目　录

第一部分 磁悬浮交通领域

484–001 超导电动悬浮系统阻尼增强方案研究.....1
484–002 单磁体失超工况下超导电磁橇的失超检测与姿态稳定控制.....2
484–003 悬架电磁减振器的非线性转矩特性及控制算法.....3
484–004 高速磁浮列车主动导向系统控制参数优化研究.....4
484–005 横风作用下超导磁浮列车明线运行气动性研究.....5
484–006 线间距对超导磁浮列车隧道交会气动特性影响.....6
484–007 永磁电动悬浮系统的悬浮导向技术研究.....7
484–008 超导磁浮列车通过隧道气动性能研究.....8
484–009 一种分隔式绕组超导直线电机动态特性研究.....9
484–010 超导磁浮剪切流特性及间隙对气动载荷影响.....10
484–011 基于内置热沉的磁浮列车电磁铁散热优化研究.....11
484–012 高温超导高速磁浮列车明线运行气动特性及对悬浮稳定性影响.....12
484–013 用于磁浮轨道不平顺高保真重构的时频域模型.....13
484–014 磁浮动力学响应预测的机器学习代理模型构建.....14
484–015 侧风条件下600kmh超导磁浮列车气动特性及抗风优化研究.....15
484–016 固定式电动悬浮动态电磁力模拟方法与实验.....16
484–017 高速磁浮起落架制动协同控制关键技术研究.....17
484–018 高速磁浮悬浮电磁铁磁极回路拓扑方案研究.....18
484–019 基于D–FINE模型的磁浮交通沿线安全监测方法.....19
484–021 基于扩散模型的磁浮轨道悬浮面重构与异常检测.....20
484–022 常导磁浮列车动态磁轨关系研究.....21
484–023 基于复矢量非奇异快速终端滑模观测器的无感测速定位方法.....22
484–024 面向电磁悬浮系统的RISE控制算法设计.....23
484–025 面向桥轨刚度突变的磁暴浮列车切换控制方法.....24
484–026 磁浮列车情感智能补偿的终端滑模悬浮控制.....25
484–027 高速磁浮列车主动导向系统的鲁棒控制研究.....26
484–028 基于孤立森林与改进LSTM的高速磁浮列车悬浮系统异常检测.....27
484–029 基于CNN–BiLSTM的悬浮系统异常检测.....28
484–030 高速磁浮列车悬浮系统固定时间预设性能控制方法.....29
484–031 数据驱动二自由度整定的自抗扰控制方法.....30
484–032 基于PSO–ADRC常导高速磁浮列车导向控制.....31

484–033 常导磁浮列车悬浮系统预测性性能评估.....32
484–034 考虑轨道不平顺和模型不确定的高速磁浮列车悬浮系统复合分层抗扰控制.....33
484–035 面向复杂攻击的磁浮车载网控系统安全评估方法.....34
484–036 低真空管道运输系统悬浮导向方案研究.....35
484–037 高隐蔽攻击下的磁浮列车网控系统安全防护研究.....36
484–038 高速磁浮列车导向系统主动抗扰控制方法研究.....37
484–039 常导磁浮车–磁–轨系统随机动态响应分析.....38
484–040 超导电动磁浮列车电磁力计算研究.....39
484–041 基于GMM的快速磁浮列车悬浮系统综合评价.....40
484–042 高速磁浮多源融合测速定位基础框架与关键技术.....41
484–043 悬浮电磁铁有限元级精度实时电磁力解算方法.....42
484–044 磁浮列车多起落架高精度同步收放控制方法.....43
484–045 线间距对高速磁浮列车明线交会气动性能的影响.....44
484–046 耦合激励下的超导钉扎磁浮缩比车动力学分析.....45
484–047 超导电动磁浮悬浮架研究现状及关键技术.....46
484–048 一种新型管轨–磁浮运输系统.....47
484–049 基于超声导波的磁浮列车结构健康监测方法.....48
484–050 超导电动磁浮列车超导磁体动态耐久试验方法与平台研究.....49
484–051 准定常气动荷载下高速磁浮列车–轨道梁耦合动力学分析.....50
484–052 超导电动磁浮列车空气动力制动装置研制.....51
484–053 永磁–电磁混合悬浮电磁铁设计与性能研究.....52
484–054 高速磁浮轨道线形静态测量.....54
484–055 超导电动磁浮列车超导磁体随机振动特性研究.....55
484–056 磁浮列车间隙传感器自编码故障诊断方法.....56
484–057 基于迭代学习的悬浮自抗扰控制算法研究.....57
484–058 轨道支撑件对超导电动悬浮系统平稳性的影响.....58
484–059 基于混沌粒子群优化算法的高速列车二系悬架主动控制系统研究.....59
484–060 超导电动悬浮8字形轨道线圈结构差异对电磁性能的影响研究.....60
484–061 高速磁浮列车设备舱散热特性数值模拟分析.....61
484–062 基于几何特征修正的超导磁体磁场建模方法.....62
484–063 超导电动悬浮8字形轨道线圈非对称程度差异对电磁性能的影响研究.....63
484–064 高速磁浮车–磁–轨参数敏感度研究.....64
484–065大跨度高速磁浮预应力混凝土连续梁桥设计.....65
484–066 时速600公里超导电动磁浮系统实时仿真研究.....66
484–067 永磁悬浮直线动力学性能分析.....67
484–068 基于数据驱动优化的高速磁浮悬浮控制研究.....68
484–069 基于预测扰动增广模型的常导高速磁浮悬浮系统协同预测控制.....69
484–070 集成化悬浮控制器散热系统优化设计.....70
484–071 超导电动悬浮车辆技术研究.....71
484–072 基于数物融合的高速磁浮车轨耦合试验技术研究.....72

484–073 高速磁浮车载电网锂电池充电控制器设计.....73
484–074 城市风场对磁浮列车气动效应的影响.....74
484–075 基于多类别偏差叠加的高速磁浮轨道不平顺分级评价.....75
484–076 高速磁浮车体疲劳强度及局部校核分析.....76
484–077 直线电机智能显式模型预测位置控制.....77
484–078 基于陷波预处理的直线永磁同步电机谐波抑制.....78
484–079 适用于超导电动磁浮列车的双层端墙结构.....79
484–080 高速磁浮梁轨温度力伸缩特性研究.....80
484–081 面向高速磁浮的车载电力线通信信道建模研究.....81
484–082 隧道通过气动荷载对EDS磁浮列车动力学影响.....82
484–083 横风环境下常导高速磁浮列车气动特性及动力学响应分析.....83
484–084 600kmh磁浮准零刚度悬挂设计与仿真分析.....84
484–085 新型混合悬浮电磁铁温升效应研究.....85
484–086 考虑电机激扰的永磁电动磁浮垂向稳定性分析与调控.....86
484–087 面向管轨物流系统的永磁–电磁混合悬浮系统研究.....87
484–088 湍流横风风场下桥上高速磁浮列车气动特性研究.....88
484–089 基于移动悬浮平台的桥上磁浮列车气动特性风洞试验研究.....89
484–090 永磁悬浮直线动力学性能分析.....90
484–091 基于径向基神经网络的单侧悬浮系统协同控制.....91
484–092 600km/h 磁浮列车大风声屏障耦合气动突变.....92
484–093 磁浮列车二自由度悬浮的深度强化学习控制.....93
484–094 钉扎磁浮低成本磁轨驱动技术.....94
484–095 磁浮列车悬浮系统扰动观测与协调控制研究.....95
484–096 三维流动对真空管道系统临界效应的影响机制研究.....96
484–097 基于强化学习的磁浮车桥系统悬浮控制研究.....97
484–098 超高速磁浮牵引系统调制技术研究.....98
484–099 支撑工况超导电动悬浮列车辅助轮参数优化.....99
484–100 超导 EDS 系统动态稳定性与运动安全边界研究.....100
484–101 永磁电磁混合悬浮平台设计与解耦控制研究.....101
484–102 磁浮车桥耦合系统典型柔性特征建模与稳定性研究.....102
484–103 大湾区广深港线高温超导磁浮交通运控系统设计.....103
484–104 大湾区广深港线高温超导磁浮交通通信系统设计.....109
484–105 磁滞效应对中低速磁浮悬浮系统振动影响研究.....114
484–106 超导电动悬浮列车垂向动力学特性研究.....115
484–107 车载高温超导磁体研制与试验研究进展.....116
484–108 车体过电压对轴端速度传感器的影响机理.....117
484–109 超导电动悬浮谐波磁场静态等效模拟.....118
484–110 基于改进Huber 卡尔曼波的列车定位方法研究.....119
484–111 中低速磁浮梁轨一体化简支精梁车桥耦合振动分析.....120
484–112 隧道中隔墙对提速中低速磁浮列车的气动影响.....121

484–113 基于小波降噪处理的高速磁浮轨道不平顺构建.....122
484–114 高温超导钉扎磁浮关键技术研究进展.....123
484–115 基于新息自适应窗口和双阈值异常值拒绝的鲁棒卡尔曼读波算法.....124
484–116 电动悬浮车载低温容器结构动力学特性分析.....125
484–117 高温超导电动磁浮轨道检测系统研究.....126
484–118 高温超导线圈接触电阻的压力与材料依赖性.....127
484–119 高速磁浮直线电机参数辨识与鲁棒预测控制.....128
484–120 超导磁体局部失超数值模拟研究.....129
484–121 超导电动悬浮阻尼特性研究.....130
484–122 基于ANN的磁浮车载高速电机谐波预测研究.....131
484–123 励磁方式与次级材料对涡流制动性能的影响研究.....132
484–124 基于扰动观测的LSLSM无模型预测电流控制.....133
484–125 驻波磁通泵电磁特性与充磁性能研究.....134
484–127 磁浮列车悬浮系统微小故障自愈控制研究.....135
484–128 磁浮列车车下设备吊耳设计与仿真对比研究.....136
484–129 高速磁浮轨道不平顺数据驱动反演方法研究.....137
484–131 适配于高速铁路供电网络的超导磁储能仿真优化研究.....138
484–132 基于AI的高速磁悬浮列车悬浮系统可靠性研究.....139
484–133 高温超导磁县浮垂向阻尼动态识别系统设计与实验测试.....140
484–134 基于BIM与NSGAII的磁浮轨道梁施工期动力参数多目标优化.....141
484–135 面向600km/h超导磁浮列车的新型起落架系统.....142
484–136 基于SA–WGAN–GP的超导悬浮器典型状态识别.....143
484–137 因果正则化LSTM的悬浮斩波器IGBT寿命预测.....144
484–139 高速磁浮车载电网动态特性仿真.....145
484–140 基于DDPG–BFB的悬浮间隙控制方法.....146
484–141 基于分数阶滑模控制的高速磁浮车两点悬浮控制.....147
484–142 轨道不平顺下磁浮类免疫PID控制性能研究.....148
484–143 多态耦合轨道交通动模试验平台联调联试策略与方法.....149
484–144 高温超导块材阵列磁屏蔽特性研究.....150
484–145 新型梁轨一体化中低速磁浮轨道梁的动力学性能仿真分析.....151
484–146 基于改进PSO的磁浮列车滑模控制器参数优化方法研究.....152
484–147 三维低真空管道磁浮列车激波抑制方法研究.....153
484–148 基于气动–动力学耦合的600kmh高速磁悬浮列车横风运行安全域研究.....154
484–149 双时滞反馈控制下磁浮车–轨耦合系统稳定性分析.....156
484–150 基于DPIM的高速磁浮列车悬浮系统随机响应分析.....157
484–151 基于虚拟轨道的悬浮控制方法.....158
484–152 常导高速磁浮直线同步电机电流解耦控制研究.....159
484–153 电动磁浮系统中直线电机的位移控制方法研究.....160
484–154 胶轮与悬浮走行融合的电动磁浮列车动态仿真.....162
484–155 基于永磁电动悬浮模糊PID控制研究.....163

484-156基于动态解码U-Net的磁浮车辆悬浮架响应重构方法.....164
484-157 磁浮列车导向系统Koopman预测控制研究.....165
484-158 基于EEMD的中低速磁浮轨道不平顺波长分析.....166
484-159 悬浮电磁铁磁极横向错位布置对电磁力的影响.....167
484-160 超导电动磁浮系统小间隙运行的动力学性能及工程经济性评估.....168
484-161 磁悬浮技术与振动控制领域研究进展、技术瓶颈及发展趋势综述.....169
484-162 超导磁浮交通系统电磁环境研究.....170
484-163 基于CNN-BiLSTM-CrossAttention预测MPC的磁浮系统控制研究.....171
484-164 磁浮列车迭代学习轨道接缝波动抑制方法.....172
484-165 基于前馈神经网络的高速磁浮车体响应修正方法.....173
484-166 快速磁浮钢梁-混凝土梁开环频响相似性分析.....174
484-167 高速磁浮道岔缓和曲线参数动力学适配研究.....175
484-168 高速磁浮道岔侧线线形动力激励特性研究.....176
484-169 干线运营下高温超导电动磁浮运输能力研究.....177
484-170 线间距对高速磁浮列车交会时气动与动力学响应的影响分析.....178

第二部分 磁悬浮轴承领域

485-001 高速磁悬浮电机轴承结构设计对散热的影响.....179
485-002 主动磁悬浮轴承结构设计研究综述.....180
485-003 一种多环靶盘式磁轴承建模与径向稳定性分析.....181
485-004 磁悬浮转子电磁激振器静态力参数辨识方法.....182
485-005 不平衡磁拉力下磁悬浮转子动力学特性研究.....183
485-006 磁悬浮分子泵不平衡交叉解耦控制研究.....184
485-007 电磁悬浮系统辨识与鲁棒MPC控制研究.....185
485-008 基于Bi-LSTM的磁悬浮转子系统动力学数据驱动建模方法.....186
485-009 基于LMI的磁悬浮轴承系统渐近预测控制.....187
485-010 考虑不确定性的磁悬浮轴承功放板振动响应研究.....188
485-011 环形永磁电动悬浮轴承悬浮力与损耗特性分析.....189
485-012 基于无模型无差拍的无轴承电机电流控制方法.....190
485-013 五自由度悬浮无轴承开关磁阻发电机机理分析.....191
485-014 基于改进重复控制-ESO的AMB振动抑制.....192
485-015 传统五自由度主动磁轴承与靶盘式主动磁轴承结构对比分析.....193
485-016 磁悬浮飞轮不平衡与传感器谐波振动抑制研究.....194
485-017 磁悬浮转子系统不平衡振动的有限时间复合控制.....195
485-018 基于有限集与无偏移的磁轴承双层预测控制.....196
485-019 余热发电机用主动磁悬浮轴承试验研究.....197
485-020 基于差动原理的四极磁轴承自感测技术研究.....198
485-021 轴向电磁轴承等效磁路建模与涡流损耗分析.....199
485-022 磁悬浮轴承无转速传感器解耦控制研究.....200

485-023 磁悬浮轴承变偏置电流下的性能研究.....201
485-024 多极独立磁轴承电流分配与节能控制策略研究.....202
485-026 电磁轴承-柔性转子系统的建模与控制研究.....203
485-027 基于多频激励的磁悬浮轴承在线辨识方法.....204
485-028 基于ADRC-IANF的磁轴承转子振动抑制方法.....205
485-029 计及时滞及扰动的混合磁轴承延迟补偿型滑模控制.....206
485-030 基于等价输入干扰的磁浮轴承不平衡补偿控制.....207
485-031 不同偏置电流作用下磁轴承参数鲁棒性分析.....208
485-032 基于LGC的磁轴承系统自适应反演滑模控制.....209
485-033 基于逆向Bertotti-IPl的AMB电磁损耗滞后前馈补偿控制.....210
485-034 基于高斯过程的飞轮电池学习模型预测控制.....211
485-035 考虑复杂扰动的车载飞轮电池多模式自适应控制策略.....212
485-036 路况干扰下车载飞轮电池自适应控制策略.....213
485-037 基于多物理场耦合函数的车载飞轮电池控制策略.....214
485-038 基于工况的车载飞轮电机偏心预测模型策略.....215
485-039 温度影响下磁悬浮轴承铁损机理与仿真分析.....216
485-040 基于轴向定子扩轭的主被动磁轴承设计与优化.....217
485-041 隔离型磁轴承磁力特性分析.....218
485-042 同心双环轴向磁轴承电流分配策略研究.....219
485-043 基于分数阶建模的实心磁轴承改进型ESO振动抑制.....220
485-044 五自由度磁悬浮轴承系统μ综合控制方法研究.....221
485-045 基于LQR阻尼引导MPC的磁轴承转子系统振动控制.....222
485-046 基于扩张状态观测器的磁悬浮轴承反步控制.....223
485-047 基于BP神经网络PID的涡旋压缩机轨迹控制.....224
485-048 高转速场景下磁悬浮轴承系统的同频观测算法及其离散化方法研究.....225
485-049基于辅助槽调制函数的无轴承磁通切换电机多目标优化方法.....226
485-050 基于多信息融合的磁悬浮轴承开关器件开路故障容错控制策略研究.....227
485-052 磁轴承自抗扰与迭代学习复合振动控制.....228
485-053 电磁轴承软开关三电平开关功率放大器的研究.....229
485-054 高负载多极独立磁力轴承拓扑及冗余容错研究.....230
485-055 多对极径向磁轴承拓扑设计及控制策略研究.....231
485-056 多极独立磁轴承功放拓扑及其控制策略研究.....232
485-057 人工肾脏泵用磁悬浮轴承的抗扰动控制研究.....233
485-058 空压机应用混合式磁悬浮轴承可行性分析.....234
485-059 磁悬浮轴承不对称偏置电流分配策略.....235
485-060基于端口哈密顿神经网络建模的磁轴承IDA-PBC控制研究.....236
485-061 SiC功放驱动下磁轴承负载变化的端部过电压自适应抑制方法.....237
485-062 磁悬浮双转子系统的过模态振动抑制研究.....238
485-063 基于扰动观测的轴向磁轴承低功耗控制研究.....239
485-064 重力效应下不平衡Jeffcott转子的多脉冲混沌动力学研究.....240

485–065 基于自抗扰控制的磁悬浮动量球转速控制研究.....241
485–066 磁悬浮心脏泵磁力耦合特性及抗扰控制研究.....242
485–067 计及材料温–频特性的磁轴承铁耗解析计算方法.....243
485–068 基于多频变角度搜索的AMB不平衡振动抑制.....244

第三部分 磁悬浮新技术及交叉领域

486–001 自主转向式直线电机设计方法研究.....245
486–002 恒力磁浮低宽频隔振系统动力学设计与调控方法.....246
486–003 基于磁场调控的准零刚度抗磁悬浮加速度计.....247
486–004 磁悬浮电机低损耗断电补偿控制方法.....248
486–005 基于旋转磁场下微型机器人的运动特性研究.....249
486–006 基于LQR控制策略的三自由度高温超导磁浮隔振台.....250
486–007 高速电磁橇逆向射流气动减阻研究.....251
486–008 基于BP神经网络的超导电动磁浮列车电磁力计算方法.....253
486–009 数据驱动的Stewart平台时序卷积网络建模方法.....254
486–010 基于高阶代理模型的大气隙电磁铁结构优化.....255
486–011 基于数据的磁悬挂天平轴向系统稳定裕度估计.....256
486–012 基于物理信息高斯过程回归的磁悬挂天平系统电磁力混合建模方法.....257
486–013 基于迭代学习的磁悬挂天平干扰补偿控制算法.....258
486–014 超高速永磁同步直线电机牵引力与法向力分析.....259
486–015 LSM无位置传感器矢量控制整体性能分析.....260
486–016 电磁弹射技术综述.....261
486–017 超高速线圈式永磁涡流制动性能研究.....262
486–018 抗磁悬浮隔振系统多自由度刚度协同调控方法.....263
486–019 自感式位移传感器动态阻抗建模.....264
486–020 基于霍尔阵列的磁悬浮平面电机设计.....267
486–022 磁悬浮飞轮储能技术在火电调频中的应用研究.....268
486–023 绕组分段式磁力驱动系统电磁耦合特性研究.....269
486–024 具有重力补偿功能的平板型音圈电机研究.....270
486–025 多源公差驱动的无铁心永磁直线电机力性能退化评估方法.....271
486–026 磁悬浮微动台用变磁阻作动器动态磁滞建模研究.....272
486–027 用于磁悬浮隔振系统的集成式多自由度音圈电机设计.....273
486–028 一种直线驱动用新型永磁导轨研究.....274
486–029 磁悬浮直驱无油涡旋压缩机模糊滑模控制器设计.....275
486–030 主动电磁悬架用圆筒型永磁直线电机研究.....277
486–031 磁悬浮隔振台建模与鲁棒控制.....278
486–032 三自由度洛伦兹平面电机冷却结构设计与分析.....279
486–033 电磁悬架用圆筒型直线电机涡流效应分析.....280
486–034 基于H_∞控制的电磁式混合型动力吸振器系统设计研究.....281

486–035 电磁悬浮系统电容老化非侵入监测方法.....282
486–036 超高速磁悬浮碳纤维飞轮储能系统.....283
486–037 基于PCA–IR的悬浮斩波器开关电路老化预测.....284
486–038 立式磁悬浮系统保护轴承失效机理研究.....285
486–039 保护间隙对磁悬浮系统保护轴承热一力响应特性研究.....286
486–040 混合式准零刚度隔振器被动隔振特性研究.....287
486–042 磁悬浮隔振系统：机理与建模综述.....288
486–043 磁悬浮转子宽频段振动在线自适应控制方法.....289
486–044 高温超导磁浮V型永磁轨道拓扑优化研究.....290
486–045 基于PINN–PDEM的磁浮车桥随机响应分析.....291
486–046 基于磁悬浮平面电机的六自由度空间磁场测量方法研究.....292
486–047 磁悬浮隔振系统电磁俘能器设计及特性分析.....294
486–048 一种共励磁开关磁阻电机的控制与实现.....295
486–049 磁悬浮轨道电机绝缘树脂材料的制备与性能研究.....296
486–050 基于阵列传感器的漏磁检测技术研究.....297
486–051 磁束缚悬浮平台非线性补偿运动控制算法研究.....298
486–052 磁悬浮无油涡旋压缩机喘振分析与抑制.....299
486–053 基于MGI–ESO的磁悬浮电机无感控制研究.....300
486–054 磁悬浮电机互感作用建模及抑制方法.....301
486–055 考虑空间参数波动的PMLSM自适应控制方法.....302
486–056 紧凑型大承载准零刚度隔振器特性研究.....303
486–057 两级电磁阻尼器的电磁力优化方法.....304
486–058 基于改进麻雀算法的直线感应电机多参数估计.....305
486–059 磁悬浮驱动泵用电涡流位移传感器研究.....306
486–060 改进分数阶自抗扰控制的磁束缚悬浮平台研究.....307
486–061 大量程位移传感器检测方法研究.....308
486–062 Pressure Shielding and Vortex Amplification of a 600 km/h Maglev Train Passing Tunnel Portals.....309
486–063 基于离散时间模型的分段开绕组直线电机参数辨识方法研究.....310
486–064 涡流联轴器传动系统动态响应特性研究.....311
486–065 基于扰动观测器的MSCMG磁力卸载方法.....312
486–066 摆线磁齿轮磁力设计与测试分析.....313
486–067 损耗特征下铁磁材料动态分数阶建模与磁滞回线解析.....314
486–068 考虑热–力–磁耦合的AINiCo8半硬磁材料性能研究.....315

文章编号：484-001

超导电动悬浮系统阻尼增强方案研究

汤澳其[1]，谭亦秋[1]，李恒达[1]，朱鹏翔[1]，周丹峰[1]，李杰[1]
(1.国防科技大学 智能科学学院，湖南 长沙 410073)

1 引言

由于无主动控制、自稳定、间隙大、自重小等优点，超导电动悬浮系统在超高速磁浮交通、磁悬浮滑橇系统、电磁弹射、磁悬浮辅助航天发射系统等领域有着广泛的应用[1-2]。但是超导电动悬浮系统的低阻尼特性会导致其在运行过程中出现振动甚至是失稳，因此低阻尼问题一直是超导电动悬浮系统的关键问题[3]。基于此提出在系统中引入二次悬挂系统以增强系统的垂向阻尼，抑制由于低阻尼而导致的振动。

2 正　文

2.1 超导电动悬浮系统建模及分析

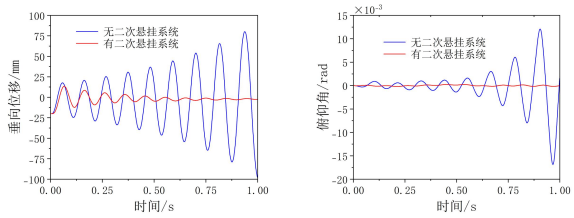
建立超导电动悬浮系统场-电路-运动耦合模型。通过虚功位移法和互感梯度计算系统动子所受到的三维电磁力。并根据超导电动悬浮系统的动力学模型分析系统在运行过程中的动力学特性以及阻尼特性。

2.2 基于二次悬挂系统的阻尼增强方案

由超导电动悬浮系统的阻尼特性可知，超导电动悬浮系统的垂向阻尼随着系统运行速度的增加而减小，甚至在高速下会呈现负阻尼的特性。为增强超导电动悬浮系统的垂向阻尼，在系统中引入二次悬挂系统，并建立引入二次悬挂系统后的系统动力学模型。

2.3 实验与验证

构建引入二次悬挂后的超导电动悬浮系统的联合动力学仿真模型，对加入二次悬挂前后的系统垂向位移以及俯仰角进行仿真实验。设置系统初始悬浮高度为 20mm，运行速度为 30m/s，则在该工况下超导电动悬浮系统在有无二次悬挂下的系统垂向位移和俯仰角如图 1 所示，可以看出加入二次悬挂系统后可有效抑制系统的垂向位移与俯仰角，增强系统的垂向阻尼。



a 垂向位移　　**b 俯仰角**

1 有无二次悬挂系统下动力学响应

3 结　论

本文提出了一种基于二次悬挂系统的超导电动悬浮系统阻尼增强方案，为解决超导电动悬浮系统中因阻尼不足而引起的垂向振动问题提供了有效途径。该方案可有效的增强超导电动悬浮系统的垂向阻尼性能，从而抑制了车体在运行过程中可能出现的垂向振荡现象。通过仿真验证了该方案可有效降低垂向振动的幅值并加速振动衰减过程，增强系统的垂向阻尼特性。

参考文献（References）：

[1] Zhu Pengxiang, Li Jie, Chen Qiang, et al. A Suspension Damping Enhancement Method Based on Permanent Magnet Damping Conductive Plate for Superconducting Maglev Sled[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2025,Vol.61(1): 1-9.

[2] Tan Yiqiu, Zhou Danfeng, Li Jie, et al. Dynamic Simulation Analysis of Null-flux Coil Superconducting Electrodynamic Suspension System[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles,2024,Vol.9(1): 1-12.

[3] 周丹峰,朱鹏翔,谭亦秋,等. 超导电动悬浮系统的垂向阻尼及其增强措施[J]. 国防科技大学学报,2025,47(5): 165-174.

收稿日期：2026 年 02 月 05 日.

基金项目：无.

作者简介：汤澳其(2002－)，男，河南商丘人，硕士研究生，主要从事超导电动悬浮系统动力学研究；通信方式：E-mail: tangaoqi24@nudt.edu.cn、联系电话：18670321159

文章编号：484-002

单磁体失超工况下超导电磁橇的失超检测与姿态稳定控制

彭雍[1]，周丹峰[1]，李杰[1]，谭亦秋[1]，李恒达[1]，朱鹏翔[1]
(1. 国防科技大学 智能科学学院，湖南 长沙 410073)

1□引言

超导电磁橇车凭借高加速度、高速运行特性，在先进交通与试验装备领域具有重要应用价值，超导磁体作为其核心部件，受临界特性约束易发生失超现象。磁体失超会打破系统力平衡，引发多自由度耦合失稳，严重威胁运行安全[1-3]。本文建立超导电磁橇车多体动力学模型，揭示失超激励下的系统失稳机制，提出快速失超检测方法与姿态稳定控制策略，为超导磁浮运载系统容错控制提供理论与工程参考。

2□正　文

2.1□超导电动悬浮系统建模及分析

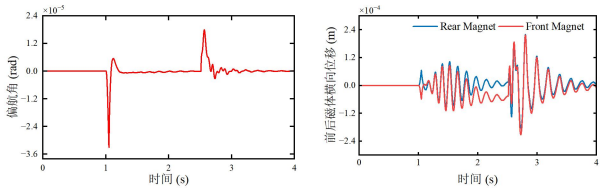
构建由车体、四个超导磁体和轨道线圈阵列组成的超导电磁橇车系统动力学模型，建立包含垂向、横向及三自由度姿态的多体动力学模型。以橇车系统主要参数为基础设置仿真工况，设定左后磁体失超并结合国防科技大学 400 米磁悬浮试验线的实测数据，分析失超后系统动力学响应。

2.2□基于 DTW 距离的超导磁体失超检测方法与实验验证

分析超导磁体失超后的端电压信号特征，发现失超前电压信号具有速度调制的周期性，失超后出现高幅值正弦尖峰与非周期性特征。针对传统阈值检测法误报率高、欧式距离匹配无法适配时序形变的问题，引入动态时间规整（DTW）算法，利用其非线性对齐特性实现信号匹配。

2.3□实验与验证

基于失超检测结果，提出以实时偏航角为反馈的横向力补偿姿态控制策略，采用自抗扰控制（ADRC）算法，通过扩张状态观测器（ESO）实时估计系统总扰动，设计线性状态误差反馈控制律，调节未失超侧磁体推力以生成偏航恢复力矩，实现横向力失衡补偿。在失超发生 0.3s 后对橇车实施控制策略，通过动力学仿真验证控制效果。



a 偏航角　　b 前后磁体横向位移

1□加入控制后橇车偏航角和前后磁体横向位移响应

3□结　论

本文针对超导电磁橇车单磁体失超工况下的动力学失稳问题，完成了系统建模、失超检测与姿态控制的系列研究。建立的多体动力学模型揭示了单磁体失超引发的力场非对称分布是系统耦合失稳的核心原因；提出的基于 DTW 的端电压模板匹配方法可在 0.3s 内精准检测失超故障；设计的横向力补偿控制策略实现了显著的姿态稳定效果。

参考文献（References）：

[1] Zhu Pengxiang, Li Jie, Chen Qiang, et al. A Suspension Damping Enhancement Method Based on Permanent Magnet Damping Conductive Plate for Superconducting Maglev Sled[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2025,Vol.61(1): 1-9.

[2] Tan Yiqiu, Zhou Danfeng, Li Jie, et al. Dynamic Simulation Analysis of Null-flux Coil Superconducting Electrodynamic Suspension System[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles,2024,Vol.9(1): 1-12.

[3] 周丹峰,朱鹏翔,谭亦秋,等. 超导电动悬浮系统的垂向阻尼及其增强措施[J]. 国防科技大学学报,2025,47(5): 165-174.

收稿日期：2026 年 02 月 07 日.

基金项目：无

作者简介：彭雍(2001－)，男，湖南邵阳人，硕士研究生，主要从事超导电动悬浮系统研究；通信方式：E-mail: pengyong24@nudt.edu.cn、联系电话：19330898872

文章编号：484–003

悬架电磁减振器的非线性转矩特性及控制算法

陈志文[1]，张弘毅[1*]，陈政清[1]，牛华伟[1]，曹先腾[1]
(1. 湖南大学 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室，湖南省 长沙市 410082)

1 引言

车辆在复杂路面行驶过程中不可避免地会受到来自不平整路面的激励，这些激励不仅会显著降低车辆的行驶平顺性和操纵稳定性，还可能对车载精密仪器、控制系统以及整车结构造成不利影响[1]。因此，如何在复杂激励条件下提升悬架系统的振动抑制能力，已成为车辆动力学与振动控制领域的重要研究方向[2]。针对上述问题，本文提出了一种基于敏感度加权的离散阻抗空间非线性映射优化算法，并构建了一种可控电磁阻尼半主动悬架系统。该方法通过电机本构模型的解析逆变换，将均匀的转矩需求映射至非线性分布的电阻空间，并利用敏感度加权策略强化低阻值敏感区的误差约束，从而有效提升离散阻抗组合对连续阻尼需求的逼近精度。在此基础上，通过冗余覆盖策略在离散阻抗空间内进行非线性优化，利用 32 组离散组合实现对 16 个目标阻抗点的最优匹配，从而突破了受限硬件资源条件下的线性化控制瓶颈.

2 研究内容

2.1 可控电磁阻尼器设计

本研究首先建立了电磁阻尼器(力矩电机)二维电磁场本构模型，推导了非线性阻尼力矩与电路电阻关系的解析表达式。在此基础上，系统分析了结构参数和电气参数对非线性转矩特性的影响，如图 1 所示.

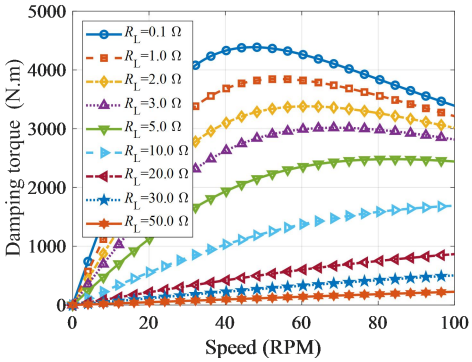
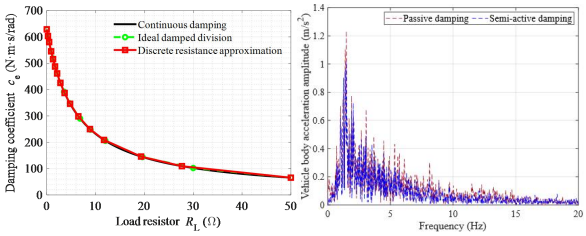


图 1□不同负载电阻下电磁转矩随转速的变化关系

2.2 基于敏感度加权的离散阻抗空间非线性映射优化算法

图 2(a)展示了连续阻尼曲线、16 档理想阻尼以及 16 档离散阻尼的对比。可以看到，采用 5 个基础电阻组合形成的 16 档离散阻尼能够很好地逼近理想连续阻尼分布。结果表明，基于有限基础电阻的组合策略能够实现对连续阻尼的高精度离散逼近，为半主动控制的硬件实现提供可靠依据。图 2(b)所示，在随机路况下，被动悬架的车身加速度 RMS 为 1.25m/s²，半主动悬架的车身加速度 RMS 为 1.04m/s²，降低了 16.8%。



a 离散阻抗逼近算法的阻尼系数　b 车身 RMS 实验测试

图 2 控制方法与试验测试

3 结　论

研究提出了基于敏感度加权离散阻抗优化算法的电磁阻尼半主动悬架系统，实现阻尼力连续可控调节。最后试验验证了所提出的电磁阻尼半主动悬架可以大幅提升驾乘人员的舒适性体验和车辆的操纵稳定性.

参考文献（References）：

[1] Qiu. W, Li. C, L. Qian et al. Design and analysis of a pseudo-active suspension. Mechanical Systems and Signal Processing. 2025. 22 (9) 112502.

[2] Lee. D, Jin. S, Rhee. E et al. Practical damper velocity estimation for semi-active suspension control. International Journal of Automotive Technology .2021.22 (11) 499-508.

收稿日期：2026 年 03 月 12 日.

基金项目：特种车辆悬挂系统磁阻尼减振的非线性特性与控制理论研究（U2141242）.

作者简介：陈志文(1998－)，男，河南省平顶山市，博士研究生，主要从事磁阻尼减振控制的研究；通信方式：E-mail: czwdlpshx@hnu.edu.cn

文章编号：484-004

高速磁浮列车主动导向系统控制参数优化研究

赵泽时[1, 2]，王志强[1, 2]，李晓龙[1, 2]，龙志强[1, 2]

(1.国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073；2.湖南省电磁悬浮与推进技术重点实验室，湖南省长沙市 410073)

1 引言

高速磁浮列车导向系统的控制性能直接影响列车过弯适应性与复杂扰动下的稳定性[1]，本文以搭接结构导向系统为研究对象，在梳理现有导向控制技术[2]研究现状的基础上，针对现有控制器参数多依赖经验设定、多扰动工况适应性不足等问题，提出基于线性二次型最优控制（LQR）设计标称控制器，旨在通过算法优化改善导向系统的抗干扰能力与动态响应性能。

2主动导向系统建模与分析

首先建立了导向单元受力模型，推导导向力公式（1）。

$$F_d=F_{d1}-F_{d2}=mg\sin\theta-m\frac{v^2}{r_m}\cos\theta+F_d \quad (1)$$

明确了了离心力、横坡角、干扰力等对导向力的影响。

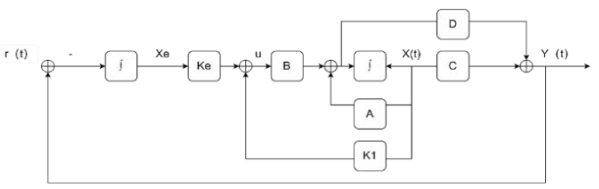
然后，以同济大学高速磁浮试验线路为模拟对象，发现51.6 km/h为临界过弯速度，低于该速度时牵连惯性力指向曲线内侧，高于时指向外侧，不同速度下导向间隙与电流呈现反向变化规律；基于计算流体力学分析横风干扰下的气动特性，车头为最大正压区，车尾形成负压区，车辆顶部存在升力作用。

3控制器设计与优化

通过数学建模基于搭接结构建立导向系统非线性模型，采用粒子群优化算法优化Q和R矩阵关键参数，构造目标函数（2）。

$$J_{rar}=0.9T_{ddd}+0.1V_{rra} \quad (2)$$

导向控制系统结构框图如图一。



图一 导向控制系统结构框图

4仿真结果与分析

通过在MATLAB/Simulink平台搭建仿真模型，模拟列车以60.0、90.0、120.0 km/h等速度过弯及1、2、3 kN横风干扰工况，对比优化前后系统响应。由仿真结果可以看出，优化后导向间隙波动幅值分别减小9.46%（1 kN）、9.70%（2 kN）、11.82%（3 kN），间隙恢复速度显著提升，系统输入稳定值略有降低；同时分析涡流效应影响，发现高速下导向力最大损失达36.89%。

本文基于高速磁浮列车导向系统搭接结构，完成了标称控制器设计与参数优化，有效改善了列车在不同速度过弯及横风干扰下的导向系统稳定性与适应性，验证了优化算法的有效性与可靠性。

参考文献（references）：

[1]王志强,郭威鹏,桑梓梁,等.高速磁浮列车导向系统的优化控制方法[J].西南交通大学学报：2025,第60卷,第四期:pp.833-841,864.

[2]龙志强,窦峰山,王志强,等.高速磁浮悬浮导向控制技术现状及展望[J].前瞻科技：2023，第二卷，第四期：pp.78-88

收稿日期： 2026年03月25日.

基金项目：湖南省重点研发计划（课题号：2024JK2038）国家自然科学基金（项目资助号：52402456）；

作者简介：赵泽时(2001－)，男，湖南省长沙市，在读硕士，电磁悬浮与推进；通信方式：15751008025@163.com、联系电话:15751008025

文章编号：484-005

横风作用下超导磁浮列车明线运行气动性研究

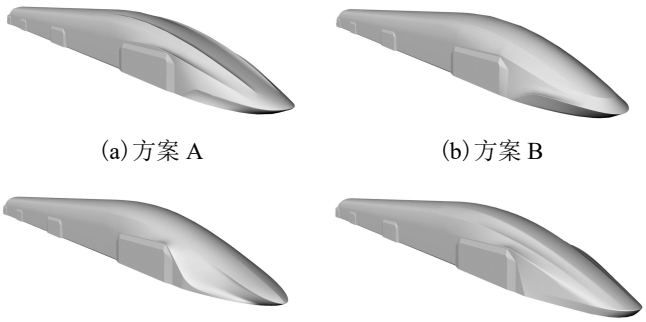
牛超俊，张雷
中南大学 交通运输工程学院，湖南省 长沙市 410075

1 引言

磁浮列车由于没有轮轨接触，其气动阻力在高速行驶时占据了主导地位，特别是列车以 600 km/h 速度在明线上高速运行时，空气阻力几乎占据了总阻力的 90%。同时，其引发的横风效应、会车效应和隧道效应等一系列的空气动力学问题也愈发显著，鉴于此，亟需针对高速磁浮列车的空气动力学关键问题展开深入研究。根据前人的研究，对于时速 600km 磁浮列车气动特性的研究大多集中于常导式磁浮列车，而对于超导磁浮列车的相关研究则相对匮乏。本文采用数值仿真与动模型试验相结合的方法，探究超导电动磁悬浮列车在不同横风速度和磁悬浮列车运行速度下的气动力及气动力系数，研究目的为高温超导磁浮列车气动性能评估提供数据和试验支撑。

2 列车明线运行气动性能分析

本文围绕高速磁悬浮列车明线单车气动性能展开分析，先明确计算分为明线无横风、有横风两类，设置 3 车与 8 车编组、多速度、多横风/侧滑角等总计 42 个工况，采用头车+中间车+尾车模型、A、B、C、D 四种头型方案，运用非定常 DDES 与 SST K-Ω湍流模型、6000 万切割体网格开展数值模拟；无横风时，列车阻力系数随速度基本稳定，方案 A、D 较 B、C 减阻约 8%，头车升力为负、中间及尾车为正，方案 A 综合气动性能最优；8 车编组在横风作用下，头车阻力随横风增大而减小、中间与尾车阻力上升，头车侧向力与侧滚力矩受横风影响最显著，尾车升力、点头及摇头力矩变化剧烈，气动性能随横风与车速提升而恶化，且横风影响更显著。



(a)方案 A　(b)方案 B　(c)方案 C　(d)方案 D

高速磁浮列车设计方案

3 结论

（1）对于超导电动磁悬浮列车的不同方案，综合考虑磁悬浮列车在明线运行时的气动阻力和气动升力，认为磁悬浮列车方案 A 的气动性能最优。

（2）当磁悬浮列车运行速度为 160km/h、横风速度为 33m/s 时，头车侧滚力矩系数为-1.6。

（3）磁悬浮列车的气动性能恶化程度和横风速度有关，随着横风速度的增加，磁悬浮列车气动性能恶化程度加剧。相同横风速度下，随着磁悬浮列车运行速度的增加，磁悬浮列车的气动性能恶化程度加剧。

参考文献 (References)：

[1] 徐飞,罗世辉,邓自刚.磁悬浮轨道交通关键技术及全速度域应用研究[J].铁道学报,2019,41(3):40-49.

[2] 田红旗,张雷,王田天,等.面向行车平稳性的高速磁浮列车气动设计[J].前瞻科技,2023,2(04):70-77.

收稿日期：2026 年 04 月 08 日.

基金项目：国家重点研发计划子任务（2022YFB4301201-02）； 国家自然科学基金面上项目(52372369).

作者简介：牛超俊（2002-），男，河南省周口市，硕士研究生，主要从事列车空气动力学的研究；
E-mail:2630651699@qq.com 联系电话：18684856068

文章编号：484–006

线间距对超导磁浮列车隧道交会气动特性影响

潘神功，张雷
(中南大学 交通运输工程学院，湖南省 长沙市 410083)

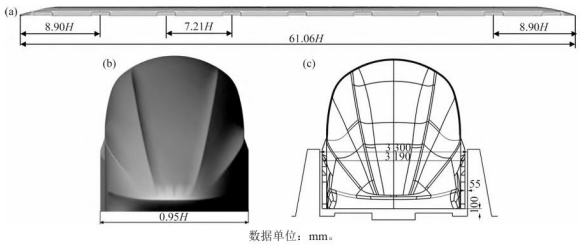
1 引言

在隧道密闭环境中，2 列超导磁浮列车以相对速度 1200 km/h 会车时，将诱发剧烈的空气动力学效应，严重影响乘客舒适性与健康安全[1]。为此，本文采用数值仿真与动模型试验相结合的方法对隧道线间距对超导磁浮列车隧道交会耦合气动特性的影响进行研究，旨在为超导高速磁浮列车在隧道安全运行提供理论依据。

2 正文

2.1 几何模型

研究采用的超导磁浮列车模型是比例为 1:1 的实际 8 车编组列车模型，并保留了影响气动性能的风挡、悬浮装置等关键部件，见图 1。该超导磁浮列车高 H=3.33 m，以此为特征高度，头车和尾车的车长为 8.90H，中间车车长为 7.21H，8 车编组的超导磁浮列车车长为 61.06H，车宽为 0.95H，相关参数分别见图 1(a)和图 1(b)。隧道断面面积定为 84 m^2，长度为 415 m。采用 5.1、5.4、5.6、5.8 m 共 4 种线间距，分析其对车/隧耦合气动特性影响规律。



a 列车侧视图；b 列车相关参数；c 列车与轨道的相对位置

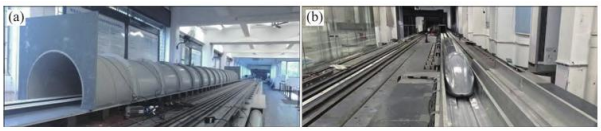
图 1 超导磁浮列车三维仿真模型文

2.2 计算方法

采用非定常 DDES 湍流模拟方法及 SSTK−ω 湍流控制方程模拟会车气动特性[2]，为了保障精度，时间采用高精度的二阶隐式非定常格式，时间步长设为 5×10^{-4} s，每个时间步长设置 20 次迭代。

2.3 试验验证

本研究涉及车隧耦合，为验证数值仿真精度，采用能模拟列车与隧道之间相对运动的动模型试验进行验证[3]。



a 隧道模型；b 超导磁浮列车模型

图 2 速度为 600 km/h 的超导磁浮列车隧道运行动模型

3 结论

当超导磁浮列车以 600 km/h 的车速于隧道中部会车、线间距为 5.4、5.6 及 5.8 m 时，车身表面测点最大压力峰峰值相当，但远小于线间距为 5.1 m 时的 37 kPa。隧道壁面压力与线间距呈正相关，但当车间距为 5.1 m 时，隧道表面压力最大达 47 kPa，这是由于两车靠得过近产生了瞬间高值压力。

参考文献（References）：

[1] 田红旗,张雷,王田天,等.面向行车平稳性的高速磁浮列车气动设计[J].前瞻科技,2023,2(04):70-77.

[2] Tian X, Xiang H, Chen X, et al. Dynamic response analysis of high-speed maglev train-guideway system under crosswinds[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(8): 2757-2771.

[3] Wang T, Huang D, Wang J, et al. Study of aerodynamic characteristics of a high-speed train with wings moving through a tunnel[J]. Journal of Central South University, 2024, 31(3): 1003-1016

收稿日期：2026 年 04 月 08 日.

基金项目：研究生自主探索创新项目（502260032）；国家自然科学基金面上项目（52372369）.

作者简介：潘神功(2000－)，男，湖南临湘，博士研究生，主要从事高速列车及高速磁浮列车空气动力学研究；通信方式：E-mail:1035325498@qq.com、联系电话:18152634727

文章编号：484-007

永磁电动悬浮系统的悬浮导向技术研究

朱鹏翔[1]，李杰[1]，周丹峰[1]，谭亦秋[1]
(1.国防科技大学 智能科学学院，湖南省 长沙 410000)

1 引言

永磁电动悬浮系统具有结构简单、成本低、自稳悬浮等优点，是降低长距离高速磁悬浮系统线路建设成本的重要发展方向之一。然而，永磁电动悬浮的国内外研究成果相对有限，且该系统存在低阻尼问题，限制其在工程上的应用。本文建立了永磁电动悬浮系统的数学模型，提出了一种悬浮导向自稳方案，提高了悬浮系统的垂向和导向的稳定性，为永磁电动悬浮系统的未来发展提供理论参考。

2 永磁电动悬浮导向系统建模

本文所搭建的永磁电动悬浮导向系统核心部件是非磁性工字形导电板、悬浮磁体以及导向磁体，如图 1-2 所示。

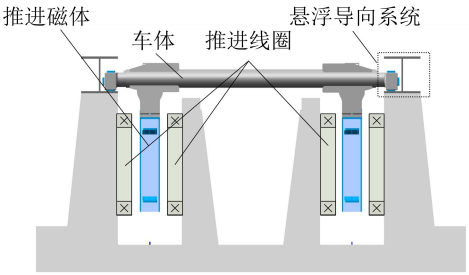


图 1　永磁电动悬浮导向系统结构图

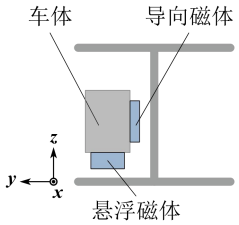


图 2　悬浮导向磁体结构图

当车体往 x 方向前进时，工字形导电板切割永磁体阵列产生磁感应线，进而产生感生磁场。该磁场反过来对永磁体阵列产生悬浮力和导向力。

为了对永磁体阵列产生悬浮力和导向力进行解析建模，本文引入二阶矢量磁位（SOVP）[1-2]，其定义如下：

$$\boldsymbol{B} = \nabla \times \boldsymbol{A} = \nabla \times \nabla \times \boldsymbol{W} \tag{1}$$

3 动力学仿真分析

为了进一步分析永磁电动悬浮导向系统，搭建了动力学模型进行仿真。动力学仿真结果如图 3-4 所示，由图可知，本文所设计的永磁电动悬浮系统能够在悬浮和导向方向均能实现自稳定运行。

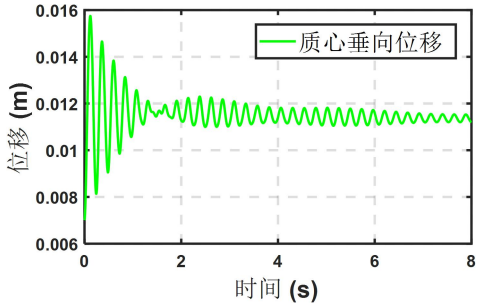


图 3　车体质心垂向位移变化图

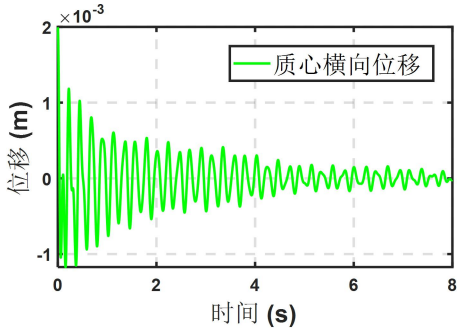


图 4　车体质心导向位移变化图

4 结论

本文以永磁电动悬浮系统为研究对象，引入二阶矢量磁位对其进行三维电磁力解析建模，并搭建了动力学仿真模型，仿真结果证明所设计的系统能够在悬浮和导向方向实现被动自稳定运行。

参考文献（References）：

[1] 罗成．永磁电磁混合 Halbach 阵列电动悬浮特性及稳定控制研究[D].西南交通大学，2021 年.
[2] 段家珩．永磁板式电动悬浮边端效应及三维电磁力特性的研究[D].西南交通大学，2021 年.

收稿日期：2026 年 04 月 09 日.
基金项目：无
作者简介：朱鹏翔(1999－)，男，籍贯(湖南省、郴州市)，博士研究生，主要从事电磁悬浮与辅助发射的研究；
通信方式：E-mail: zpxnudt@nudt.edu.cn

文章编号：484–008

超导磁浮列车通过隧道气动性能研究

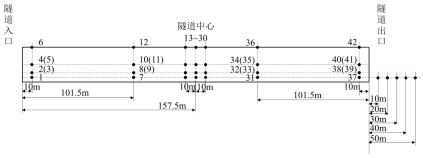
诸葛佳仪，张雷
中南大学 交通运输工程学院，湖南省 长沙市 邮编：410075

1 引言

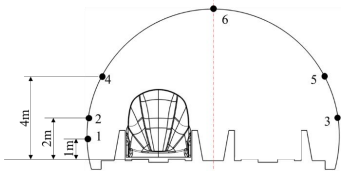
超导高速磁浮列车运行时速可达 600 km/h，当列车通过隧道时，剧烈的压力波与车隧耦合效应会诱发车体振动及悬浮间隙波动。现有研究缺乏基于 1：1 实车编组的隧道通过气动性能分析，本文基于超导高速磁浮列车 8 车编组实车模型，采用 EN14067 标准确定最不利隧道长度（315 m，600 km/h），研究四种隧道断面面积对车隧耦合气动性能的影响。

2 正文

建立 1:1 的 8 车编组超导磁浮列车实车模型，编组长约 200 m。隧道长度按欧标 EN14067 最不利隧道长度公式计算，在 600 km/h 时速下取 315 m。隧道断面面积设置四种：73、84、100、120 m²，其中 73 m²基于原 74 m²隧道按轨道尺寸不变原则缩放，其余断面按比例缩放，线间距固定为 5.4 m。动网格采用重叠网格法进行仿真，共生成 4 套结构化网格，计算 32 个工况。在隧道表面距离隧道口 10m、101.5m(车长一半距离)、隧道中心及偏离隧道中心 10m 共 7 个截面布置测点，每个截面布置了 6 个测点，共计 42 个测点，各截面相对位置及测点编号如图 1a 所示，各截面布点及测点编号顺序如图 1b 所示。沿隧道壁面 1 号测点距离隧道出口 10m、20m、30m、40m 及 50m 位置，布置 5 个测点用以监测微气压波，提取列车表面瞬态压力、车体气动力及隧道口微气压波进行分析。



（a）测点相对位置及测点编号定义



（b）各截面测点布置及测点编号顺序示意

图 1 隧道表面及隧道口测点布置

3 结论

（1）600 km/h 下，四种隧道断面的车身最大正峰值压力均满足±9000 Pa 规范，但最小负峰值全部超标，73 m²断面负压超标最严重。

（2）增大隧道断面可明显降低头车、中间车、尾车的气动阻力波动，并抑制双线隧道中侧向力与倾覆力矩的波动，有利于悬浮系统振动控制。

（3）隧道口微气压波幅值随断面面积增大而减小，且减缓率随车速降低而下降。

参考文献（References）：

[1]Li P Z ,Pan M Y ,Wang F X , et al.Aerodynamic characteristics of a 600 km/h high-temperature superconducting maglev train running in open air considering different suspension gaps[J].Journal of Central South University,2026,32(12):4683-4701.

[2]潘神功,张雷,王田天,等.隧道断面面积与线间距对速度为 600 km/h 的超导磁浮列车隧道交会气动特性的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(10):4445-4457.

[3]贺义,杨成,杨志刚,等.超导磁浮列车明线与隧道内气动噪声仿真研究[J].铁道科学与工程学报,2025,22(02):485-495.

收稿日期：2026 年 04 月 10 日.

基金项目：国家重点研发计划子任务，（2022YFB4301201-02）；国家自然科学基金面上项目，（52372369）.

作者简介：诸葛佳仪(2003－)，女，江西省上饶市，硕士研究生，主要从事列车空气动力学的研究；通信方式：E-mail:2529390245@qq.com 联系电话：15779319928

文章编号：484-009

一种分隔式绕组超导直线电机动态特性研究

高天宇[1,2]，张志华[2*]，张赫[1*]
（1.哈尔滨工业大学 电气工程学院，黑龙江省 哈尔滨市 150000；2.高速飞车山西省实验室，山西省 大同市 038100）

1 引言

分隔式绕组是一种改进端部布置的整距分布式绕组，可以实现定子模块化生产与安装，相比传统分布式绕组更适用于磁悬浮交通[1]、航天电磁发射[2]等长距离铺设的直线电磁驱动领域。目前，分隔式绕组主要应用于有铁芯旋转电机与永磁、感应直线电机，在采用空心定子绕组的超导直线电机方面尚无深入研究。

本文以一种设计应用于如图 1 所示的超高速磁悬浮电磁推进系统的分隔式绕组超导直线电机为例，对直线电机的解析计算方法、动态电磁特性及超导磁体动态扰动仿真方法开展了详细研究，综合对比了分隔式绕组与磁悬浮轨道交通常用的集中式绕组的动态扰动特性，为采用该拓扑的超导直线电机设计与超导磁体振动抑制提供了有效参考。

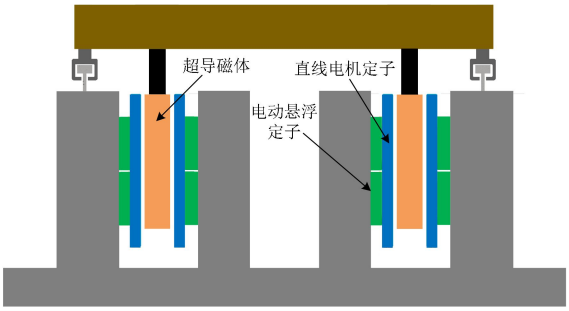


图 1 超高速磁悬浮电磁推进系统

2 分隔式绕组超导直线电机动态特性研究

2.1 分隔式绕组超导直线电机拓扑

应用于超导直线电机的无铁芯分隔式绕组拓扑结构如图 2 所示。相比传统的整距分布式绕组，分隔式绕组通过将 C 相绕组端部反向布置在 A、B 相绕组之间，在绕组竖直边相位不变前提下实现了三相绕组的模块化布置，相邻两个三相绕组之间不存在纵向的交叉重叠，便于沿线路连续安装铺设。

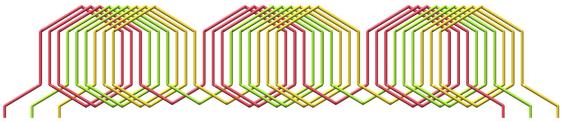


图 2 分隔式绕组拓扑结构

2.2 超导直线电机电磁特性分分析

本文首先建立了三相分隔式绕组超导直线电机的电磁特性解析计算模型，可以高效计算长距离连续布置的多相分隔式绕组动态空间磁场、反电动势、动子磁体六自由度运动下的电磁载荷，通过有限元仿真验证了解析计算模型的有效性，然后基于解析模型对直线驱动过程中分隔式绕组特有的动态电磁特性进行详细研究。

2.3 超导磁体电磁扰动特性分析

提出了分隔式绕组空间磁场动态分布的离线模拟方法，得到了超导磁体真实运行条件下的动态电磁力分布特性，对比了相同推力下集中式绕组动态磁场对超导磁体的电磁扰动差异及性能优劣，分析了应用分隔式绕组的超导直线电机动子磁体振动抑制方法。

3 结论

本文首先介绍了应用于超导直线电机的空心分隔式绕组拓扑结构，提出了电机电磁性能解析计算方法，研究了分隔式绕组直线电机整体电磁特性与局部动子的动态电磁载荷，对比了分隔式绕组与常规集中式绕组对超导磁体电磁扰动特性，为该种绕组的实际工程应用提出了参考性建议。

参考文献（References）：

[1] 熊嘉阳，邓自刚．高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]．交通运输工程学报，2021，21(1)：177-198.
[2] 夏陈超，苟永杰．航天器磁悬浮助推发射技术发展综述[J]．载人航天，2021，27(1)：119-126.

收稿日期：2026 年 4 月 12 日．
基金项目：国家自然科学基金委面上项目（编号：52477067）；国家重点研发计划项目（编号：2024YFF0508004）．

作者简介：高天宇(1994—)，男，江苏省徐州市，高级工程师，博士研究生，主要从事超导直线电机、超导电动悬浮系统的研究；通信方式：gaotianyu_nuaa@163.com

文章编号：484-010

超导磁浮剪切流特性及间隙对气动载荷影响

李林青[1]，钱博森[1]，贺冬晴[1]
(1.中南大学 交通运输工程学院，湖南省 长沙市 410083)

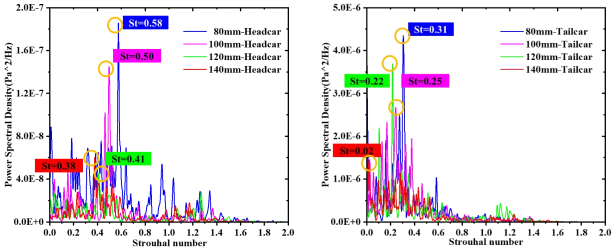
1 引　言

磁浮列车与轨道间隙较小，常导型悬浮高度约10mm，超导型约100mm。高速运行时间隙内会产生剪切流动，边界微小变化易引发流场与气动载荷突变。风洞实验显示，磁浮头尾车升力差异明显[1]，由此产生的点头力矩与气动差异易引发车身振动，威胁运行安全[2]。多个领域研究均表明间隙流动对气动特性影响显著：轮轨列车研究发现车底平滑化可降低阻力[3]，相关模型可描述车底气流特征；磁浮领域已有学者测得列车气动载荷；航空与赛车领域也存在近地间隙壅塞、底盘高度变化导致升力或下压力剧变的现象。目前，间隙流动边界变化下的气动载荷演化与临界气动效应机制仍缺乏系统解释。本研究将针对高速磁浮间隙剪切流动，分析流场演化特征，探究气动载荷随悬浮高度与横向位移的变化规律，揭示车轨关系与气动激励对列车运行稳定性的耦合作用机制。

2 正　文

本文研究三种理想简化轨道结构，设定四种悬浮高度，三种横向偏移量。H为车高，计算域长129.13H、宽54.05H、高24.02H。入口边界为自由流、出口边界为压力出口；列车静止，来流速度600 km/h，地面与轨道为移动无滑移壁面。选用基于SST k-ω的IDDES湍流模型。通过1:8高温超导磁浮列车风洞试验验证方法有效性，关键测点压力系数最大误差6.42%。全域采用切割体网格，开展了网格无关性检验，中等网格兼顾精度与效率。

以工程模型分析悬浮高度与横向偏移对气动载荷的影响。头车升力向下，升力系数随高度升高缓慢下降，80至100，120和140 mm依次降低3%、5%、6%。将导向间隙分为宽侧与窄侧，头车侧向力指向宽侧、尾车指向窄侧，且均随偏移增大而增大。偏移20至40、60 mm，头车侧向力系数增加25%、80%，尾车增加60%、25%。图1功率谱密度分析表明尾车升力系数主频低于头车、能量更高，波动更显著；悬浮高度越低，头尾车升力能量与主频均越大。横向偏移对头车侧向力波动影响不显著，主要影响尾车侧向力波动主频和能量。



a 头车升力系数功率谱密度　　b 尾车升力系数功率谱密度

1 悬浮高度对列车升力系数功率谱密度影响

3 结　论

80-140mm悬浮高度内，头车升力及俯仰力矩系数及二者的波动能量与主频随高度增加而降低。横向偏移破坏导向间隙对称性，使头尾车产生反向侧向力。相较于头车，尾车对偏移敏感。本研究揭示了轨道边界与运行参数的影响机制，为磁浮列车控制系统、安全设计及气动优化提供支撑。

参考文献（References）：

[1] 丁叁叁，姚拴宝，陈大伟. Aerodynamic lift force of high-speed maglev train[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 228-234.

[2] Lin T T, Yang M Z, Zhang L, et al. Influence of the suspension gap on the wake characteristics of a 600 km/h superconducting maglev train[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(2).

[3] Ido A, Saitou S, Nakade K, et al. Study on under-floor flow to reduce ballast flying phenomena[C], 2008

收稿日期：2026年04月13日.

基金项目：国家自然科学基金项目（52202453）;中国科协青年托举项目（2021QNRC001）.

作者简介：李林青(1999－)，男，湖南省衡东县，无职称，在读博士生，主要从事列车空气动力学、客室环境安全的研究；

通信方式：E-mail: linqingli@csu.edu.cn、联系电话19307413945

文章编号：484-011

基于内置热沉的磁浮列车电磁铁散热优化研究

王家斌[1]，胡嘉琛[1]，董天韵[2]
(1.中南大学 交通运输工程学院，湖南 长沙 410075；2. 中南大学 极端流动力能前沿科学中心，湖南 长沙，410075)

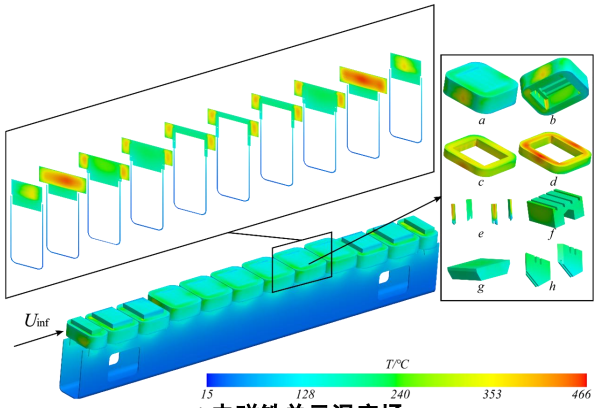
1 引言

时速 600 km/h 高速磁浮列车悬浮电磁铁的散热问题严峻。现有研究多局限于单模块，缺乏列车长时运行工况下对整车悬浮电磁铁散热措施的应用研究有待进一步拓展。因此，本文对高速磁浮列车运行状态下悬浮电磁铁组温度特性开展研究，提出了一种基于内置热沉结构的高速磁浮列车散热优化方案并针对该优化方案的温度场和流场开展了对比分析，验证了其对高速磁浮列车悬浮电磁铁散热有效性。

2 正 文

2.1 悬浮电磁铁温度场分布特性

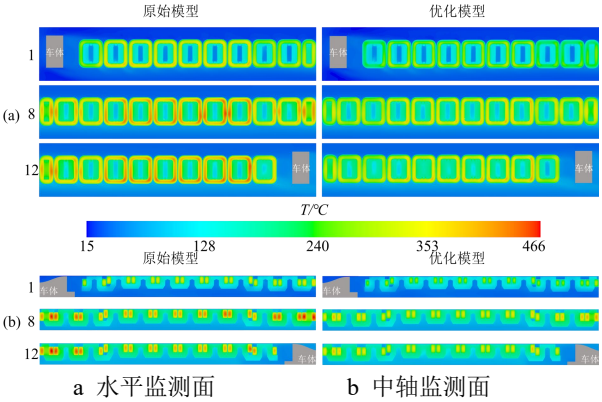
悬浮电磁铁单元内部热负荷高度集中于线圈绕组核心区，呈现出芯部热量积聚与径向温度梯度非均匀分布，温度值以中心向外表面呈径向递减；受不同材质导热系数突变的影响，线圈与树脂包覆层交界面处出现了显著的温度阶跃；而底部磁轭与法兰盘远离核心热源，且具备较大的热容量与充裕的对流换热面积，成为系统主要的冷端结构。



1 电磁铁单元温度场

2.2 温度场分布

内置热沉优化方案显著抑制了冷却气流的沿程温升效应，使 1 至 12 号电磁铁阵列的内部温度场均匀性得以提升。对比原构型，优化后的特征高温区覆盖范围大幅收缩。量化分析表明，该局部高温区的面积占比由原先的 5.8%锐减至 1.4%，相对降幅达 74%。从热力学分布特征来看，原流场中高度集中、分布离散的局部热斑已被广域中低温区所取代，各发热单元间的纵向温差显著缩小，整体空间温度梯度趋于平缓。



a 水平监测面　　b 中轴监测面

2 内置热沉优化方案温度场对比

3 结 论

1) 列车高速长时运行工况下，热量且沿列车纵向呈现非线性的温度递增趋势，第 10-12 组电磁铁区域形成显著的局部热点，峰值温度达 466 ℃。

2)内置热沉方案表现出更优的散热性能，该方案显著抑制了沿程热累积效应，使电磁铁组的温度场分布趋于均匀，整体温度有效降低。

3) 与初始设计方案相比，优化后的各电磁铁单元平均温度与峰值温度的降幅均超过 13%，线圈区域平均温度的降幅至少为 10%。

参考文献 (References)：

[1] 佟来生，李海涛，张文跃，等. 磁浮列车悬浮电磁铁温度场分析与散热优化研究[J]. 电力机车与城轨车辆，2022，45(04)：13–18，24..

[2]丁叁叁，姚拴宝，陈大伟. 高速磁浮列车气动升力特性研究[J]. 机械工程学报，2020，56(8)：228–234.

[3] YE F, DONG Y, OPOLOT M, et al. Assessment of thermal management using a phase–change material heat sink under cyclic thermal loads[J]. Energies, 2024, 17(19): 4888.

收稿日期：2026 年 04 月 13 日.

基金项目：国家重点研发计划子任务(2023YFB4302502-12).

作者简介：王家斌(1993－)，男，辽宁抚顺，副教授，工学博士，主要从事高速磁浮列车电磁铁高效散热技术的研究；
通信方式：E-mail: wangjiabin@csu.edu.cn、联系电话:15200893306

文章编号：484–012

高温超导高速磁浮列车明线运行气动特性及对悬浮稳定性影响研究

李宗澎[1,3]，潘逸鸣，邓自刚[2,3]

（1. 西南交通大学 力学与航空航天学院，四川省 成都市 610031；2. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031；3. 西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心，四川省 成都市 610031）

1 引言

本研究通过考察时速 600 公里工况下的三编组 HTS 磁浮列车，填补了这一空白。采用计算流体力学模拟分析气动载荷，重点关注悬浮转向架周围的流动结构。将悬浮架视为独立部件，以分析其附近的详细流动与气动载荷。在此基础上，利用多体动力学软件建立车辆动力学模型，分析磁浮列车在不同加载条件下的动态响应差异。结果表明，头车底部的第一个转向架对气动载荷的非定常波动贡献最大。不同加载条件下的动态响应表现出显著差异。这些发现为优化 HTS 磁浮设计以确保超高速运行稳定性提供了关键见解。

2 正 文

2.1 研究方法

采用改进的延迟分离涡模拟方法模拟了三编组列车在 600 km/h 速度下的气动性能。提取了每节车厢及悬浮转向架所承受的气动载荷，并利用 ICE-2 模型列车的风洞实验数据进行了验证。建立了三编组列车的五自由度动力学模型，并提出了三种气动载荷施加方法。

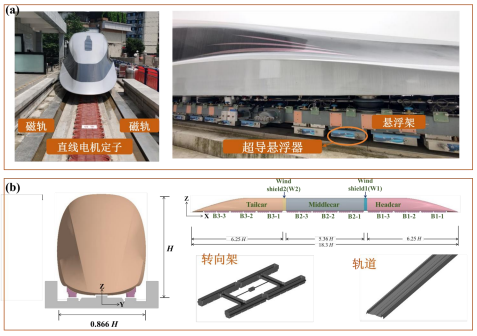


图 1 HTS 磁浮列车模型及关键部件：（a）西南交通大学 HTS 磁浮头车实物原型；（b）数值模型的前视图、侧视图及关键尺寸（H 为模型特征长度，H=3.45m）

3 结 论

(1) U 型轨道结构直接影响磁浮列车周围的流动。头车鼻尖压缩轨道内的空气，并使其沿流线型表面向上抬升至轨道外部，在侧梁顶部形成涡旋。尾车产生的尾流部分被限制在 U 型轨道内部。

(2) 提出了两种气动载荷提取方法。以时速 600 公里的头车为例，头车与中间车具有相近的正升力，均高于尾车的负升力。悬浮架升力呈正负交替波动，其幅值从 B1 向 B6 逐渐减小。仅提取车厢的升力略高于整体提取整车方法的升力。

(3) 动力学结果表明，气动载荷显著影响悬浮间隙，最高悬浮高度为 23.2mm，且不同转向架之间的差异因加载方法而异。这些差异同样体现在空气弹簧力的变化上，对于 B6 转向架，整体加载方法得到的最大空气弹簧力是基于部件方法的 2.16 倍。基于部件的加载方法能更好地反映二系悬挂的空气弹簧力特性，并提供更准确的动力学计算。

采用分区加载方法可以更准确地获取二系悬挂空气弹簧受力及车辆悬浮状态，为车辆动力学提供更精确的计算

参考文献（References）：

[1] DENG Zi-gang., LIU Zong-xin., LI Hai-tao., et al. Development status and prospect of maglev train[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57: 455-474, 530.

[2] DING San-san., YAO Shuan-bao., CHEN Da-wei. Aerodynamic lift force of high-speed maglev train[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(08): 228-234.

[3] LI Zong-peng., WANG Xiao-fei., PAN Yi-ming., et al. Contribution of Suspension Bogies' Aerodynamic Loads to the Dynamic Characteristics of a High-Temperature Superconducting Maglev Train Running under Crosswind[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2025, 18(4).

收稿日期：2026 年 04 月 13 日.

基金项目：国家自然科学基金联合基金项目（U24B20125）.

作者简介：李宗澎(1999)，男，河南省南阳市，博士研究生，主要从事高速磁浮空气动力学的研究；通信方式：1360388496@qq.com:、联系电话:13281270572.

文章编号：484-013

用于磁浮轨道不平顺高保真重构的时频域模型

陈张航[1,2]，徐俊起[1,2]，倪菲[1,2]，林国斌[1,2]

（1.同济大学 交通学院，上海 201804；2.同济大学 磁浮交通工程技术研究中心，上海 201804）

1 引言

轨道不平顺是列车振动的主要激扰源，其精确建模对高速磁浮系统的仿真精度与运行安全至关重要。高速磁浮轨道不平顺数据呈现出显著的非平稳性与非高斯特征，具有强烈的随机性与复杂的时空依赖性。现有建模方法主要分为两类：一类基于频域的轨道谱公式拟合，能反映波长成分与能量分布，但难以刻画时域动态变化；另一类基于时域的时间序列生成模型（如 TimeGAN[1]），可捕捉时间依赖关系，但未能融合频域信息。单一依赖频域或时域的建模方法均无法全面捕捉轨道不平顺的复杂性，工程应用要求生成数据同时具备时域真实性与轨道谱一致性。因此，亟需一种融合时频域信息的建模方法。

2 模型架构

本文提出的 GC-TimeGAN（Global Conditioned TimeGAN）在 TimeGAN 架构基础上引入条件生成对抗网络（CGAN）[2]的思想，将全局频谱条件信息有效嵌入生成与判别过程中。模型改进包含两个核心部分：数据预处理改进和网络结构改进。

（1）数据预处理改进

以每个时序数据切片的功率谱密度（PSD）作为全局条件信息。由于 PSD 数值量级集中在 10^{-6} 至 10^{-1} 之间，原始数据直接输入会导致网络难以有效学习，因此对 PSD 依次进行对数变换与全局归一化处理。其数学表达式为：

$$\mathbf{P} = \mathbb{E}[\mathrm{PSD}(\mathbf{X}_t)]，\quad \mathbf{P}_{\log} = \log(\mathbf{P})，\quad \mathbf{P}_{\mathrm{norm}} = \frac{\mathbf{P}_{\log} - \mu}{\sigma}，$$

其中 μ 为均值，σ 为标准差，该变换扩展了数据动态范围，确保训练过程的数值稳定性与一致性。

（2）网络结构改进

将归一化后的全局条件信息通过可训练的线性映射层投影至隐层特征空间 $x_c = \sigma(W_c x_c + b_c)$，其中 W_c 和 b_c 为可训练的权重矩阵和偏置项，σ 为 Sigmoid 激活函数。所得隐层特征作为生成器与判别器中 RNN 每一层的初始隐藏状态 h_0，RNN 的前向传播过程为：

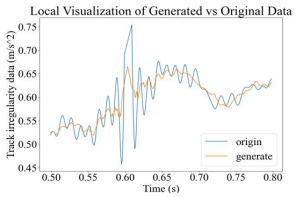
$$h_t = \sigma(W_h \cdot h_{t-1} + W_x \cdot x_t + b_h)$$

$$y_t = W_y \cdot h_t + b_y，\quad h_0 = x_e$$

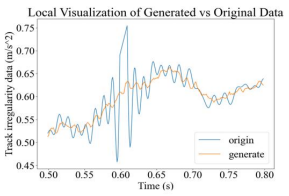
通过将条件信息 x_c 作为初始状态引入 RNN，生成器和判别器在每个时间步骤中不仅根据历史信息生成时序数据，还能够持续保持对全局条件的依赖. 这样，生成器能够更精确地结合全局条件生成数据，从而提高生成序列的真实性和多样性。

3 结论

模型评估从多样性、保真度、实用性和谱一致性四个维度展开，分别通过降维可视化、LSTM 判别分数、回归预测误差和功率谱 KL 散度进行度量。部分实验结果如图所示。



GC-TimeGAN的部分恢复数据的可视化结果



TimeGAN的部分恢复数据的可视化结果

实验结果表明，GC-TimeGAN 在各项指标上均优于 TimeGAN 和 IAAFT，尤其在频谱一致性方面优势显著，且对离群与边缘数据的覆盖度明显提升，说明 PSD 条件能有效引导模型捕捉边缘波动与频域特征。训练成本方面，GC-TimeGAN 相比 TimeGAN 仅有小幅增加，仍在可控范围内。此外，对比实验表明简单统计特征难以有效指导生成，而 PSD 频域条件在刻画轨道不平顺的周期性与能量分布方面具有不可替代的优势.

参考文献（References）：

[1] Xu J，Chen Z，Zheng Q，Ni F. Data-driven modeling of high-speed maglev track irregularity[J]. Probabilistic Engineering Mechanics，2025，81：103798.

[2] Mirza M，Osindero S. Conditional Generative Adversarial Nets[J]. arXiv:1411.1784，201

收稿日期：2026 年 04 月 13 日.

基金项目：国家重点研发计划（2023YFB4302502）；中央高校基本科研业务费专项资金（22120230311）；中国国家自然科学基金（52232013，52572416）.

作者简介：陈张航（2003－），性别女，籍贯（江苏省扬州市），博士研究生在读，主要从事磁浮列车轨道状态智能建模与分析的研究；通信方式：E-mail:2411709@tongji.edu.cn、联系电话：15252552391

文章编号：484-014

磁浮动力学响应预测的机器学习代理模型构建

秦天[1]，徐钊[2]，宋洋[2]
(1.西南交通大学 利兹学院，四川省 成都市 611756；2. 西南交通大学 电气学院，四川省 成都市 611756)

1 引言

磁浮系统动力学研究通常依赖高保真数值仿真，但当参数空间较大、工况数量较多时，传统仿真方法存在计算耗时长、分析效率低等问题，不利于快速评估与参数优化。为此，本文基于磁浮动力学仿真数据构建机器学习代理模型，以建立系统参数与动力响应之间的快速映射关系，从而提升响应预测效率并为系统参数分析提供支撑.

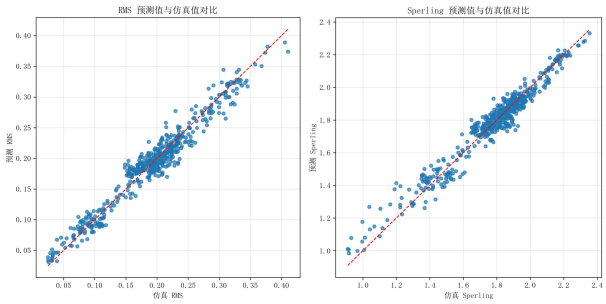
2 动力学仿真-机器学习模型

2.1 仿真模型构建

本文基于上海磁浮线建立仿真模型，采用单极磁铁控制系统[1,2]，构建通过线圈电压改变电磁力的 PID 控制器。

2.2 机器学习模型训练

本文基于磁浮动力学仿真数据构建样本集，选取车速、悬挂参数及控制参数作为输入，以 RMS（均方根） 和 Sperling 指标作为输出，建立 XGBoost 代理模型。由图 1 可见，两项指标的预测值与仿真值总体吻合较好，大部分样本点分布在对角线附近，表明该模型能够较准确预测高速磁浮系统动力响应。

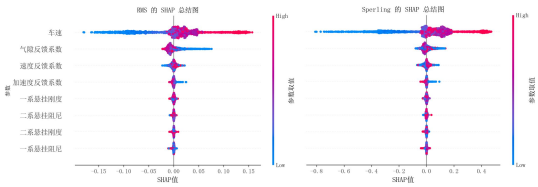


a RMS　　b Sperling

图 1 模型预测值与仿真值对比

2.3 SHAP 参数分析

采用 SHAP 方法对代理模型进行可解释性分析。由图 2 可见，车速对 RMS 和 Sperling 指标的影响最为显著，气隙反馈系数和速度反馈系数次之，其余参数影响相对较小。结果表明，所建模型能够较好识别影响动力响应的关键参数。



a RMS　　b Sperling

图 2 SHAP 总结图

3 结 论

本文基于磁浮动力学仿真数据建立了 XGBoost 代理模型，实现了对 RMS 和 Sperling 指标的快速预测。结果表明，该模型具有较好的预测精度；SHAP 分析进一步识别出车速及部分控制参数是影响动力响应的关键因素。研究结果可为高速磁浮系统的快速评估与参数优化提供参考。

参考文献 (References)：

[1] ZHANG L, HUANG J Y. Dynamic interaction analysis of the high-speed maglev vehicle/guideway system based on a field measurement and model updating method[J]. Engineering Structures, 2019, 180: 1-17.

[2] KONG E, SONG J S, KANG B B, et al. Dynamic response and robust control of coupled maglev vehicle and guideway system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(25): 6237-6253.

收稿日期： 2026 年 04 月 14 日.

基金项目： 国家自然科学基金青年科学基金项目(C 类)(52402452);

作者简介： 秦天(2004－)，男，四川成都，本科生；

通信方式：E-mail:qintian@my.swjtu.edu.cn、联系电话:18202838661

文章编号：484-015

侧风条件下 600km/h 超导磁浮列车气动特性及抗风优化研究

张雷[1]，徐枢[2]

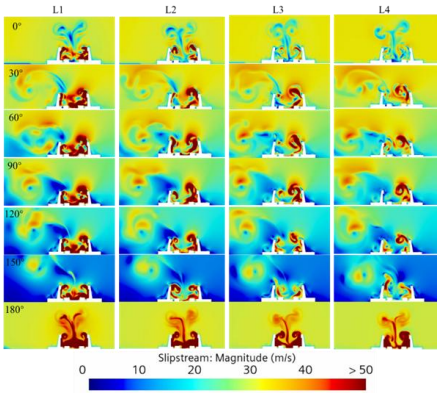
（1. 中南大学 交通运输学院，湖南省 长沙市 410000；2. 中南大学 交通运输学院，湖南省 长沙市 410000）

1 引　言

风环境是列车行车安全不得不考虑的一个关键因素，本文围绕了在风环境下高速运行的超导磁浮列车的空气动力学问题，系统的研究了气动特性和流场结构的规律，给出了可行的抗风措施及其抗风效果的定量定性分析。本文可为相关研究提供一定的参考价值。

2 正　文

2.1 风环境下的气动特性

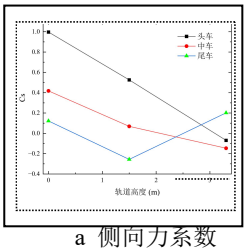


1 尾流区域的列车风变化

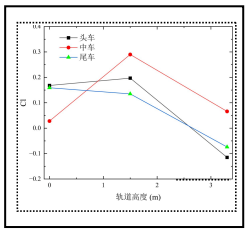
随着角度的增加涡旋逐渐向背风侧偏移，随后又逐渐消失。不同位置下的列车风在相同的角度下展现出相同的规律。L1 的流动最为复杂，速度变化最为剧烈。

2.2 轨道高度对抗风性能的影响

通过研究不同轨道高度下对列车气动力特性分析，采用数值仿真方法，探索了轨道高度 0m、1.5m 和 3.3m 下超导磁浮列车高速运行时的气动特性。



a 侧向力系数



b 升力系数

2 气动力随角度变化曲线

这表明了轨道高度会显著削减整车的侧向力和升力。

3 结　论

（1）正向偏角显著加剧了车体背风侧的气流分离，诱发了更为强烈且不规则的涡旋脱落与复杂尾流结构，导致其侧向气动载荷与流场不稳定性远超逆向偏角工况

（2）适当增加超导磁浮列车两侧轨道高度，对列车气动升力及侧向力系数幅值具有较好的改善效果。

参考文献（References）：

[1] 熊嘉阳, 沈志云, 池茂儒, 等. 高速磁悬浮列车技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(02): 1-23.

[2] 熊嘉阳, 邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(01): 177-198.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.

基金项目：项目名称：国家重点研发计划子任务（2022YFB4301201-02）；项目名称：国家自然科学基金面上项目（52372369）.

作者简介：张雷，男，山东省菏泽市，职称：副教授，主要从事列车空气动力学的研究；通信方式：E-mail: gszxzhanglei@csu.edu.cn，联系电话：13667327480

文章编号：484–016

固定式电动悬浮动态电磁力模拟方法与实验

郑珺[1]，李明明[1, 2]，梁明杰[1]，刘剑儒[1, 3]

(1.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610000；2.西南交通大学 电气工程学院，四川省 成都市 610000；3. 庆应义塾大学 理工学研究科，日本 神奈川县 横滨市 2238522)

1 引言

零磁通电动悬浮（Electrodynamic Suspension，EDS）技术具有自稳定悬浮、浮阻比高和高速运行潜力大等优点。但其试验研究通常依赖全尺寸线路或高速动态试验装置，存在成本高、磁场测量复杂等问题。不同于其他固定式实验台构建思路，本文提出一种基于电磁力等效重构原理的固定式动态模拟测试方法，亦可在无需高速运动条件下实现零磁通 EDS 系统动态电磁力特性的等效模拟。构建过程中，首先，建立零磁通 EDS 系统电-磁-力解析模型，并通过有限元仿真对典型工况下的动态电磁力行为进行对比验证。然后，提出了一种基于线圈单位电流电磁力特征的磁场表征方法，通过构建线圈电流激励与等效电磁力之间的映射关系，避免了对复杂车载磁体磁场的直接测量，实现了运动磁源与地面线圈相互作用的固定式等效模拟。最后，开展多工况实验对所提方法进行验证。结果表明，该方法能够准确重现电动悬浮系统的动态电磁力行为，与理论分析及仿真结果保持有良好一致性。

2 正　文

2.1 电-磁-力解析模型

根据零磁通 EDS 系统中车载磁场源与地面零磁通线圈（Null-Flux Ciol，NFC）的相互作用机理，建立磁场、NFC 感应电流及电磁力的解析模型，描述 EDS 系统动态电磁耦合关系。

2.2 固定式动态模拟方法

依据零磁通 EDS 系统中磁场源与地面 NFC 的电磁耦合关系，将实际 NFC 解构为多组固定式试验台线圈（Test Bench Coil，TBC），并在另一侧布置静态磁场源，如图 1 所示。遵循电磁力等价原则解析计算出各组 TBC 应该施加的主动控制电流。通过主动电流输入重构出分离式、三合一式动态运行条件下的电磁力响应。

2.3 实验验证

开展多工况实验并结合解析与有限元结果进行对比，验证所提方法的准确性和有效性。

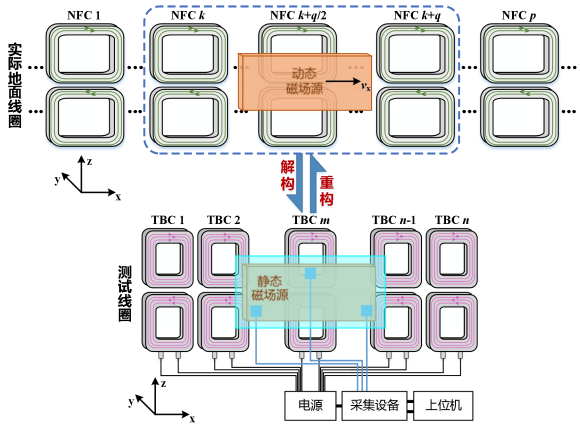


图 1 固定式动态模拟方法原理图

3 结　论

本文针对零磁通 EDS 系统传统试验方法成本高、实现复杂及对高速运行依赖强等问题，提出了一种新的固定式动态等效测试平台方法。以动态磁场等效原理出发，提出了基于主动电流控制的动态电磁力重构方法，有效实现了对运动电磁过程的静态模拟。结果表明，所提出的方法为 EDS 系统的实验研究提供了一种低成本、可扩展的测试手段。该方法亦可能推广至其他线圈式动态电磁耦合系统中。

参考文献（References）：

[1] Liu Jianru, Zheng Jun, Liu Runjie, et al. A stationary simulation method for dynamic electromechanical characteristic in null-flux electrodynamic suspension systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2026, 73 (1): 139-148.

[2] Li Hengda, Zhu Hanlin, Huang Huan, et al. A new suppression strategy of pitching vibration based on the magnetic-electric-mechanical coupling dynamic model for superconducting EDS transport system[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 188: 110039.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.

基金项目：四川省国（境）外高端人才引进项目（编号：2024JDHJ0002）.

作者简介：郑珺，女，研究员，博士，主要从事超导磁悬浮与电磁推进、直线电机、机电耦合相关的研究，E-mail: jzheng@swjtu.edu.cn.

文章编号：484-017

高速磁浮起落架制动协同控制关键技术研究

秦强[1]，金鑫[2],危伟[2]，张赛[1]，刘尚武[2],李凯[1]
(1. 中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮研究所，吉林 长春 130000；2.西安航空制动科技有限公司 设计研究所，陕西 西安 710075)

1 引 言

高速磁浮列车是我国新一代高速轨道交通体系的核心发展方向，600km/h 速度等级的高温超导磁浮列车是其中重点布局的高端前沿车辆。

高温超导磁浮列车工程化的核心前提是列车的安全运行，因此车辆的制动系统能力成为车辆安全保障体系中的核心枢纽。

现阶段，600km/h 速度等级高温超导磁浮列车制动系统在国内没有成熟方案和技术积累。高温超导磁浮列车制动系统特殊之处在于：车辆需要配置具有支撑能力且可进行收放的特殊装置，以完成非悬浮状态、紧急制动状态及其他特殊工况下对车辆的垂向支撑。

起落架装置是飞机的标配核心部件，具有可收放、超大承重、强抗冲击等特点，且搭载制动装置，可实现停放支撑、滑跑导向和强力制动等功能，与高温超导磁浮列车的特殊需求匹配。中车长客股份公司在国内首次将起落架这一概念引入高速轨道交通车辆的设计中，联合国内航空制动领域头部科研单位，将航空起落架与制动控制技术进行跨界赋能，开展起落架、制动协同控制关键技术研究。

2 正 文

2.1 系统总体方案

本文以时速 600 公里高温超导磁浮列车为应用载体，采用“航空制动技术+轨道交通场景适配”的创新路线。

三编组的高温超导磁浮列车配置有四套悬浮架，车辆以每个悬浮架为最小控制单元进行起落架及制动功能控制。每个单元配置四套起落架装置，还包括液压单元、蓄能器组成、电磁阀组成、位移传感器、速度传感器及电子制动控制单元等液压、电气控制设备。控制单元内部实现对自身起落架系统的独立控制，外部可与其他单元进行实时通讯，在起落架动作与制动执行层面相互协同、联合控制，形成分布式独立控制、跨装置协同的整体系统架构。

2.2 协同控制关键技术

本文提出如下三项关键技术：

一是起落架同步控制技术。在传统飞机起落架收放控制方法基础上，根据高温超导磁浮列车起落架控制需求设计了一套全新的算法，以实现三编组车辆共 16 套起落架的动作收放同步精准控制。

二是高速防滑制动控制算法。基于航空制动成熟制动控制策略，针对高温超导磁浮列车高速制动工况进行算法优化迭代，实现毫秒级压力调节。

三是多执行机构安全控制策略。面对车辆共 16 套起落架机构与制动装置的多执行机构系统，定制专门安全控制策略，通过状态反馈与安全控制逻辑，实现全装置协同管控与故障安全保障。

3 结 论

本文以高温超导磁浮列车行车安全需求为核心，明确磁浮列车起落架系统与飞机起落架系统的同源性，论证航空技术赋能轨道交通的可行性。以车辆的“独立控制、相互协同、故障导向安全”为核心，结合航空领域成熟经验，提出的一体化协同控制方案，有效破解高速磁浮列车区别于传统轨道列车的起落架控制、高速制动、多装置安全协同等核心难题，为我国高速磁浮装备自主化研制与工程化落地提供关键技术支撑。

参考文献 (References)：

[1]熊嘉阳,沈志云,池茂儒,等.高速磁悬浮列车技术综述[J].交通运输工程学报：2025,25(02):1-23.

收稿日期： 2026 年 04 月 15 日.

基金项目： 时速 600 公里高温超导磁浮列车关键技术研究及验证（2021CCZ002-2）.

作者简介： 秦强（1989—），男，硕士，高级工程师，主要从事轨道车辆制动系统方面的研究；E-mail：qinqiang316@163.com；联系电话：17743131729

文章编号：484-018

高速磁浮悬浮电磁铁磁极回路拓扑方案研究

韩沛辰[1,2,3,4]，徐俊起[1,2,3,4]，荣立军[1,2,3,4]，陈琛[1,2,3,4]，邵仲书[1,2,3,4]

(1.同济大学 交通学院，上海市 201804；2.同济大学 国家磁浮交通工程技术研究中心，上海市 201804；3.高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海市 201804；4.磁浮技术铁路行业重点实验室，上海市 201804)

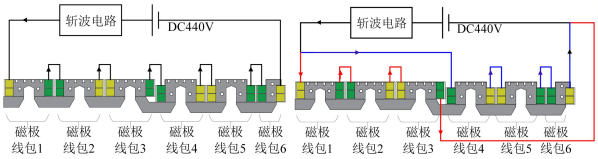
1 引　言

随着高速磁浮列车运行速度的提高，轨道不平顺等外部扰动的扰动频率增大，对悬浮控制响应速度提出了更高的要求。对于悬浮电磁铁而言，传统的 6 磁极串联拓扑方案存在电流响应慢、输出饱和等问题，制约了控制响应速度的提升。本研究提出两种新的磁极拓扑方案，分析不同方案的控制性能，为后续的悬浮电磁铁优化设计提供参考。

2 正　文

2.1 悬浮电磁铁磁极回路拓扑结构

高速磁浮列车的中间电磁铁包含 12 个电磁铁磁极线包。原拓扑结构为 6 个磁极串联，构成 2 个控制回路。本文提出两种新的拓扑方案：方案 A 为 12 个磁极分为 3 组，每组 4 个磁极串联；方案 B 为 12 个磁极分为 2 组回路，回路内 3 个磁极串联，形成 2 个并联支路（如图 1b 所示）。



a 6 磁极串联　　b 3+3 磁极并联

1 悬浮电磁铁磁极拓扑结构

2.2 磁极回路电流响应分析

列车悬浮时控制回路的电流变化率为：

$$\frac{di(t)}{dt}=\frac{u(t)-i(t)R-u_{emf}}{L(c)} \tag{1}$$

由式(1)可知，电流变化率与控制回路的总电感、电阻密切相关。通过减少回路内磁极数量，电流变化率可进一步提升，提高电流跟随速度。

2.3 磁极回路拓扑方案对比

采用两种新的拓扑方案后，单个悬浮控制回路的等效电阻与电感降低到原方案的 2/3 与 1/4，具有以下优势：1.控制回路内的电感、电阻大小与磁极数量有关，采用两种新方案后，系统的电流响应提高。2.受制于斩波器电压限制，电流环控制器的增益存在上限，其最大带宽与电路特性有关。相较原拓扑结构，新方案能够在相同的控制器增益限制下，达到更高的控制器带宽。另一方面，方案 A 存在控制器数量增加的不足。方案 B 斩波电路电流变为原方案的 2 倍，需重新设计选型；系统的电压调节精度下降，不利于悬浮间隙的精准控制。

3 结　论

本研究针对高速磁浮列车悬浮电磁铁的控制拓扑问题，提出减少磁极数量、改为并联结构的技术方案，并针对方案优缺点进行了讨论。

参考文献（References）：

[1] 付善强,吴冬华,韩伟涛,等.基于非线性材料的高速磁浮电磁铁建模与分析[J].西南交通大学学报,2023,58(04):879-885.

[2] 李云钢,柯朝雄,程虎.磁浮列车悬浮控制器的电流环分析与优化设计[J].国防科技大学学报,2006,(01):94-97.

[3] 倪菲,王凡鑫,徐俊起,等.基于云理论的电磁悬浮系统控制回路性能评估[J].同济大学学报(自然科学版),2021,49(12):1660-1670.

收稿日期：2026 年 04 月 15 日.

基金项目：国家自然科学基金重点项目（52232013）；国家重点研发计划资助项目（2023YFB4302502）

作者简介：韩沛辰(2000－)，男，山东青岛人，在读博士生，硕士学历，主要从事磁浮列车悬浮控制的研究；通信方式：E-mail:hpc0045@tongji.edu.cn、联系电话 18019100045

文章编号：484-019

基于 D-FINE 模型的磁浮交通沿线安全监测方法

郑新禹[1,2]，王恬格[1,2]，叶丰[1,2]，曾国锋[1,2]
(1.同济大学国家磁浮交通工程技术研究中心，上海 201804；2. 高速磁浮运载技术全国重点实验室,201804)

1 引言

磁浮线路通常具有高架区段长、沿线环境开放以及巡检范围广等特点，沿线区域中出现的人员、车辆、异物、设备构件及其他异常目标都可能对磁浮系统的安全运行造成影响。当前沿线安全监测主要依赖人工巡查或传统视频监控方式，存在实时性不足、复杂背景下目标易误检漏检以及小尺度目标识别困难等问题。针对上述问题，本文提出了一种基于改进 D-FINE[1]模型的磁浮沿线复杂环境感知与安全监测方法 MSC-D-FINE。本方法以端到端实时目标检测网络作为核心架构，融合磁浮沿线场景的视频时序特征，针对线路周边空间结构信息及目标多尺度特性进行特征提取与优化，有效提升了复杂场景下沿线多类别目标的检测精度。该方法可为磁浮线路异物监测、入侵识别及安全预警提供有力的技术保障。

2 正文

本文以 D-FINE 作为基础检测框架，构建了磁浮沿线多类别目标检测网络 MSC-D-FINE。首先，针对磁浮沿线场景中空间结构相对固定、目标活动区域较为集中的特点，本文引入结构先验信息，将轨道保护区、检修通道、桥梁边缘及轨旁设备带等区域的空间分布特征融入模型学习过程，以提高模型对重点区域目标的感知能力，并减弱复杂背景对检测结果的干扰。其次，考虑到沿线监测中目标尺度形态差异较大且类别多样，本文设计了尺度解耦增强模块，通过结合局部细节信息与全局语义信息，提升模型对远距离小目标、细长目标及外观差异较大目标的检测与定位能力。最后，针对连续视频监测中检测结果易受到遮挡、反光和瞬时噪声影响的问题，本文引入时序优化机制，利用相邻帧之间的短时一致性对检测结果进行修正，从而减少误检、漏检和结果波动。通过上述设计，模型能够更好地适应磁浮沿线复杂场景，实现多类别目标的准确检测与稳定识别。

图 1 模型框架图

3 结 论

本文面向磁浮沿线安全监测需求，提出了一种基于 D-FINE 的多类别目标检测方法 MSC-D-FINE。该方法针对磁浮沿线场景中结构受限、目标异构性强及视频检测稳定性不足等问题，构建了融合结构先验感知、尺度解耦增强和时序稳健优化的检测框架。所提方法能够提升复杂场景下沿线多类别目标的识别能力与结果稳定性，可为磁浮线路沿线异物检测、入侵监测、智能巡检和安全预警提供有效支持。

参考文献 (References)：

[1] Peng Y, Li H, Wu P, Zhang Y, Sun X, Wu F. D-FINE: Redefine regression task in DETRs as fine-grained distribution refinement [EB/OL]. arXiv, 2024.

收稿日期：2026 年 4 月 15 日.

基金项目：上海市自然科学基金青年项目(25ZR1402508)、中央高校基本科研业务费专项资金资助（22120230311）.

第一作者简介：郑新禹（2000-），男，博士研究生，主要研究方向为磁浮交通工程。

通讯作者简介：王恬格（1997-），女，助理教授，博士，主要研究方向为轨道交通智能运维，邮箱为 wangtiange@tongji.edu.cn。

文章编号：484-021

基于扩散模型的磁浮轨道悬浮面重构与异常检测

金幸炜[1,2]，王恬格[1,2]，叶丰[1,2]，曾国锋[1,2]

(1.同济大学国家磁浮交通工程技术研究中心，上海 201804；2. 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海 201804)

1 引　言

磁浮轨道悬浮面在长期服役过程中易出现剥落、裂纹等表面异常，此类异常通常尺度较小、形态不规则，且容易与电缆边缘、定子轮廓等正常高对比结构混淆，给异常区域的稳定识别带来困难。现有研究主要形成两类技术路线：一类是以生成对抗模型及扩散模型为代表的生成式异常重构方法[1,2]，适用于缺陷样本稀缺场景，但在复杂全图背景下仍存在异常残留、热图噪声较重和边界显化不足等问题；另一类是基于域泛化的异常分割方法，该类方法在表面异常边界提取方面具有优势，但对标注质量和场景一致性依赖较强。针对上述问题，本文提出一种基于扩散模型的悬浮面异常检测多阶段联合方法，通过扩散重构异常显化、GAN 先验引导增强及 U-Net 分割辅助校准，形成面向磁浮轨道悬浮面异常检测的完整技术路线。

2 正　文

本文提出一种基于扩散模型的悬浮面异常检测多阶段联合方法。第一阶段采用仅正常图像训练策略构建扩散模型重构基线，通过输入图像与重构图像的差异生成异常热图，实现缺陷初步显化；第二阶段引入 GAN 模型提取正常结构先验，并通过瓶颈向量与扩散过程耦合，构建先验引导的 GAN-Diffusion 联合重构框架，以增强模型向正常图像分布映射的能力；第三阶段构建 U-Net 监督分割辅助校准分支，引入掩膜增强与梯度反转层，对异常区域进行进一步分析与校准，从而形成图像重构与分割验证相结合的悬浮面异常检测技术路线。

磁浮轨道悬浮面异常检测模型框架图

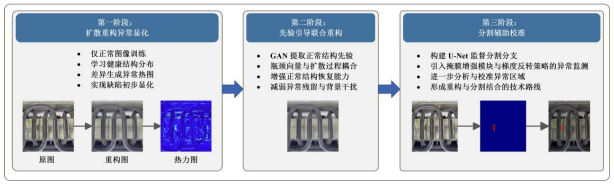


图 1 模型框架图

3 结　论

本文面向磁浮轨道悬浮面异常检测需求，提出了基于扩散模型的多阶段联合检测方法。针对缺陷样本稀缺、复杂全图背景干扰强及异常边界难以稳定显化等问题，构建了融合扩散重构异常显化、GAN 正常结构先验引导和 U-Net 分割辅助校准的检测框架。实验结果表明，扩散模型基座在复杂背景条件下较 GAN 与 VAE 具有更稳定的重构质量和异常显化能力，辅助分割中梯度反转策略的异常监测表现优于掩膜增强模块。总体分割精度可达 60.57%。

参考文献（References）：

[1] Peng J, Shao H, Xiao Y, et al. Industrial surface defect detection and localization using multi-scale information focusing and enhancement GANomaly[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 238: 122361.

[2] Li T, He K. Back to basics: Let denoising generative models denoise[J]. arXiv preprint arXiv:2511.13720, 2025.

[3] Pan Y, Chen J, Wu P, et al. Enhanced Rail Surface Defect Segmentation Using Polarization Imaging and Dual-Stream Feature Fusion[J]. Sensors, 2025, 25(11): 3546.

收稿日期： 2026 年 4 月 15 日.

基金项目： 国家自然科学基金重点项目(52432012)、上海市自然科学基金青年项目(25ZR1402508).

第一作者简介： 金幸炜（2003-），男，硕士研究生，主要研究方向为磁浮交通工程。

通讯作者简介： 王恬格（1997-），女，助理教授，博士，主要研究方向为轨道交通智能运维，邮箱为 wangtiange@tongji.edu.cn。

文章编号：484-022

常导磁浮列车动态磁轨关系研究

曾启瑾[1]，刘耀宗[1*]
(1.国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073)

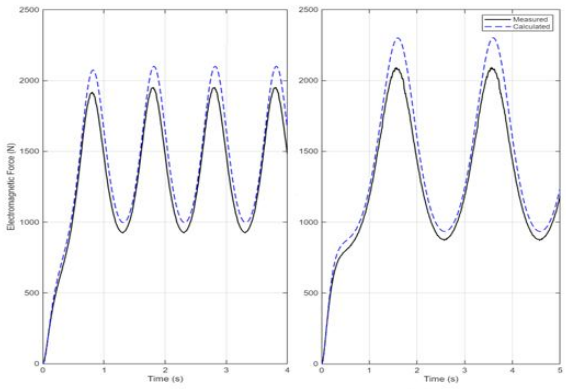
1 引言

电磁悬浮（Maglev）技术已成为高速交通领域的核心发展方向，其性能优劣取决于对电磁力静态特性与动态响应的精准刻画。现有非线性等效磁路（EMC）模型虽已纳入铁磁饱和、涡流效应及漏磁等现象对电磁力的影响，但对气隙动态时变耦合作用下的电磁力研究不足，难以适配变气隙往复运动的实际动态工况。本文提出一种以现有非线性等效磁路模型为基础，聚焦电磁力随气隙变化的扩展模型，提升了对动态气隙工况的适配性。可为高速磁浮系统的优化设计、控制器参数整定及动态性能评估提供有效的理论支撑。

2 磁轨关系研究

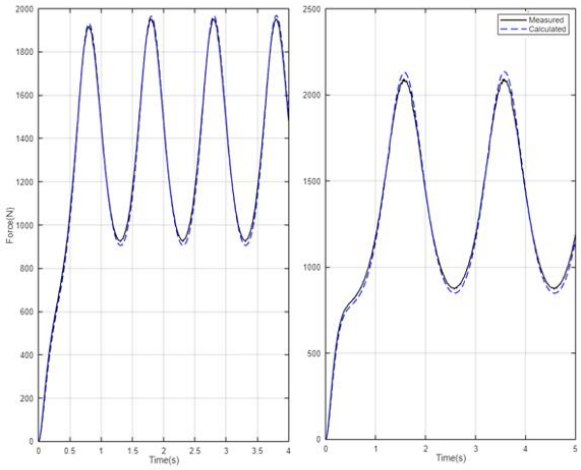
本文以原有非线性磁路模型为基础，嵌入耦合电路模型中电感的解析表达式，考虑动态气隙对于电磁力计算的影响。修改后模型可精准刻画不同周期气隙变化场景下电磁力的动态演化规律，显著提升模型对动态气隙工况的适配能力。

3 实验对比



T=1　　T=2

图 1 原模型电磁力计算



T=1　　T=2

图 2 改进模型电磁力计算

动态实验对比结果表明，恒定电压输入条件下，面对两种不同周期的气隙往复运动工况，原磁路模型的动态电磁力计算误差较大；而本文改进模型可精准追踪动态电磁力的实时变化趋势，两组工况下 RMSE 分别为 19.896 N、28.515 N，定量验证了模型在动态电磁力求解中的有效性。

4 结　论

本文通过耦合气隙时变特性与电路动态方程，拓宽了磁路模型的适用边界，实现了多周期动态气隙工况下电磁力的高精度求解，可为磁浮系统动态电磁特性分析与高性能控制算法设计提供可靠模型支撑。

参考文献：

[1] Karl Popp, Werner Schiehlen. Ground Vehicle Dynamics[M]. Springer,2010.
[2] P. Schmid, G. Schneider, F. Dignath, X,et al. Static and Dynamic Modeling of the Electromagnets of the Maglev Vehicle Transrapid.[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2021,Vol.51(1): 1-15.

收稿日期：2026 年 4 月 27 日.
基金项目：国家自然科学基金项目（编号: 52572426）
作者简介：曾启瑾(1999－)，男，湖南省怀化市，博士研究生，主要从事电磁悬浮与推进的研究；
通信方式：1582159483@qq.com、联系电话：13367450579

文章编号：484-023

基于复矢量非奇异快速终端滑模观测器的无感测速定位方法

邓沛[1]，李杰[1]，陈强[1]，刘琦[1]，金玉鑫[1]，顾世杰[1]，王子豪[1]
(1.国防科技大学 智能科学学院，湖南 长沙 410073)

1 引言

基于非奇异快速终端滑模观测器(NFTSMO)的永磁同步电机无传感器定位测速方法具有鲁棒性强、收敛速度快等优点，但是存在空间各向异性与过零畸变等问题。针对这些问题，本文提出了一种结合跟踪微分器(TD)和改进非奇异快速终端滑模观测器的无感测速定位方法。该方法通过重构圆形切换控制律，实现复平面内控制力的平滑投影。结合跟踪微分器，增强了观测器的鲁棒性，为无传感器测速定位提供理论与工程参考。

2 正　文

2.1 基于 NFTSMO 的无感控制及缺陷分析

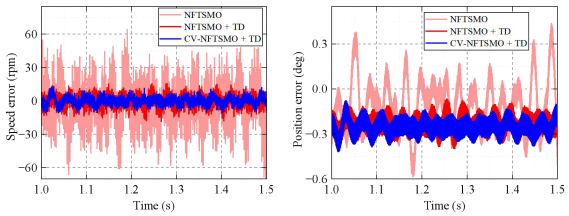
构建基于传统 NFTSMO 的电机反电动势观测模型，并深入剖析其标量控制架构的底层缺陷。分析指出，单轴独立切换控制律在复平面内存在空间各向异性，误差过零时会引发非光滑增益突变。该畸变机制自发激发出低频次生谐波并污染观测信号，进而导致速度估算产生明显的周期性抖振，严重制约了系统的稳态观测精度。

2.2 基于复矢量重构的各向同性切换 NFTSMO

提出一种基于复矢量重构的各向同性切换观测策略（CV-NFTSMO）。通过在复数域降维重构系统模型，并提取滑模面空间总模长，设计了具备旋转对称性的圆形切换控制律，从机理上消除了过零增益突变。此外，引入非线性跟踪微分器，在滤除高频噪声的同时实现速度平滑提取。

2.3 仿真与实验验证

基于 DSP 硬件平台，对纯 NFTSMO、NFTSMO+TD 与所提 CV-NFTSMO+TD 进行了多工况消融对比实验。结果表明，复矢量策略实现了平滑的圆形控制轨迹，将反电动势 THD 由 6.51% 降至 1.25%，显著抑制了转速抖振。在电感参数失配与阶跃变速工况下，新算法的速度观测误差 RMSE 降低超 23%，验证了其在复杂工况下的高精度与强鲁棒性。



a 速度误差　　b 位置误差

1 匀速工况下电机观测结果

3 结　论

本文针对 SPMSM 无感控制中标量架构的底层缺陷，提出基于复矢量重构的 CV-NFTSMO 策略。该方法构建了各向同性圆形切换流形，从机理上消除了增益突变与内生次生谐波。新算法将反电动势 THD 显著降至 1.25%，大幅抑制了稳态转速抖振；在参数失配与转速阶跃等严苛工况下，动态超调量缩减逾 27%，展现出卓越的强鲁棒性。

参考文献 (References)：

[1] Y. Li, et al., "Novel cascade sliding mode control of loader electro-hydraulic systems based on improved extended state observers," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 72, no. 12, pp. 14314-14324, 2025.

[2] A. Dòria-Cerezo, J. M. Olm, D. Biel and E. Fossas, "Sliding Modes in a Class of Complex-Valued Nonlinear Systems," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 66, no. 7, pp. 3355-3362, July 2021.

[3] Yuxin Jin, Jie Li, Mingxin Liu, et al. Sensorless control for high-speed linear synchronous motor based on a deadbeat predictive observer[J]. Mechatronics, 2026, Vol. 117: 103508.

收稿日期：2026 年 04 月 30 日.

基金项目：无.

作者简介：邓沛(2003－)，女，湖南娄底人，硕士研究生，主要从事电机无感测速定位研究；通信方式：E-mail: dengpei24@nudt.edu.cn、联系电话：18890357063

文章编号：484-024

面向电磁悬浮系统的 RISE 控制算法设计

李悦欣[1]，鲍文涛[1]，张学华[1],周丹峰[1]，王连春[1]，李杰[1]
(1.国防科技大学 智能科学学院，湖南 长沙 410073)

1 引言

磁悬浮系统凭借非接触驱动、低摩擦、低噪声等优良特性，具备广阔的工程应用场景[1][2]。针对磁悬浮系统存在的强非线性、参数摄动及外部扰动问题[3]，本文构建非线性动力学模型，克服了传统线性化模型仅可实现局部稳定的局限性。依托三阶非线性动力学模型与反步设计架构，提出一种递归型鲁棒误差符号积分（RISE）控制策略。该控制器可有效融合系统先验模型信息，精准补偿外部力扰动与电磁集总不确定性，确保闭环控制系统稳定运行。基于全尺寸磁悬浮试验平台开展对比试验，测试结果表明，所提控制方法稳态误差更小、抗扰动鲁棒性优异，且超调量更低。

2 正　文

2.1 磁悬浮悬浮系统建模

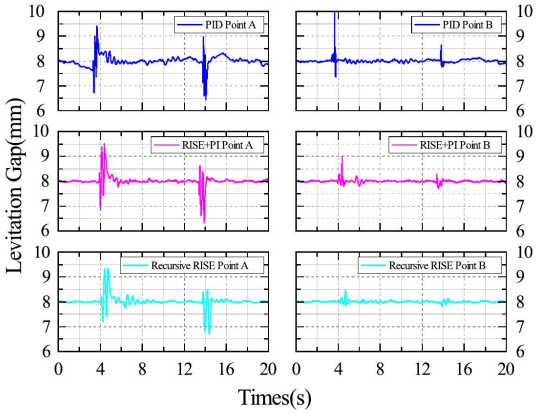
构建磁悬浮系统的三阶非线性动力学模型，同时考虑外部力扰不确定性和集总电磁扰动不确定性。建模摒弃了传统在平衡点泰勒展开的线性化假设，更能反应系统的真实响应。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + \mathrm{g} + d_2 \\ \dot{x}_3 = -\dfrac{\sqrt{-x_3}}{\sqrt{Km}}u - \dfrac{Rx_1x_3}{K} + d_3 \end{cases}$$

其中，$x_1 = \delta$；$x_2 = \dot{\delta}$；$x_3 = -\dfrac{K}{m}\left|\dfrac{i}{\delta}\right|^2$；$K = \dfrac{\mu_0 N^2 A}{4}$。

2.2 基于过轨道接缝干扰的实验验证

进行过轨道接缝干扰的实验验证，以模拟磁浮列车实际运行经过轨道接缝时所承受的瞬态冲击，轨道接缝位于两个悬浮支点之间（左侧悬浮支点 A 与右侧悬浮支点 B）。试验过程中，列车先向右行驶，使左侧悬浮支点 A 从左至右经过接缝，模拟下台阶冲击工况；随后列车向左行驶，使同一悬浮支点 A 从右至左再次经过该接缝，模拟上台阶冲击工况。和间隙环外环-电流环内环的级联 PID 算法等经典算法进行仿真对比，实验结果如图 1 所示，所提算法的实验效果最好。



1 在过轨道接缝干扰下递归 RISE 算法的响应性能

3 结　论

本文针对磁悬浮系统设计一种递推鲁棒积分符号误差（RISE）控制算法。该控制器基于悬浮系统三阶非线性动力学模型，依托反步递推架构完成设计，可保证闭环系统渐近稳定，并有效抑制参数摄动、未建模动态及外界干扰构成的集总不确定性。试验结果验证了该算法的有效性与可行性。

参考文献（References）：

[1] Xiang Wu,Ke Xu,Qun Lu,et al. Disturbance Rejection Control for Magnetic Levitation System With Nondifferentiable Uncertainties and Measurement Noise[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2025,Vol.74: 1-11.

[2] 曹泽华,杨杰,胡海林. 单点磁悬浮系统自抗扰自适应控制[J]. 哈尔滨工业大学学报,2024,56(8): 86-93.

[3] Danfeng Zhou,Qing Yang,Lianchun Wang,et al. Stability and control of maglev vehicle-girder coupled system considering torsional vibration of the girder[J]. ISA transactions,2021,Vol.111: 309-322.

收稿日期：2026 年 05 月 09 日.

基金项目：无.

作者简介：李悦欣(2003－)，男，江西吉安人，博士研究生，主要从事磁悬浮控制；电机控制

方式：E-mail: liyuexin25@nudt.edu.cn、联系电话：18720649536

文章编号：484–025

面向桥轨刚度突变的磁悬浮列车切换控制方法

李志鑫[1]，徐园平[1]，金超武[1]，周瑾[1]
(1.南京航空航天大学 机电学院，江苏省 南京市 邮编 210016)

1 引言

磁悬浮列车经过柔性桥梁时，桥轨刚度突变易引发悬浮气隙波动及车桥耦合振动，降低悬浮控制系统稳定性。传统固定参数控制器难以适应桥轨与路轨间差异显著的动力学特性，而针对不同工况配置相应控制参数虽能有效抑制振动、提高系统稳定性，但控制参数切换过程中易产生瞬态冲击与位移振动。为此，本文提出一种结合状态重置与插值平滑的切换方法，减弱切换引起的振动，提高系统切换过程的平稳性与稳定性。

2 切换控制

如图 1 所示，利用状态重置技术，通过补偿器在切换瞬时预调离线控制器状态，使其输出接近在线控制器输出。通过平滑插值，在过渡期内通过增益调节，使旧信号平滑衰减、新信号稳步增强，解决状态重置可能存在的瞬态波动问题。

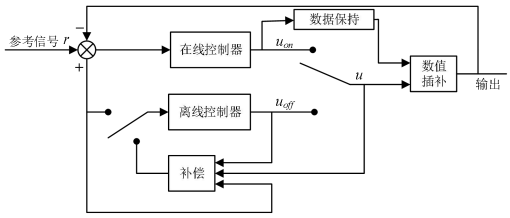


图 1 切换控制方法示意图

2.1 状态重置预补偿

核心思想：切换前，把离线控制器内部状态调整到接近在线控制器。

$$\Delta u = f(u1, u2), u(t) = u_2(t) + \Delta u$$

u_1与u_2分别为离线与在线控制器输出，Δu为输出补偿，u为实际输出。

2.2 指数型平滑切换

构造如下指数型平滑插值控制律：

$$u(t) = u_1 e^{-\lambda t} + u_2(1 - e^{-\lambda t})$$

其中，u_1与u_2分别为离线与在线控制器输出，λ为平滑因子。

2.3 仿真验证

采用两组不同 PID 参数，在 4s 时进行导轨切换，图 2 为固定控制参数，控制参数直接切换以及带切换补偿的切换控制仿真图，切换补偿效果明显。

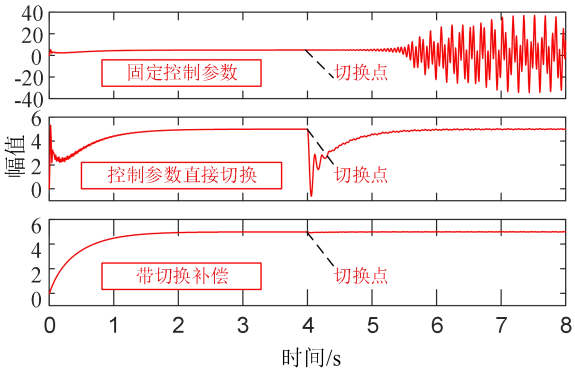


图 2 切换控制仿真

3 结论

结果表明，所提出的切换控制及补偿算法能够抑制桥轨过渡区车桥耦合振动，减小控制切换引起的位移抖动，提高悬浮系统稳定性。

参考文献（References）：

[1] 赵颖,付俊,赵军.切换系统的无扰切换控制及其在航空发动机中的应用[J].自动化学报,2020,46(10):2165-2176.

[2] Zhao Y, Zhao J. Event-triggered bumpless transfer control for switched systems with its application to switched RLC circuits[J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 98(3): 1615-1628.

收稿日期：2026 年 5 月 15 日．•

基金项目：项目名称（编号）；项目名称（编号）．

作者简介：李志鑫(2002－)，男，籍贯(江西省、上饶市/鄱阳县)，硕士研究生，主要从事磁悬浮的研究；通信方式：E-mail: sx2405140@nuaa.edu.cn

文章编号：484–026

磁浮列车情感智能补偿的终端滑模悬浮控制

李凤恺[1,3]，徐俊起[2,3]，陈琛[2,3]

（1. 同济大学 交通学院，上海 201804；2. 同济大学 磁浮交通工程技术研究中心，上海 201804；3. 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海 201804）

1 引　言

常导高速磁浮列车电磁悬浮系统易受载荷变化、轨道不平顺等扰动影响，导致间隙控制性能下降[1]．滑模控制虽具有较强鲁棒性，但仍依赖扰动先验与保守增益设计，在未知动态补偿和抖振抑制方面存在不足[2]．因此，有必要研究兼具快速收敛、在线补偿和工程可实现性的智能鲁棒悬浮控制方法．

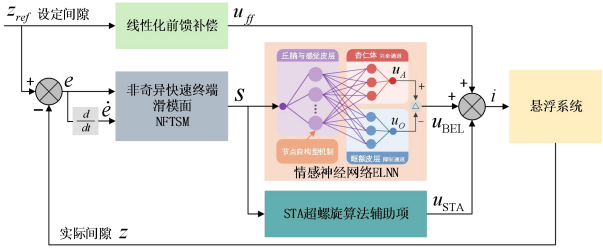
2 控制设计

2.1 脑情感学习神经网络（BELNN）

构建基于脑情感学习神经网络（BELNN）的在线补偿模块，网络采用 Hermite 正交多项式激活函数，并通过杏仁核—眶额皮层双通道输出逼近未知动态；同时引入节点生长与剪枝机制，使网络规模随悬浮误差状态自适应调整，可兼顾补偿精度与实时性．

2.2 复合控制器设计

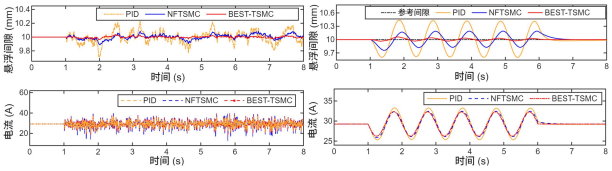
在非奇异快速终端滑模框架下，融合 BELNN 补偿与超螺旋算法（STA），形成 BEST-TSMC 控制策略，如图 1 所示．总控制电流由前馈电流、BELNN 补偿电流和 STA 辅助电流组成，分别用于静态悬浮支撑、主导不确定性补偿和残余失配校正．



1BEST-TSMC 控制器框图

3 仿真试验

基于 MATLAB/Simulink 建立高速磁浮悬浮系统模型，典型扰动工况的仿真结果如图 2 所示。结果表明，在复杂随机扰动与周期性轨道激励作用下，BEST-TSMC 均能有效减小悬浮间隙波动，相较 PID 和常规 NFTSMC 控制器表现出更强的抗扰鲁棒性与抑振能力．



a 随机力扰动响应　　b 轨道不平顺响应

2 悬浮仿真响应对比

4 结　论

本文提出了一种面向高速磁浮列车悬浮系统的智能鲁棒控制方法，该方法通过在线学习补偿与连续鲁棒校正协同作用，提升了悬浮系统在模型不确定性和外部扰动下的动态调节能力．仿真结果表明，所提方法能够有效减小悬浮间隙波动，改善系统抗扰性与抑振性能，可为悬浮系统的智能化鲁棒控制设计提供参考．

参考文献（References）：

[1] JI W, LIN X, SUN Y G, et al. Intelligent fault-tolerant control for high-speed maglev transportation based on error-driven adaptive fuzzy online compensator[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2025, 26(10): 17814-17823..

[2] WANG J X, ZHAO L, YU L. Adaptive terminal sliding mode control for magnetic levitation systems with enhanced disturbance compensation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(1): 756-766.

收稿日期：2026 年 05 月 17 日．

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目（52502449）；国家自然科学基金重点项目（52232013）．

作者简介：李凤恺(2003－)，男，山东青岛人，学士，主要从事磁浮列车悬浮控制技术的研究；通信方式：E-mail: lifengkai@tongji.edu.cn、联系电话：18562796297.

文章编号：484–027

高速磁浮列车主动导向系统的鲁棒控制研究

张璐[1,2]，翟明达[1,2]，李晓龙[1,2]，龙志强[1,2]

（1. 国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073

2. 国防科技大学电磁悬浮与推进技术湖南省重点实验室，湖南省长沙市 410073）

1 引言

常导高速磁浮列车经过平面曲线线路时需要导向系统提供主动导向力，列车的主动导向能力直接关乎列车的运行安全。高速磁浮列车因线路转弯半径小，坡度大，线路条件复杂，导致导向系统工作区间大，电流变化剧烈，系统需要在多个平衡点工作，因此导向系统的模型具有较大的不确定性。为了保障常导高速磁浮列车在各种线路条件下的稳定导向，本文建立了考虑线路曲线变化的导向系统动力学模型并设计了相应的鲁棒控制器。充分考虑横向偏移和偏航角的影响，建立二自由度导向系统动力学模型。引入鲁棒控制理论，考虑电流引起的模型不确定性，设计了 H_∞ 鲁棒导向控制器，保证导向系统具有较好的鲁棒性能。通过对导向系统在不同曲线半径、运行速度和有效载荷下的性能分析与评估，有效检验了导向系统在不同工况下的导向能力，应用鲁棒导向控制器可以实现列车在不同线路条件下的稳定导向。

2 导向系统动力学模型

导向动力学研究关注的是列车车辆系统各刚体沿轨道横向发生的相对运动情况。具体包括刚体质心沿轨道侧向的偏移和刚体相对轨道的偏航。而惯性坐标系下导向系统牵连轨道的运动可以分解为随轨道牵连坐标系的平移运动和绕垂直于轨道面的定轴转动。其中，偏移与偏航运动方程如下：

$$\ddot{\mathbf{r}}_{o2y}=\sum\mathbf{F}_y/m+\kappa V^2\cos\theta \tag{1}$$

$$\mathbf{I}_z\ddot{\alpha}=\sum\mathbf{M}_z-\mathbf{I}_z\dot{\kappa}V^2\cos\theta \tag{2}$$

3 鲁棒控制器设计与仿真

导向系统的不确定性主要是由静态工作电流的较大变化引起的，静态导向间隙在大部分情况下都基本保持不变。当导向系统处于单电磁铁模型时，仅考虑电流引起的模型不确定性。

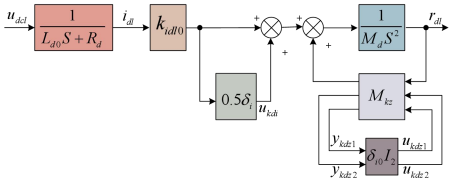


图 1 考虑扰动的导向控制系统结构

通过线性分式变换，将不确定度与导向系统分离，得到鲁棒控制系统的标准形式。导向系统鲁棒控制器设计中所采用的一般框架如图 2 所示，图中 M 为考虑了扰动的导向系统模型，K 为控制器。

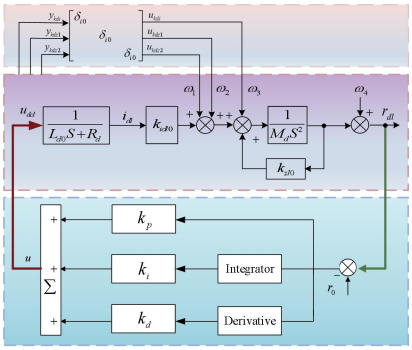


图 2 导向系统鲁棒控制器框架

4 结论

针对高速磁浮列车受到外部干扰存在撞击轨道的风险的问题，本文建立了更接近实际情况的导向动力学模型，同时考虑了偏移与偏航，设计了鲁棒导向控制器，在不同条件下能够提供稳定的导向能力，大幅增加了高速磁悬浮列车运行过程中的安全性和可靠性。

参考文献（References）：

[1] Long Z, Wang Z, Zhai M, et al. High-Speed Maglev Train's Levitation and Guidance Control [M]. Berlin: Springer Nature, 2024.

收稿日期：2026 年 02 月 04 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（编号：52402457, 52332011）

作者简介：**张璐**(2003－)，女，湖南省长沙市，博士研究生，电磁悬浮与推进；

通信方式：zhanglu21a@nudt.edu.cn、联系电话:18953884985

文章编号：484–028

基于孤立森林与改进 LSTM 的高速磁浮列车悬浮系统异常检测

周星宇[1,2]，王志强[1,2]，李晓龙[1,2]，龙志强[1,2]

（1.国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073；2.湖南省电磁悬浮与推进技术重点实验室，湖南省长沙市 410073）

1 引言

高速磁浮列车主要应用于城市群之间的长途及高速旅客运输，有效填补了轮轨列车与航空运输之间的空白。高速磁浮列车的商业化运营安全性高度依赖于悬浮系统的安全性与可靠性，但运营规模的扩大与系统复杂性的提升随之而来的是安全风险显著加剧[1]。如何主动准确监测悬浮系统状态并实现及早预警，就显得尤为关键。因而，对悬浮系统的异常检测成为近年来的重点研究方向[2]。

2 基于孤立森林与 CEEMDAN-LSTM 的高速磁浮列车悬浮系统异常检测方法

本文将高速磁浮列车悬浮系统的异常状态分为暂态异常状态和长期异常状态两大类。设计了一种融合孤立森林算法与改进 LSTM 的“双轨”异常检测框架：利用孤立森林算法分离暂态异常点，对运维策略调整提供及时反馈；采用改进 LSTM 模型捕捉系统状态的长期演化规律，进一步通过稳态度量方法区分正常与异常状态的细微差异，辨识长期异常状态，最终实现异常检测范式的全覆盖，流程如图 1 所示。

孤立森林算法通过式(1)识别暂态异常点：

$$\begin{cases} h(x)=\dfrac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}h_t(x) \\ s(x)=2^{-h(x)/c(n)} \\ c(n)=2H(n-1)-2(n-1)/n \\ H(i)\approx \ln(i)+0.5772 \end{cases} \tag{1}$$

得到的异常分数 $s(x)$取值介于[0, 1]之间，越接近于 1 说明越有可能是异常点。

长期异常状态的识别依赖于用于异常状态评判的稳态度量值。首先，基于 CEEMDAN-LSTM 时序模型准确捕捉正常状态数据的趋势和周期性。随后，引入稳态度量方法，衡量悬浮系统偏离正常悬浮间隙的程度，完成长期异常状态识别。稳态度量指标的计算如式(2)所示。

$$r_{robust}=\frac{2\sum_{i=1}^{n}\rho(e_i)}{\sum_{i=1}^{n}\rho(e_{i-1}-e_i)} \tag{2}$$

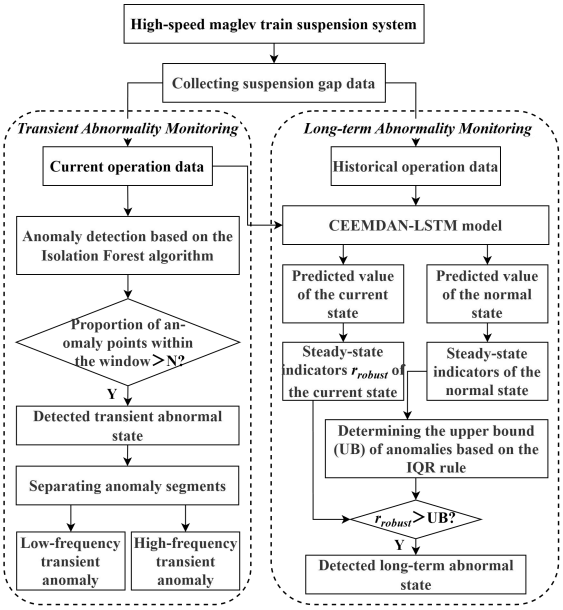


图 1 高速磁浮列车悬浮系统异常检测流程

3 结论

针对不同的悬浮系统异常状态，本文设计一种融合孤立森林算法与改进 LSTM 的“双轨”异常检测框架：利用孤立森林算法计算复杂度低、对点异常敏感度高的随机分割机制，高效分离暂态异常点，对运维策略调整提供及时反馈；采用建模能力更好、抗噪能力更强的改进 LSTM 模型捕捉系统状态的长期演化规律，进一步通过稳态度量方法区分正常与异常状态的细微差异，辨识长期异常状态，最终实现异常检测范式的全覆盖。

参考文献（References）：

[1] Y. S. Xu, Z. G. Zhao, H. Luo, et al. “Data-driven control performance degradation recovery as an extension of loop transfer recovery”, *Automatica*, vol. 174, Apr. 2025, Art. no. 112110.

[2] 龙志强, 翟明达, 王志强, 等. 磁浮列车状态监测、故障诊断与容错控制[M]. 上海：上海科学技术出版社, 2023.

收稿日期：2026 年 02 月 05 日.

基金项目：湖南省重点研发计划（课题号：2024JK2038）；国家自然科学基金（项目资助号：52402456）.

作者简介：周星宇(2001－)，男，湖南省长沙市，在读博士，电磁悬浮与推进；

通信方式：zhouxingyuzxy@nudt.edu.cn、联系电话:19921872383

文章编号：484-029

基于 CNN-BiLSTM 的悬浮系统异常检测

尚东洋[1,2]，翟明达[1,2]，李晓龙[1,2]，龙志强[1,2]

(1.国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073；2.湖南省电磁悬浮与推进技术重点实验室，湖南省长沙市 410073)

1 引言

磁浮列车对轨道交通领域意义重大，其悬浮系统稳定性直接关乎列车安全及乘客舒适度[1]。但当前该系统异常检测面临数据分析精度低、响应迟缓、难以适应复杂运行环境等诸多挑战[2]。对此，本文提出了一种基于卷积神经网络-双向长短期记忆网络的磁浮数据的异常检测方法，利用卷积神经网络提取时间序列数据中的局部特征，利用双向长短期记忆神经网络[3]捕获时间序列数据的双向动态特性。将卷积神经网络级联于双向长短期记忆网络之上，整合二者优势，从而提高对复杂序列数据的处理能力。

2 卷积双向长短期记忆网络异常检测

1D CNN 是卷积神经网络（CNN）的一种特殊形式，旨在处理序列数据或一维信号，如时间序列，音频信号或基因序列。它们在输入信号上应用卷积滤波器来提取局部特征。卷积运算如公式（1）所示。

$$y(i)=\sum_{k=0}^{N-1} w(k)\cdot x(i+k) \tag{1}$$

双向长短期记忆（BiLSTM）网络是一种特定类型的递归神经网络，它可以分析前向和后向的输入序列，从而使其能够从先前和随后的数据点中捕获上下文洞察。该架构由两个不同的 LSTM 网络组成：一个以传统的正向方式处理序列，另一个以反向序列操作。从两个方向生成的输出通常通过级联合并，以产生每个时间步长的结论性输出。其数学表达如（2）所示。

$$y_t=w_{yh}^{\rightarrow}\overrightarrow{h_t}+w_{yh}^{\leftarrow}\overrightarrow{h_t}+b_y \tag{2}$$

双向长短期记忆（BiLSTM）神经网络，擅长捕捉和记忆长期依赖关系，使其非常适合处理扩展的时间序列数据。卷积神经网络（CNN）擅长处理多个信息通道并执行局部特征提取。将卷积神经网络级联与双向长短期记忆网络之上，可以整合二者优势，从而提高对复杂序列数据的处理能力。通过这种结合，卷积层能够提取局部特征，而双向 LSTM 层可以捕捉序列中的长期依赖关系和上下文信息。其网络结构图 1 所示。

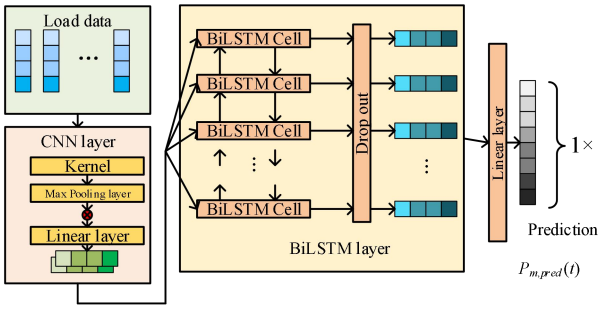


图 1 CNN-BiLSTM 网络结构图

首先卷积神经网络提取磁浮数据时间序列数据中包含的隐式特征， BiLSTM 层混合磁浮数据时间序列和特征融合的数据特性，上述特性通过全连接层，最终可以得到异常时间序列数据和其类别标签。

3 结　论

本文提出了 CNN-BiLSTM 异常检测方法，理论分析与网络结构表明，CNN 与 BiLSTM 的级联形成了“局部特征提取→全局时序建模”的协同流程，使模型能同时敏锐感知瞬态异常并综合考量系统长期状态，从而显著提升了对复杂磁浮系统运行状态的表征能力；因此，本研究构建的 CNN-BiLSTM 模型为悬浮系统异常检测提供了一种高精度、强自适应的解决方案，显著提升了对磁浮列车悬浮系统复杂运行状态的表征精度与早期异常预警能力，为保障列车安全、实现智能运维提供了有效的技术途径。

参考文献（References）：

[1] 丁叁叁等著. 时速 600 公里高速磁浮交通系统[M]. 上海：上海科学技术出版社,2022.

[2] Long Z, Wang Z, Zhai M, et al. High-Speed MaglevTrain's Levitation and Guidance Control [M]. Berlin:Springer Nature, 2024.

[3] X.Xie, "A Hybrid CNN-LSTM Architecture for Enhanced Music Genre Classification," 2024 5th International Conference on Machine Learning and Computer Application (ICMLCA), Hangzhou, China, 2024.

收稿日期：2026 年 02 月 05 日.

基金项目：国家自然科学基金（项目资助号：52402457）.；湖南省重点研发计划（课题号：2024JK2038）

作者简介：尚东洋(2002－)，男，湖南省长沙市，在读硕士，磁浮列车状态监测与故障诊断

通信方式：shangdongyang25@nudt.edu.cn、联系电话:13321433761

文章编号：484-030

高速磁浮悬浮系统固定时间预设性能控制方法

李自康[1, 2]，曾杰伟[1, 2]，李晓龙[1, 2]，龙志强[1,2]

(1. 国防科技大学 智能科学学院，湖南省长沙市 410000；2. 国防科技大学 电磁悬浮与推进技术湖南省重点实验室 湖南省长沙市 410000)

1 引 言

在磁浮列车运行过程中，悬浮电磁铁与轨道间的气隙需维持在 8-10 毫米，且相对平衡位置的允许偏差不超过 4 毫米[1]。然而，悬浮系统本质上是开环不稳定且强非线性的，易受轨道不平顺、气动扰动等外部干扰影响。悬浮控制器的控制力受车载供电电压限制，输入饱和问题未得到充分考虑，忽略该约束易导致控制性能退化甚至系统失稳。针对上述工程技术问题，提出基于固定时间预设性能滑模控制方法，实现悬浮系统在状态约束、多源外部扰动以及输入饱和下快速跟踪。

2 系统模型与控制器设计

基于搭接结构的对称性，将单点悬浮被视为高速磁浮列车悬浮系统的基本单元，选取单侧单点电磁铁模型进行分析：

$$\begin{cases}\dot{x}_1(t)=x_2(t)\\ \dot{x}_2(t)=\mathbb{C}+q(x,t)\mathrm{sat}(u)+d(t)\end{cases}\tag{1}$$

为确保高速磁浮悬浮系统平稳、精确地跟随目标间隙轨迹，将跟踪误差作为性能指标设计预设性能函数，并将其转化为悬浮间隙的跟踪轨迹约束，满足悬浮间隙的安全限制，设计如下预设性能函数约束悬浮间隙误差范围：

$$\rho(t)=\begin{cases}\left(\dfrac{T-t}{T}\right)^{\frac{1}{1-\mu}}(\rho_0-\rho_T)+\rho_T, t\le T\\ \rho_T, t>T\end{cases}\tag{2}$$

通过受约束的状态误差与预设性能函数构造一个无约束变换变量，引入带辅助函数的无约束映射，将相对误差转化为无约束变量：

$$\xi(\vartheta)=q\ln\frac{\varepsilon+\vartheta}{\varepsilon(1-\vartheta)}+(1-q)\ln\frac{\varepsilon(1+\vartheta)}{\varepsilon-\vartheta}\tag{3}$$

基于无约束变量设计满足预设性能的固定时间非奇异终端化滑模面：

$$s=\xi_2+a_1\xi_1^{[\alpha_1]}+a_2\xi_1+a_3b(\xi_1)\tag{4}$$

引入如下辅助系统补偿输入饱和：

$$\dot{\lambda}=\begin{cases}-k_1\lambda-k_2|\lambda|^{\gamma}\,\mathrm{sgn}(\lambda)+k_3\Delta u,\\ \|\lambda\|_2>\lambda_0\\ 0,\|\lambda\|_2\le\lambda_0\end{cases}\tag{6}$$

基于预设性能函数的滑模控制方法由等效控制律 u_e 与趋近控制律 u_r 组成：

$$\begin{cases}u_e=\dfrac{1}{q}\left(\ddot{x}_{1d}-\mathbb{C}+\dfrac{\dot{e}_1\dot{\rho}-e_1\ddot{\rho}}{\rho^2}\right)\\ u_r=\dfrac{1}{q}\left(\eta(-\beta_1 s-\beta_2\lambda-\beta_3|s|^{\gamma}\,\mathrm{sgn}(s))\right)\end{cases}\tag{7}$$

所构建的控制架构融合了固定时间预设性能框架与非奇异终端滑模控制的优势，通过预设性能边界对系统状态误差进行量化约束，结合非奇异终端滑模的固定时间收敛特性，有效应对轨道激励、外部负载变化及传感器噪声等多种扰动。

3 仿真分析与结论

基于上述控制策略，在时变扰动下与 PID 和 LQR 进行悬浮控制对比仿真，如图 1 所示，系统快速性、鲁棒性、抗饱和特性、快速性均得以验证，表明所提方法的有效性。

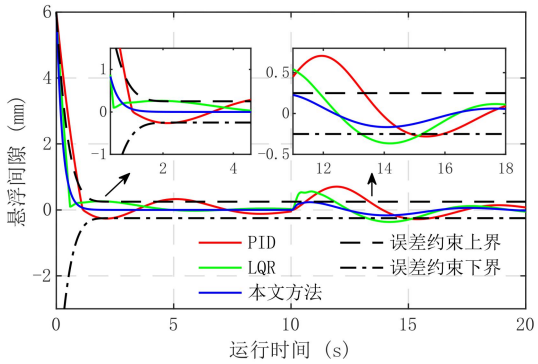


图 1 悬浮间隙响应曲线

参考文献（References）：

[1] LONG Zhiqiang, WANG Zhiqiang, ZHAI Mingda, et al. High-Speed Maglev Train's Levitation and Guidance Control[M]. Springer, 2024.

收稿日期：2026 年 02 月 06 日.

基金项目：国家自然科学基金重点项目(52572427, 52332011).

作者简介：李自康(1995－)，男，河北省石家庄市，博士研究生，主要研究方向为电磁悬浮与推进控制研究；

通信方式：544024558@qq.com；联系电话：15520706615.

文章编号：484-031

数据驱动二自由度整定的自抗扰控制方法

王浩[1,2]，窦峰山[1,2]，刘耀宗[1,2]，龙志强[1,2]
（1. 国防科技大学智能科学学院，湖南省 长沙市 410073；2. 国防科技大学电磁悬浮与推进技术湖南省重点实验室，湖南省 长沙市 410073）

1 引言

磁浮列车在运行过程中面临轨道不平顺等外部干扰，必须引入高效的抗扰控制策略以保障悬浮稳定性[1]。作为一种典型的无模型控制方法，自抗扰控制（ADRC）通过实时估计和补偿系统的“总扰动”来实现抗扰。参数整定质量直接决定了自抗扰控制的控制性能。传统的参数整定方法大多依赖专家经验或系统模型信息，往往需要反复试错或面临高计算复杂度，限制了其在磁浮领域中的应用[2]。针对 ADRC 参数整定依赖经验的局限，本文提出一种基于 FRIT 的数据驱动整定方法。该方法将 LADRC 等效为二自由度结构，根据性能指标分别建立跟踪与抗扰的参考模型，利用初始闭环数据迭代优化参数，实现了无模型化整定。磁浮系统实验验证了该方法的有效性。

2 基于 2-DOF 的 ADRC-FRIT 整定方法

将通用二阶系统 LADRC 等效为包含前置滤波器 $H(s)$ 与控制器 $C(s)$ 的二自由度结构（如图 1），基于带宽参数化方法实现了跟踪与抗扰性能的联合分析。

为了实现数据驱动的参数自整定，本文采用虚拟参考迭代整定（FRIT）方法。该方法利用单次闭环实验的输入输出数据 $[u_0, y_0]$，在离线状态下计算“虚拟参考信号”和“虚拟扰动信号”，构建包含跟踪性能和抗扰性能的综合代价函数：

$$J=\frac{1}{2N}E\{\sum_{t=1}^{N}[\tilde{y}_d(\rho_i,t)-y_0(t)]^2+\sum_{t=1}^{N}[\tilde{y}_r(\rho_i,t)-y_0(t)]^2\}$$

其中，ρ 为待优化的控制器参数（包括控制器带宽 ω_c 和观测器带宽比例 α ）。通过梯度下降法迭代求解该代价函数的极小值，即可获得逼近期望参考模型特性的最优控制参数。

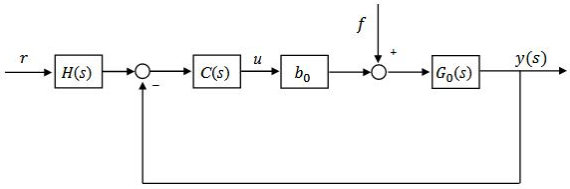


图 1　LADRC 的等效 2-DOF 结构框图

3 悬浮实验验证

本文以磁浮列车悬浮控制系统为对象验证所提算法。利用双电磁铁实验平台进行物理实验，该平台包含悬浮电磁铁和干扰电磁铁。使用一组保守的初始参数进行闭环测试以获取数据，然后利用本文提出的 2-DOF FRIT 算法进行离线迭代整定。将整定后的 ADRC 控制器与初始 ADRC 及传统 PID 控制器进行对比。在施加阶跃扰动（3A 电流）和周期性三角波扰动的情况下，整定后的 ADRC 控制器在抗扰性能上表现最优：其超调量显著降低，恢复时间最短，积分误差指标（ITAE）低于对比组。

4 结　论

针对磁浮系统等抗扰性能要求高的对象，本文提出的基于 2-DOF FRIT 的数据驱动 ADRC 整定方法，能够仅利用单次闭环实验数据，同时优化系统的跟踪性能和抗扰性能。实验结果表明，该方法能有效解决 ADRC 参数整定依赖经验的问题，显著提升磁浮系统在面对外部动态干扰时的鲁棒性和控制精度.

参考文献 (References)：

[1] LONG Zhiqiang, WANG Zhiqiang, ZHAI Mingda, et al. High-Speed Maglev Train's Levitation and Guidance Control[M]. Springer, 2024.
[2] 丁叁叁等著. 时速 600 公里高速磁浮交通系统[M]. 上海：上海科学技术出版社, 2022.

收稿日期：2026 年 02 月 08 日.
基金项目：国家自然科学基金项目（52572426）；国家自然科学基金项目（52332011）.
作者简介：王浩(1999－)，男，河南省信阳市，博士研究生，主要从事电磁悬浮与推进技术的研究；通信方式：E-mail: wanghao_wh@nudt.edu.cn、联系电话：18145198931

文章编号：484-032

基于 PSO-ADRC 常导高速磁浮列车导向控制

车泓欣[1,2]，王志强[1,2]，许雲淞[1,2]，龙志强[1,2]

(1. 国防科技大学 智能科学学院，湖南省长沙市 410073；

2. 电磁悬浮与推进技术湖南省重点实验室，湖南省长沙市 410073)

1 引言

磁悬浮列车凭借无摩擦、低噪声、小转弯半径和低维护成本等优势，已成为交通发展的重要方向。相较于中低速磁浮列车主要依赖悬浮系统被动提供导向力，高速磁浮列车为实现曲线高速安全、平稳通过，必须配备独立的主动导向系统。该系统结构复杂，实时产生并调节侧向力以精确校正车轨间的横向偏移。因此，高速磁浮列车导向系统的稳定性对列车安全至关重要，在系统精确运行中起着关键作用[1]。

2 导向动力学模型

本节主动导向系统的模型在考虑横向偏移基础上，还考虑横向偏航，形成导向搭接系统的二自由度动力学综合模型。

根据偏移方程以及偏航方程推导出导向搭接系统的综合动力模型为：

$$\begin{cases} m\Delta\ddot{r} = \left(F_{rf} - F_{lf} + F_{rb} - F_{lb}\right) + F_d - mg\sin\theta \\ I_z\ddot{\alpha} = \left(F_{lf} + F_{rb}\right)\cdot r_2 - \left(F_{lb} + F_{rf}\right)\cdot r_1 + M_d \end{cases} \tag{1}$$

其中，$F_{rf}, F_{rb}, F_{lf}, F_{lb}$ 分别代表右侧前端、右侧后端、左侧前端、左侧后端的导向电磁力；F_d 为横向干扰力。I_z 代表导向系统的转动惯量；$\ddot{\alpha}$ 为偏航角加速度，M_d 为干扰力矩。

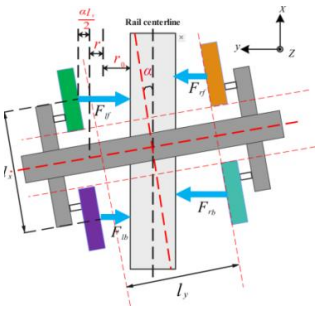


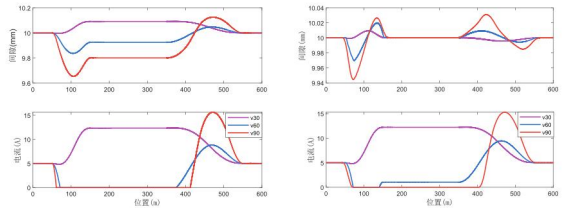
图 1 导向搭接系统受力及合力矩示意图

3 PSO-ADRC 算法

由于 ADRC 存在参数整定困难的问题，因此引入 PSO 算法对 ADRC 的状态观测（ESO）和非线性误差反馈控制律（NLSEF）的主要参数进行整定。其中，ESO 的关键参数包括观测器参数 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$，NLSEF 的参数主要包括非线性函数中的增益系数 β_1, β_2。

4 仿真结果

仿真轨道线路采集自同济大学高速磁浮试验线中一段 600 m 曲线，根据曲率不同可以分为直线段、缓和曲线和圆曲线段。仿真得到不同速度下 ADRC 与 PID 控制器在通过曲线时导向间隙及导向电流的动态响应特性，如图 2 所示：



(a)PID　　(b) ADRC

图 2 导向间隙和导向电流曲线图

在导向电流控制方面，PID 与 ADRC 效果接近，响应平稳且稳态值相当；但在间隙调节上，ADRC 优势明显。30 km/h 时，ADRC 可将间隙稳定控制在 0.01 mm 内，PID 存在响应滞后和稳态误差。随着速度升至 60 km/h 和 90 km/h，PID 过冲和间隙波动显著加剧，ADRC 则始终保持较小波动和较短调节时间，高速下间隙波动仍控制在 0.1 mm 以内。

5 结束语

本文的 PSO-ADRC 算法较传统 PID 表现出优异的鲁棒性与控制性能，为磁浮列车导向系统的稳定运行具有重要意义。

参考文献 (References)：

[1]龙志强, 窦峰山, 王志强, 等. 高速磁浮悬浮导向控制技术现状及展望[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 78-88.

收稿日期：2026 年 02 月 08 日.

基金项目：湖南省优秀青年基金：高动态系统电磁主动控制与性能实时优化方法（2023JJ20053）

作者简介：车泓欣(2001－)，男，湖南省长沙市，博士研究生，主要从事高速磁浮列车悬浮、导向控制理论与应用研究；

通信方式：chehongxin20@nudt.edu.cn、联系电话:13236825827

文章编号：484–033

常导磁浮列车悬浮系统预测性性能评估

田雨光[1,2]，曾杰伟[1,2]，王志强[1,2]，龙志强[1,2]

（1. 国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073

2. 国防科技大学电磁悬浮与推进技术湖南省重点实验室，湖南省长沙市 410073）

1 引言

面对商业化磁浮列车运营对严苛安全标准的诉求，开展准确有效的控制系统性能评价，不仅能够定量分析控制回路的运行状态与参数调整效果，更是指导工程人员进行系统监测、故障诊断及科学运维的核心依据。然而，传统的最小方差等线性评价基准在应对磁浮悬浮系统显著的非线性特征时容易产生估计偏差，传统的循环神经网络（RNN）难以有效解耦这些复杂的时序依赖关系，长短时神经网络（LSTM）往往面临长期依赖丢失和计算效率低下的问题。本文考虑常导磁浮悬浮系统多变量传感器数据中存在的非线性耦合与多尺度周期性特征，设计了基于 TimesNet 的时序二维变化建模架构，充分解耦传感器数据中的非线性动态。同时引入最小香农熵作为广义性能基准，构建了一套适用于非高斯随机扰动环境的数据驱动控制性能评价框架。

2 基于最小熵的预测性性能评估方法

TimesNet 由 TimesBlock 块以残差方式堆叠而成，核心思想是将一维时间序列转化为二维张量，从而在二维空间中捕捉时序变化，如图 1 所示。

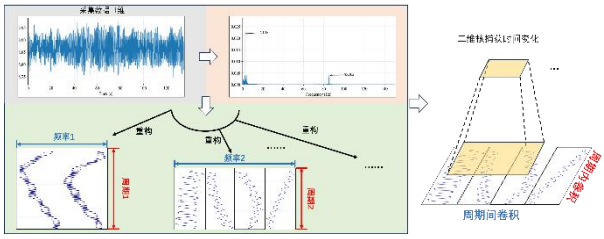


图 1 时序二维预测模型流程示意图

将训练好的 TimesNet 模型在测试集上的预测输出与实际采集的悬浮间隙信号进行差分，获得反映系统动态调节误差与随机扰动特性的残差序列：

$$e(t) = \hat{y}(t) - y(t) \tag{1}$$

由于磁浮轨道不平顺及气动载荷往往呈现显著的非高斯与长尾分布特征，残差序列 $e(t)$ 的概率密度函数（PDF）形状直接反映了控制系统对不确定性扰动的抑制能力。PDF 的峰值处越尖锐，表明系统稳态精度越高。为此，本文引入香农信息熵作为广义性能评价指标。对于残差变量，其微分熵定义为：

$$H(E) = -\int_{-\infty}^{\infty} p(e)\ln p(e)de \tag{2}$$

其中 $p(e)$ 为通过核密度估计方法从残差序列中拟合得到的概率密度函数。

使用实测数据验证预测性能结果如图 2 所示。

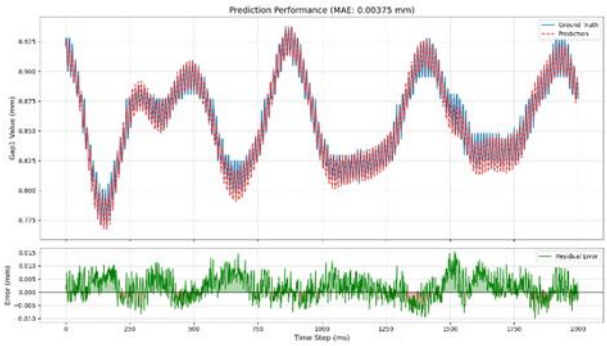


图 1 悬浮间隙预测跟踪性能示意图

3 结论

针对常导磁浮列车悬浮系统在复杂工况下表现出的强非线性、多变量耦合及非高斯扰动特性，传统方法适用性受限的问题。本文提出了一种基于 TimesNet 深度时序建模的数据驱动最小熵性能评价方法，在不同运行条件下均能提供更具鉴别力的性能评价结果，为常导磁浮列车的智能运维与安全评估提供了理论依据与技术支撑。

参考文献 (References)：

[1] Long Z, Wang Z, Zhai M, et al. High-Speed Maglev Train's Levitation and Guidance Control [M]. Berlin: Springer Nature, 2024.

收稿日期：2026 年 02 月 08 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（编号：52572427，52402456）

作者简介：**田雨光**(2001－)，男，湖南省长沙市，博士研究生，电磁悬浮与推进控制；

通信方式：tianyuguang19@nudt.edu.cn、联系电话:15575100216

文章编号：484-034

考虑轨道不平顺和模型不确定的高速磁浮列车悬浮系统复合分层抗扰控制

杨洋[1,2]，戴春辉[1,2]，王志强[1,2]，龙志强[1,2]

（1. 国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073

2. 国防科技大学电磁悬浮与推进技术湖南省重点实验室，湖南省长沙市 410073）

1 引言

随着高速磁浮列车运行速度的提升，耦合效应和模型不确定性进一步加剧了轨道不平顺对悬浮系统稳定性与平稳性的影响。因此，具备强鲁棒性的悬浮控制器对于列车安全稳定运行至关重要。本文针对搭接结构的控制问题，提出了一种复合分层抗扰动控制（CHADC）方案。首先，利用关节结构的先验模型信息，设计了一种基于全驱动系统（FAS）方法的非线性控制策略，以实现关节结构的解耦与线性化。随后，在 FAS 控制框架内设计了两个扩展状态观测器（ESO），通过间隙传感器和加速度计的信号来提取轨道不平顺及总扰动的信息。最后，在标称控制之外增设了两条补偿控制环路，以实现快速轨迹跟踪并有效抑制总扰动。通过李雅普诺夫稳定性理论分析了扩展状态观测器的收敛性和闭环系统的稳定性。仿真结果表明，所提出的控制方案表现出卓越的控制性能，并且对模型参数的变化不敏感。

2 搭接结构悬浮系统模型

搭接结构左右悬浮单元受到的轨道不平顺可以等效为作用在悬浮间隙处的非匹配扰动(p_1, p_2)。设搭接结悬浮单元动力学模型为[1]：

$$\begin{cases} \dot{x}_{11} = x_{12} + \dot{p}_1 \\ \ddot{x}_{11} = f_1(x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22}) - \dfrac{K_e u_{el}^{\ 2}}{m_e x_{11}^2} + \varphi_d^1 + \varphi_p^1 \\ \dot{x}_{21} = x_{22} + \dot{p}_2 \\ \ddot{x}_{21} = f_2(x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22}) - \dfrac{K_e u_{er}^{\ 2}}{m_e x_{21}^2} + \varphi_d^2 + \varphi_p^2 \end{cases}$$

其中，$\varphi_p^i, i = 1,2$ 是由轨道不平顺激励产生的动态，它们是 p_i，$\dot{p}_i$，$\ddot{p}_i$ 的线性组合。$f_i(x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22})$ 表示搭接结构已知模型，φ_d^i 表示外部扰动和模型不确定。

3 复合分层抗扰制器设计与仿真

如图 1 所示为搭接结构悬浮系统的复合分层抗扰控制框图。首先根据模型(1)通过 FAS 方法设计搭接结构的解耦和线性控制反馈控制。然后设计 NESO 和 LESO 对轨道不平顺信息和总扰动进行观测。最后将扰动估计指反馈到 FAS 控制框架中进行扰动抵消。仿真实现如图 2 所示

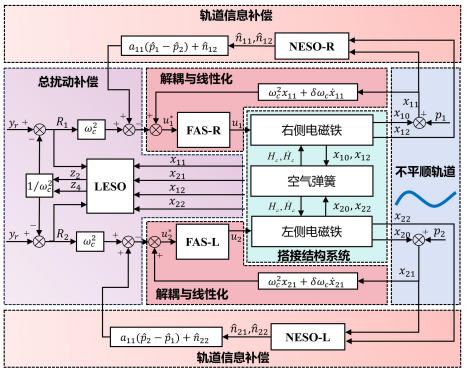


图 1 复合分层抗扰控制框图

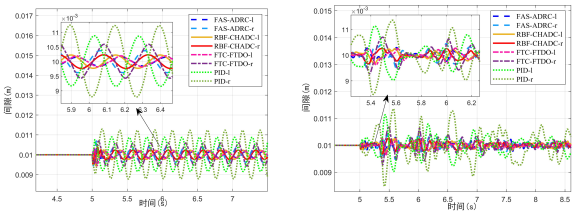


图 2 搭接结构轨道不平顺仿真

图 2 中分别用周期性和随机性轨道不平顺对搭接结构进行激励。可以看出所提出的控制方法能够实现对不平顺轨道的快速跟踪和对扰动有效抑制。

4 结论

针对高速磁浮列车受到外部干扰，模型不确定和轨道不平顺，本文提出了一种复合分层抗扰控制方法。该方法利用了模型的先验知识，间隙传感器和加速的信息设计了多回路反馈控制，实现了对轨道的快速跟踪和扰动的抑制，并且其控制性对模型参数变化不敏感。

参考文献 (References)：

[1] Long Z, Wang Z, Zhai M, et al. High-Speed Maglev Train's Levitation and Guidance Control [M]. Berlin: Springer Nature, 2024.

收稿日期：2026 年 02 月 08 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（编号：52402456, 52332011）

作者简介：杨洋，男，湖南省长沙市，博士研究生，电磁悬浮与推进；

通信方式：yangy2022@nudt.edu.cn、联系电话:15116255511

文章编号：484-035

面向复杂攻击的磁浮车载网控系统安全评估方法

宋鹏飞[1,2]，许雲淞[1,2]，贺光[1,2]，龙志强[1,2]

(1. 国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073

2. 国防科技大学电磁悬浮与推进技术湖南省重点实验室，湖南省长沙市 410073)

1 引言

磁浮车载网控系统正向工业以太网演进，虽提升通信性能，但也引入网络安全风险。传统封闭防护手段难以应对开放网络环境下的复杂攻击。攻击者可篡改传感器数据、伪造控制指令[1][2]，威胁列车运行安全。为此，本文提出一种面向复杂攻击的安全评估方法，实现攻击检测与安全评估的结合。

2 面向复杂攻击的检测方法

利用历史状态窗口 $\mathcal{H}(k)=\{x(k-L),\dots,x(k-1)\}$构建预测器：

$$\begin{cases}\hat{x}(k|k-1)=f(\mathcal{H}(k),u(k-1))\\ \hat{y}(k|k-1)=C\hat{x}(k|k-1)\end{cases} \tag{2.1}$$

定义残差$r_H(k)=\tilde{y}(k)-\hat{y}(k\mid k-1)$，构建检测统计量：

$$\chi_H(k)=r_H^T(k)\Sigma_H^{-1}r_H(k)] \tag{2.2}$$

其中Σ_H为残差协方差矩阵。检测规则为：

$$\delta(k)=\begin{cases}1, & \text{if } \chi_H(k)>\gamma_H\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases} \tag{2.3}$$

阈值γ_H由虚警概率通过卡方分布确定。

3 安全评估方法研究

建立多维度安全评估指标体系，包括检测性能指标、系统鲁棒性指标等。在时间窗口$[k-T_w,k]$内，系统的累积控制性能指标$J(k)$定义为：

$$J(k)=\sum_{i=k-T_w}^{k}[x^T(i)Qx(i)+u^T(i)Ru(i)] \tag{3.1}$$

其中J_{th}为预设的性能阈值，定义综合安全评分：

$$S(k)=\alpha_1S_d(k)+\alpha_2S_r(k)+\alpha_3S_p(k) \tag{3.2}$$

其中各分项得分定义为：

$$S_d(k)=\exp\left(-\frac{1}{T_w}\sum_{i=k-T_w}^{k}\frac{\chi_H(i)}{\gamma_H}\right) \tag{3.3}$$

$$S_r(k)=\exp\left(-\frac{1}{T_w}\sum_{i=k-T_w}^{k}\frac{e_x(i)}{e_{x,th}}\right) \tag{3.4}$$

$$S_p(k)=\exp\left(-\frac{J(k)}{J_{th}}\right) \tag{3.5}$$

完整的攻击检测以及评估方法如图 1 所示：

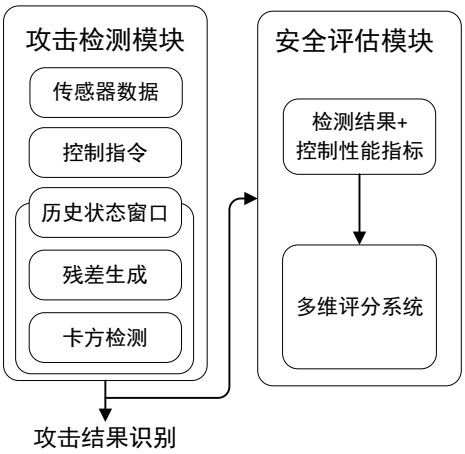


图 1：车载网控系统安全评估框架

4 结论

本文提出了面向复杂攻击的磁浮车载网控系统安全评估方法。通过建立基于历史一致性的检测方法，构建安全评估指标体系，为磁浮列车网控系统提供了系统化安全保障方案。未来将探索自适应检测阈值优化、多传感器融合检测主动防御策略。

参考文献（References）：

[1] Liang Xin,Zhi-Qiang Long. A Learning-Based Passive Resilient Controller for Cyber-Physical Systems: Countering Stealthy Deception Attacks and Complete Loss of Actuators Control Authority[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica,2025,12(7): 1368-1380.

[2] 杨彪, 贺光, 辛亮, 等. 基于分布式检测与告警切换的多传感器 CPS 安全状态估计[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(11): 2121-2130.

收稿日期：2026 年 02 月 08 日.

基金项目：国家重点研发计划课题（2023YFB4302102），国家自然科学基金“叶企孙”基金重点项目（2023.01-2026.12）

作者简介：**宋鹏飞**(2000－)，男，湖南省长沙市，硕士研究生，智能装备安全控制技术；

通信方式：songpengfeinudteducn@nudt.edu.cn、联系电话:15225010702

文章编号：484–036

低真空管道运输系统悬浮导向方案研究

刘佩兵[1,2]，丁明强[1,2]，袁菲[1]，龙志强[2,3]

（1.西北机电工程研究所，陕西省咸阳市 712099；2.国防科技大学 智能科学学院，湖南省长沙市 410073；

3.国防科技大学装备状态感知与敏捷保障全国重点实验室，湖南省长沙市 410073）

1 引言

在常规大气环境中，磁浮列车运行速度超过 400–500 km/h 后，空气阻力和气动能耗急剧增加，真空管道运输通过降低介质密度，为突破这一物理约束提供了根本解决途径。目前，真空管道交通采用的多种悬浮与导向技术路线各具特点，同时在成本、控制复杂度和工程适用性等方面仍面临不同挑战[1]。因此，系统分析并比较各类悬浮导向方式的技术特性与关键问题，对推动真空管道交通的工程化应用具有重要意义。

2 管道运输系统悬浮导向基本方案

国内外真空管道相关的研究采用了不同的技术路线，相较于传统的磁悬浮，真空管道磁浮拥有低压、超高速两大特点，这使得其悬浮导向系统面临更复杂的运行环境与设计约束。

电磁悬浮（EMS）通过线圈通电产生磁场，与轨道形成电磁相互作用实现悬浮。慕尼黑工业大学 TUM Hyperloop 在真空管道中采用 EMS 并结合主动控制，实现了可载客示范验证。由于电磁吸力随悬浮间隙增大而迅速衰减，EMS 本质上属于静态不稳定系统，电磁力呈现显著非线性特性，需依赖高速、高精度闭环控制维持稳定运行。真空环境进一步提高了系统对控制带宽、响应速度和鲁棒性的要求。

永磁电动悬浮（EDS-PM）利用永磁体与轨道导体相对运动感生涡流产生悬浮力，具有技术成熟、成本较低等优势，被 Virgin Hyperloop 等项目采用。由于系统本征阻尼较小，悬浮过程易产生振荡，需要通过附加阻尼或控制手段提升系统稳定性，以提高运行安全性和乘坐舒适性。

超导电动悬浮（EDS-SC）采用超导磁体作为强磁场源，依据楞次定律实现被动悬浮，在高速条件下可产生较大的悬浮力和导向力。我国“高速飞车”项目已在低真空环境中验证了其可行性。相较永磁体，超导磁体悬浮间隙和承载能力较大，但其固有阻尼能力有限，振动控制较为困难。此外，低温制冷系统存在失效风险，磁体失超可能导致悬浮导向功能丧失，需通过冗余设计和降级运行策略保障系统安全。

高温超导钉扎悬浮（HTS）基于磁通钉扎效应，高温超导体在外磁场中冷却至超导态后，内部缺陷形成钉扎中心，从而形成稳定的磁约束状态。该方式无需主动控制即可实现稳定悬浮，具有较高的结构稳定性。在真空环境中，其阻尼主要来源于磁滞损耗和磁通松弛过程，且随振动幅值、频率和温度变化显著，表现出较强的非线性和历史相关性，可能导致振动衰减缓慢。

3 问题与挑战

在真空环境下，气动阻尼显著降低，系统对外部扰动更加敏感，悬浮稳定性明显下降。超高速运行条件下，多自由度之间的耦合效应显著增强，气动阻尼缺失使振动难以衰减，高速运动还会将轨道不平顺等空间扰动转化为高频激励，易与车辆结构及控制系统的固有频率发生耦合。此外，悬浮导向电磁力具有显著非线性特征，进一步加剧系统耦合复杂性。轨道不平顺和磁场不均匀作为主要外部激励，在超高速条件下易引起悬浮力周期性波动，并通过磁路耦合诱发横向振动甚至共振。上述因素使悬浮导向控制面临多变量、强非线性及时变参数等问题，显著增加了系统设计、稳定性分析与工程实现的难度，构成真空管道磁浮交通亟需解决的关键挑战。

参考文献（References）：

[1] 张卫华,邓自刚,毕海权,等. 低真空超高速轨道交通研究进展与思考[J]. 机车电传动,2025,(1): 1-13.

收稿日期：2026 年 02 月 08 日.

基金项目：国家重点研发计划课题（2023YFB4302102）

作者简介：刘佩兵(2002－)，男，宁夏吴忠市，研究硕士生，超导电动悬浮技术；

通信方式：liupeibing24@nudt.edu.cn、联系电话:118795132925

文章编号：484-037

高隐蔽攻击下的磁浮列车网控系统安全防护研究

陈翔[1,2]，贺光[1,2]，许雲淞[1,2]，龙志强[1,2]

(1. 国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073

2. 国防科技大学装备状态感知与敏捷保障全国重点实验室，湖南省长沙市 410073)

1 引言

磁浮车载网控系统正向工业以太网演进，通信性能显著提升，但也伴随高隐蔽攻击的风险[1,2]。相比传统封闭环境，开放网络更易被攻击者利用，实施不易察觉的数据篡改与控制指令伪造，严重威胁行车安全。现有防护手段在高隐蔽场景下难以奏效。为此，本文提出一种面向高隐蔽攻击场景的安全防护方法，将攻击检测与安全控制有机融合，实现对高隐蔽攻击的识别与系统的安全控制。

2 攻击建模方法

根据磁浮列车网控系统，构建系统受攻击模型：

$$\begin{cases} \hat{x}_a(k+1) = A\hat{x}_a(k) + Bu(k) + Lr_0^a(k) \\ \hat{y}^a(k) = C\hat{x}_a(k) \\ u^a(k) = u(k) + a_u(k) \\ y^a(k) = y_a(k) + a_y(k) \\ r_\kappa^a(k) = y^a(k) - \hat{y}^a(k) \end{cases} \tag{1}$$

并且 $w(k)=0$，$v(k)=0$，如果下式成立：

$$\forall u(k),\ r_\kappa^a(k) = y^a(k) - \hat{y}^a(k) = 0 \tag{2}$$

则说明该攻击无法被常规检测器，为高隐蔽攻击。

3 安全防护策略研究

设计一种基于分层式检测与弹性切换的安全防护方法。在被攻击的系统引入随机编码信号，得到改进的残差信号：

$$r_\kappa^a(k) = y_a^d(k) - y_a(k) = \overline{y}_a^*(k) \tag{3}$$

设置残差评价函数：

$$J\left[r_\kappa^a(k)\right] = \left[r_\kappa^a(k)\right]^{\mathrm{T}} \Sigma_{r_\kappa^a}^{-1} r_\kappa^a(k) \sim \gamma^2 \chi^2(m) \tag{4}$$

检测出攻击后，定义如式所示传感器信度指数，用于实现攻击隔离与弹性切换：

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \xi & , r_{0,i}^a(k) \in \Omega^a \\ \dfrac{1/(1+d_i^2)}{\sum_{j=1}^{l} 1/(1+d_j^2)} & , r_{0,i}^a(k) \in \Omega \setminus \Omega^a \end{cases} \tag{5}$$

将指数引入一般的状态估计方法，得到全局融合的状态估计公式如下：

$$\hat{x}(k) = \left(\sum_{i=1}^{l} \varepsilon_i(k) P_i^{-1}(k)\right)^{-1} \sum_{i=1}^{l} \varepsilon_i(k) P_i^{-1}(k) \hat{x}_i(k) \tag{6}$$

最后利用完好的传感器对系统进行状态估计，得到重构安全状态估计公式：

$$\hat{x}\ k\ = \left(\sum_{i\in\mathcal{S}(k)} \varepsilon_i\ k\ P_i^{-1}\ k\ \right)^{-1} \sum_{i\in\mathcal{S}(k)} \varepsilon_i\ k\ P_i^{-1}\ k\ \hat{x}_i\ k) \tag{7}$$

4 结论

本文提出了一种高隐蔽攻击下的磁浮列车网控系统安全防护方法。该方法通过多维特征关联分析识别隐蔽异常，并结合弹性架构设计实现关系统的快速切换与恢复，确保系统稳定运行。未来将探索基于在线学习的攻击演化预测与跨域协同防御机制，进一步提升防护体系的主动性与适应性。

参考文献（References）：

[1] Liang Xin,Zhi-Qiang Long. A Learning-Based Passive Resilient Controller for Cyber-Physical Systems: Countering Stealthy Deception Attacks and Complete Loss of Actuators Control Authority[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica,2025,12(7): 1368-1380.

[2] 杨彪，贺光，辛亮，等. 基于分布式检测与告警切换的多传感器 CPS 安全状态估计[J]. 控制理论与应用，2024，41(11)：2121-2130.

收稿日期：2026 年 02 月 08 日.

基金项目：国家重点研发计划课题（2023YFB4302102），国家自然科学基金“叶企孙”基金重点项目（2023.01-2026.12）

作者简介：陈翔(2004－)，男，湖南省长沙市，硕士研究生，智能装备安全控制技术；

通信方式：chenxiang25@nudt.edu.cn、联系电话

文章编号：484-038

高速磁浮列车导向系统主动抗扰控制方法研究

刘鹏博[1,2]，杨洋[1,2]，王志强[1,2]，龙志强[1,2]

(1. 国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073

2. 国防科技大学电磁悬浮与推进技术湖南省重点实验室，湖南省长沙市 410073)

1 引言

针对高速磁浮列车导向系统在强外部干扰、模型参数时变以及工作点频繁变动等复杂工况下的稳定控制问题，本文采用基于模型参考自适应控制与主动抗扰控制相结合的复合控制方法（MRAC-ADRC）。该方法在 MRAC 框架下实现对系统参数不确定性的自适应调节，保证导向系统在不同工作点下的稳定跟踪性能；同时引入线性扩张状态观测器（LESO）对系统总扰动进行实时估计与补偿，显著增强系统的抗干扰能力。

2 导向系统 MRAC-ADRC 控制方法研究

导向系统是包含四个电磁铁的复杂耦合搭接结构，由于左右两侧各自的两个电磁铁机械上刚性连接，且控制器参数相同，可以认为同一侧的两个电磁铁间隙和电流近似相等。采取差动控制，将复杂模型等效为二阶系统。考虑导向系统模型参数不确定性及外部干扰，系统状态空间方程表示为：

$$\begin{cases}\dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \left(a_1 + \Delta a_1\right)x_1 + \left(b + \Delta b\right)u + f_d\end{cases} \tag{1}$$

其中 x_1 为导向间隙差值，x_2 为导向间隙差值变化率，a_1，b 为标称参数，Δa_1，Δb 为参数摄动，f_d 为外部扰动。

为式（1）设计如下的参考模型：

$$\dot{X}_m = A_m X_m + B_m r \tag{2}$$

MRAC 控制律可设计为：

$$u_{mrac} = FX + kr \tag{3}$$

自适应律为：

$$\begin{cases}\dot{f}_1 = -R_f b_m x_1\left(p_{m12}e_1 + p_{m22}e_2\right) \\ \dot{f}_2 = -R_f b_m x_2\left(p_{m12}e_1 + p_{m22}e_2\right) \\ \dot{k} = -R_k b_m r\left(p_{m12}e_1 + p_{m22}e_2\right)\end{cases} \tag{4}$$

在 MRAC 控制下，系统可写为：

$$\dot{x}_2 = a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + b_m r + \phi \tag{5}$$

其中，ϕ 为总扰动。设计 LESO 扰动观测器：

$$\begin{cases}e_z = z_1 - x_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e_z \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 e_z + a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + b_m u \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 e_z\end{cases} \tag{6}$$

最终的控制输入为 MRAC 输出与扰动补偿项之和：

$$u = f_1 x_1 + f_2 x_2 + kr - \frac{z_3}{b_m} \tag{7}$$

通过构造李雅普诺夫稳定性函数：

$$V = \frac{1}{2}X^T PX + \frac{1}{2}tr\left(\tilde{F}^T\Gamma_1^{-1}\tilde{F}\right) + \frac{1}{2}\Gamma_2^{-1}\tilde{k}^2 \tag{8}$$

可以证明在自适应律与 LESO 作用下，系统状态一致最终有界，导向间隙收敛至期望平衡点邻域。

3 结论

针对高速磁浮列车导向系统在强外部干扰、模型参数时变以及工作点频繁变动等复杂工况下的稳定控制问题，本文采用基于模型参考自适应控制与主动抗扰控制相结合的复合控制方法。该方法将 MRAC 的参数自适应能力与 ADRC 的扰动抑制能力相结合，适用于高速磁浮列车导向系统这类具有强非线性、多干扰、参数时变的控制对象，具有良好的工程应用前景。

参考文献（References）：

[1] Yang Yang1,Huang Cuicui2,Dai ChunhuiCA3,et al. An Active Resisting Disturbance Control Method for High-speed Maglev Train With Weak Model Dependence[J]. ISA Transactions,2025,Vol.163: 172-183.

收稿日期：2026 年 02 月 08 日.

基金项目：国家自然科学基金（52402456）

作者简介：**刘鹏博**(2002－)，男，河北省沧州市，硕士研究生，电磁悬浮与推进技术；

通信方式：liupengbo21@nudt.edu.cn、联系电话:15100865122

文章编号：484-039

常导磁浮车-磁-轨系统随机动力响应分析

顾铮昊[1,2]，曾杰伟[1,2]，王志强[1,2]，李晓龙[1,2]，龙志强[1,2]

(1. 国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073

2. 国防科技大学电磁悬浮与推进技术湖南省重点实验室，湖南省长沙市 410073)

1 引言

常导磁浮是一种新型轨道交通工具，其利用电磁吸力克服重力，采用直线电机牵引，实现车辆与轨道之间的无接触式运行。其中，常导中低速磁浮系统，因具有爬坡能力强、转弯半径小等优势，适用于城市内、城郊及景区的交通运输。国内外学者对车-磁-轨系统动力学做了大量的研究，主要分为确定性和随机性动力学分析。中低速磁浮在运行过程中会受到随机轨道不平顺、随机车体荷载分布以及随机车轨结构参数等随机扰动的影响，使得其车辆系统-磁力系统-轨道梁系统(以下简称车-磁-轨系统)成为一个复杂的随机动力系统[1]，导致其动态响应呈现显著的随机性与不确定性，影响行车安全性与乘坐舒适性。传统的动力学分析方法通常是基于确定性参数，对于描述随机动力系统的动态响应具有一定的局限性。对此，本文充分考虑系统随机因素，建立中低速磁浮车-磁-轨系统随机动力学模型，并引入概率密度函数实现对系统的随机动态响应分析与预测，提高行车安全性与乘坐舒适性。

2 随机动力学模型建立

针对随机车轨结构参数、轨道随机不平顺等时变随机激励作用下的中低速磁浮车-磁-轨系统，建立随机动力学模型。通过引入随机过程与参数不确定性量化方法，提升模型动力学表征精度与可靠性，为随机振动分析和抑制策略研究提供模型基础。中低速车-磁-轨系统示意图如图 1 所示。

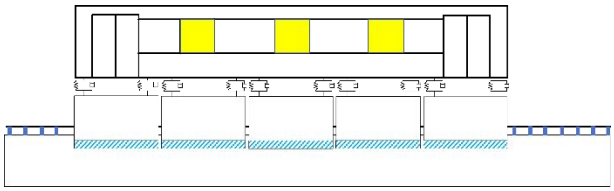


图 1 常导中低速磁浮车-磁-轨系统示意图

其中，随机车轨结构参数动力学方程如下：

$$M_{v,\xi_q^v}\ddot{X}_v + C_{v,\xi_q^v}\dot{X}_v + K_{v,\xi_q^v}X_v = F_{v,\xi_q^r} \tag{1}$$

$$M_{b,\xi_q^b}\ddot{X}_b + C_{b,\xi_q^b}\dot{X}_b + K_{b,\xi_q^b}X_b = F_{b,\xi_q^R} \tag{2}$$

针对中低速磁浮运行过程中由于线路动态工况、轨道几何形变等因素造成的 F 轨与电磁铁磁极偏移问题，研究不确定性磁-轨关系表达方法，建立不确定性磁-轨关系模型。

3 基于概率密度函数的车-磁-轨系统随机动力响应分析

根据参数分布规律考虑选点规则。对于多维非均匀分布参数，采用数论选点法生成随机分布点集，再将均匀分布点集转换成具有非均匀概率分布的随机参数离散代表点集。

$$\xi_q = \left\{\xi_q^V, \xi_q^b, \xi_q^R\right\} \tag{3}$$

基于概率守恒原理，结合增广系统的转化关系，推导联合概率密度演化方程。基于物理意义和随机参数特性设定概率密度演化方程的初始条件和边界条件，并求解概率密度演化方程。

$$\frac{\partial p_{\mathbf{Z\Theta}}(z,\boldsymbol{\theta},t)}{\partial t} + \sum_{j=1}^{m}\dot{Z}_j(\boldsymbol{\theta},t)\frac{\partial p_{\mathbf{Z\Theta}}(z,\boldsymbol{\theta},t)}{\partial z_j} = 0 \tag{4}$$

4 结论

针对常导中低速磁浮车-磁-轨系统随机动态响应分析问题，建立了考虑多种随机因素的随机动力学模型，生成随机参数代表性点集，并采用概率密度函数分析系统动态响应，揭示多源随机因素作用下的中低速磁浮车-磁-轨系统动力学响应规律。

参考文献（References）：

[1] 余志武,张鹏,丁叁叁,等. 基于概率密度演化理论的磁浮列车-轨道梁耦合系统随机动力分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(7): 2544-2554.

收稿日期：2026 年 02 月 11 日.

基金项目：国家自然科学基金面上项目(52572427)

作者简介：顾铮昊(1998－)，男，湖南省长沙市，博士研究生，研究方向为电磁悬浮与推进技术；

通信方式：guzhenghao24@nudt.edu.cn

文章编号：484-040

超导电动磁浮列车电磁力计算研究

于淼[1]，于青松[1]，李凯[1]，刘帅[1]，李小汾[2]
(1.中车长春轨道客车股份有限公司 国家轨道客车工程研究中心，吉林 长春 130000；2.上海交通大学 电气工程系，上海 200240)

1 引言

磁浮列车因为不与轨道接触可以达到更高的运行速度。目前高速磁浮制式主要有常导电磁悬浮、超导电动悬浮和超导钉扎悬浮[1-2]。本文系统说明了电磁力计算基础和电磁力计算模型，构造实际形状下的超导线圈和“8”字形线圈数学模型，使用电流卷积的思想计算磁场，在傅里叶空间上进行毕奥萨法尔定律的解析计算进而求解互感，结合动态电路方程与虚功原理对超导磁体和地面“8”字形线圈作用产生的电磁力开展解析计算和特性分析，使用日本山梨试验线的数据对解析计算进行了对比验证，说明本文电磁力计算方法的准确性，同时开展了不同参数对电磁力的影响规律计算。

2 正　文

2.1 电磁力计算模型

求解电磁力需要首先计算互感和“8”字形线圈的感生电流。对于两个线圈之间互感的计算，本文使用互感的定义式进行求解，本文使用毕奥萨法尔定律结合傅里叶变换在傅里叶空间计算第一个线圈产生的磁场，得到傅里叶空间上的磁场后再进行傅里叶逆变换得到真实磁场结果。在实际计算中我们将第二个线圈厚度分成若干份，求解第一个线圈在第二个线圈每一份产生的磁场，再对第二个线圈中每一份磁场进行累加即为最终第一个线圈电流在第二个线圈产生的磁场，进而我们使用计算得到的磁场与第二个线圈做面积积分得到磁通，最后使用磁通乘以线圈匝数除以电流求解互感，需要求解的互感分别为超导线圈和超导线圈之间的互感、超导线圈和“8”字形线圈之间的互感、“8”字形线圈和“8”字形线圈之间的互感。在此基础上分别构建了轨道两侧“8”字形线圈无交叉连线和交叉连线电路模型。

2.2 不同参数对电磁力的影响

首先采用日本实验测试数据和本文所建立的计算模型仿真结果进行对比，仿真计算结果与实验测试数据一致性良好,我们定义误差为仿真计算结果与实验测试数据差值的绝对值除以实验测试数据，由此求出的悬浮力误差为 0.2%，导向力误差为 14.1%，磁阻力误差为 3.9%，随后使用本文计算模型开展磁动势、车速、下沉量、横向偏移对电磁力的影响分析。

3 结　论

本文针对超导磁体和地面“8”字形线圈组成的超导电动磁浮系统，开展了悬浮力、导向力和磁阻力的计算，首先通过日本山梨实验线的实验测试数据与本文的计算模型仿真结果进行对比说明了计算模型的准确性，然后开展了不同参数对电磁力的影响计算，系统揭示了不同参数对电磁力的影响，可以在此基础上进一步开展超导电动磁浮系统的匹配和参数优化设计，同时为超导电动磁浮列车的运动稳定性计算提供了重要参考。

参考文献 (References)：

[1] 王家素，王素玉. 超导技术应用[M]. 成都：成都科技大学出版社， 1995.
[2] 马光同, 杨文姣, 王志涛等. 超导磁浮交通研究进展[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2019, 47(7): 68-74, 82

收稿日期：2026 年 02 月 28 日.
基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFF0508000）；上海市科技计划项目（25DZ3008300）.
作者简介：于淼(1997－)，男，吉林省松原市，工程师，硕士，主要从事超导电动悬浮列车电磁特性的研究；通信方式：E-mail:yumiao13844827303@163.com

文章编号：484–041

基于 GMM 的快速磁浮列车悬浮系统综合评价

李梦成[1,2]，李晓龙[1,2]，王志强[1,2]，龙志强[1,2]

(1.国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073；2.湖南省电磁悬浮与推进技术重点实验室，湖南省长沙市 410073)

1 引言

在快速磁浮列车系统中，悬浮系统是列车平稳运行的关键。由于其具有开环不稳定性，因此往往采取基于模型的控制方法，但是此方法会因为参数的变化使得控制性能下降，从而影响到磁浮列车系统的安全运行[1]。因此，开展针对悬浮系统的综合评价研究有着重要意义。本文以改进 R 指标和τ距离指标[2]为基础构建系统特征向量，设计了以高斯混合模型（Gaussian Mixture Model,GMM）为框架的悬浮系统综合评价方法。

2 快速磁浮列车悬浮系统综合评价

由于数据驱动的性能评价方法的非侵入性，以及 GMM 在处理多模态数据上的天然优势，以 GMM 为框架构建悬浮系统综合评估体系有着广泛的应用前景。本文所使用的改进 R 指标和τ距离指标分别从悬浮系统间隙和加速度两个维度进行统计，涵盖多维评价指标，能够反映悬浮系统的运行状态，并由此给出系统综合评价。总体评价过程分为两个阶段：离线建模阶段和综合评价阶段。

首先，采集悬浮系统运行的健康数据，并以此计算改进 R 指标和τ距离指标。在数据窗口内，统计改进 R 指标的均值和中位数作为窗口特征。

窗口内第 k 个数据点的改进 R 指标由式（1）定义：

$$R_i = \frac{V_{1,k}^2}{V_{2,k}^2} = \frac{\alpha\times\varepsilon_k^2+(1-\alpha)\times V_{1,k-1}^2}{\frac{1}{2}\times\alpha\times(\varepsilon_k-\varepsilon_{k-1})^2+(1-\alpha)\times V_{2,k-1}^2} \qquad (1)$$

其中，α为遗忘因子，ε_k为间隙误差值。

τ距离指标由式（2）定义：

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^{5} X_i}{5} \qquad (2)$$

其中，X_i 为归一化后的加速度五维特征（标准偏差、均方根、平均值、极差和方差）。

基于以上数据特征，通过贝叶斯信息准则（BIC）和赤池信息准则（AIC）选取模型最优分量数，采取期望最大化算法，训练悬浮系统健康运行的基准 GMM,并基于此开展综合评估。完整综合评估流程具体如图（1）所示。

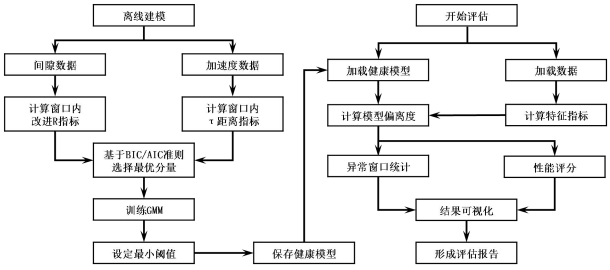


图 1 综合评估流程

3 结论

本文以改进 R 指标和τ距离指标为基础，构建悬浮系统的特征向量，提出的基于性能评价指标和 GMM 的悬浮系统综合评估框架，可以实现对悬浮系统性能的快速、准确的评价。并可通过悬浮数据的概率分布和对数似然值阈值设定，提高评价结果的可释性。

参考文献（References）：

[1] Ni, Fei,Dai,et al. PERFORMANCE EVALUATION OF THE SUSPENSION SYSTEM ON MAGLEV TRAINS BASED ON MEASUREMENT DATA[J]. Metrology and Measurement Systems,2024,Vol.31(1): 115-133.

[2] Xingyu Zhou,Shi Liang,Xiaolong Li,et al. A Data-Driven Comprehensive Evaluation Method for Electromagnetic Suspension Maglev Control System[J]. Actuators,2024,Vol.13(8): 314.

收稿日期：2026 年 03 月 09 日

基金项目：湖南省重点研发计划（课题号：2024JK2038）；国家自然科学基金（项目资助号：52402456）.

作者简介：李梦成(1996－)，男，湖南省长沙市，在读硕士，电磁悬浮与推进

通信方式：limengcheng13@nudt.edu.cn、联系电话:18579053224

文章编号：484-042

高速磁浮多源融合测速定位基础框架与关键技术

孟川舒
（中国铁道科学研究院集团有限公司，北京 100081）

1 引言

精准可信的速度位置信息是高速磁浮系统能够运行的关键。随着传感器技术和信息处理技术的快速发展，基于多种传感器的多源融合测速定位是必然趋势，但目前高速磁浮多源融合测速定位基础理论较为欠缺，亟待开展研究。

2 高速磁浮多源融合测速定位概念

高速磁浮多源融合测速定位可定义为：利用不同类型传感器从多个维度测量采集时间、速度、加速度、位置等信息，通过滤波融合控制误差，提高信息的可信度、系统的鲁棒性和可靠性，降低数据失准、信息失真、系统失稳和技术失效的风险，能够获得满足列车运行要求的、精准可信的速度位置信息，支撑高速磁浮列车运行控制、牵引控制等业务应用。

3 多源融合测速定位基础框架

3.1 通用层次模型

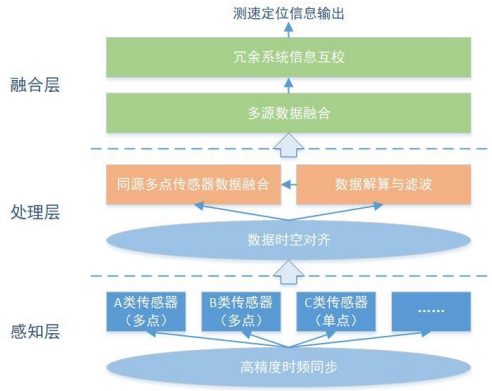


图 1 高速磁浮多源融合测速定位通用层次模型

高速磁浮多源融合测速定位通用层次模型如图 1 所示，按照数据产生、传递和处理过程自下而上分为感知层、处理层与融合层。

3.2 技术框架

基于通用层次模型，构建高速磁浮多源融合测速定位技术框架，主要包括多源传感、信息融合、解算输出和支撑保障四个部分。

4 关键技术

4.1 时空同步

时空同步是多源信息能够融合的基础和前提，高精度时空同步技术是多源融合测速定位关键技术之一。

4.2 具有时空约束关系的同源多点数据融合

同源多点数据融合是指布设在列车不同位置的同一类型传感器数据的融合，多传感器布设可有效提高系统的鲁棒性。归一化的位置最优解为：

$$\hat{x}_{train} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \hat{x}_k - \sum_{k=1}^{n-1} (n-k) l_k}{n}$$

速度最优解为：

$$v = \frac{\sum_{k=1}^{n} w_k v_k}{\sum_{k=1}^{n} w_k}$$

4.3 多源信息融合

多源信息融合是通过不同类型传感器信息融合获取全局最优的速度位置信息，能有效提高测速定位数据的精度、可信度和系统鲁棒性。融合方案主要包括卡尔曼滤波类和人工智能方法。

3 结论

提出高速磁浮多源融合测速定位概念，设计通用层次模型，构建基础技术框架并明确关键技术划分，为高速磁浮多源融合测速定位技术深入研究提供理论依据。

参考文献（References）：

[1]李晓龙,刘锡良,史黎明.磁浮列车测速定位中的信息融合研究[J].电子科技大学学报,2013,42(01):87-91.
[2]罗永升,樊亮,刘泽,等.基于多源信息融合的磁浮列车测速技术研究[J].机车电传动,2024,(06):155-162.

收稿日期：2026 年 03 月 31 日.
基金项目：中国铁道科学研究院集团公司科研开发基金项目（2024YJ142）
作者简介：孟川舒（1981—），男，辽宁省、沈阳市，高级工程师，博士，主要从事高速磁浮铁路时空技术应用及铁路数智化相关技术研究工作；通信方式：E-mail:15910653021@126.com。

文章编号：484-043

悬浮电磁铁有限元级精度实时电磁力解算方法

韩羽菲[1]，张佳欣[1]，邓楚燕[1]，王运达[2]，刘帅[2]
(1.中车科技创新（北京）有限公司 六研究所，北京 100192；2.中车长春轨道客车股份有限公司，吉林 长春 130062)

1 引言

电磁铁是磁悬浮列车悬浮控制系统的核心执行元件，其电磁力与线圈电流、工作间隙之间呈现强非线性、强耦合特性。精确的电磁力模型是提高悬浮控制系统性能的基础，直接影响悬浮间隙的稳定性、抗扰能力和能耗水平。传统电磁力解算方法主要分为两类：一类是基于简化假设的线性化模型或经验公式，虽然计算速度快，但在全局工作范围内精度较低，难以满足高精度控制需求；另一类是基于有限元仿真的数值解算方法，精度较高但计算耗时长，无法满足实时控制对毫秒级响应速度的要求。如何在保证有限元级精度的同时满足实时性要求，是磁悬浮电磁力解算领域亟待解决的核心问题。本文提出一种磁悬浮电磁铁的有限元级精度实时电磁力解算方法，通过“离线精密仿真、在线快速插值”的策略，实现电磁力的有限元级精度与毫秒级响应速度的统一。

2 有限元级精度实时电磁力解算方法

2.1 技术路线

本方法在离线阶段，基于电磁铁精确有限元模型，以精密步长对全工作区间进行参数化扫描，构建高分辨率的“电流-间隙-电磁力”三维力映射模型。在线阶段，通过传感器实时获取当前间隙与电流值，利用双线性插值算法在预建模型中快速解算出有限元级精度的电磁力值。

2.2 离线三维力映射模型构建

采用 Maxwell 3D 有限元软件构建中低速磁浮悬浮电磁铁的精确三维模型。确定电磁铁的实际工作区间后，以精密步长对整个工作区间进行参数化扫描计算，解算出所有离散点上的精确电磁力值。将计算结果组织为三维数据表形式，构建高分辨率的“电流-间隙-电磁力”三维力映射模型。该模型完整描述了电磁力与双变量之间的复杂非线性关系，为在线实时解算提供了有限元级精度的数据基础。

2.3 在线实时电磁力解算

在线控制时，系统通过间隙传感器获取当前工作间隙 g，通过电流传感器获取当前线圈电流 i。以(g,i)作为查询坐标，在预建的三维力映射模型中定位相邻的四个离散网格点，采用双线性插值算法解算当前工况下的电磁力值。若对精度有更高要求，可采用高阶多项式拟合或 NURBS 曲面拟合方法替代双线性插值。整个在线解算过程仅需一次查表与插值运算，耗时在毫秒级以内，同时解算精度达到有限元级。

3 结 论

本文针对悬浮电磁铁电磁力解算中有限元级精度与实时性难以兼得的核心矛盾，提出了一种悬浮电磁铁的有限元级精度实时电磁力解算方法。该方法在离线阶段以精密步长对电磁铁全工作区间进行有限元参数化扫描，构建高分辨率的“电流-间隙-电磁力”三维力映射模型；在线阶段通过实时传感器数据与双线性插值算法，瞬间解算出有限元级精度的电磁力值。理论分析与仿真结果表明，该方法有效解决了传统简化模型精度不足与有限元直接解算速度过慢的问题，实现了有限元级精度与高实时性的统一。所解算的精确电磁力值可直接用于状态观测器、负载估计器或直接力反馈控制器，为提升磁悬浮系统的控制品质与鲁棒性提供了关键数据支撑。

参考文献（References）：

[1] 赵春发,魏阳州,翟婉明,等.一种中低速常导磁浮列车电磁力计算方法:202311015897[P].
[2] 冉振华,方红荣,陈二锋,等.一种基于有限元分析的电磁铁磁场仿真方法:CN201310556810.0[P].CN103678768A.

收稿日期：2026 年 04 月 09 日.

基金项目：中国中车股份有限公司科技研究开发计划（2026CCB325）；中国中车股份有限公司科技研究开发计划（2025CCB258）.

作者简介：韩羽菲(1995－)，女，籍贯辽宁省凌源县，中级工程师，硕士，主要从事电磁悬浮控制算法与系统的研究；通信方式：E-mail:326904279@qq.com、联系电话 15624953616

文章编号：484-044

磁浮列车多起落架高精度同步收放控制方法

韩羽菲[1]，曲铭鑫[1]，张显锋[1]，王运达[2]

（1.中车科技创新（北京）有限公司 六研究所，北京 100192；2.中车长春轨道客车股份有限公司，吉林 长春 130062）

1 引言

磁悬浮列车作为一种新型轨道交通装备，其起落架系统在站台停靠、检修支撑及紧急制动等工况下承担关键作用。列车通常由独立液压支路分别驱动四个起落架完成收放动作，其同步性与一致性直接关系到车体姿态安全。然而，由于液压缸加工精度、密封状态、管路阻尼及车厢负载分布等个体差异，即使中央控制器对各执行机构施加相同的控制电流，各起落架的实际运动速度仍存在差异，导致收放过程中出现高度不一致甚至车体倾斜风险。现有开环或简单闭环控制方法难以有效补偿上述多执行机构间的动态差异。为此，本文提出一种基于行程分段与实时位移比较的同步控制方法，通过“高速趋近+同步精调”的分段策略及分级差异补偿机制，在不消除机械液压固有差异的前提下，实现起落架收放过程的高精度一致性控制。

2 控制方法设计

2.1 系统结构与总体策略

本方法应用于磁浮列车液压起落架控制系统，该系统由一个中央控制器、四路独立比例电流驱动模块、四个液压作动筒及四个位移传感器构成。控制器接收总收/放指令，输出四路独立控制电流，并实时读取位移反馈值。设定起落架目标总行程为 S_{total}，第一阶段行程阈值 S_1。整个收放过程分为高速趋近段与同步精调段。

2.2 高速趋近段控制

控制器接收到收/放指令后，同时向四路比例阀驱动模块输出最大允许控制电流 I_{max}，使各起落架以当前工况下的最快速度独立运动。控制器持续读取四路位移传感器数值 s_1,s_2,s_3,s_4。当某一通路 k 满足 $s_k \geqslant S_1$ 时，立即切断该通路驱动电流，使其停止于 S_1 位置。待四路均满足 $s_k \geqslant S_1$ 后，将所有起落架控制电流统一设为基准电流，以较低基准速度进入同步精调段。

2.3 同步精调段控制

系统以固定频率采集四路位移值，计算最大值、最小值及位移差 ΔS。根据 ΔS 大小执行分级调节：

- 小偏差微调（$5mm < \Delta S \leqslant 10mm$）：仅对位移最大的一路起落架将其控制电流降低 20%（即 $0.8I_{base}$），其余三路维持 I_{base} 或最优电流；
- 大偏差急停（$\Delta S > 10mm$）：立即切断位移最大一路的控制电流，使其停止等待，其余三路维持运动；
- 同步良好（$\Delta S \leqslant 5mm$）：四路均维持当前电流（通常为 I_{base}）继续运动。

3 结 论

本文针对磁浮列车起落架多执行机构同步控制难题，提出了一种基于行程分段与实时差异补偿的高精度一致性控制方法。该方法在保证整体响应效率的前提下，为高精度同步创造条件。理论分析与实验结果表明，该方法不依赖于对被控对象的精确统一建模，具有良好的鲁棒性与工程实用性，能够有效消除因液压、负载个体差异引起的位移不同步问题，确保各起落架在收放终点处高度一致，显著提升磁浮列车起落架系统的运行安全性与控制品质。

参考文献（References）：

[1] 张显锋，要文峰，段姹莉，等. 一种起落架液压驱动系统和磁悬浮列车：CN202310439853.4[P]. 2023.

[2] 韩羽菲,张佳欣,刘帅,等.一种磁悬浮列车及其制动方法:202411524849[P].

收稿日期：2026 年 04 月 09 日.

基金项目：中国中车股份有限公司科技研究开发计划（2026CCB325）；中国中车股份有限公司科技研究开发计划（2025CCB258）.

作者简介：韩羽菲(1995－)，女，籍贯辽宁省凌源县，中级工程师，硕士，主要从事电磁悬浮控制算法与系统的研究；通信方式：E-mail:326904279@qq.com、联系电话 15624953616

文章编号：484-045

线间距对高速磁浮列车明线交会气动性能的影响

王建达，张雷
(1. 中南大学 交通运输学院，湖南省 长沙市 410083)

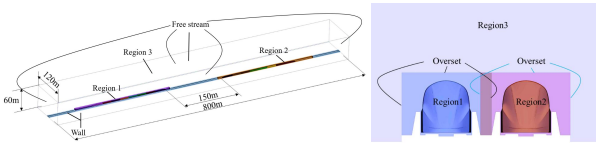
1 引　言

时速 600 公里高速磁浮列车明线交会过程中产生的剧烈气动效应是制约运营安全与结构耐久性的关键因素[1]。而线间距是调控列车交会气动性能的重要参数，增大线间距能够有效缓解列车交会压力波效应，对列车周围流场结构，对车体表面压力分布和气动力影响显著，是高速磁浮线路设计与气动优化的重要指标[2]。

2 正　文

2.1 几何模型与计算方法

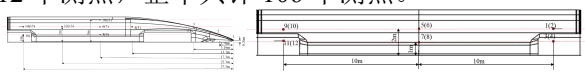
本文采用 1:1 的 8 车编组超导磁浮列车模型，使用数值模拟计算方法和重叠网格技术模拟了高速磁浮在线间距为 5.1m、5.4m、5.6m 和 5.8m 的线路上明线交会时的气动特性。计算域的尺寸和边界条件设置如图 1 所示，计算域划分为三个区域，包含车体的运动区域 Region1 及 Region2 和模拟线路环境的静止区域 Region3。两车初始相距 150m 以建立列车会车前的真实流场。



a 整体计算域尺寸及边界条件　　b 运动区域边界条件

1 计算域边界条件

列车表面压力测点布置如图 2 所示，尾车测点布置同头车一致，头尾车各 17 个测点，中间车 12 个测点，整车共计 106 个测点。

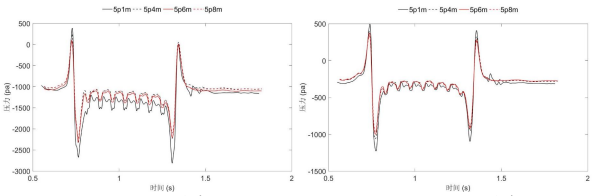


a 头车测点布置　　b 中间车测点布置

2 车身表面测点布置

2.2 线间距对列车表面压力的影响

由于车头鼻尖部位驻点的存在，车身表面压力正峰值极值出现在鼻尖测点，除鼻尖点以外测点正峰值极值相对较小；负峰值极值出现在尾车车身，而压力峰峰值极值出现在头车车身。图 3 所示为超导磁浮以 600km/h 速度于不同线间距明线会车时，车体表面测点压力时程曲线。随着线间距增大，车身表面压力逐渐减小，当线间距从 5.1 增加到 5.4m 时，车身表面压力最大降幅可达 24.1%；线间距从 5.4 增加到 5.8 时，压力最大降幅仅 3.6%，可忽略线间距对表面压力幅值的影响。



a h4 测点　　b h10 测点

3 车身表面压力时程曲线

2.3 线间距对列车气动力的影响

列车明线交会运行时，车体气动阻力、侧向力及倾覆力矩同车体表面测点压力变化一致，在交会开始和结束时段出现明显波动。线间距为 5.1m 时，交会时段车体气动力最大，线间距增大至 5.4m，车体气动力显著下降，其中中间车的气动力降幅最大，当线间距大于 5.4m 时，增大线间距车体气动力变化不明显，甚至出现微小增幅。

3 结　论

本文对超导磁浮列车以 600km/h 速度，于不同线间距明线交会时，分析车体表面压力和气动力，结果显示：线间距从 5.1m 增大至 5.4m 时，车体表面压力和气动力下降明显；线间距大于 5.4m 时，列车表面压力和气动力变化较小，可忽略。因此这四种方案中，线间距为 5.4m 最优。

参考文献 (References)：

[1] 杨永刚, 梅元贵. 时速 600 km 高速磁浮列车明线非定常气动性能数值模拟研究[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(06):106-118.

[2] 王峰, 张雷, 杨明智, 等. 线间距对时速 600 公里级高速磁浮列车明线交会气动性能的影响[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(04):31-40.

收稿日期： 2026 年 04 月 10 日.

基金项目： 国家重点研发计划子任务（2022YFB4301201-02）；国家自然科学基金面上项目（52372369）.

作者简介： 王建达(2000－)，男，福建省漳州市，博士研究生，主要从事列车空气动力学的研究；E-mail:254206053@csu.edu.cn

文章编号：484-046

耦合激励下的超导钉扎磁浮缩比车动力学分析

朱建梅，周徐呈，邓自刚，张卫华
（西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省成都市 邮编 610031）

1. 引言

超导钉扎磁浮车辆动力学性能是保障其安全、平稳、高速运行的核心。面向工程化应用需求，本文提出考虑电机法向力的缩比磁浮车动力学模型，通过仿真分析电机法向力对车辆动力学的影响。

2. 正文

2.1 永磁同步直线电机矢量 FOC 控制仿真

图 1 所示为基于 SVPWM 技术的永磁同步直线电机双闭环矢量控制 i_d=0 系统结构框图，其中速度控制环与电流控制环均采用线性 PI 控制算法，通过 PI 调节器的参数优化，实现对电机运行参数的准确调控，确保系统具备良好的动态响应。

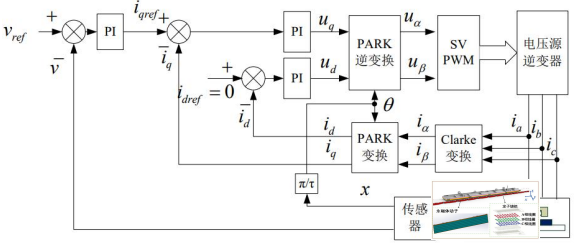


图 1 基于 SVPWM 永磁同步直线电机的矢量控制系统框图

2.2 基于轨道不平顺和电机法向力激扰的耦合动力学联合仿真模型

缩比车辆的 8 个高温超导悬浮装置与永磁轨道相互作用，提供系统所需的悬浮和导向力[1]。车辆由长定子线性电机驱动，同时考虑永磁轨道不平顺[2]。车辆系统动力学模型详见图 2。

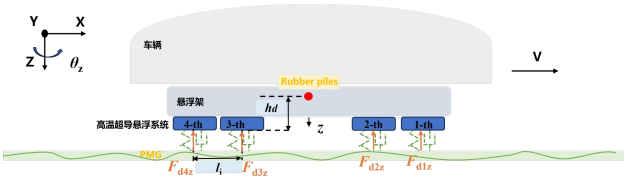
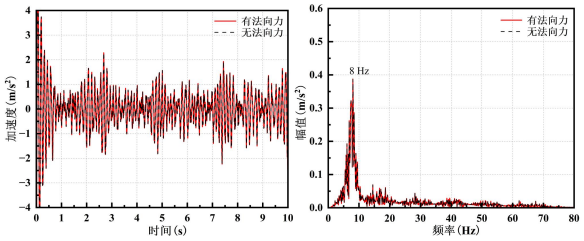


图 2 车辆动力学布局图[3]

2.3 缩比车辆耦合动力学性能研究

缩比小车在 150 km/h 工况下的动力学时域与频域图见图 3。电机法向力对缩比小车沉浮运动的时域和时域图的影响非常小，有无法向力工况响应曲线几乎重合。



(a) 时域图， (b) 频域图

图 3 150 km/h 缩比小车沉浮运动响应图

3 结论

基于 SVPWM 调制与 i_d=0 控制策略的 FOC 双闭环矢量控制系统，电机法向力整体呈高频小幅扰动特征，单悬浮架法向力幅值稳定在 −150~200 N 范围内，同一工况下各悬浮架法向力差值小于±5 N。电机法向力并非车辆悬浮系统振动的主导激励源，其对振动的影响在全速度范围内均极其微弱，可基本忽略。

参考文献（References）：

[1] J. Zheng, Z. H. Wang, S. X. Zhang, et al., "Vertical Nonlinear Damping Experiments and Identification of High Temperature Superconducting Levitation Above Permanent Magnet Track," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 72, May, 2023, Art no. 6005911.

[2] Z. G. Deng and X. Y. WANG Shan, LI Haitao, ZHOU Xucheng, ZHANG Weihua, "Dynamics Modeling and Simulation of Superconducting Pinning High-speed Maglev Vehicle-Rail Coupling," J. China Railw. Soc, vol. 46, no. 8, pp. 56-68, Aug, 2024.

[3] Zhu, Jianmei, Zhang, Gaowei, Yuan, Yuhang, et al. Experimental and Numerical Investigation of the Dynamic Characteristics of an HTS Maglev Scaled Vehicle-Bridge Coupled System[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2025,35,(6)

收稿日期： 2026 年 04 月 11 日.

基金项目： 国家自然科学基金（U24B20125）、中国教育部基础学科与交叉学科突破计划（JYB2025XDXM211）。

作者简介： 朱建梅(1986－)，性别：女，四川成都，博士研究生，主要从事磁浮交通动力学的研究；通信方式：E-mail:195918045@qq.com；联系电话：15828531986。

文章编号：484-047

超导电动磁浮悬浮架研究现状及关键技术

张艺馨[1]，张赛[2]
(1.中车长春轨道客车股份有限公司，吉林 长春 130000；2. 中车长春轨道客车股份有限公司，吉林 长春 130000)

1 引　言

超导电动磁浮列车因其高效、安全、节能环保、智能舒适等优势，成为未来更高速轨道交通的重要发展方向。悬浮架作为整车承载、传递载荷、减振的核心部件，其结构形式与动力学特性直接关系到列车运行平稳性和安全性。本文系统梳理了悬浮架的工作原理和国内外发展现状，重点分析结构轻量化、多级悬挂动力学及多物理场耦合优化等关键技术，为工程化应用提供参考。

2 正　文

2.1 悬浮架工作原理

超导电动磁浮采用低速走行+高速悬浮运行的混合运行模式：低速阶段，依靠起落架橡胶轮胎支撑车辆，实现走行功能，悬浮架两侧导向轮伸出，提供导向功能。高速阶段，导向轮收回、起落架收起，依靠车载超导磁体与轨道线圈相对运动产生的电磁力实现车辆稳定悬浮。该系统悬浮间隙大，降低了轨道精度要求，为多级悬挂机构的集成提供了条件。

2.2 国内外发展现状

日本 MLX01 型悬浮架采用双框架弹性支撑结构，通过中间悬浮架框架与超导磁体支撑框架之间的两级空簧悬挂实现六自由度隔振，L0 系列于 2015 年创 603 km/h 载人运行纪录，预计 2035 年商业运营；韩国 HTX 采用胶囊式车体与一体化悬浮架设计，车载永磁体直接安装于车体底部支架，配合弧形导体板轨道实现悬浮-导向一体化，目标 1000 km/h，目前处于缩比模型试验阶段。

国防科大 2026 年 1 月在 400 米试验线完成吨级车辆 2 秒内加速至 700 km/h，采用单框架碳纤维轻量化结构，集成高场超导磁体与大功率直线电机牵引接口；大同试验线为全球首条全尺寸低真空管道磁浮系统，采用多悬浮架布置，构建三级弹性悬挂体系，实现振动加速度降幅超 50%；中车长客 2025 年 7 月发布超导电动高速磁浮列车，采用多模式铰接悬浮架，集成全尺寸高温超导磁体，代表高温超导电动悬浮工程化最新进展。

2.3 悬浮架关键技术分析

结构设计与轻量化方面，采用铝合金-碳纤维复合材料混合架构，通过拓扑优化实现减重；多级悬挂系统动力学设计方面，构建一系橡胶弹簧-二系空簧分级隔振体系，优化刚度阻尼解耦设计，实现宽频振动抑制与动态稳定性平衡；多物理场耦合优化设计方面，建立电磁-热-结构协同优化模型，确保 600 km/h 级电磁-力学稳定性与结构安全性。

3 结　论

日本山梨试验线、韩国 HTX、国防科大大功率直线牵引试验线、大同试验线、中车长客工程样车等代表性方案表明，悬浮架正朝着轻量化、多级悬挂、多物理场耦合优化方向演进。未来需在长距离可靠性验证、全生命周期成本控制等方面深化研究，推动超导电动磁浮向更高速度及商业化运营迈进。

参考文献 (References)：

[1] MA Weihua，LI Tengfei，HU Junxiong 等.超导 EDS 磁浮列车多级悬挂方案优化与动力学性能[J].交通运输工程学报：正刊，2023，23(6)：168-179.

[2] Takao K,Takahashi K.Vehicles for superconducting Maglev system on Yamanashi test line[J].WIT Transactions on the Built Environment,1994,9:487-494.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.

作者简介：第 1 作者(1996－)，女，辽宁省抚顺市，工程师，硕士，主要从事磁浮列车悬浮架的研究；通信方式：E-mail:zhangyixin0308@126.com

文章编号：484-048

一种新型管轨-磁浮运输系统

王剑博[1]，吕荣斌[1]，冯涵[1]
(1.中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮研究所，吉林 长春 130000)

1 引　言

随着城镇化与城市物流规模持续增长，提升物流运输效率、降低能耗与综合成本已成为迫切需求。管轨 – 磁浮运输系统融合管道运输与磁浮轨道技术优势，可构建地下智能物流网络，实现共同配送与运力共享。该系统兼具磁浮交通无人化运行、小半径转弯、强爬坡能力及低振动噪声等特点，能够更好适配城市地下物流高效、稳定、低噪的运行需求。

2 正　文

2.1 总体方案

新型管轨-磁浮运输系统由智能传输系统、智能载运平台、末端无人配送组成，如图 1 所示。货物首先经过地面智能传输设备实现货物分类并智能定制配送方案；随后位于管轨节点的地下智能传输系统根据上述货物类型和配送方案将货物投送至不同类型的智能载运平台；智能载运平台根据配送方案以及货物数量自适应配置载运装备类型及虚拟编组数目；当货物运输至指定管轨节点后，经地下智能传输系统送至地面，由无人配送小车完成末端配送，实现闭环智能物流运输。

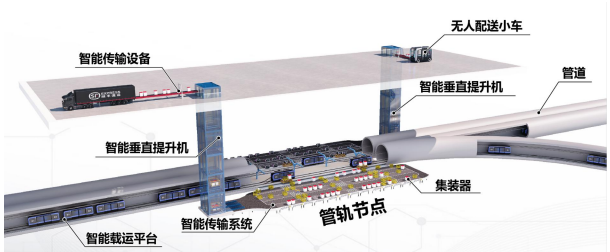
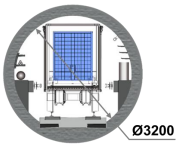


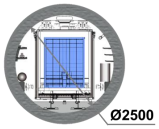
图 1 管轨-磁浮运输系统方案

2.2 载运装备设计方案

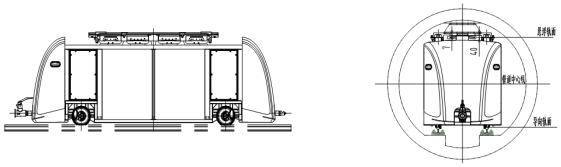
载运装备是系统效率与成本的核心。对比表明，管道-磁浮制式较管道-轮轨制式断面直径更小；在磁浮悬浮模式中，吊挂式悬浮所需管道内径最小，可显著降低建设成本。同时，采用单轴转向架可有效解决传统中低速磁浮道岔转换慢、组网能力弱等问题，显著提升系统运行效率与路网适应性。



（a）管道-轮轨



（b）管道-磁浮



（c）吊挂式悬浮+单轴转向架

图 2 载运装备设计方案

3 结　论

本文提出的管轨-磁浮运输系统，融合地下管网与磁浮运载技术优势，构建了集智能分拣、自适应载运、末端配送于一体的新型城市物流体系。通过制式对比与方案优化，确定了吊挂式悬浮+单轴转向架的核心载运装备方案，可显著减小管道断面、降低工程建设成本，并有效提升道岔转换效率与路网组网能力，为城市智慧物流提供了可行技术方案。

参考文献（References）：

[1] 王剑博，邵晴，刘海萍，等. 高速磁浮碳纤维复合材料车体结构及性能研究[J]. 机车电传动，2024(6)：29-34.

[2] 王剑博. 100%低地板现代有轨电车轻量化研究[J]. 城市轨道交通研究，2021，24(2)：30-33.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.

基金项目：国家重点研发计划资助（2024YFB4303203）

作者简介：王剑博(1985－)，性别男，籍贯(吉林省松原市扶余县)，正高级工程师，机械学士学位，主要从事磁浮结构技术、小型磁浮车辆系统集成技术的研究；通信方式：E-mail:13943038869@163.com、联系电话 13943038869

文章编号：484-049

基于超声导波的磁浮列车结构健康监测方法

王剑博[1]，冯涵[1]，吕荣斌[1]
(1.中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮研究所，吉林 长春 130000)

1 引　言

高速磁浮列车是我国轨道交通高端装备自主化的重要载体，最高运行速度可达 600 km/h。车体、悬浮架、电磁铁等关键承载结构长期承受气动载荷、交变载荷与强电磁耦合作用，易产生疲劳裂纹与结构损伤，传统离线检测方法难以实现实时在线监测。超声导波技术监测范围广、对微小损伤灵敏度高，但磁浮列车复杂工况与强电磁干扰对监测可靠性提出更高要求。为此，本文采用 PZT+PVDF 复合传感与自适应高斯混合模型，开展磁浮列车结构健康监测方法研究，为磁浮列车安全运维提供技术支撑。

2 正　文

2.1 总体方案

构建 PZT+PVDF 复合传感的超声导波监测架构，在车体、悬浮架、电磁铁等应力集中区与易损部位布设传感器阵列网络，形成“感知-采集-处理-诊断-预警”一体化流程。系统分为车载在线监测与地面智能运维两层：车载端完成导波激励、信号采集、实时降噪与特征提取；地面端依托多源数据平台实现损伤识别、趋势预测与运维决策。

2.2 关键技术与方法

1. PZT+PVDF 复合传感：结合 PZT 激励效率高、PVDF 柔性好、频带宽、抗振性强的优势，适配磁浮列车复杂结构与强电磁环境，提升信号稳定性与环境适应性。

2. 导波信号处理：采用连续复小波变换降噪，提取时域互相关与频谱幅值差特征，抑制时变载荷、温度波动对信号的干扰。

3. 自适应高斯混合模型（GW-GMM）监测方法：建立健康状态基线高斯混合模型，通过动态学习与分裂-合并机制自适应更新模型；基于 KL 散度构建概率损伤指标（PDI），提取损伤微弱累积变化，实现早期损伤可靠识别。

4. 环境补偿：采用温度与载荷补偿算法，消除环境因素影响，提升宽温域、交变载荷下的监测鲁棒性。

2.3 方法特点

复合传感适配性强；纯数据驱动无需结构模型；自适应抑制环境干扰；可有效识别早期损伤并预测损伤扩展趋势。

3 结　论

本文提出基于 PZT+PVDF 复合超声导波与自适应高斯混合模型的磁浮列车结构健康监测方法，可有效抑制时变载荷与强电磁干扰，实现关键结构疲劳裂纹与渐进损伤的实时、可靠监测。该方法工程适用性强，可为磁浮列车全生命周期安全运维提供技术支撑。

参考文献（References）：

[1] 牛步钊，彭畅，阳劲松，等。高速磁浮列车结构健康监测系统研究及应用 [J]. 铁道技术标准，2026,8(01):6-12.
[2] 房芳，郑辉，汪玉，等。机械结构健康监测综述 [J]. 机械工程学报，2021,57 (16):269-292.
[3] Qiu L , Yuan S , Boller C .An adaptive guided wave-Gaussian mixture model for damage monitoring under time-varying conditions: validation in a full-scale aircraft fatigue test[J].Structural Health Monitoring, 2017, 16(5):501-517.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.
基金项目：

作者简介：第 1 作者(1985－)，性别男，籍贯(吉林省松原市扶余县)，正高级工程师，机械学士学位，主要从事磁浮结构技术、小型磁浮车辆系统集成技术的研究；通信方式：E-mail:13943038869@163.com、联系电话 13943038869

文章编号：484-050

超导电动磁浮列车超导磁体动态耐久试验方法与平台研究

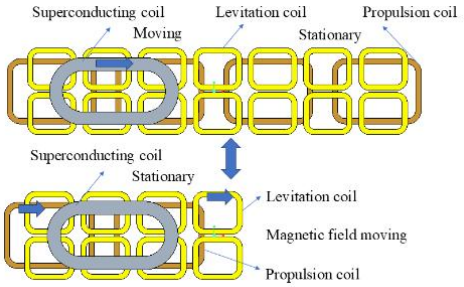
邵晴[1]，于青松[1]，李凯[1]，刘奥[1]，于淼[1]，董磊[1]，杨顺[1]，任世达[1]，李真[1]，李小汾[2]
(1.中车长春轨道客车股份有限公司磁浮研究所，吉林省长春市 130062；2.上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海市 200204)

1 引言

车载超导磁体是超导电动悬浮列车的核心部件，是列车悬浮、导向和牵引力的来源。其在长大干线交变磁场下长周期运行的性能的演变，是影响超导电动悬浮列车安全性和服役寿命的核心因素，也是当前超导电动悬浮研究领域进一步发展的决定性问题。本文系统研究了超导磁体在高速运行过程中受到行波磁场作用时的疲劳耐久性等效测试方法，并构建耐久度测试平台，为超导电动磁浮列车的工程应用提供了理论支撑。

2 等效行波磁场复现原理

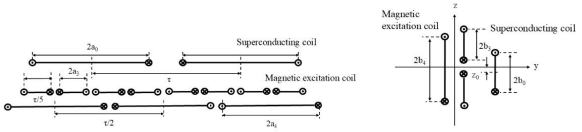
为对车载超导磁体进行动态耐久性测试，本文开发了一套等效的电磁振动测试平台。该系统使地面线圈保持静止，主动通入交变电流模拟行波磁场。在地面试验室环境中，再现高速磁浮列车运行过程中地面线圈与车载超导磁体之间产生的相对运动行波磁场，将“空间运动”转化为“时变电流激励”，如图 1 所示。从而在车载超导磁体保持静止的状态下，模拟动态运行条件，对其进行性能测试与疲劳评估。



1 磁场等效原理示意图

3 新型激振线圈拓扑设计及试验平台搭建

试验平台采用两层线圈配置：靠近超导磁体侧的线圈模拟 8 字形线圈的交变磁场效应，而远离超导磁体侧的线圈模拟牵引线圈的交变磁场效应。在运行过程中，将计算出的交流电流分别施加到两层线圈上，以模拟轨道线圈的交变磁场电流。试验平台中激振线圈的拓扑结构如图 2 所示。



2 新型激振线圈拓扑

超导磁体动态耐久试验平台包括悬浮与牵引地面激振线圈系统、逆变器系统、监控具体指标如下：模拟速度范围 0-660km/h；模拟频率范围 0.1－367 Hz；背景磁场强度 750kA；支持连续工作以进行疲劳耐久性测试。

3 结　论

本文设计了一种新型地面激振线圈几何拓扑结构，在等效测试模式下，运行磁场分布的重现精度超过 95%。下一步，将基于试验平台开展动态耐久测试，为超导电动磁浮列车工程化提供理论及试验支撑。

参考文献（References）：

[1] R. Ikeda, K. Mizuno, M. Tanaka. “Evaluation of Vibration Resistance of Levitation and Guidance Ground Coils by Electromagnetic Excitation Tests Using a Superconducting Magnet,” QR of RTRI, vol. 64, no. 1, pp 61-66, Feb, 2023.
[2] D. Hu, S. Yan, H. Cai, et al., “Design of electromagnetic vibration test bench for maglev superconducting magnets”, Journal of Traffic and Transportation Engineering, vol 23, no. 6, pp 193-205, Dec, 2023.

收稿日期：2026 年 4 月 14 日.
基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFF0508000），中国中车股份有限公司原创技术十年培育项目（2025CGY008）.
作者简介：邵晴(1990 年 2 月－)，女，籍贯为吉林省长春市，正高级工程师，博士，主要从事超导电动磁浮列车相关技术研究；通信方式：E-mail:shaoq1990@foxmail.com

文章编号：484–051

准定常气动荷载下高速磁浮列车-轨道梁耦合动力学分析

田祥富[1]，向活跃[1]，李永乐[1]
(1.西南交通大学 土木工程学院，四川 成都 610031)

1 引言

随着高速磁浮列车运行速度不断提高，其空气动力学性能急剧下降[1]。本研究开发了一个包含五个气动力分量的风-磁浮列车-轨道梁耦合动态模型。提出了一种考虑合成风偏角修正的车辆抖振载荷计算公式。列车风荷载考虑了平衡状态下平均气动载荷的非均匀性、风偏角修正的抖振载荷以及由车辆振动位移引起的简化自激载荷。利用所提出的模型，分析了各种侧风条件下的动态响应。

2 风-车-桥耦合振动研究

2.1 列车风荷载

车辆上的风载荷可分为三部分：静风荷载、抖振荷载和自激荷载。作用于运动车辆上的空气动力可表示为：

$$\mathbf{F}_w^v=\mathbf{F}_{st}^v+\mathbf{F}_{bu}^v+\mathbf{F}_{se}^v=\begin{bmatrix}F_D^v\\F_L^v\\F_{Mx}^v\\F_{My}^v\\F_{Mz}^v\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}F_{D,st}^v+F_{D,bu}^v+F_{D,se}^v\\F_{L,st}^v+F_{L,bu}^v+F_{L,se}^v\\F_{Mx,st}^v+F_{Mx,bu}^v+F_{Mx,se}^v\\F_{My,st}^v+F_{My,bu}^v+F_{My,se}^v\\F_{Mz,st}^v+F_{Mz,bu}^v+F_{Mz,se}^v\end{bmatrix} \tag{1}$$

其中，$\mathbf{F}_w^v$ 为作用在列车系统的风荷载，包括静风荷载 $\mathbf{F}_{st}^v$、抖振荷载 $\mathbf{F}_{bu}^v$ 和自激荷载 $\mathbf{F}_{se}^v$，F_D^v、F_L^v、F_{Mx}^v、F_{My}^v 和 F_{Mz}^v 分别是作用在车辆上的侧向力，升力，侧滚力矩，点头力矩和摇头力矩.

2.2 风车桥模型

当磁悬浮列车在一系列磁悬浮轨道上行驶时，车辆、轨道以及两部件的风致振动之间的耦合振动可以用风-列车-桥梁系统来描述。

$$\begin{bmatrix}\mathbf{M}^v & 0\\0 & \mathbf{M}^g\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\ddot{\mathbf{U}}^v\\\ddot{\mathbf{U}}^g\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}\mathbf{C}^v & 0\\0 & \mathbf{C}^g\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{\mathbf{U}}^v\\\dot{\mathbf{U}}^g\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}\mathbf{K}^v & 0\\0 & \mathbf{K}^g\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\mathbf{U}^v\\\mathbf{U}^g\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\mathbf{F}_e^v\\\mathbf{F}_e^g\end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix}\mathbf{F}_w^v\\\mathbf{F}_w^g\end{Bmatrix} \tag{2}$$

2.3 振动响应分析

车体横向加速度对风偏角修正表现出更高的敏感性，尤其是头车和尾车，在考虑风偏角修正后，其横向加速度的波动幅值和峰值均明显增大。

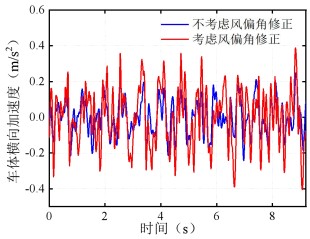


图 3 考虑合成风偏角修正的车体响应对比

3 结 论

合成风偏角修正对列车抖振荷载及系统动力响应具有显著影响。侧风条件下，简化自激气动荷载对系统响应的影响整体较小。随着侧风风速增大，高速磁浮列车峰值加速度和 Sperling 舒适度指标持续上升。

参考文献（References）：

[1] 丁叁叁，刘加利，陈大伟. 600 km/h 高速磁浮交通系统气动设计[J]. 实验流体力学: 2023, 37(01): 1-8.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.
基金项目：国家自然科学基金项目（52322811）.
作者简介：田祥富(1996－)，男，山西省孝义市，学生，博士学位，主要从事磁浮车桥耦合振动的研究；
E-mail: xiangfu@my.swjtu.edu.cn

文章编号：484-052

超导电动磁浮列车空气动力制动装置研制

牛玉国[1]，秦强[2]，李敬[1]，张彦伟[1]，马飞[1]
(1.中车制动系统有限公司，山东省青岛市 邮编：266031 2.中车长春轨道客车股份有限公司，吉林省长春市 邮编：130113)

1 引言

超导电动磁浮列车速度相比传统轮轨列车提升大，其安全制动问题日益突出。空气动力制动作为一种非黏着制动方式，具有高速下制动力强、无机械磨耗等显著优势。本文针对现有制动装置结构复杂、响应速度慢等问题，研制一种新型空气动力制动装置。通过气动外形与结构强度协同设计，结合产品研制与仿真进行验证。结果表明，该装置能有效提升高速紧急制动效能，为超导电动磁浮列车运行安全提供重要技术支撑。

2 空气动力制动装置技术方案

2.1 技术要求

研制的风阻制动器为最高时速 650km/h，最大逆风速度33m/s的高速磁浮车用垂向升降风阻制动器。整列高速磁浮车由2节端车和6节中间车构成，风阻制动器安装于每辆车的端墙位置，共分布7套，整体配套如下图所示。

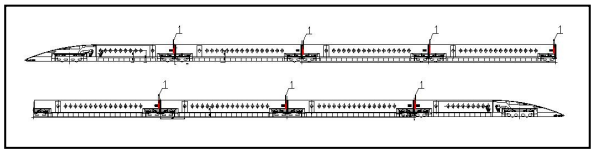


图1 磁浮车结构及风阻制动器安装位置

风阻制动器的升降翼板为风阻制动器制动力产生的核心，由整个无孔洞的平板构成，收起时，顶部与车体的外形一致，升起时，升降翼板升高约700mm，单套升降翼板的迎风面积约 $1m^2$，响应时间约 2s。为实现轻量化设计，整体采用铝合金材质，单套重量约 400kg。

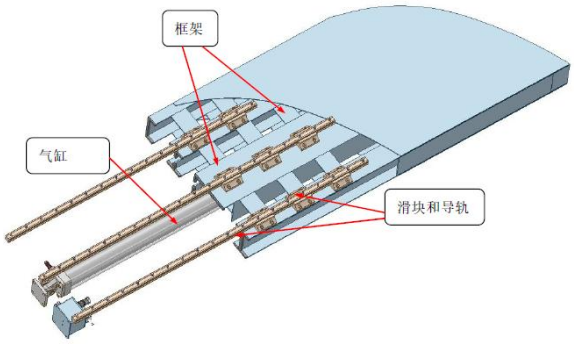


图2 风阻制动器结构

2.1 仿真计算

供风压力最大 1MPa，能满足整体 $1x10^4$ 次的升降试验。满足-25℃~40℃的工作范围。根据有限元仿真计算对风阻制动器进行冲击和静强度分析、最大工作状态分析、疲劳分析以及振动分析。

3 结 论

本文针对超导电动磁浮列车，研制了一套垂直升降式空气动力制动装置。通过明确技术参数、制定技术方案，并开展研制试验与仿真计算，验证了该装置的可行性。结果表明，该制动装置气动增阻效果显著，结构动作可靠，能有效满足高速紧急制动需求，为超导电动磁浮列车提供了重要的安全技术支撑。

参考文献 (References)：

[1] 李鹏，李睿，陈嘉辉，等.高速列车开孔式风阻制动板设计及安装参数研究[J].空气动力学报：2025，43(04)：30-42.
[2] 高立强，奚鹰，王国华，等.基于 CFD 的高速列车空气动力制动风翼板型研究[J].中国工程机械学报：2015，13(03)：236-241.
[3] Hajime TAKAMI，岳枰屹.高速铁路用空气动力制动装置的开发[J].国外铁道车辆：2021，58(04)：9-14.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.
基金项目：时速 600 公里高温超导磁浮列车关键技术研究及验证（2021CCZ002-2）.
作者简介：牛玉国(1988-)，男，江苏省徐州市，高级工程师，硕士，主要从事轨道交通车辆制动技术的研究；通信方式：yuguoniu@163.com、15689953540

文章编号：484-053

永磁-电磁混合悬浮电磁铁设计与性能研究

冯彩庆[1]，李凯[1]，李小庆[1]
(1.中车长春轨道客车股份有限公司 国家轨道客车工程研究中心，吉林 长春 130000；)

1 引言

磁浮列车因其与轨道无接触，可以有效避免轨道摩擦、损耗而被广泛应用。目前的磁浮列车的悬浮系统主要包括常导电磁悬浮（EMS）、超导电动悬浮（EDS）两种[1]。其中常导电磁悬浮的优点为主动控制悬浮，能控性高，可高速运行也可低速运行，因而应用场景更多。电磁铁系统是磁悬浮列车的核心部件，目前常导磁浮列车的电磁悬浮模式完全依靠电磁来控制列车起伏，存在能耗较高、电磁铁发热影响运行时长等问题[2]。对此本研究提出一种永磁-电磁混合悬浮方案，在电磁铁磁路中增加永磁体，利用永磁体提供部分悬浮力，通过减小电磁铁工作电流，降低能耗、减小电磁铁发热的方式，实现提高车辆运行稳定性的目的。经过仿真验证：该方案适用于磁悬浮列车的实际应用环境，鲁棒性强；与常导电磁铁相比，新方案在 10mm 悬浮间隙、0A 电流工况下，实现了节能 33.4%；满载工况下节能 23.6%。验证所提方案的可行性与优越性。同时保证了在吸死工况下，通过列车自身车重可以防止出现列车与轨道的吸死现象，验证了方案的实用性。

2 正　文

2.1 永磁-电磁混悬电磁铁模型

为研究混悬方案电磁力提升效果，在有限元仿真软件 Maxwell 中创建三维电磁铁仿真模型，如图 1 所示。为了最大程度地增加混悬电磁铁的悬浮能力，将一块 N52H 的永磁体添加在磁轭中间，以此保证永磁的磁路和电磁铁磁路相互叠加，最大程度增加永磁体的利用率、减少漏磁[3]。同时磁轭下部分采用圆弧形硅钢方案，通过令下半部分磁路闭合的方式实现有效导磁。由于在磁轭中间增加永磁会导致磁阻增大，进一步影响通电情况下的电流响应速度，使可控性降低，因此在磁轭的最下部添加一块硅钢片与磁轭相连，一方面可以通过下方的闭合磁路减小吸死状态下的磁力，另一方面又可以提高电磁铁通电状态下的电流响应速度，提高系统整体可控性。

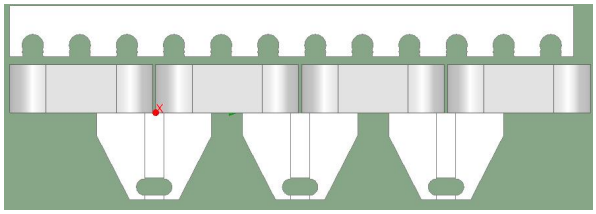


图 1 混悬电磁铁仿真模型

2.2 仿真实验

表 1 混悬电磁铁参数

参数名称	选定值
电磁铁绕组匝数	270
电磁铁磁极面积/m^2	1.69*0.35
永磁体截面积/m^2	1.69*0.35
永磁体长度/m	1.20
永磁体相对磁导率	1.05
硅钢片截面积/m^2	1.69*0.35
硅钢片长度/m	0.08

按照表一所示设置混悬电磁铁的实验参数，分别对常导电磁铁与混悬电磁铁开展仿真实验，并对其悬浮力进行对比。以常导高速磁浮列车电磁铁为研究目标，要求在吸死状态下利用自身车重可以实现防吸死，即车重大于电磁铁吸力。同时在满载时节能 15%以上。按照额定悬浮间隙 10mm，吸死间隙 3.5mm 为基准开展试验。
首先进行吸死工况下的仿真实验。当悬浮间隙为 3.5mm（吸死间隙）、电流为 0A 时，不同尺寸永磁体产生的电磁力如下表所示。

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.

作者简介：冯彩庆(1997－)，男，黑龙江省齐齐哈尔市，助理工程师，硕士，主要从事常导列车电磁铁性能研究，通信方式：E-mail:2272257995@qq.com

表 2 吸死工况电磁力与永磁尺寸对照表

永磁尺寸/mm	常规	120*35	130*35	140*35
电磁力/KN	0	29.81	30.9595	37.532

由上表可以看出，在吸死间隙下，120*35 与 130*35 两种尺寸模型可以实现通过自身车重（33KN）实现防吸死，而 140*35 模型需要通过外加反向电流的方式实现防吸死。

接下来进行悬浮工况下的仿真实验。在悬浮间隙为 10mm 时，不同永磁尺寸的混悬电磁铁悬浮力与电流关系对比如下图所示。

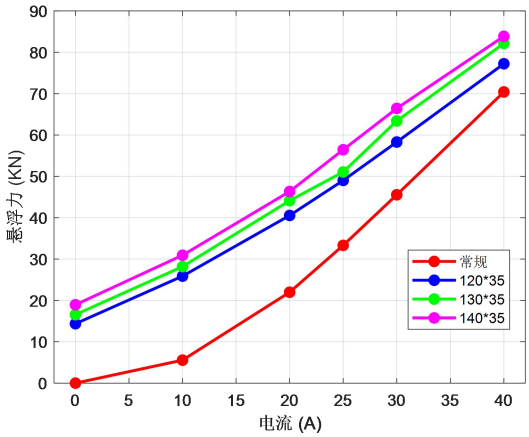


图 2 不同尺寸混悬电磁铁悬浮力与电流对比图

从图中可以看出，三种尺寸的混悬电磁铁整体性能均可以实现列车稳定悬浮。考虑到 140*35 方案需要额外设计防吸死方案，增加控制器设计难度，故将此方案舍弃。而且永磁自身尺寸越大，相应的会带来重量上的增加。因此，永磁体尺寸选择 120*35。此时在满载工况下，相较于常规纯电电磁铁，节能效率达到 23.6%。

3 结　论

本文针对永磁电磁混合悬浮电磁铁系统，提出了三种混悬方案，开展了不同工况下悬浮力的计算，并与常导电磁铁进行了性能对比，主要得出了以下研究结论：

(1) 根据实际高速常导车车型，设计混合悬浮电磁铁的相关参数，并通过对比，得到了满足各种工况的电磁铁方案。

(2) 和常导纯电电磁铁相比，新方案在 10mm 悬浮间隙、0A 电流工况下，实现了节能 33.4%；满载工况下节能 23.6%。同时可以实现通过自身车重实现车辆防吸死。

(3) 磁轭的长度要随着永磁的长度变化而变化，永磁体越长，相应的磁轭也要更长。随着永磁体长度的增加，磁阻也会因此增大。

本文提出了一种永磁电磁混合悬浮电磁铁，并通过仿真实验对比得到了方案的可行性与优越性，为常导磁浮列车混悬电磁铁的参数优化与设计提供了重要参考。同时为磁悬浮列车防吸死策略提供了一种新思路。

参考文献（References）：

[1]卢相宇,马卫华,张敏,等.混合悬浮电磁铁结构优化设计[J].铁道机车车辆,2023,43(05):25-30.

[2]袁中原,周弦,李海涛,等.新型导磁型永磁混合电磁铁优化设计[J].现代交通与冶金材料,2025,5(02):16-21.

[3]薛齐豪,刘放,梁成,等.磁悬浮列车悬浮电磁铁结构优化方法研究[J].机械设计与制造,2020,(05):202-205.DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2020.05.049.

文章编号：484-054

高速磁浮轨道线形静态测量

吴睿琦[1]，江强[1]，徐海荣[1]
(1.上海市安装工程集团有限公司，上海市 200080)

1 引言

作为 600km/h 级地面高速交通技术，高速磁浮依托电磁悬浮与直线牵引实现无接触运行，轨道线形是悬浮稳定性、牵引效率与乘坐舒适度的核心几何基准。与传统轮轨铁路不同，高速磁浮对轨道线形提出极端精度要求，轨道线形静态测量是精度保持的关键手段。

2 高速磁浮静态测量精度的要求

高速磁浮轨道线形精度直接决定悬浮气隙稳定性，从而影响乘坐舒适性，其核心指标远高于传统轮轨高铁，其主要精度指标要求如表 1 所示。

表 1 高速磁浮主要功能面精度要求

功能面	允许偏差
滑行面	横向±1.0mm；垂向±0.5mm
定子面	横向±1.0mm；垂向±0.5mm
导向面	横向±0.5mm；垂向±1.0mm

3 静态测量核心功能

静态线形测量承担三大核心功能：一是为新建线路轨道安装提供的精准定位；二是运营期线形变化长期跟踪监测；三是动态异常区段的轨面确诊与维护校准提供依据。

4 高精密测量装备

传统的线路测量采用全站仪，其精度为：0.6mm+1ppm，与高速磁浮线路精度要求存在差距；并且需要在强光下完成工作，无法满足既有线路仅能在窗口期作业的要求。根据磁浮线路的高精度要求可采用激光跟踪仪完成测量工作，其精度达到±15μm+6μm/m，并能在弱光环境下工作。激光跟踪仪可直接输出特征元素三维坐标数据，为数字孪生模型几何骨架提供核心数据。

5 静态测量与动态监测之间的关系

静态检测是在无荷载的状态下对轨道几何形位进行的离线、定点测量。而动态监测是在磁浮列车（监测车辆）正常运行状态下，利用车载传感器系统实时、连续地采集轨道与车辆相互作用的动态响应参数。

日常可以动态监测为“哨兵”，实时计算轨道健康指数，实现预测性预警。静态检测可对动态报警区段进行绝对坐标校准和精细测量。由此可建立“动态筛查→静态确诊→动态验证”的双向闭环维护流程。

6 结　论

高速磁浮轨道静态测量是保障悬浮稳定性和运行安全的生命线工程。它以亚毫米级精度为轨道提供绝对空间基准，是动态监测误差标定的标准。通过精准控制线形平顺度，可为线路精度的保持提供依据，并为数字孪生与预测性维护奠定高精度数据基底，实现从“被动维修”向“主动预防”的跨越。

参考文献 (References)：

[1] 洪小波,吴峻,晁闯,等. 高速磁浮轨道导向不平顺检测系统的研究[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(7): 2718-2727.
[2] 高豆豆,董登峰,邱启帆,等. 面向激光跟踪测量的大范围高精度姿态测量[J]. 光学精密工程,2024,32(7): 976-986.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.
基金项目：适用于长大线路的磁浮交通专项技术研究（25JCYJ-03）.
作者简介：吴睿琦(1982－)，女，江苏、南通，高级工程师，工学硕士，主要从事高速磁浮轨道系统的研究；通信方式：wrqcom@126.com

文章编号：484-055

超导电动磁浮列车超导磁体随机振动特性研究

丁文超[1]，邵晴[1]，张朋[1]，王爱彬[1]
（1. 中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮研究所，吉林 长春 130000）

1 引言

超导磁体是超导高速磁浮列车安全稳定运行的核心部件，在列车运行中会受多种因素影响产生随机振动。研究不同运行因素对其振动的影响，对超导磁体研发、振动测试及风险防控具有重要意义。本文基于实时仿真系统，分析超导高速磁浮列车线路模拟下的磁体随机振动特性，并采用统计容差法归纳其振动功率谱密度。

2 超导磁浮列车实时仿真系统

鉴于目前超导磁浮列车暂无达速试验线路，无法通过实车试验直接获取超导磁体随机振动数据，本文依托超导磁浮列车实时仿真系统研究其随机振动特性。实时仿真系统综合考虑了牵引、线路、车辆、轨道等多要素，能够提取超导磁体三向振动加速度等关键动态响应，其数据传递关系如图 1 所示。

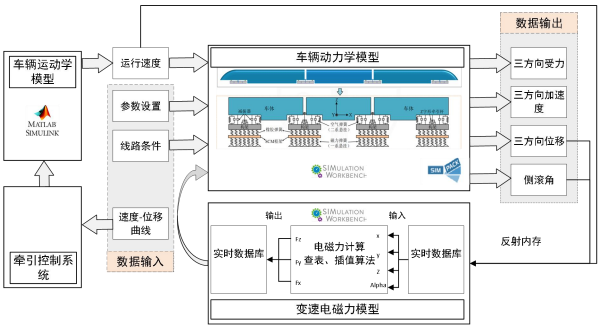


图 1 实时仿真系统数据流图

3 超导磁体工况振动特性分析

为研究超导磁体的随机振动特性，在动力学模型中选取超导磁体的安装点、边和角等部位作为振动观测点。按不同线路条件、牵引、制动等工况分类，基于测点加速度，探讨超导磁体在不同运行工况下 x、y 和 z 三个方向上的振动水平及特点，同时也考虑了不同载重条件对超导磁体随机振动的影响。

4 多工况振动功率谱的统计归纳

针对上文中的多种运行工况，对三个方向的振动数据开展了时域到频域的功率谱变换与统计归纳，有效降低了试验数据的随机分散性，提取出具有统计代表性的频域振动特征。基于统计容差法实现多工况功率谱的包络与统一处理，形成了规范的输入条件，可为超导磁体随机振动特性分析与动力学性能评估提供有效参考。

5 结 论

本文以超导高速磁浮列车超导磁体为研究对象，基于实时仿真系统开展随机振动特性研究，分析列车在牵引、制动及不同限速等级工况下，磁体在 x、y、z 三向的振动响应。采用功率谱变换与统计容差法对多工况数据进行归纳处理，建立了超导磁体随机振动功率谱，可为超导磁体振动分析、动力学评价及试验方案制定提供参考。

参考文献（References）：

[1] 姜春龙,程亚军,张红卫,等.400 km/h 动车组车下设备随机振动载荷谱及加速试验研究[J].大连交通大学学报：2025,46(06)：49-57+119.
[2] 高文杰,谭诗磊,杨艺,等.轨道随机不平顺对地铁振动源强时-频特性影响的仿真研究[J].城市轨道交通研究：2023, 26(7)：38-43+49.

收稿日期：2026 年 04 月 15 日.
基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFF0508000）；中国中车股份有限公司原创技术十年培育项目（2025CGY008）.
作者简介：丁文超(1999－)，男，吉林省四平市，助理工程师，硕士，主要从事超导磁体振动特性的研究；
通信方式：ding_wenchao@foxmail.com

文章编号：484–056

磁浮列车间隙传感器自编码故障诊断方法

吴珊珊[1,2]，李传健[1,2]，张轲[1,2]，张和洪[1,2*]

（1. 福州大学 计算机与大数据学院，福建 福州 350108；2. 福州大学 先进技术创新研究院，福建 福州 350108）

1 引言

在中低速磁浮列车悬浮控制系统中，间隙传感器用于检测悬浮电磁铁与轨道悬浮功能面的间距，为悬浮控制器提供状态反馈信息，其可靠性直接影响行车安全。工程中，间隙传感器测量系统通常采用“三取二”的硬件冗余配置，以应对单个传感器过轨道接缝时的瞬时异常，同时提升系统对传感器失效的容错能力。然而，该设计无法区分具体的故障类型，且环境干扰（尤其是轨道接缝扰动）常使基于探头间输出差值超限的判断规则失效。因此，研究强干扰下间隙传感器故障诊断方法对保障磁浮列车可靠运行具有重要意义。

2 间隙传感器故障诊断方法设计

本文提出的故障诊断方法如图 1 所示。首先，设计自适应估计算法提取三探头信号的直流、幅值、频率特征，并利用滑动窗口构造探头间的差异特征，正常工况下该差异由安装偏差、测量噪声等因素引起，数值维持在较低水平且波动较小。其次，考虑到探头故障会体现为差异特征的异常变化，引入自编码器对正常工况下的差异特征进行无监督建模，以重构误差超过阈值作为故障判据，并通过偏差得分定位故障探头。最后，为区分不同类型的故障，基于故障探头与正常探头的差异序列构建方向向量，采用余弦相似度匹配主导异常特征，从而判断故障类型，提高诊断的准确性与可解释性。

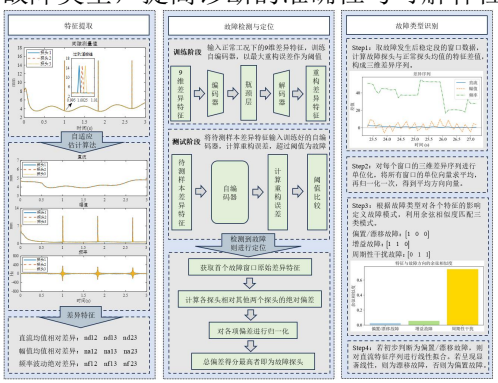
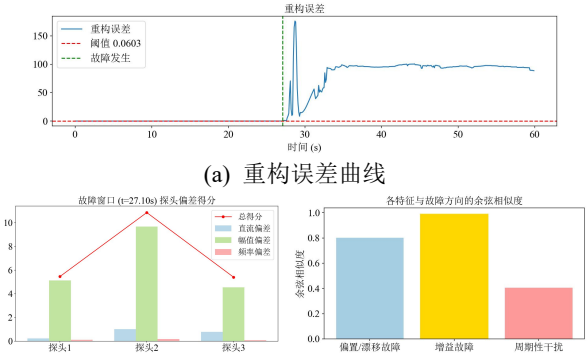


图 1 故障诊断方法流程图

3 仿真验证

针对所提故障诊断方法，基于单点悬浮模型开展仿真验证。收集正常工况数据训练自编码器，在测试阶段注入偏置、漂移、增益及周期性干扰四类典型故障。结果表明，所提方法能够有效诊断间隙传感器故障。以探头 2 增益故障为例，在 27 秒处注入系数为 1.1 的增益故障。如图 2 所示，所提方法在故障注入后 0.1 秒检测到重构误差超过阈值，且能够准确定位故障探头并识别故障类型。



(a) 重构误差曲线

(b) 偏差得分　　(c) 余弦相似度匹配结果

图 2 探头 2 增益故障诊断结果

4 结论

本文提出了一种间隙传感器故障诊断方法，能够实现故障探头的检测、定位与类型识别，具有较高的准确性和可解释性。该方法为悬浮控制系统间隙传感器故障诊断提供了有效的解决方案。

参考文献（References）：

[1] 谢云德, 龙志强, 张和洪, 等. 非线性信号特征提取算法及其在磁浮列车制动振动控制中的应用[C]//第十一届全国磁悬浮技术与振动控制学术会议论文摘要集. 2023：154.

[2] ZHANG He-hong, XIAO Gao-xi, YU Xing-huo, et al. On Convergence Performance of Discrete-Time Optimal Control Based Tracking Differentiator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4)：3359-3369.

收稿日期：2026 年 04 月 15 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（62003088）.

作者简介：吴珊珊(2002－)，女，福建泉州，硕士研究生，主要从事磁浮列车故障诊断算法的研究；通信方式：241027015@fzu.edu.cn、19959829887.

文章编号：484-057

基于迭代学习的悬浮自抗扰控制算法研究

胡昊[1,2]，张轲[2,3]，黄峰[1,2*]

（1.福州大学 机械工程及自动化学院，福建 福州 350108；2.福州大学 先进技术创新研究院，福建 福州 350108；3.福州大学 计算机与大数据学院，福建 福州 350108）

1 引言

在磁浮列车悬浮控制系统中，维持电磁铁与轨道间的稳定间隙是保障列车安全、平稳运行的核心基础。线性自抗扰控制(LADRC)凭借扩张状态观测器(LESO)对内外扰动的实时估计与补偿，在悬浮系统中展现出良好的鲁棒性。然而，磁浮列车通常服役于既定运营线路，其面临的轨道接缝、结构形变及几何不平顺等空间分布型激扰，在控制系统的时间域内映射为周期性确定扰动。长期依赖 LESO 和误差反馈机制对强周期性冲击进行实时跟踪，会显著加重观测器的动态估计负担。迭代学习控制(ILC)能够充分挖掘系统运行的重复性特征，通过记忆前序运行批次的跟踪误差与控制输入，在迭代域内构建前馈补偿律。因此，本文提出一种基于 ILC 的悬浮控制方法，利用 ILC 的主动学习能力消除周期性扰动，有效降低 LESO 的估计负担，这对提高悬浮列车运行的动态精度与稳定性具有重要意义。

2 悬浮系统控制方法设计

本文所提控制方法如图 1 所示。首先，建立单点悬浮系统非线性机电动力学模型，经反馈线性化重构为包含标称控制增益与广义总扰动的二阶自抗扰标准型，并设计 LADRC 控制器以实现对基础非线性动态的闭环稳定控制。其次，为减轻 LESO 的估计负担并提升对周期性扰动的补偿精度，在时间迭代域引入 PD 型 ILC。为克服传统微分算子极易放大高频量测噪声的缺陷，提取 TD 与 LESO 输出的低噪信号作为 ILC 的反馈源，从而构建内外环频域解耦的复合控制架构。

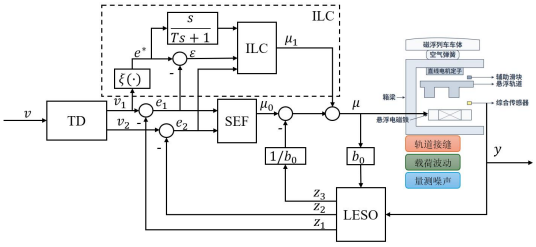
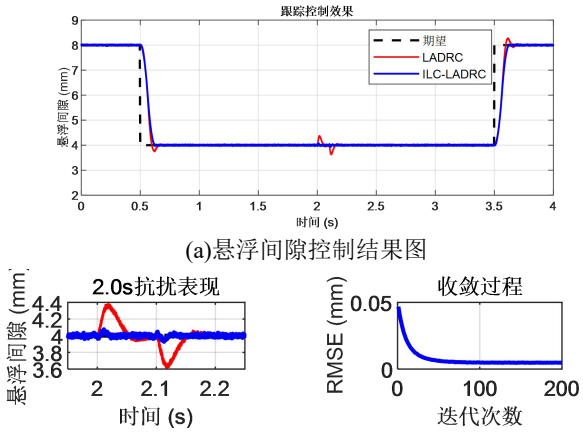


图 1 ILC-LADRC 算法原理图

3 仿真验证

针对所提控制方法，基于单点悬浮动力学模型开展了仿真验证。为模拟磁浮列车在固定线路上的实际受扰特性，在系统测试阶段的反馈回路中注入了高频量测噪声，并在空间位移上施加了代表轨道接缝的周期性确定物理冲击。结果表明，所提控制方法能够有效消除重复性扰动带来的不利影响。



(a)悬浮间隙控制结果图

(b)重复性扰动消除　　(c)算法迭代过程

图 2 ILC-LADRC 控制结果

4 结论

本文提出了一种磁悬浮系统控制方法，能够实现对周期性重复扰动的主动消除，缓解状态观测器的动态估计负担，为提升固定线路运营工况下悬浮系统的抗扰性提供了有效的控制策略与解决方案。

参考文献（References）：

[1]王术波，韩宇，陈建，等.基于ADRC迭代学习控制的四旋翼无人机姿态控制[J].航空学报，2020，41(12)：319-331.

[2]杨亮亮，陈泓，鲁文其.执行器约束下基于轨迹学习的核正则化最优迭代学习控制[J].中国机械工程，2025，36(10)：2274-2283.

[3]张和洪，张文进，陈建，等.BP神经网络跟踪微分器在磁浮列车悬浮控制中的应用[J].交通运输工程学报，2025，25(01)：94-106.

收稿日期：2026 年 04 月 15 日.

基金项目：基于产教融合闭环与大模型驱动的计算机控制课程教育教学模式创新探索（JG48250130）.

作者简介：胡昊(2002－)，男，河南省信阳市，硕士，主要从事磁悬浮控制的研究；通信方式：482988868@qq.com、13805043633

文章编号：484-058

轨道支撑件对超导电动悬浮系统平稳性的影响

周丹峰[1]，彭雍[1]，谭亦秋[1]，汤澳其[1]，王连春[1*]，李杰[1]
(1.国防科技大学 智能科学学院，湖南省 长沙市 410073)

1 引言

超导电动悬浮（Electro-dynamic Suspension, EDS）系统利用运动的超导磁体与轨道悬浮线圈排斥实现悬浮导向。但是车辆运行时轨道上规律性布置的金属支撑件会对超导磁体产生周期性的力脉冲，从而影响车辆平稳性。本文以轨道下方碳钢支撑板为例，探讨支撑板间距等参数对车辆平稳性的影响，从而对结构件的布置提出建议。

2 金属支撑件对 EDS 系统影响分析

2.1 碳钢支撑板与超导磁体的作用力分析

在真空管道磁浮交通中，轨道基座常通过金属板与管道固连。然而，超导磁体会对碳钢支撑板产生静吸力以及感应排斥力。对于图 1 所示的情形，有限元仿真结果如图 2 所示。可见，支撑板对超导磁体产生的吸力呈双峰脉冲状，峰可达 250N。

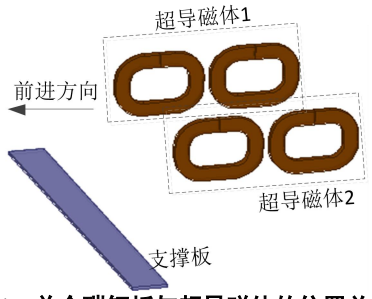


图 1　单个碳钢板与超导磁体的位置关系

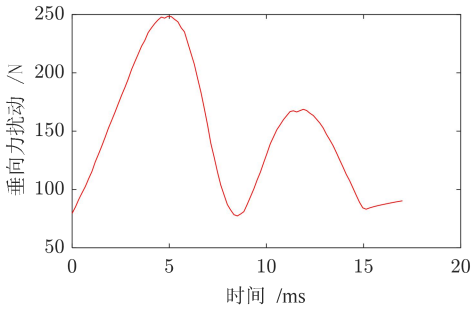


图 2　碳钢板对超导磁体产生的垂向吸力

2.2 碳钢板间距对 EDS 车辆平稳性的影响

设车体由 4 个超导磁体支撑，前后磁体距离 L 为 4.3m，车体重量为 1245kg。改变支撑板的间距，得出车体质心垂向加速度的变化规律如图 3 所示。可见，随着板间距的增大，车体振动加速度呈规律性的增减。其中，当间距为 1.25m、1.75m 左右达到最小，它们分别对应 1/3.5L 和 1/2.5L；在 1.08m、1.45m 左右出现极大值，它们分别对应 1/4L 和 1/3L。

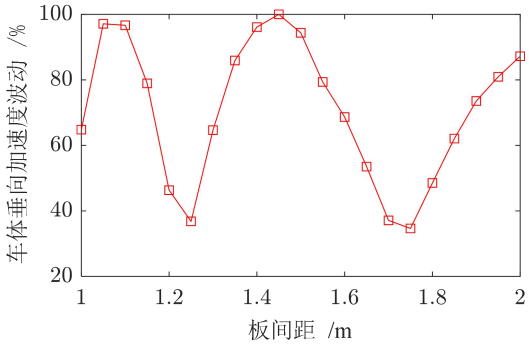


图 3 支撑板的间距与 EDS 车体质心垂向加速度的关系

3 结　论

以上分析说明，在配置轨道的金属支撑件时，应当合理配置它们的间距，从而使其对车辆的运行平稳性影响最小。特别注意的是，轨道支撑件的间距不能与车辆长度成整数倍关系，否则将引起车体垂向振动加速度达到最大值。

参考文献 (References)：

[1] Tan Y, Zhou D, Chen Q, et al. Research on the calculation methods of the mathematical model of null-flux coil electrodynamic suspension system and experimental verification [J]. IEEE Trans.Transportation Electrification, 2025, 11(1): 3015-3027.

[2]王志涛，蔡尧，龚天勇，等. 基于场-路-运动耦合模型的超导电动悬浮列车特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4):1162-1170.

[3] 周丹峰, 朱鹏翔, 谭亦秋, 等. 超导电动悬浮系统的垂向阻尼及其增强措施[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(5):165-174

收稿日期：2026 年 04 月 19 日.

基金项目：国家自然科学基金重点项目（52332011）.

作者简介：周丹峰(1982—)，男，籍贯：河南内乡，副研究员，博士，主要从事磁悬浮控制、车轨耦合振动控制研究；通信方式：E-mail: zhoudanfeng@nudt.edu.cn、联系电话:0731-87005178

文章编号：484-059

基于混沌粒子群优化算法的高速列车二系悬架主动控制系统研究

曹先腾[1,2]，牛华伟[1*]，刘宇奇[1]，张弘毅[1]，陈志文[1,2]，陈政清[1]

(1. 湖南大学 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室，湖南省 长沙市 410082)

(2. 湖南大学 整车先进设计制造技术全国重点实验室，湖南省 长沙市 410082

1 引言

高速列车主动悬架系统是保障列车在高精尖工况下运行平稳性的关键环节。针对二系悬架在高速行驶中面临的复杂宽频激扰及浮沉-点头运动耦合问题，通过引入更灵活的控制器并进行高效参数优化已成为提升乘坐舒适性的核心路径。分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器凭借其增加的阶数自由度，在非线性系统控制中表现出比传统 PID 更强的鲁棒性和适应性。然而，分数阶控制器多达五个待整定参数（Kp, Ki, Kd, λ , μ），在应用于高速列车复杂的动力学模型时，存在参数搜索空间大、整定盲目性及传统算法易陷入局部最优等瓶颈。为此，本研究探讨了一种基于混沌粒子群优化算法（CPSO）的高速列车二系主动悬架分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制策略。首先，建立了含车体及转向架的 6 自由度高速列车动力学模型。结合分数阶微积分理论，设计了以车体垂向加速度及点头角加速度为多输入反馈变量的分数阶控制器，用以协同抑制车体的浮沉与俯仰运动

2 研究内容

2.1 高速列车二系主动悬架系统动力学及无流体主被动混合磁电减振器设计

为了有效开展高速列车二系主动悬架系统的性能研究，本文对高度非线性的列车系统进行了合理简化。基于垂向与横向动力学响应的弱耦合特征，建立了半车 6 自由度垂向主动悬架模型。在该体系中，电磁作动器作为核心执行元件安装于车体与转向架构架之间。在设计过程中，本文首先基于磁路流通模型推导出电涡流线性区的阻尼系数，使其满足系统的基值阻尼需求；随后通过磁场解析推导出主动电磁推力特性。该直线电机作动器可根据轨道激扰的变化实时调节电流，输出相应的补偿力抵消垂向振动，从而显著提升列车的减振性能与运行平顺性。

2.2 基于混沌粒子群优化的分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$的控制器设计

为获取最佳控制律，本文引入逻辑映射（Logistic Map）改进传统粒子群算法，利用混沌序列的遍历性和随机性初始化种群，并设计了混沌扰动算子以增强算法跳出局部最优的能力。研究综合考虑车体垂向加速度均方根值、点头角加速度、二系悬架动挠度及轮重减载率等关键性能指标，构建了加权无量纲目标函数。

利用 MATLAB/Simulink 对被动悬架、传统 PID 控制主动悬架及 CPSO-FOPID 优化后的主动悬架进行了典型轨道谱激励下的时域与频域对比仿真。研究结果表明：相较于被动悬架与传统 PID 控制，基于混沌粒子群优化的分数阶控制器能显著降低车体共振峰值，有效衰减高速运行时的宽频振动。该策略不仅解决了分数阶控制器参数整定的难题，且计算效率高、稳态精度好，为高速列车主动悬架的智能化控制提供了理论依据与工程参考。

3 结 论

本文通过建立高速列车 6 自由度动力学模型，利用混沌粒子群算法（CPSO）解决了分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器参数整定难的问题；仿真证实，该策略能精准协同抑制车体的浮沉与点头振动，在显著提升乘坐舒适性的同时兼顾了行车安全性，为高速列车主动悬架提供了更高效、鲁棒的智能化控制方案。

参考文献 (References)：

[1] 张开林,段治勇.铁道车辆横向主动悬挂试验研究[J].西南交通大学学报,1999(1):101-105.

[2] 李忠继.基于高速列车稳定性和振动特性的半主动悬挂系统研究[D].成都:西南交通大学, 2013.

收稿日期：2026 年 04 月 23 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（U2141242）.

通讯作者：牛华伟(1978 年 9 月)，男，教授，博士生导师，主要从事电涡流阻尼减振器、电力新能源结构风振的研究；通信方式：E-mail: niuhw@hnu.edu.cn.

文章编号：484-060

超导电动悬浮 8 字形轨道线圈结构差异对电磁性能的影响研究

李梓博[1]，张赫[1,2]，吕凯[1]
(1.哈尔滨工业大学 电气工程及其自动化学院，黑龙江省哈尔滨市 150001
2.哈尔滨工业大学 苏州研究院，江苏省苏州市 215104)

1 引言

超导电动磁浮列车与传统轮轨交通相比，具有非接触运行、速度高和维护需求低等优势，是未来高速、绿色轨道交通的重要发展方向[1]。8 字形轨道线圈是提供的悬浮力和导向力维持列车稳定性的重要结构，降低线圈提供电磁力波动可提升列车的稳定性，改善车辆乘坐的舒适性。本文通过对比分析几种不同 8 字形轨道线圈结构所提供悬浮力和导向力，得出一种能够同时降低悬浮力波动和导向力波动的线圈结构。

2 不同 8 字形轨道线圈结构对比分析

2.1 4 种 8 字形轨道线圈结构

轨道线圈通常为上下两个线圈反向串联的 8 字形结构。列车居中运行时，上下线圈磁链基本平衡，感应电流较小，悬浮力不明显；当列车达到一定速度并下沉后，磁链不对称使感应电流增大，并与车载超导磁体作用产生向上的悬浮力。当列车横向偏移时，两侧感应电流不对称，气隙较小一侧斥力较大，从而形成恢复性的导向力，使列车保持居中运行。

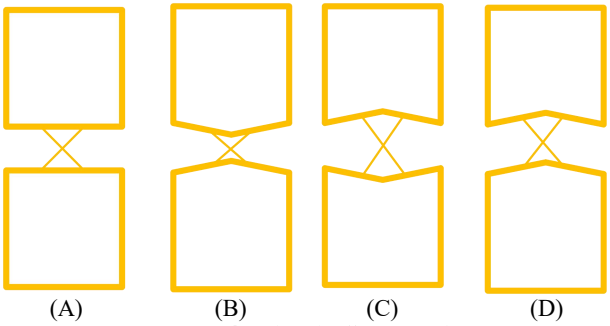


图 1 4 种 8 字形轨道线圈结构

图 1 为本文分析的 4 种 8 字形轨道线圈结构。其中 A 结构是传统轨道线圈结构，B、C 两种结构是在传统结构基础上提出的上下对称结构，D 结构是上下非对称结构。

2.2 电磁力特性对比分析

如图 2 所示，传统结构 A 平均悬浮力为 27.96N、波动为 9.89%。其余三种结构中 B 结构悬浮力波动最小为 7.92%，稳定性最好，但平均值稍稍下降为 27.83N；C 结构平均悬浮力小为 26.88N，且波动较大为 11.34%；D 结构平均悬浮力最大，为 32.65N，但波动也较大为 11.52%。

如图 3 所示，传统结构 A 平均导向力为 19.27N、波动为 12.52%。其余三种结构中，B 结构波动最小为 9.00%，稳定性最好，但导向力略低为 18.11N；C 结构的平均导向力略高于 A 结构为 19.38N，但波动最大，为 15.35%；D 结构平均导向力最大，为 29.91N，波动也较大为 15.05%。

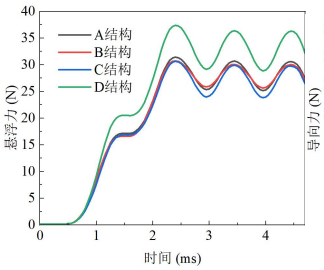


图 2 悬浮力对比

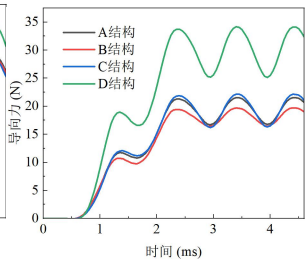


图 3 导向力对比

3 结　论

本文对比了四种 8 字形轨道线圈的电磁力特性。结果表明，D 结构可提高悬浮力和导向力，但力波动较大；C 结构综合优势不明显；B 结构在保持接近传统结构电磁力水平的同时，悬浮力和导向力波动均最小，稳定性最好。综合来看，B 结构更有利于降低电磁力波动、提升列车运行平稳性。

参考文献（References）：

[1] 熊嘉阳，邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. 交通运输工程学报，2021，21(01):177-198

收稿日期：2026 年 04 月 28 日.

基金项目：

作者简介：李梓博(2002－)，男，内蒙古赤峰市，博士生研究生，主要从事超导电动悬浮一体化线圈的研究；通信方式：LZB_HIT@163.com、联系电话 18147662913

文章编号：484-061

高速磁浮列车设备舱散热特性数值模拟分析

王亚男[1]，于文晶[1]，王中辰[1]
（1. 中车长春轨道客车股份有限公司，吉林 长春 130000）

1 引言

随着高速磁浮列车向 600km/h 乃至更高速度迈进，车下设备舱的热管理面临严峻挑战。设备舱内集中了变流器、直线电机等大量发热设备，同时高速运行带来的气动加热效应显著，导致舱内温度环境复杂。如果热量不能及时有效地散发，将导致设备舱内温升累计过高，加速绝缘材料老化，降低电子元器件的性能和寿命，甚至引发故障，严重威胁行车安全。

2 数值模拟分析

2.1 物理模型与数学模型

以 600km/h 高速磁浮列车的设备舱为研究对象，建立包含设备舱外壳、内部主要发热设备及通风系统的三维仿真模型。

设备舱内的传热过程是一个复杂的湍流流动与对流、传导、辐射综合换热的过程。本文采用 RNG k-ε 湍流模型来描述复杂的流动现象，并采用离散坐标（DO）辐射模型来精确求解设备间的辐射换热。

2.2 边界条件设定

列车运行速度为 600km/h，环境温度设定为 40℃。根据列车实际运行工况，设定如下关键边界条件：

表 1 仿真条件设置

边界条件设置		求解设置	
边界名称	对应位置	设置对象	算法选取
速度入口边界	外流场模型入口	时间	稳态
压力出口边界	外流场模型出口	湍流模型	RNG κ-ε
内部边界	interface 面	算法	SIMPLE 算法
外部边界	壁面，对称面	求解器	分离式求解器

2.3 结果分析

整体温度场分布：设备舱内温度呈现明显的分层现象，上部区域温度较高，下部区域温度较低。最高温度达到了 105℃。设备舱内平均温度约为 65℃，存在一定的热风险。

气流组织：冷却风大部分流向了发热量大的变流器和电机区域，形成了有效的强制对流冷却。但在设备舱的角落和设备间隙处，存在明显的气流死角，容易形成局部热点。

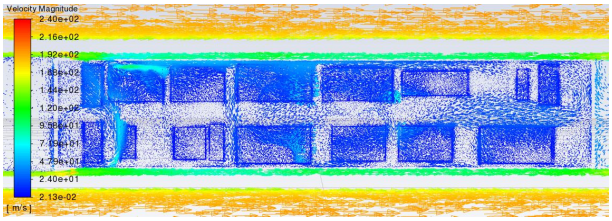


图 1 列车设备舱速度矢量图

3 结论

高速磁浮设备舱内温度分布不均匀，存在明显的温度分层和局部热点。在 600km/h 运行工况下，部分设备的温度已接近其材料允许的上限。设备舱内的气流死角也是潜在的热风险点，现有通风系统起到了关键的散热作用，但气流组织仍有优化空间。后期可通过对高速列车车下设备舱温度场的分析，得出设备温度变化规律，为高速列车车下设备的合理布局和设备舱结构优化设计提供依据。

参考文献（References）：

[1] 汪秀平，鄂慧宁，王维斌. 动车组设备舱气流组织仿真研究[J]. 铁道机车与动车，2022(03)：31-33.
[2] 吴依桐，周伟，梁习锋，等. 高速列车设备舱通风结构设计与散热优化[J]. 中南大学学报（自然科学版），2025(12).
[3] 何守宝，吴楠楠，臧建彬. 高速列车设备舱底流场特性分析[J]. 铁道机车车辆，2019，39(4)：36-41，47.

收稿日期：2026 年 04 月 28 日.
基金项目：

作者简介：王亚男(1993－)，女，吉林省长春市，工程师，硕士，主要从事高速磁浮结构设计、车辆空气动力学分析、设备舱热管理；通信方式：crrc_ynw@163.com

文章编号：484–062

基于几何特征修正的超导磁体磁场建模方法

吕凯[1]，张赫[1,2]，李梓博[1]

(1.哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院，黑龙江省哈尔滨市 150001

2.哈尔滨工业大学 苏州研究院，江苏省苏州市 215104)

1 引　言

超导 EDS 系统中，车载超导磁体与地面线圈之间的电磁耦合是实现悬浮、导向及非接触供电的基础。对于集电线圈而言，其可利用磁场与气隙中的高次空间谐波密切相关。现有研究多采用空间谐波法进行磁场建模，并常将跑道形超导线圈等效为矩形线圈[1],但该处理忽略了圆弧端部、绕组宽度和厚度等几何特征。为此，本文在现有矩形等效模型的基础上引入几何修正因子，以提高模型对实际跑道形线圈的适用性。

2 建模方法

基于标量磁位法，可推导出超导线圈在导向方向的磁通密度表达式为：

$$B_z(x,y,z)=\sum_{m=1,3\ldots}^{\infty}\sum_{n=1,3\ldots}^{\infty}\frac{2\mu_0 NI}{\tau_x\tau_y}k_{mn}e^{-k_{mn}z}S_{mn}^{corr}\cos(k_{xm}x)\cos(k_{yn}y) \quad (1)$$

其中：

$$k_{xm}=m\pi/\tau_x,k_{yn}=n\pi/\tau_y,kmn=\sqrt{k_{xm}^2+k_{yn}^2} \quad (2)$$

传统模型将跑道型线圈等效为矩形线圈，其基础形状因子为：

$$S_{mn}^{rec}=a_0b_0\frac{4\sin(k_{xm}a_0/2)\sin(k_{yn}b_0/2)}{k_{xm}k_{yn}a_0b_0} \quad (3)$$

为考虑几何特征，修正形状因子定义为：

$$S_{mn}^{corr}=S_{mn}^{rec}\eta_A\eta_{mn}^r\eta_{mn}^w\eta_{mn}^h \quad (4)$$

四个修正因子分别为：

$$\begin{cases}\eta_A=\left(b_0\left(a_0-b_0\right)+\pi((b_0/2)^2+w^2/12)\right)/a_0b_0\\ \eta_{mn}^r=\exp(-\alpha_r(k_{mn}R_0)^2)\\ \eta_{mn}^w=\exp((-\beta_w k_{mn}w)^2/24)\\ \eta_{mn}^h=2\sinh(\beta_h k_{mn}h/2)/\beta_h k_{mn}h\end{cases} \quad (5)$$

其中，η_A 修正跑道形与矩形之间的面积差异，η_{mn}^r，η_{mn}^w，η_{mn}^h 分别表征圆弧端部、有限绕组宽度及厚度方向电流层位置差异对谐波幅值和衰减特性的影响。

3 结果分析

在工作气隙条件下，选取不同横向位置计算主要耦合区域磁场 B_z，并与有限元结果进行对比。修正后 RMSE 由 0.07475-0.08654T 降至 0.00416-0.00465T，归一化误差由 9.33%-22.83%降至 0.51%-1.10%，最大绝对误差由 0.13423-0.17830T 降至 0.00829-0.01177T。

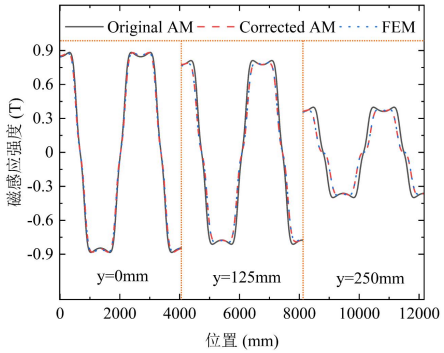


图 1 不同横向位置下导向磁场 Bz 效果对比

4 结　论

针对矩形等效模型忽略几何特征的问题，引入面积、圆弧端部、绕组宽度和厚度修正因子，提高空间磁场谐波模型的准确性。

参考文献（References）：

[1] G. Lv, Y. Liu, Z. Zhang and T. Zhou, "Characteristic analysis of coreless-type linear synchronous motor with the racetrack coils as secondary for EDS maglev train," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 27, no. 6, pp. 4654-4664, Dec. 2022.

收稿日期： 2026 年 04 月 28 日.

基金项目： 项目名称（编号）；项目名称（编号）.

作者简介： 吕凯(2001—)，男，安徽省汤池镇，博士研究生，主要从事超导 EDS 系统非接触供电、阻尼特性研究；通信方式：E-mail: 2205577040@qq.com

文章编号：484-063

超导电动悬浮 8 字形轨道线圈非对称程度差异对电磁性能的影响研究

李梓博[1]，张赫[1,2]，吕凯[1]

(1.哈尔滨工业大学 电气工程及其自动化学院，黑龙江省哈尔滨市 150001

2.哈尔滨工业大学 苏州研究院，江苏省苏州市 215104)

1 引言

超导电动磁浮列车与传统轮轨交通相比，可以克服有轨列车轮轨摩擦的限制，达到更高的运输速度，具有爬坡能力强、噪声小、平稳性好以及维护成本低等优点，成为未来轨道交通发展的重点方向[1]。8 字形轨道线圈所提供的悬浮力和导向力是维持列车稳定性的重要结构，非对称 8 字形轨道线圈能够节省材料成本，并可以改善悬浮力的性能[2]。本文对比分析了不同非对称程度的 8 字形轨道线圈提供悬浮力和导向力的能力，为非对称 8 字形轨道线圈的结构优化设计提供参考。

2 8 字形线圈非对称结构对比分析

2.1 非对称 8 字形线圈结构

非对称 8 字形轨道线圈是在传统上下等尺寸 8 字形零磁通线圈基础上演变产生的。其工作原理与传统结构一致，超导线圈受到的悬浮力是由上下线圈的不平衡磁链差值导致的感应电流环流产生的。这种非对称结构加强了不平衡磁链的差值，进而提升了线圈产生的电磁力。

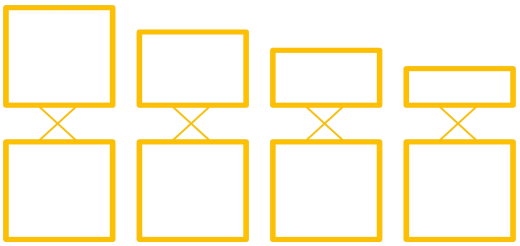


图 1 不同非对称程度 8 字形线圈

2.2 非对称 8 字形线圈结构电磁性能分析

上线圈高度为 60mm 的非对称结构平均悬浮力最大，为 29.67N，但悬浮力波动为 12.56%，相比于对称结构的波动值 11.05%增大了 1.51%。整体来看，随着上线圈高度从对称高度逐渐减小，平均悬浮力先增大，在 60mm 附近达到最大，之后下降；而悬浮力波动值呈缓慢增大趋势。

对称结构的平均导向力最大，为 19.27 N，且波动值最小，为 12.52%。随着上线圈高度从 90mm 逐渐降低到 40mm，平均导向力整体下降，而波动值逐渐增大，说明非对称产生导向力的稳定性变差。

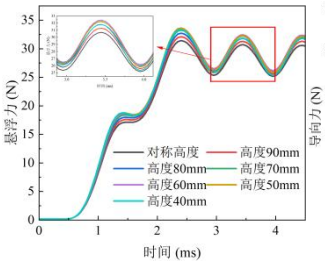


图 2 悬浮力对比

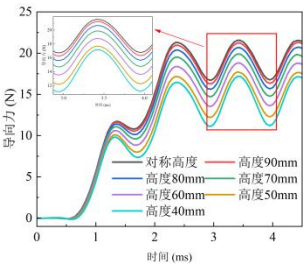


图 3 导向力对比

3 结　论

本文对比了不同非对称程度的 8 字形轨道线圈电磁力特性。结果表明，随着非对称程度增大，悬浮力呈先增大后减小的趋势，且悬浮力波动缓慢增大，导向力性能则持续变差。因此非对称结构在提升悬浮性能的同时降低了导向性能，在满足悬浮力指标的前提下要尽量降低线圈非对称程度 。

参考文献（References）：

[1] 葛庆稳. 双边空芯超导磁悬浮直线同步电机的基础研究[D]. 哈尔滨工业大学，2023.

[2] Ning X., C. Zhao, Q. Yu, et al. Suspension and Guidance Performance of a New Superconducting EDS System Using the 8-Shaped Ground Coils With Nonequal Turns[J]. IEEE Trans. Appl. Supercon., 2024, 34(4): 1-11.

收稿日期：2026 年 04 月 28 日.

基金项目：

作者简介：李梓博(2002－)，男，内蒙古赤峰市，博士生研究生，主要从事超导电动悬浮一体化线圈的研究；通信方式：LZB_HIT@163.com、联系电话 18147662913

文章编号：484–064

高速磁浮车-磁-轨参数敏感度研究

王文[1,2,3]，徐俊起[1,2]，刘志刚[3]，陈琛[1,2]

(1.同济大学 磁浮交通工程技术研究中心，上海市 201804；2.同济大学 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海市 201804；3.同济大学 交通学院，上海市 201804；)

1 引言

常导电磁悬浮依靠车载电磁铁与铁磁性轨道之间的吸力实现悬浮，其车轨耦合振动十分显著。目前主要依靠“以轨适车”方法来保障系统的稳定和平稳运行，即依赖不断提升轨道平顺性和控制地下基础结构精度，来减小悬浮间隙波动，导致土建成本居高不下。因此，优化车辆-磁力-轨道参数匹配设计，采用“以车适轨”模式是提升技术经济性，推动磁浮交通在全国乃至全球实现大规模应用的重中之重。

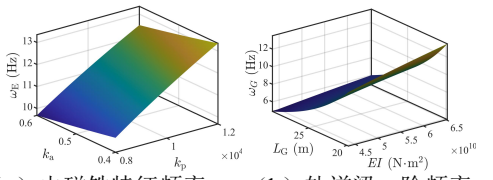
2 参数边界条件分析

基于最小悬浮单元的稳定分析，获得了稳定性边界条件：

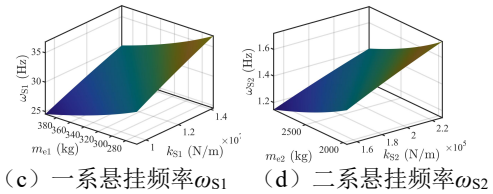
$$\begin{cases} a_3 = c_n + \dfrac{k_i k_v (2m_1 + m_G)}{m_G (m_1 + k_i k_a)} > 0 \\ \dfrac{a_2 a_3 - a_1}{a_3} = \dfrac{\left[k_n + \dfrac{k_i k_p - k_\delta}{m_1 + k_i k_a} + \dfrac{2m_1 (k_i k_p - k_\delta)}{m_G (m_1 + k_i k_a)}\right] \times \left[c_n + \dfrac{k_i k_v (2m_1 + m_G)}{m_G (m_1 + k_i k_a)}\right] - \left[\dfrac{c_n (k_i k_p - k_\delta) + k_n k_i k_v}{m_1 + k_i k_a}\right]}{c_n + \dfrac{k_i k_v (2m_1 + m_G)}{m_G (m_1 + k_i k_a)}} > 0 \\ a_0 = \dfrac{k_n (k_i k_p - k_\delta)}{m_1 + k_i k_a} > 0 \end{cases} \tag{1}$$

基于避免共振频率分析，获得频率边界条件：

$$\omega_{S2} < \omega_G < \omega_E < \omega_{s1} \tag{2}$$



（a）电磁铁特征频率ω_E （b）轨道梁一阶频率ω_G



（c）一系悬挂频率ω_{S1} （d）二系悬挂频率ω_{S2}

图 1 高速磁浮子系统频率随参数变化图

3 参数可变的快速代理模型

基于深度学习+高斯过程构建间隙的标准差 S_δ、电磁铁加速度标准差 S_{ae}、车辆平稳性指标 W 和轨道跨中加速度标准差 S_{aG} 的快速计算模型，为敏感性分析提供计算工具。

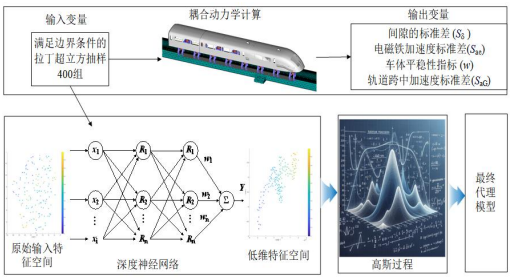


图 2 系统输出指标值快速计算模型构建的工作流程

4 敏感度分析结果

利用最终训练好的 DKL 模型，随机采样数量取 40000，计算 10 个输入变量对系统响应的敏感性系数。

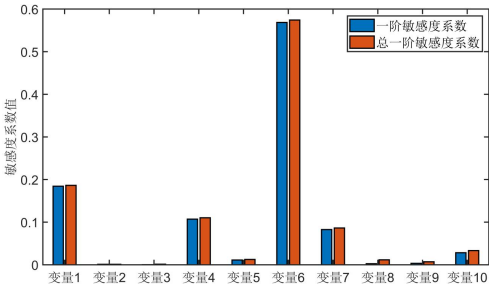


图 3 系统输出指标值快速计算模型构建的工作流程

5 结论

本文构建的快速计算模型预测系统动力学响应的 MAE<2%，R^2>0.98，具有优秀的预测精度和拟合能力。对车辆平稳性影响较大的参数依次为车体质量、二系悬挂刚度、轨道梁长、轨道刚度和间隙反馈系数，对应量化的一阶总敏感度系数 STi 分别为 0.4185、0.2715、0.2314、0.0767 和 0.0566。对悬浮间隙影响较大的参数依次为轨道梁长、间隙反馈系数、轨道刚度和车体质量，对应量化的一阶总敏感度系数 STi 分别为 0.4939、0.3311、0.1047 和 0.0916。

收稿日期：2026 年 04 月 30 日.

基金项目： 国家自然科学基金重点项目（52232013）；国家重点研发计划项目(2023YFB4302502)。

作者简介：王文(1996－)，男，安徽省安庆市，硕士，磁浮列车悬浮控制及车轨耦合动力学分析；通信方式：2496741148@qq.com;联系电话:18328040659

文章编号：484–065

大跨度高速磁浮预应力混凝土连续梁桥设计

郑婧怡[1,2,3,4]，汪斌[4]，王文[1,2,3]，徐俊起[1,2,3]
(1.同济大学 磁浮交通工程技术研究中心，上海市 201804；2.同济大学 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海市 201804；3.同济大学 交通学院，上海市 201804；4.西南交通大学 土木工程学院，四川省 成都市 611756)

1 引言

常导高速磁浮交通现有技术一般采用桥梁与轨道合二为一的“梁轨一体式”轨道梁结构形式，存在制造工序复杂、施工难度大、轨面线形调整困难、经济成本高、适应的桥梁跨度小等问题[1]。就目前已有的磁浮线路而言，一般为小跨度简支梁桥，对于大跨度磁浮桥梁，一般采用桥上轨道梁结构[2]。

本次设计为高速磁浮（56+104+56）m 预应力混凝土连续梁桥，包含钢纵横梁轨排设计，设计时速 600km/h，受恒载、磁浮活载和温度等影响，采用“梁轨分离式”结构系统，通过承轨梁和主梁连成整体，借助 Midas 软件建模分析。

2 连续梁桥及钢纵横梁轨排设计

2.1 连续梁桥设计

本次设计采用预应力混凝土单箱单室变截面连续梁结构，施工方法主要采用悬臂拼装法，边跨靠近边墩附近采用满堂支架施工。主墩截面的梁高取 8m，边墩及跨中截面梁高取 4m。主梁材料采用 C50 混凝土，预应力钢束采用Φs15.2 高强度低松驰预应力钢绞线，张拉控制应力取 1209MPa。根据《高速磁浮交通设计规范》等进行验算，结构变形、刚度及截面、钢筋验算均满足规范要求。

连续梁桥有限元模型设计梁单元共 72 个，节点共 73 个，如图 1 所示。

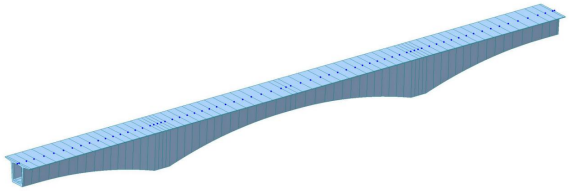


图 1 主梁有限元模型

2.2 钢纵横梁轨排设计

本次设计采用梁轨分离式高速磁浮桥梁与轨道结构，轨道板采用 Q345q 钢材，每块长为 7.628m，纵横梁均为工字形截面。有限元模型如图 2 所示。

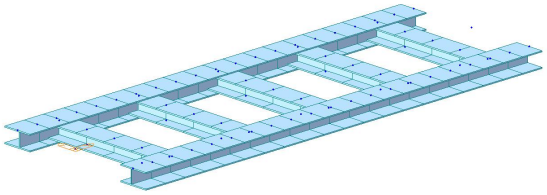


图 2 钢纵横梁轨排有限元模型

高速磁浮纵横梁式钢结构轨道板的最大拉应力 13.6MPa，最大疲劳应力幅 15.232MPa，上述各项强度指标均满足《铁路桥梁钢结构设计规范》等规定的限值要求；轨道板最大竖向位移 0.264mm，轨道板最大端部转角 0.037‰ rad，轨道结构变形很小，显示了轨道结构整体刚度较大，性能良好。综上所述，纵横梁式钢结构轨道板的强度、刚度均满足时速 600 公里高速磁浮的行车要求。

3 结 论

本文完成了（56+104+56）m 三跨高速磁浮预应力混凝土连续梁桥及钢纵横梁轨排的设计。通过 Midas Civil 有限元分析及结构验算，连续梁桥及钢纵横梁轨排各项力学性能均满足规范要求。

参考文献（References）：

[1] 龚俊虎,谢海林,鄢巨平.高速磁浮梁轨分离式桥梁与轨道设计和创新[J].铁道科学与工程学报,2021,18(3):564-571.

[2] 王阳,国巍,伍卫凡等.600 km/h 磁浮大跨度连续梁车-桥耦合振动特性及影响因素研究[J].东南大学学报（自然科学版）,2026,56,(1):80-92.

收稿日期：2026 年 04 月 30 日.

基金项目：无

作者简介：郑婧怡(2004－)，女，甘肃省陇南市，本科，主要从事磁浮交通系统研究的研究；通信方式：18193911731@163.com;联系电话:18193911731

文章编号：484-066

时速 600 公里超导电动磁浮系统实时仿真研究

邵晴[1]，于青松[1]，李凯[1]，李小庆[1]，张朋[1]，刘奥[1]，杨顺[1]，李小汾[2]
(1.中车长春轨道客车股份有限公司磁浮研究所，吉林省长春市 130062；2.上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海市 200204)

1 引言

超导磁浮交通系统在车辆、牵引、运控、线路系统之间具有强耦合特性，集成设计和验证极具挑战性。在目标速度为时速 600 公里情况下，悬浮和导向间隙调整响应时间在毫秒级，需要极高的安全冗余度。为了应对上述挑战，中车长春轨道客车股份有限公司自主研发了超导电动磁浮系统实时仿真平台。该平台集成了车辆、线路、牵引和运控系统，为时速 600 公里超导电动高速磁浮交通系统技术验证和迭代优化提供了有力支持。

2 实时仿真方法

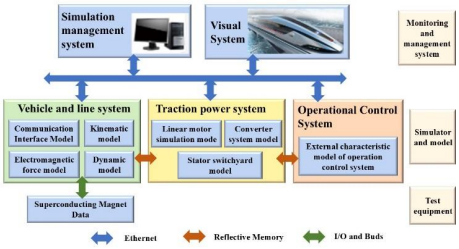
本文提出的实时仿真系统由五个主要系统组成：车辆、线路、牵引供电、运控和视景系统，总体架构如图 1 所示。该平台由五个主要组件构成：硬件平台、软件平台、数据传输模块、仿真模型和辅助模块。

硬件平台：旨在满足不同模型计算需求，适应不同模型类型对仿真步长的要求。

软件平台：该软件平台用于管理不同模型的建立、模拟和过程监控，以及为硬件系统分配分布式计算资源。

实时通信网络：基于光纤和反射内存卡的高速反射内存网络实现，实现模型之间的可靠数据交换。

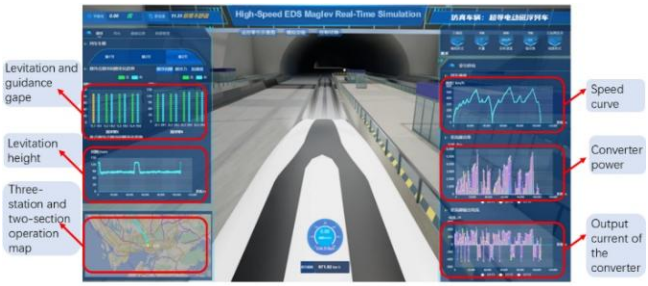
系统共配备了 14 个高性能实时仿真机，用于毫秒级模拟；23 个 FPGA 板卡，用于微秒和纳秒级模拟；并建立了高速低延迟反射内存网络，以实现模型之间的互联互通，模型间的通信延迟低至数百纳秒。



1 总体架构示意图

3 仿真结果

基于所开发的实时全系统仿真平台，本研究对预研线路（三站两区间）配置进行了仿真运行，如图 3 所示。测试主要聚焦于三个关键目标：（1）验证 600 公里/小时速度下的悬浮和导向功能；（2）评估牵引系统跟踪指定速度曲线的能力；（3）根据所需标准评估整车和子系统的整体性能。



3 结　论

本研究建立了超导电动磁浮交通系统实时仿真平台，通过实时仿真与离线仿真对比，验证误差小于 5%。基于该平台，对预研三站两区间线路开展一列三编组列车全系统实时仿真，仿真结果验证了目标速度曲线准确跟踪、牵引力合理输出以及悬浮导向间隙稳定性，所有指标均符合运行规范。

参考文献（References）：

[1] Q. Yu, et al., “Research and technological prospects of applications for superconducting electrodynamic suspension”, Electric drive for locomotives, vol. 293, no. 4, pp. 1-8, 2023, doi: 10.13890/j.issn.1000-128X.2023.04.001.
[2] Q Yu, N Shao, Y Feng, et al. “Research on Suspension Force Matching Technology for High Temperature Superconducting Maglev Transportation System with a Speed of 600 km/h”. vol. 47, no. 7, pp. 172-187, 2025. doi:1001-8360(2025)07-0172-16.
[3] Y. Shi, W. Ma, M. Li, and Z. Xu, “Research on dynamics of a new highspeed Maglev vehicle,” Vehicle Syst. Dyn., vol. 60, no. 3, pp. 721 - 742, Mar. 2022.

收稿日期：2026 年 05 月 11 日.
基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFF0508000），中国中车股份有限公司原创技术十年培育项目（2025CGY008）.

作者简介：邵晴(1990 年 2 月 –)，女，籍贯为吉林省长春市，正高级工程师，博士，主要从事超导电动磁浮列车相关技术研究；通信方式：E-mail:shaoq1990@foxmail.com

文章编号：484-067

永磁悬浮直线动力学性能分析

于红涛，赵春发，冯洋
（西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031）

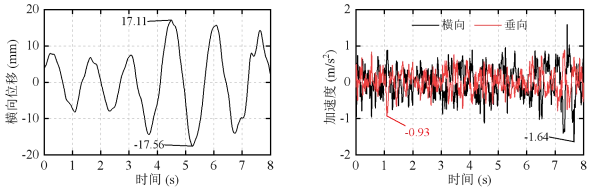
1 引言

近年来，永磁悬浮交通系统发展迅速，其利用车载永磁体和用词轨道之间的吸引力或排斥力实现车辆悬浮，具备承载能力强，节能环保，造价低等特点[1]。本文通过建立车辆动力学仿真模型，探究行车速度对车辆系统动力学响应的影响规律，为永磁悬浮交通系统设计提供理论依据和应用参考。

2 车辆系统动力学响应规律

2.1 典型速度工况下的动力学响应

本节以 60 km/h 作为典型速度工况，仿真分析车辆系统在不平顺激扰下的动力学响应。



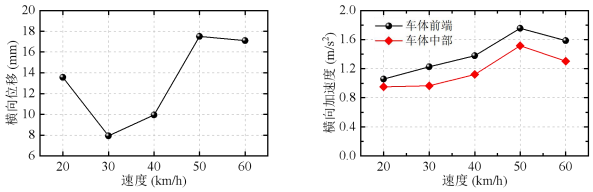
(a) (b)

图 1 车体响应 (a) 横向位移；(b) 加速度

由图 1 (a)可以看出，车体的横向位移变化范围为-17.56~17.11 mm；图 1 (b)可以看出，车体前端横、垂向加速度最大值分别为 1.64 m/s^2 和 0.93 m/s^2，表明车辆运行过程中横向振动更为剧烈。但两者均未超过文献[2]所规定的限值 2.5 m/s^2。

2.1 不同行车速度下的动力学响应

本节分析行车速度在 20~60 km/h 范围内变化时，车辆振动响应及平稳性变化规律。



(a) (b)

图 2 车体响应最大值 (a) 横向位移；(b) 横向加速度

由图 2 (a)可知，当行车速度为 30 km/h 时车体横向位移最小，且随着行车速度的增大，车体位移响应也随之增大；由图 2 (b)可知，在 20~50 km/h 范围内，车体横向加速度随行车速度的增大而增大，在 50 km/h 时前端和中部横向加速度最大值分别为 1.76 m/s^2 和 1.52 m/s^2；60 km/h 时横向加速度出现小幅下降。

3 结 论

在车辆运行过程中，车体横向振动响应较为明显；随着行车速度的增加，车体响应也呈不断增大的趋势发展，且在 50 km/h 时，横向位移和加速度最大。

参考文献 (References)：

[1]. 邓自刚,刘宗鑫,李海涛,等. 磁悬浮列车发展现状与展望 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57 (03): 455-474+530.

[2]. 国家铁路局. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599-2019[S]. 中国标准出版社, 2019.

收稿日期： 2026 年 05 月 11 日.

基金项目： 永磁悬浮车辆-轨道梁耦合振动特性研究（2023YFB4302102-6）

作者简介： 于红涛(2001－)，男，甘肃平凉，硕士研究生，主要从事磁浮车辆动力学的研究；通信方式：E-mail:18034635810@163.com、联系电话 18034635810

文章编号：484-068

基于数据驱动优化的高速磁浮悬浮控制研究

马晓雨[1]，韩沛辰[2]，管延华[3]，徐俊起[4]
（1.山东大学 齐鲁交通学院，山东省 济南市 250003；2.同济大学 交通学院，上海市 201804；
3.山东大学 齐鲁交通学院，山东省 济南市 250003；4.同济大学 交通学院，上海市 201804；）

1 引　言

悬浮系统作为高速磁浮列车实现无接触平稳运行的核心，其控制性能直接影响列车的平稳性与安全性。然而，列车运行速度由 430 km/h 提升至 600 km/h 后，系统面临复杂的参数时变、轨道不平顺及气动升力等多源扰动的影响，基于传统机理模型的线性控制方法难以满足列车高速运行下的性能要求。本文以高速磁浮列车悬浮系统为研究对象，围绕高速运行条件下存在的系统参数时变和多源扰动问题，开展基于数据驱动模型的控制优化研究，提出基于最小二乘离线辨识的 LQR 控制策略和基于递归最小二乘在线辨识的模型预测控制策略，旨在改善悬浮系统的控制性能，提高列车在高速运行条件下的悬浮稳定性和乘坐舒适性。

2 正　文

2.1 悬浮系统建模与基础控制

首先在分析高速磁浮列车悬浮系统构造的基础上，建立悬浮系统的垂向二自由度动力学模型，推导电磁力非线性表达式，并在平衡点处泰勒展开得到系统的线性化状态空间模型，进而分析系统的开环控制特性。

随后基于 Simulink 平台搭建仿真模型，先后设计了 PID 和 LQR 基础控制器。在实现系统稳定悬浮的基础上，引入轨道不平顺与气动升力两类典型的扰动，分析悬浮系统在 430 km/h 与 600 km/h 速度下的响应特征，揭示了速度提升对悬浮间隙和加速度等指标的影响。

2.2 数据驱动离线建模与 LQR 控制优化

为克服参数机理建模的局限性，基于扩展卡尔曼滤波器，构建完整的系统状态空间模型。随后基于仿真采集到的输入输出数据，采用批量最小二乘法辨识系统的关键参数并构建数据驱动离线模型。对比分析结果表明，基于该模型优化的 LQR 控制器，参数不变的情况下，调节时间缩短 15.4%，波动幅值减小 60.8%；参数改变的情况下，波动幅值减小 87.9%，稳态误差保持为 0。

2.3 数据驱动在线建模与模型预测控制优化

为进一步克服列车运行中的参数时变问题，提出递归最小二乘参数在线辨识方法，并与模型预测控制策略相结合。在参数时变和 600 km/h 轨道不平顺扰动下，所提方法能够快速跟踪参数变化，相比于传统 LQR 控制，稳态误差由 1.048 mm 减小至−0.077 mm。

3 结　论

研究表明，数据驱动建模与在线优化控制能显著改善高速磁浮列车悬浮系统在复杂工况下的控制性能，克服参数时变导致的模型失配问题，为 600 km/h 高速磁浮列车悬浮控制提供了新的技术路径。

参考文献（References）：

[1] 曹广忠，潘剑飞，黄苏丹，等. 磁悬浮系统控制算法及实现[M]. 北京：清华大学出版社，2013：41.

[2] Liu M, Ye F, Zeng G. Research of the track irregularity spectrum of Shanghai high-speed transrapid demonstration line[J]. Vehicle System Dynamics, 2024, 62(8): 2054-2078.

收稿日期：2026 年 05 月 14 日.

基金项目：国家自然科学基金重点项目“600 km/h 高速磁浮车-轨无接触平稳运行关键理论与技术”（52232013）；国家重点研发计划资助项目“高速磁浮系统工程理论及高速试验风险评估技术研究”（2023YFB4302502）.

作者简介：马晓雨(2004－)，女，山东滨州，学士学位，主要从事磁浮载运技术与系统的研究；通信方式：mxy231304@163.com、19554101335

文章编号：484–069

基于预测扰动增广模型的常导高速磁浮悬浮系统协同预测控制

成柯[1,2,3]，徐俊起[1,2]，陈琛[1,2]，王文[1,2,3]，韩沛辰[1,2,3]

(1.同济大学 磁浮交通工程技术研究中心，上海市 201804；2.同济大学 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海市 201804；3.同济大学 交通学院，上海市 201804；)

1 引言

高速运行工况下，轨道不平顺会通过左右悬浮间隙测量通道进入控制闭环，引起间隙跟踪误差。传统协同模型预测控制能够处理输入约束和左右协同误差，但其预测模型通常未显式包含轨道不平顺扰动，导致扰动段预测精度受限。为此，本文在传统模型预测控制基础上，引入轨道不平顺显式扰动矩阵，构建了一种扰动预测补偿方法.

2 系统模型与控制方法

2.1 预测模型

以高速磁浮搭接结构为基础，将轨道梁视为刚体，建立高速磁浮列车悬浮系统最小悬浮单元。定义系统状态为：

$$x=[\Delta z_R,\dot{z}_R,\Delta i_R,\Delta z_L,\dot{z}_L,\Delta i_L,\Delta H,\dot{H}]^T$$

系统控制输入为：

$$u=[\Delta u_R,\Delta u_L]^T$$

实测轨道不平顺扰动为：

$$d=[d_R,\dot{d}_R,d_L,\dot{d}_L]^T$$

系统可表示为：

$$\dot{x}=Ax+Bu+Gd$$

采用零阶保持离散化构造拓展矩阵：

$$M=\begin{bmatrix} A & B & G \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$e^{MT_s}=\begin{bmatrix} A_d & B_d & G_d \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}$$

最终得到离散预测模型：

$$x_{k+1}=A_d x_k+B_d u_k+G_d d_k$$

2.2 控制器设计

优化目标为：

$$J=\sum_{j=1}^{N_p}\left\|y_{k+j}-r\right\|_Q^2+\sum_{j=0}^{N_{c-1}}\left\|\Delta u_{k+j}\right\|_R^2$$

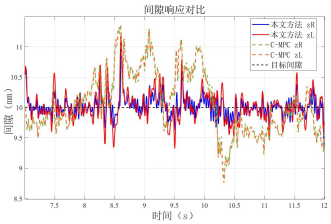
其中，输出量为：

$$y=[\Delta z_R,\dot{z}_R,\Delta i_R,\Delta z_L,\dot{z}_L,\Delta i_L,\Delta H,\dot{H},e_{cor}]^T$$

式中，e_{cor} 为左右两侧悬浮间隙协同误差。

3 结 论

在 MATLAB simulink 中搭建悬浮系统搭接结构模型，并对控制方法进行 600km/h 工况下的仿真验证，结果如下所示.



1 悬浮间隙响应结果

所提方法能够显著改善扰动段左右悬浮间隙跟踪精度，其中右侧和左侧间隙 RMSE 分别降低约 67.3%和 51.6%.该结果说明，将轨道不平顺作为可测扰动显式引入预测模型，能够提高 MPC 对扰动状态的预测和补偿能力.

参考文献（References）：

[1] 翟明达. 高速磁浮列车悬浮系统性能优化问题研究[D]. 国防科技大学, 2019.

[2] SUN Y G, HE Z Y, XU J Q, et al. Cooperative model predictive levitation control for two-points electromagnetic levitation system of high-speed maglev vehicle[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024.

收稿日期：2026 年 05 月 14 日.

基金项目：国家自然科学基金重点项目（52232013）；国家重点研发计划任务(2023YFB43025021)。

作者简介：成柯(1996－)，男，甘肃省定西市，博士研究生，主要从事磁浮列车悬浮控制系统优化的研究；通信方式：E-mail:chengkeke@tongji.edu.cn；联系电话：18509325816

文章编号：484-070

集成化悬浮控制器散热系统优化设计

张浩阳 [1]
(1.中车株洲电力机车有限公司 磁浮系统研究所，湖南省 株洲市 412001)

1 引言

悬浮控制器是磁浮车辆悬浮系统的控制部件，新一代悬浮控制器采用集成化设计，集中布置了 4 个 IGBT，采用翅片散热器结合强制风冷的技术方案[1]，利用 ANSYS 仿真系统研究其散热特性，结合正交试验获得全局较优参数组合[2-3]。在空间与轻量化约束下设计出满足温升要求的散热结构。

2 散热系统分析及试验验证

2.1 散热器结构参数对散热影响分析

建立集成化悬浮控制器及散热系统仿真模型，如图 1 所示，分别分析散热器各结构参数对散热性能的影响规律。仿真表明，基板厚度在 5～11 mm、翅片厚度在 3～5 mm、翅片间距在 3～5 mm 时散热性能较优，风机与散热器间距在 15～25 mm 范围内可有效提升换热效率。

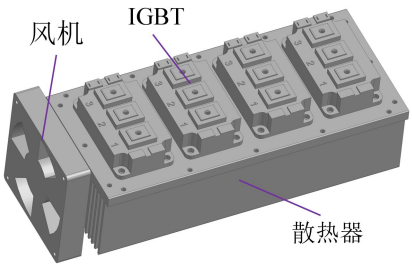


图 1 散热系统结构

考虑各参数间的耦合效应，采用正交试验设计进行多参数全局寻优，对试验结果进行极差分析得出各因素影响主次顺序为：翅片厚度>风机与散热器间距>基板厚度>翅片间距，据此得到最优参数组合为基板厚度 11 mm、翅片厚度 4 mm、翅片间距 5 mm、风机与散热器间距 20 mm。仿真表明该全局寻优组合方案的散热性能优于单因素最优方案。

2.2 样机仿真与试验

在优化方案的基础上，综合考虑轻量化、结构强度及安装空间等实际约束，确定最终近似参数，通过仿真得到 IGBT 最高温升为 19.4 K。使用该方案生产物理样机，进行温升试验得到最高温升为 20 K，温升曲线如图 2 所示，与仿真结果接近。

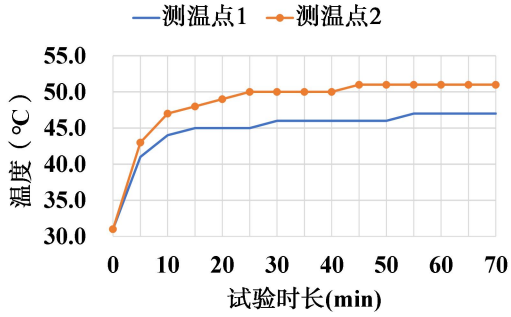


图 2 试验温升曲线

3 结 论

优化后的散热系统能满足设计温升要求，该方案在实现高效散热的同时兼顾了结构轻量化和安装空间约束。基于参数化仿真与正交试验驱动的多参数耦合优化方法，为同类高功率密度电子设备热管理提供了有效的工程参考。

参考文献（References）：

[1] 李书培,孙冬明,张赛,等.某机载光电系统风冷散热翅片优化设计及仿真[J].激光与红外,2024,54(6):951-957.
[2] 刘杙,杜毅,等.电池热管理散热器流动换热特性实验与数值仿真研究[J].制冷学报,2026:1-11.
[3] Younes Shabany. 传热学:电力电子器件热管理[M].北京：机械工业出版社，2013.

收稿日期：2026 年 05 月 15 日.
基金项目：中国中车股份有限公司科技研究开发计划（2025CCCB274）.
作者简介：张浩阳(1996－)，男，湖南省株洲市，助理工程师，硕士，主要从事磁悬浮车辆电气设备的研究；通信方式：E-mail:a1273995796@outlook.com

文章编号：484-071

超导电动悬浮车辆技术研究

董磊[1]，赵枫泽[1]，张茂超[1]
（1. 中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮研究所，吉林 长春 130000）

1 引言

近年来，高速铁路交通得到了蓬勃发展，时速 450 公里动车组已经发布并开展运用考核，但随着速度的不断提升，轮轨车辆运行速度极限由于轮轨粘着系数的影响，制约瓶颈已经出现。为了实现更高速度的突破，必须摆脱依靠轮轨摩擦实现运行的交通模式。磁浮交通应运而生，该交通模式利用电磁力实现车辆的稳定悬浮及高速运行。

2 超导电动悬浮交通发展历程

国外在超导电动悬浮交通发展历程上，20 世纪 60 年代以来，日本和美国相继开展超导悬浮交通技术研究，日本较早投入研发，自 70 年代起陆续研发了 ML 系列以 及在 MLX 基础上开发的 L0 车型。2015 年 L0 试验车载人时速达到了 603km/h，创造地面交通 工具最高试验速度。美国在上世纪 90 年代开始磁浮火箭橇测试。2016 年，采用超导电动悬浮方式实现测试速度 1018km/h。

3 超导电动悬浮车辆的具体特点

超导电动悬浮车辆有别于传统轮轨车辆。主要存在四个方面。

3.1 车辆的运行原理

超导电动磁浮车辆的运行机理是车辆上安装有超导磁体，超导磁体注入电流后，利用超导原理电流可在该闭合线圈内流动，永不消失，使其成为一个永磁体，再利用轨道牵引线圈形成的行波磁场作用下维持高速运行。

3.2 车辆的静载

由于超导电动悬浮车辆的运营速度等级高，所以车辆自身受到的静载很大。

3.3 车辆的电磁防护

超导电动悬浮车辆上装有超导磁体，同时 U 型轨道上装有牵引线圈利用交流电产生行波磁场。

3.4 车辆的制动形式

传统轮轨车辆主要的制动方式有三种，电制动、盘式摩擦制动和非黏着制动。

3.5 车辆的轻量化设计

超导电动悬浮车辆由于悬浮力匹配得非常精确，所以对于车辆的自重要求非常严格。

4 超导电动悬浮车辆的结构布局

根据超导电动悬浮车辆的具体特点，在车辆布局上我们需要从前端流线型设计、静载荷设计、电磁防护要求、制动系统、轻量化设计几方面进行考虑。

5 结 论

超导电动悬浮车辆在研发设计上和传统轮轨车辆相比较既有继承更有创新，我们需要针对自身特殊的运行机理及结构特点进行有针对性的技术研发。这样才能满足超导电动悬浮车辆的整体设计。

参考文献 (References)：

[1] 邓自刚，李海涛.高温超导磁悬浮车研究进展 [J]. 中国材料进展 issn. 1674-3962. 2017. 05. 02.
[2] 牛晓妮， 山梨试验线新型车辆的特点与试验概况 译自《铁道と电气技术》（日本）No81,25-30.
[3] 周贤全，山梨试验线车辆空气动力制动 译自《OR OF RTR》（日本） 2000 No 74-78.

收稿日期：－－－－年－－月－－日.
基金项目：中国中车科研项目（2020CKA002）；吉林省科技发展计划项目（232654GX0101113938）.
作者简介：董磊(1980－)，男，吉林省长春市，正高工程师，学士，主要从事超导磁悬浮车辆结构研究；
通信方式：d120230@163.com

文章编号：484-072

基于数物融合的高速磁浮车轨耦合试验技术研究

张硕楠[1]，唐志远[1]，梁鑫[1]，付善强[1,2]

(1.中车青岛四方机车车辆股份有限公司 高速磁浮运载技术全国重点实验室，山东青岛，266111；
2.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川成都，610031)

1 引言

时速 600 公里高速磁浮系统已完成工程样机研制，但缺乏时速 600 公里级的线路验证环境，需要一种有效的方法准确模拟高速运行条件下的车-轨耦合动力学作用。本文针对轨道桥梁变形难以精准复现，车-轨耦合作用激励下车辆系统状态不明确等问题，分别从电磁力集成与测量、实时闭环体系构建、速度模拟、车轨耦合试验验证等方面介绍了融合实际车辆、台架试验、线路数据与数值仿真的数物融合实时混合试验方法，最终可实现高速磁浮车-控-轨耦合系统的多边界、多学科、协同一体化验证，为高速磁浮系统工程应用提供理论与技术支撑。

2 实时混合试验

2.1 电磁力集成与测量

在长定子与轨道梁连接处安装悬浮力传感器，每定子单元（1032 mm）均布 3 个，即每个电磁铁（3096 mm）对应 9 个；在导向板与轨道梁连接处安装导向力传感器，每导向板均布 5 个。通过测量并累加各测点集中力，计算电磁铁局部电磁力，进而得到悬浮导向单元的等效悬浮力与等效导向力。

$$F_{\mathrm{Lev1}}=\sum_{i=2}^{5}F_i+\frac{1}{2}F_1 \quad F_{\mathrm{Gui1}}=\frac{1}{2}F_{1'}+F_{2'}+F_{3'}$$

$$F_{\mathrm{Lev2}}=\sum_{i=6}^{9}F_i+\frac{1}{2}F_{10} \quad F_{\mathrm{Gui2}}=F_{4'}+F_{5'}+\frac{1}{2}F_{6'}$$

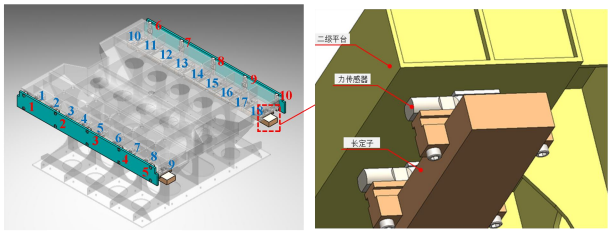


图 1 振动台架与力传感器安装位置

2.2 实时闭环体系构建

车辆在实际运行过程中，其振动会传递至轨道梁，使轨道梁产生连续变形。相邻托臂间长度为 3.096 m，以此设定台架特征长度，单跨梁长为 24.768 m，为 8 个台架的长度，故通过 8 台架连续协同振动模拟线路动态。以时间步长△t 依次更新各台架位姿，实现车辆不动、轨道运行的边界等效。

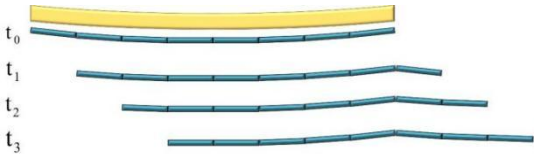


图 2 不同时刻车辆定子组位置状态

试验测力系统测量得到电磁力，按车桥对应关系将其施加至数值模型，计算桥梁变形；根据台架特征长度离散桥梁变形，确定 8 个台面姿态并由作动器复现；台面调整时车辆控制跟随，并重新获取电磁力，形成实时闭环周期。

2.3 速度模拟

通过振动频率和多平台协同振动相位差模拟运行速度，其中振动频率指车辆连续通过桥跨时引起的作用频率。多平台协同振动相位差指车辆相邻搭接结构经过同一位置的相位差，对应不同速度。

2.4 车轨耦合试验验证

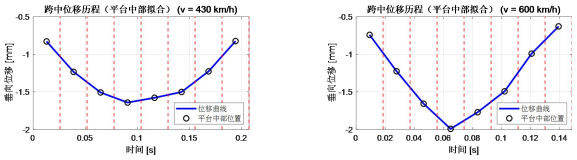


图 3 上海线桥梁通过模拟

3 结论

本文面向高速磁浮车辆复杂边界条件下动态验证需求，采用数物融合的技术手段，从振动领域实现高速磁浮系统动态耦合特性试验研究，为磁浮车辆动力学性能评估提供了新的试验方案。

参考文献 (References)：

[1]潘孟春,陈棣湘,罗飞路,等.常导高速磁悬浮列车电磁场的分析与测量[J].铁道学报,2004,(04):126-128.
[2]付善强,梁鑫,丁叁叁.高速磁浮车-轨耦合系统动态机理与振动响应[J].同济大学学报(自然科学版),2023,51(03):314-320+384.
[3]付善强,吴冬华,梁鑫,等.速度600 km/h高速磁悬浮车辆系统耦合特性与集成技术研究[J].铁道学报,2025,47(07):1-8.

收稿日期：2026 年 05 月 18 日.
基金项目：国家自然科学基金项目（52232013，52432012）.
作者简介：张硕楠(2000－)，男，辽宁省锦州市，工程师，硕士，主要从事高速磁浮系统动力学技术研究；通信方式：E-mail:zhangsn0212@163.com、联系电话：19102848916

文章编号：484-073

高速磁浮车载电网锂电池充电控制器设计

赵戴楠，付善强，李言民，刘宁
（中车青岛四方机车车辆股份有限公司 高速磁浮运载技术全国重点实验室，山东省 青岛市 266111）

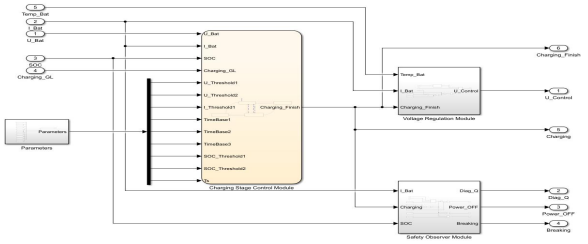
1 项目背景

高速磁浮车辆采用无接触运行，其车载电网的稳定依赖于储能电池。电池用于调节电网电压，并在起浮、着陆及紧急制动工况下提供关键动力支持。本文针对新一代磁浮系统，设计了一种基于钛酸锂电池的高效充电控制器。

2 设计与仿真验证

2.1 充电控制器设计

为优化锂电池性能，本文设计了一种集成充电阶段控制、电压调节及容量监控的模块化控制器（见图 1）。该控制器采用动态恒流转恒压控制策略，在低电量阶段通过实时调节电网电压确保恒流快充；当 SOC 或电压达到预设阈值时，自动切换至恒压浮充模式。系统引入温度补偿系数修正输出电压，确保电池在不同环境温度下均能处于最优工作状态。



1 充电控制器架构

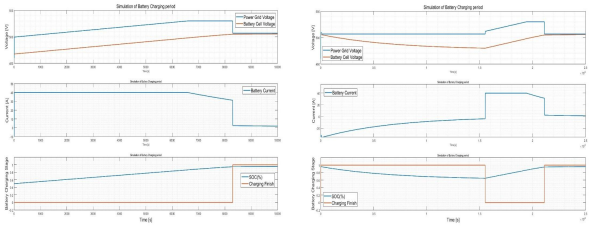
2.2 充放电过程仿真验证

利用 Simulink 建立模型，针对三种典型工况进行验证（见表 1）。**工况 1** 模拟系统启动时电池处于 50%的中等电量状态；**工况 2** 模拟满电状态（99%）遭遇重载持续放电。

表 1 仿真工况

	初始荷电系数 [%]
工况 1	50
工况 2	99

结果显示：**工况 1** 中，系统启动后首先进入恒定高电流的快充模式，SOC 快速线性增长，达到满电阈值后转入恒压阶段（图 2a）。**工况 2** 中，电池先在重载下放电，当 SOC 跌至阈值，控制器启动快充直至充满（图 2b）。



a 亏电下的快充过程　　b 放电后启动快充的过程

2 电压、电流、及荷电系数的变化趋势

3 结　论

充电控制器根据电池实时状态切换充电模式，该策略能精准控制高效的充电过程，同时避免过充损害电池寿命，有效提升了车载电网的动态响应能力与运行安全性，为高速磁浮系统的工程化应用提供了可靠的电源管理方案。

参考文献（References）：

[1] 佟明昊，程明，许芷源，等. 电动汽车用车载集成式充电系统若干关键技术问题及解决方案[J]. 电工技术学报，2021，36(24)：5117-5133..

[2] 邓元望，文滨，周帅，等. 电动汽车车载充电系统集成设计及模糊控制[J]. 电源技术，2015，39(10)：2215-2218

收稿日期：2026 年 05 月 18 日.

基金项目：无.

作者简介：赵戴楠(1993－)，男，黑龙江省大庆市，工程师，硕士研究生，主要从事高速磁浮控制技术研究；通信方式：zhaodainan@cqsf.com:、联系电话 18521098376

文章编号：484–074

城市风场对磁浮列车气动效应的影响

毛建锋[1,2]，王喜[1,2]，余志武[1,2]

（1.中南大学 土木工程学院，湖南 长沙，410075；2.高速铁路建造技术国家工程研究中心，湖南 长沙，410075）

1 引言

中国现役高速磁浮列车运行速度高达430 km/h，并积极推动其往 600 km/h 以上发展[1]。随着磁浮列车目标速度不断提升，列车高速运行时与周围环境之间耦合产生非稳定气流，其运行安全性和稳定性受到空气动力效应的制约。城市风场是影响列车高速运行时气动稳定性的一大气动激励源，城市建筑群的不规则布局会加剧风场不稳定性；城市建筑间隙与道路可能使风场发生局部加速效应。因此，研究城市风场对磁悬浮列车气动特性的作用规律有重要意义[2]。

2 磁浮列车气动特性分析

2.1 数值计算模型

基于高德地图获取城市矢量数据，并利用 ArcScene 软件筛选得到建筑外形及高程信息。建立了包含横风来流、磁浮车桥系统及城市建筑群在内的 1：10 缩尺三维数值仿真模型，如图 1 所示。列车模型基于上海磁悬浮线三编组架构（头车+中车+尾车），运行速度恒定为 430 km/h。头车与尾车的长度、宽度和高度分别为 L=27.00 m、W=3.55 m 与 H=3.80 m，中车长度为 0.92L，宽度和高度与头车保持一致。

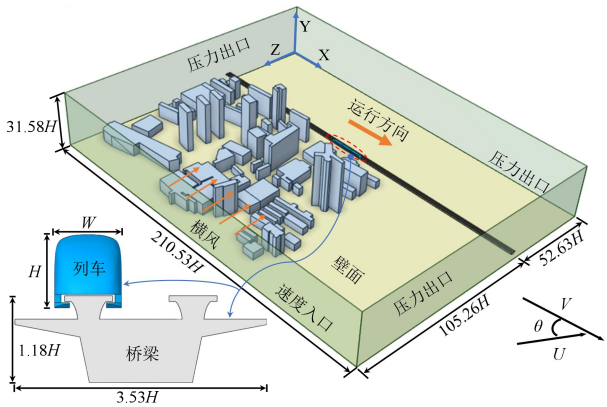


图 1 数值计算模型

2.2 模型验证

为确保数值模拟的准确性，进行了网格无关性、时间无关性和室内动模型试验。结果表明数值方法能够准确复现列车运行诱发的非定常气动效应。

2.3 列车气动荷载分析

如图 2 所示，建筑间隙会诱发列车气动荷载显著脉动效应。列车经过城市道路时气动荷载显著增大，且气动荷载在此过程中呈现显著的突变特征，其中以升力系数 C_y 均值的增幅最为突出。

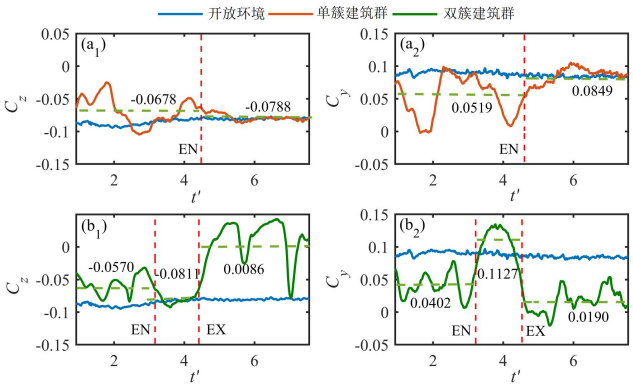


图 2 头车气动荷载系数时程

3 结论

以上海磁浮示范线高架区段为原型，建立了横风-城市建筑群-车桥体系的 CFD 数值模型，采用大涡模拟方法分析了建筑群及风向角对列车气动荷载与流场结构的影响。建筑间隙与城市道路对横风来流具有加速效应，风向角的增大可显著强化城市道路对横风来流的加速效应，加剧气动荷载波动。

参考文献 (References)：

[1] Mao J F, Wang X, Li Z, et al. A Pdem-Driven Method for Stochastic Parameter Analysis and Running Safety Reliability Assessment in High-Speed Maglev Train-Bridge Coupled System[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2025.

[2] Mao J F, Wang X, Liu Y K, et al. Coupling Effect of Urban Building Clusters and Crosswinds On the Aerodynamic Performance of High-Speed Maglev Trains[J]. Sustainable Cities and Society, 2026, 143.

收稿日期：2026 年 05 月 20 日.

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52478321, 52078485)；中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助（2026ZZTS0832）.

作者简介：毛建锋(1986-)，男，籍贯(浙江丽水)，副教授，工学博士，主要从事高速磁浮列车空气动力学、铁路车-轨-桥系统随机动力学的研究；

通信方式：E-mail: jfmao1@csu.edu.cn

文章编号：484–075

基于多类别偏差叠加的高速磁浮轨道不平顺分级评价

张雨潇[1,2]，徐俊起[1,2,3]，王文[1,2]，陈琛[1,2]

（1. 同济大学交通学院，上海 201804；2. 同济大学磁浮交通工程技术研究中心，上海 201804；
3. 同济大学高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海 201804）

1 引言

与轮轨系统相比，磁浮车辆通过非接触的电磁力实现悬浮与导向，毫米级的轨道不平顺可能引发显著的车辆系统振动，直接影响悬浮稳定性。现有研究多侧重于轨道不平顺的生成与模拟，却鲜有涉足其状态的定量化评价与分级，难以为运营线路的养护维修提供清晰的等级化决策依据。因此，构建一套适用于高速磁浮的轨道不平顺分级评价方法，对于科学指导运维实践具有重要意义。

2 多类别不平顺叠加模型

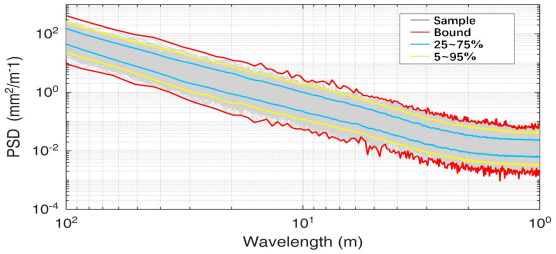
针对线路轨道结构分别考虑梁跨系统和定子铁芯系统的变形特性，采用分层建模策略，将整体系统分解为梁跨子系统和定子铁芯子系统。两个子系统独立建模后，通过坐标变换和变形叠加获得整体变形。对于第 i 个梁跨内第 j 个定子铁芯的节点 k，其垂向叠加不平顺 $V_{Si,j,k}^{\text{total}}$ 如下。

$$V_{Si,j,k}^{\text{total}} = V_{Bi,1} + \frac{m_{Si,j,k}}{L_B}\left(V_{Bi,2} - V_{Bi,1}\right) + V_{Si,j,k} \qquad (1)$$

式中，$V_{Bi,1}$、$V_{Bi,2}$ 为梁跨首尾节点垂向偏差，$m_{Si,j,k}$ 为里程，L_B 为梁跨长度，$v_{Si,j,k}$ 为定子铁芯垂向偏差。

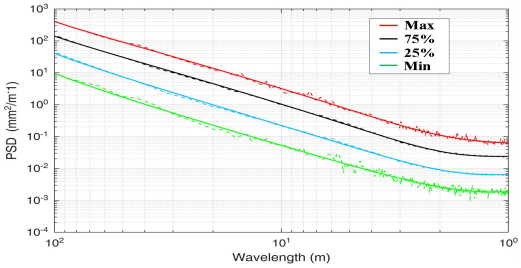
3 功率谱区间分级评价

结合样本量与计算效率双重需求，基于多类别不平顺叠加模型构造了 1000 组 1200m 长的随机不平顺。计算各组样本数据的 PSD，如图 1 所示。



1 随机不平顺 PSD 置信界限

针对上述大量轨道不平顺样本提供的 PSD 概率信息，提出 5 级评价原则。（1）低于最小值边界，表示状态优秀；（2）分布于最小值边界与 25%置信界限之间，表示状态良好；（3）分布于 25%~75%置信区间内，表示状态一般；（4）高于 75%且低于最大值边界，表示状态较差；（5）高于最大值边界，表示状态劣化。采用七参数函数形式对各界限进行拟合，如图 2 所示，以便于 PSD 分级评价区间的精确表达和应用。



2 PSD 拟合

4 结　论

提出一种基于多类别偏差叠加的轨道不平顺建模与分级评价方法，通过构建考虑轨道梁与定子铁芯系统分层变形的叠加模型，模拟多源不确定性下的轨道几何波动，并基于功率谱密度置信区间提出了五级评价准则，形成了适用于轨道状态评估的概率分级系统。

参考文献（References）：

[1]Xu J, Chen Z, Zheng Q, et al. Data-driven modeling of high-speed maglev track irregularity[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2025, 81: 103798.

[2]王文，徐俊起，陈琛，等. 基于线路技术标准构建的高速磁悬浮轨道不平顺及应用[J]. 铁道学报，2025,47(07): 214-224.

[3]梁鑫，丁叁叁，黄超，等. 基于正态分布叠加原理的高速磁浮线路不平顺预测方法[J]. 机车电传动，2020,(06): 20-24.

收稿日期： 2026 年 05 月 21 日.

基金项目： 国家自然科学基金（52232013, 52332011）；国家重点研发计划项目（2023YFB4302502）.

作者简介： 张雨潇(1996－)，男，河北省唐山市，副研究员，博士学位，主要从事高速磁浮智能运维研究；通信方式：E-mail: yuxiaozhang@tongji.edu.cn、联系电话: 18600320315

文章编号：484–076

高速磁浮列车车体疲劳强度及局部校核分析

白郑琦[1]，高定刚[2]，孙友刚[2]
（1.同济大学 交通学院，上海市 201804；2.同济大学 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海市 201804）

1 引言

高速磁浮列车车体轻量化程度高，承受惯性、气动及走行机构接口载荷耦合作用，连接形式复杂，局部应力集中明显。国产化样车端车采用铝合金承载框架与三明治复合结构，部件间通过焊接、铆接、胶接和螺栓连接装配。在既有静强度分析基础上，本文进一步开展整车疲劳强度校核与门柱局部应力修正，识别关键低裕度部位，为车体连接设计和结构优化提供依据。

2 疲劳强度及局部子模型校核方法

基于国产化样车端车建立整车有限元模型。壳单元用于铝合金型材、三明治结构和车头复合材料，梁单元用于焊接、铆接及螺栓连接，质量单元等效设备和乘客质量，弹簧单元表征胶接及局部柔性连接。模型约含 808366 个单元、763940 个节点，如图 1 所示。

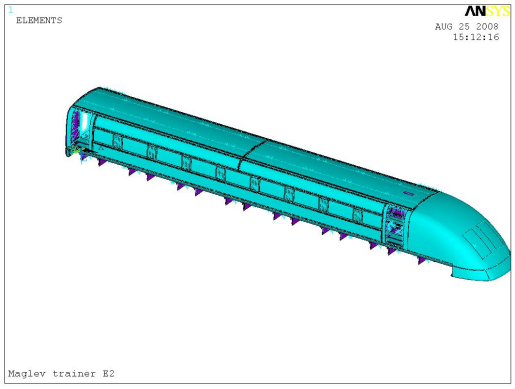


图 1 整车有限元模型

选取含惯性、气动和接口载荷的典型疲劳组合，对车顶、侧顶板、地板、下弦梁、门柱、门柱安装座、车窗边框及夹层等部位进行 Von Mises 应力和安全系数评价。结果表明，地板疲劳应力约 56 MPa，安全系数约 1.0；下弦梁、门柱安装座及夹层等连接或载荷传递部位安全裕度较低，应作为后续详细校核重点。

针对整体模型中门柱区域局部应力偏高、气动载荷等效影响较大的问题，建立含车门结构的局部子模型。以弹簧单元模拟车门与门柱连接并重新施加气动载荷，可更合理描述门区载荷传递路径及边界条件。门柱局部子模型应力分布如图 2 所示。

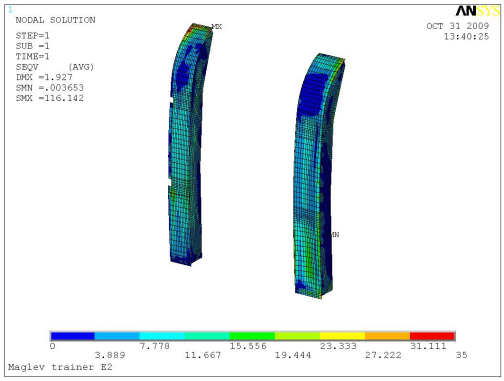


图 2 门柱局部子模型应力分布

3 结论

本文开展了高速磁浮国产化样车端车疲劳强度及局部应力校核。结果表明，车体多数承载部位具有一定疲劳安全裕度，部分低裕度结果受连接简化和载荷等效影响，需结合局部子模型及试验进一步判定。局部子模型可削弱整体模型简化引起的局部应力偏差，为结构改进和疲劳试验提供参考。

参考文献（References）：

[1] SUN Y G, GAO D G, WANG G, et al. Novel structure strength evaluation method for a high-speed maglev train considering aerodynamics[J]. Strength Mater, 2021, 53: 601-609.

[2] GUO F, HU F F, WU S C, et al. System dynamics in structural strength and vibration fatigue life assessment of the swing bar for high-speed maglev train[J]. Int J Mech Syst Dyn, 2022, 2(2): 178-189.

[3] HAN J W, KIM J D, SONG S Y. Fatigue strength evaluation of a bogie frame for urban maglev train[J]. Eng Fail Anal, 2013, 31: 412-420.

收稿日期： 2026 年 05 月 20 日.

基金项目： 国家自然科学基金（52332011, 52522217, 52441203）

作者简介： 白郑琦(2001－)，男，甘肃省白银市，学士，主要从事磁悬浮列车车辆动力学的研究；

通信方式：E-mail: 2534261@tongji.edu.cn

文章编号：484–077

直线电机智能显式模型预测位置控制

苗源[1]，黄苏丹[1]，胡宏锦[1]，曹广忠[1]
(1.深圳大学 机电与控制工程学院，广东省 深圳市 518060)

1 引 言

为提高多目标多约束下直线电机运动控制性能，提出直线电机智能显式模型预测位置控制方法。建立电机动力学模型，选取位置误差和速度误差作为状态变量构建电机误差状态模型，设计不同误差状态空间对应的系列椭圆域，并采用非支配排序遗传算法求解多目标约束最优控制问题。通过离线求解获得电机系列椭圆域对应的显式状态反馈控制律，从而降低模型预测控制在线求解的计算复杂度、提高电机系统动态和稳态控制性能。开展实验研究，验证所提出方法的有效性。

2 直线电机动力学模型

直线电机的动力学模型表示为

$$\tilde{F} = M\frac{d^2p(t)}{dt^2} + B\frac{dp(t)}{dt} + F_d \tag{1}$$

其中，$\tilde{F}$ 表示电机的总推力，M 表示电机运动平台的质量，p 表示电机的实际位置，B 表示电机粘性阻尼，F_d 表示未建模的外部干扰。

3 智能显式模型预测位置控制方法

3.1 电机误差状态模型

定义误差状态为

$$\begin{aligned} e_p(t) &= p_r(t) - p(t) \\ e_v(t) &= v_r(t) - v(t) \end{aligned} \tag{2}$$

其中，p_r 表示电机参考位置，v_r 表示电机参考速度。选取位置误差和速度误差作为状态变量。

$$x_e = \begin{bmatrix} e_p & e_v \end{bmatrix}^T \tag{3}$$

基于模型预测控制最优状态反馈思想，设计控制律为

$$u(t) = Kx_e(t) = k_1e_p(t) + k_2e_v(t) \tag{4}$$

采用前向欧拉离散化方法，得到误差状态模型

$$\begin{bmatrix} e_p(t+T_s) \\ e_v(t+T_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_1}{m} & -\frac{m-k_2+bT_s}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_p(t) \\ e_v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ T_s \end{bmatrix} \left(\ddot{p}_r(t) + \frac{b}{m}\dot{p}_r(t)\right) \tag{5}$$

3.2 椭圆域设计

为描述直线电机在不同运行阶段的误差状态，基于误差状态空间，构造多层嵌套椭圆域：

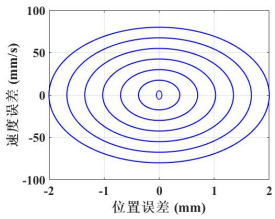


图 1 椭圆域划分示意图

$$\Omega_i = \left\{ x_e \middle| \frac{e_p^2}{a_i^2} + \frac{e_v^2}{b_i^2} \le 1 \right\}, \quad i = 1, 2, \cdots, 7 \tag{6}$$

其中，a_i 和 b_i 分别表示第 i 个椭圆域的位置误差半轴和速度误差半轴。

3.3 控制律求解

根据电机误差状态使用不同状态反馈增益

$$U_i = K_i x_e(t), \quad i = 1, 2, \cdots, 7 \tag{7}$$

并结合非支配排序遗传算法对控制增益进行离线优化。

4 实验结果

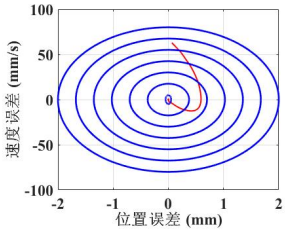


图 2 正弦轨迹误差状态转移曲线

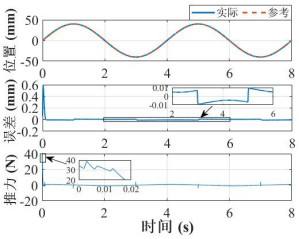


图 3 正弦轨迹跟踪、误差、推力曲线

误差状态逐步收敛，最终稳定于内层椭圆域，在幅值 40 mm 周期 4 s 的正弦工况下，于 0.12 s 收敛至 10 μm 内，验证了该方法的有效性。

参考文献（References）：

[1] Huang S D, Ling L, Cao G Z, et al. Intelligent Explicit Model Predictive Control of Planar Motors for High-Precision Position Tracking Applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2026.

收稿日期：22026 年 05 月 20 日.

基金项目：深圳市科技计划基础研究面上项目（JCYJ20240813141634046）.

作者简介：黄苏丹(1986)，女，广东省深圳市，硕士生导师，主要从事电机与磁悬浮系统控制、模型预测控制方向的研究；通信方式：E-mail:hsdsudan@szu.edu.cn

文章编号：484-078

基于陷波预处理的直线永磁同步电机谐波抑制

赵松泽，黄苏丹，胡宏锦，曹广忠
（深圳大学 机电与控制工程学院广东省 深圳市 518060）

1 引言

直线永磁同步电机具有直接驱动、推力密度高、响应快等优点，在高速运输系统、半导体制造装备、精密加工平台等领域得到广泛应用。但该电机系统中受非理想、逆变器死区和采样误差等影响，其三相电流会产生 5 次和 7 次谐波，引起 6 倍电频率推力脉动，导致速度波动和振动噪声增加。因此，亟需研究直线永磁同步电机的 5 次和 7 次谐波抑制方法，以提高电机运动性能。

2 直线永磁同步电机谐波问题分析

直线永磁同步电机的电角度与直线位移之间满足

$$\theta_e = \frac{\pi}{\tau}x \tag{1}$$

其中，θ_e为电角度，τ为极距，x 为动子位置。电角速度可表示为

$$\omega_e = \frac{\pi}{\tau}v \tag{2}$$

其中，v 为直线速度。在多同步旋转坐标系谐波抑制方法中，5 次和 7 次谐波分别通过$-5\omega_e$和$7\omega_e$同步旋转坐标系变换为直流量，再经低通滤波器提取。但是，基波分量在 5 次和 7 次谐波坐标系下会分别表现为 6 倍频交流扰动。由于基波电流幅值远大于目标谐波分量，单纯依赖低通滤波器容易产生基波泄漏，并引起滤波截止频率与谐波环 PI 参数整定之间的矛盾。

3 基于陷波器基波预处理的谐波抑制方法

为削弱谐波提取支路中的基波泄漏，本文将基波泄漏问题抽象为单一频率分量选择性抑制问题，并借鉴机械谐振抑制中陷波器对特定频率进行选择性衰减的思想，在 5/7 次谐波提取前引入基波陷波预处理。其基本思想为

$$i'_{abc} = H(s)i_{abc} \tag{3}$$

其中，i_{abc}为原始三相电流，i'_{abc}为基波预处理后的三相电流，H(s)为基波陷波器。本文采用二阶陷波器：

$$H(s) = \frac{s^2 + 2\pi\xi ks + \omega_0^2}{s^2 + 2\pi ks + \omega_0^2} \tag{4}$$

其中，ω_0 为陷波中心角频率，k 为陷波宽度，ξ为陷波深度系数。由于需要削弱基波分量，因此陷波中心频率设置为电角频率：

$$\omega_0 = \omega_e \tag{5}$$

当 $s = j\omega_0$时，有 $H(j\omega_0) = \xi$。因此，ξ可表示陷波中心频率处的基波剩余比例。通过调节ξ，可以控制基波预处理后的剩余基波含量；通过调节 k，可以改变陷波器对基波频率偏移的适应能力。所提方法将陷波器放置于谐波提取支路，而不改变主电流环反馈结构。

4 仿真结果

为验证所提方法的有效性，分别在 1.92 m/s、3.84 m/s 和 5.76 m/s 匀速速度工况下，对未加入谐波抑制、传统谐波抑制和加入基波预处理的谐波抑制三种方法进行对比，结果图表 1 所示。实验结果表明：所提方法在大部分工况下可进一步降低目标谐波含量和速度波动，而高度工况下的抑制效果不明显，可进一步提高速工况下的抑制效果。

表 1 部分仿真结果

速度/$m \cdot s^{-1}$	方法	δ_n/%
1.92	未抑制	0.322
	谐波抑制	0.304
	基波预处理谐波抑制	0.269
3.84	未抑制	0.149
	谐波抑制	0.153
	基波预处理谐波抑制	0.132
5.76	未抑制	0.092
	谐波抑制	0.097
	基波预处理谐波抑制	0.099

参考文献(References)：

[1] 廖勇,甄帅,刘刃,等.用谐波注入抑制永磁同步电机转矩脉动[J].中国电机工程学报,2011,31(21):119-127.

收稿日期：2026年 05 月 21 日.

基金项目：深圳市科技计划基础研究面上项目（JCYJ20240813141634046）.

作者简介：黄苏丹(1986)，女，广东省深圳市，副教授，博士研究生，主要从事电机与磁悬浮系统控制、模型预测控制方向研究；E-mail:hsdsudan@szu.edu.cn

文章编号：484-079

适用于超导电动磁浮列车的双层端墙结构

王中辰[1]，王亚男[1]，王剑博[1]，王爱彬[1]
(1. 中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮研究所，吉林 长春 130000)

1 引言

超导电动磁浮列车在超高速运行时面临严苛的工况，端墙作为车体端部的核心承载部件，承担着气密性维持、载荷传递、设备安装等多种功能，其结构设计的优劣直接影响列车的安全性与可靠性。为此，本文提出了一种新型双层端墙结构，将承载与设备集成功能解耦，以满足超导电动磁浮列车对承力、减重及可维修性的多重需求。

2 结构设计

双层端墙主体由内端墙与外端墙构成，如图 1 所示。两者均采用高强度铝型材拼焊成型，实现筋板布局与厚度分布的精准匹配。内端墙主要承担车厢气密边界与乘客区隔断的作用；外端墙直接承受列车运行过程中的表面气动压力与交会冲击；内外端墙之间的夹层空腔被设计为空气制动装置的集成安装空间，实现了“承载-设备集成”一体化。在需要检修的位置，设置了可拆卸的密封盖板，兼顾了气密性与维护可达性。

图 1 双层端墙结构示意图

3 强度分析

针对该双层端墙结构，采用有限元方法进行了全面的载荷工况校核，载荷工况依据超导磁浮列车的最大运用边界制定。分析结果表明，内外端墙的协同受力有效降低了单板的弯曲应力，最大 Von Mises 应力出现在外端墙与底架连接区域及制动安装座根部，最大应力值低于铝合金母材屈服强度的 75%，疲劳薄弱点在 100 万次循环载荷下的应力幅均处于相应 S-N 曲线下包络线安全区域，结构动力特性满足使用要求。

4 结 论

本文设计的双层端墙结构成功将空气制动装置集成于内、外端墙之间的夹层中，在维持气密性的前提下，实现了设备隐藏式安装。铝型材拼焊方案在满足超导电动磁浮列车气动、制动、气密等各工况强度要求的同时，有效优化了车上空间布局。强度分析全面验证了该结构在组合工况下的静强度与疲劳寿命安全裕度充分，本文为高速磁浮列车车体的多功能集成与轻量化设计提供了可行的设计方案。

参考文献 (References)：

[1] 张相昱.液压支架底座结构合理性仿真分析及轻量化研究[D].山东交通学院,2024.
[2] 林庆琳,王万静等.一种模块化设备吊挂框架及磁浮车辆[P].中国,ZL202210227319.2,2023.07.16:1.

收稿日期：2026 年 05 月 22 日.

作者简介：王中辰(1997－)，男，吉林省长春市，工程师，硕士，主要从事磁浮列车结构设计；
通信方式：zhongchenwang123@126.com

文章编号：484–080

高速磁浮梁轨温度力伸缩特性研究

张威风，余浩伟
（中铁二院工程集团有限责任公司，四川省成都市 邮编 610036）

1 引言

常导高速磁浮轨道梁标准跨度通常取 24.768 m，标准跨度区间附近，温度力伸缩对轨道几何状态影响不明显，但未来高速磁浮在长大干线应用中必然会遇到更大跨度需求，梁端轨道功能件将发生明显的伸缩位移，对行车安全造成不利影响。本文针对温度力作用下高速磁浮梁轨结构的伸缩变形开展研究，并提出大跨桥上梁轨变形协调方案。

2 正　文

2.1 高速磁浮梁轨温度力伸缩模型

以某高速磁浮规划线路的气候特征作为温度荷载，建立梁轨纵向伸缩模型，如图 1 所示。

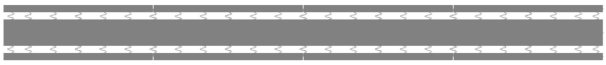


图 1 梁轨温度力纵向伸缩模型

2.2 梁轨纵向变形变位映射关系

图 2 所示为 24.768 m 标准跨度轨道梁梁体与功能件的变形变位曲线。由于梁体为连续混凝土结构，纵向伸缩变形平缓，而功能件为分段式不连续钢结构，因此纵向变位呈现明显的锯齿状。在桥梁与功能件的两连接点之间，二者伸缩变形一致且由二者的合成刚度确定，整体变形仍然呈现出高度线性化，且由于降温时桥梁与功能件的温变幅度差异较小，功能件的变位曲线对桥梁的依赖程度更高。

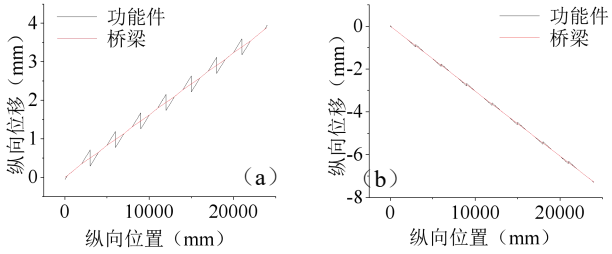


图 2 梁轨纵向变形变位曲线：（a）升温；（b）降温

2.3 温度力对梁端功能件间隙的影响

图 3 所示为不同跨度时，极限升温和降温工况梁端功能件间隙变化，行车安全需保证升温时梁端有足够的安全间隙，相邻功能件不会顶死，同时降温时梁端功能件间隙不超限。通常来说初始间隙能保证足够的伸长余量，降温工况往往控制设计。

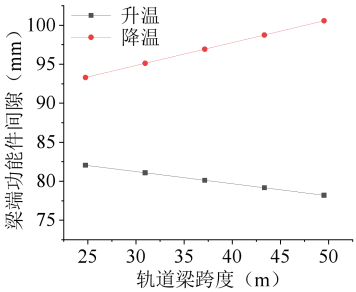


图 3 变温工况时的梁端功能件间隙

2.4 大跨桥上梁轨变形协调

为了防止大跨桥端部伸缩过大导致功能件间隙无法满足行车安全要求，可设置若干可动节段梁，如图 4 所示，节段梁可在大跨桥滑台上纵向滑动，依靠滑台上的限位装置保证竖向稳定，节段梁与节段梁、节段梁与固定梁之间设有弹性可控装置，使大跨桥端部伸缩均摊至各节段梁缝隙中，实现协同伸缩，有效保证轨道的平顺性。

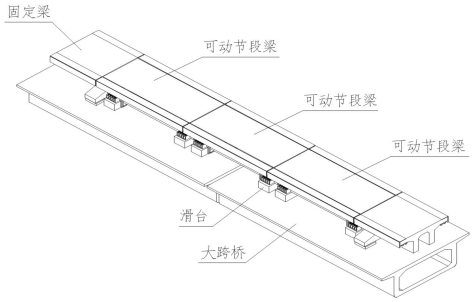


图 4 大跨桥上梁轨纵向变形协调方案

3 结　论

桥梁与功能件的温度力伸缩表现出一定差异，降温导致的梁端功能件间隙增加往往控制设计，大跨桥端部可采用节段梁方案实现梁轨变形协调。

参考文献（References）：

[1] 曾国锋，叶丰. 常导高速磁浮轨道结构[M]. 上海：上海科学技术出版社，2024.

收稿日期：2026 年 05 月 23 日.

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFB4302506-02）.

作者简介：张威风(1993－)，男，河南周口，工程师，工学硕士，主要从事铁路、城轨及新制式轨道工程设计研究；通信方式：E-mail: 1784261987@qq.com.

文章编号：484-081

面向高速磁浮的车载电力线通信信道建模研究

王文泽[1,2]，薛健康[1,2,*]，刘先恺[1,2]，邓桂美[1,2]

(1.高速磁浮运载技术全国重点实验室，山东省 青岛市 266000；2.中车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东省 青岛市 266000)

1 引言

高速磁浮列车作为下一代轨道交通技术的代表，具有速度快、噪音小、维护成本低等显著优势，已成为我国交通强国战略的重要组成部分。随着列车运行速度提升，车载系统的智能化、网络化程度不断提高，对通信系统的可靠性提出了更为严苛的要求。传统车载通信系统采用专用通信线束实现设备间的数据传输，随着磁浮列车电气设备数量的急剧增加，通信线束的重量和布线复杂度呈指数级增长，不仅增加了列车的能耗，也提高了系统的维护难度和故障风险[1]。

电力线载波通信（Power Line Communication, PLC）技术利用电力线作为传输媒介，实现电能和数据的一体化传输，具有无需额外布线、覆盖范围广、抗物理破坏能力强等独特优势，在智能电网、智能光伏、家庭路由等场景已有成熟应用。高速磁浮车载电网具有复杂的拓扑、负载和电磁环境，现有 PLC 信道模型难以精确模拟。本文分析了高速磁浮列车车载电网的拓扑结构和电气特性，建立基于传输线理论的车载低压电网信道模型。研究了 1MHz~20MHz 频段内，不同线路长度、分支数量、负载阻抗对信道衰减特性的影响，并分析 PLC 技术在高速磁浮车载供电系统中的应用可行性。

2 多节点信道特性分析

2.1 多尺度信号衰减特性

高速磁浮列车的 PLC 信道表现出与无线信道相似的衰落特性，包括大尺度衰落和小尺度衰落。其中大尺度衰落主要表现为路径损耗现象，其物理成因是信号在电力线介质传输过程中产生的热能损耗。该损耗机制与传输距离和工作频率相关，小尺度衰落是因短距离内阻抗衰变与多径效应引发的深度陷波。

2.2 多径传输特性

基于传输线理论分析，电力线信道表现出显著的多径传播特性，其成因为信号在传输过程中不仅沿发射端与接收端之间的直接路径传播，还会在电力网分支节点处产生多次反射与折射现象。

3 高速磁浮列车车载 PLC 信道建模

3.1 基于 W-element 的 PLC 线缆模型

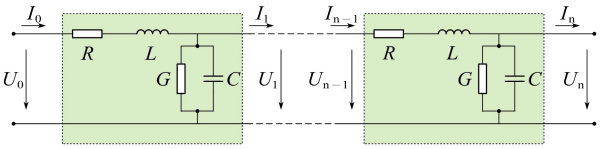


图 1 传输线的分布参数模型

3.2 基于结构的连接器电磁模型

4 结论

本文针对高速磁浮列车车载电网，开展了低压宽带电力线通信信道特性仿真研究。基于传输线理论建立了高速磁浮车载低压电网的确定性信道模型，分析了 1MHz~20MHz 频段内，线路长度、分支数量及负载阻抗对信道衰减特性的影响规律。验证了低压宽带 PLC 技术在高速磁浮车载电网中应用的技术可行性，该技术可显著降低系统重量和布线复杂度。

参考文献 (References)：

[1] 廖志明,林国斌,赵华华.高速磁浮列车冗余供电方法[J]. 电源学报, 2017, 15(02): 52-58.

[2] 曹旺斌, 尹成群, 谢志远, 等. 多输入多输出宽带电力线载波通信信道模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1136-1141.

[3] 陈可, 胡晓光. 基于低压电力线正交频分复用系统虚载波改进信道估计算法[J]. 电力自动化设备, 2013,33(4): 135-141.

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：高速磁浮交通系统工程化技术与运营系统集成技术（2023YFB4302500）.

作者简介：王文泽(1999－)，男，山东省日照市，中级职称，硕士，主要从事高速磁浮车载电力系统的研究；通信方式：wangwz0108@163.com

文章编号：484-082

隧道通过气动荷载对 EDS 磁浮列车动力学影响

李煜寒[1]，赵春发[1]，冯洋[1]，杨晶[2]，李凯[2]

(1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031,；2. 中车长春轨道客车股份有限公司，吉林 长春 13000)

1 引言

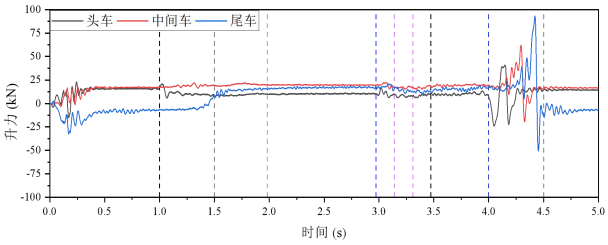
超导电动磁浮列车凭借自稳定和大间隙优势，实现了 600 km/h 试验达速[1]。但在高速运行下，过隧气动压力波动剧烈，会冲击隧道结构、在隧道出口产生音爆并危及行车安全与舒适性[2]。因此，开展列车过隧气动效应与动力学性能研究，对实现达速运行意义重大。

本研究分析三编组超导电动悬浮列车以 600km/h 通过无缓冲结构双线隧道时受到的气动荷载，重点关注气动荷载作用下列车运行的安全性。

2 正　文

2.1 隧道通过气动荷载

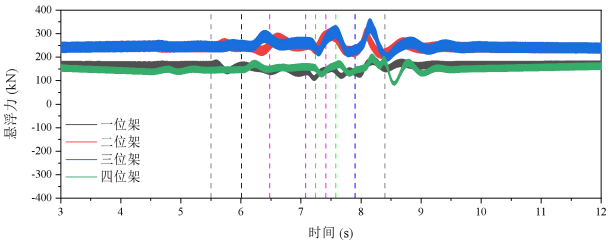
基于有限元数值模拟方法计算得到的三车体气动升力随时间/位置的变化曲线如图 1 所示。计算结果表明，列车在驶出隧道阶段，各车体所受的气动升力均达到了整个运行周期内的最大值。其中，尾车的气动响应最为剧烈，其最大升力峰值高达 93.2 kN，已逼近整车重力的 50%。



1 气动升力时程曲线

此外，在隧道内运行阶段，三节车体均表现为向上的正升力；尾车在进入隧道前承受的是负升力（即下压力），而进入隧道后由于空间限制及瞬态压力波的叠加效应，其受力性质迅速由负值转变为正升力，呈现出显著的非定常气动特性。

下图 2 给出了气动荷载作用下悬浮电磁力变化曲线，不难看出，悬浮电磁力受气动荷载的影响出现了一定幅度的波动，其中二三位悬浮架的电磁力在稳定运行时大于一四位悬浮架，而在气动荷载作用下，二三位悬浮架作为铰接式悬浮架，同时受到两个车体运动的牵连，其电磁力变化幅值也远大于一、四位悬浮架。电磁力最大波动量约占稳定值的 32.72%



2 悬浮电磁力时程曲线

3 结　论

计算表明，列车在出隧道阶段气动升力非定常效应显著，带来接近列车重量 50%的冲击荷载。受此气动干扰影响，悬浮电磁力产生剧烈波动，最大波动量达稳定值的 32.72%；其中，二、三位铰接式悬浮架因受相邻双车体运动的强耦合牵连，其电磁力基值及波动幅值均显著大于独立的一、四位悬浮架。

参考文献 (References)：

[1] 徐飞, 罗世辉, 邓自刚. 磁悬浮轨道交通关键技术及全速度域应用研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(03):40-49.

[2] 田红旗, 张雷, 王田天, 等. 面向行车平稳性的高速磁浮列车气动设计[J]. 前瞻科技, 2023, 2(04):70-77.

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：国家重点研发计划（2024YFF0508000）.

作者简介：李煜寒(2000-)，男，四川成都，博士研究生，主要从事磁浮列车动力学研究；通信方式：E-mail:liyuhan920@my.swjtu.edu.cn

通信作者：赵春发(1973-)，男，湖北仙桃，研究员，博士，主要从事轨道交通系统动力学研究；通信方式：E-mail: cfzhao@swjtu.edu.cn

文章编号：484-083

横风环境下常导高速磁浮列车气动特性及动力学响应分析

袁密奥[1]，赵春发[1]，冯洋[1]，黄曾[1]，郭海霞[2]，付善强[2]
(1.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031；
2.中车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东 青岛，266111)

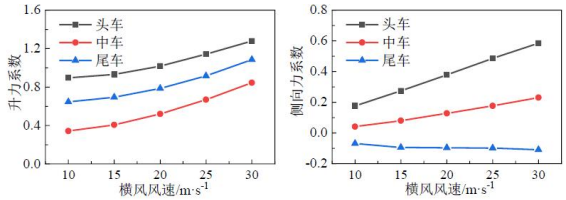
1 引言

常导高速磁浮列车依靠电磁吸力实现稳定悬浮与导向，额定间隙仅 10~12 mm。当运行速度提升至 600 km/h 时，列车气动效应显著加剧[1]，而长距离运输中遭遇的横风作用会进一步增大气动升力与横向力，严重威胁列车的悬浮导向稳定性[2]。为此，本研究建立高速磁浮列车空气动力学模型，仿真分析横风作用下的气动特性及车辆动态响应，为横风环境中的磁浮列车安全平稳运行提供理论依据。

2 正 文

2.1 横风对磁浮列车气动性能影响

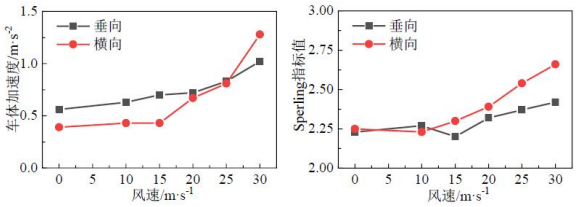
基于 CFD 建立时速 600 km/h 常导高速磁浮列车空气动力学模型，得到磁浮列车三节车的气动系数随横风风速的变化曲线如图 1 所示。可知，列车气动升力系数在不同横风风速下均为正值，随风速的增大而出现增大趋势；头车和中间车侧向力系数为正值，随横风风速的增大而增大，而尾车侧向力系数出现与头车、中间车相反的变化趋势，随横风风速的增大而反向增大。头车侧向力系数对横风最为敏感，随横风风速的变化速率最大。



a 升力系数　　b 侧向力系数

图 1 列车气动系数随横风风速变化规律

图 2 给出了 600 km/h 运行速度下，不同横风风速的车体垂、横向加速度和车辆乘坐平稳性指标值。可知，车体垂、横向加速度幅值随横风风速增大总体均呈上升趋势，而横向加速度对风速变化更加敏感。垂向加速度总体变化较缓，在风速超过 25 m/s 后出现更加明显增长；横向加速度幅值随风速变化较明显，在风速大于 15 m/s 后，车体横向加速度幅值增速明显变快。车体横向 Sperling 指标值对横风速度较敏感，当横风风速超过 20 m/s 后降低为“良好”等级。



a 车体加速度　　b Sperling 值

图 2 车体响应随风速变化趋势

3 结 论

结果表明：横风风速增大使列车气动升力系数、头车和中间车侧向力系数均增大，尾车侧向力系数反向增大，头车侧向力系数对横风最敏感。车体垂向加速度在风速超过 25 m/s 后增长明显，横向加速度在风速大于 15 m/s 后增速显著加快。横向 Sperling 值随风速增大而下降，当横风风速超过 20 m/s 时由“优秀”降为“良好”。

参考文献 (References)：

[1] 杨永刚，梅元贵．时速 600 km 高速磁浮列车明线非定常气动性能数值模拟研究[J]．中国铁道科学，2022，43(06)：106-118.

[2] 孙体佳，汪斌，王伟旭，等．侧风下磁浮列车-箱梁组合系统气动特性[J]．铁道建筑，2024，64(10)：70-77.

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：高速磁浮运载技术全国重点实验室开放基金课题（SKLM-SFCF-2025-004），高速磁浮技术装备铁路行业工程研究中心开放基金项目（ERCM-SFCF-2025-001）

作者简介：袁密奥(1998-)，男，重庆垫江，博士研究生，主要从事磁浮列车动力学研究；通信方式：E-mail: yma14789@foxmail.com

通信作者：赵春发(1973-)，男，湖北仙桃，研究员，博士，主要从事轨道交通系统动力学研究；通信方式：E-mail: cfzhao@swjtu.edu.cn

文章编号：484-084

600km/h 磁浮准零刚度悬挂设计与仿真分析

吴永翥[1]，赵春发[1]，冯洋[1]，虞大联[2]，梁鑫[2]

（1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031；

2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东 青岛 266111）

1 引言

发展时速 600km 级高速磁浮交通技术对于构建我国现代化综合立体交通网具有重大战略意义。随着运行速度的提升，轨道长波不平顺诱发的 1~5Hz 低频激扰占比显著增加[1]。以德国 TR 系列为代表的传统“摇枕+空气弹簧+吊杆”二系悬挂系统，受限于车下极为有限的安装空间，空气弹簧的几何尺寸受到严格限制。此外，由于整体悬挂系统的杠杆机构设计在满足重载支撑的同时，也成倍放大了空气弹簧的等效刚度，导致系统在 600 km/h 超高速运行环境下，垂向隔振能力严重不足，难以兼顾稳定的载荷支撑与低频宽频隔振需求。这直接导致车辆运行平稳性 Sperling 指标显著退化，甚至在某些频段出现振动放大现象。准零刚度（QZS）理论通过并联正、负刚度元件，在保证静载能力的同时，使系统在平衡位置附近的动刚度趋近于零，为突破传统悬挂性能瓶颈提供了新思路[2]。

2 QZS 二系悬挂设计与力学特性分析

本文设计了一种集成于磁浮车辆悬浮架与车体之间的 QZS 模块。该系统由提供正刚度的垂向主弹簧 k_v 与对称布置的水平负刚度机构 k_h 并联而成。其等效动刚度公式为：

$$k_{eq}=\frac{dF}{dx}=k_v+2k_h\left[1-\frac{l_0 l^2}{(l^2+x^2)^{3/2}}\right]$$

式中 l_0 为负刚度机构弹簧的自由原长，l 为静平衡位置(x=0)时负刚度机构弹簧的水平长度，x 为以向下为正的车体相对于摇枕产生垂向位移。

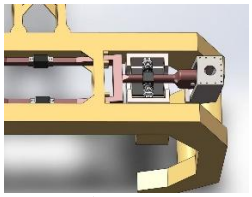


图 1 搭载 QZS 模块悬浮架

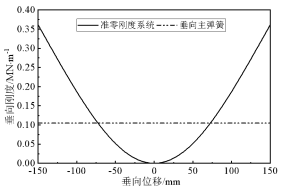


图 2 QZS 模块力学特性

3 动力学仿真分析

通过 SIMPACK 与 MATLAB/Simulink 联合仿真，对比了 600 km/h 直线运行下 QZS 悬挂与传统二系悬挂的性能。

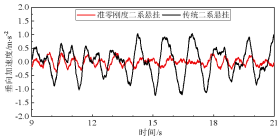


图 3 车体垂向加速度响应

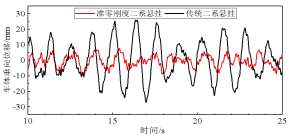


图 4 车体垂向位移响应

4 结 论

针对 600 km/h 常导高速磁浮车辆设计的 QZS 二系悬挂系统，相比传统线性悬挂可使车体垂向振动加速度降低 60%，平稳性指标改善约 41%，达到“优秀”等级。

参考文献（References）：

[1] 赵春发，冯洋，翟婉明. 面向列车稳定舒适运行的磁浮交通车线动力学参数匹配设计[J]. 前瞻科技，2023，2(04)：49-60.

[2] 陈志辉，翟婉明，朱胜阳，等. 基于准零刚度理论的悬挂式单轨车辆二系悬挂系统研究[J]. 振动与冲击，2019，38(02)：13-17+40.

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：高速磁浮运载技术全国重点实验室开放基金课题，编号：SKLM-SFCF-2025-004；高速磁浮技术装备铁路行业工程研究中心开放基金项目，编号 ERCM-SFCF-2025-001.

作者简介：吴永翥(2000－)，男，贵州省荔波县，硕士研究生，主要从事磁浮车辆动力学的研究；通信方式：E-mail:www928970939@163.com、联系电话 13885492841

文章编号：484–085

新型混合悬浮电磁铁温升效应研究

马亚群[1]，刘清辉[1]，袁中原[1]，马卫华[1,2]，曹毅[1]
(1.西南交通大学 轨道运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031；2.西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心，四川 成都 610031)

1 引言

磁浮交通由于其低噪声、绿色环保的特点已成为未来轨道交通发展的重要方向之一。虽然电磁悬浮技术已实现了商业化运营，但其较高的能耗限制了电磁悬浮的进一步发展。因此如何将电磁悬浮和永磁悬浮的优势相结合，实现可控的低能耗稳定悬浮是发展磁浮技术的新方向[1,2]。

当前永磁电磁混合悬浮结构中电磁线圈的发热问题是限制永磁电磁混合悬浮电磁铁悬浮能力的重要因素[3]。基于此提出一种磁导流型+侧贴式组合的新型永磁电磁混合悬浮方案并建立其二维温度场数值模型，开展不同线圈电流条件下的温度场仿真分析，并结合现场试验对磁导流型混合悬浮电磁铁温升效应开展研究。

2 磁导流混合悬浮电磁铁温升效应

2.1 磁导流混合悬浮电磁铁方案

磁导流+侧贴式组合的永磁电磁混合悬浮电磁铁结构如图 1 所示。

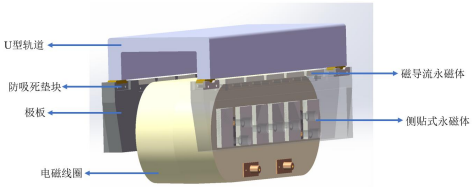


图 1 新型混合悬浮电磁铁三维结构

相比表贴式的永磁体，磁导流永磁体吸死磁力更小，同时侧贴永磁体会进一步提升零电流条件下系统的悬浮能力。相比纯电磁铁，新型混合悬浮电磁铁能实现能耗降低 30%。

2.2 温升效应仿真分析

新型混合电磁铁的二维瞬态热传导基本方程应满足：

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+qv \quad (1)$$

式中，ρ为材料密度，c 为材料比热容，T 为温度，t 为作用时间，k 为导热系数，r 和 z 为二维方向坐标，qv 为单位体积内热源功率密度。40A 电流通电 1h 时仿真结果和实测结果分别如图 2 和 3 所示。

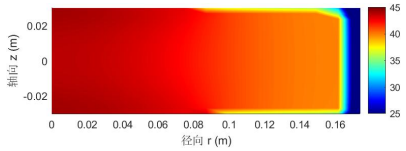


图 2 新型混合悬浮电磁铁稳态温度分布

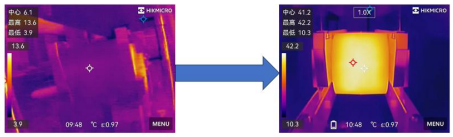


图 3 新型混合悬浮电磁铁温升测试

3 结　论

从结果中可以看出，40A 直流电条件下新型混合悬浮电磁铁通电 1 h 时，初始温度为 3.6℃，仿真最高温度为 44.3℃。现场实测初始温度为 3.9℃，通电后最高温度为 42.2℃，仿真与试验结果吻合。

参考文献（References）：

[1] 李云钢, 闫宇壮, 程虎. 混合 EMS 型磁浮列车的悬浮磁铁设计与分析[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(5): 94-98.

[2] 袁中原, 周弦, 李海涛, 等. 新型导磁型永磁混合电磁铁优化设计[J]. 现代交通与冶金材料, 2025, 5(2): 16-21.

[3] Lu Y, Chen J ,Li J X, et al. A study on the electromagnetic-thermal coupling effect of cross-slot frequency selective surface[J]. Materials, 2022, 15(2): 35057357.

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：国家重点研发项目子任务（2024YFB4303202）；中央高校基本科研业务费专项资金资助（2682026CX124）.

作者简介：马亚群（1999-），男，山东菏泽，在读博士，主要从事悬浮系统结构设计、电磁耦合性能研究；通信方式：E-mail:yaqun_ma@163.com、联系电话：17853314844

文章编号：484-086

考虑电机激扰的永磁电动磁浮垂向稳定性分析与调控

张德旺[1]，石洪富[1]，伍思燚[2]，赤铭昂[2]，邓自刚[1,2]

（1. 西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心，四川省成都市 邮编：610031）

（2. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省成都市 邮编：610031）

1 引　言

永磁电动悬浮系统与双边空心永磁同步直线电机共同布置后，悬浮架垂向位移会同时引起悬浮间隙和电机气隙变化[1]。电机法向力及其波动会作为垂向激扰作用于悬浮系统，改变其平衡位置、等效刚度和稳定性；悬浮磁阻力也会增加电机牵引负载，形成牵引与悬浮耦合。现有研究多分别分析电机或悬浮系统，对电机激扰下永磁电动悬浮系统垂向稳定性及调控方法研究不足。基于此，本文建立考虑电机激扰的永磁电动悬浮垂向耦合模型，分析电机法向力对悬浮稳定性的影响，并利用电机 *d-q* 轴电流调节能力，研究永磁电动悬浮系统垂向稳定性调控方法。

2 牵引-悬浮系统状态空间方程

定义△h 为电机和永磁电动悬浮系统的垂向偏移量；车辆纵向速度为 v。在实际运行过程中，永磁电动悬浮系统产生的磁阻力构成直线电机的纵向非线性负载，而直线电机产生的法向力会作为附加扰动作用于悬浮系统。气隙变化将同时影响电机推力、法向力、悬浮力和磁阻力，因此牵引系统与悬浮系统之间存在明显的双向耦合关系。由此可建立如下非线性耦合动力学模型：

$$\begin{cases} m\dot{v} = F_x(v,h,\dot{h},i_q,i_d) - F_D(v,h,\dot{h}) - R(v) + w_x \\ m\ddot{h} = -F_L(v,h,\dot{h}) - F_z(v,h,\dot{h},i_q,i_d) + mg + w_h \end{cases} \tag{1}$$

其中，F_x 和 F_z 分别是电机的牵引力和法向力；F_L 和 F_D 分别是悬浮力和磁阻力，以及 w_x 和 w_h 分别为垂纵向附加扰动。

控制系统的目标本身就是使车辆在目标速度 v^*和目标气隙 h^*附近运行，即使速度偏差和气隙偏差保持在较小范围内。虽然电磁力均具有非线性特征，但在给定运行工况附近，相关力学量通常是连续且可微的。因此，可在平衡工作点因此在平衡点（v_0, h_0, i_{q0}, i_{d0}）将式（1）进行小扰动线性化：

$$\begin{cases} m\Delta\dot{v} = a_v\Delta v + a_h\Delta h + a_{\dot{h}}\Delta\dot{h} + F_q\Delta i_q + F_d\Delta i_d + \Delta w_x \\ m\Delta\ddot{h} = b_v\Delta v + b_h\Delta h + b_{\dot{h}}\Delta\dot{h} - N_q\Delta i_q - N_d\Delta i_d + \Delta w_h \end{cases} \tag{2}$$

其中 a_v, a_h, F_q, F_d, b_v, b_h, N_q 和 N_d 为线性化系数。进一补可得系统状态空间方程为：

$$\dot{x} = Ax + B_u u_m + B_d d,\ \ y = Cx$$
$$x = \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta h \\ \Delta\dot{h} \end{bmatrix},\ \ u_m = \begin{bmatrix} \Delta i_q \\ \Delta i_d \end{bmatrix},\ \ d = \begin{bmatrix} \Delta w_x \\ \Delta w_h \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} \frac{a_v}{m} & \frac{a_h}{m} & \frac{a_{\dot{h}}}{m} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{b_v}{m} & \frac{b_h}{m} & \frac{b_{\dot{h}}}{m} \end{bmatrix},\ B_u = \begin{bmatrix} \frac{T_q}{m} & \frac{T_d}{m} \\ 0 & 0 \\ -\frac{N_q}{m} & -\frac{N_d}{m} \end{bmatrix},\ B_d = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} \end{bmatrix} \tag{4}$$

3 结论

本文以电机 *d-q* 轴电流为控制输入，以速度和间隙变化量为状态变量，描述悬浮磁阻力对电机牵引负载的影响，以及电机法向力对永磁电动悬浮稳定性的扰动作用。在平衡工况附近，对电机推力、法向力、悬浮力和磁阻力进行一阶泰勒展开，建立小扰动状态空间模型，并构建速度偏差、间隙偏差到 *d-q* 轴电流参考值的映射关系，为永磁电动悬浮系统的垂向稳定调控和牵引-悬浮协调控制提供理论基础。

参考文献（References）：

[1]曹婷, 等. 永磁电动悬浮多工况下的电磁力特性研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5262-5277.

收稿日期： 2026年05月24日.

基金项目： 四川省自然科学基金项目（2026NSFSC1312）、高速磁浮运载技术全国重点实验室开放基金（SKLM-SFCF-2025-015）

作者简介： 张德旺(2001－)，男，甘肃白银人，硕士研究生，主要从事电机设计和控制的研究； E-mail:zhangdw@my.swjtu.edu.cn.

文章编号：484-087

面向管轨物流系统的永磁-电磁混合悬浮系统研究

袁中原[1]，胡俊雄[2]，马卫华[1,2]，刘清辉[1]，马亚群[1]，曹毅[1]

（1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610000；2.西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心，四川 成都 610031）

1 引言

管轨物流系统具有封闭空间运行、小断面布置、高频启停等特点，对车辆支承系统提出了低能耗、低噪声、低维护和高可靠性的要求[1-2]。传统电磁悬浮具有较好的主动控制能力，但持续励磁会带来稳态能耗和散热问题。因此，将永磁体与电磁铁组合形成永磁-电磁混合悬浮系统，是面向管轨物流车辆的一种可行技术路线[3]。

2 方案分析与关键技术

永磁-电磁混合悬浮系统由永磁体、电磁铁、气隙传感器、控制器等结构组成。其中，永磁体主要承担车辆静态载荷，电磁铁用于补偿气隙偏差，从而在降低稳态励磁需求的同时维持系统稳定。其工程应用需重点解决承载能力、气隙稳定、励磁能耗、控制策略等问题。

管轨物流需求	混合悬浮技术响应	关键问题
低能耗运行	永磁体承担主要静载	永磁偏置力与载荷匹配
载荷变化频繁	电磁铁补偿动态扰动	气隙控制和电流裕度
封闭空间少维护	非接触支承减少磨耗	散热、检修和故障诊断

表 1 管轨物流需求与混合悬浮关键技术问题

根据永磁体的布置方式，混合悬浮电磁铁可分为表贴式、集中式、侧贴式和导磁式等构型。其中，表贴式结构简单，集中式有利于磁通集中，侧贴式便于小断面布置，导磁式可通过导磁体调整永磁磁通路径。

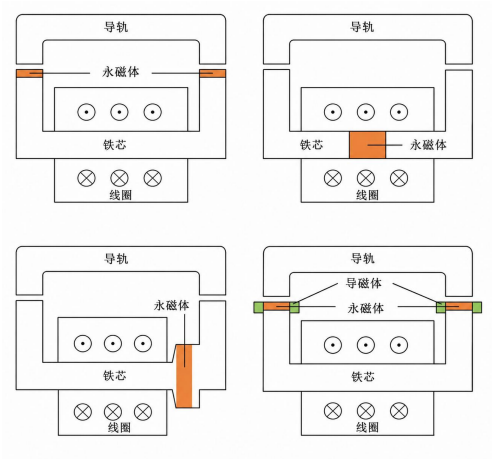


图 1 混合悬浮系统结构示例

3 结论

永磁-电磁混合悬浮能够利用永磁体承担主要静态载荷，并通过电磁铁实现气隙调节与动态稳定控制，在降低稳态励磁需求的同时兼顾系统可控性，因而在管轨物流车辆悬浮支承场景中具有一定应用潜力。

参考文献（References）：

[1] Hu H, Wang J. Research on the Design and Sustainable Evaluation of Metro-Based Underground Logistics Systems[J]. IEEE Access, 2023, 11: 67600-67612.

[2] Gong D, Tian J, Hu W, Dong J, Chen Y, Ren R, Chen Z. Sustainable Design and Operations Management of Metro-Based Underground Logistics Systems[J]. Buildings, 2023, 13(8): 1888.

[3] 邓自刚，刘宗鑫，李海涛，张卫华．磁悬浮列车发展现状与展望[J]．西南交通大学学报，2022，57(3)：455-474，530.

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：国家重点研发项目子任务（2024YFB4303202）；中央高校基本科研业务费专项资金资助（2682026CX124）.

作者简介：袁中原（1999-），男，河南邓州，在读博士，主要从事电磁悬浮结构设计、悬浮控制研究；通信方式：E-mail:1257180036@qq.com、联系电话：18339175989

文章编号：484–088

湍流横风风场下桥上高速磁浮列车气动特性研究

王力东，沈永杰，卜秀孟，韩艳*
(长沙理工大学 土木与环境工程学院，湖南 长沙 410114)

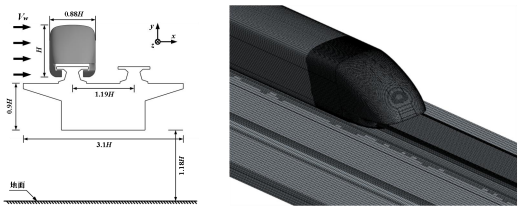
1 引言

桥上高速磁浮列车面临横风环境的严峻挑战，其气动特性直接影响行车安全[1-2]。现有研究多基于均匀来流或简化风场，对湍流横风下磁浮车-桥系统复杂气动作用的研究尚不充分。本文采用数值模拟方法，探究湍流横风风场特性对桥上磁浮列车气动力、压力分布及绕流结构的影响规律。

2 桥上磁浮列车气动特性分析

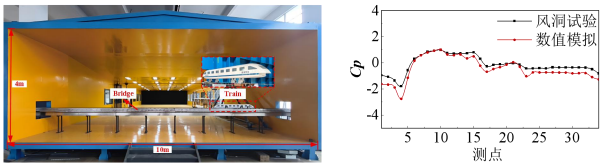
2.1 磁浮车-桥系统 CFD 计算模型及验证

以上海 TR08 型高速磁浮列车为原型，建立了缩尺比为 1： 20 的车-桥系统 CFD 计算模型，模型几何参数如图 1a 所示。采用 STAR-CCM+软件对计算域进行离散，通过在车体周围设置三个互相嵌套的加密块，实现了网格从密到疏的均匀过渡。模型网格划分如图 1b 所示，网格数量为 3110 万。



a 几何模型端视图　　b CFD 模型网格划分

图 1 车-桥系统 CFD 计算模型



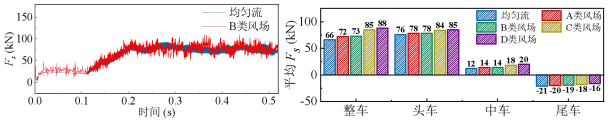
a 移动列车测试装置　　b 试验和仿真结果对比

图 2 数值模型验证

利用长沙理工大学移动列车气动特性测试装置（图 2a）验证模型的计算精度。图 2b 给出了风速 8m/s、车速 6m/s 条件下头车流线型区域典型断面压力系数对比结果。可见，两种结果吻合较好，压力系数分布规律基本一致。

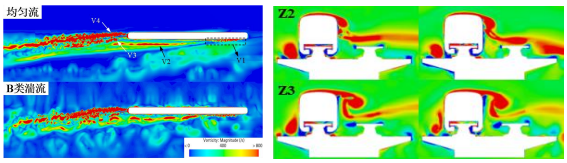
2.2 结果分析

从图 3 和图 4 可以看出：与均匀流场相比，湍流会加剧列车气动力动态波动，且湍流度越大，波动越显著；B 类湍流中列车周围的涡结构更为紊乱，湍流来流与车顶分离的剪切层相互作用，增大了其曲率，使其更偏向列车背风侧表面。



a 时程曲线　　b 时均值

图 3 不同湍流来流条件下气动力计算结果



a 俯视图　　b 端视图

图 4 均匀流和 B 类湍流来流下列车周围涡量云图

3□结　论

头车承受的侧向力最大，而尾车受到与风向相反的侧向力；随着来流湍流度的增加，列车整体气动侧向力逐渐增大，整体气动升力则先减小后增大；各节车厢气动力的标准差逐渐增大，表明来流湍流强度越高，列车所受气动力波动越显著。

参考文献（References）：

[1] 丁叁叁,刘加利,陈大伟. 600 km/h 高速磁浮交通系统气动设计[J].实验流体力学,2023,37(01): 1-8.

[2] Gang Xu, Yuhan Guo, Xinkang Li, et al. Aerodynamic behavior of a 600 km/h high-speed maglev train under crosswinds with different wind attack angles[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(8): 085243.

收稿日期： 2026 年 05 月 23 日.

基金项目： 湖南省自然科学基金项目（2026JJ40043）；长沙市杰出青年科技人才培养计划项目（kq2506015）.

作者简介： 第 1 作者(1990－)，男，湖南郴州人，副教授，博士，主要从事高铁/磁浮车-桥-风耦合振动研究；通信方式：wangld@csust.edu.cn，联系电话：15874853751.

文章编号：484–089

基于移动悬浮平台的桥上磁浮列车气动特性风洞试验研究

卜秀孟[1,2]，王力东[1*]，韩艳[1]

(1.长沙理工大学 土木与环境工程学院，湖南 长沙 410114；2.国防科技大学 智能科学学院，湖南 长沙 410073)

1 引言

为保证车辆的侧风安全性，需要进行车辆气动特性测试，明确其抗风性能[1-2]。为克服轮轨接触噪声对测试结果的影响，提高气动力测试精度，本文采用电磁悬浮技术，研发了一种新型移动车辆气动特性测试装置。基于该装置开展了磁浮列车气动特性风洞试验，探究了不同风偏角下磁浮列车气动力系数变化规律。

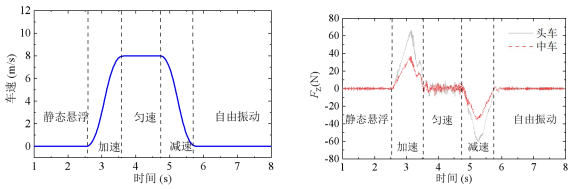
2 磁浮车辆气动特性测试装置研发

利用长沙理工大学风洞实验室低速试验段宽度较大的特点，研发了一套磁悬浮式移动列车模型风洞试验装置，用于测试磁浮列车在桥上运动时车辆的气动特性，车辆的运动由伺服电机牵引。如图1所示，整套装置主要由车辆模型、桥梁模型、支撑基座、移动平台、牵引制动系统、悬浮系统、导向系统和信号采集系统等组成。车辆表明布置有9排压力测试孔，头车和中车均安装有测力天平，采用信号无线传输的方式实现列车同步测力测压。

图1 移动车辆模型风洞试验装置

3 结果分析

以风速8 m/s、车速8 m/s为典型工况，图2中给出了车辆运行过程中的速度曲线和纵向力时程。可以看出，稳定段车辆的速度和纵向力幅值均波动较小，车辆运行平稳性良好。



(a) 运行速度　　(b)纵向力

图2 车辆平稳性测试结果

图3中给出了不同风偏角下头车气动力系数测试结果。可以看出，测压法与测力法测试结果吻合良好，磁浮车辆气动力试验结果具有良好的准确性。随风偏角的增大，头车阻力系数呈先增大后减小变化，最大值在83°风偏角处取得；升力系数呈先增大后减小，然后增大变化，最大值在58°风偏角处取得；力矩系数随风偏角的增大而增大（绝对值），最大值在90°风偏角处取得。

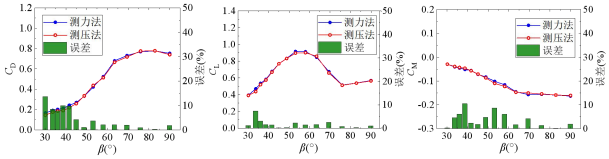


图3 车辆气动力系数测试结果

3 结　论

测试装置的运行平稳性良好；测压法与测力法获取的气动力系数结果吻合良好，验证了该装置的测试精度与可靠性；头车的阻力、升力和力矩系数分别在风偏角83°、58°、90°取得最大值。

参考文献（References）：

[1] Xiang H, Li Y, Chen S, et al. A wind tunnel test method on aerodynamic characteristics of moving vehicles under crosswinds[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2017, 163: 15-23.

[2] Zhou D, Xia C, Wu L, et al. Effect of the wind speed on aerodynamic behaviours during the acceleration of a high-speed train under crosswinds[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2023, 232: 105287.

收稿日期：2026年05月23日.

基金项目：湖南省自然科学基金项目（2026JJ40043）；长沙市杰出青年科技人才培养计划项目（kq2506015）.

作者简介：卜秀孟(1998－)，男，贵州毕节人，博士研究生，主要从事高速磁浮风-车-桥耦合振动研究；通信方式：buxiumeng1121@163.com，联系电话：15274845828.

文章编号：484-090

永磁悬浮直线动力学性能分析

于红涛，赵春发，冯洋
（西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031）

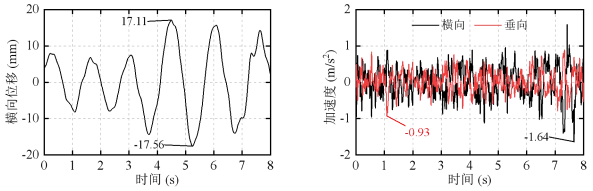
1 引言

近年来，永磁悬浮交通系统发展迅速，其利用车载永磁体和用词轨道之间的吸引力或排斥力实现车辆悬浮，具备承载能力强，节能环保，造价低等特点[1]。本文通过建立车辆动力学仿真模型，探究行车速度对车辆系统动力学响应的影响规律，为永磁悬浮交通系统设计提供理论依据和应用参考。

2 车辆系统动力学响应规律

2.1 典型速度工况下的动力学响应

本节以 60 km/h 作为典型速度工况，仿真分析车辆系统在不平顺激扰下的动力学响应。



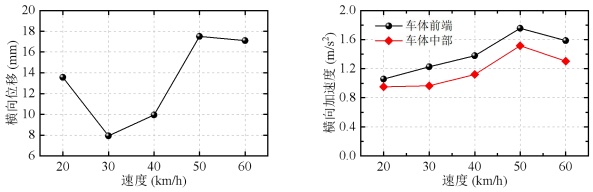
(a) (b)

图 1 车体响应 (a) 横向位移；(b) 加速度

由图 1 (a)可以看出，车体的横向位移变化范围为-17.56~17.11 mm；图 1 (b)可以看出，车体前端横、垂向加速度最大值分别为 1.64 m/s^2 和 0.93 m/s^2，表明车辆运行过程中横向振动更为剧烈。但两者均未超过文献[2]所规定的限值 2.5 m/s^2。

2.1 不同行车速度下的动力学响应

本节分析行车速度在 20~60 km/h 范围内变化时，车辆振动响应及平稳性变化规律。



(a) (b)

图 2 车体响应最大值 (a) 横向位移；(b) 横向加速度

由图 2 (a)可知，当行车速度为 30 km/h 时车体横向位移最小，且随着行车速度的增大，车体位移响应也随之增大；由图 2 (b)可知，在 20~50 km/h 范围内，车体横向加速度随行车速度的增大而增大，在 50 km/h 时前端和中部横向加速度最大值分别为 1.76 m/s^2 和 1.52 m/s^2；60 km/h 时横向加速度出现小幅下降。

3 结 论

在车辆运行过程中，车体横向振动响应较为明显；随着行车速度的增加，车体响应也呈不断增大的趋势发展，且在 50 km/h 时，横向位移和加速度最大。

参考文献 (References)：

[1]. 邓自刚,刘宗鑫,李海涛,等. 磁悬浮列车发展现状与展望 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57 (03): 455-474+530.

[2]. 国家铁路局. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599-2019[S]. 中国标准出版社, 2019.

收稿日期： 2026 年 05 月 23 日.

基金项目： 永磁悬浮车辆-轨道梁耦合振动特性研究（2023YFB4302102-6）

作者简介： 于红涛(2001－)，男，甘肃平凉，硕士研究生，主要从事磁浮车辆动力学的研究；通信方式：E-mail:18034635810@163.com、联系电话 18034635810

文章编号： 484-091

基于径向基神经网络的单侧悬浮系统协同控制

王美琪[1,2]，白冰[1]，郝紫洋[1]，刘鹏飞[1,2]，王瑞晨[1,2]

(1.石家庄铁道大学 机械工程学院，050043；2.石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室，石家庄 050043)

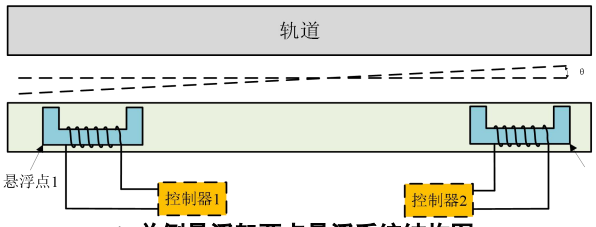
1 引言

磁悬浮列车正常运行过程中，由于悬浮架自身结构影响，多个磁铁之间存在较为明显的耦合作用，滑模面驱动的径向基神经网络协同控制算法对单侧悬浮系统中的电磁铁模块进行控制，使不同电磁铁之间相互协同，提高列车运行的安全性和稳定性。

2 正　文

2.1 单侧悬浮系统构建及控制算法

由于单侧悬浮架多个磁铁间存在耦合作用，单侧悬浮架可以将其看作一种杆式结构，只需对两端进行协同控制。具体结构如图 1 所示。

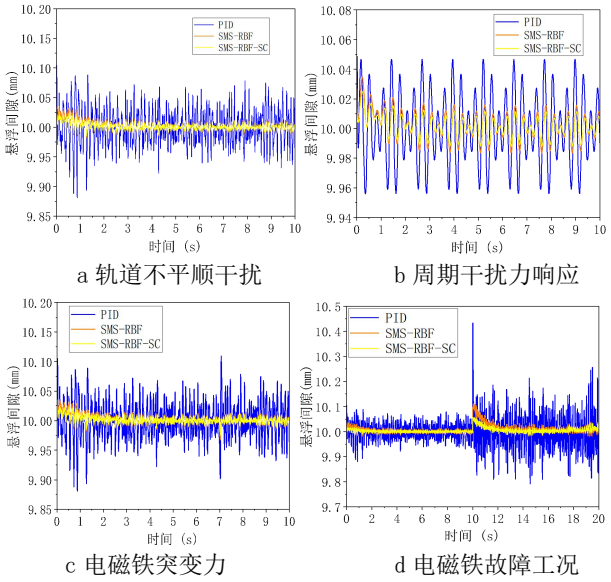


1 单侧悬浮架两点悬浮系统结构图

针对单侧悬浮系统悬浮点间动态耦合与非对称扰动问题，引入 PID 协同控制有效消除两点同步误差。单点回路采用 SMS-RBF 控制器，依托滑模面与 RBF 神经网络补偿模型不确定性及外部扰动；在此基础上 PID 进行协同控制，输出补偿电流叠加至单点控制回路，最终实现单侧悬浮系统悬浮点间的协同控制。

2.2 悬浮控制仿真结果与分析

通过对 PID 控制器，未添加协同控制径向基神经网络控制器的与提出的 SMS-RBF-SC 控制器，在轨道不平顺干扰，周期干扰力，电磁铁突变力，电磁铁故障工况四个工况下的悬浮间隙响应进行对比如图 2 所示，由仿真结果可得，文章所提出的 SMS-RBF-SC 控制器具有较好的鲁棒性。



a 轨道不平顺干扰　　b 周期干扰力响应

c 电磁铁突变力　　d 电磁铁故障工况

2 不同工况下悬浮间隙

3 结　论

本文从单侧悬浮系统结构出发，搭建单侧悬浮系统动力学模型，通过多个工况下不同控制策略的仿真结果对比可得，SMS-RBF-SC 控制方法的悬浮间隙控制效果优于其余两种对比控制策略，能够有效抑制不同悬浮点之间由于耦合所带来的扰动，提高悬浮系统运行的稳定性。

参考文献 (References)：

[1] 龙志强,窦峰山,王志强,等. 高速磁浮悬浮导向控制技术现状及展望[J].前瞻科技,2023,2(04):78-88.

[2] 陈琛, 徐俊起, 林国斌, 等. 具有径向基网络加速度反馈的磁浮列车悬浮系统滑模控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 1642-1651.

[3] 李自康, 王志强, 杨洋, 等. 高速磁悬浮列车搭接悬浮结构解耦自抗扰算法[J]. 铁道学报, 2025, 47(07): 18-27.

收稿日期： 2026 年 05 月 24 日.

基金项目： 国家自然科学基金面上项目（12472020）.

作者简介： 王美琪(1988－)，男，河北唐山人，教授，博士，主要从事车辆动力学、悬浮控制算法的研究；通信方式：E-mail: wangmeiqi@stdu.edu.cn、联系电话：13223435755.

文章编号：484-092

600km/h 磁浮列车大风声屏障耦合气动突变

陈争卫[1]，彭 程[2]

(1.中南大学交通运输工程学院，轨道交通安全教育部重点实验室，长沙 410075)

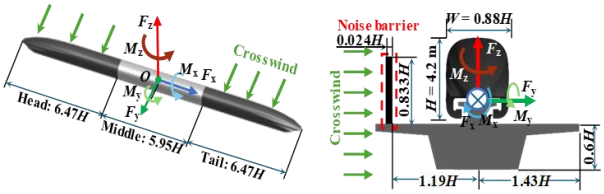
1 引言

沿海及多风城市走廊中，列车频繁进出非连续声屏障区段，横风与基础设施过渡的叠加可能诱发明显的瞬态载荷和稳定性问题[1-3]。现有研究已关注高速列车横风安全、声屏障气动效应和防风设施过渡问题，但针对 600 km/h 高速磁浮列车、单侧声屏障和强横风共同作用的研究仍相对不足。基于此，本文建立高速磁浮列车—高架桥—声屏障耦合模型，分析列车在 10、15、20、25 和 30 m/s 横风下进出屏障过程中的气动载荷、压力分布和频域响应。

2 结果与讨论

2.1 几何模型与边界条件

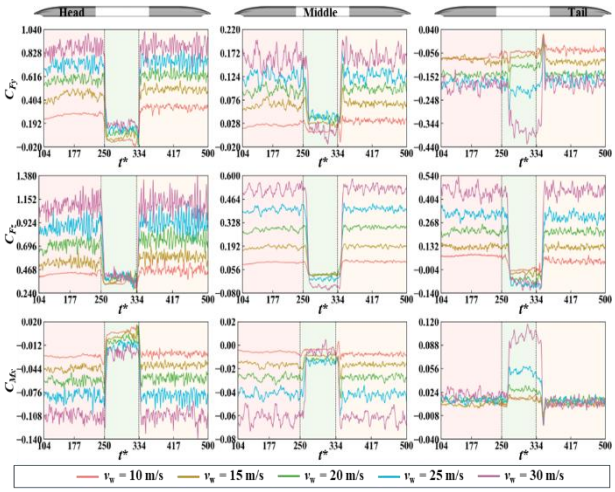
计算对象为三编组磁浮列车（80 m×4.2 m）-高架桥-单侧声屏障（距轨 5 m、厚 0.3 m）几何模型；边界条件取车速 600 km/h、90°横风 10~30 m/s，入口速度出口压力；数值设置采用可压缩流、SST k-ω IDDES、SIMPLEC、二阶迎风、步长 0.005 s，并配合滑移网格与局部加密。



1 几何模型及气动载荷方向

2.2 气动载荷结果

图 2 为气动载荷结果。无遮挡区头车横向力、升力和滚转力矩随横风风速升高而增大；进入声屏障后载荷显著下降，离开后回升。屏障对头车改善突出：30 m/s 横风下，横向力和滚转力矩 RMS 降幅超 80%，升力最大降幅由 10 m/s 时的 22.1%增至 63.0%。尾车因尾迹影响改善有限。



2 气动载荷随时间变化趋势

3 结 论

本文研究表明，单侧声屏障在入口和出口附近会引发明显的气动突变，但在遮蔽区内可显著削弱头车两侧压力不对称，从而降低横向力、升力和滚转力矩。

参考文献（References）：

[1] W. Guo, H. Xia, R. Karoumi, et al. Aerodynamic effect of wind barriers and running safety of trains on high-speed railway bridges under cross winds[J]. Wind and Structures, 2015, 20: 213-236.

[2] Z. Chen, T. Liu, W. Li, et al. Aerodynamic performance and dynamic behaviors of a train passing through an elongated hillock region beside a windbreak under crosswinds and corresponding flow mitigation measures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 208: 104434.

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：国家自然科学基金（No. 52472373）.

作者简介：陈争卫(1991－)，男，陕西咸阳人，教授，博士学位，主要从事高速列车空气动力学及系统动力学安全的研究；通信方式：E-mail:gszxczw@csu.edu.cn、联系电话

文章编号： 484-093

磁浮列车二自由度悬浮的深度强化学习控制

王美琪[*1]，郝琳杰[1]，徐嘉跃[2,3]，刘鹏飞[1]

(1. 石家庄铁道大学机械工程学院,河北省 石家庄市 050043；2. 同济大学 交通学院，上海 201804；3. 同济大学 磁浮交通工程技术研究中心，上海 201804)

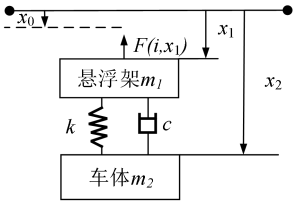
1 引言

悬浮系统具有非线性和开环不稳定的特点，在工程实际中大部分是用传统反馈控制。但传统反馈控制鲁棒性差，当工况发生变化控制性能将下降。为此本文提出一种基于深度强化学习 SAC（Soft Actor-Critic）的悬浮控制算法，用于二自由度悬浮系统的控制。通过与传统控制 PID 算法的对比，验证了所提控制算法的优越性和鲁棒性。

2 正　文

2.1 二自由度悬浮系统建模

本文所研究的二自由度磁浮列车悬浮系统如图 1 所示。



1 二自由度悬浮系统

其中，m_1 为悬浮架质量，m_2 为车体的质量，k 和 c 分别为二系悬挂装置的刚度和阻尼，x_1 为悬浮架的垂向位移，x_2 为车体的垂向位移，x_0 为悬浮架的平衡位置悬浮间隙，$F(i,x_1)$ 是悬浮架的悬浮电磁力，F_d 为外界扰动。$i(t)$ 为控制电流。

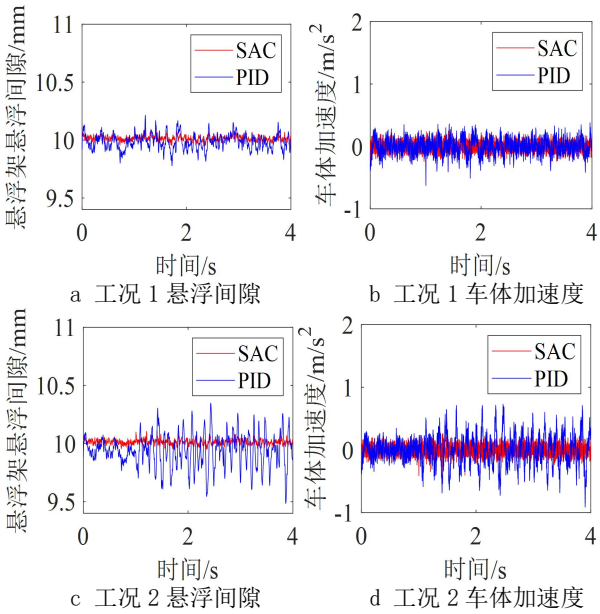
2.2 基于 SAC 算法的二自由度悬浮系统控制方法

SAC 是一种基于最大熵强化学习框架的离策略深度强化学习算法，而强化学习的奖励函数是训练智能体性能的关键因素之一，以靠近目标间隙 10mm 为正向奖励，同时考虑电流过大与车体的振动的影响，设置奖励函数为：

$$r(s_t,i_t)=e^{-(1000(x_t-x_0))^2}+0.005\times e^{-\dot{x}_1^2}+0.05\times e^{-i}+0.005\times e^{-\dot{x}_2^2}+0.1\times e^{-\ddot{x}_2^2} \quad (1)$$

2.3 悬浮控制仿真结果与分析、

工况 1 是作用于悬浮架的不平顺干扰，工况 2 是在列车稳定运行后对悬浮架施加大小为 2mm 的脉冲扰动。



2 不同工况下算法性能对比

由图 2 可知，对于车体加速度：工况 1 下，SAC 与 PID 接近，工况 2 下，PID 振动范围约为 SAC 的 1.5 倍。对于悬浮间隙：工况 1 下，SAC 比 PID 性能提升约 63.98%。工况 2 下，SAC 比 PID 性能提升了约 49.10%。

3 结　论

本文建立了二自由度悬浮系统的深度强化学习环境，设计了适用于该环境下的指数奖励函数，通过训练后的 SAC 智能体与 PID 算法进行仿真分析，证明了 SAC 智能体控制器可以有效减小磁浮列车运行过程中的波动，提升了控制的鲁棒性。

参考文献（References）：

[1] 徐俊起, 李凤恺, 陈琛, 等. 关键具身智能驱动磁浮交通系统智能化：前沿进展、应用与未来挑战[J/OL]. 西南交通大学学报, 1-24.

[2]胡轲珽, 徐俊起, 刘志刚, 等. 基于强化学习的电磁悬浮型磁浮列车悬浮控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(03): 332-340

收稿日期： 2026 年 05 月 24 日.

基金项目： 国家自然科学基金面上项目（12472020）.

作者简介： 王美琪(1988－)，男，河北唐山人，教授，博士，主要从事车辆动力学、悬浮控制算法的研究；通信方式：E-mail: wangmeiqi@stdu.edu.cn、联系电话：13223435755.

文章编号： 484-094

钉扎磁浮低成本磁轨驱动技术

龙威[1*]，郑杰[1]，邓自刚[2]，
(1.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031；
2.西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心，四川 成都 610031；)

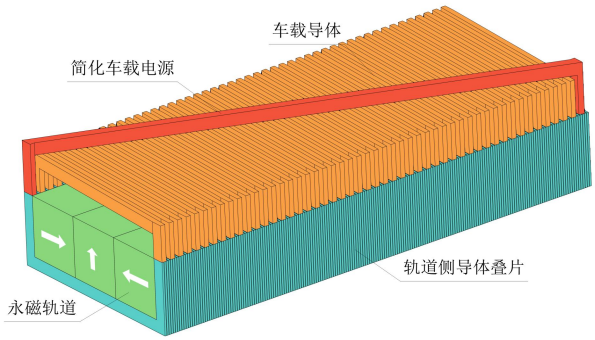
1 引 言

高温超导钉扎磁浮采用永磁轨道实现自稳定悬浮与被动导向，沿线铺设的恒定永磁磁场为驱动系统提供了独特的复用机会[1]，但永磁轨道沿运行方向呈单极分布，无法直接套用依赖空间交变磁场的传统直线交流电机方案，至今未见可行的工程化方案。

本文提出一种复用永磁轨道磁场的钉扎磁浮驱动架构，仅需将现有永磁轨道固定件替换为片间绝缘的导体叠层，配合车载斜置导体跨接形成多匝串联回路，即可实现永磁轨道的悬浮-驱动-导向一体化设计，大幅降低钉扎磁浮建造成本。COMSOL 有限元仿真验证了该拓扑的可行性。

2 结构设计与验证

2.1 系统结构与工作原理

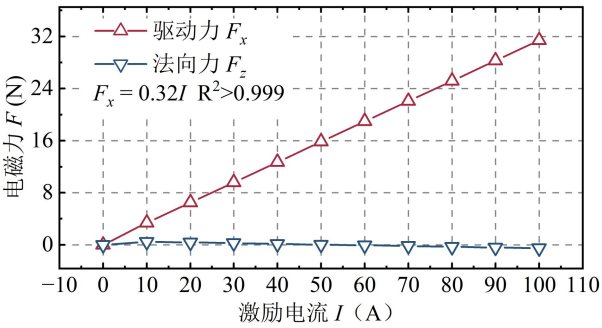


1 磁轨驱动结构

如图 1 所示，本系统由永磁轨道、轨道侧导体叠片、车载斜置导体及车载直流电源构成。永磁轨道由 Halbach 单元沿运行方向周期性铺设，气隙处合成方向恒定的垂向磁场。轨道侧由片间绝缘的薄导电片沿运行方向密集叠层，使电流仅能横向流动。车载斜置导体与多个薄导电片相接，并通过斜跨将电流传导到后续轨道侧导电薄片，实现电流在车载导体与轨道侧导体间反复串联实现多匝线圈效果，并与电源构成闭合回路。同时，为防止短路，相邻斜导体间距须大于一个叠片长度；单根斜导体并联跨接多片叠片，运动中每根斜导体所跨接的叠片数仅波动 ±1，保证推力平顺。

2.2 电磁推力特性

基于 COMSOL 建立三维静磁场有限元模型。模型由 3 块 25×25×100 mm 钕铁硼永磁体沿运行方向铺设构成 Halbach 阵列单元，气隙 5 mm，上方布置 24 匝车载斜置导体并通过顶部回流导体串联，模拟车载直流电源闭合回路。如图 2 所示，纵向推力随激励电流线性增长，法向力为零。



2 推力计算结果

2.3 工程可行性

按同一横截面布置 4 套推进单元、车底 2/3 长度可铺装电机估算，对线密度 1.5 t/m 的钉扎磁浮车辆，仅需 176 A 激励电流即可实现 1 m/s² 起步加速度，对应电流密度 7 A/mm²，位于铜导体长期许用范围内，无需特殊冷却即可满足牵引需求。

3 结 论

本提出一种复用永磁轨道磁场的直流直线推进拓扑。可显著降低钉扎磁浮工程化建造成本。

参考文献（References）：

[1] DENG Z, ZHANG W, ZHENG J, et al. A high-temperature superconducting maglev-evacuated tube transport (HTS Maglev-ETT) test system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(6): 3602008.

收稿日期： 2026 年 05 月 24 日.
基金项目： 教育部学科突破先导项目课题（JYB2025XDXM211）
作者简介： 龙威（2000-），男，四川宜宾人，博士研究生，主要从事磁悬浮及驱动技术研究；
通信方式：E-mail: lethon@my.swjtu.edu.cn

文章编号：484-095

磁浮列车悬浮系统扰动观测与协调控制研究

陈迪来[1]，倪中煜[1]，陆晨旭[1]，张让[1]，沈钢[2]

（1.上海应用技术大学 智能技术学部，上海 奉贤 201418；同济大学 交通学院，上海 嘉定 200092）

1 研究背景

磁浮列车悬浮系统通过多组电磁铁对气隙进行毫秒级闭环调节，是车辆安全和平稳运行的关键。随着速度提高，轨道不平顺、载荷变化及电磁铁参数摄动会进入控制回路，引起悬浮力波动、构架姿态偏差和多点气隙不一致。近年来，EMS 型悬浮控制已由传统 PID 拓展到扩张状态观测器、扰动观测器和复合抗扰控制等方向[1-3]。本文在单点间隙控制基础上，提出扰动观测与协调分配控制方法。

2 扰动观测与协调控制方法

2.1 技术路线

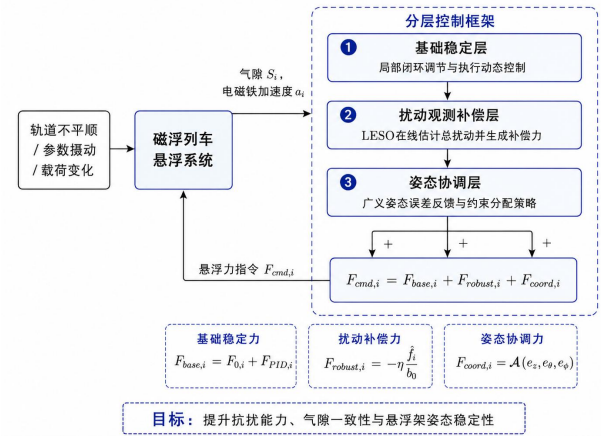
本方法采用分层叠加结构：底层采用单点悬浮稳定控制，以间隙闭环和电流/电压内环保证各悬浮点的基本稳定及工程可实施性；扰动观测层构建线性扩张状态观测器（LESO），将轨道不平顺、模型参数偏差和电磁执行滞后等未建模因素等效为总扰动，利用气隙误差及其变化信息在线估计扰动，并将估计结果转换为悬浮力补偿项叠加到名义力指令中，从而降低对精确车辆-电磁铁模型的依赖。

协调控制层在悬浮架层定义平均气隙误差、前后气隙差和左右气隙差三类广义姿态误差，分别表征构架升沉、俯仰和侧滚运动趋势。基于广义姿态误差设计 PID 协调器生成广义协调力，并通过零总力约束分配矩阵映射到四个悬浮点，使协调修正主要改变前后、左右力差，而不改变悬浮架名义承载能力。

最终悬浮力指令由基础稳定力、扰动补偿力与姿态协调力共同组成：

$$F_{cmd,i} = F_{0,i} + F_{PID,i} - \eta\ \hat{f}_i / b_0 + F_{coord,i}$$

控制结构如图 1 所示。



1 控制结构图

3 结论

本文提出的磁浮列车悬浮系统扰动观测与协调控制方法，将单点稳定、扰动估计补偿和悬浮架姿态协调统一在同一力指令框架内。与仅提高 PID 增益相比，该方法更强调对未知扰动的主动估计和对多点力分配关系的约束，可用于改善轨道不平顺激励下的气隙一致性、构架姿态稳定性和悬浮力波动特性。

参考文献（References）：

[1] LI F, SUN Y, XU J, et al. Control methods for levitation system of EMS-type maglev vehicles: an overview[J]. Energies, 2023, 16(7): 2995..

[2] LI Q, LENG P, YU P, et al. Decoupling control for module suspension system of maglev train based on feedback linearization and extended state observer[J]. Actuators, 2023, 12(9): 342.

[3] XIE Y, ZHAO B, YAO X. Refined disturbance observer based prescribed performance fixed-time control of high-speed EMS trains with track irregularities[J]. High-speed Railway, 2023, 1(3): 171-178.

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：项目名称（编号）；项目名称（编号）.

作者简介：第 1 作者(出生年 –)，性别，籍贯(省、市/县)，职称，学位，主要从事□□□□、□□□□的研究；通信方式：E-mail:、联系电话

文章编号：484–096

三维流动对真空管道系统临界效应的影响机制研究

蔡超超[1]，钱博森[2]

(中南大学 交通运输工程学院，湖南省 长沙市 410018)

1 引言

真空管道列车（ETT）高速运行诱发的壅塞会导致气动阻力剧增。目前，等熵与 Kantrowitz 极限常被用作评估壅塞的理论基准（如 Zhou 等[1]、Hou 等[2]的研究）。然而，现有研究较少关注实际三维黏性流场中壅塞行为与一维理论的差异，且缺乏对该偏离机制的深入剖析。为此，本文基于理论推导揭示了三维壅塞临界点偏离一维预测的内在物理机制；并结合三维数值模拟，探究了列车流线型长度对临界气动效应及流场特性的影响。

2 正　文

2.1 三维耗散对理论壅塞边界的修正与对比

一维等熵理论表明，临界质量流量 $\dot{m}_{max}$仅受喉部面积 A^* 与来流状态约束。但在真实三维流动中，边界层排挤会缩减有效面积（$A^*{}_{eff} < A^*$），尾流耗散会造成总压折减（恢复系数$\sigma < 1$）。综合这两项修正，实际临界质量流量为：

$$\dot{m}_{max,real} = \sigma p_0 A^*{}_{eff}\sqrt{\frac{\gamma}{RT_0}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \qquad (1)$$

显然 $\dot{m}_{max,real} < \dot{m}_{max}$。面积折减与总压损失使流场在更低的来流速度下即达到流量极限，导致实际临界马赫数低于理论预测值：

$$Ma_{real} < Ma \qquad (2)$$

即真实工况下的三维黏性效应将导致管道列车提前触发壅塞。

2.2 数值仿真验证

为验证前文的理论分析，并定量分析三维流体黏性及复杂尾流耗散对临界壅塞特征的影响，本文引入了三维数值仿真方法开展进一步研究。

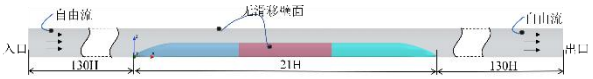


图 1 基础模型和计算域边界条件示意图

如图 2 所示，载具在亚临界状态下（蓝线），车尾流场为亚声速，且压力系数与马赫数分布平缓。跨越临界点后（红线），该处形成局部超声速区，随后压力骤升且马赫数陡降，表明车尾诱发了强压缩波，迫使气流减速至亚声速。由此可知，在本文研究工况下，亚跨音速临界马赫数为 0.53Ma。

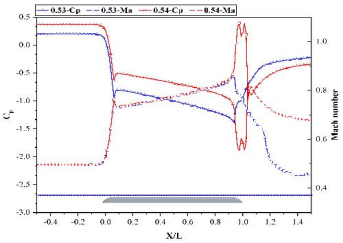


图 2 载具跨越临界速度等级时上部中心线压力系数与马赫数演化分布

3 结　论

以阻塞比 0.159 的超导磁浮列车为对象，本文揭示了三维黏性效应对 ETT 系统壅塞点偏移的作用机制。边界层排挤导致的有效面积缩减与湍流耗散引起的总压损失相耦合，使得实际壅塞速度低于一维等熵预测值。数值结果证实，本工况下系统的实际临界马赫数由一维理论预测的 0.6 降至 0.53。

参考文献 (References)：

[1] Zhou Z, Xia C, Du X, et al. Impact of the isentropic and Kantrowitz limits on the aerodynamics of an evacuated tube transportation system[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(6).

[2] Hou Z, Zhu Y, Bo J, et al. A quasi-one-dimensional study on global characteristics of tube train flows[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(2).

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：基于冲压通风的高速磁浮设备舱流动控制及散热优化（52202453）.

作者简介：蔡超超(2001.08)，男，河南信阳，在读硕士研究生，研究方向：低真空管道列车空气动力学；通信方式：E-mail: 244212091@csu.edu.cn、联系电话：13849724080

文章编号：484-097

基于强化学习的磁浮车桥系统悬浮控制研究

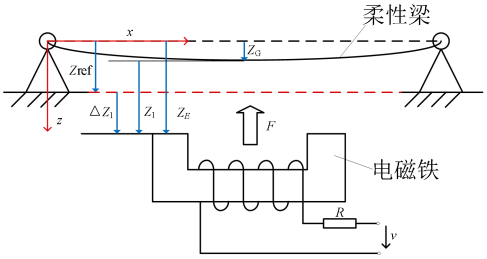
王美琪[*1]，郝琳杰[1]，刘鹏飞[1]
（1. 石家庄铁道大学机械工程学院，河北省 石家庄市 050043）

1 引　言

磁浮列车悬浮电磁力与桥梁弹性形变相互作用，直接影响悬浮稳定性，本文旨在利用强化学习算法对磁浮车桥耦合系统进行控制，通过智能体智能决策，实现对车桥耦合振动的抑制。

2 正　文

2.1 受控车桥磁耦合模型



1 磁浮列车车桥耦合模型示意图

对于磁悬浮列车车桥耦合系统，单点悬浮系统可以被视为磁悬浮列车整体悬浮系统的基本单元，悬浮控制模型如图 1 所示，其中 Z_E 为电磁铁的垂直位移，Z_G 为轨道梁的垂直变形，Z_{ref} 为目标悬浮间隙，Z_1 为实际悬浮间隙，ΔZ 为间隙误差。

2.2 基于 PPO 算法的悬浮系统控制策略

PPO（Proximal Policy Optimization）是一种基于策略梯度的深度强化学习算法，其核心思想通过裁剪机制约束策略更新范围，从而提高训练过程的稳定性。核心公式如式(1)、(2)所示：

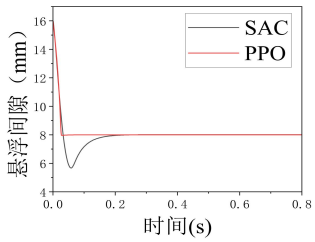
$$r_t(\theta)=\frac{\pi_\theta(at\,|\,st)}{\pi_{\theta old}(at\,|\,st)} \tag{1}$$

$$L(\theta)=E_t[\min(rt(\theta)A_t,clip(r_t(\theta),1-\varepsilon,1+\varepsilon)A_t)] \tag{2}$$

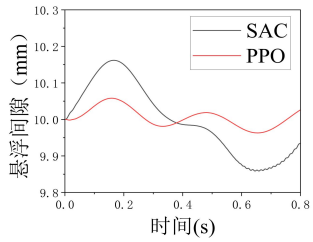
其中，$r_t(\theta)$为新旧策略概率比，A_t 为优势函数，ε为裁剪系数。L 为 PPO 的裁剪目标函数。

2.3 仿真验证与分析

工况 1 为在桥跨中位置的单电磁铁从 16mm 处稳定到 8mm 的悬浮间隙，由图可知，在同样的时间内训练智能体，PPO 算法到达平衡位置更快，稳定性更高。工况 2 是加了非周期扰动后从目标间隙开始悬浮的悬浮间隙对比图像，以接近 10mm 目标间隙来计算平均间隙误差，PPO 比 SAC 提升了约 98.85%的性能。



a 工况 1 悬浮间隙



b 工况 2 悬浮间隙

2 悬浮间隙性能对比

3 结　论

对于磁浮列车车桥耦合模型，在同样时间内，以相同的奖励函数对两种智能体进行训练，PPO 控制效果明显优与 SAC，进一步证明了 PPO 算法在悬浮控制系统的有效性与稳定性。

参考文献（References）：

[1] 王志强，龙志强，李晓龙. 高速磁浮列车搭接结构悬浮系统仿真分析[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(03): 590-599.

[2] 周凯，潘邦泰，孙友刚，等. 基于能量法的磁浮车辆-桥梁耦合动力学建模与振动特性[J/OL]. 交通运输工程学报, 1-25.

收稿日期： 2026 年 05 月 24 日.

基金项目： 国家自然科学基金面上项目（12472020）.

作者简介： 王美琪(1988－)，男，河北唐山人，教授，博士，主要从事车辆动力学、悬浮控制算法的研究；通信方式：E-mail:wangmeiqi@stdu.edu.cn、联系电话：13223435755.

文章编号：484-098

超高速磁浮牵引系统调制技术研究

张旭[1]，胡俊雄[1]，王非凡[2]，费毅昂[2]，马卫华[1,2]

（1.西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心，四川省 成都 610031；

2.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都 610031）

1 引言

超高速磁悬浮交通是实现地面交通时速 600 km/h 及以上目标的重要技术路线，其直线牵引系统需在宽速度范围内输出高电压、大功率、高频率的三相电压电流。受限于开关器件的热裕度与电磁兼容约束，牵引变流器的开关频率无法随基波频率同比提升，传统载波移相 SPWM（CPS-SPWM）等多电平调制策略在超高速区段面临电流品质急剧恶化、牵引力波动增大等瓶颈。本文针对采用 H 桥级联拓扑的超高速直线牵引系统，提出一种低开关频率的阶梯波调制策略。该策略通过优化各 H 桥单元的电平组合与导通时序，使每个开关器件在单个基波周期内仅完成一次开或关动作，在大幅降低开关损耗的同时，利用级联多电平结构的自然谐波抵消特性，将输出电压总谐波畸变率（THD）抑制在允许范围内。理论分析与仿真结果表明，在基波频率超过 300Hz 的超高速运行工况下，所提策略可将 THD 降低至传统 PWM 方案的 50%以下，系统效率显著提升，且控制逻辑简单、易于数字化实现。该研究为超高速磁浮牵引变流器的高可靠性、高效率运行提供了一种有效的调制技术途径。

2 仿真结果

8 模块 H 桥级联系统（每个模块电压 1000V）在调制度连续变化时仿真结果如图 1 所示，验证了阶梯波调制的有效性。

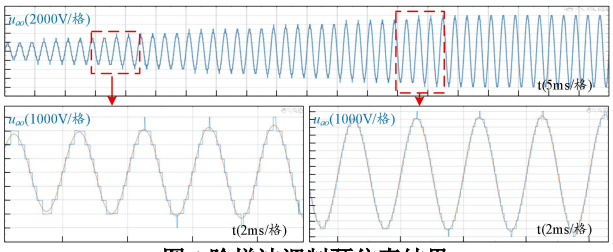


图 1 阶梯波调制预仿真结果

3 结　论

本文针对超高速磁浮直线牵引系统基波频率高、开关损耗受限的技术瓶颈，提出了一种基于 H 桥级联拓扑的阶梯波调制策略。

（1）所提阶梯波调制策略通过优化各级联 H 桥单元的导通角与电平组合，实现了每个开关器件在单个基波周期内仅动作一次，显著缓解了超高速区段变流器的散热压力，为提升牵引系统功率密度与运行可靠性提供了关键支撑。

（2）利用级联多电平结构的自然谐波抵消特性，结合导通角的优化设计，所提策略在大幅降低开关频率的同时，将输出电压 THD 控制在工程允许范围内，有效抑制了牵引力脉动与铁耗，满足超高速磁浮对牵引品质的要求。

本文工作主要基于理论分析与仿真验证，后续研究将围绕以下方面展开：一是开展大功率 H 桥级联样机的实验验证，评估阶梯波调制在实际工况下的温升与动态响应特性；二是研究阶梯波与低速区段 PWM 策略的平滑切换方法，实现全速度范围调制策略的统一与优化；三是结合超高速磁浮列车的牵引控制需求，进一步探索阶梯波调制与矢量控制、直接转矩控制等电机控制策略的协同设计，为下一代超高速磁浮牵引系统的工程化应用奠定理论与技术基础。

参考文献（References）：

[1] 牟瀚林，徐绪宝，张敏，等．低真空管道超高速磁浮交通发展思考［J］．铁道工程学报，2026，43（02）：37-41.

[2] 许泽昊，李子欣，孙柏岩，等．面向马赫级超高速电磁推进的交流励磁变频驱动系统特性分析［J］．电工电能新技术，2025，44（12）：1-10.

[3] 李印川，李海涛，毕海权，等．超高速真空管道磁浮交通重大科技基础设施建设管理［J］．实验技术与管理，2025，42（11）：264-270..2025.11.033.

[4] 张卫华，邓自刚，毕海权，等．低真空超高速轨道交通研究进展与思考［J］．机车电传动，2025，(01)：1-13.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家重点研发计划（2024YFB4303202）；国家自然科学基金面上项目（52572460）.

作者简介：张旭(1990－)，男，辽宁省大石桥市，副研究员，博士，主要从事大功率电力电子、直线牵引的研究；通信方式：lnyk_zhangxu@swjtu.edu.cn

文章编号：484-099

支撑工况超导电动悬浮列车辅助轮参数优化

朱韬宁[1]，马光同[2]，冯丕极[1]，苏振华[2]，罗俊[1]，宋明彦[1]

（1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031；2. 西南交通大学 电气工程学院，四川省 成都市 610031）

1 引 言

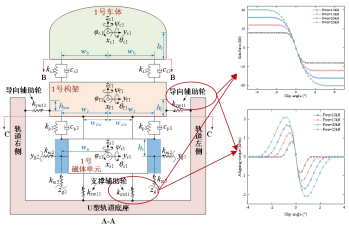
超导电动悬浮列车的动力学特性研究是评估整车运行平稳性与服役安全性的可靠手段之一,为确保列车运行安全与稳定，深入开展此项研究尤为必要[1]。辅助轮作为确保超导电动悬浮列车低速安全运行的关键部件，其直接安装于构架处，实现列车低速支撑工况下的支撑和导向功能。因此，针对辅助轮的动力学参数进行优化是改善列车低速运行平稳性的关键。

本文首先采用 Fiala 轮胎模型模拟超导电动悬浮列车橡胶辅助轮的力学特性；随后通过多目标粒子群优化智能优化算法（MOPSO）对辅助轮导向和支撑刚度进行了优化，提高超导电动悬浮列车支撑工况下的动力学性能。

2 正 文

2.1 考虑辅助轮的列车动力学模型

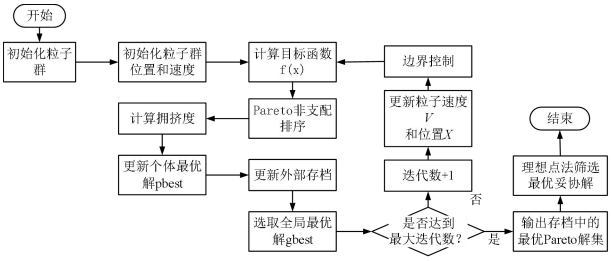
本文构建了考虑辅助轮的“双模式”悬浮架动力学模型，并在此基础上建立了 66 自由度超导电动悬浮列车数值动力学模型，如图 1 所示。模型利用 Fiala 轮胎模型作为辅助支撑轮的动力学模型，以模拟低速状态下的支撑力，从而能够分析支撑运行工况下的列车振动性能。



1 考虑辅助轮的 66 自由度列车动力学模型

2.2 基于多目标粒子群算法的辅助轮参数优化

由动力学分析可知，辅助导向轮和支撑轮的刚度将直接影响列车低速支撑工况下的动力学性能。因此，本节采用多目标粒子群优化算法[2]对辅助轮刚度进行优化，优化算法流程如图 2 所示。分别选择铰接式转向架和非铰接式转向架的横向和垂向均方根值和峰值作为优化目标使其最小化，分别以其对应的辅助轮刚度作为优化变量。



2 超导电动悬浮列车模型示意图

3 结 论

本文基于 Fiala 轮胎模型建立了考虑辅助轮的“双模式”超导电动悬浮列车动力学模型，分析了其支撑工况下的动力学特性。随后采用多目标粒子群算法以转向架加速度峰值与均方根值为目标，优化了辅助导向轮以及支撑轮的支撑刚度，为超导电动悬浮列车的工程化设计提供了理论支撑。

参考文献（References）：

[1] 王艺宇,胡道宇,吕民东,等.阻尼线圈电流控制相序对超导电动悬浮系统振动抑制效果研究[J].中国电机工程学报,2025,45(22):9016-9029.

[2] CARLOS A. COELLO C, MAXIMINO S L. MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimization[C].//IEEE International Conference on Fuzzy Systems.2002:1051-1056.

收稿日期： 2026 年 05 月 25 日.

基金项目： 国家重点研发计划(2024YFF0508001)；国家自然科学基金(52425702, 52577070).

作者简介： 朱韬宁(2001－)，男，湖南省邵阳市，博士研究生，主要从事超导电动悬浮动力学的研究；

通信方式：2022201554@my.swjtu.edu.cn

文章编号：484-100

超导 EDS 系统动态稳定性与运动安全边界研究

熊相波[1]，赵春发[1]
（1.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031）

1 引言

本文通过将场-路-运动耦合模型与李雅普诺夫指数及运动安全边界相结合，提出了一套分析方法用于评估超导电动悬浮（EDS）系统的动态运行稳定性与安全性。采用二分搜索法分别确定了单个转向架在横-垂运动平面内的稳定域、悬浮失效域和安全域，并进一步探讨了列车运行速度和主动电磁阻尼对安全域的影响，为列车运行状态评估和安全防护设计提供理论指导。

2 悬浮失效条件下系统运动安全边界

当转向架横向-侧滚位移过大或运行速度过低会导致系统产生的电磁悬浮力不再足以支撑车辆重量，即系统发生悬浮失效。不同运行速度下系统的悬浮失效边界及悬浮力时程曲线如图 1 所示。

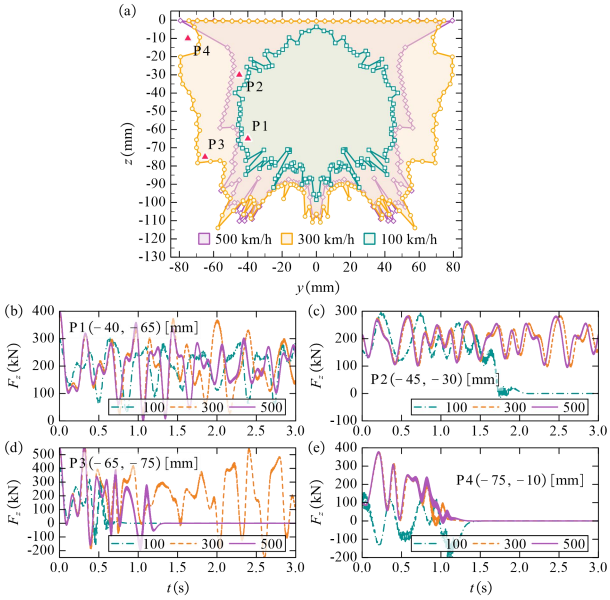


图 1 不同运行速度下系统悬浮失效边界及悬浮力时程曲线

3 轨道空间约束下系统运动安全边界

由轨道不平顺或气动载荷引起的剧烈扰动可能使车辆运动轨迹超出轨道空间边界而引发撞轨。不同运行速度下系统的运动安全边界如图 2 所示。

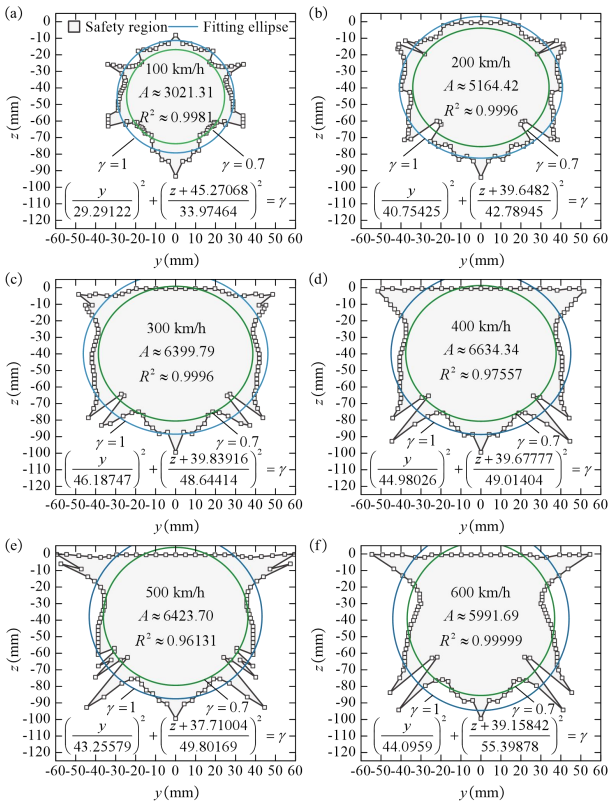


图 2 不同运行速度下系统运动安全边界及其拟合函数

4 结 论

EDS 系统在所探索的初始状态空间域内表现出非渐进稳定性，且安全域面积随列车运行速度提高呈现先增大后减小趋势，这表明列车在中高速区间内运行更加安全。此外，引入主动电磁阻尼能够有效提高全速域内列车的运行安全性与平稳性。

参考文献（References）：

[1]Lee H W, Kim K C, Lee J. Review of maglev train technologies[J]. IEEE transactions on magnetics, 2006, 42(7): 1917-1925.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFF0508000）；国家自然科学基金项目(52172375).

作者简介：熊相波(1998)，男，江西宜春，在读博士，硕士学位，主要从事超导电动磁浮理论及应用的研究；
通信方式：xb_xiong17@126.com

文章编号： 484-101

永磁电磁混合悬浮平台设计与解耦控制研究

罗涛 [2,3]，杨杰 [1,3]，周发助 [2,3]

(1. 上海电机学院 电气学院，上海 201306；2.江西理工大学 电气工程与自动化学院，江西 赣州 341000；3. 江西理工大学 磁浮轨道交通装备江西省重点实验室，江西 赣州 341000)

1 引 言

磁悬浮技术具有无接触、无摩擦、低磨损、寿命长等优点，在轨道交通、精密装备、航空航天和智能物流等领域应用前景广阔。传统电磁悬浮能主动调节但能耗高、易发热，纯永磁悬浮低功耗但悬浮力难以调节，抗扰能力不足。为兼顾低能耗与主动控制，本文设计四点永磁电磁混合悬浮平台，采用 Halbach 永磁阵列提供基础悬浮力，电磁执行单元进行动态调节，并结合姿态解耦与 IDESO-NFTSMC 控制算法，提高系统悬浮精度、抗扰能力和稳定性[1]。

2 系统方案与关键设计

2.1 永磁电磁混合悬浮结构设计

所设计的悬浮平台采用四点并联式结构，四个悬浮点对称布置于刚性转向架底部，每个悬浮点由永磁 Halbach 阵列和电磁铁共同组成。永磁阵列主要提供基础悬浮力，电磁铁通过调节线圈电流产生主动控制力，从而兼顾低能耗、高承载和动态调节能力。针对四点悬浮间隙相互耦合的问题，基于刚体垂向平动、俯仰转动和侧倾转动特性，建立四点位移与三自由度姿态之间的映射关系，将复杂的多点耦合控制转化为垂向、俯仰、侧倾三个姿态通道的解耦控制问题。

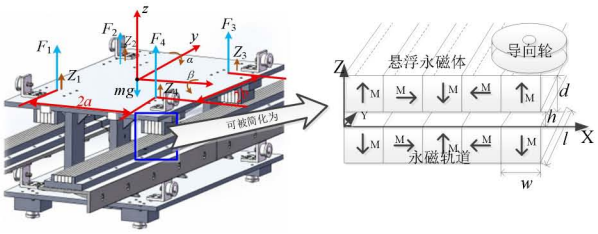
2.2 三自由度姿态解耦

四点悬浮系统的关键在于多悬浮点之间存在强耦合。由于悬浮平台可近似为刚体，四个悬浮点位移由质心垂向位移、俯仰角和侧倾角共同决定。本文基于刚体几何关系，建立四点位移与三自由度姿态变量的转换关系，将四路间隙控制转化为垂向、俯仰和侧倾三个姿态通道控制。同时，根据三自由度控制量与四个电磁铁电流的对应关系，采用最小范数分配方法合理分配线圈电流，避免控制冗余和局部电流过大，提高系统控制效率[2]。

2.3 复合抗扰控制算法

针对永磁电磁混合悬浮系统非线性强、参数不确定及外部扰动复杂等问题，本文设计 IDESO-NFTSMC 复合抗扰控制算法。改进扩张状态观测器用于实时估计系统状态和总扰动，并将扰动补偿引入控制律，以减小滑模抖振；非奇异快速终端滑模控制器提高误差收敛速度和稳态精度。同时采用“间隙外环+电流内环”双环控制结构，兼顾姿态控制精度与电流响应速度，提升系统稳定悬浮能力。

1 四点永磁电磁混合悬浮系统结构示意图



3 结 论

本文围绕四点永磁电磁混合悬浮系统开展研究，设计了由 Halbach 永磁阵列与电磁执行单元组成的并联式悬浮平台，并完成控制器、斩波器、传感采集和上位机监测系统搭建。针对四点位移耦合及外部扰动问题，建立了四点位移到垂向、俯仰、侧倾三自由度的解耦关系，并引入 IDESO-NFTSMC 控制算法，提高了系统的抗扰能力、收敛速度和悬浮稳定性，为多点磁悬浮平台的工程应用提供了可行方案。

参考文献 (References)：

[1] Yang S, Yang J, Zhou F Z. Adaptive Linear Active Disturbance Rejection Cooperative Control of Multi-Point Hybrid Suspension System[J]. Actuators,2025,Vol.14(7): 312.

[2] Zhou F Z, Yang J, Hu H L, et al. Study of repulsive permanent magnetic levitation mechanism and its dynamic characteristics[J]. Scientific Reports,2024,Vol.14(1): 29859.

收稿日期： 2026 年 05 月 25 日.

基金项目： 江西省研究生创新专项资金项目（YC2024-B217）；国家重点研发计划（2024YFB4303201-5）.

作者简介： 罗涛(2001－)，男，江西赣州人，在读硕士研究生，主要从事滑模控制技术、磁悬浮控制技术的研究；通信方式：E-mail:jxlgdx_lt@163.com、联系电话:18370885575.

文章编号：484-102

磁浮车桥耦合系统典型柔性特征建模与稳定性研究

李海涛[1,2]，张文跃[2]，陈琛[1]，林国斌[1]

(1.同济大学 磁浮交通工程技术研究中心，上海 201804；2.中车株洲电力机车有限公司 磁浮系统研究所，湖南 株洲 412001)

1 引言

为降低磁浮交通系统建设成本，有必要开展轻量化桥梁结构参数研究。然而，桥梁刚度、跨长、线密度及模态频率等参数会直接影响车辆悬浮适应性与车桥耦合稳定性。因此，需从系统匹配角度优化桥梁结构参数，在降低成本与保障运行稳定性之间取得平衡[1,2]。

2 耦合系统振动模型及稳定性分析

2.1 多自由度车辆-柔性轨道等效动力学模型

本文采用等效单悬浮架模型对整车进行降阶处理。选取位于桥梁跨中位置的单悬浮架建立考虑悬浮模块柔性特征的精细化动力学模型，并在闭环控制条件下获得其实际悬浮力输出特性。在此基础上，将该单悬浮架产生的悬浮力作为代表性作用力，结合桥梁一阶模态振型函数，对其在桥梁不同位置上的作用进行模态映射，从而构造与原多悬浮架分布作用在一阶模态空间内等效的广义力输入。通过保持桥梁模态广义力的一致性，在动力学上等效表征整车多悬浮架对桥梁的耦合作用。模型降阶处理后耦合系统仅保留单悬浮架自由度与桥梁低阶模态广义坐标，便于后续参数分析与稳定性判定。

对于桥梁而言，在低频整体响应分析中，一阶弯曲模态由桥梁主导。因此，在桥梁低频响应分析中，将桥梁轨道结构合理近似为由桥梁弯曲刚度主导的简支单梁体系。

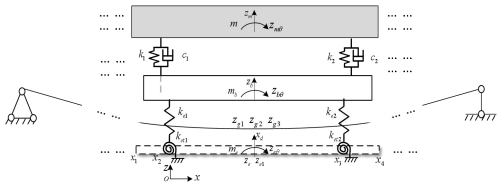


图 1 简化等效动力学模型

基于拉格朗日方法，定义涵盖车体、悬浮架、电磁铁刚体运动及柔性模态、桥梁柔性模态的广义坐标系，通过构建系统的总动能、总势能及耗散能函数，推导包含分布参数特性的广义电磁力表达形式，建立矩阵形式的刚柔耦合多点悬浮系统运动微分方程：

$$[m]\{\ddot{z}\}+[c]\{\dot{z}\}+[k]\{z\}=\{F_z\} \qquad (1)$$

在平衡状态时将耦合系统中非线性的电磁力及电压方程线性化处理。结合式（1），可得到系统状态空间方程及其雅可比矩阵。

2.2 考虑典型柔性特征的车-桥耦合状态稳定性分析

选取桥梁抗弯刚度 EI、跨长 L作为主要分析变量，分析桥梁结构参数对耦合系统稳定性的影响规律。以典型钢梁线密度 1.5 t/m 进行分析，当桥梁刚度过低时，削弱了悬浮控制系统的等效刚度并降低系统阻尼水平，耦合系统易发散。随着 EI 的增大，桥梁稳定性呈增强趋势，但当桥梁一阶主导模态的阻尼固有频率逐渐接近电磁铁平动频率（即线性化悬浮控制系统在平衡点处的特征频率，对应图中粉色虚线）时，出现局部稳定性下降现象，表明二者频率接近是导致系统稳定裕度降低的重要原因。比较不同跨长条件可以发现，跨长越小时，桥梁一阶稳定性受 EI 影响更大，因此在保证结构强度与刚度要求的前提下，适当增加桥梁跨长有利于提高车－桥耦合系统的稳定性。

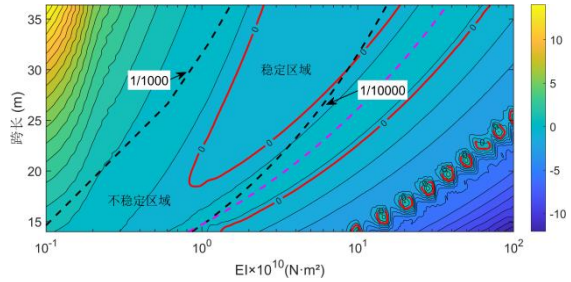


图 2 不同 L与 EI下桥梁一阶模态对应特征根变化规律

3 结 论

从车桥耦合稳定性角度看，磁浮钢梁参数并非单纯追求低频或高刚度，而是应在足够竖向刚度的基础上实现模态频率避让和耦合能量输入抑制，在此基础上适当增加跨长有利于扩大耦合系统的稳定范围。

参考文献 (References)：

[1] CHEN Chen, XU Jun-qi, LU Yang, et al.Experimental study on vertical vehicle-rail-bridge coupling of medium and low speed maglev train based on track beam with different stiffness[J].Journal of Vibration and Control,2023,29(17-18):4129－4142.

[2] 周丹峰,朱鹏翔,屈鸣鹤,等.桥梁参数对磁浮系统车－桥耦合稳定性的影响[J].西南交通大学学报,2025,60(04):823-832.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：湖南省科技创新计划项目（2018TP1035，2024JK2038）

作者简介：李海涛(1994－)，男，湖南常德，工程师，硕士，主要从事磁浮车辆悬浮控制及车轨耦合研究；通信方式：E-mail:haitao_li_012968@163.com 联系电话 18811442268

文章编号：484–103

大湾区广深港线高温超导磁浮交通运控系统设计

洛启[1]， 周燕[1]， 刘奥[1]， 杨顺[1]，李真[1]

（1.中车长春轨道客车股份有限公司，长春，130062)

摘 要：以粤港澳大湾区为预选址潜在目标城市群，针对大湾区广深港线的线路条件、站型拓扑、牵引系统分区配置等信息，搭建起大湾区超导磁浮运行控制系统（以下简称运控系统）整体架构和设计具体方案，并给出中央、分区、车载运控系统的配置。研究成果可以为大湾区广深港线高温超导高速磁浮交通系统建设提供技术支撑，同时也为其他磁浮交通系统相关人员提供技术参考。

关键词： 磁悬浮；高温超导；运控系统；大湾区广深港线

Design scheme for high-temperature superconducting maglev transportation control system on the Guangzhou Shenzhen Hong Kong Line in the Greater Bay Area

LUO Qi[1]， *ZHOU Yan*[1]， *LIU Ao*[1]， *YANG Shun*[1]， *LI Zhen*[1]

（1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co.，LTD，Changchun 130062，China）

Abstract: Taking the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as the potential target city cluster of pre-selected sites, the overall architecture and design of the superconducting magnetic levitation operation and control system (hereinafter referred to as the operation and control system) in the Greater Bay Area are built for the information of the line conditions, station topology, and the configuration of the traction system zones of the Guangdong-Shenzhen-Hong Kong Line of the Greater Bay Area, and the configurations of the centralized, zoned, and on-vehicle operation and control systems are also given. The research results can provide technical support for the construction of the high-temperature superconducting high-speed magnetic levitation transportation system of the Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong line in the Greater Bay Area, as well as technical references for other magnetic levitation transportation system related personnel.

Key words: maglev; high-temperature superconducting; ocs; guangzhou shenzhen hong kong line

收稿日期： 2025 年 05 月 25 日

基金项目： “十四五”科技重大专项（2021CCZ002-2）

第一作者：洛启(1989—),男,高级工程师,研究方向为运行控制与通信技术,sd2114829@163.com

通信作者：杨顺(1998—),男,电气技术工程师,研究方向为运行控制与通信技术,E-mail:yangshun0802@163.com

1 设计背景

目前高速磁悬浮列车技术的发展主要集中在常导电磁悬浮、低温超导电动悬浮以及高温超导电动悬浮技术领域。我国与德国合作修建的上海常导高速磁悬浮示范线于 2006 年正式投入运营[1,2]，我国中车四方股份公司牵头的多家合作单位，在速度为 600 km/h 的常导高速磁浮交通系统关键技术课题方面取得了阶段性成果[3]；日本 L0 系列低温超导电动悬浮车辆试验运行达到了 603 公里/小时，利用超导电动悬浮技术的中央新干线磁悬浮项目已经于 2014 年开工，东京至名古屋以及名古屋至大阪两段分别计划于 2027 和 2045 年运营[4][5]。近几年，国内外有多家单位开展高温超导磁浮技术的研究和试验工作，国内单位例如西南交大[6,7,8]、航天科工[9]、中车长客等[10]。中国中车长春轨道有限公司自主研制的国内首套高温超导电动悬浮全要素试验系统 2023 年 3 月底完成首次悬浮运行[11]，公司并与多家合作单位在高温超导磁浮交通系统的研发设计方面开展了一系列工作，其中以粤港澳大湾区为预选址背景，针对大湾区广深港线（广州-深圳-香港）进行了线路和车站的选址与设计、牵引系统等的设计，本文在此基础之上进一步研究磁浮交通运控系统设计方案。

2 设计背景

粤港澳大湾区广深港线的设计线路如图 1 所示，通过高速磁浮铁路连接广州主城区、东莞中心城区、深圳福田中心城区，对加强广州与深圳核心城市间中心城区间的基础设施的互联互通以及加速广深港之间人流、物流、资金流、信息流的流动具有重要意义。

图 1 大湾区广深港线近期的线路拓扑

Fig.1 The recent line topology of the Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong line in the Greater Bay Area

大湾区广深港线的工况及运营场景设计为近期 3 站 2 区间 1 车辆段、远期 4 站 3 区间 1 个车辆段；初期 9 列车、近期 14 列车、远期 17 列车。下面主要以近期的工况和运营场景，设计大湾区广深港线的运行控制系统。

2.1 线路轨道工况

大湾区广深港线近期的线路由广州东站、东莞站以及深圳站三个车站、站间的两个区间以及一个深圳香蜜湖车辆段组成。道岔系统采用整体水平横移式多关节梁轨道导向道岔，运行控制系统与道岔系统接口以及控制逻辑与中低速磁浮的水平横移道岔相似，道岔转换时间为 30s。

2.2 车辆系统工况

2.2.1 车辆的配置及参数

大湾区广深港线的运营场景为初期9列车、近期14列车、远期17列车。具体的车辆配置以及参数如下。

（1）列车数量：初期9列，近期14列，远期17列。

（2）8编组，长202.75m；头车32t中间车23t；定员：400席。

（3）列车运行采用全自动驾驶方式。

（4）车站设置专门的旅客接驳通道。

（5）最高运行速度：650km/h。

（6）加速度：0-100km/h平均加速度≥1.5 m/s²；0-300km/h平均加速度≥1.1 m/s²；

0-650km/h平均加速度≥0.7 m/s²。

（7）减速度：650-0km/h 平均减速度≥1.0m/s²；紧急制动减速度：≥1.5m/s²。

2.2.2 车辆的可能风险及处置方案

（1）起落架无法放下，将会导致车辆依靠滑橇紧急拖行。

（2）车辆控制系统突然断电，车辆可能失控，需要立即采取电制动停车，并利用备用电源控制起落架落下，同时施加液压紧急制动。

（3）超导磁体由超导线圈、冷体结构、真空腔等组成，车辆设置制冷机维持其低温运行状态。超导磁体内部设置有温度传感器、真空度传感器、磁场传感器，当真空度或磁场强度反馈至低于预期范围时，车辆将紧急制动，释放起落架。

2.3 测速定位系统工况

大湾区广深港线的高温超导磁浮列车为地面定位方式，采用编码电缆定位测速，编码电缆包含绝对位置检测的编码电缆和相对位置检测的编码电缆。

在线路的某些点上，铺设绝对位置编码电缆。列车通过此位置时，获得列车的绝对位置。

全线铺设相对位置检测编码电缆。对列车经过的线路上的长定子齿槽进行计数，从而确定列车的相对于绝对点的相对位置、运行方向和速度。

地面为两套冗余编码电缆，车辆载波发生器为单端双套冗余结构。

3 运控系统设计原则

运行控制系统设计，首先要遵循“故障-安全”原则，实现大湾区广深港线高温超导磁浮列车的“运行指挥+安全防护”功能。

（1）基于中车长客自主研制的高温超导磁浮列车的技术特点开展运控系统方案的设计工作；

（2）充分借鉴日本低温超导及德国常导磁浮列车运控系统设计的经验，在此基础上，给出适合长客高温超导磁浮列车的运控系统设计方案；

（3）针对大湾区广深港线路条件及运营场景设计运控系统；

（4）涉及安全的运控子系统，在高可靠的基础上，均按照故障-安全的原则进行设计，不涉及安全的子系统均采用高可靠的冗余设计。

4 运控系统总体架构设计

针对高温超导磁浮列车的技术特点，充分借鉴日本低温超导磁浮及德国常导磁浮列车运行控制系统的设计理念，根据大湾区高温超导高速磁浮线的工况及场景，运行控制（简称运控）系统为三层结构：

一是位于控制中心的中央运行控制子系统；

二是位于牵引变电站或道岔房，与牵引分区对应的分区运控子系统；

三是位于列车上的车载运控子系统。

中央运控与分区运控子系统之间的数据传输通过轨旁光纤网实现，分区运控与车载运控子系统之间的数据传输通过车地无线通信系统实现，系统总体架构如图2f所示。

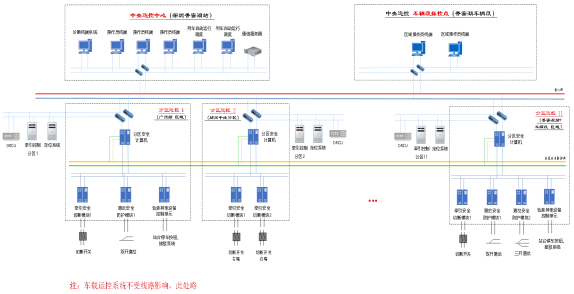


图2 大湾区高温超导磁浮列车运控系统总体架构

Fig. 2 Overall Architecture of the Operation and Control System for High-Temperature Superconducting Maglev Trains in the Greater Bay Area

中央运行控制系统主要包括操作员终端、自动运行、维护与诊断终端等子系统。

分区运行控制系统主要包括分区安全防护、分区牵引切断、分区道岔测控等子系统。

车载运行控制系统主要包括车载安全防护、操作控制台、紧急停车按钮等部件。

根据大湾区广深港线近期的运营场景：3站2区间1车辆段以及9个道岔的线路条件；牵引供电系统分11个牵引分区；9列车。运控系统设计如下：

（1）设置1个中央运控子系统，其主体布置在深圳香蜜湖站；另外，为方便车辆段内磁浮列车的调车作业，在香蜜湖车辆段分布式设置2个操作员终端；

（2）设置11个分区运控子系统，分区运控子系统的控制范围与牵引分区的划分保持一致；

（3）设置9套车载运控子系统。

5 运控系统子系统设计

5.1 中央运行控制子系统

中央运控系统（CCS，Centralized Control System）负责全线磁浮列车运行的自动调度和人工调度管理与监控，同时也是与其它子系统间信息交换处理的中心。

中央运控系统通常位于控制中心。主要包括操作员终端系统、列车自动运行调度系统、中央诊断终端系统等。

在大湾区广深线全线设置1个中央运控子系统，且中央运控子系统采用冗余配置，考虑未来线路会扩展到香港站，中央运控系统设置在深圳香蜜湖站，另外，在香蜜湖车辆段设置2个区域操作员终端。中央运控系统的结构图如图3所示。

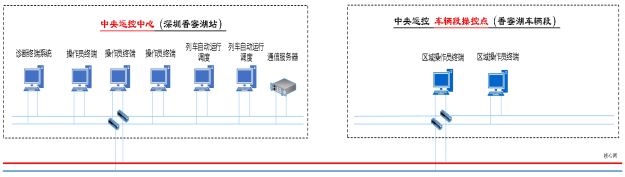


图 3 中央运控系统总体架构

Fig. 3 Overall Architecture of Centralized Operation and Control System

中央运控系统主要功能如下：

（1）中央运控系统设置在深圳香蜜湖站，香蜜湖站的中央运控系统架构是完整的，配置3个完全冗余的操作员终端、1套热备冗余的列车自动运行调度系统、1套中央诊断终端系统，实现广深港线全线（含车辆段）的运行指挥功能，具体如下：

1）操作功能：处理列车时刻表或人工指令，通过终端系统发出磁浮列车的运行指令，控制磁浮列车按照设定的运行计划运行，以实现中央控制系统对整个线路磁浮列车运行的控制功能。

2）显示功能：显示整个磁浮系统线路及列车运

行的状态，能够显示磁浮列车当前的运行速度和位置信息等。

3）列车自动运行调度系统功能：自动或人工方式完成磁浮列车的运行计划、列车的调度、进路预置、道岔控制等功能，并对运行数据进行记录。注：该自动运行功能，不包含车辆段内的调车功能。

4）中央诊断终端系统功能：汇总并显示运行控制系统各功能组件的在线诊断信息，能够快速确定故障部件的位置和主要故障原因。

（2）为了方便磁浮列车在车辆段内调车作业，在香蜜湖车辆段设置2个完全冗余的区域操作员终端，即香蜜湖车辆段的区域操作员终端，其操作命令有效范围约束在车辆段区域内，实现车辆段内调车作业的运行指挥功能，具体如下：

1）操作功能：处理人工指令，通过终端系统发出磁浮列车在车辆段内的调车作业的运行指令。

2）显示功能：显示整个磁浮系统线路及列车运行的状态，能够显示磁浮列车当前运行速度和位置信息等。

5.2 分区运行控制子系统

分区控制系统（DCS，Decentralized Control System）是整个超导磁浮交通运控系统的中枢，对磁浮列车运行起到至关重要的安全防护作用，同时分区控制系统还是中央控制系统和车载运行控制系统的联系通道。

分区运控系统主要由分区安全计算机（DSC，Decentralized Safety Computer）、分区牵引切断模块（DPS，Decentralized Propulsion Shut-off）、分区道岔模块（DSM，Decentralized Switch Module）等设备组成。分区运行控制系统的功能包括：检查和转发中央控制系统控制命令、控制命令分解与执行、控制轨道、控制列车、控制牵引系统、轨道防护、列车防护、牵引切断、速度曲线监控、安全定位、诊断等功能。

图 4 为典型全功能分区运行控制系统结构（单分区运控子系统）。

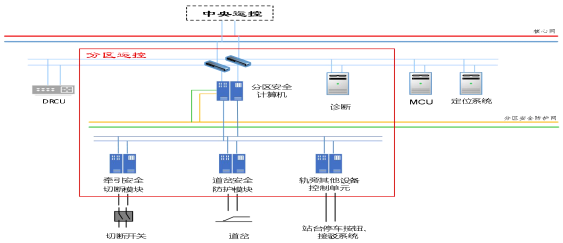


图 4 典型全功能分区运行控制系统结构

Fig.4 Typical Full-Function Zone Operation Control System Architecture

分区运行控制系统组成及功能如下：

（1）分区安全计算机（DSC）

分区安全计算机负责对每个分区操作的控制。它涉及到的操作部件有车辆、轨道和牵引系统。分区安全计算机根据操作员的手工设置或列车自动运行功能的设置为相关部件确定参考值。分区安全计算机的主要功能有控制列车操作、检查和发送中央控制系统（CCS）的报文、控制列车（包括列车运行模式管理）、控制牵引系统、控制轨道和管理系统状态等。

分区安全计算机的安全防护功能是分区运控系统的核心功能。它的主要任务是对分区控制系统所属区域内的列车和进路进行防护，其中进路防护包括牵引切断功能和道岔防护功能。分区安全计算机的具有轨道防护、列车管理与防护、驾驶控制和牵引切断防护等功能，并把系统的状态实时地发回到中央控制中心。

（2）分区牵引切断模块（DPS）

分区牵引切断模块是对牵引系统进行安全监控与防护的关键部件，它负责在牵引系统发生故障或在某些运行条件下安全地切断列车的牵引供电。在磁浮列车运行过程中，如果分区安全计算机无法正确控制牵引控制系统切断牵引供电，则负责安全切断的分区牵引切断计算机将发挥作用，将牵引供电系统的电力供应切断，确保磁浮列车能够通过必要措施实现安全控制。

（3）分区道岔模块（DSM）

分区道岔模块负责对道岔的安全控制和防护。包括道岔工作模式管理、道岔的锁闭、解锁、转换、位置确认和动力电的安全切断。

（4）轨旁其他设备控制单元

实现接驳系统、屏蔽门、车站紧急停车按钮等设备的控制与防护。

基于该典型分区运控系统，针对大湾区工况（3 个车站及 1 个车辆段，共 9 个道岔，每个车站设置了 1 个牵引分区，站间区间的每个干线轨道分为 2 个牵引分区），大湾区广深线全线设置 11 个分区运控系统。

由于每个牵引分区的工况不同，控制对象的种类与数量不同，下面在运控系统总体方案以及典型全功能分区运控架构的基础上，给出大湾区高温超导磁浮列车运控系统设计方案。

根据大湾区的工况，牵引分区分为两个大类：

其一，站间干线分区，没有道岔，双端供电；

其二，车站类分区，有道岔及接驳系统，单端供电。

因此， 给出如下两大类共 11 个分区运控系统的设计方案。

5.2.1 站间干线类的分区运控系统方案

由大湾区线路拓扑及牵引供电分区的划分可知，为了适应磁浮列车高速运营需求，广州站-东莞站间、东莞站-深圳站间干线，干线分区的技术特征如下：

（1）线路特征：直轨道，无岔；

（2）广州东-东莞之间，东莞-深圳之间，上下行均被分成两个分区；

（3）牵引供电特征：每个牵引分区均为高功率双端供电。

以分区 2 为例进行分区运控系统设计，包含一个分区安全计算机 DSC 和 2 个分区牵引切断模块 DPS，无 DSM。分区运控系统架构如图 5 所示。

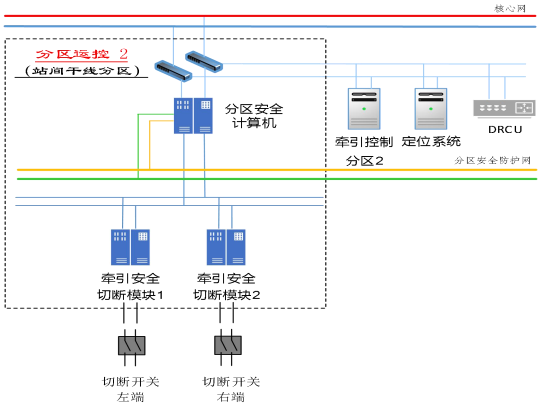


图 5 分区 2 运控系统架构

Fig.5 Zone 2 Operation Control System Architecture

5.2.2 广州东站分区（分区 1）运控系统方案

分区 1 的线路特征如下：

（1）线路特征：部分直轨道、一个双开道岔；

（2）牵引供电特征：一个牵引分区，中功率单端供电；

根据分区 1 的线路特征和牵引供电特征，分区 1 的运控系统设计，包含一个分区安全计算机 DSC，1 个分区牵引安全切断模块 DPS，1 个道岔控制模块 DSM。分区运控系统构成如图 6 所示。

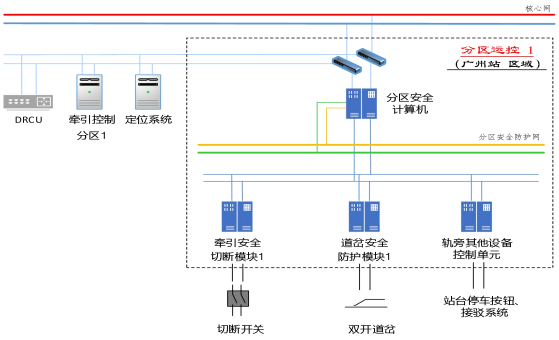


图 6 分区 1 运控系统架构

Fig.6 Zone 1 Operation Control System Architecture

5.2.3 东莞站分区（分区 6）运控系统方案

分区 6 的线路特征如下。

（1）线路特征：包含 4 个三开道岔，2 个双开道岔；

（2）牵引供电特征：一个牵引分区，中功率单端供电。

分区 6 的运控系统设计，包含一个分区安全计算机 DSC，1 个分区牵引安全切断模块 DPS，6 个道岔安全防护模块 DSM。分区运控系统构成如图 7 所示。

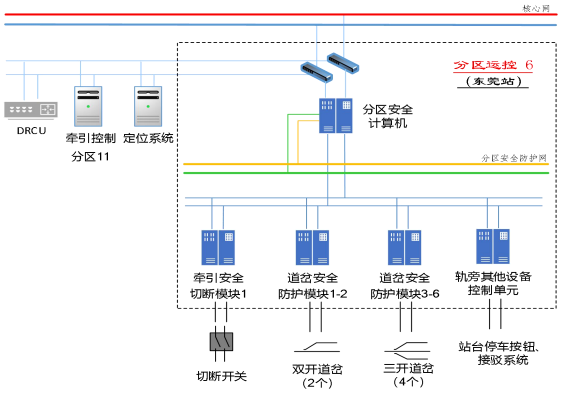


图 7 分区 6 运控系统架构

Fig.7 Zone 7 Operation Control System Architecture

5.2.4 香蜜湖分区（分区 11）运控系统方案

分区 11 的线路特征如下：

（1）线路特征： 包含 1 个双开道岔，1 个三开道岔；

（2）牵引供电特征：一个牵引分区，中功率单端供电。

分区 11 的运控系统设计，包含一个分区安全计算机 DSC，1 个分区牵引安全切断模块 DPS，2 个道岔安全防护模块 DSM。分区 11 的运控系统结构图如图 8 所示。

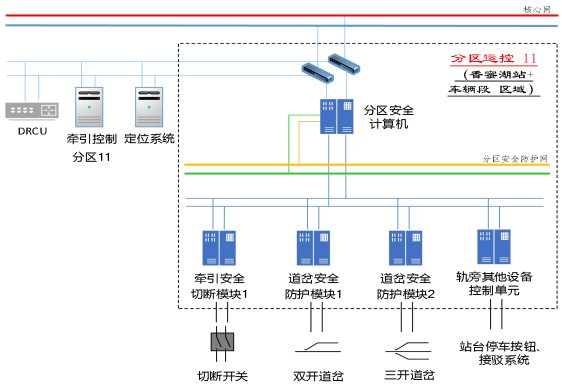


图 8 分区 11 运控系统架构

Fig.8 Zone 11 Operation Control System Architecture

5.3 车载运行控制子系统配置方案

大湾区广深高温超导磁浮列车系统初期配置 9 列车，相应地，配 9 套车载运控子系统（VCS，Vehicle Control System）。车载运控系统位于列车的两个端车上，每列车包含两套车载安全计算机 VSC1 和 VSC2，实现列车防护、速度曲线监控、安全制动、车辆控制等功能。车载运行控制系统如图 9 所示。

图 9 车载运控子系统

Fig.9 Onboard Operation Control Subsystem

车载运行控制子系统组成及功能如下：

（1）车载安全计算机（VSC，Vehicle Safety Computer）执行列车启动和停止的监控、速度曲线监控、运行方向监控、车门的监控、强制停车管理、运行模式变更、列车起落架的收起/落下、 制动、车载控制设备的监控、车载运行控制系统诊断、与分区运行控制子系统间无线通信的安全连接和数据交换等功能。

车载安全计算机实时计算列车运行的动态速度曲线，当发现当前速度超过限制速度时，将首先向分区运行控制系统申请切断牵引；分区运控系统切断逆变器输入端供电开关，同时指挥牵引系统实施最大电制动，车载运行控制系统实施最大的空气动力制动，当速度降低到 200km/h 后起落架开始放下，待起落架完全放下后，实施轮盘制动，并使列车停到指定停车点。当出现超导体失超且起落架无法正常着陆的极端工况时，车载安全计算机发出切断牵引供电，启动最大电制动、空气动力制动命令，同时实施滑橇制动。

（2）辅助控制面板

辅助控制面板可以配合完成列车运行模式的转换、起落架的收起/落下等功能。

6 运控系统各个子系统设计方案

高温超导磁浮列车是一种新型交通工具，与高铁相比其运行控制系统架构复杂度高，运营场景特殊，本文针对大湾区广深港线的线路条件、站型拓扑、牵引系统分区配置等信息，完成了大湾区超导磁浮运行控制系统设计。研究成果可以为大湾区广深港线高温超导高速磁浮交通系统建设提供参考。

参考文献:

[1] 上海常导高速磁浮 http://www.smtdc.com/cn.

[2] 吴祥明. 高速磁浮上海示范线的建设[J]. 综合运输，2003，25（8）： 38-39,48.

[3] 中国中车. 青岛高速磁浮交通系统[EB/OL]. [2021-11-25]. https： //www.crrcgc.cc/sj/g16998/s30989/t323860.aspx.

[4] 关于日本中央新干线磁悬浮项目 https://www.sohu.com/a/748927026_121080087.

[5] 日本低温超导 https://company.jr-central.co.jp/company/linear-chuo-shinkansen/plan.html.

[6] 付垚. 高温超导磁悬浮车/轨/桥耦合系统垂向振动特性研究[D]. 四川:西南交通大学,2022.

[7] 龚天勇,马光同,罗俊,等. 行波磁场中高温超导电动悬浮磁体的热性能研究[J]. 中国电机工程学报,2023,43(1):415-424,中插 35. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.220245.

[8] 吉宇昂,池茂儒,吴兴文. 基于车桥耦合模型的高温超导磁浮车辆悬浮架结构对比分析[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(7):2431-2442. DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20221431.

[9] 马琳,郑勇,金成日. 超高速磁悬浮列车闭塞分区设计与优化模型[J]. 北京交通大学学报,2022,46(5):131-141. DOI:10.11860/j.issn. 1673-0291. 20210095.

[10] 李重阳,高畅,武玉新. 不同绕组结构的高温超导变压器漏磁场分析[J]. 低温与超导,2018,46(8):34-38. DOI:10.16711/j.1001-7100.2018.08.007.

[11] 中车长客高温超导 https://www.crrcgc.cc/ckgf/g7651/s26937/t340428.aspx.

文章编号：484–104

大湾区广深港线高温超导磁浮交通通信系统设计

杨顺[1]， 洛启[1]， 马玉彬[1]， 孙振超[1]，陈彦宏[1]

（1. 中车长春轨道客车股份有限公司，长春，130062）

摘要：以粤港澳大湾区为预选址潜在目标城市群，针对大湾区广深港线的线路条件、站型拓扑、牵引系统分区配置等信息，搭建大湾区超导磁浮车地通信系统整体架构和设计具体方案，并给出中央、分区、车载通信子系统的配置。研究成果可以为大湾区广深港线高温超导高速磁浮交通系统建设提供技术支撑，同时也为其他磁浮交通系统相关人员提供技术参考。

关键词：磁悬浮；高温超导；通信系统；大湾区广深港线

Design of High-Temperature Superconducting Magnetic Levitation Transportation Communication System for the Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong Line in the Greater Bay Area

YANG Shun[1]， *LUO Qi*[1]， *MA Yubin*[1]， *SUN Zhenchao*[1]， *CHEN Yanhong*[1]

（1.CRRC Changchun Railway Vehicles Co.，LTD，Changchun 130062，China）

Abstract: Taking Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area as the potential target city cluster of pre-selected sites, the overall architecture of superconducting magnetic levitation vehicle-ground communication system in the Greater Bay Area is constructed and designed with specific solutions for the line conditions, station topology, and traction system zoning configuration of the Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong Line in the Greater Bay Area, and the configuration of centralized, zoning, and vehicle-mounted communication subsystems is also given. The research results can provide technical support for the construction of the high-temperature superconducting high-speed magnetic levitation transportation system of the Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong line in the Greater Bay Area, as well as technical references for other magnetic levitation transportation system related personnel.

Key words: Maglev; High-temperature Superconducting; Vehicle-to-Ground Communication System; Guangzhou Shenzhen HongKong Line

收稿日期： 2006 年 05 月 25 日

基金项目：“十四五”科技重大专项（2021CCZ002-2）

第一作者：杨顺(1998—),男,电气技术工程师,研究方向为运行控制与通信技术,E-mail:yangshun0802@163.com

通信作者：杨顺(1998—),男,电气技术工程师,研究方向为运行控制与通信技术,E-mail:yangshun0802@163.com

1. 设计背景

现阶段高速磁悬浮列车技术的发展主要集中在常导电磁悬浮、低温超导电动悬浮以及高温超导电动悬浮技术领域。在常导方面，上海常导高速磁悬浮示范线已经商业运营了十几年，我国中车四方股份公司在常导磁浮交通技术方面也取得了阶段性结果[1][2]。在超导方面，日本L0系列低温超导电动悬浮车辆试验运行达到了603公里/小时[3]，国内也有多家单位开展高温超导磁浮技术的研究和试验工作[4][5][6]，中国中车长春轨道有限公司自主研制的国内首套高温超导电动悬浮全要素试验系统2023年3月底完成首次悬浮运行[7]，公司并与多家合作单位在高温超导磁浮交通系统的研发设计方面开展了一系列工作，其中以粤港澳大湾区为预选址背景，针对大湾区广深港线（广州-深圳-香港）进行了线路和车站的选址与设计、牵引系统、运控系统等设计，本文在此基础之上进一步研究磁浮交通通信系统设计方案。

高速磁浮系统中，高速磁浮列车以其极高的运行速度和对安全性的严格要求，使得车地之间的实时、可靠通信成为系统正常运作的基础。目前主流的车地无线通信技术主要有GSM-R、LTE和5G-R[8][9][10]，但对高速磁浮交通系统的适用性还需要更多的测试以及时间的检验。本文以LTE-H技术为例，给出大湾区广深港线的通信系统设计方案。

2. 高温超导高速磁浮交通系统工况

粤港澳大湾区广深港线的设计线路如图1所示，通过高速磁浮铁路连接广州主城区、东莞中心城区、深圳福田中心城区，对加强广州与深圳核心城市间中心城区间的基础设施的互联互通以及加速广深港之间人流、物流、资金流、信息流的流动具有重要意义。

图1　大湾区广深港线近期的线路拓扑

Fig.1　The recent line topology of the Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong line in the Greater Bay Area

大湾区广深港线的工况及运营场景：近期 3 站 2 区间 1 车辆段、远期 4 站 3 区间 1 个车辆段；初期 9 列、近期 14 列、远期 17 列车。下面主要以近期的工况和运营场景，设计大湾区广深港线的车地通信系统。

2.1 线路轨道工况

大湾区广深港线近期的线路由广州东站、东莞站以及深圳站三个车站、站间的两个区间以及一个深圳香蜜湖车辆段组成。

2.2 车辆系统工况

大湾区广深港线的运营场景为初期 9 列车、近期 14 列车、远期 17 列车。具体的车辆配置以及参数如下。

（1）列车数量：初期 9 列，近期 14 列，远期 17 列。

（2）8 编组，长 202.75m；头车 32t 中间车 23t；定员：400 席。

（3）列车运行采用全自动驾驶方式。

（4）车站设置专门的旅客接驳通道。

（5）最高运行速度：650km/h。

（6）加速度：0-100km/h平均加速度≥1.5 m/s²；0-300km/h平均加速度≥1.1 m/s²；

0-650km/h平均加速度≥0.7 m/s²。

（7）650-0km/h 平均减速度≥1.0m/s²；紧急制动减速度：≥1.5m/s²。

2.3 测速定位系统工况

大湾区广深港线的高温超导磁浮列车为地面定位方式，采用编码电缆定位测速。编码电缆包含绝对位置检测的编码电缆和相对位置检测的编码电缆。

在线路的某些点上，铺设绝对位置编码电缆。列车通过此位置时，获得列车的绝对位置。

全线铺设相对位置检测编码电缆。对列车经过的线路上的长定子齿槽进行计数，从而确定列车的相对于绝对点的相对位置、运行方向和速度。

地面为两套冗余编码电缆，车辆载波发生器为单端双套冗余结构。

2.4 运行控制系统工况

大湾区广深港线的高温超导磁浮交通的运控系统采用三层结构设计。

一是位于控制中心的中央运行控制子系统；

二是位于牵引变电站或道岔房，与牵引分区对应的分区运控子系统；

三是位于列车上的车载运控子系统。

中央运控与分区运控之间数据传输通过轨旁光纤网实现，分区运控与车载运控之间的数据传输通过车地无线通信系统实现。

根据大湾区广深港线的线路条件：近期 3 站 2 区间 1 车辆段，共 9 个道岔；牵引供电系统分 11 个牵引分区；初期 9 列车的运营场景，运控系统架构如下：

（1）设置 1 个中央运控子系统，其主体布置在深圳香蜜湖站；另外，为方便车辆段内磁浮列车的调车作业，在香蜜湖车辆段设置 2 个操作员终端。

（2）设置 11 个分区运控子系统。

（3）设置 9 套车载运控子系统

3. 车地通信系统业务需求分析

车地无线通信系统是列车与地面进行信息交换的桥梁。在高速运行状态下，车辆与地面间通过车地无线通信系统进行双向实时数据传输。列车和地面间传递的信息包括运行控制系统数据、诊断数据、语音信息和旅客信息等，并预留定位数据传输。

为实现磁浮列车安全高速运行，车地通信系统必须顺利畅通、透明，具有很高的可靠性和可用性。

与德国的常导高速磁浮不同，高温超导磁浮列车系统的实时定位信息由地面轨旁的感应环线产生，因此，高温超导磁浮列车的车地无线通信系统的最为关键的服务对象是运行控制系统。此外，车载运行控制系统、车辆控制系统、车载诊断系统、视频监控系统等等与地面中央控制系统、分区控制系统、地面调试系统间也是通过车地通信系统来传输信息的。

车地无线通信系统的服务对象如下:

（1）运行控制系统

车地无线通信系统在分区运控子系统与车载运控子系统间传递列车的定位数据，并为两个子系统共同实现高速磁浮列车的运行指挥与协同安全防护提供冗余通信通道，在特殊情况下，为中央操作员实现远程操控列车提供冗余的无线通道。

（2）牵引系统

高温超导磁浮列车的定位数据在地面生成，目前的牵引系统对车地无线通信系统没有需求。为了给高温超导磁浮列车系统局部功能架构优化提供支撑，预留定位信息源在车上、车地无线通信系统要为牵引系统实时传递车辆的定位数据的需求。

（3）车辆系统

为支撑高温超导磁浮列车的车辆系统的研制及后期智能维护，大量车辆系统状态需要监测，有些重要的数据需要实时检测，车地无线通信系统需要为车辆系统提供数据通道。

（4）运营系统

为支撑高温超导磁浮列车的商业运营，需要为旅客提供信息，车地无线通信系统需要为运营系统提供数据通道。

4. 车地通信系统的总体架构设计方案

基于高温超导磁浮列车系统的技术特点，针对大湾区线的实际工况以及运行控制等相关业务系统的配置情况，以及为了适应预留的车载定位模式，本文拟采用基于LTE-R改造的车地通信系统LTE-H，满足同步直线牵引对车地通信的实时性要求。

针对高温超导磁浮列车的技术特点，根据大湾区高温超导高速磁浮交通线路的工况及运营场景，车地无线通信系统采用三层结构：

一是位于控制中心的中央通信子系统；

二是位于牵引变电站的分区通信子系统；

三是位于列车上的车载通信子系统。

高温超导高速磁浮交通的车地通信系统采用A、B双网设计，A、B双网相互物理独立，并行工作。

大湾区广深港线的高温超导磁浮交通系统，由于大部分线路为隧道，因此，全程采用漏缆，道岔等个别地点用基站天线补充。车地通信系统由控制中心子系统CRCU+网管OMC、分区无线控制子系统DRCU+地面无线基站RBS+漏缆/轨旁天线、车载无线控制子系统MRCU+车载天线三部分组成。

根据大湾区广深港线的线路条件：近期3站2区间1车辆段、11个分区运控系统、9列车的运营场景，车地通信系统设计如下：

（1）设置1个中央通信子系统，布置在深圳香蜜湖站；

（2）设置11个分区车地通信子系统，主体设备布置在轨旁变电站，天线或漏缆及其附属部件沿线布置；

（3）设置9套车载车地通信子系统，布置在列车的两端。

5. 车地通信系统的各子系统设计方案

5.1 中央控制中心无线子系统配置方案

控制中心无线子系统是整个无线网络关键部分，设置于控制中心，完成无线传输数据的汇聚与分发，与其它各业务子系统互联，负责移动性管理、业务

数据的统一交换控制和传送，为它们提供可靠的数据通信服务，同时其还负责整个网络的管理与维护。

控制中心无线子系统设备，包括CRCU和OMC。核心网CRCU通过骨干网实现运控系统和其它系统业务的互通。

中央无线电控制单元CRCU负责无线系统移动性管理、业务数据的统一交换控制和传送。网管OMC实现配置管理、故障管理、性能管理等操作维护功能，可以支持多个远程终端的连接，并通过通信时钟系统获取标准时间。

核心网子系统分为核心骨干网A网和B网。核心网主要用于地面各控制系统之间的状态信息、控制命令及诊断信息等的传输，包括中央运行控制系统与分区运行控制系统之间、中央控制系统与分区无线电控制单元之间等。

在大湾区广深线全线设置1个中央通信子系统，采用冗余配置，设置2个独立的CRCU和2个独立的OMC。大湾区广深线的中央通信子系统的结构如图2所示，该中央通信子系统设置在深圳香蜜湖站的控制中心。

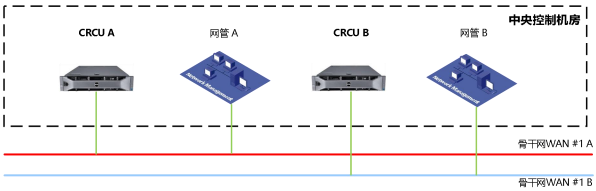


图2　中央通信子系统总体架构

Fig.2　Overall Architecture of the Central Communication Subsystem

5.2 分区无线通信子系统配置方案

分区无线通信子系统包括DRCU、RBS、合路器、漏缆或天线。

DRCU为基带处理单元，实现无线资源管理、无线承载控制、无线接纳控制、连接移动性控制、空口安全等功能。为分区安全计算机提供数据传输接口。车站、停车场等区域设置DRCU设备，DRCU与CRCU之间通过骨干网提供的以太网通道连接。

RBS提供无线传输链路，完成基带信号与射频信号之间的转换。分布式基站的射频单元RBS可沿轨道区间和车辆段部署。RBS通过光纤链路远程与DRCU连接，一个DRCU可以管理和连接多个RBS。A、B网信号通过合路器馈入，沿线路轨道采用漏缆或天线作为传输介质，向外界辐射或者从外界接收电磁波。

5.2.1 站间分区的车地通信子系统配置方案

由大湾区线路拓扑及牵引供电分区的划分可知，为了适应磁浮列车高速运营需求，广州站-东莞站间、东莞站-深圳站间干线，分为2，3，4，5，7，8，9，10分区，这几个分区的线路拓扑没有道岔，干线分区的技术特征如下。

（1）线路特征：直轨道，没有移动的轨道道岔；

（2）广州东-东莞间，东莞-深圳间，上下行均被分成两个分区；

分区2与分区3的长度相同，约30公里；分区4与分区5的长度相同，约17公里；分区7与分区8的长度相同，约27公里；分区9与分区10的长度相同，约30公里。由LTE-H车地无线通信系统的技术特征可知，每个RBS可以覆盖左右各1公里漏缆；每个DRCU可以管理12个RBS，超过24公里长的分区，需要DRCU级联。上述几个站间分区通信子系统架构设计方案相似，只是不同长度分区的DRCU及RBS数量不同，需要分别设计。

下面仅以分区2为例，给出干线分区车地通信子系统设计方案，如图3所示。

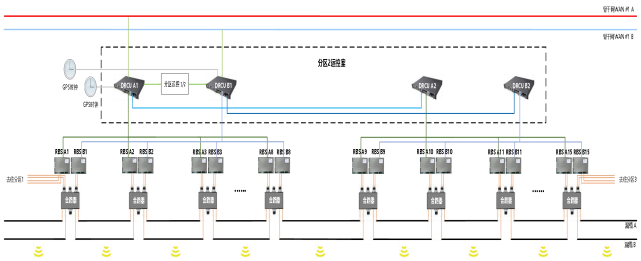


图3　分区2的车地无线通信子系统架构

Fig.3　The architecture of the on-board and ground wireless communication subsystem in Zone 2

5.2.2 广州东站分区无线通信系统配置方案

广州东站分区为分区1，部分直轨道、一个双开道岔，总长度不足1千米。

根据分区1的线路特征。分区1车地无线通信子系统的架构如图4所示，道岔区域用基站天线覆盖，天线设置在道岔的岔尖区域，其它区域用漏缆覆盖。

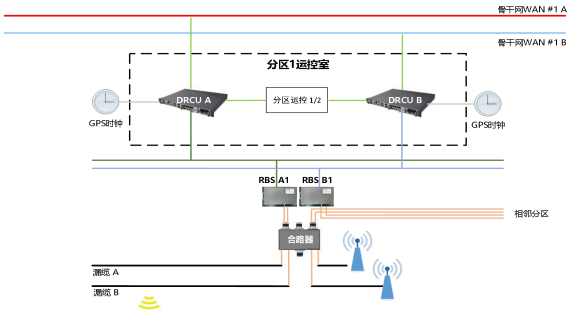


图4　分区1的车地无线通信子系统架构

Fig.4　The architecture of the on-board and ground wireless communication subsystem in Zone 1

5.2.3 东莞站分区无线通信子系统配置方案

东莞站分区为分区6，部分直轨道、2个双开道岔、4三开道岔，总长度不足1千米。

根据分区6的线路特征，分区车地通信子系统的架构如图5所示，道岔区域用基站天线覆盖，天线设置在岔尖区域，其它区域用漏缆覆盖。

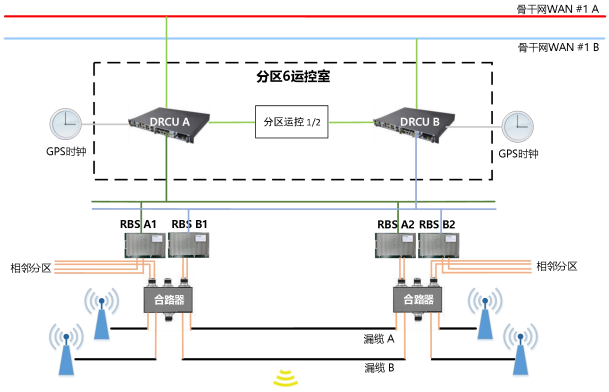


图5　分区6的车地无线通信子系统架构

Fig.5　The architecture of the on-board and ground wireless communication subsystem in Zone 6

5.2.4 香蜜湖分区无线通信子系统配置方案

香蜜湖分区覆盖深圳站及车辆段，部分直轨道、1个双开道岔、1个三开道岔，总长度约4千米。

根据分区11的线路特征，分区车地通信子系统的架构如图6所示，道岔区域用基站天线覆盖，天线设置在岔尖区域，其它区域用漏缆覆盖。

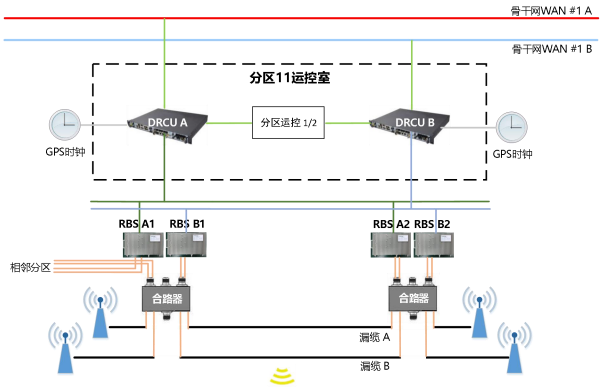


图6　分区11的车地无线通信子系统架构

Fig.6　The architecture of the on-board and ground wireless communication subsystem in Zone 11

5.3 车载无线控制子系统配置方案

在列车的车头和车尾，分别设置LTE-H的车载设备，包括MRCU和天线等。如图7所示，车头和车尾各安装2台MRCU，1台接入A网，1台接入B网。

大湾区广深高温超导磁浮线初期配置9列车，相应地，配9套车载通信子系统。

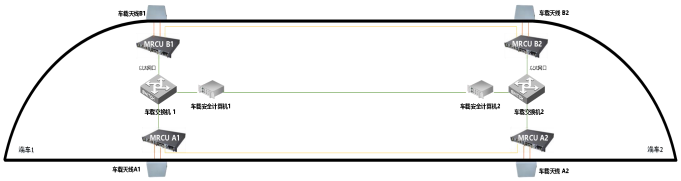


图7　车载车地通信子系统

Fig.7　Onboard Train-Ground Communication Subsystem

6. 结束语

高温超导磁浮列车是一种新型交通工具，其运行速度远超传统的铁路，运营场景特殊，本文针对大湾区广深港线的线路条件、站型拓扑、运控系统分区配置等信息，完成了大湾区超导磁浮车地通信系统设计。研究成果可以为大湾区广深港线高温超导高速磁浮交通系统建设提供参考。

参考文献:

[1] 吴祥明.高速磁浮上海示范线的建设[J]. 综合运输,2003,25(8): 38-39,48.

[2] 中国中车.青岛高速磁浮交通系统 https://www.crrcgc.cc/sj/g16998/s30989/t323860.aspx.

[3] 日本低温超导 https://company.jr-central.co.jp/company/linear-chuo-shinkansen/plan.html

[4] 胡啸,邓自刚,张银龙等.真空管道磁浮交通管内波系时空分布特征.空气动力学学报,2022(6):146-154.

[5] 李文龙,刘文旭,方进,刘延超.基于 Maxwell 的高温超导 EMS 型悬浮电磁铁仿真分析与优化[J].低温与超导,2020,0(2):25-29.

[6] 于青松,李凯,胡浩等. 超导电动悬浮应用研究与技术展望[J]. 2023(4):1-8

[7] 中车长客高温超导 https://www.crrcgc.cc/ckgf/g7651/s26937/t340428.aspx

[8] 田园,梁轶群,蒋韵等.铁路 GSM-R 系统高速适应性测试及分析[J]. 铁道标准设计,2024(1):185-191.

[9] 王皓.基于 LTE-M 的下一代列控数据通信系统设计与可用性评估[J].都市快轨交通,2023(1): 156-167.

[10] 毛磊,翟浩杰,尹尚国.5G 在轨道交通行业的应用探讨[J].移动通信, 2020(1):63-70.

文章编号：484-105

磁滞效应对中低速磁浮悬浮系统振动影响研究

曹毅[1]，马卫华[1]，张敏[1]，马亚群[1]

(1.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031)

1 引言

EMS 速磁浮列车悬浮系统电流由载荷决定的直流分量与动态交流分量叠加而成[1]，使铁磁材料产生显著的“局部动态磁滞”现象。现有中低速磁浮动力学模型大多忽略电磁铁的磁滞非线性特性，导致对悬浮间隙、悬浮加速度及车桥振动等关键指标的预测精度不足，尤其在较大扰动下偏差更明显。为此，本文引入磁滞效应，建立考虑动态磁滞的车桥耦合动力学模型，系统分析磁滞对悬浮及振动特性的影响。

2 车轨耦合动力学模型建立

2.1 磁滞建模

基于 J-A 模型，建立描述悬浮电磁铁磁化材料的磁滞特性的方程：

$$\frac{dM}{dH}=\frac{(1-c)(M_{an}-M)+c\delta k\dfrac{dM_{an}}{dH}}{k\delta-\alpha(1-c)(M_{an}-M)} \qquad (1)$$

本文采用文献中辨识的 Q235 材料的 J-A 磁滞参数[2]，取 Ms=1.5743×106 A/m, α=7.09×10-4，a=499 A/m，c=0.0198，k=1154.6 A/m。

得考虑磁滞的悬浮力表达式：

$$F=\frac{N^2\mu_{rc}{}^2A_c{}^2\mu_0A_pi^2}{\left(2\mu_{rc}A_c\delta+A_pl_c\right)^2} \qquad (2)$$

2.2 车桥耦合建模

车体和悬浮模块均具有 6 个自由度，防侧滚梁相对左右悬浮模块具有绕 Z 轴旋转的自由度，移动滑台相对车体具有沿 Y 轴横移自由度，牵引杆相对悬浮模块具有绕 Y、Z 轴的点头和摇头自由度，各部件的自由度如图 1 所示。

3 结果分析

分析结果如图 2 所示，引入磁滞效应显著增大了悬浮加速度的振荡幅度。在 20 km/h 的车速下，引入磁滞效应的悬浮加速度范围为[-6.18, 4.12] m/s²，而未考虑磁滞效应的模型仿真结果范围为[-0.7, 0.69] m/s²；在 100 km/h 的车速下，引入磁滞效应的悬浮加速度范围为[-18.81, 10.21] m/s²，而未考虑磁滞效应的模型仿真结果范围为[-9.28, 8.95] m/s²。

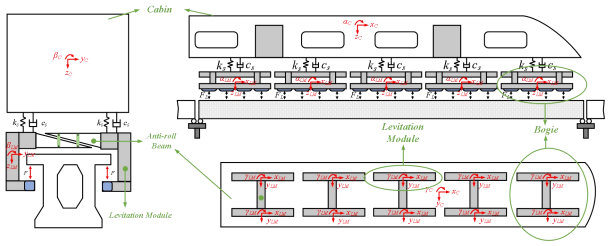
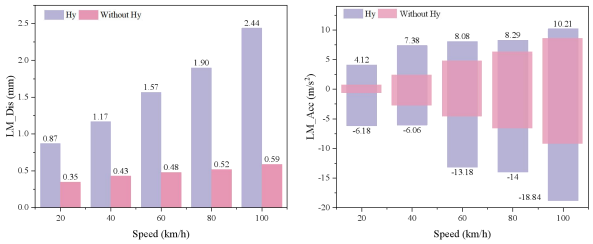


图 1 车辆系统动力学模型的拓扑关系



（a）悬浮间隙　　（b）悬浮加速度

图 2 不同运行速度下考虑磁滞与不考虑磁滞对悬浮间隙与加速度对比

4 结　论

在 100km/h 速度范围内，考虑磁滞效应时的模型中悬浮间隙和悬浮加速度的振荡幅值明显高于忽略磁滞时的模型，随着运行速度提升，悬浮间隙差异逐渐扩大，而悬浮加速度差异逐渐缩小。

参考文献（References）：

[1] Liu Qinghui, Li Miao, Ma, Weihua, et al. Mechanism of hysteresis effect in levitation electromagnet under large gap fluctuation and its influence on dynamic performance[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2025, 613.

[2] Jiles D C，Atherton D L. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Applied Physics，1984，55(6)：2115-2120.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家重点研发计划，2024YFB4303202.国家自然科学基金青年科学基金项目（52102442）.

作者简介：第 1 作者(1996－)，男，山东日照，博士研究生，主要从事车辆系统动力学研究；

通信方式：E-mail:17864303052@163.com、联系电话：17864303052

文章编号：484-106

超导电动悬浮列车垂向动力学特性研究

宋明彦[1]，马光同[2]，苏振华[2]，冯丕极[1]，朱韬宁[1]，罗俊[1]

（1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031；2. 西南交通大学 电气工程学院，四川省 成都市 610031）

1 引　言

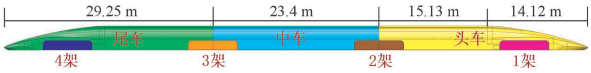
为确保列车运行安全与稳定，开展超导电动悬浮列车垂向动力学特性研究尤为必要[1]。针对时速600 km条件下超导电动悬浮列车非线性气动效应显著增强并严重干扰垂向悬浮稳定性的问题，本文旨在探明非定常气动升力与列车垂向动态行为间的复杂耦合机制。

本文构建了三节编组超导电动悬浮列车流固耦合仿真模型，通过多项式拟合非定常气动升力，并与搭建的22自由度垂向多体动力学模型进行耦合，揭示了高速工况下气动激扰对多部件动态响应的作用机理，为超导悬浮列车的动力学设计与安全运行提供了理论支撑。

2 正　文

2.1 列车气动特性参数化分析

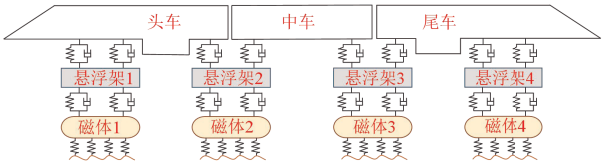
本研究构建了三节编组超导电动悬浮列车流体力学仿真模型，如图1所示。针对600 km时速下的复杂气动效应，本研究基于StarCCM+建立了以悬浮间隙为核心变量的参数化分析流程，通过URANS方法求解三维可压缩纳维-斯托克斯方程，精准捕捉列车周围的流场变化。同时采用高阶多项式对不同悬浮间隙下的非定常气动升力进行快速高效拟合，为动力学模型提供了可靠的载荷输入。



1 三节编组超导电动悬浮列车仿真模型侧视图

2.2 整车垂向多体动力学建模与动态响应分析

基于气动升力载荷的实时映射，本文构建了22自由度整车垂向多体动力学模型，模型结构如图2所示。整车动力学方程通过翟方法进行数值迭代求解[2]，在每一仿真步长内自动提取车体垂向位移并匹配对应的气动升力拟合值，实时更新激扰矩阵的载荷输入。同时，通过等效位移加载法引入轨道垂向随机不平顺，精确还原了高速运行工况下气流冲击与轨道激扰耦合对各级部件动态响应的作用机理，为揭示复杂气流冲击下整车系统的响应特征提供了理论支撑。



2 22自由度垂向动力学模型示意图

3 结　论

本文建立了22自由度超导电动悬浮列车垂向动力学模型，构建了基于流固耦合的气动载荷参数化映射框架，通过对比分析研究了非定常气动激扰对整车动态响应的影响规律。本研究揭示了高速运行下流固耦合诱发的动力学响应机理，为超导电动悬浮列车的悬挂参数匹配及气动减载设计提供了理论支撑。

参考文献（References）：

[1] 刘士苋,王磊,王路忠,等. 超导电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(4): 734-753.

[2] 翟婉明. 车辆-轨道垂向系统的统一模型及其耦合动力学原理[J]. 铁道学报, 1992, 14(3): 10-21.

收稿日期：2026年05月25日.

基金项目：国家杰出青年科学基金（52425702）.

作者简介：宋明彦(1999－)，男，吉林省延吉市，硕士研究生，主要从事超导电动悬浮动力学的研究；

通信方式：2024201638@my.swjtu.edu.cn

文章编号： 484-107

车载高温超导磁体研制与试验研究进展

胡浩[1]，李凯[1]，吴蔚[2]，刘洪涛[1]，邵晴[1]，王爱彬[1]，于淼[1]，于文晶[1]，刘航[1]，徐显昭[1]，李昊宸[1]，卢旭[1]，孙振超[1]，袁陈茗阳[1]，王新田[3]，蔚鑫[3]，胡子俊[3]，潘莹[3]，潘呈赟[2]

(1.中车长春轨道客车股份有限公司，吉林省 长春市 邮编：130000；2.上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海市 邮编：200240；3.上海轨道交通发展设备有限公司，上海市 邮编：200240)

1 引 言

车载超导磁体是保证超导电动磁浮列车实现悬浮和导向、牵引和制动功能的动力源，内部涉及高真空、超深冷、强磁场环境，且要承载车辆运行时的全部动静载荷，其性能的稳定性直接关系到车辆能否跑得快、浮的稳，是电动悬浮列车的关键核心系统. 采用第二代高温超导材料的车载超导磁体是未来的发展趋势.

2 正 文

2.1 关键技术攻关与试制资源建设

面向超导电动磁浮车载应用，攻克大磁动势低损耗无源闭环 REBCO 磁极、低漏热轻量化低温恒温器、超导磁体设计、制造及试验测试关键技术.

规划建设磁极、磁体自主研制场地，构建了超导磁体全流程制造资源并开发试验测试方法，已具备总装集成、动静态测试能力.

2.2 样机研制与试验验证进展

研制的 4 台高温超导磁体样机可全断电脱机运行 1h 以上且电磁性能无衰减，且磁动势在 430kA 时衰减速率低至 0.5%/天.已完成 100 余次动态运行试验，最大冲击加速度可达 7g，已稳定服役 3 年. 研制的全尺寸高温超导磁体通过满场励磁测试，并集成安装至超导电动磁浮试验样车.经测试，其在 40K 温区实现大于 750kA 持续运行能力，无外接励磁电源时，磁动势日衰减速率低至 0.288%/天，脱机运行时长可达 2h，正在开展动态服役性能测试.

1 车载高温超导磁体样机

表 1 车载高温超导样机关键参数

参数名称	缩比磁体样机	全尺寸磁体样机
长×宽×高/mm	1070×600×255	6000×870×305
服役温度/K	35~50	35~50
磁动势/kA	430	750
极距/mm	540	1500
磁动势/kA	430	750
磁动势衰减速率/%/天	0.5	0.288
重量/kg	500	2200

3 结 论

构建了全流程自主化研制与测试能力，通过缩比样机研制与试验测试，确立了面向电动悬浮应用的车载高温超导磁体技术路线.在此基础上，结合全尺寸超导电动磁浮试验样车开发需求，攻克核心部件设计与工程制备关键技术，自主研制全尺寸车载高温超导磁体，达成工程应用静态服役性能指标并装车验证.

参考文献（References）：

[1] 刘士苋，王磊，王路忠等. 电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述[J]. 西南交通大学学报,2023,58(4):734-753.

[2] Shao Q, Li K, Shao N, etal. Transient thermal analysis and experimental study of the closed-loop no-insulation HTS magnets of superconducting maglev[J]. IEEE Trans. Appl. Supercond, 2024, 34(5):1-5.

收稿日期： 2026 年 05 月 25 日.

基金项目： 国家重点研发计划(2024YFF0508000)； 上海市科委科技计划项目(25DZ3008300).

作者简介： 胡浩(1990－)，男，山东省菏泽市，高级工程师，硕士，主要从事车载高温超导磁体工程应用技术研究；通信方式：E-mail:hh5437@126.com、联系电话: 15764300099

文章编号：484-108

车体过电压对轴端速度传感器的影响机理

杜小龙 [1]
(1.西南交通大学 电气工程学院，四川省成都市 C10000)

1 引言

复杂的电磁环境使得要保证高速动车组正常、安全的运营变得更加困难[1]。列车在运行过程中频繁操作主断路器，如过分相、升降弓等过程，造成列车牵引传动系统电路中过电压的频繁出现[2]。CRH3 型动车组因为其速度传感器受到列车车体过电压的电磁干扰，针对动车组在运行过程中因速度传感器被干扰导致车门无法开启的故障，分析了速度传感器发生电磁干扰的原因，建立和验证了速度传感器的电磁耦合仿真模型，采用仿真模型研究了车体浪涌过电压幅值、信号传输电缆长度及屏蔽层串联电容对速度传感器电磁干扰的影响。

2 电磁干扰仿真分析

2.1 仿真模型构建

从“列车－接触网－牵引变电所”系统的角度出发，利用 PSCAD 软件建立等效电路模型。AT 所间距一般设计为 25~30km，将接触网按集总参数模型考虑，供电臂长度设置为 25km。

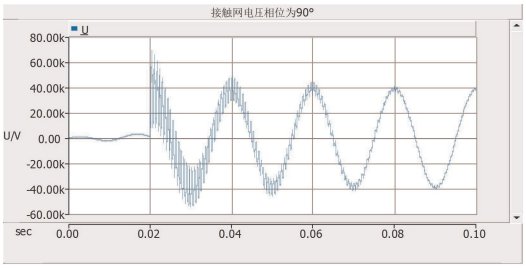


图 1 高压电缆过电压仿真波形图

通过分析波形可知，由于主断路器的动作，使得电路拓扑结构发生了变化，高压电缆与车顶的分布电容被瞬间充电，使得弓头电压在工频分量上叠加了高频振荡，导致列车主电路中电压峰值高于工频电压，由于线路中存在阻抗，高频振荡会在 1~2 个周期内衰减。从图 1 可以看出，当相位角位于 90° 时分开断路器，产生的过电压幅值最大，为 68.9kV。

3 结论

通过建立车－网－所电路仿真分析模型，分析列车主断路器动作瞬态高压电缆上过电压波形及传播特性，得出以下结论：

参考文献：

[1]朱峰, 牛大鹏, 徐常伟.CRH1 型动车车体磁场环境测试与分析[J].电力科学与技术学报,2012,27(02):42-46.

[2]张国芹,高国强.车体过电压对动车组轴端速度传感器的影响机理[J].城市轨道交通研究,2019,22(02):60-65.

收稿日期：2026 年 05 月 26 日.

作者简介：第 1 作者(2001－)，男，籍贯(四川省巴中市)，研究生，主要从事轨道交通电磁兼容的研究；通信方式：E-mail: duQmy.swjtu.edu.cn

文章编号：484-109

超导电动悬浮谐波磁场静态等效模拟

陈杨坤[1]，马光同[2]，崔李滨[1]，罗俊[1]，
(1.西南交通大学 轨道运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031；2.西南交通大学 电气工程学院，四川 成都 610031)

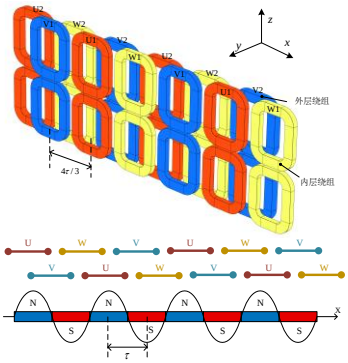
1 引言

超导电动悬浮运行产生的空间谐波易引发车载磁体失超，构建静态等效模拟平台对降低测试成本、保障系统安全具有重要意义。然而，现有单层绕组拓扑难以在静态下有效抑制非目标低阶谐波。为此，本文提出一种双层错位三相励磁绕组拓扑，并建立电枢磁场解析模型以实现特征谐波的高精度静态模拟。

2 正 文

2.1 双层错位励磁绕组拓扑及原理

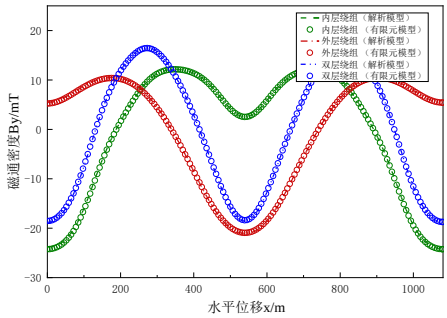
为在静态工况下高精度重构轨道特征空间谐波，本文提出一种双层错位三相励磁绕组拓扑。单个线圈采用与轨道零磁通线圈相同的上下对称“8”字形结构，其极距 τ 按 5 次目标空间谐波确定为 0.36 m。内、外两层绕组沿纵向错位 2τ，且均采用 U-W-V 相序排列。该配置核心利用了层间错位引发的物理干涉机制，对于基波等非目标奇次谐波，两层磁场反相相消；对于 2 次等偶次分量，磁场同相叠加增强。这种空间互补特性从源头上抑制了谐波畸变，突显了特征目标谐波，显著提升了气隙合成磁场的正弦度。



1 双层励磁绕组分布

2.2 电枢磁场三维解析建模及与仿真验证

本文采用空间矢量磁位法与双重傅里叶级数法，建立了双层绕组反应磁场的高精度解析模型。首先考虑线圈截面尺寸，将跑道形圆弧边电流离散并沿轴分解，表征出随周期分布的电流密度级数。随后将求解空间划分为上下空气域及线圈域，依据拉普拉斯与泊松方程，结合交界面处磁场连续边界条件，求解出目标区域的电枢磁场显式表达式。为验证模型正确性，在商用有限元软件中建立了 3-D 模型。对比表明，解析计算与仿真数据高度吻合。



2 电枢磁场法向分量对比

3 结 论

本文提出双层错位三相励磁绕组拓扑，并建立了高精度解析模型。3-D 有限元仿真与解析计算结果高度吻合。该拓扑利用层间错位干涉机制抑制了谐波畸变，成功实现了超导电动悬浮特征空间谐波的高精度静态模拟。

参考文献 (References)：

[1] 李婧，徐佳明，罗俊，等. 高温超导直线同步电机电磁力仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报，2024，4 4(11)：4513-4524.
[2] 冯慈璋，马西奎. 工程电磁场导论[M]. 高等教育出版社，2000.

收稿日期： 2026年05月26日.
基金项目： 国家杰出青年科学基金；（52425702）.
作者简介： 陈杨坤(2001－)，男，四川省成都市，硕士研究生，主要从事超导电动悬浮非接触供电的研究；
通信方式：chenyangkun@my.swjtu.edu.cn

文章编号： 484-110

基于改进 Huber 卡尔曼滤波的列车定位方法研究

江志坚[2,3]，杨杰[1,3]，刘书云[2,3]

(1. 上海电机学院 电气学院，上海 201306；2.江西理工大学 电气工程与自动化学院，江西 赣州 341000；3. 江西理工大学 磁浮轨道交通装备江西省重点实验室，江西 赣州 341000)

1 引 言

轨道交通智能化对列车定位的精度与鲁棒性要求持续提升，传统轨旁定位成本偏高、适用性不足，多源组合定位成为主流方式。实际运营中，多径干扰与设备故障易造成观测数据含非高斯噪声和粗差，导致经典卡尔曼滤波精度下降。常规 Huber 卡尔曼滤波阈值固定，难以匹配列车动态运行状态，抗干扰效果不佳。本文提出滑动窗口 MAD 自适应阈值的改进算法，动态调整阈值强化噪声粗差抑制效果，有效优化定位精度与运行稳定性，可为轨道列车高精度自主定位提供技术参考[1]。

2 系统方案与关键设计

2.1 磁浮列车运动模型构建

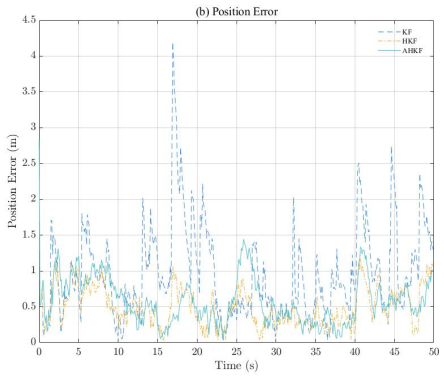
本文设计的测速定位是通过构建适配 SINS/BDS 惯导卫星组合定位的列车运动学模型。忽略影响较小的垂向运动，将其简化为二维平面质点运动模型，并完成系统方程的离散化处理，满足滤波迭代运算需求。采用 CA 匀加速模型表征列车运动状态，同时引入高斯白噪声模拟车体振动、轨道扰动等外部干扰。通过构建运动模型为后续数据融合与滤波算法的仿真验证提供支撑。

2.2 引入卡方检测抗差策略设计

在进行 Huber 算法前先采用新息卡方检测方法进行异常检测，实时判断观测量的污染程度，对超出检测门限的强污染观测直接剔除，滤波仅执行状态预测而不进行更新；对未超门限的观测则通过 Huber 方法重构伪观测以保留有效信息、抑制强噪声干扰，并将重构后的观测用于滤波更新，由此在连续非高斯强观测噪声场景下实现兼具精度与稳定性的鲁棒滤波优化[2]。

2.3 改进 Huber 算法

针对传统 Huber 算法采用固定阈值，难以适配动态变化的数据的问题，本文设计出一种基于滑动窗口的改进 Huber 算法，通过引入滑动窗口机制截取时序局部数据，计算窗口内数据的中位数绝对偏差 MAD，依据局部统计特征实时动态更新 Huber 阈值，让阈值可随数据波动自适应调整，有效提升算法对异常值的判别能力与整体鲁棒性。



1 改进 Huber 算法仿真对比图

3 结 论

本文针对磁浮列车组合定位易受噪声粗差干扰、常规滤波阈值固定适配性差的问题，建立适配全工况的二维匀加速运动模型，先通过新息卡方检测甄别异常观测，再利用滑动窗口 MAD 动态调整阈值改进 Huber 算法，构建自适应抗差卡尔曼滤波方法，有效抑制干扰、避免滤波发散，提升定位精度与稳定性，可为磁浮智能定位提供技术参考。

参考文献 (References)：

[1] Liu J H, Zhao X, Wu X Y, et al. Robust and stable H∞-maximum correlation entropy traceless Kalman filter UAV position estimation[J]. Geocarto International,2025,Vol.40(1): 2596968.

[2] 高敬东,李开龙,常路宾.基于 Huber 的改进鲁棒滤波算法[J].系统仿真学报,2014,26(08):1769-1774.

收稿日期： 2026 年 05 月 25 日.

基金项目： 江西省研究生创新专项资金项目（YC2024-B217）；国家重点研发计划（2024YFB4303201-5）.

作者简介： 江志坚(2002－)，男，江西九江人，在读硕士研究生，主要从事列车测速定位、组合导航的研究；通信方式：E-mail:2091748008@qq.com、联系电话:15179206142.

文章编号：484-111

中低速磁浮梁轨一体化箱梁车桥耦合振动分析

熊福强[1]；蔡陈之[1]；邹云峰[1]；邱冰[123]；周智辉[1]；毛旺[1]

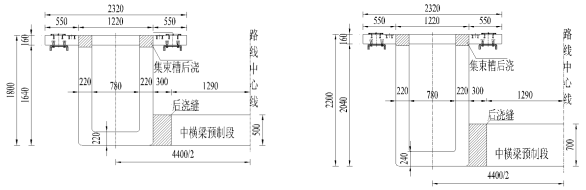
(1.中南大学 土木工程学院，湖南省 长沙市 410075；2.湖南省湖南省交通规划勘察设计院有限公司轨道磁浮院，湖南省 长沙市 410200；3. 湖南省轨道勘察设计有限公司 快速磁浮研究中心 湖南省 长沙市 410219)

1 引言

中低速磁浮列车利用电磁力实现悬浮，消除了轮轨摩擦，具有转弯半径小、爬坡能力强、噪声低、安全性高等优点[1]，因而在穿越城区、景区等环境敏感区域时具备独特的适用性。然而，高昂的建设成本始终是制约磁浮交通大规模商业化推广的关键瓶颈。既有中低速磁浮线路大多采用“轨道梁+轨排系统”的分离式结构[2]，存在建设成本高、截面尺寸大及施工繁琐等问题。为从根本上破解这一难题，本文提出一种梁轨一体化新型结构体系。该体系通过取消独立轨排、将轨道功能直接集成于梁体并进行截面轻量化设计，有望从源头大幅降低工程造价与结构复杂性。

为验证该结构能否满足运行要求，本文以挠跨比均为 L/3000 的 25m 和 30m 一体化简支箱梁为研究对象，开展车桥耦合振动计算，评估不同速度等级及空载和超员工况下梁轨一体化结构的行车安全性与乘坐舒适性。

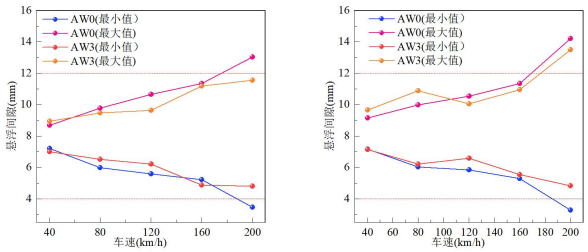
2 磁浮车桥耦合振动模型



a 25m 梁截面图　　b 30m 梁截面图

图 1 桥梁截面图

3 结果分析



a 25m 悬浮间隙最值　　b 30m 悬浮间隙最值

图 2 悬浮间隙最值

4 结论

本文计算了挠跨比均为 L/3000 的 25 m 和 30 m 梁轨一体化简支箱梁在空载与满载工况、不同车速下的车桥耦合振动响应。随着车速提高，车体加速度先增后减，峰值出现在 160 km/h 附近；桥梁加速度、Sperling 指标及悬浮间隙波动幅度均单调递增。空载悬浮间隙小于满载，且高速段差异更显著。结果表明：160 km/h 及以下时，结构动力性能良好，满足行车安全与舒适性要求；200 km/h 时性能明显劣化，平稳性趋于限值，空载悬浮间隙波动超出 4～12 mm 合理范围。建议该结构用于 160 km/h 及以下线路；若提速至 200 km/h，应提高桥梁动力刚度并控制空载悬浮间隙，使其处于合理范围，以保障安全与舒适性。

参考文献 (References)：

[1] 路志远. 中低速磁浮技术在城市轨道交通中的应用[J]. 中国战略新兴产业，2018，(04)：38. DOI:10.19474/j.cnki.10-1156/f.003148.

[2] 邹云峰,邱冰,何旭辉,等. 中低速磁悬浮 U 形简支梁竖向刚度限值研究 [J]. 铁道学报，2025，47(07)：232-242.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：无

作者简介：熊福强(2002－)，男，江西九江人，硕士研究生，主要从事车桥耦合振动的研究；

E-mail:1217785423@qq.com

文章编号：484-112

隧道中隔墙对提速中低速磁浮列车的气动影响

许少鹏[1]，蔡陈之[1,2]，周智辉[1,2]，邹云峰[1,2]，何旭辉[1,2]
（1. 中南大学 土木工程学院，湖南 长沙 410075；2. 高速铁路建造技术国家工程研究中心，湖南 长沙 410075）

1 引 言

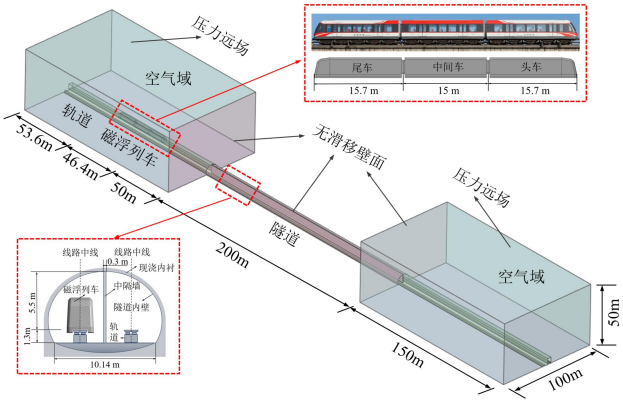
在提升线路运能与运行效率的需求驱动下，中低速磁浮列车正呈现出由传统设计运行速度 100 km/h 向 160 km/h 更高运行速度提升的发展趋势[1]。在现代双线隧道工程中，为优化结构受力及缓解列车交会时的气动冲击，常在隧道中央设置中隔墙。针对隧道中隔墙对列车气动特性的影响研究，杨永刚等[2]和 XIONG 等[3]分别对高速列车和城际列车通过带中隔墙的隧道的气动特性进行研究，发现中隔墙的存在使列车侧部流场流速增大。

本文以 3 车编组长沙中低速磁浮列车为研究对象，构建了中隔墙隧道-列车-空气三维 CFD 仿真模型。基于改进延迟脱体涡模拟(IDDES)湍流模型和动网格技术，对提速工况下中低速磁浮列车通过中隔墙隧道的全过程进行了数值模拟，并结合实测数据进行了验证，进而分析了隧道中隔墙对提速后磁浮列车的气动特性影响。

2 CFD 数值模拟

2.1 计算域与网格划分

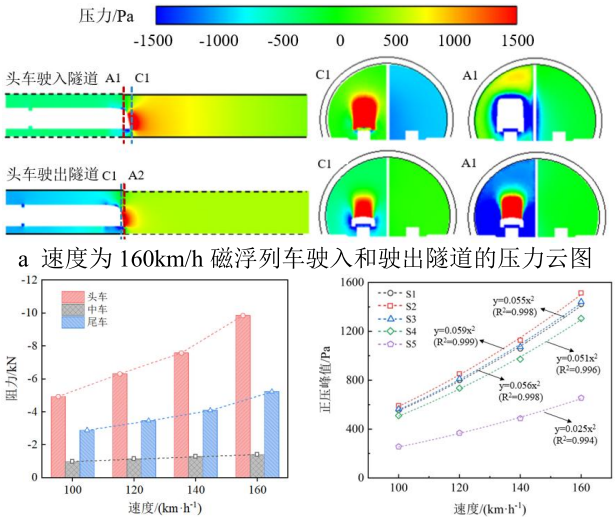
如图 1 所示，以三车编组形式的长沙中低速磁浮列车为列车模型，隧道几何模型基于矿山法施工的马蹄形单洞双线断面构建。计算域采用静止区域与移动区域相结合的重叠网格方法进行划分。



1 CFD 模型计算域

2.2 计算结果

图 2 为中低速磁浮列车提速后的部分计算结果。



a 速度为 160km/h 磁浮列车驶入和驶出隧道的压力云图

b 提速磁浮列车的阻力峰值　　c 提速隧道内壁的压力峰值

2 部分计算结果

3 结 论

中低速磁浮列车进、出带中隔墙隧道时气动力存在突变现象。在磁浮列车提速工况下中隔墙的存在能够加速驶入隧道阶段的压缩波传播，也会加剧驶出隧道阶段泄压后的负压效应。

参考文献（References）：

[1] 蔡文锋，张威风，冯洋，等.提速情况下磁浮轨道结构振动响应及传递特性研究[J].铁道标准设计, 2023, 67(03): 55-60.

[2] 杨永刚，李睿，贾永兴，等.中隔墙开孔参数对高速铁路隧道压力波影响研究[J].铁道科学与工程学报, 2025, 22(10): 4320-4334.

[3] XIONG K, WENG M C, ZOU Z B, et al. Field measurements of aerodynamic pressures induced by suburban rail transit train passing through double-track tunnel with mid-partition wall[J]. International Journal of Rail Transportation, 2025, 13(1): 120-150.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52378546)；湖南省自然科学基金资助项目(2024JJ4065).

作者简介：许少鹏(1999－)，男，河南省安阳市，在读博士生，主要从事磁浮列车空气动力学的研究；

E-mail: xspchn@csu.edu.cn、15565056478

文章编号：484-113

基于小波降噪处理的高速磁浮轨道不平顺构建

刘普栋[1]，徐俊起[2]，孙友刚[2]，陈琛[2]
（1. 同济大学 交通学院，上海市嘉定区 201800；2. 同济大学磁浮交通工程技术研究中心，上海市嘉定区 201800）

1 引言

高速磁浮轨道不平顺是影响车辆平稳性的重要因素。惯性基准法是轨道不平顺测量的常用方法。该方法常采用巴特沃斯滤波法对实测数据预处理[1]，但该滤波方法截止频率固定单一，不能区分高频有效信号与噪声，效果较差，得到的轨道不平顺数据缺乏真实性。小波变换采用多尺度多分辨率分频，兼具时域与频域局部聚焦能力，是处理时变、非平稳信号的有效方法。本文采用小波相关性降噪法对实验数据降噪处理，并基于惯性基准法得到轨道不平顺样本，以提高样本的真实性与准确性。

2 小波降噪处理后的不平顺构建

惯性基准法是基于车辆运行试验测量出的电磁铁加速度和悬浮气隙数据，经预处理和计算得到轨道不平顺的方法。受自身设备和环境的影响，测量数据将不可避免的受到噪声干扰。

小波变换联合时域和频域来表示信号特征，是处理时变、非平稳信号的有效方法。小波相关性去噪法具有去噪效果好，效率高等优点，是小波降噪的首选方法[2]。试验采集的数据可看作离散信号 $f(n)=x(n)+s(n), n=0,1,\ldots,N-1, s\in N(0,\sigma^2)$，对 $f(n)$ 进行小波变换：

$$Wf(j,k)=2^{-0.5j}\sum_{n=0}^{N-1}f(n)\Psi(2^{-j}n-k) \tag{1}$$

式中，$Wf(j,k)$ 为小波系数，记为 $W_{j,k}$，$\Psi(2^{-j}n-k)$ 为离散小波。设归一化相关量 $\tilde{W}_{j,k}$ 为

$$\tilde{W}_{j,k}=W_{j,k}W_{j+1,k}\sqrt{\frac{PW_j}{PCW_j}} \tag{2}$$

式中，PW_j 表示第 j 层系数的能量，PCW_j 表示 j 尺度的相关系数能量。

通过给定分解层数，比较各尺度上 $\tilde{W}_{j,k}$ 和 $W_{j,k}$ 的大小来区分信号信息与噪声信息，从而实现数据去噪处理。处理前后的某段气隙数据如图 1 所示。

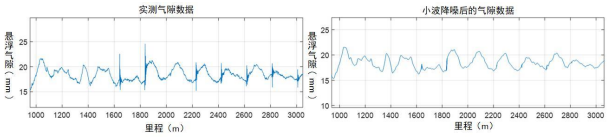


图 1　小波去噪前后气隙数据

由图 1 可知去噪处理后的曲线更加平滑，毛刺明显减少，说明去噪效果较好。

对测量的加速度信号做相同处理，基于惯性基准法可得到高速磁浮垂向不平顺，如图 2 所示。

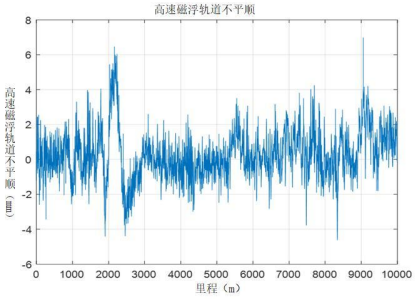


图 2　高速磁浮轨道不平顺样本

由图 2 可知，得到的不平顺样本幅值大多在 6mm 以内，特征表现为随机性，与实际情况相似。

3 结　论

本文基于小波相关性去噪法来去除实验测量数据的噪声干扰，提取出采集数据的有效成分，最后通过惯性基准法得到高速磁浮轨道不平顺，提高了不平顺样本的科学性与真实性。

参考文献（References）：

[1] Jin S, ZANG W, WANG Y, et al.[J]. Journal of Zhejiang University-Science: A(Applied Physics & Engineering),2014,15(06):385-39.
[2]崔丽. [MATLAB]小波分析与应用[M]. 2015, 北京：北京航空航天大学出版社.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.
基金项目：国家自然科学基金重点项目（52232013),国家重点研发计划任务（2023YFB4302502).
作者简介：刘普栋(2001－)，男，山东省青岛市，学士，主要从事轨道不平顺、电磁系统的研究；通信方式：2433555@tongji.edu.cn

文章编号：484-114

高温超导钉扎磁浮关键技术研究进展

邓自刚[1, 2]，黄志川[1]，何雨宸[3]，李婷婷[1]，郑杰[1]，郑珺[1]，张卫华[2]

(1.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 C10031；2.西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心，四川省 成都市 C10031；3.西南交通大学 信息科学与技术学院，四川省 成都市 C10031)

1 引　言

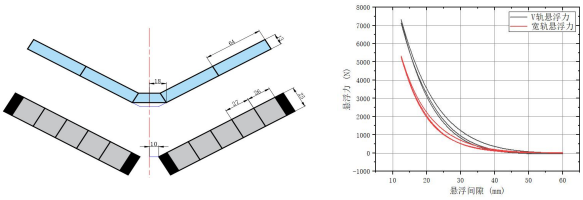
高温超导钉扎磁浮技术依靠块状高温超导体的磁通钉扎效应实现被动稳定悬浮，具有无源自稳定、结构简单和运行能耗低等优势[1]。自 2000 年西南交通大学研制成功世界首辆载人高温超导磁悬浮试验车“世纪号”以来[2]，该技术逐步向工程化方向发展。2021 年，设计时速 620 公里的高温超导钉扎磁浮工程化样车及试验线在成都建成并投入运行，进一步推动了其工程应用进程。

然而，面向更高速度等级和长期稳定运行需求，高温超导钉扎磁浮系统仍面临大载荷悬浮能力提升、高速振动抑制、悬浮衰减控制等关键问题。因此，面向低真空管道超高速高温超导钉扎磁浮系统的发展需求，本文对本团队近年来在超导材料结构优化、永磁轨道设计、磁通调控、振动控制等方面的最新研究进展进行总结。

2 正　文

首先针对高温超导块材磁通钉扎能力有限的问题，提出了块材表面人工孔槽磁通调控技术。通过在块材表面引入人工孔槽结构，实现了局部磁通分布与钉扎特性的结构调控。研究结果表明，人工孔槽结构可形成等效附加磁通钉扎中心，使块材最大捕获磁场提高 9.46%，悬浮力提升 8.01%，导向力提升 8.21%。

其次，针对基于传统平面型永磁轨道的悬浮系统导向能力不足的问题，提出了 V 型空间永磁轨道构型及基于离散化磁化角的逆向设计方法。通过将永磁轨道由传统一维平面结构扩展为二维 V 型结构，增强了轨道磁场聚集效应并提高了空间磁场梯度。实验结果表明（图 1），在场冷条件下，相较于传统平面型轨道，基于 V 型轨道的悬浮系统悬浮力提升了 41%、导向力提升了 107%。



a 永磁轨道结构示意　　b 悬浮力对比

图 1 V 型永磁轨道结构及其悬浮性能

此外，针对高温超导磁浮系统高速运行过程中的悬浮性能衰减与振动增强问题，提出了超导磁悬浮全流程磁通控制方法（预载）以及面向二系悬挂的磁流变阻尼器半主动振动控制方法，采用天棚线性连续控制策略实现阻尼力的实时调控。相关研究表明，预载措施可有效改善系统悬浮性能衰减问题，基于磁流变阻尼器的半主动控制可显著抑制永磁轨道不平顺激励下的车体垂向与横向振动，高速工况下车体振动衰减率可达 50%以上，在保障系统安全运行的同时提升了车辆动力学性能。

3 结　论

本团队围绕高温超导钉扎磁浮系统的高速化与工程化应用需求，从超导块材、永磁轨道和系统振动控制三个层面开展了关键技术研究，提升了系统的悬浮、导向与运行稳定性。相关结果可为低真空管道超高速高温超导钉扎磁浮系统的结构设计、性能优化及工程化应用提供参考。

参考文献 (References)：

[1] 熊嘉阳,邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. 交通运输工程学报,2021,21(1): 177-198.

[2] WANG Jia-su, WANG Su-yu, ZENG You-wen, et al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world[J]. Physica C: Superconductivity, 2002, 378-381: 809-814.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家自然科学基金（U23A20681）；教育部学科突破先导项目（JYB2025XDXM211）.

作者简介：邓自刚(1982－)，男，四川泸州人，研究员，博士，主要从事超导钉扎磁浮及真空管道交通研究；通信方式：deng@swjtu.edu.cn

文章编号： 484-115

基于新息自适应窗口和双阈值异常值拒绝的鲁棒卡尔曼滤波算法

罗志云[2,3]，杨杰[1,3]，刘书云[2,3]

(1. 上海电机学院 电气学院，上海 201306；2.江西理工大学 电气工程与自动化学院，江西 赣州 341000；3. 江西理工大学 磁浮轨道交通装备江西省重点实验室，江西 赣州 341000)

1 引　言

高精度定位是自动驾驶、无人机及轨道交通的核心技术，惯性/卫星组合导航互补缺陷实现长时间可靠定位。但多径效应等导致数据含非高斯噪声或粗差，使滤波精度下降。固定阈值鲁棒滤波难匹配动态状态。本文提出滑动窗口新息自适应阈值与双阈值异常检测，动态调整增益抑制粗差，优化精度稳定性，为高精度定位提供参考[1]。

2 系统方案与关键设计

2.1　组合导航运动模型构建

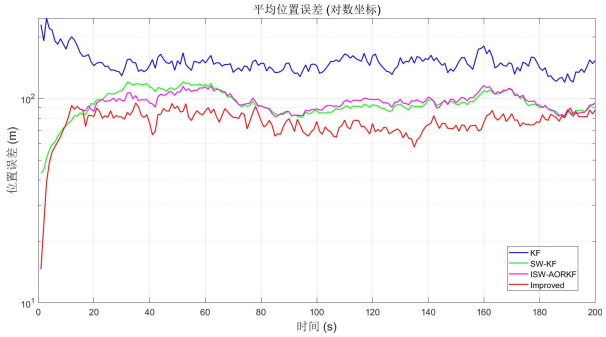
本文设计的测速定位基于 SINS/BDS 惯导卫星组合定位系统，构建列车二维平面匀速运动模型。忽略垂向运动，将列车简化为平面质点，采用匀速运动状态方程表征位置与速度变化。过程噪声采用高斯白噪声模拟车体振动及轨道扰动，观测方程为卫星定位系统提供的位置观测。通过建立离散化运动模型，为后续数据融合与滤波算法仿真提供支撑[2]。

2.2　双阈值异常值检测与增益调整

鲁棒滤波前，先用新息卡方检测异常：计算新息向量与协方差得马氏距离。传统固定阈值易漏检或误检。本文设计双阈值（低、高），将观测分为正常、可疑、强污染三类。对超高阈值的强污染观测，卡尔曼增益降至 5%，几乎拒绝更新；对介于两阈值间的可疑观测，增益降至 50%，部分保留信息；正常观测保持增益。该策略在连续非高斯强噪声下提升了鲁棒滤波的精度与稳定性。

2.3　自适应滑动窗口改进

针对滑动窗口鲁棒卡尔曼滤波固定窗口难以适配动态数据的问题，本文提出基于新息范数的自适应窗口调整法。通过窗口内新息范数均值动态调整窗口：超过高阈值时缩小窗口以快速响应剧烈变化；低于低阈值时增大窗口以平滑平稳噪声；否则保持不变。该方法使窗口长度自适应数据波动，提升了动态环境适应性与鲁棒性。



1 改进算法与原始算法仿真对比图

3 结　论

本文针对组合导航系统易受噪声粗差干扰、常规滑动窗口鲁棒滤波阈值与窗口长度固定适配性差的问题，建立了适配动态工况的二维匀速运动模型，先通过双阈值卡方检测甄别异常观测并动态调整增益，再利用新息范数滑动窗口自适应调整窗口长度，构建了改进型鲁棒卡尔曼滤波方法。仿真表明，该方法有效抑制了异常值干扰，避免了滤波发散，显著提升了定位精度与稳定性，可为智能运载体的高精度自主定位提供技术参考。

参考文献（References）：

[1] 孙进，叶千祺，赵海涛．基于改进型滑动窗口的自适应异常值鲁棒卡尔曼滤波算法[J]．南京邮电大学学报(自然科学版)，2025，45(6)：52-59.

[2] 蒋锐，虞跃，徐友云，等．基于 CHAN 的改进卡尔曼滤波室内定位算法［J］．通信学报，2023，44（2）：136-147.

收稿日期： 2026 年 05 月 26 日.

基金项目： 江西省研究生创新专项资金项目（YC2024-B217）；国家重点研发计划（2024YFB4303201-5）.

作者简介： 罗志云(2000－)，男，江西宜春人，在读硕士研究生，主要从事列车测速定位、组合导航的研究；通信方式：E-mail:3388389887@qq.com、联系电话:18397807370.

文章编号：484-116

电动悬浮车载低温容器结构动力学特性分析

赵志博[1]，周鹏博[1]，田伟康[1]，李松林[1]，刘博强[1]，马光同[1,2]

（1.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点学院 四川省 成都市 610031）

（2.西南交通大学 电气工程学院 四川省 成都市 610031）

1 引　言

超导电动悬浮是未来超高速交通发展的重要方向之一。车载低温容器为超导磁体提供稳定低温环境，长期承受电磁力、热应力与轨道振动冲击作用。目前对低温容器多部件力热优化较多，但容器的结构动力学、振动冲击响应及模态特性研究仍较少，亟需开展动力学特性分析。

2 正　文

2.1 低温容器仿真模型

建立含超导磁体、外杜瓦、支撑杆等完整低温容器有限元模型[1]，合理简化结构并完成材料赋值与网格划分。综合考虑大气压、电磁载荷与低温热应力，开展静力学仿真，获得结构应力与变形分布，为后续动力学分析提供预应力基础。

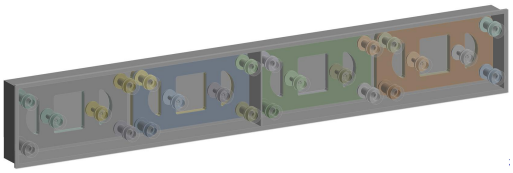
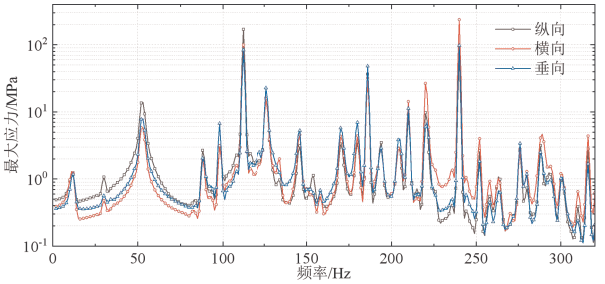


图 1 三维模型

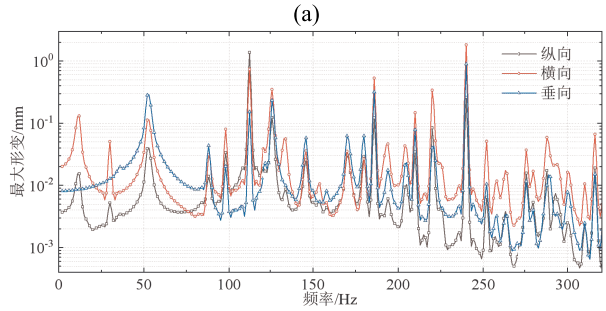
2.2 结构动力学特性仿真分析

参照轨道交通 IEC 61373 标准，开展模态、谐响应、随机振动及冲击响应分析，获得结构固有频率、振动响应及瞬态冲击特性，评估结构运行可靠性与薄弱位置。

仿真结果表明，超导磁体与低温容器各阶固有频率分布合理，不会与常规轨道激励发生低频共振；在轨道线圈谐波激扰作用下[2]，结构共振应力与变形均控制在安全范围内，满足机械强度设计要求。随机振动工况下整体应力水平远低于材料屈服强度，抗振动能力良好[3]。但在瞬时冲击载荷作用下，外杜瓦支撑隔板位置局部应力偏大，接近材料屈服极限，且结构整体阻尼偏小，载荷消失后易产生长时间持续振荡，存在一定结构优化空间。



(a)



(b)

图 2 低温容器频率响应结果 (a)最大应力；(b)最大形变

3 结　论

本文基于前期设计的结构，完成了低温容器及超导磁体有限元建模与多工况动力学仿真，得到整机固有振动与动态响应规律。评估了共振、随机振动下结构安全裕度，发现外杜瓦局部刚度及结构阻尼存在不足，可为后续结构改进、减振优化及工程应用提供依据。

参考文献 (References)：

[1] 江民圣. ANSYS Workbench 19.0 基础入门与工程实践[M]. 北京：人民邮电出版社，2019.

[2] 庞超凡，闫世风，邹彩虹，等. 基于模态叠加法的悬臂吊悬臂结构优化[J]. 机械设计，2021，38(11)：61-66.

[3] 胡道宇，闫少强，蔡华，等. 磁悬浮列车超导磁体电磁激振试验台设计[J]. 交通运输工程学报，2023，23(6)：193-206.

收稿日期： 2026 年 06 月 26 日.

基金项目： 国家重点研发计划（2024YFB0608）；国家自然科学基金（62477017）；　国家自然科学基金（62462702）；

作者简介： 赵志博（2002），男，辽宁省锦州市，硕士研究生，主要从事低温容器、超导磁体的研究；通信方式：E-mail:zzb@my.swjtu.edu.cn、联系电话:18624680728

文章编号：484-117

高温超导电动磁浮轨道检测系统研究

任世达[1]

(1.中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮研究所，长春，130000)

1 引言

超导电动悬浮是一种适用于高速及超高速的磁浮交通制式,其轨道在线路制式、设计标准、车轨耦合特性等方面均与传统铁路线路有较大不同，本文目的是分析超导电动磁浮轨道检测需求，探讨可行性方案.

2 正　文

2.1 行业现状与研究背景

轨道交通行业正经历全自动智能化轨道检测应用浪潮，检测系统从单一参数检测向“几何参数+结构缺陷+部件状态+环境监测”一体化检测演进。磁浮轨道检测仍处于技术探索阶段，特别是超导电动磁浮 U 型槽轨道所具有的“走行面+导向面+地线圈”特殊结构，对检测项点、适用标准及精度要求均需正向梳理，同时对检测系统底层架构、算法优化、硬件选型均提出了差异化需求.

全球磁浮轨道检测技术研发主要集中于日本、德国和我国，其中日本对于超导电动悬浮制式轨检系统研究应用最为深入。以山梨试验线为例，JR 东海现采用 “激光雷达 + 惯性导航 + 人工复核” 轨检方案，几何参数检测精度可达 ±2mm;并将于 2026 年末开始测试基于铃木公司开发的轮式机器人的下一代轨检系统，预期将显著降低道岔、廊桥登车区等特殊轨道区域的人工复合需求。我国磁浮轨检应用目前主要集中于中低速磁浮线路（如长沙磁浮快线、北京 S1 线），采用“红外热成像 + 普通相机 + 手持设备辅助”模式，检测速度≤80km/h，缺陷检测精度≥3mm（裂缝），难以适配高温超导磁浮的高速、高精度检测需求，同时直接移植易产生检测盲区（如导向面螺栓、线圈边缘区域）。

2.2 系统需求

高温超导电动磁浮车载轨道检测系统是具备日常在线检测、故障预警、数据分析等功能的新一代轨道动态检测系统。

从车辆运行安全和平稳性双维度出发，根据现场环境调研及行业需求调研，检测对象应包括轨道几何参数、轨道结构缺陷及地面关键部件状态三类，特别是以下维度：走行面与导向面的平整度、轨道板间错台及轨缝大小、轨道表面裂缝、轨行区异物、轨道安装螺栓松动或缺失，地面悬浮线圈断路或移位。

2.3 技术方案

技术方案讨论应遵循分类分析、工程可行、适度创新的原则；充分考虑将系统硬件搭载于磁浮车辆、工务车辆及独立使用的应用场景。针对轨道交通行业较常见检测项点，如轨行区异物检测，优先考虑成熟方案，注重算法优化；针对其他交通行业具有类似检测需求的项点，如走行面与导向面平整度检测，借鉴公路交通领域混凝土道路平整度检测的经验和技术标准；针对超导电动磁浮轨道独有的且无参考可循的检测项点，如地面悬浮线圈断路检测，制作基于不同猜想的原理样机，并充分利用现有实验资源，寻找最优解。

3 结　论

基于当前世界先进的非接触式轨道检测应用经验，采用机器视觉检测、惯性基准测量等原理，实现高温超导电动磁浮轨道综合状态实时检测基本可行。适时开展系统设计、样机试验等工作，形成多应用场景下的轨道检测应用能力，可为超导电动磁浮系统的工程化应用提供安全保障。

参考文献 (References)：

[1] M. Kawada, "Automatic Insulation Diagnosis Using the Characteristics of Electromagnetic Waves Due to Partial Discharges Occurring in Propulsion Coils," 2025 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), South Padre Island, TX, USA, 2025, pp. 1-3, doi: 10.1109/EIC63069.2025.11123347.

[2] Y. Yuan, K. Wang, F. Ye, G. Zeng, "Development of the Guideway Deviation Measurement Technology for High-Speed Maglev System", in J. Pombo, (Editor), "Proceedings of the Sixth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance", Civil-Comp Press, Edinburgh, UK, Online volume:CCC7,Paper16.9,2024, doi:10.4203/ccc.7.16.9.

[3] 太田 衆一郎, 吉岡 博, 村井 敏昭, 曄道 佳明, 磁気浮上式鉄道の軌道不整同定に関する基礎研究, 日本機械学会論文集, 2014, 80 巻, 814 号, p. TL0181, 公開日 2014/06/25, Online ISSN 2187-9761, https://doi.org/10.1299/transjsme.2014tl0181

收稿日期：2026 年 05 月 26 日.

作者简介：任世达(出生于 1997 年)，性别男，籍贯河北省石家庄市，助理工程师，硕士研究生学位，主要从事磁悬浮系统技术、机械结构、机电设备的研究；通信方式：E-mail:013200031086@crrcgc.cc、联系电话 13610714003

文章编号： 484-118

高温超导线圈接触电阻的压力与材料依赖性

余波，李婧，周鹏博，柴经纬，钟家俊，林衡，杜明阳，赵志博
(西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省成都市 611756)

1 引言

无绝缘（NI）高温超导（HTS）磁体凭借其卓越的失超自保护能力和高电流密度，成为高场装置和超导储能系统（SMES）的重要发展方向。然而，无绝缘线圈中特有的匝间接触电阻具有高度的非线性，是决定磁体励磁延迟、动态响应及稳定性的核心参数。特别是在存在交变谐波磁场扰动的运行环境下，匝间接触电阻的大小直接主导了线圈内部的径向漏电流行为与动态能量耗散。因此，系统研究机械压力、表面材料对匝间接触电阻的协同影响机制，并量化其在谐波场下的损耗规律，对于高温超导储能磁体的电磁与热设计具有重要意义。

2 正　文

2.1 研究方法

本研究基于 REBCO 高温超导带材，设计并搭建了液氮（77 K）低温环境下的带材堆叠与接触特性实验测试平台。利用精密加压装置在宽压力范围 0 - 100 MPa 内精确调控横向接触应力，通过高精度测量系统，对比分析了带材直接接触、引入不锈钢带共绕、镀银、无超导材料等不同界面材料与状态下匝间接触电阻的响应特性。在此基础上，进一步围绕高温超导线圈开展动态电磁实验，重点测试并分析在不同变频交变谐波磁场扰动下，线圈内部的电压、磁场波动以及由于径向漏电流引起的动态能量耗散行为。

2.2 主要结果

实验结果表明，匝间接触电阻对机械压力和界面材料具有极强的敏感性。随着横向压力的增加，R_{ct} 呈现出显著的非线性下降趋势，并在压力达到 50MPa 后由于微观接触面塑性变形趋于饱和而逐渐平缓。谐波磁场扰动实验则表明，随着接触压力的提高（即 R_{ct} 减小），线圈在相同扰动下的径向感应漏电流显著增大，进而导致线圈内部的涡流损耗与整体能量耗散呈非线性上升趋势。

3 结　论

本研究揭示了本征表面材料特性与机械应力对高温超导线圈匝间接触电阻的协同调控机制，并建立了接触电阻与谐波磁场下动态能量耗散之间的定量关联。研究结果表明，在无绝缘超导储能磁体的设计中，必须综合权衡绕制张力及匝间材料以平衡磁体的自保护能力与动态交流损耗。

参考文献 (References)：

[1] Lu J, Levitan J, McRae D, et al. Contact resistance between two REBCO tapes: the effects of cyclic loading and surface coating[J]. Superconductor Science and Technology, 2018, 31, (8).

[2] Gao S W, Liu F, Liu H J, et al. Dynamic evolution of pressure-dependent non-uniform turn-to-turn contact resistivity in no-insulation REBCO magnets: modeling and experimental validation[J]. Superconductor Science and Technology, 2026, 39, (2): 025025-025025.

[3] Liu Y Z, Ou J, Gyuraki R, et al. Study of contact resistivity of a no-insulation superconducting coil[J]. Superconductor Science and Technology, 2021, 34, (3): 035009-035009.

收稿日期： 2026 年 05 月 26 日.

基金项目：

作者简介： 余波(2002－)，男，河南省商丘市，本科，主要从事超导磁体的研究；通信方式：E-mail:Yub21275@163.com、联系电话：16650675787

文章编号：484-119

高速磁浮直线电机参数辨识与鲁棒预测控制

何喜玉[1]，马光同[1]，徐帅[2]，任冠州[2]，陈俩[1]

（1. 西南交通大学 电气工程学院，四川省 成都市 610031；2. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031）

1 引　言

高速磁悬浮列车采用长定子直线同步电机进行驱动，其控制策略对于列车系统运行起着关键作用。在实际高速运行工况下，未建模动态、外部扰动、参数不匹配等因素均会对电流造成较大的波动，为了进一步提升系统性能并确保其运行的稳定性，精确的数学建模至关重要[1]。

本文提出了扰动观测器与参数辨识的模型预测复合控制策略，搭建了考虑多源扰动耦合的电机系统模型，揭示了扰动观测器对集总扰动的实时估计与补偿机制以及参数辨识对预测模型参数的修正，为高速磁浮列车在复杂工况下的高品质、强鲁棒稳定运行提供理论支撑。

2 正　文

2.1 LSLSM 模型预测数学模型及扰动分析

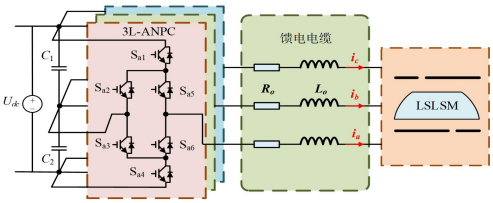


图 1 高速磁浮牵引结构图

根据牵引变流器、长定子直线同步电机系统建立电压方程，为了抑制双端供电模式下的环流，采用均流控制方式[2]。考虑参数不匹配和外部扰动时，状态变量会有漂移引入扰动，且存在未建模的额外扰动，将所有扰动视作 dq 轴上的总扰动 D，重构考虑参数漂移及外部扰动时的电机数学模型。

2.2 扰动观测器及在线参数辨识

基于上节根据实际运行分析的集总扰动，设计扰动观测器模型，对集总扰动进行估计并实时修改模型预测电流方程。同时设计在线参数辨识器，在不注入任何额外信号的情况下，实现对所有关键电机参数的在线辨识。通过补偿-辨识-更新的三层协同设计，提升模型预测的参数鲁棒性。

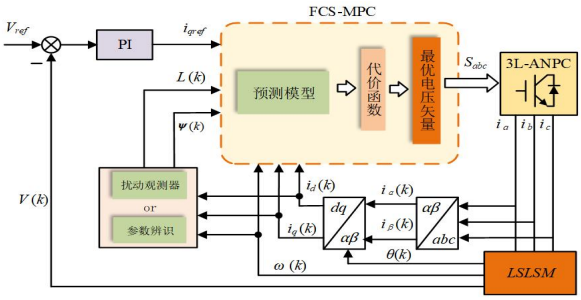


图 2 长定子直线电机控制框图

3 结　论

本文建立了考虑多源扰动耦合的长定子直线同步电机驱动系统预测模型，采用模型预测电流控制策略实现定子电流的高性能精准跟踪，提出了基于扰动观测器和在线参数辨识的电机预测模型参数动态修正方法，分析了列车在复杂工况与参数失配下的动态响应，研究了关键控制参数对驱动系统鲁棒性及电流谐波抑制性能的影响，为高速磁浮列车牵引控制系统的稳定运行提供了理论基础。

参考文献（References）：

[1] X. Cao, Q. Ge, J. Zhu, et al. Improved Sliding Mode Traction Control Combined Sliding Mode Disturbance Observer Strategy for High-Speed Maglev Train[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023,38(1):827-838.

[2] 朱进权, 葛琼璇, 孙鹏琨, 等. 高速磁悬浮列车在双端供电模式下的电流控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23):4937-4947.

收稿日期：2026 年 05 月 26 日.

基金项目：国家自然科学基金（52377068）.

作者简介：何喜玉(2003－)，女，四川省南充市，硕士研究生，主要从事电机控制；

通信方式：18121805985@my.swjtu.edu.cn

文章编号：484-120

超导磁体局部失超数值模拟研究

杜明阳[1]，马光同[2]，苏振华[2]，周鹏博[1]，程隆超[2]，朱苗[2]

（1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031；2. 西南交通大学 电气工程学院，四川省 成都市 610031）

1 引　言

高速电动悬浮（EDS）交通系统车载高温超导磁体的安全稳定运行至关重要。无绝缘（NI）线圈凭借独特的匝间动态分流机制具备极高的电磁自保护能力[1]，但其局部失超早期的多物理场演化规律高度非线性且极具复杂性。

本文构建了基于 COMSOL 平台的高温超导无绝缘线圈二维轴对称电磁-热耦合数值仿真模型，采用双组件跨场映射架构，系统研究了局部热激扰下线圈内部电流径向分流[2]、电磁损耗与暂态磁场的演化机理。基于该多物理场模型，本文开展了包含运行电流、热激扰功率、持续时间及加热位置等多变量的离散工况扫描。研究结果为车载磁体安全防护设计提供了可靠的理论依据。

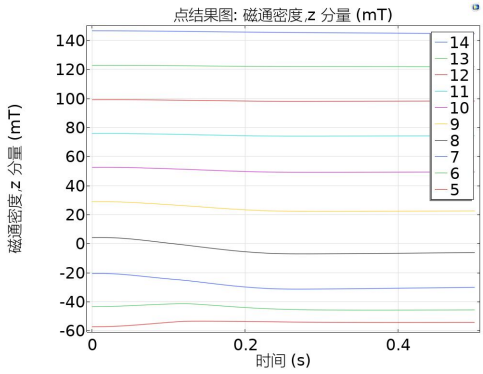
2 正　文

2.1 无绝缘超导线圈电磁-热双组件耦合机理

本研究基于 COMSOL 平台构建了高温超导无绝缘线圈的二维轴对称电磁-热耦合模型，通过在特定匝施加局部脉冲热激扰，模型成功复现了超导态丧失后的暂态演化过程：这种内部电流密度的重构与重组，直接通过空间磁场探针及局部匝间电压的特征波动得以灵敏表征。

2.2 多工况扫描与失超特性分析

基于该模型开展了多变量组合工况扫描（涵盖运行电流、热激扰参数、局部缺陷及位置等）。研究重点对比了两种典型暂态响应：一是低激扰下的可逆失超，即热源撤销后电流依靠匝间分流与散热回归超导层，磁场恢复稳态；二是高激扰下的不可逆失超，即焦耳热恶性累积引发雪崩式退磁崩溃。通过两类响应动态特征的对比，成功厘清了车载磁体的热稳定边界。



2 局部热激绕影响下的磁场变化示意图

3 结　论

本文建立了高保值的轴对称双组件多物理场数值模型，成功揭示了无绝缘线圈在局部热冲击下，电流分流行为引起空间多点暂态磁场及微伏级阻性电压的非线性演化机理。通过多变量工况扫描，明确了该线圈在不同电磁和热载荷下的稳定裕度，精细划定了磁体可逆失超与不可逆失超的临界边界，为车载超导磁体的热稳定性评估与安全运行限界的划定提供了量化的数据依据。

参考文献 (References)：

[1] 刘士苋,王磊,王路忠,等. 超导电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(4): 734-753.

[2] Hahn S, Park D K, Bascuñán J, et al. HTS pancake coils without turn-to-turn insulation[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 1592-1595.

收稿日期： 2026 年 05 月 226 日.

基金项目： 国家杰出青年科学基金（52425702）.

作者简介： 杜明阳(2003－)，男，河南省南阳市，硕士研究生，主要从事高温超导磁体失超预测的研究；

通信方式： dumingyang@my.swjtu.edu.cn

文章编号：484-121

超导电动悬浮阻尼特性研究

朱苗[1]，马光同[2]，罗俊[1]，苏振华[2]，朱韬宁[1]
（1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031；2. 西南交通大学 电气工程学院，四川省 成都市 610031）

1 引　言

超导电动悬浮系统利用超导磁体与轨道线圈间的电磁感应作用实现列车无接触悬浮，具有悬浮间隙大、运行速度高及安全稳定性好等优点，是高速磁浮交通的重要发展方向。然而，在高速运行条件下，车辆垂向振动会引起感应电流与电磁力的动态变化，进而产生复杂的阻尼特性。当系统阻尼不足甚至出现负阻尼时，将导致振动幅值增大，影响列车运行稳定性与乘坐舒适性。因此，研究超导电动悬浮系统的阻尼形成机理及其变化规律，对高速磁浮系统动力学设计具有重要意义。

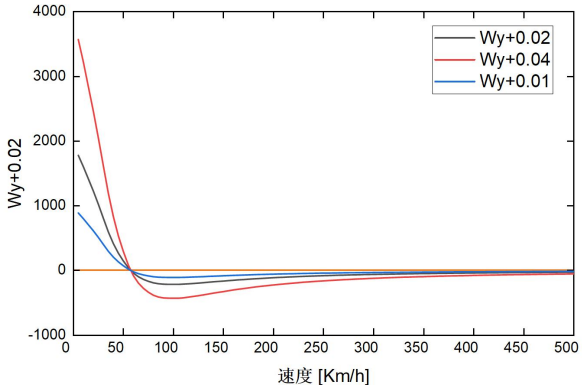
2 正　文

2.1 超导电动悬浮阻尼机理分析

本文基于超导磁体—轨道线圈耦合模型，对EDS 系统垂向阻尼特性进行了理论分析。通过建立轨道线圈感应电流方程与电磁力表达式，推导了悬浮系统等效阻尼系数模型，分析列车运行速度、线圈电阻、电感及时常数等参数对阻尼特性的影响规律。研究表明，阻尼力来源于车辆垂向振动过程中轨道感应电流与磁场相互作用产生的能量交换效应，其大小与运行速度及系统电磁参数密切相关。

2.2 阻尼特性及负阻尼现象研究

基于理论模型，对超导电动悬浮系统阻尼系数随速度变化规律进行了分析。结果如图 1，在低速区间系统表现为正阻尼特性，可抑制车辆振动；而随着运行速度提高，阻尼系数逐渐减小，并在特定速度范围内出现明显负阻尼现象。负阻尼将导致系统振动能量持续增加，从而降低车辆运行稳定性。进一步研究发现，轨道线圈时常数及悬浮高度对负阻尼范围具有显著影响，通过优化系统参数可有效改善悬浮系统动力学性能。



1 固有阻尼系数随运行速度的变化曲线

3 结　论

本文分析了系统阻尼形成机理及主要影响因素，研究了运行速度对阻尼特性的作用规律。结果表明，EDS 系统在高速运行条件下易出现负阻尼现象，其对车辆垂向稳定性具有重要影响。通过优化轨道线圈参数及系统结构，可有效减弱负阻尼效应，提高高速磁浮列车运行稳定性。

参考文献（References）：

[1] 胡道宇,冯馨月,张志华. 超导电动悬浮系统阻尼特性研究[J]. 中国电机工程学报,2021, 41(13): 4679-4687.
[2] 周丹峰,朱鹏翔,谭亦秋,等. 超导电动悬浮系统的垂向阻尼及其增强措施[J]. 国防科技大学学报,2020, 42(4): 107-114.

收稿日期：2026 年 05 月 26 日.
基金项目：国家杰出青年科学基金（52425702）.
作者简介：朱苗(2002－)，女，甘肃省兰州市，硕士研究生，主要从事超导电动悬浮动力学的研究；
通信方式：miaomiao@my.swjtu.edu.cn

文章编号：484-122

基于 ANN 的磁浮车载高速电机谐波预测研究

贺宇琴[1]，马光同[2]，孙振耀[1]，罗俊[1]，焦笑航[1]

（1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031；2. 西南交通大学 电气工程学院，四川省 成都市 610031）

1 引　言

磁浮列车车载高速永磁同步电机具有功率密度高、效率高和响应速度快等特点，可用于冷却风机、空气压缩机及高速辅助驱动系统[1]。高速运行时，受开关频率、器件损耗和控制器算力限制，驱动系统易处于低载波比工况，采样延迟、死区效应、非正弦反电动势及参数摄动会引起电流预测误差，导致 d、q 轴电流谐波和电磁转矩脉动。

无差拍预测电流控制响应快、数字实现直接，适用于高速永磁同步电机电流环控制，但其性能依赖精确的电机离散模型[2]。针对高速工况下非线性扰动难以建模的问题，本文提出一种基于人工神经网络（ANN）的谐波补偿无差拍预测控制方法，以提升电流跟踪精度和谐波抑制能力。

2 正　文

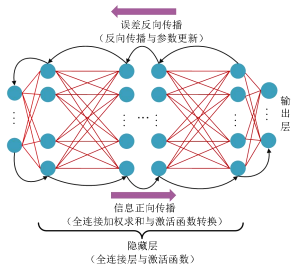
2.1 高速永磁同步电机无差拍预测控制模型

本文建立基于 d-q 坐标系的高速永磁同步电机离散控制模型。系统采用速度外环与电流内环结构，速度环生成 q 轴电流参考值，电流环采用无差拍预测控制，根据采样电流、电角速度、转子电角度及电机参数计算下一周期 d、q 轴电压指令。考虑高速运行下反电动势增大、电流耦合增强及控制延迟影响，在基础预测模型中引入电压前馈与交叉耦合补偿。

2.2 基于 ANN 的谐波预测补偿方法

本文构建 ANN 谐波预测补偿模型，以 d、q 轴电流、电流误差、历史电压指令、电角速度和转子电角度等变量作为输入，以下一控制周期的 d、q 轴谐波补偿电压作为输出。ANN 作为前馈补偿环节嵌入电压指令端，用于学习死区效应、非正弦反电动势和参数摄动引起的周期性谐波扰动。

仿真结果表明，所提方法能够降低 d、q 轴电流谐波，减小电磁转矩脉动，提高高速永磁同步电机运行平稳性。



1 超导电动悬浮列车模型示意图

3 结　论

本文提出了一种基于 ANN 谐波补偿的高速永磁同步电机无差拍预测电流控制方法。该方法通过 ANN 预测下一控制周期的等效谐波补偿电压，并将其叠加至基础电压指令端，从而改善电流预测精度。研究表明，该方法能够抑制高速工况下的 d、q 轴电流谐波和电磁转矩波动，可为磁浮列车车载高速电机驱动系统设计提供参考。

参考文献（References）：

[1] 张丹,姜建国.高速磁悬浮永磁电机三电平无速度传感器控制[J].电工技术学报,2022,37(22):5808-5816.

[2] Slimani A A, Bourek A, Ammar A, et al. Artificial Neural Network-Based Deadbeat Predictive Current Control with Dead-Time Compensation for PMSMs[J]. ITEGAM-JETIA, 2025, 11(51): 197-205.

收稿日期：2026 年 05 月 26 日.

基金项目：国家杰出青年科学基金（52425702）.

作者简介：贺宇琴(2002－)，女，江西省吉安市，硕士研究生，主要从事高速磁浮电机控制的研究；

通信方式：hhyq@my.swjtu.edu.cn

文章编号：484-123

励磁方式与次级材料对涡流制动性能的影响研究

张俊鹏[1]，李婧[1]，马光同[2],柴经纬[2]，罗俊[1]
（1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031；2. 西南交通大学 电气工程学院，四川省 成都市 610031）

1 引　言

随着高速轮轨列车持续向更高速度发展，传统黏着制动已难以满足高速、大坡度、复杂工况下的制动需求，轨道涡流制动凭借无磨耗、无接触、制动力不依赖轮轨黏着等优势成为重要研究方向。

其中，直流励磁轨道涡流制动存在低速区域制动力不足的问题；而交流励磁轨道涡流制动可通过调节励磁频率实现对制动力的灵活控制，有望弥补直流励磁方式的不足。此外，次级钢轨的材料属性（电导率、磁导率）直接影响涡流分布与制动力大小，是制动器设计的关键因素。本文围绕直流励磁与交流励磁轨道涡流制动器的性能差异及次级材料影响，开展了系统的理论分析、数值仿真与实验研究。

2 正　文

2.1 涡流制动器的解析模型

首先，基于电磁场基本理论，分别建立了直流励磁与交流励磁轨道涡流制动器的解析模型。针对直流励磁方式，采用等效磁路法求解气隙磁感应强度，并基于能量法推导了涡流制动力的解析表达式；针对交流励磁方式，引入行波电流层概念，结合子域法将求解区域划分为初级铁芯、气隙、次级钢轨及外部气隙四个子区域，通过边界条件求解制动力与法向力的解析公式。在解析模型中，考虑了初级铁芯齿槽结构引起的气隙不均匀性，引入卡特系数对气隙进行修正；同时，针对次级钢轨在强磁场下的磁饱和特性，采用迭代法求解等效平均磁导率，提高了模型的计算精度。

2.2 涡流制动器有限元建模与实验验证

利用有限元软件（ANSYS Maxwell）建立了直流励磁与交流励磁轨道涡流制动器的有限元模型。系统研究并对比直流励磁与交流励磁轨道涡流制动器运行速度、工作气隙、励磁电流、励磁频率等关键参数对制动性能的影响规律。为验证仿真与解析模型的准确性，设计并搭建了模拟高速运行的轨道涡流制动器测试平台，进一步验证直流励磁和交流励磁的性能对比以及次级材料的差异对制动性能的影响，将解析和有限元结果与实验测试数据进行对比，验证模型的准确性。进一步，对比不同次级材料（传统钢轨、高电导率铜合金、高磁导率硅钢等）对制动性能的影响。

3 结　论

交流励磁方式可通过调节励磁频率实现制动力的灵活控制，在低速区域仍能保持较大的制动力，而直流励磁方式在高速区域制动力较为稳定，但低速性能不足。另外，提高次级材料的电导率可增强涡流强度，从而提升制动力，但会加剧趋肤效应，减小有效作用深度；提高磁导率则有利于增大气隙磁通密度，但容易导致磁饱和，通过材料优化（如表面镀层或复合结构）可在不显著增加成本的前提下提升制动性能。

参考文献（References）：

[1] 李婧,曾明睿,张智博等.直线轨道涡流制动对高速列车制动动力学特性的影响[J].动力学与控制学报,2024,22,(6):68-79.
[2] 王立超,陈钊,王可等.永磁线性涡流制动的性能分析与试验研究[J].铁道机车车辆,2024,44,(4):1-8.
[3] 陈家敏,应博.磁悬浮列车涡流制动的效能分析与优化[J].铁道车辆,2022,60,(5):34-38.

收稿日期：2026 年 05 月 26 日.
基金项目：国家自然科学基金项目
作者简介：张俊鹏(2002－)，男，河南省南阳市，硕士研究生，主要从事涡流制动的研究；通信方式：17838771898@163.com

文章编号：484-124

基于扰动观测的 LSLSM 无模型预测电流控制

胡海林[1,2]，陈雨晖[1,2]，郭玮[1,2]
（1. 江西理工大学 电气工程与自动化学院，江西 赣州 341000；2. 磁浮轨道交通装备江西省重点实验室，江西 赣州 341000）

1 引 言

常导高速磁悬浮列车采用长定子直线同步电机（Long Stator Linear Synchronous Motor, LSLSM）牵引。列车高速运行所产生的剧烈振动、强电磁干扰、长距离馈电效应以及电机温升等因素导致电机等效磁链、电感等关键参数呈现时变性。本文研究了一种基于扰动观测的无模型预测电流控制策略，控制器仅引入系统的输入输出量，不考虑任何电机参数，有效抑制关键参数时变导致的控制性能衰减，提升了控制系统的鲁棒性。

2 无模型预测电流控制器设计

2.1 扰动观测

LSLSM 的超局部数学模型可以表示为：

$$\frac{di_s}{dt} = F + \alpha u_s \tag{1}$$

F 即为未知扰动量，构建一个以电流和扰动量为状态变量，以电流误差为反馈的扰动观测器：

$$\begin{cases} e_{rr}(k) = \hat{i}_s(k) - i_s(k) \\ \hat{i}_s(k+1) = \hat{i}_s(k) + T_s\left(\hat{F}(k) + \alpha u_s(k)\right) - \beta_{01} e_{rr}(k) \\ \hat{F}(k+1) = \hat{F}(k) - \beta_{02} e_{rr}(k) \end{cases}$$

(2)2.2 控制策略

根据超局部模型，参考电压矢量计算为：

$$\begin{cases} \boldsymbol{u}_d^{\mathrm{ref}} = \dfrac{\boldsymbol{i}_d^{\mathrm{ref}}(k+1) - \boldsymbol{i}_d^k}{\alpha T_s} - \dfrac{\hat{F}_d(k)}{\alpha} \\ \boldsymbol{u}_q^{\mathrm{ref}} = \dfrac{\boldsymbol{i}_q^{\mathrm{ref}}(k+1) - \boldsymbol{i}_q^k}{\alpha T_s} - \dfrac{\hat{F}_q(k)}{\alpha} \end{cases} \tag{3}$$

无模型预测电流控制框图如图 1 所示：

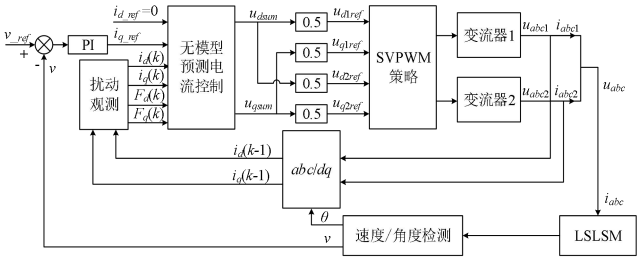


图 1 无模型预测电流控制框图

在此控制框架下电机仿真运行结果如图 2 所示：

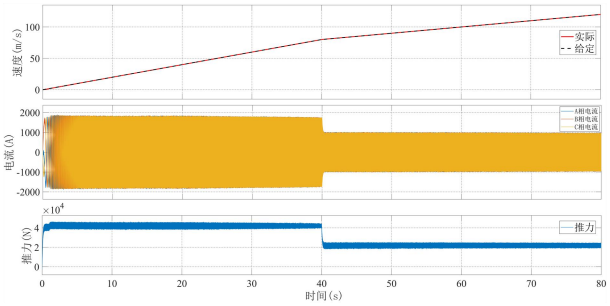


图 2 电机仿真运行结果

3 结 论

本文研究了基于扰动观测的无模型预测电流控制，运用 LSLSM 超局部模型进行扰动观测，构建控制系统无需电机参数，算法特性表现出较强的参数鲁棒性。仿真结果验证了该方法的有效性和可行性，为高性能 LSLSM 控制提供了一定参考。

参考文献（References）：

[1] WANG Feng-Xiang, WEI Yao, Rodriguez J, et al. State-of-Art, Development, and Challenges of Model-Free Predictive Control on Motor Drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, Vol.40(8): 10846-10864.

[2] LIU Xing, YANG Hui, CAI Shun, et al. A Novel Finite-Control-Set Model-Free Predictive Current Control Incorporating Event Triggering Mechanism for PMSM Drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, Vol.61(1): 322-334.

收稿日期：2026 年 05 月 27 日.

基金项目：高层次人才科研专项经费（205200100844）.

作者简介：胡海林(1984－)，男，江西赣州，副教授，博士，主要从事变流器控制技术、变流器可靠性研究的研究；通信方式：E-mail: huhailin@jxust.edu.cn、联系电话：18579055931.

文章编号：484-125

驻波磁通泵电磁特性与充磁性能研究

林衡[1]，马光同[2]，龚天勇[2]，周鹏博[1]，程隆超[1]，朱苗[1]
（1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031；2. 西南交通大学 电气工程学院，四川省 成都市 610031）

1 引　言

高温超导磁体在电动悬浮交通、强磁场装置和高效电力装备中具有重要应用价值。传统充磁方式依赖大电流引线，低温环境下会引入额外热负荷并降低系统效率。磁通泵可在无大电流引线条件下向超导闭合回路持续注入电流，是实现车载超导磁体轻量化、低热漏和长期稳定运行的重要技术途径。

驻波磁通泵通过在超导带材局部区域产生周期性交变磁场，使超导层形成受控动态电阻区，并将交变磁通作用转化为等效直流泵浦电压。与行波磁通泵相比，该结构紧凑、驱动方式灵活，适合空间受限的车载超导磁体充磁系统。本文建立驻波磁通泵电磁模型，分析关键参数对输出电压和充磁效率的影响。

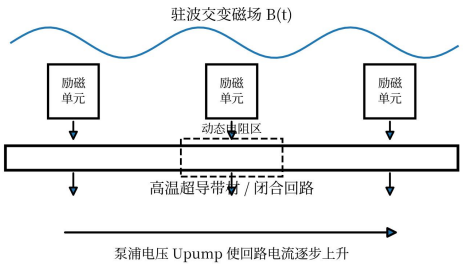
2 正　文

2.1 驻波磁通泵工作机理与模型建立

本研究建立驻波磁通泵二维电磁模型，模拟周期性驻波磁场作用下高温超导带材的电磁响应。采用 E-J 幂律描述超导非线性特性，分析磁通密度、电流密度、电场及平均输出电压，揭示动态电阻形成与负载电流上升机理。

2.2 多参数扫描与充磁性能分析

基于该模型开展参数化扫描，分析励磁电流幅值、频率、气隙距离、超导带材临界电流及负载电感等因素对磁通泵性能的影响。结果表明，增大励磁磁场可增强动态电阻区域，提高输出电压并加快充磁电流上升，但过大磁场会增加交流损耗并降低稳定性。适当提高频率可提升平均泵浦电压，过高则会加剧相位滞后和损耗；减小气隙有利于增强泵浦能力，但对装配精度要求更高。



1 驻波磁通泵工作原理示意图

3 结　论

本文建立驻波磁通泵电磁仿真模型，分析交变驻波磁场作用下超导带材的磁通穿透、电流密度重构及动态电阻形成过程。结果表明，驻波磁通泵可在超导闭合回路中产生等效直流泵浦电压，实现高温超导磁体持续充磁。励磁磁场幅值、频率和气隙距离是影响输出性能的关键因素，合理匹配可提高充磁效率并降低交流损耗，为结构设计与参数优化提供参考。

参考文献 (References)：

[1] Coombs T A, Campbell A M. Flux pumps for HTS magnets[J]. Superconductor Science and Technology, 2013, 26(9): 093001.
[2] Hoffmann C, Pooke D, Caplin A D. Flux pump for HTS magnets[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 1628-1631.

收稿日期： 2026 年 05 月 28 日.
基金项目： 国家杰出青年科学基金（52425702）.
作者简介： 林衡(2003－)，男，四川省南充市，硕士研究生，主要从事驻波磁通泵性能研究；
通信方式： lh1776122038@my.swjtu.edu.cn

文章编号：484-127

磁浮列车悬浮系统微小故障自愈控制研究

熊梓彤[1,2]，吉文[*1,2]，林国斌[1,2]

(1.同济大学 交通学院，上海 201804；2.同济大学 国家磁浮交通工程技术研究中心，上海 201804)

1 引　言

电磁悬浮系统是磁浮列车实现稳定运行的关键子系统，具有强非线性、开环不稳定和参数时变等特点。实际运行中，系统易受气动扰动、轨道不平顺、载荷变化以及传感器零偏、执行器效率下降等微小故障影响，导致悬浮间隙偏移和控制性能退化。已有增益调度控制方法可通过扰动变量在线调整控制参数，提高系统对扰动和载荷变化的适应能力，但对传感器、执行器及电磁参数微小故障缺少主动补偿。为此，本文提出一种故障估计增强型自愈增益调度控制方法，将扰动估计、故障估计与控制律重构相结合，实现磁浮列车悬浮系统微小故障下的性能恢复。

2 正　文

2.1 悬浮系统故障建模

针对悬浮系统中的外部扰动、载荷变化及传感器、执行器微小故障，本文将故障影响统一等效为附加扰动，并在传统增益调度控制基础上引入故障估计与控制重构机制。以单电磁铁悬浮系统为对象，其垂向动力学可表示为式（1）：

$$m\ddot{z} = mg + f_d - \frac{c}{4}\left(\frac{i}{z}\right)^2 \tag{1}$$

考虑实际运行中的微小故障，将执行器故障、传感器故障和参数故障分别建模为：

$$\begin{aligned} u_f(t) &= \eta_a(t)u(t) + b_a(t) \\ z_m(t) &= z(t) + b_z(t) + n_z(t) \\ R_f &= R + \Delta R(t), c_f = c + \Delta c(t) \end{aligned} \tag{2}$$

上述故障在早期通常不会导致系统立即失稳，但会表现为悬浮间隙稳态误差增加、控制输入补偿量增大及动态响应变慢。

2.2 故障估计增强型自愈控制方法（FE-SHGSC）

本文选取外部扰动估计值、等效故障估计值和执行器健康因子作为联合调度变量：

$$\rho(t) = [\hat{f}_d, \hat{f}_{fault}, \hat{\eta}_a]^T \tag{3}$$

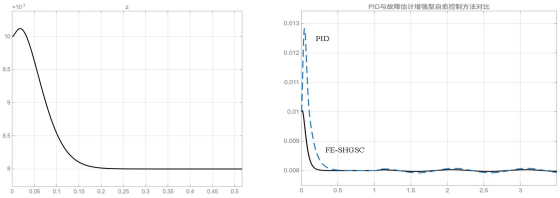
据此设计自愈增益调度控制律如式（4），在线调整反馈增益和平衡控制量。

$$u = sat\left\{\frac{1}{\hat{\eta}_a}[K^T(\rho)\Delta x + \bar{u}(\rho) - k_D\hat{D}]\right\} \tag{4}$$

当系统出现微小故障时，控制器根据估计结果自动补偿故障影响，实现悬浮间隙恢复；当残差超过安全阈值时，切换保守控制模式，避免系统失稳。

2.3 仿真与实验设计

为验证所提方法的有效性，建立单电磁铁悬浮系统非线性仿真模型，并在外部扰动、载荷变化及微小故障等工况下进行测试。仿真结果表明，所提方法能够有效抑制悬浮间隙波动，使系统快速恢复并稳定在 8mm 悬浮间隙，具有较好的鲁棒性、自适应性和微小故障自愈能力。



a FE-SHGSC 方法悬浮间隙图　b PID 与 FE-SHGSC 对比图

1 仿真结果图

3 结　论

本文针对磁浮列车电磁悬浮系统微小故障难以及时识别和主动补偿的问题，提出了一种故障估计增强型自愈增益调度控制方法。该方法在传统增益调度控制基础上，引入扰动—故障联合估计和执行器健康因子估计机制，将多种扰动及参数摄动统一纳入调度控制框架。通过构造联合调度变量，实现控制增益和平衡控制量的在线重构，使系统在微小故障发生后能够自动完成故障感知、补偿控制和性能恢复，提高磁浮列车悬浮系统运行安全性和鲁棒性。

参考文献（References）：

[1] 孙友刚，黄志创，林国斌，等. 基于多样化基神经网络的高速磁浮列车悬浮系统容错控制[J]. 交通运输工程学报，2025，25(2)：61-74.

[2] KIM Y C, KIM K H. Gain scheduled control of magnetic suspension system[C]//Proceedings of the American Control Conference. Baltimore: IEEE, 1994: 3127-3131

收稿日期：2026 年 06 月 02 日.

基金项目：国家自然科学基金（52572415）、国家高速磁悬浮交通技术重点实验室开放课题（ SKLM-SFCF-2025-002）

作者简介：熊梓彤(2003)，女，湖南株洲人，学士，主要从事磁浮列车悬浮控制技术的研究

通信方式：E-mail:2534262@tongji.edu.cn、联系电话:17501628229

文章编号： 484-128

磁浮列车车下设备吊耳设计与仿真对比研究

韩潇昱[1]，王运达[2]

（1.中车科技创新（北京）有限公司 六研究所，北京市 100000；2.长春轨道客车股份有限公司，吉林省长春市 130000）

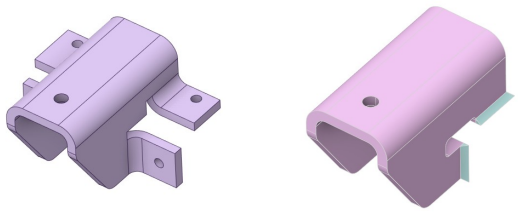
1 引　言

车下设备吊耳作为连接设备箱体与车体的关键承载部件，其结构强度直接影响列车运行安全.然而，现有研究主要集中于高铁及地铁车辆[1-2]，磁浮列车的运行载荷以及振动特征与轮轨列车存在显著差异，针对其吊耳结构的研究尚显不足.本文设计两种不同结构形式的磁浮列车车下设备吊耳，引入快速磁浮列车载荷功率谱密度数据，通过有限元仿真对比其静强度与疲劳特性，为磁浮列车车下设备吊耳结构选型提供参考.

2 磁浮列车车下设备吊耳结构设计与仿真

2.1 磁浮列车车下设备吊耳结构设计

如图1所示，基于可更换性和可靠性需求分别提出螺栓连接和焊接两种连接方式的吊耳结构.其中，螺栓连接型吊耳通过高强度螺栓与设备机箱实现紧固，可根据需求单独拆卸更换受损吊耳；焊接型吊耳直接焊接固定在设备机箱支撑梁的顶面和侧面，结构整体性更强.



a 螺栓连接型吊耳　　b 焊接型吊耳

1 两种吊耳的几何结构

2.2 磁浮列车车下设备吊耳冲击载荷仿真

按照实际机箱负载对两吊耳施加冲击载荷.结果显示，两种结构的最大冲击应力均小于材料许用应力，且具有一定安全系数.螺栓连接型吊耳在机箱侧螺栓位置产生较高应力.焊接型吊耳在焊缝处应力水平最高，但仅为螺栓连接型最高应力的25.25%.

2.3 磁浮列车车下设备吊耳疲劳仿真

根据快速磁浮车辆1类B级设备实测通用功率谱密度[3]，进行两种吊耳结构的疲劳仿真.其中焊接型吊耳模型对焊缝实体建模，使用结构应力法单独对焊缝进行疲劳分析.结果显示，两种结构的疲劳寿命均满足使用需求.

3 结　论

本文提出两种磁浮列车车下设备吊耳结构，并进行冲击和振动疲劳仿真，得到如下结论：两种结构均满足相应环境下静强度与疲劳寿命要求.相较之下焊接型吊耳具有更高的可靠性，实际使用须选用较高焊缝性能等级；螺栓连接型吊耳在安装和更换上能满足更灵活的需求，但在螺栓性能等级上须做考量.

参考文献（References）：

[1] 丁杰.高速动车组车下设备的吊耳动力学分析[J].西南交通大学学报,2024,59(1):168-176.

[2] 王媛媛,陈德强,欧士玺,等.地铁车辆车下设备吊挂结构及紧固件设计[J].内燃机与配件,2025,(13):43-45.

[3] 龙子凡,洪远卓,司恩,等.基于运营线实测数据的快速磁浮车辆设备振动试验标准研究[J].现代交通与冶金材料,2025,5(2):22-27.

收稿日期： 2026年06月03日.

作者简介： 韩潇昱(1997－)，男，河北唐山，工程师，硕士，主要从事车辆结构设计与仿真方向研究；

通信方式：xiaoyuhan0125@126.com

文章编号：484-129

高速磁浮轨道不平顺数据驱动反演方法研究

任冰[1]，孙友刚[1*]，郭春江[1]，赵小宁[1]
（1. 同济大学 交通学院 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海 201804）

1 引　言

轨道不平顺是影响高速磁浮列车运行平稳性的主要外部激励源。现有轨道不平顺检测主要依赖专用检测设备，而列车运行中的动态响应信息能够反映轨道状态特征。因此，本文基于高速磁浮车-磁-轨耦合动力学模型构建仿真数据集，提出一种基于 Attention-LSTM 的轨道不平顺反演方法。

2 正　文

2.1 高速磁浮车-磁-轨耦合动力学建模与数据集构建

基于多刚体动力学理论、电磁悬浮理论在 UM 平台建立高速磁浮车-磁-轨耦合动力学模型[1]。通过仿真获取车辆运行过程中的悬浮间隙、悬浮电磁力、悬浮架垂向加速度，构建轨道不平顺反演数据集。采用滑动时间窗口方法对数据进行样本划分，形成训练集和测试集，为深度学习模型训练提供数据基础。

2.2 Attention-LSTM 轨道不平顺反演模型

基于 Attention-LSTM 的轨道不平顺反演模型见图 1。

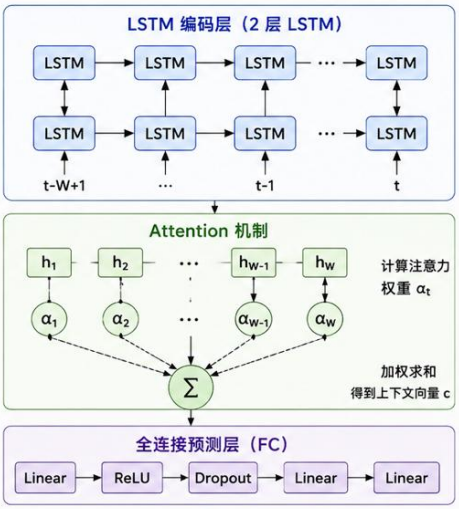


图 1 Attention-LSTM 轨道不平顺反演模型框图

训练结果见图 2，各工况下模型决定系数均达到较高水平，反演结果能够较好地反映轨道不平顺变化规律。研究结果验证了 Attention-LSTM 模型在高速磁浮轨道状态识别中的有效性，为利用车辆运行响应实现轨道状态在线监测提供了可行方案。

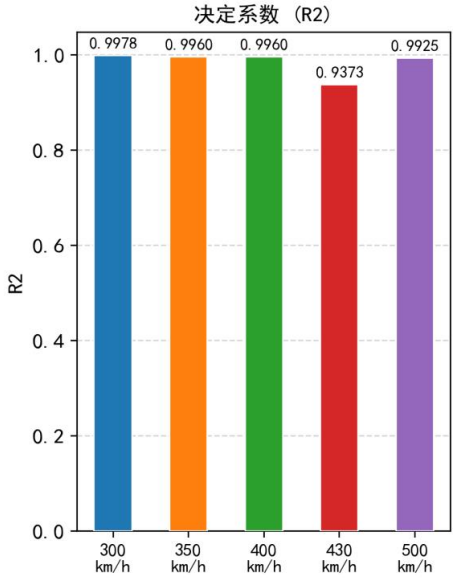


图 2 训练结果

3 结　论

本文建立高速磁浮车-磁-轨耦合动力学模型获得多工况动态响应数据。构建了基于 Attention-LSTM 的轨道不平顺反演模型，实现了车辆动态响应与轨道状态之间的非线性映射。

参考文献（References）：

[1] 王文，徐俊起，刘志刚，等. 轨道不平顺作用下 600 km/h 常导高速磁浮车轨耦合垂向振动分析 [J]. 振动工程学报，2026，39 (4)：907-916.

[2] LIU M, YE F, ZENG G. Research of the track irregularity spectrum of Shanghai high-speed transrapid demonstration line[J]. Vehicle System Dynamics, 2024, 62(8): 2054-2078.

收稿日期：2026 年 06 月 03 日.

基金项目：无

作者简介：任冰(2004－)，女，，主要从事磁悬浮智能控制技术的研究；
通信方式：E-mail: 2253654@tongji.edu.cn、联系电话:19190100095

文章编号： 484-131

适配于高速铁路供电网络的超导磁储能仿真优化研究

云闻文[1]，付琳[1*]，沈博洋[1]，吉文[1]
（1. 同济大学 交通学院 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海 201804）

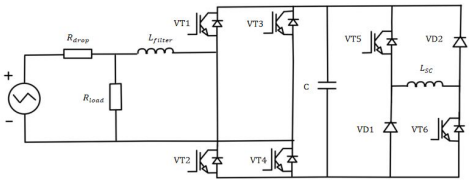
1 （引言）

高铁牵引负荷的强突变性易导致列车加速时网压深度跌落，制动时又易引发网压异常抬升与能源浪费。超导磁储能（SMES）凭借毫秒级响应和极高功率密度，在高铁瞬时功率调节中优势显著。本文旨在研究适配高铁供电网的 SMES 仿真优化策略，以提升列车运行的安全与稳定性。

2 正　文

2.1 联合仿真模型建立

搭建了单相 25 kV 高速铁路牵引供电系统与 SMES 的联合仿真模型。系统采用了“交流电源-牵引网线路-列车负荷-单相全桥变流器-双向 DC-DC 变换器-超导磁体”的核心拓扑结构。



1 适配高铁牵引网的 SMES 系统的仿真电路

2.2 典型工况补偿特性分析

针对高铁负荷强突变特性，储能侧设计了双向 Buck-Boost 变换电路，并结合离散 PI 控制策略动态调节占空比 D，实现系统能量的双向极速传输。充电放电时电路方程为：

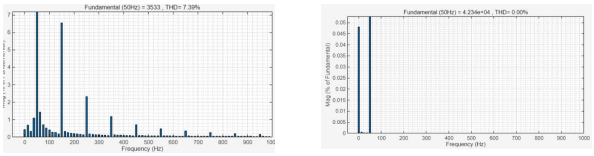
$$\begin{cases} L_{sc}\dfrac{di_{sc}}{d_t} = -R_{sc}i_{sc} + Du \\ C\dfrac{du}{dt} = i_{dc} - Di_{sc} \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} L_{sc}\dfrac{di_{sc}}{d_t} = -R_{sc}i_{sc} - (1-D)u \\ C\dfrac{du}{dt} = i_{dc} + (1-D)i_{sc} \end{cases} \tag{2}$$

2.3 典型工况补偿特性分析

为验证系统的可靠性，设置了涵盖牵引加速与再生制动两类共 12 组不同幅值（10%、20%）和变化速率的电压波动工况进行对比分析。

结果表明：在 20%深度暂降工况下，SMES 于 10ms 内极速响应，将网压由 19.96kV 补偿至 24.6kV 以上的安全域；在 20%网压抬升工况下，SMES 迅速吸收回馈电能，将高达 30.1kV 的越限网压抑制在 28.5kV 以下。



a 接入 SMES　　b 不接入 SMES

2 母线电流 FFT 图

3 结　论

基于 25kV 牵引网-SMES 联合仿真模型分析可知：SMES 能在毫秒级内抑制网压越限，将电压波动幅度由±20%压缩至±6%以内。不仅有效保障了行车安全，还实现了制动能量高效回收，显著改善了电能质量。

参考文献（References）：

[1] 钱清泉，高仕斌，何正友，等. 中国高速铁路牵引供电重要技术[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 9-20.
[2] 胡海涛，陈俊宇，葛银波，等. 高速铁路再生制动能量储存与利用技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(01): 246-256+391.

收稿日期： 2026 年 06 月 04 日.
基金项目： 国家自然科学基金（52572415）、国家高速磁悬浮交通技术重点实验室（SKLM-SFCF-2025-002）
作者简介： 云闻文(2003－)，女，在读本科生，主要从事磁浮列车悬浮控制技术的研究；
通信方式：E-mail: 2250480@tongji.edu.cn、联系电话:13340741885

文章编号： 484-132

基于 AI 的高速磁浮列车悬浮系统可靠性研究

李小庆[1,2,4]，陈琛[1,2]，张雨潇[1,2,3]，孙友刚[2]，徐俊起[2]

(1. 同济大学 交通学院，上海 201804；2. 同济大学 磁浮交通工程技术研究中心，上海市 201804；3. 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海，201804；4. 中车长春轨道客车股份有限公司，长春，130062)

1 引言

复杂扰动环境下的智能悬浮系统是高速磁浮列车稳定运行的关键保障。为量化悬浮控制系统可靠性，本文提出一种基于人工智能的悬浮控制系统自动在线评估方法，构建可靠性评估框架并设计状态评估在线排序算法，实现实时分析与及时补偿。结合悬浮系统特性，分析复杂扰动下的时空关联检测模型，确立综合可靠性分析策略，并提出可信鲁棒智能控制策略与预测模型。仿真与试验表明，所提方法可依据环境扰动引导悬浮间隙变化、选取合理系统状态完成控制量计算，验证了算法与模型的高可靠性。

2 悬浮系统性能可靠性分析

2.1 悬浮系统可靠性鲁棒控制策略

为解决悬浮系统受干扰面临的可靠性问题，本文提出了一种虚拟输出(VOP)分布式控制策略。

首先，对 N 个悬浮点 $i=\{1,2,...,N\}$ 进行状态检测，提取出其中异常点。将与悬浮点 i 相邻的悬浮点 j 的可靠度定义为 $c_{ij}(k)(\forall j\in N_i^-)$，且在初始时间的悬浮点 $c_{ij}(0)$ 设置为 0，由公式(1)来更新可靠度：

$$c_{ij}(k+1)=\begin{cases}\max\{c_{ij}(k)-1,0\},\text{如果悬浮点可疑}\\ c_{ij}(k),\ \text{其它}\end{cases}\tag{1}$$

对受到严重冲击的悬浮点，将其状态信息传递给相邻的悬浮点，其状态基于邻近悬浮点修改。因此，当一个悬浮点在受干扰过程中不能保持自身稳定时，相邻的悬浮点接收上位机的悬浮命令，有效地覆盖上述不稳定的悬浮点，确保基准悬浮间隙等于实测悬浮间隙，使整个列车悬浮完全可控。

2.2 悬浮系统性能可靠性评估

本文将单时域法和跨时域法结合起来评估悬浮系统性能的可靠性。整个可靠性评估过程为：首先，从列车控制单元获取每个悬浮系统的状态信息和预期数据集信息。随后，基于收集的信息，使用在线排队算法构建预测序列，以评估系统可靠性。之后，预测的序列以警报的形式反馈到操作界面。最后，参考告警信息，对可能触发下一次系统故障的悬浮点采取参数修正、冗余替换等改进措施，确保整个磁浮列车所有悬浮系统无故障运行。

悬浮系统的可靠性分析结果如图 1 所示。由图 1 可知，在 VOP 接收命令的动态调整过程中，系统在初始调整阶段对干扰具有较高的敏感度，可靠性相对较弱，但一段时间后其可靠性显著提高。同时，计算无干扰下的悬浮间隙时，系统可靠性相对较低。悬浮控制系统能基于复杂环境影响特点，在 VOP 计算的基础上有所预备，合理计算控制电流以抵抗干扰。

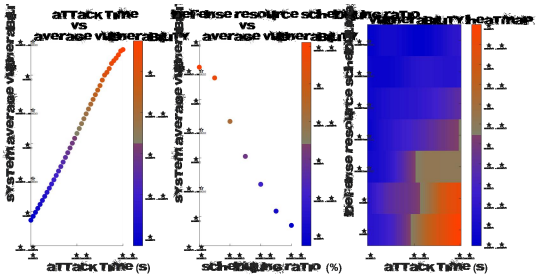


图 1 协同控制动态过程对系统可靠性的影响

3 结　论

本文提出一种基于机器学习的悬浮系统在线可靠性自动评估方法，提高了多因素干扰下的响应速度和鲁棒性，全面增强了系统的稳定性。

参考文献 (References)：

[1] 张文清. 基于磁通反馈的悬浮控制方法研究及实现[D]. 国防科学技术大学, 2014.

[2] 谢云德, 常文森, 尹力明. 磁悬浮列车系统轨道动力学分析与试验研究[J]. 国防科技大学学报, 1997, (5):58-63.

收稿日期： 2026 年 06 月 04 日.

基金项目： 国家自然科学基金重点项目（52232013）；国家自然科学基金青年项目（C 类）（52502449）.

作者简介： 第 1 作者(1990 年)，男，辽宁省锦州市义县，高级工程师，硕士学位，主要从事磁浮车辆、悬浮控制研究 通信方式：li827702336@163.com:联系电话 17390071995

文章编号：484–133

高温超导磁悬浮垂向阻尼动态识别系统设计与实验测试

王子涵，欧阳晨曦，郑珺

（西南交通大学，轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031）

1 引言

高温超导磁悬浮凭借无接触、低能耗等优势成为轨道交通研究热点，依托磁通钉扎实现被动无源悬浮，悬浮刚度与阻尼受工况影响呈非线性时变特征，精准实时识别电磁阻尼参数是悬挂优化与安全运行的关键。现有主流振动衰减法仅能单点瞬时测参，无法实时自动测算阻尼。本文针对该短板，从理论、软硬件层面设计搭建阻尼动态识别系统，并通过激振与高速模拟试验完成性能验证，该系统可为车辆阻尼自适应调控、故障预警提供数据与技术支撑。

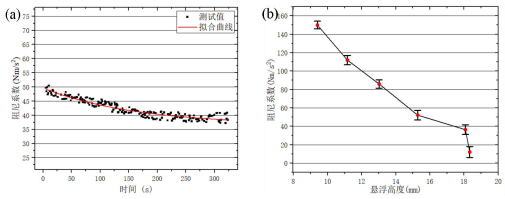
2 系统结构与测试

针对高温超导磁悬浮运行激励随机、悬浮力无法直接实测的难题，本文以半功率带宽法与频响函数相结合，实现随机激励下的阻尼参数测试；以磁场信号等效替换悬浮激励力进行计算，解决了悬浮力测量难题，依靠半功率带宽法完成阻尼系数与阻尼比的求解，满足随机工况下阻尼在线识别需求。

阻尼动态识别系统测试硬件由传感器、供电电路、信号调理、数据采集四部分组成，利用霍尔元件采集磁场数据、激光位移传感器获取振动响应，二者共用回路实现同步采样。硬件采用干电池供电规避工频干扰，经二级稳压分别输出 12 V、5 V 适配两类传感器，并搭配 RC 滤波电路削减电源杂波。

阻尼动态识别系统软件基于 LabVIEW 开发，旨在实现阻尼全自动实时辨识。后台程序分为采集、滤波、缓存、频谱、半功率求解、阻尼计算六大模块。软件引入环形缓存，破解了计算精度与计算速率的矛盾，实现了 0.031 Hz 频谱分辨率、2 Hz 阻尼计算速率，并依托算法自动拾取特征频率点求解阻尼参数，配套波形调试、数据存储等辅助功能，最终构成完整的自动化测控软件。

为了验证阻尼动态识别系统可行性，分别在静载激振台与高速模拟试验平台完成试验验证。结果表明，在阻尼系数超 50 Ns/m 时误差低于 10%，超 150 Ns/m 时误差不足 2.7%。该识别方案适配高温超导磁悬浮全工况测试需求。



a 连续阻尼测试结果　　b 测试结果误差棒图

图 1 测试数据

3 结论

本文基于半功率带宽法和 LabVIEW 平台搭建出阻尼动态识别系统，实现了悬浮系统电磁阻尼全自动连续测算。多类型试验表明系统测量精度优良。该系统弥补了动态测试短板，可为磁悬浮减振调控与工程化提供前期支撑。

参考文献(References)：

[1] 杨昆茂.基于改进半功率带宽法的结构阻尼比识别理论研究[D]. 大连理工大学,2021.DOI:10.26991/d.cnki.gdllu.2021.001177.

[2] Pintelon Rik, Johan Schoukens. Measurement of frequency response functions using periodic excitations, corrupted by correlated input/output errors. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(6): 1753-17.

[3] Zheng J, Wang Z, Zhang S, et al. Vertical nonlinear damping experiments and identification of high temperature superconducting levitation above permanent magnet track[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 6005911.

收稿日期：2026 年 06 月 04 日.

基金项目：国家自然科学基金（52375132）.

作者简介：王子涵(1999)，男，四川，博士，主要从事高温超导磁悬浮电磁阻尼的研究；通信方式：1046092077@qq.com

文章编号：484-134

基于BIM与NSGA- II的磁浮轨道梁施工期动力参数多目标优化

徐文轩 [1]
(1.同济大学 交通学院，上海 2001804)

1 引言

磁浮交通系统对轨道梁动力特性要求极高，施工期参数偏差如几何尺寸、预应力水平、材料不均匀等会导致运营期振动加剧、舒适性下降，且后期难以补救。传统施工组织仅关注工期与成本，忽视动力学性能优化。BIM 技术虽能提供参数化信息，但与智能优化算法之间存在“数据鸿沟”。为此，本文提出一种基于 BIM 与 NSGA-II 的磁浮轨道梁施工期动力参数多目标优化方法，实现“振动响应-工期-成本”的协同优化。

2 方法

2.1BIM 信息提取与参数映射

利用 Revit 建立 24m 标准跨磁浮轨道梁参数化 BIM 模型，包含几何尺寸，材料属性及预应力筋布置。基于 IFC4.3 标准与 Python/IfcOpenShell 构建“BIM 参数-动力学参数”映射规则库，自动提取决策变量：梁高 h（1.8~2.1m）、预应力系数α（0.7~0.9）以及 7 道关键工序的正常/最短持续时间，转化为结构化输入数据。

2.2 多目标优化模型

以频率偏差、工期和成本最小化为目标，以梁高 h、预应力系数α及工序时间 ti 为决策变量，建立多目标优化模型。工期由关键路径法计算，成本含直接与间接部分；约束包括工序逻辑、时间边界及频率下限（≥7.8Hz）。采用 MATLAB 调用 ANSYS 进行频率计算，嵌入 NSGA-II 算法求解帕累托前沿。

2.3 求解与对比

采用经典 NSGA- II 算法（种群 100，迭代 200 代）求解帕累托前沿。为验证算法可靠性，对离散工序时间组合与连续变量 h、α 离散化后，可结合枚举法进行对比。

3 结果与分析

以某磁浮试验线标准跨轨道梁为例，优化得到一组帕累托最优解集。工期范围为 9~13.5 天，成本范围为 24~29 万元，频率偏差从初始约 7%可降至接近 0。经熵权法推荐平衡型方案：工期约 11 天、成本约 26 万元、频率偏差约 3%，相比初始设计，在成本基本不变的前提下，工期明显缩短、振动偏差显著降低。

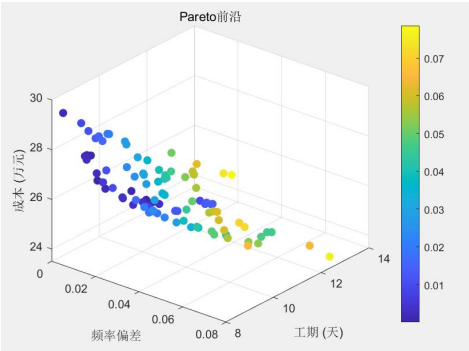


图 1 Pareto 前沿图

参考文献（References）：

[1]Deb K ,Agrawal S ,Pratap A , et al.A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II.[J].IEEE Trans Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.

[2]张波.中低速磁浮铁路轨道简支梁预制场规划研究[J].铁道工程学报,2018,35(10):73-78.

[3] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学（上册）[M]. 4 版. 北京：科学出版社，2015.

收稿日期：2026 年 06 月 05 日.

基金项目：无

作者简介：徐文轩(2003－)，男，上海，本科生，研究方向为 BIM 与智能建造；通信方式：101422227@sues.edu.cn、15795178878

文章编号：484-135

面向 600km/h 超导磁浮列车的新型起落架系统

曲铭鑫[1]，王运达[2]，秦强[3]

(1.中车科技创新有限公司科创六研究所，北京市 邮编 100192；2.中车长春轨道客车股份有限公司，吉林省长春市 邮编 130113；
2.中车长春轨道客车股份有限公司，吉林省长春市 邮编 130113)

1 引言

当前，国内外既有超导磁浮列车的起落架、导向轮通常采用分立式设计，各部件由独立的控制器或液压回路分别驱动，缺乏统一的时序协同，同时也没有降低风阻的底板结构。这导致以下问题：其一，起落架与导向轮的动作之间没有时序联动，容易造成导向轮机械干涉与损坏；其二，没有底板结构会导致超高速下列车的风阻过大，影响列车列车空气动力学。

为解决上述问题，本文提出一套由起落架、导向轮、底板组成的新型液压执行系统，并将三者纳入统一的协同控制框架。起落架承担列车低速走行、静态支撑和制动承载，是制动安全的核心执行部件；导向轮在起落架放下后伸出，为列车在曲线通过或侧风工况下提供辅助横向导向，弥补低速时电磁导向力的不足；底板则在起落架放下动作前自动打开，提供无障碍运动空间，并在起落架收起锁定后关闭，保证列车高速运行时的气动外形完整性。三者通过控制系统统一调度，实现严格的时序联动和故障协同处理。

2 正　文

起落架：采用液压缸驱动，比例阀调节流量，位移传感器（精度 0.1mm）实时反馈位置，上下位锁实现到位后的机械锁定。设计缘由在于传统方案无法满足 200km/h 高速放下的同步精度要求（需≤5mm），到位后有反馈信号。

导向轮：为弥补超高速曲线通过和侧风工况下电磁导向力的不足，增加液压驱动导向轮。采用液压缸驱动。导向轮仅在起落架放下且锁定后伸出，起落架收上指令发出后收回，到位后有反馈信号。

底板：为起落架收放提供无障碍空间，同时保证列车高速运行时的气动外形完整性。底板由电机驱动，在起落架动作前自动打开，完全到位后起落架方可解锁；起落架收上并且锁定后底板自动关闭，到位后有反馈信号。

协同框架：基于速度阈值（150km/h 起落架收上，200km/h 起落架放下）或者控制指令，实现底板→起落架→导向轮的严格时序联动。所有到位信号经控制器确认；动作超时自动上报故障并触发备用逻辑。该框架将三个独立子系统整合为统一的执行体系，解决了分立设计常见的时序错乱。

3 结　论

本文提出的新型起落架、导向轮、底板系统已应用于中车超导磁浮液压控制功能样机，其协同框架填补了国内在“三位一体”执行机构统一控制方面的空白。后续将在此基础上进一步研究同步算法与故障容错策略。

参考文献（References）：

[1] 张卫华. 高速磁浮列车关键技术研究进展[J]. 中国铁道科学，2023,44(2):1-10.

[2] 李芾,黄运华,傅茂海. 磁浮列车制动系统设计与分析[J]. 机械工程学报，2022,58(10):120-128.

收稿日期：2026 年 06 月 05 日.

基金项目：项目名称（编号）；项目名称（编号）.

作者简介：第 1 作者(出生年 1990－)，性别男，籍贯(吉林省、通化市/县)，职称工程师，学位硕士，主要从事超导磁浮列车液压系统控制的研究；通信方式：E-mail:645069186@qq.com、联系电话 18543589283

文章编号：484-136

基于 SA-WGAN-GP 的超导悬浮器典型状态识别

庞 鹏[1]，闫亮[1]，聂诗南[1]，杨浩[1]，杨博[1]，郑珺[1,*]
（1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610000）

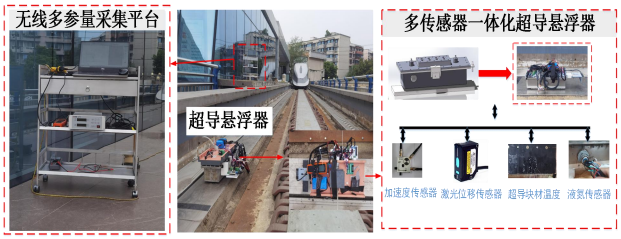
1 引言

本文提出了一种典型的超导悬浮体状态识别方法，该方法结合了自注意（SA）、Wasserstein 生成对抗网络（WGAN）和梯度惩罚（GP）以及卷积神经网络（CNN）。首先，建立了一个多参数采集平台，研究了不同液氮含量、不同速度和不同负载下超导悬浮体的热振动特性。其次，构建了 SA-WGAN-GP 来增强不同状态下的振动数据。最后，提取了振动信号的 20 个典型时域、频域和时频域特征，被用作 CNN 的输入，相应的温升状态被用作输出。研究了不同数据增强下的状态识别结果，找到了最合适的数据增强尺度。本文提出的方法为高温超导磁悬浮列车的故障诊断提供了一种有效方法。

2 正 文

2.1 多传感器一体化超导悬浮器平台

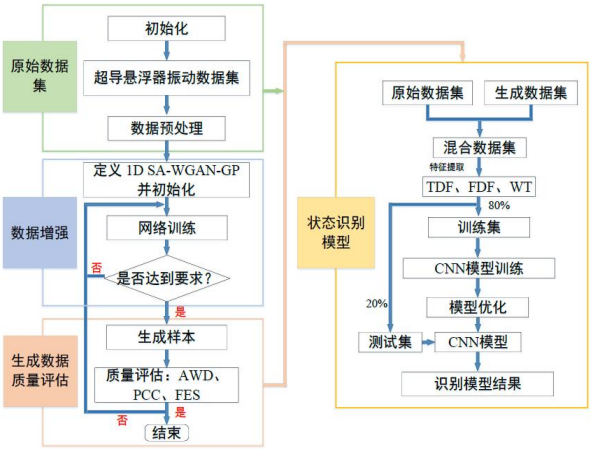
实验在工程 165m 实验线上进行。由于数据采集卡的有效传输范围在 40m 以内，为保证数据传输的有效性，本实验选择的运行距离为 30m。选择的运行速度为 3.6km/h、7.2km/h 和 10.8km/h。液氮含量分别为 100%、40%和 20%。为了研究超导悬浮体在不同负载下的动态特性，在悬浮体顶部放置了铅块作为加载机构。每个导块重 37N，研究了 74N、111N、148N、185N 和 222N 载荷下的热振动特性，如图 1 所示为实验现场及结构。



1 实验示意图

2.2 状态识别过程

状态识别过程如图 2 所示：首先，将随机噪声 z 输入生成器，以生成与源数据分布非常相似的数据。然后，将生成的数据和振动数据输入判别器进行比较。判别器的目标是尽可能准确地分辨输入数据，最后，降不同的数据规模输入神经网络，进行运行状态识别准确率的对比。



2 状态识别框架图

3 结 论

在超导悬浮器不同速度和负载工况下的实验结果表明，SA-WGAN-GP 生成的增强数据能较好地适应工况变化状态识别准确率得到显著提升。不同负载下的识别准确率从 60.00%提升至 86.67%，10.8 km/h 下不同液氮液位的状态识别准确率从 50.00%提升至 93.33%，验证了所构建网络与方法在超导悬浮器状态监测中的实际应用潜力。

参考文献（References）：

[1] Pang Peng, Zheng Jun, Yang Hao, et al. Thermal-Vibration analysis for superconducting levitator under different liquid nitrogen content and loads based on a novel wireless multiparameter data monitoring platform[J], IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 1-13.

[2] Sun Y, Xu J, Qiang H, et al. Adaptive Neural-Fuzzy Robust Position Control Scheme for Maglev Train Systems With Experimental Verification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 8589-8599.

收稿日期： 2026 年 06 月 05 日.

基金项目： 国家自然科学基金委面上项目（52375132）.

作者简介： 庞鹏(1993－)，男，河南省驻马店市，助理研究员，博士，主要从事高温超导磁浮机电耦合及智能化研究；E-mail:pangp@swjtu.edu.cn

文章编号：484-137

因果正则化 LSTM 的悬浮斩波器 IGBT 寿命预测

林大选[1,2]，任冰[1,2]，赵小宁[1,2]，孙友刚[*1,2]
(1.同济大学 交通学院，上海 201804；2.同济大学 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海 201804)

1 引言

绝缘栅双极型晶体管（IGBT）作为磁浮列车悬浮斩波器的功率器件，其工作状态直接影响悬浮系统稳定性[1]。高速工况下的结温波动加速 IGBT 退化，开展剩余使用寿命（RUL）预测对设备整体运维水平至关重要。数据驱动神经网络已广泛用于 IGBT 的 RUL 预测，但在多结温场景的诊断中易出现灾难性遗忘。弹性权重固化（EWC）及分块对角弹性权重巩固（BDEWC）[2]虽利用 Fisher 约束缓解遗忘，但存在阈值经验赋值的缺陷，难以适配复杂退化场景。

为此，本文提出因果正则化注意力长短期记忆（CR-AMLSTM）持续学习模型。该模型基于结构因果模型构建自适应正则化机制，实现核心权重的筛选，满足复杂持续学习场景下预测需求。

2 正 文

2.1 注意力 LSTM 时序编码器

采用 LSTM 网络建模 IGBT 集电极-发射极饱和压降（Vce）的退化时序，通过遗忘门、输入门和输出门的协同更新捕获长程依赖。引入多头注意力机制提取退化阶段的特征。上下文向量经全连接层映射为 Vce 预测值，并进一步计算 RUL。

2.2 因果正则优化的 BDEWC

依次计算数据分布特征、梯度范数、参数约束强度、预测结果，形成因果关联。基于该链式依赖关系构建结构因果方程，以带正则项的线性模型拟合因果映射关系，完成结构因果模型的构建。基于该因果模型明确 BDEWC 中的需保留的重要参数。

2.3 持续学习 RUL 预测流程

CR-AMLSTM 模型依次执行以下步骤：1、对不同场景下 IGBT 的退化曲线进行持续学习设置。2、利用注意力增强 LSTM 提取时序特征。3、计算分层分块对角 Fisher 矩阵，结合结构因果模型识别因果关系，并引入正则化项抑制遗忘。4、对测试数据进行 Vce 预测并计算 RUL。

表 1 持续学习结果 R^2 对比

Model	设备 1	设备 2	设备 3	设备 4
LSTM	0.8947	0.8261	0.8472	0.8241
BDEWC-AMLSTM	0.9550	0.9487	0.9233	0.9357
CR-AMLSTM	0.9663	0.9601	0.9536	0.9619

3 结 论

基于 NASA 的 IGBT 加速老化数据集[3]的持续学习实验表明，本文所提 CR-AMLSTM 模型在设备 1 至设备 4 的 R^2 值分别为 0.9663、0.9601、0.9536、0.9619，均高于 LSTM 和 BDEWC-AMLSTM，预测精度与稳定性更优。为磁浮列车悬浮斩波器 IGBT 全生命周期健康管理提供可靠技术支撑。

参考文献 (References)：

[1] 高明.磁浮列车悬浮斩波器 IGBT 寿命预测技术研究[J].铁道机车与动车,2021,(201): 25-32，6.

[2] LI T, WANG E Y, LIU X P, et al. An block-diagonal elastic weight consolidation-attention mechanism LSTM enabled lifelong learning approach for lifetime prediction of insulated gate bipolar transistor[J]. Expert Systems with Applications,2026,299:130015.

[3] SONNENFELD G, GOEBEL K, CELAYA J R. An agile accelerated aging, characterization and scenario simulation system for gate controlled power transistors[C]. IEEE AUTOTESTCON,2008.

收稿日期：2026 年 06 月 06 日.

基金项目：国家自然科学基金（52522217，52441203）.

作者简介：林大选(2001－)，性别，(浙江、温州)，博士，主要从事磁浮智能运维、故障诊断的研究；通信方式：E-mail:118157728303@163.com、联系电话 18157728303

文章编号：484-139

高速磁浮车载电网动态特性仿真

张嘉懿[1,2]，徐俊起[1,2]，陈琛[1,2]

（1. 同济大学 交通学院，上海 201804；2. 同济大学 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海 201804）

1 引言

高速磁浮列车车载电网承担运行系统和负载的供电任务，其动态稳定性直接关系车辆运行安全。近年，高速磁浮直线发电机建模、牵引供电系统仿真及 600 km/h 高功率牵引系统虚拟仿真已成为车载供电研究的重要方向[1-2]。车辆运行过程中，直线发电机、供电轨、蓄电池及负载状态不断变化，导致 440V 直流母线产生动态波动。为分析车载电网电源—负载耦合特性，结合 440 V 电网结构、升压斩波器原理及仿真结果，研究母线电压、蓄电池电压和负载电流的变化规律，为车载供电系统优化提供依据。

2 正 文

2.1 车载电网结构与原理

如图 1 所示，车载 440 V 直流电网由直线发电机、外部供电轨、升压斩波器、蓄电池和多类负载组成。低速阶段主要由供电轨供电，速度升高后直线发电机输出能力增强，并经升压斩波器向直流母线供电；当输入功率不足时，蓄电池参与放电，补充负载所需能量。

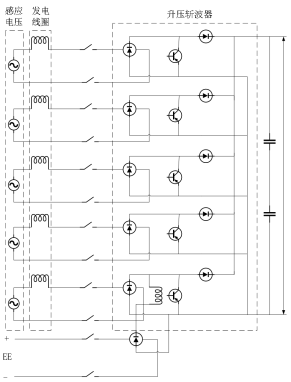
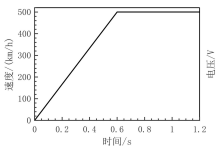
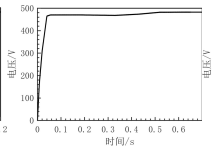


图 1 升压斩波电路与电网关系图

2.2 车载电网动态仿真分析

如图 2 所示，车辆运行过程中，升压斩波器输出电压、蓄电池电压和负载电流均随速度变化而动态响应。车辆启动后，升压斩波器输出电压逐步建立；当受流器脱离供电轨后，直线发电机在低速过渡阶段输出不足，母线电压出现小幅下降，蓄电池参与放电补偿功率缺口；随着速度升高，直线发电机输出能力增强，母线电压逐渐恢复稳定。负载电流随车辆运行状态变化，说明车载电网电源侧与负载侧存在明显耦合关系。





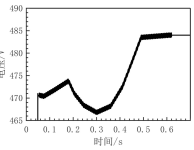


图 2 车辆速度曲线图 3 升压斩波器输出电压波形(1)、(2)

3 结 论

仿真结果表明，车辆运行过程中升压斩波器输出电压、蓄电池电压及负载电流随工况变化而动态响应。受流器脱离供电轨后，直线发电机在低速阶段输出不足，蓄电池能够补偿功率缺口；随着速度升高，母线电压逐渐恢复稳定。结果验证了车载电网模型对电源—负载耦合过程的描述能力，可为升压斩波器控制和蓄电池能量管理优化提供依据。

参考文献 (References)：

[1] Ding S S, Han W T, Sun J J, et al. Modeling and Analysis of a Linear Generator for High Speed Maglev Train[J]. IEEE Access, 2021, 9: 24637-24645.

[2] Zou Z, Zheng M, Lu Q. Modeling and Simulation of Traction Power Supply System for High-Speed Maglev Train[J]. World Electric Vehicle Journal, 2022, 13(5): 82.

收稿日期：2026 年 06 月 07 日.

基金项目：无

作者简介：张嘉懿(2002－)，男，河南平顶山人，学士，主要从事载运工具驱动与控制的研究；通信方式：E-mail:15237500657@163.com

文章编号：484-140

基于 DDPG-BFB 的悬浮间隙控制方法

朱恩佳[1,2]，陈琛[1,2]，徐俊起[1,2]
（1. 同济大学 交通学院，上海 201804；2. 同济大学 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海 201804）

1 引言

悬浮系统是磁浮列车的核心系统，其控制性能直接影响运行安全性和乘坐平稳性。PID 控制器应用广泛，但参数整定依赖经验，在复杂工况下难以兼顾响应速度和控制精度。BFB 控制器利用有界非线性函数构造控制律，能够限制控制输入幅值，提高系统平稳性和扰动抑制能力，但其参数整定较为复杂。针对上述问题，本文提出一种基于 DDPG-BFB 的悬浮间隙控制方法，利用深度强化学习优化 BFB 控制器参数，以提高间隙稳定性和抗扰性能。

2 DDPG-BFB 控制框架与仿真分析

2.1 DDPG-BFB 参数整定方法

本文采用 BFB 控制器对悬浮间隙进行控制。该控制器利用 tanh 等有界非线性函数构造控制律，限制反馈项输出幅值，使控制电流变化更加平滑，减少输入突变和剧烈振荡，提高系统扰动抑制能力。为提高参数整定效率，本文引入 DDPG 算法进行寻优。DDPG 适用于连续动作空间，可直接输出连续参数增量，适合 BFB 控制器多参数耦合的整定问题。

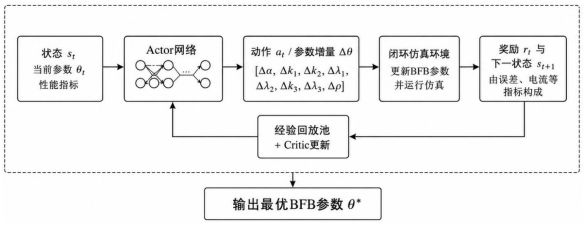
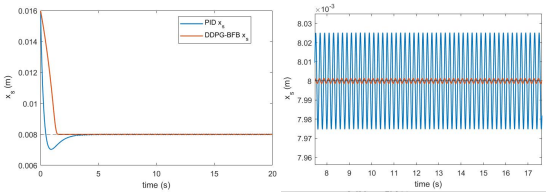


图 1 DDPG 寻参流程图

2.2 仿真结果

仿真结果表明，存在力扰动的情况下，DDPG-BFB 控制器在仅增加约 1.31%电流 RMS 的情况下，相比 PID 控制器，DDPG-BFB 的扰动后 RMS 误差降低约 94%，峰峰值降低约 94.11%。同时，两种控制方法的电流均方根值接近，说明 DDPG-BFB 控制效果较好。



a 悬浮间隙　　b 局部放大图

图 2 仿真结果

3 结　论

本文提出一种面向有界有限控制器的 DDPG 参数整定方法，保留了 BFB 控制输入有界、结构连续的特点，同时提高了参数整定效率。仿真结果表明，该方法能够减小悬浮间隙波动，提高系统抗扰性能。

参考文献（References）：

[1] Li X, Zuo Z, Wang G, et al. Bounded-Function-Based Schemes for Finite-Time Control of a NWMR With Input Constraints[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2025.

[2] Chen C, Zhu E, Xu J, et al. Research on Electromagnetic Suspension Vibration Isolation Experiment and Performance Optimization Under Composite Excitation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2026, 75: 1-13.

收稿日期：2026 年 06 月 07 日.

基金项目：无

作者简介：朱恩佳(2002 年 7 月)，男，上海市崇明区，硕士在读，主要从事悬浮控制的研究；E-mail:2534316@tongji.edu.cn。

文章编号：484-141

基于分数阶滑模控制的高速磁浮车两点悬浮控制

王珊[1,2]，王鑫阳[2]，徐俊起[1,2]

（1.同济大学 磁浮交通工程技术研究中心，上海 201804；2.同济大学 交通学院，上海 201804）

1 引言

针对电磁悬浮系统的控制问题，PID 控制因其参数整定依赖经验，对系统非线性和外部扰动的适应能力有限。分数阶滑模控制（Fractional-Order Sliding Mode Control，FOSMC）通过将分数阶微分算子引入滑模面设计，在保持滑模控制鲁棒性的同时，有望改善系统的动态性能并抑制抖振。

2 系统动力学与控制模型搭建

2.1 两点悬浮动力学搭建

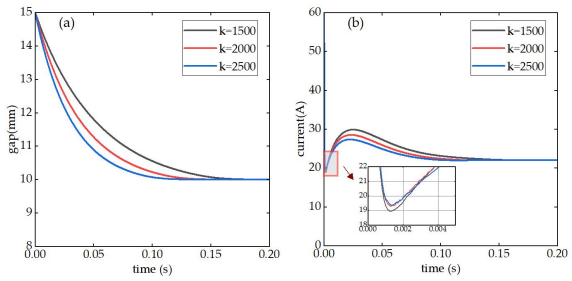
由于左段模块与右段模块之间存在搭接结构，根据牛顿第二定理，推导系统运动学方程为。

2.2 FOMSC 控制策略及其稳定性分析

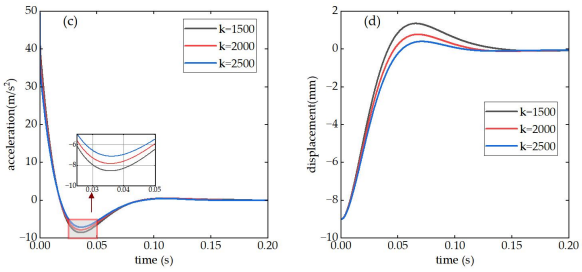
Grünwald-Letnikov 定义因其数值可实现性与计算高效性，将其引用至 FOMSC，得到高速磁浮分数阶滑模控制策略如下：

$$i_c = i_{ref} + \frac{2m_a\delta_{ref}^2\dot{\delta}}{\mu_0 N^2 A i_{ref}} + \frac{i_{ref}}{\delta_{ref}}\dot{\delta} + \frac{2m_a\delta_{ref}^2(\varepsilon sat(s) + ks)}{\mu_0 N^2 A i_{ref}} \quad (1)$$

3 FOSMC 参数分析



a 悬浮间隙　　b 控制电流



c 托臂加速度　　d 托臂位移

1 FOSMC 参数分析

FOSMC 控制方法中有五个关键参数：k、λ、ϕ、ε 和 α。为了研究每个参数对控制性能的影响，采用控制变量法对每个参数进行了仿真分析。

4 结　论

本文通过仿真分析得到分数阶滑模控制参数优化与动态性能。

1）通过控制变量法对关键参数进行分析与优化，最终选取合适的控制参数，最终选取分数阶阶次α=0.5、滑模面参数λ=80、指数收敛因子k=2000、切换增益ε=40、边界层厚度φ=0.02。

2）使得 FOSMC 控制下系统调节时间为 0.1 s，超调量保持零，相比传统 PID 控制（调节时间 0.406 s、超调量 22.18%）显著提升了响应速度与稳定性。

参考文献（References）：

[1] Sun Y, Xu J, Qiang H, et al. Adaptive sliding mode control of maglev system based on RBF neural network minimum parameter learning method[J]. Measurement 2019, 141: 217–226.

[2] Chen C, Xu J, Lin G, Sliding mode bifurcation control based on acceleration feedback correction adaptive compensation for maglev train suspension system with time-varying disturbance. IEEE Trans. Transp. Electr. 2022, 8: 2273–2287.

收稿日期：2026 年 06 月 07 日.

基金项目：国家重点研发计划(2023YFB4302500)；国家自然科学基金(52232013).

作者简介：王珊(1996 年－)，女，四川省自贡市，博士研究生，主要从事磁浮车辆动力学与控制的研究；通信方式：E-mail:2311638@tongji.edu.cn、联系电话:15608189928

文章编号：484-142

轨道不平顺下磁浮类免疫 PID 控制性能研究

黄佳铭[1,2]，吉文[*1,2]，陈琛[1,2]

（1. 同济大学 交通学院，上海市 嘉定区 201804；2. 同济大学磁浮交通工程技术研究中心，上海市 嘉定区 201804）

1 引言

在众多磁浮悬浮控制算法中，PID 算法由于优秀的鲁棒性以及算法简单等优点仍处于主流地位。但该算法无法动态调整增益以面对列车运行时工况的变化[1]。受到生物免疫系统启发，在高速磁浮列车悬浮控制算法的参数可以引入类免疫机制，实现面对复杂工况时控制器增益动态可调。本文基于该理论，探究类免疫机制在悬浮控制中应用的可能.

2 类免疫机制下的 PID 控制

2.1 类免疫理论

基于生物免疫的机制，工况类比为抗原，PID 算法的增益 Kp、Ki 和 Kd 增益类比为抗体。参考生物在受到抗原侵袭时，抗体迅速分化，抵抗外界病原体。在本研究中面对轨道不平顺扰动时，增益基于适应度函数动态变化，匹配不同轨道不平顺，适应度越低表示抗体和抗原匹配度更好.

本研究选择的适应度函数 ΔJ_{IAE} 是悬浮间隙误差 $e(t)$ 的绝对值在仿真时间 T 内的积分在更新周期的变化量：

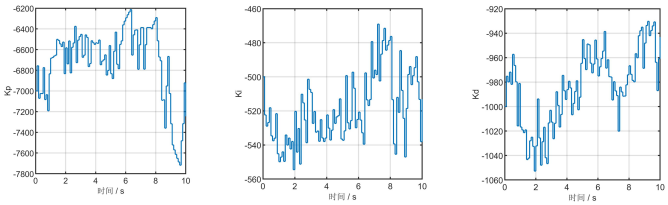
$$J_{IAE}=\int_0^T |e(t)|dt \tag{1}$$

$$\Delta J_{IAE}=J_{IAE}(t_k)-J_{IAE}(t_{k-1}) \tag{2}$$

式(2)中 t_k 为 k 个更新周期所经过的时间。

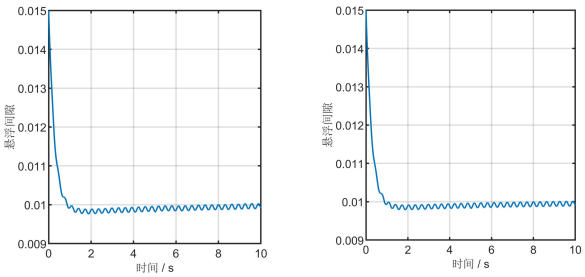
2.2 增益动态变化

设置初始悬浮间隙为 15mm，目标悬浮间隙为 10mm，轨道不平顺设置频率为 20rad/s、幅值为 2mm 正弦波形。且在 5s 时有幅值为 1mm 的阶跃响应。仿真时间为 10s，增益更新周期为 0.1s。Kp、Ki 和 Kd 的变化范围分别为[-8000,-6000]、[-600,-400]和[-1100,-900]，三种增益变化结果如图 1 所示，悬浮效果对比图如图 2 所示。



a Kp　　b Ki　　c Kd

图 1 增益随时间变化图



a 类免疫　　b 传统 PID

图 2 悬浮效果对比图

3 结 论

本研究在 Matlab/Simulink 中搭建仿真，通过搭建磁浮单点悬浮模型[2]研究基于类免疫机制的 PID 参数自整定算法。使用基于类免疫机制的 PID 参数自整定算法在面对轨道不平顺时的表现不亚于传统参数不变 PID 算法，但在面临相似工况时能快速匹配最优增益，提高悬浮系统的稳定性。

参考文献（References）：

[1] 刘国联，谭冠政，何燕. 基于改进人工免疫算法的 PID 参数优化研究[J]. 计算机工程与应用，2008，(19)：84-86.

[2] 蔡文涛，王春江，滕念管，等. 超高速磁浮轨道梁体系的跨平台耦合振动分析[J]. 上海交通大学学报，2021，55(10)：1228-1236.

收稿日期：2026 年 06 月 07 日.

基金项目：国家自然科学基金（52572415）、国家高速磁悬浮交通技术重点实验室（ SKLM-SFCF-2025-002）.

作者简介：黄佳铭，女，福建省福州市，硕士研究生，主要从事高速磁浮悬浮控制的研究；通信方式：E-mail:2534387@tongji.edu.cn、联系电话:17859187717

文章编号：484-143

多态耦合轨道交通动模试验平台联调联试策略与方法

谭浩，张卫华

（西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心，四川 成都 610031）

1 引言

多态耦合轨道交通动模试验平台是我国面向超高速真空管道磁浮交通技术研究的省级重大科技基础设施，由真空管道系统、真空产生与维持系统、牵引与制动系统、模型列车、悬浮与导向系统、综合监控与通信系统、测试与监测系统以及试验保障系统八大子系统组成。其联调联试是验证各系统接口匹配性、运行协调性及整体性能达标的关键环节。本文围绕联调联试工作，阐述了分阶段、递进式调试的策略和方法。

2 正　文

2.1 试验阶段划分

由于该系统的复杂性，联调联试过程涉及高电压、大电流、低真空、超高速等多重复杂环境。为了逐步释放技术风险，应采用分阶段联调联试的策略[1]。如图 1 所示，首先进行全线真空建立与维持试验，确保管道低真空环境达标；其次开展牵引与制动系统联调试验，实现动子高速运行；最后完成悬浮与导向系统联调试验，验证模型列车悬浮运行性能。各阶段按序递进，逐步验证系统整体功能。

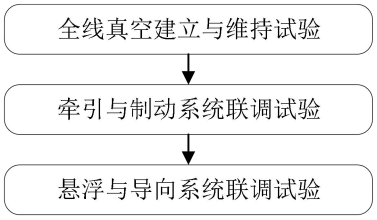


图 1 联调联试策略

2.2 系统联调试验方案

2.2.1 真空系统调试

真空系统调试涵盖真空管道漏点检查、过渡舱真空建立与维持、全线真空度控制及全线真空建立与维持四项内容，主要考核真空建立时间、真空度控制偏差、保压压升率及极限真空度等关键指标，充分验证真空建立、维持及破空工作流程的合理性以及全线 500 Pa 低真空环境的建立与保持能力，同时检验真空产生与维持系统对不同真空度的控制能力。

2.2.2 牵引与制动系统调试

牵引与制动系统调试按“先功能后性能、先常压后低压”的原则递进开展，首先完成储能系统功能联调、过渡舱变频器功能联调、牵引变流系统功能联调，其次进行牵引系统空载联调，最后开展牵引系统达速联调，考核脉冲发电机转速、变流器输出电流与频率以及动子运行速度等关键指标。该阶段主要验证牵引系统接口匹配性与设备间工作协调性、低真空环境工作性能及牵引控制算法的正确性。

2.2.3 悬浮与导向系统调试

悬浮与导向系统在牵引达速联调完成、永磁轨道安装后进入调试。在依次完成常压环境悬浮导向功能试验、模型列车牵引上线试验、低真空环境适应性试验及低真空环境悬浮导向功能试验后，开展低真空下的全系统演示验证试验。

3 结　论

本文提出了面向“真空管道+超高速磁浮”复杂试验平台的联调联试策略及方法。通过“先真空、后牵引，最后悬浮”的分步验证策略，逐步释放技术风险，顺利实现了对全系统工作匹配性、接口协调性以及关键性能指标的验证，可为超高速真空管道磁浮交通试验平台的系统集成、运行调试和工程化验证提供参考。

参考文献（References）：

[1] 李印川，李海涛，毕海权,等.超高速真空管道磁浮交通重大科技基础设施建设管理[J].实验技术与管理，2025, 42(11)：264-27.

收稿日期：2026 年 6 月 10 日.

基金项目：气动作用下高温超导钉扎磁浮高速运行可靠性及电磁力协同设计研究（U24B20125）.

作者简介：谭浩(1983-)，男，重庆人，研究员，博士，从事超高速真空管道磁浮交通试验平台系统集成与调试研究；通信方式：E-mail: tanhao_science@126.com、联系电话：13621029441

文章编号：484-144

高温超导块材阵列磁屏蔽特性研究

闫亮[1]，田梦瑶[1]，欧阳晨曦[1]，李志平[1]，郑珺[1]*
(1.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031)

1 引 言

超导体在低温下因迈斯纳效应具有抗磁性，能够排斥外部磁场并实现磁通屏蔽。现有超导磁屏蔽研究中，超导带材相关工作集中于超导电机、超导重力仪等应用场景[1]，而超导块材研究则多面向磁制冷等低温工程问题[2]，但是对阵列结构磁屏蔽特性的研究较为有限。高温超导钉扎磁浮系统中，永磁轨道会产生杂散磁场，而悬浮系统的精密传感设备对低磁干扰环境要求较高，结合系统在液氮低温条件下运行并集成超导块材组合结构的特点，块材磁屏蔽特性研究成为了亟待解决的问题。基于此，本文开展高温超导块材阵列在外磁场下的屏蔽特性研究，以实现对杂散磁场的有效抑制。

2 正 文

2.1 超导磁屏蔽理论与仿真模型搭建

超导块材磁屏蔽的机理源于迈斯纳效应与磁通钉扎特性，使其能有效排斥外部磁场，从而实现杂散磁场屏蔽。为研究超导块材阵列的磁屏蔽特性，基于电磁场理论并结合实际磁场环境建立有限元仿真模型，如图 1 所示。结果表明，在约 200 mT 外加磁场作用下，阵列对磁通具有显著排斥作用，外磁场未发生有效穿透，主要向块材间隙区域聚集。同时，块材的抗磁响应引起了磁场畸变，使下方永磁体区域磁场强度出现一定增强。

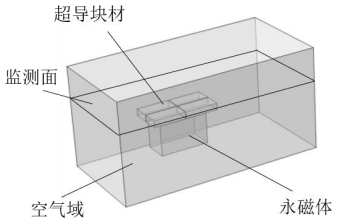


图 1 仿真几何结构示意图

2.2 超导块材阵列磁屏蔽性能仿真分析

为明晰超导块材阵列的磁屏蔽调控规律，基于有限元模型，在杂散磁场条件下开展对比分析。对几何形状、材料参数、阵列间隙及排布方式等关键因素进行参数化计算，研究了其对屏蔽区域磁场强度、均匀性及屏蔽效率的影响。通过结果分析，识别出的关键控制参数，为阵列结构优化与低磁环境设计提供依据。

2.3 低温实验验证与结果分析

同时，搭建出低温磁场测试实验平台，复现了外场环境及块材阵列，如图 2 所示。实验系统包括永磁体、低温杜瓦及课题组自主研发的扫磁测量设备，并在 SCML-01 超导磁悬浮磁力测试系统中记录了悬浮力数据，以补充力学响应分析。

图 2 低温磁场测试平台

3 结 论

阵列间隙是影响屏蔽性能的主要因素，而块材性能提升及温度降低对屏蔽效果的改善作用有限。在不同排布中，双层结构（上 5 下 4）表现出最佳屏蔽能力。实验结果与仿真基本一致，验证了模型可靠性，并明确了关键影响因素的主次关系。

参考文献（References）：

[1] NIU Fei-fei, HU Xin-ning, ZHANG Zi-li, et al. Effect of Magnetic Shielding on Levitation Characteristics of Superconducting Gravimeter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, 32(9): 3800414.

[2] Hirano N, Onodera Y, Osaka S, et al. Fundamental Research on Magnetic Shielding of High-Temperature Superconducting Bulk Materials for Magnetic Refrigeration Applications[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2025, 35(5): 6800505.

收稿日期：2026 年 06 月 16 日.

基金项目：国家自然科学基金（52375132）.

作者简介：闫亮(1997－)，男，甘肃礼县人，博士研究生，主要从事超导电磁特性、低温传热的研究；E-mail:2639470481@qq.com、联系电话：15682996016

文章编号：484-145

新型梁轨一体化中低速磁浮轨道梁的动力学性能仿真分析

杨家琛[1]，徐俊起[1,2]，陈琛[1,2]

（1.同济大学 磁浮交通工程技术研究中心，上海市 201804；2.同济大学 磁浮技术铁路行业重点实验室，上海市 201804；）

1 引言

中低速磁浮交通系统因其噪音低、爬坡能力强、转弯半径小等优势，已在长沙磁浮快线、北京S1线等多条线路实现运营。然而，轨道梁系统造价高昂已成为制约其规模化推广的关键瓶颈。现有轨道梁结构复杂，由承重梁体、钢横梁、扣件、承载台、支座等多部件组装而成，制造工序繁琐、维护成本高。本文提出一种梁轨一体化新型轨道梁方案，并引入轨道梁预拱设计，通过车-磁-轨耦合动力学仿真，系统评估该方案在降低建造成本的同时能否满足动力学性能要求。

2 仿真条件及结果

2.1 仿真条件

基于UM多体动力学软件与ANSYS有限元软件，如图1所示，建立新型梁轨一体化轨道梁柔性体的车-磁-轨耦合动力学模型。轨道梁采用模态综合法导入多体动力学模型，形成刚柔耦合系统。模拟中低速磁浮列车以不同速度通过带预拱的新型梁轨一体化梁时的动态响应。

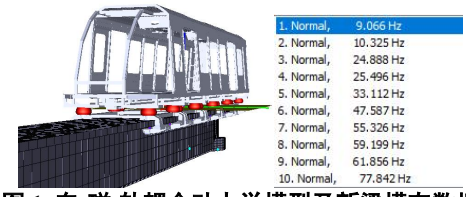


图1 车-磁-轨耦合动力学模型及新梁模态数据

2.1 仿真结果

通过动力学仿真，得到新型梁轨一体化梁在不同运行速度下的列车悬浮间隙曲线，如图2所示。图3对比了列车不同速度条件下跨中挠度的变化。

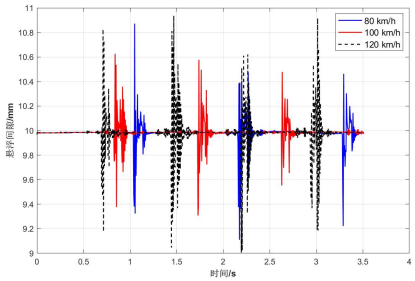


图2 不同运行速度悬浮间隙曲线

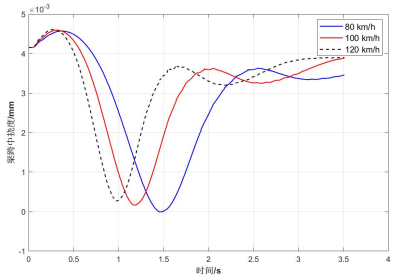


图3 不同速度梁跨中挠度曲线

3 结 论

仿真结果表明，新型梁轨一体化梁结构自重显著降低，但梁体刚度相应减小，但在引入预拱设计后，梁体下挠变形被有效补偿。该方案在保证动力学性能的前提下，可显著降低轨道梁材料用量与建造成本，为中低速磁浮交通的规模化推广提供了可行的技术路径。

参考文献（References）：

[1]陈绪黎,向活跃,田祥富,等.常导高速磁浮桥梁预拱度形式研究[J].振动工程学报,2023,36(3):652-661.

[2]谭社会.高速铁路钢桁梁斜拉桥线形设置方法研究[J].铁道建筑,2016,(12):1-4

收稿日期：2026年6月17日.

基金项目：国家自然科学基金重点项目（52232013）；国家重点研发计划任务(2023YFB4302502).

作者简介：杨家琛(2002－)，男，河北省邢台市，研究生，主要从事磁浮列车动力学及悬浮控制的研究；通信方式：2433674@tongji.edu.cn、联系电话：18632916811

文章编号：484–146

基于改进 PSO 的磁浮列车滑模控制器参数优化方法研究

黄翠翠[1]，尹孟凯[1]，曾杰伟[1,2]，龙志强[1,2]

(1. 国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073

2. 电磁悬浮与推进技术湖南省重点实验室，湖南省长沙市 410073)

1 引言

常导磁浮列车安全运行高度依赖悬浮气隙的实时精确调节[1, 2]。然而，实际工程中的载荷突变、轨道不平顺等内外扰动极易引起间隙剧烈波动，甚至诱发安全事故。因此，研究高精度、强抗扰的悬浮控制策略至关重要。

传统 PID 控制难以应对悬浮系统的非线性与时变特征，在复杂工况下易产生稳态误差。滑模控制（SMC）虽抗扰性强，但传统 SMC 依赖大切换增益，极易引发高频电流抖振；且其参数强耦合，人工整定难以兼顾动态响应与控制平滑性。为此，引入智能优化算法（如 PSO）进行参数寻优。针对上述问题，本文提出一种基于改进粒子群优化的自适应滑模悬浮控制策略。并搭建基于快速控制原型的磁悬浮实验平台，进行实验验证。

2 改进 PSO 的参数优化算法

在忽略漏磁效应和结构弹性变形的条件下，选取实际悬浮气隙、气隙变化率和线圈控制电流为状态变量，可得到非线性悬浮系统状态空间模型：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\dfrac{K}{m_e}\left(\dfrac{x_3}{x_1}\right)^2 + \dfrac{(m_e+m_c)}{m_e}g + d(t) \\ \dot{x}_3 = \dfrac{x_2 x_3}{x_1} + \dfrac{x_1}{2K}(u - x_3 R) \end{cases} \tag{1}$$

定义系统的位置跟踪误差为 $e = x_1 - x_d$ 。为保证误差的渐近收敛，选取如下形式的积分滑模面：

$$s = \dot{e} + \lambda e = x_2 - \dot{x}_d + \lambda(x_1 - x_d) \tag{2}$$

引入非线性异步动态学习因子策略，其更新公式为：

$$\begin{cases} c_1(t) = c_{1,\text{start}} - (c_{1,\text{start}} - c_{1,\text{end}})\sin\left(\pi t / 2T_{\max}\right) \\ c_2(t) = c_{2,\text{start}} + (c_{2,\text{end}} - c_{2,\text{start}})\sin\left(\pi t / 2T_{\max}\right) \end{cases} \tag{3}$$

改进后的粒子速度更新公式为：

$$\begin{aligned} v_{ij}(t+1) = {} & w(t)v_{ij}(t) + c_1(t)r_1(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) \\ & + c_2(t)r_2(p_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \end{aligned} \tag{4}$$

3 仿真验证

如图 1 所示，悬浮间隙被约束在 6.23-6.36 mm 之间，最大波动幅值降至 ±0.065 mm，表现出最优悬浮稳定性，PSO 优化后的参数匹配也有效削弱了传统滑模控制的抖振问题。

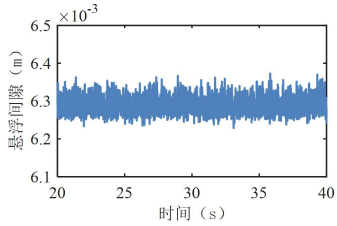


图 1 控制下的轨道不平顺响应曲线

4 结论

本文针对常导磁浮列车悬浮系统存在的外部轨道激扰问题，提出一种基于多指标约束 PSO 寻优的自适应滑模悬浮控制策略。实验结果表明在多频轨道不平顺振动台激励下，优化后的参数间隙最大波动幅值抑制在 ±0.065 mm 以内，兼顾了高抗扰性能与硬件执行平滑性。

参考文献（References）：

[1]李自康，戴春辉，黄翠翠，等. 基于多种群遗传算法的磁浮列车自抗扰速度控制 [J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(4): 912-920..

[2] Long Z, Wang Z, Zhai M, et al. High-Speed Maglev Train's Levitation and Guidance Control[M]. 2024.

收稿日期：2026 年 06 月 22 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（编号:52572427）

作者简介：黄翠翠(1992 –)，女，湖南省长沙市，博士，电磁悬浮与推进控制；

通信方式：huangcui@163.com、联系电话:15273166505

文章编号：484-147

三维低真空管道磁浮列车激波抑制方法研究

苗坤，黄尊地，周世光
（五邑大学轨道交通学院，广东省 江门市 529020）

1 引　言

低真空管道磁浮交通通过降低气体密度与非接触悬浮，可有效减小机械摩擦与气动阻力，是实现 600 km/h 及以上地面高速运输的重要途径。然而，列车在封闭管道内高速运行时，车体与管壁间形成狭窄环流通道，气流无法自由扩散。

当运行速度接近当地声速时，车头前方气体持续压缩，易诱发气动壅塞；车尾则依次出现膨胀、回流与再压缩，并形成斜激波、反射波及交叉波系[1]。该激波系引起显著的压力跃变与激波-边界层相互作用，不仅增大列车气动阻力，还会在管壁产生压力波动与非定常载荷，对运行稳定性和结构安全构成威胁[2][3]。

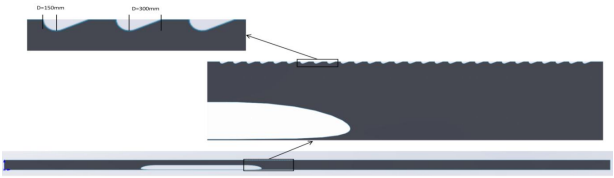
2 激波抑制方法

2.1 隧道壁面水滴型仿生微结构抑制方法

在列车尾部激波反射较强的管壁区域布置水滴型仿生微结构（圆钝迎风端、渐缩尖尾端，沿流向排列）。

作用机理为：通过连续壁面曲率分散集中反射的激波，降低局部压力梯度；诱导小涡增强近壁动量交换，抑制边界层分离。

结果表明，该结构能使管壁附近强反射波分散，尾部低压区压力恢复更平缓，适用局部激波—边界层相互作用控制。



1 水滴型仿生微结构隧道壁面示意图（缩比后）

2.3 阶梯变截面隧道激波抑制方法

在尾部激波区设置两级阶梯变截面管道，逐级增大流通面积。强激波经第一级阶梯膨胀、反射与透射而分解，第二级再次削弱，将单次压力跃变转化为多次弱压变化；阶梯后剪切层与涡流促进能量耗散。该方法通过宏观流道改变激波路径实现分级消能，但结构改动较大。

2 变截面隧道壁面示意图

3 结　论

本文建立的三维数值模型可有效捕捉列车周围斜激波、壁面反射波及交叉波系。水滴型微结构通过分散反射波和增强近壁动量交换，抑制局部激波与分离；两级阶梯变截面通过分级膨胀和反射，将强激波分解为多次弱波，实现能量耗散。两种方法机理互补，微结构适用于局部控制，阶梯变截面适用于整体波系调节，后续需定量比较压升、阻力、压力波动及总压损失。

参考文献（References）：

[1] ZHOU P, ZHANG J Y, LI T, et al. Numerical study on wave phenomena produced by the super high-speed evacuated tube maglev train[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 190: 61-70.

[2] SUI Y, YU Q, NIU J, et al. Flow characteristics and aerodynamic heating of tube trains in choked/unchoked flow: A numerical study[J]. Journal of Thermal Science, 2023, 32(4): 1421-1434.

[3] BI H, WANG Z, WANG H, et al. Aerodynamic phenomena and drag of a maglev train running dynamically in a vacuum tube[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(9): 096111.

收稿日期：2026 年 06 月 22 日.

基金项目：广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金面上项目(2026A1515010694)；高速磁浮运载技术全国重点实验室(中车青岛四方机车车辆股份有限公司)开放基金项目(SKLM-SFCF-2025-006)

作者简介：苗坤(2002-)，女，河北省新乐市，在读硕士研究生，主要从事磁悬浮列车激波抑制的研究；
通信方式：E-mail:2778482936@qq.com

文章编号：484-148

基于气动-动力学耦合的 600 km/h 高速磁悬浮列车横风运行安全域研究

周世光[1] 黄尊地[1] 苗坤[1]
(1. 五邑大学 轨道交通学院，广东 江门，529020)

1 引言

高速磁悬浮列车具有速度高、噪声低及运维成本低等优点，是未来高速轨道交通的重要发展方向。随着运行速度提升至 600 km/h 等级，列车所受气动效应显著增强，尤其在横风环境下，气动力波动将直接影响悬浮系统稳定性，进而威胁列车运行安全[1]。因此，开展高速磁悬浮列车横风作用下的动力学响应研究，对建立运行安全评价体系及制定运营控制策略具有重要意义。

目前，国内外针对高速列车横风安全性的研究主要集中于轮轨系统，而针对高速磁悬浮列车悬浮间隙动态变化规律及其安全阈值的研究仍相对不足。为此，本文基于气动-动力学耦合方法，对 600 km/h 高速磁悬浮列车在不同横风工况下的运行安全性进行分析。

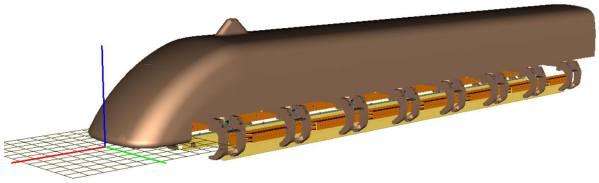
2 正　文

2.1 气动载荷计算

采用 Fluent 软件建立 600 km/h 高速磁悬浮列车三维外流场模型，基于稳态数值模拟方法计算横风作用下列车表面压力分布及流场特征。选取 10 m/s、20 m/s 和 30 m/s 三种典型横风工况，获得列车升力、侧向力及滚转力矩等关键气动参数，并提取气动力时程数据作为动力学分析输入。

2.2 动力学模型建立

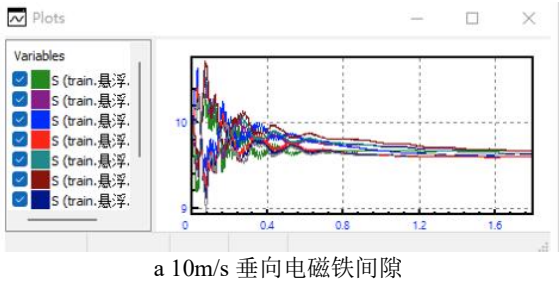
利用 Universal Mechanism（UM）建立高速磁悬浮列车动力学模型，并引入 Fluent 计算得到的气动力载荷，实现气动与动力学耦合分析。重点监测悬浮间隙、导向间隙以及车体振动响应等关键运行参数，研究横风速度变化对列车动态性能的影响规律。



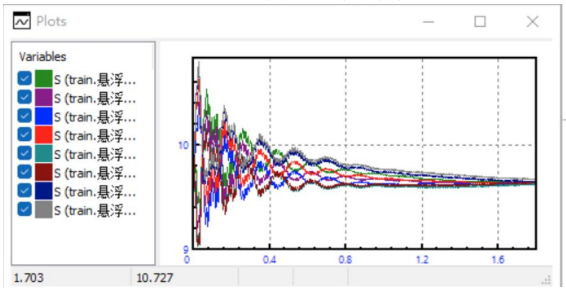
1 磁悬浮列车模型

2.3 安全性评价分析

仿真结果表明，随着横风速度增加，列车悬浮间隙波动幅值逐渐增大。其中 30 m/s 横风工况下，车体横向振动及滚转响应明显增强，悬浮系统稳定裕度显著降低[2]。通过统计各工况下悬浮间隙极值及波动范围，建立横风速度与悬浮间隙响应之间的关系模型，并依据悬浮控制系统允许偏差范围确定列车运行安全边界，为高速磁悬浮列车横风安全评估提供参考依据[3]。



a 10m/s 垂向电磁铁间隙



b 30m/s 垂向电磁铁间隙

2 垂向电磁铁间隙图

收稿日期： 2026 年 06 月 22 日.

基金项目： 广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金面上项目(2026A1515010694)；高速磁浮运载技术全国重点实验室 （中车青岛四方机车车辆股份有限公司）开放基金项目(SKLM-SFCF-2025-006)

作者简介： 周世光(2002-)，男，海南省儋州市，在读硕士研究生，主要从事空气动力学的研究；

通信方式：E-mail:1443100582@qq.com

3 结　论

本文基于 Fluent 与 UM 耦合分析方法，研究了 600 km/h 高速磁悬浮列车在不同横风条件下的动态响应特性。结果表明，横风是影响高速磁悬浮列车运行安全的重要因素，悬浮间隙波动随横风速度增加而增大，系统稳定裕度逐渐减小。通过建立基于悬浮间隙响应的安全评价方法，确定了列车在不同横风环境下的运行安全范围。研究成果可为高速磁悬浮列车抗横风设计、线路环境适应性评价及运营安全控制提供理论支撑。

参考文献（References）：

[1] 包思远，沈博洋，刘睿，et al. 600 km/h 常导磁悬浮电磁铁绝缘层热传导性能提升研究：试验与有限元分析［J］. 铁道学报，2025，47(07)：188-95.

[2] 陈琛，徐俊起，王文，et al. 基于数据驱动的磁悬浮列车悬浮系统参数辨识及控制［J］. 铁道学报，2025，47(07)：40-51.

[3] 革非，毕海权，雷波，et al. 具有横风效应的磁浮列车湍流外流场特性数值计算［J］. 铁道学报，2005，(06)：117-21.

文章编号：484-149

双时滞反馈控制下磁浮车-轨耦合系统稳定性分析

孙万奇[1]，王美琪[2,3]

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院，河北省 石家庄 050043；2. 石家庄铁道大学 机械工程学院，河北省 石家庄 050043；

3. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室，河北省 石家庄 050043)

1 引言

磁浮列车依靠电磁悬浮力实现车辆与轨道之间的无接触支承，其悬浮稳定性直接关系到车辆运行安全与乘坐舒适性[1]。在实际悬浮控制系统中，传感器采集、控制器计算等均会引入不可避免的时滞[2]。当反馈时滞与车-轨耦合振动共同作用时，系统可能诱发振荡失稳[3]。现有研究多关注单一控制时滞，而对位移反馈时滞和速度反馈时滞共同作用下的磁浮车-轨耦合稳定性研究不足。因此，本文以静态跨中悬浮状态为对象，研究双时滞作用下磁浮车-轨耦合系统的稳定性变化规律。

2 正　文

考虑静态跨中条件下磁浮车-轨耦合动力学模型。如图 1 所示，电磁悬浮力根据平衡点附近的小扰动关系进行线性化处理。在此基础上，将位移反馈时滞和速度反馈时滞分别引入悬浮控制律，如式(1)所示。

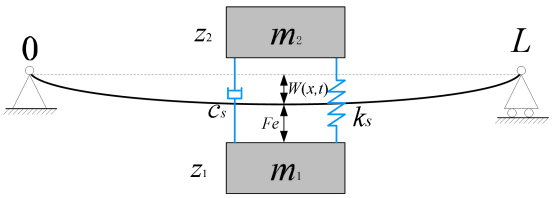


图 1 车-轨耦合系统示意图

$$\Delta i_z = k_p \Delta z\left(t-\tau_1\right) + k_d \Delta \dot{z}\left(t-\tau_2\right) \tag{1}$$

针对所建立的双时滞系统，以特征根最大实部作为稳定性判据，通过计算得到位移反馈时滞和速度反馈时滞共同作用下的二维稳定域，如图 2 所示。图中可以看到稳定区域不稳定区的边界线并非线性，说明双时滞之间存在耦合效应。

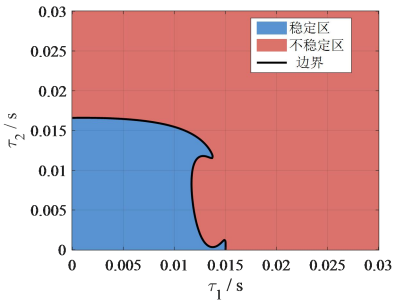


图 2 双时滞控制下系统稳定域

3 结　论

针对双时滞作用下磁浮车-轨耦合系统的稳定性问题，建立静态跨中车轨耦合模型，并基于特征根最大实部构建了系统稳定性分析方法。研究表明，位移反馈时滞和速度反馈时滞之间存在耦合作用，系统稳定性不能仅通过单一时滞裕度进行判断。双时滞稳定域能够清晰划分稳定区与不稳定区，并为悬浮控制系统中时滞裕度设计提供参考。该研究可为磁浮车辆悬浮控制参数设计和车轨耦合振动稳定性分析提供一定理论依据。

参考文献（References）：

[1] Zhou D F, Hansen C H, Li J. Suppression of maglev vehicle–girder self-excited vibration using a virtual tuned mass damper[J]. Journal of sound and Vibration, 2011, 330(5): 883-901.

[2] Cao S, Liu C, Wang S, et al. Analysis of vibrational stability, bifurcation and resonance characteristics of the maglev train-bridge coupling system[J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113(13): 16135.

[3] Sun Y, Xu J, Lin G, et al. RBF neural network-based supervisor control for maglev vehicles on an elastic track with network time delay[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 18(1): 509-519.

收稿日期： 2026 年 06 月 22 日.

基金项目： 可控非线性电磁力作用下高速磁浮车轨耦合振动机理与调控研究（12472020）.

作者简介： 孙万奇(1998－)，男，河北省定州市，博士在读，主要从事磁浮系统非线性动力学的研究；通信方式：1031627400@qq.com.

文章编号：484-150

基于 DPIM 的高速磁浮列车悬浮系统随机响应分析

范琳[1]，倪菲[1,2]，林国斌[1,2]，荣立军[1,2]

(1.同济大学 交通学院,上海 201804；2.高速磁浮运载技术全国重点实验室,上海 201804)

1 引言

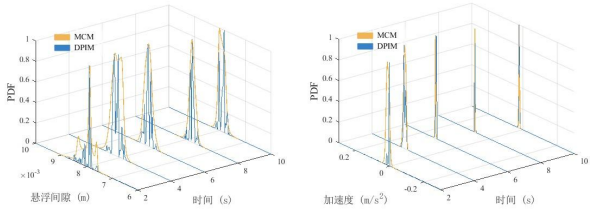
高速磁浮列车车辆结构参数的不确定性会影响悬浮系统动力响应，仅采用确定性分析难以全面反映系统响应特征。本文基于悬浮系统动力学方程，以悬浮间隙和车体垂向加速度为主要响应量，引入直接概率积分法（DPIM）计算随机参数作用下系统响应概率密度，并与蒙特卡洛模拟（MC）结果进行对比，分析列车速度及关键参数波动对悬浮系统随机响应的影响[1]。

2 正　文

基于高速磁浮列车悬浮系统动力学方程，以悬浮间隙和车体垂向加速度为输出响应，选取电磁铁铁芯有效面积 A、绕组匝数 N 和悬浮系统负载质量 m 作为随机结构参数。各随机参数均假定服从均匀分布，波动范围取其均值的 ±1%，并分析 400、500、600 km/h 运行速度下系统随机响应的变化规律[2]。首先计算不同代表性点对应的确定性响应，再采用 DPIM 获得响应概率密度函数(PDF)。

为验证 DPIM 在估计高速磁浮列车悬浮系统响应概率密度方面的有效性，将其与 MC 结果进行对比。MC 采用 100000 个随机样本，DPIM 采用 225 组代表性响应。结果如图 1 所示，两种方法得到的悬浮间隙和车体垂向加速度响应的概率密度函数曲线在峰值位置、分布范围和整体形态上基本一致，说明 DPIM 在较少样本条件下仍能准确表征系统随机响应。

随机分析结果表明，随着运行速度升高，悬浮间隙和车体垂向加速度响应的概率密度分布范围增大，响应离散性增强；当 A、N 增大时，PDF 曲线整体集中，峰值增强，系统稳定性提升。当 m 增大时，系统惯性增强，响应更稳定。



a 悬浮间隙响应　　b 车体垂向加速度响应

1 DPIM 与 MC 随机响应概率密度函数对比

3 结　论

本文基于高速磁浮列车悬浮系统动力学方程，采用 DPIM 开展了随机参数作用下的悬浮系统响应分析。结果表明，DPIM 能够在较少样本条件下准确获得响应的随机分布特征。随着列车运行速度升高，系统响应离散性增强，电磁铁铁芯有效面积和绕组匝数的增大可使响应 PDF 曲线趋于集中，系统稳定性提升，负载质量的增大则可能导致悬浮间隙调节滞后。研究结果表明 DPIM 可为悬浮系统随机响应分析提供高效方法。

参考文献 (References)：

[1] Chen G H, Yang D X. Direct probability integral method for stochastic response analysis of static and dynamic structural systems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 357:112612.

[2] 余志武，张鹏，丁叁叁.轨道梁参数随机的磁悬浮列车-轨道梁系统概率密度演化分析 [J]. 铁道学报，2023，45 (12)：138-147.

收稿日期：2026 年 06 月 23 日.

基金项目：国家自然科学基金（52572416）；中央高校基本科研业务费专项资金（22120230311）.

作者简介：范琳(1999－)，女，山西长治，学生，学士，主要从事磁浮列车鲁棒控制的研究；通信方式：E-mail: fanlin@tongji.edu.cn、联系电话:13293851776

文章编号：484-151

基于虚拟轨道的悬浮控制方法

黎奇明[1]，倪菲[1,2]，马迪豪[1]，徐俊起[1,2]
(1.同济大学 交通学院,上海 201804；2.高速磁浮运载技术全国重点实验室,上海 201804)

1 引言

高速磁浮交通具有速度高、噪声低、爬坡能力强和运行平稳等优点，是未来轨道交通的重要发展方向。然而，电磁悬浮系统本身具有强非线性和开环不稳定特征，悬浮间隙容易受到轨道不平顺、气动升力和姿态变化等因素影响。为降低轨道不平顺扰动对悬浮控制性能的影响，本文提出一种基于虚拟轨道的悬浮控制方法。该方法在传统 PID 控制框架中引入虚拟轨道环节，使控制器跟踪经过柔化处理的轨道参考，缓解轨道不平顺对悬浮间隙响应和励磁电流等控制过程的冲击，提高悬浮系统在受扰情况下的控制能力。

2 正　文

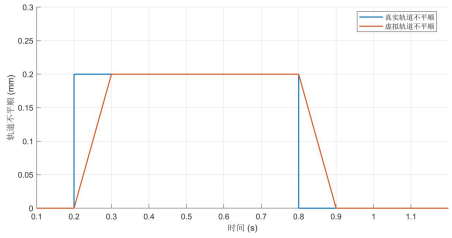
基于虚拟轨道的悬浮控制方法的关键在于在悬浮模型基础上，将真实轨道扰动与控制器参考轨道区分开，并通过虚拟轨道环节对控制器参考输入进行柔化处理，其设计流程如下：

（1）构建前、后两点电磁悬浮模型[1]，用于描述单个电磁铁前后控制点之间的耦合关系和悬浮间隙响应。

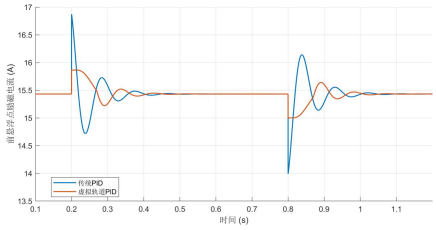
（2）设计虚拟轨道环节[2]，使轨道不平顺信号在进入控制器前得到平滑处理，从而减小轨道扰动变化对控制过程的冲击。

（3）设计基于 PID 的悬浮控制器。虚拟轨道用于改善控制器参考输入，PID 控制器根据间隙偏差调节励磁电流，实现两点悬浮系统的稳定控制。

结果表明，本文所提出方法通过在两点悬浮系统的控制中引入虚拟轨道参考，使系统在轨道扰动作用下的气隙调节过程更加平缓，并有效降低励磁电流的冲击和振荡，从而减小轨道不平顺对悬浮稳定性的影响。



a 轨道不平顺输入对比



b 励磁电流对比

1 仿真结果

3 结　论

本文通过基于虚拟轨道的悬浮控制方法，在两点电磁悬浮模型中引入虚拟轨道参考，从而实现轨道不平顺作用下的稳定悬浮。与传统 PID 控制方法相比，本文提出的基于虚拟轨道的控制方法可有效缓解悬浮系统在受扰情况下的气隙响应冲击，并明显降低励磁电流的波动幅度，提高悬浮系统的稳定性与抗扰能力。为提升复杂运行条件下磁浮列车的悬浮可靠性提供了新思路。

参考文献 (References)：

[1] ZHOU F, LI X L. Coupled dynamics modeling and validation of maglev vehicle and bridge systems[J]. Actuators, 2025, 14(3): 107.

[2] 李亚楗. 基于轨道信息的磁浮列车悬浮控制技术研究[D]. 长沙：国防科技大学, 2020.

收稿日期：2026 年 06 月 23 日.

基金项目：国家自然科学基金（52572416）；中央高校基本科研业务费专项资金（22120230311）.

作者简介：黎奇明(2004－)，男，广西南宁，学生，学士，主要从事磁浮列车悬浮控制的研究；通信方式：E-mail: 2250974@tongji.edu.cn、联系电话:13307863209

文章编号：484–152

常导高速磁浮直线同步电机电流解耦控制研究

陈汇中[1]，倪菲[1,2]，赵元哲[1,2]，林国斌[1,2]
（1. 同济大学 交通学院，上海 201804；2. 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海 201804）

1 引 言

常导高速磁浮列车采用长定子直线同步电机实现牵引驱动，由于动子励磁磁极同时承担牵引与悬浮功能，牵引系统与悬浮系统之间存在显著的电磁耦合效应。针对传统电压前馈解耦策略补偿能力不足的问题，本文提出长定子直线同步电机电流解耦控制方法，以改善电流跟踪精度，提升系统的动态响应速度与抗扰动性能。

2 正 文

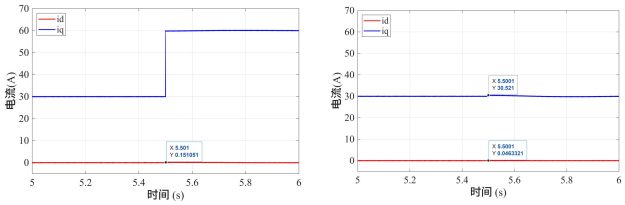
2.1 数学模型

首先，从长定子直线同步电机的工作机理出发，建立其在三相静止坐标系和同步旋转坐标系下的数学模型；其次，阐述中点钳位型三电平逆变器的拓扑结构及空间矢量脉宽调制策略；最后，对磁场定向控制与传统电压前馈解耦控制进行原理分析，揭示后者的解耦局限性。

2.2 改进自抗扰解耦控制

针对电压前馈解耦控制的不足，本文提出一种改进型自抗扰电流解耦控制策略。该方法将 dq 轴电流耦合效应及其他不确定性视为总扰动，通过扩张状态观测器进行实时估计，并在控制律中予以补偿，从而实现 dq 轴电流的动态解耦。与传统电压前馈解耦相比，该方法不依赖精确的电机参数，对参数变化和外部扰动具有更强的适应力。

最后，基于 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型，设置多种典型工况，对不同控制策略的电流跟踪、动态响应和抗扰能力进行对比验证。



a.电流阶跃　　b.电压扰动

1 不同工况下解耦策略的 dq 轴电流波形图

3 结 论

仿真结果表明，相较于电压前馈解耦控制，改进型自抗扰解耦控制在电流阶跃条件下对 d 轴耦合峰值的平均抑制率约为 79.4%，在外加电压扰动工况下约为 76.5%；此外，q 轴电流跟踪的动态稳定性亦得到明显改善。上述结果验证了该方法在动态响应速度与抗扰能力之间取得了更优的折中。综上所述，所提控制策略能够有效增强常导高速磁浮直线同步电机牵引控制系统的综合控制品质，为高速磁浮列车高性能牵引控制策略的工程设计提供理论支撑与仿真参考。

参考文献（References）：

[1] 康劲松，韩仁杰，赵元哲，等. 磁浮长定子直线同步电机的鲁棒预测控制技术[J]. 电源学报, 2026，24(2): 291-300.

[2] 杨淑英，王玉柱，储昭晗，等. 基于增益连续扩张状态观测器的永磁同步电机电流解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6):1985-1997.

收稿日期： 2026 年 06 月 24 日.

基金项目： 国家自然科学基金（52572416）；中央高校基本科研业务费专项资金（22120230311）.

作者简介： 陈汇中(2004－)，男，籍贯(辽宁省、大连市)，学士，主要从事磁浮列车悬浮控制的研究；通信方式：E-mail：2634536@tongji.edu.cn、联系电话:13019484337

文章编号：484-153

电动磁浮系统中直线电机的位移控制方法研究

王波[1,3]，徐杰[2]，欧阳萍萍[3,4]，秦龙泉[3,4]，刘静[3,4]，马卫华[3,4]

(1.西南交通大学 力学与航空航天学院，四川省 成都市 610031；2.海军工程大学 船舰综合电力技术国防科技重点实验室，湖北省 武汉市 430032；3.西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心，四川省 成都市 610031；4.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031；)

1 引言

直线电机驱动具有效率高、振动小、噪声低、响应快、结构简单和使用寿命长等优点，使得其在轨道交通行业中得到广泛应用。西南交通大学牵头建设的“多态耦合轨道交通动模试验平台”采用双边直线电机进行牵引，通过横向止挡确保直线电机动子间隙维持在 10mm，以实现 1500km/h 速度[1]。李旭等[2]则将边直线电机应用在微重力落塔装置，通过滚动轮止挡，确保双边直线电机的气隙控制在 10mm 范围。伊斯坦布尔理工大学设计的 Hyperloop 磁浮车辆采用双边直线电机，通过机械止挡方式将直线电机的工作气隙控制在 10mm，以实现 1220km/h 速度[3]。可以发现双边直线电机均采用物理止挡方式控制双边直线电机的气息，以实现车辆的高加速度运行。而随着直线电机气隙的减小，物理止挡的接触时间将显著增加，其产生的热热量将进一步增大，同时物理止挡的碰撞加剧直线电机的振动，会直接影响双边直线电机性能的发挥。因此本文提出一种非接触式止挡控制双边直线电机的气隙，从而有效解决物理止挡产生的摩擦及温升影响，形成非接触式的双边直线电机气隙控制方法。

2 双边直线电机气隙控制方法

2.1 当前直线电机波动量

为了便于牵引和制动系统控制，电动磁浮系统中的需要及时采集速度信号，然而速度信号的采集方式要求直线电机的横向位移波动量不超过 4mm，给电动磁浮系统提出巨大挑战。而动力学仿真发现当前双边直线电机的横向位移波动量为±15mm，远超限值，如图 1 所示。

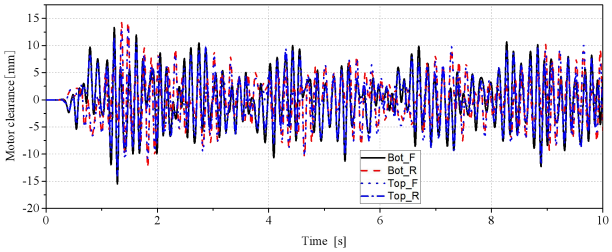


图 1 直线电机水平位移

为了分析双边直线电机位移波动量过大原因，采用运动学理论推导和动力学仿真发现，直线电机横移运动、侧滚运动和摇头运动过大是电机位移超限的直接原因，其根本原因在于直线电机法向力刚度与悬浮导向系统参数不匹配所致。而当前结构优化仅能有限降低直线电机位移波动量，仍然无法满足直线电机波动量小于 4mm 要求。

2.2 直线电机位移控制方法

为了确保磁浮高速运行，需要设计一种具有止挡作用且非接触式结构以限制电动磁浮车辆运行姿态。而 Halbach 永磁阵列安装在直线电机上，通过与直线电机的感应板作用恰好满足上述需求，如图 2 所示。因此，通过磁场理论分析和动力学仿真计算，设计了一组 Halbach 永磁阵列，其作为一种非接触式止挡作用与直线电机上，从而等效降低直线电机法向刚度，控制直线电机的位移波动量。图 3 为设计的 Halbach 永磁阵列的作用力曲线图，将其引入动力学模型，并对不同速度下的直线电机位移波动量最大值进行仿真，可以发现直线电机的横向位移波动量均不超过 4mm（如图 4 所示），满足

收稿日期：2026 年 6 月 25 日.

基金项目：项目名称（编号）；中央高校基本科研业务费专项资金资助（2682026XJ001）.

作者简介：王波(1988－)，男，山西隰县，助理研究员，工学博士，主要从事车辆系统动力学及轮轨损伤研究；通信方式：wb2016@swjtu.edu.cn:17313043020

速度信号的采集需求，同时表明设计的非接触式止挡能够有效控制直线电机的运动姿态。

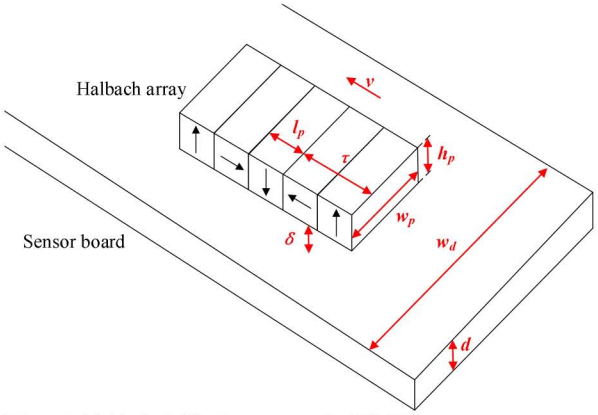


图 2 非接触式止挡（Halbach 永磁阵列）

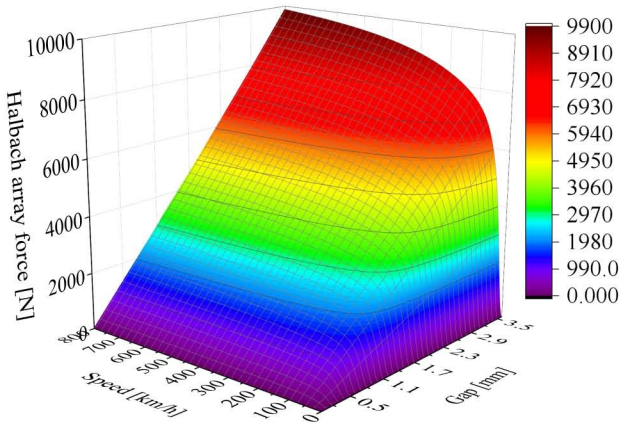


图 2 Halbach 永磁阵列作用力

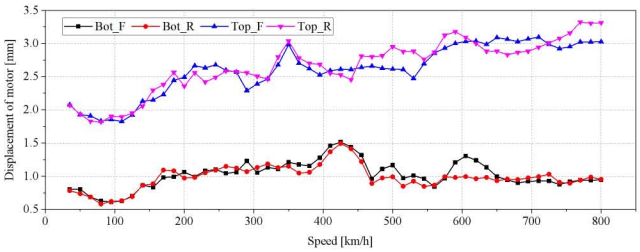


图 3 直线电机水平位移最大值

3 结　论

本文研究了双边直线电机位移的控制策略，通过研究可以得到如下结论：

1）电动磁浮系统的直线电机横向位移主要由直线电机的横移量、电机的摇头角和电机的侧滚角线性组合而成，直线电机横向位移超标的直接原因是上述三个自由度没有得到有效约束；

2）高速磁浮系统的电机横向位移超标的根本原因是车辆结构和参数匹配性不足导致，降低直线电机的法向力刚度是最为有效的控制方式。

3）反向设计 Halbach 永磁阵列非接触止挡，能够保证车辆动力学指标不降低的情况下，使得电机的横向位移得到控制。为后续双边直线电机位移的控制方案提供一定的参考。

参考文献 (References)：

[1] 牟瀚林,颜佳海,欧阳萍萍,等.低真空管道超高速磁浮模型车系统边界条件影响分析[J/OL].西南交通大学学报,1-10[2026-06-03].

[2] 李旭,胡俊雄,马名中,等.导轨激励形式对电磁弹射微重力装置振动响应的影响研究[J].振动与冲击,2026,45(4):73-82.

[3] Bahaddin Goksun,Ismet Sen,Musap Kuzucu, et al.Design and Parametric Optimization of a Doublesided Linear Induction Motor for Hyperloop Pod[J].CES Transactions on Electrical Machines and Systems,2025,9,(1):36-45

文章编号：484–154

胶轮与悬浮走行融合的电动磁浮列车动态仿真

李苗[1,2]，陈晓昊[3]，尚贤洪[4]，杨晶[2,5]，王爱彬[2,5]，马卫华[1,2]

(1. 西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心，四川 成都 610031；2. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031；3. 浙江师范大学 工学院，浙江 金华 321004；4. 卡特彼勒技术研发（中国）有限公司，江苏 无锡 214115；5. 中车长春轨道客车股份有限公司磁浮研究所，吉林 长春 130062)

1 引　言

发展 600 km/h 超导电动磁浮交通系统是支撑我国交通强国战略的重要举措[1]。然而，现有动力学研究多局限于单一走行状态，难以描述胶轮支撑向悬浮运行过渡的动态过程。本文提出了一种融合胶轮与悬浮走行模式的动力学建模方法，实现了列车从静止、胶轮走行、起浮过渡、悬浮运行至落车的全过程连续仿真。

2 动力学建模与算例分析

2.1 胶轮与悬浮走行融合的动力学建模

如图 1 所示，探索了悬浮力、导向力及磁阻力随列车运行速度的非线性变化规律，构建了涵盖超导磁体三向平动位移、侧滚角及运行速度的五维电磁力数据库；搭建了包含车体、悬浮架的多刚体系统模型，并基于描述轮胎力学特性的经典魔术公式补充建立走行轮动力学模型[2]。

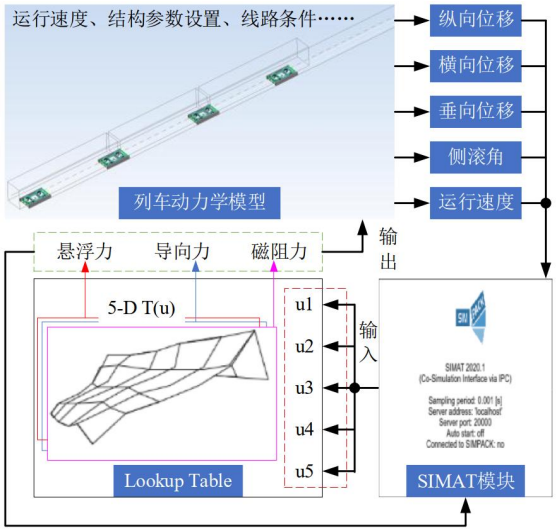


图 1 超导磁体磁力与列车多体动力学模型联合仿真框架

最后，通过 SIMULINK 与 SIMPACK 联合仿真平台实现了电磁力模块与机械动力学模型的实时交互与迭代求解。

2.2 算例结果分析

考察 AW0/AW3 两种载荷及 575～625 mm 的地面 8 字线圈中心垂向高度对动态响应的影响。结果表明：起浮速度随 8 字线圈中心垂向高度增大而下降，在 AW3 载荷及线圈高度不足 585 mm 条件下，中车因悬浮力不足无法实现悬浮走行；超导磁体下沉量随列车载荷提升而增大，但在相同载荷下受线圈垂向高度变化影响微弱；随着线圈垂向高度增加，系统垂向振动加速度均方根值呈线性增长趋势，且振动经由悬挂系统传递至构架与车体时得到大幅衰减。

3 结　论

1）悬浮力、导向力随列车运行速度单调递增至饱和，基于查表法组建了与超导磁体三向平动、侧滚角和运行速度相关的五维电磁力数据库。

2）建立的动力学仿真模型可实现实时联合仿真，用一套模型合理模拟了列车胶轮走行和悬浮走行两个运行阶段的动态特性。

3）起浮/落车速度与列车载荷呈正相关，与 8 字线圈中心垂向高度呈负相关，明确了可实现悬浮走行的 8 字线圈最小有效垂向高度阈值。

参考文献（References）：

[1] 于青松，李凯，胡浩，等. 超导电动悬浮应用研究与技术展望[J]. 机车电传动, 2023(4): 1-8.

[2] PACEJKA H B. Tire and Vehicle Dynamics[M]. Third Edition. Kent County: Butterworth-Heinemann, 2012.

收稿日期：2026 年 06 月 26 日.

基金项目：无.

作者简介：李苗(1991－)，男，四川营山，助理研究员，博士，主要从事磁浮列车系统动力学研究；通信方式：E-mail: limiao@swjtu.edu.cn、18202879167

文章编号：484-155

基于永磁电动悬浮模糊 PID 控制研究

万郭豪[1]，马光同[2]，罗成[1]，罗俊[1]，孙振耀[1]
(1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031；2. 西南交通大学 电气工程学院，四川省 成都市 610031)

1 引　言

永磁 EDS 系统相较于其他磁浮技术，如 EMS 型磁浮列车和超导磁浮列车，展现出了其独特的技术优势。永磁 EDS 系统结构简单、成本低，这是其显著的特点之一[1]。由于其固有的临界稳定特性，当受到外界干扰时，系统可能会出现震荡，极端情况下，甚至可能引发安全事故[2]。

为提升永磁电动悬浮系统的稳定性，本文提出一种基于模糊 PID 控制方法，通过其参数自整定的特点，能有效应对永磁电动悬浮系统的强非线性、时变性和外部干扰等固有挑战，从而显著提升系统的稳定性、动态响应和抗干扰能力。

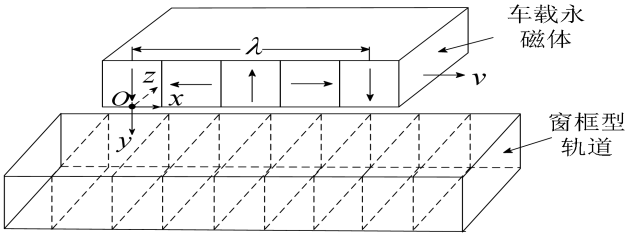
2 正　文

2.1 永磁电动悬浮电磁力以及稳定性解析

本节深入探讨 Halbach 阵列的磁场分布特性与磁力分布特性。首先，依托理论框架，据此建立了磁力计算表达式。然后搭建 Simulink 传递函数模块，当系统受到外界扰动力影响时，进行仿真分析，可以得到在不考虑垂向运动时系统的震荡在大多数情况下有很强的危害性这一结论。在考虑垂向运动时，当受到外界扰动力影响时，系统将以很慢的速度衰减振荡，系统可近似认为处于临界稳定状态。

2.2 建立基于模糊 PID 控制研究方法

本文构建模糊 PID 闭环控制模型，分别用于控制线圈电流和气隙，以应对外界扰动来维持系统平稳运行。当系统受到外界扰动时，控制器会调整线圈电流以抵消这种扰动的影响。通过这种方式，系统能够迅速恢复到额定气隙处。



1 永磁电动悬浮系统 3D 示意图

3 结　论

本文提出了一种基于 ANN 谐波补偿的高速永磁同步电机无差拍预测电流控制方法。系统固有的临界稳定特性（阻尼严重不足）在面临外界扰动时存在巨大的安全隐患，本文提出的模糊 PID 控制方法响应速度快，能让系统快速温度，控制效果强，有一定的抗干扰能力。

参考文献 **(References)**：

[1] 刘士苋,王磊,王路忠,等.电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述[J].西南交通大学学报, 2023, 58(4): 734-753.

[2] 罗成, 张昆仑, 靖永志. 新型 Halbach 阵列永磁电动悬浮系统垂向稳定性[J], 交通运输工程学报, 2019, 19(2): 101-109.

收稿日期：2026 年 06 月 26 日.

基金项目：国家杰出青年科学基金（52425702）.

作者简介：万郭豪(2002－)，男，贵州省贵阳市，博士研究生，主要从事高速磁悬浮电机设计以及电动悬浮控制研究；通信方式：hhyq@my.swjtu.edu.cn

文章编号：484-156

基于动态解码 U-Net 的磁浮车辆悬浮架响应重构方法

李梓轩 [1],刘向 [2]
(1. 山东科技大学 交通学院,山东 青岛 邮编 266590；2. 同济大学 交通学院,上海市 201804)

1 引言

磁浮车辆悬浮架是列车实现悬浮、导向与走行的关键子系统,其运行状态受磁轨关系、结构参数及外部激励等多因素耦合作用影响[1].现有振动响应重构研究表明,深度学习方法能够有效地实现结构动态响应重构,但研究对象多集中于桥梁等土木结构场景[2]. 相比之下,磁浮车辆悬浮架振动传播链条更复杂,工况变化更明显,目标测点响应恢复难度更高.针对这一问题,本文开展基于U-Net的响应重构研究.

2 正文

2.1 动态解码 U-Net 设计

已有研究表明,U-Net 结构可用于多测点输入到目标响应输出的动态结构响应重构任务[3].本文以 1D U-Net 为框架,针对其高层时域上下文组织不足以及解码阶段固定融合的问题,构建了时域桥接引导动态解码 U-Net(Temporal-Bridge Target-Aware Dynamic Decoding U-Net, TBTD-UNet).

该模型在基础 U-Net 的瓶颈位置引入中尺度时域桥接模块 Dilated Temporal Bridge(DTB)，用于增强高层动态信息的跨尺度聚合能力；在解码中后段，利用目标相关条件摘要引导特征融合与局部重建，通过目标引导动态融合模块以及基于 CondConv 的条件参数化局部修正模块，实现不同波形片段下的自适应特征分配与细节恢复。

2.2 实验结果

基于凤凰磁浮观光快线实测振动数据的初步验证结果表明, 所提出的动态解码U-Net在整体拟合精度、波形一致性及频域恢复能力方面均优于基础 U-Net,主要结果见表 1.

表 1 基础 U-Net 与 TBTD-UNet 指标对比

模型	R^2	RMSE	RelL2	FAS-RelL2
U-Net	0.8745	0.2745	0.3541	0.2492
TBTD-UNet	0.8946	0.1521	0.3245	0.2245

3 结论

本文面向磁浮车辆悬浮架关键测点振动响应重构问题，构建了时域桥接引导动态解码 U-Net(TBTD-UNet). 该模型通过中尺度时域桥接、目标感知动态融合和条件参数化局部修正，改善了基础 U-Net 在高层上下文建模、解码特征分配和局部细节恢复方面的不足. 结果表明，该方法能够提升目标测点振动响应的重构效果，可为关键测点监测数据补全提供参考.

参考文献 (References)：

[1] 马卫华，胡俊雄，李铁，等. EMS 型中低速磁浮列车悬浮架技术研究综述[J]. 西南交通大学学报，2023，58(4)：720-733.

[2] Jiang K, Han Q, Du X, et al. Structural dynamic response reconstruction and virtual sensing using a sequence to sequence modeling with attention mechanism[J]. Automation in Construction, 2021, 131: 103895.

[3] 凡逸飞，贾亮，胡金龙，等. 基于 U-Net 的动态结构响应重构[J]. 强度与环境，2025，52(1)：26-35.

收稿日期：2026 年 06 月 27 日.

基金项目：项目名称（编号）；项目名称（编号）.

作者简介：李梓轩(2002－),男,山东省、青岛市,硕士研究生,主要从事中低速磁浮车辆系统动力学与状态监测的研究；通信方式：E-mail:13176421975@163.com、联系电话:13176421975

文章编号：484-157

磁浮列车导向系统 Koopman 预测控制研究

袁佳乐[1]，强海燕[*1]，张向康[1]，董帅[1]，赵鑫[1]，
(1.上海海事大学 物流工程学院，上海市 201306)

1 引言

磁浮列车导向系统对车辆横向稳定运行具有重要作用。高速运行时，系统易受侧风、会车气动载荷等扰动，导致导向气隙偏移[1]。由于电磁力与气隙、电流之间存在强非线性，线性 MPC 在变工况和强扰动下预测精度有限。为此，本文提出一种磁浮列车导向系统扰动增广 Koopman 预测控制方法[2-3]，以提高导向系统非线性预测精度的控制性能。

2 正　文

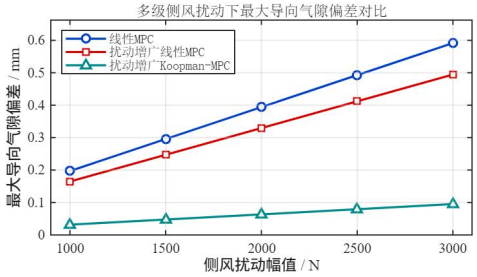
本文首先建立考虑横向扰动的磁浮列车导向系统非线性模型，并基于不同工况下的状态—输入—扰动数据，采用扩展动态模态分解方法构建扰动增广 Koopman 线性预测模型：

$$\begin{cases} z_k = \psi(x_k) \\ z_{k+1} = Az_k + Bu_k + Gd_k \\ y_k = Cz_k \end{cases} \tag{1}$$

其中，z_k 为提升空间中的状态变量，x_k 为原始系统状态变量，$\psi(\bullet)$ 为 Koopman 提升函数，u_k 为控制输入，d_k 为外部横向扰动，A、B、G 分别为 Koopman 线性预测矩阵、输入矩阵和扰动矩阵，y_k 为系统输出，C 为输出矩阵。

3 结　论

本文设置线性 MPC 和扰动增广线性 MPC 作为对照。仿真结果如图 1 所示。在多级侧风扰动下，扰动增广 Koopman-MPC 的最大导向气隙偏差始终小于线性 MPC 和扰动增广线性 MPC。



1 仿真气隙偏差图

参考文献 (References)：

[1] ZHAI M D, HAO A M, LI X L, et al. Research on the active guidance control system in high speed maglev train[J]. IEEE Access, 2019, 7: 741-752.

[2] HAN P C, XU J Q, RONG L J, et al. Data-driven control method based on Koopman operator for suspension system of maglev train[J]. Actuators, 2024, 13(10): 397.

[3] ZHANG X L, PAN W, SCATTOLINI R, et al. Robust tube-based model predictive control with Koopman operators[J]. Automatica, 2022, 137: 110114.

收稿日期：2026 年 06 月 30 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（52502447）.

作者简介：袁佳乐(2003－)，男，安徽省亳州市，硕士研究生在读，主要从事磁浮导向控制的研究；
通信方式：E-mail: 202530210001@stu.shmtu.edu.cn

文章编号：484–158

基于 EEMD 的中低速磁浮轨道不平顺波长分析

胡俊雄[1]，宗凌潇[2]，马浩然[3]，李凯[3]，马卫华[1]

(1.西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心，四川省 成都市 610031；2. 南通职业大学汽车与交通工程学院，江苏省 南通市 226007；3.中车中车长春轨道客车股份有限公司，吉林省 长春市 130062)

1 引言

轨道不平顺是影响列车振动与悬浮稳定性的关键因素，目前中低速磁浮轨道不平顺实测数据匮乏。本文基于 EEMD 分解方法，通过逆滤波器还原清远磁浮轨检弦测数据，分析高低与轨向不平顺的波长分布及能量占比特征，为中低速磁浮轨道平顺安全运行提供理论依据。

2 正　文

2.1EEMD 分解参数选取

EEMD 分解主要通过正交性检验和重构误差来计算参数。模态函数正交性检验通过计算 IMF 分量之间的能量交叉内积来表示模态混叠程度，如式 1 所示：

$$Z=\frac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{i,j=1}^{n}\left|IMF_i(t)\cdot IMF_j(t)\right|}{\sum_{t=1}^{T}x^2(t)}(i\neq j) \tag{1}$$

重构误差 RE 是原不平顺 $x(t)$与重构不平顺 $X(t)$ 的偏差，如式 2 所示。

$$RE=\frac{\sqrt{\sum_{t=1}^{T}[x(t)-X(t)]^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^{T}x^2(t)}}\times 100\% \tag{2}$$

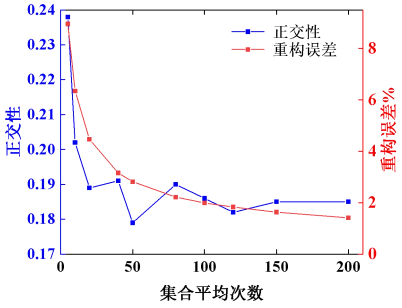


图 1 集合平均次数选取

分析过程如图 1 所示，最终，集合平均次数选择 100，白噪声幅值取标准差的 0.1 倍。

以轨向不平顺为例，进行选定参数后的 EEMD 分解，模态混叠情况如图 2 所示。EEMD 较好抑制了不平顺模态混叠。

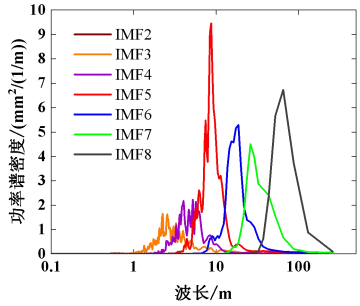


图 2EEMD 分解模态混叠情况

3 结　论

针对清远磁浮弦测数据，经滤波器还原得到轨道不平顺并开展 EEMD 分解。确定分解参数：白噪声幅值为轨道不平顺标准差的 0.1 倍，集合平均次数为 100；EEMD 可缓解传统 EMD 的模态混叠，结合闭合镜像延拓法抑制 IMF 端点发散，提升分解精度。结果显示，样本高低不平顺主导波长 1.47~27.85m（能量占比约 97%），轨向不平顺主导波长 1.34~23.51m（能量占比约 96%）；15 组低置直线段数据，统计可知日常检修应重点维护桥梁轨排与轨枕的中短波不平顺。

参考文献（References）：

[1] 马卫华，胡俊雄，李铁，等．EMS 型中低速磁浮列车悬浮架技术研究综述[J]．西南交通大学学报，2023，58(4)：720-733．

[2] 李伟强，冯洋，赵春发．桥梁竖向变形引起的中低速磁浮轨道不平顺分析[J]．铁道标准设计，2021，65(6)：77-82．

收稿日期：2026 年 06 月 29 日．
基金项目：国家自然科学基金项目（52402480, 52572460）；国家重点研发计划（2024YFB4303202）
作者简介：胡俊雄(1992－)，男，湖北孝感，副研究员，博士，主要从事磁浮车辆动力学、电磁推进研究；通信方式：E-mail:hujx92@outlook.com、联系电话:13072848548

文章编号：484-159

悬浮电磁铁磁极横向错位布置对电磁力的影响

韩田[1]，李凯[1]，杨晶[1]，邵晴[1]，李小庆[1]，任婧萌[1]
(1. 中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮研究所，吉林 长春 130000)

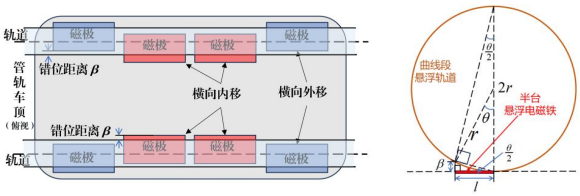
1 引　言

管轨磁浮车辆是“十五五”绿色物流重点攻关方向，其采用电磁铁磁极顶置的技术方案，结构简单、检修便捷。但受管道空间及车体尺寸限制，无法采用类似中低速磁浮依靠电磁铁整体偏移提供悬浮力的方案。为满足管轨磁浮车辆对悬浮、导向能力的需求，有必要开展磁极横向错位布置研究。

2 正　文

2.1 弯中导向力计算公式推导

磁极布置方案如图 2 所示，错位距离等于轨道极面、磁极极板中线之间的距离。



（a）车顶布置图　　（b）磁轨拓扑关系

图 1 管轨磁浮磁极布置方案

经过一系列推导，磁极在弯道中的导向力为：

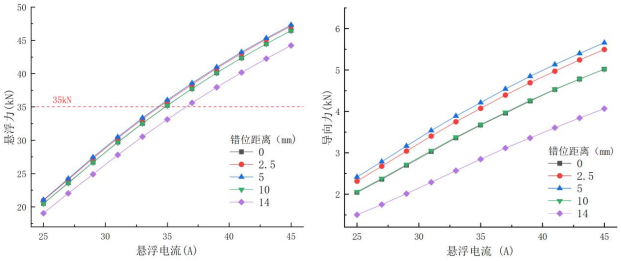
$$F_{//}=\frac{\mu_0\Omega^2}{4\pi}[\frac{L^2}{\alpha}\arctan(\frac{L^2}{2r\alpha})-r\ln(1+(\frac{L^2}{2r\alpha})^2)]$$

应用仿真软件验证计算公式，电流 30A 时，两者相差 0.84%，误差较低，结果可信。

2.2 曲线半径 25m 时，磁极的悬浮导向力

悬浮间隙 7mm、电流 25~45A、错位距离 0~14mm 时，磁极在 R25 轨道曲线段上的悬浮、导向力如图 2 所示，悬浮、导向力随电流增加而增大；错位距离 5mm、悬浮电流为 35A 时的悬浮力为 36kN、导向力为 4.2 kN，相对错位距离为 0 时的悬浮导向力分别提升 2.3%、14.4%。

悬浮间隙 7mm、电流 35A 时，轨道下表面磁感应强度分布如图 3 所示，轨道被磁化后，磁极正对轨道位置的磁感应强度最大。



（a）悬浮力　　（b）导向力

图 2 悬浮间隙 7mm、r=25m 时，悬浮、导向力随电流变化

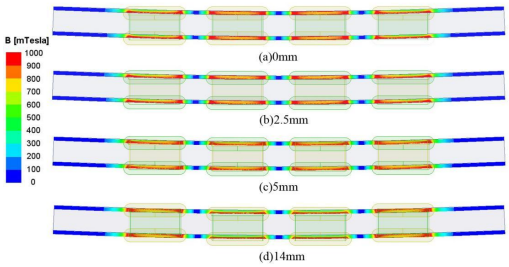


图 3 不同错位距离下，轨道下表面磁感应强度分布

3 结　论

1）悬浮电流为 30A 时，解析解与仿真解计算结果相差 0.84%，误差较低，结果可信。

2）错位距离 5mm、电流为 35A 时的悬浮力为 36kN、导向力为 4.2 kN，相对不错位时的悬浮导向力分别提升 2.3%、14.4%。

参考文献（References）：

[1] 邵晴，赵峻，张朋，等. 高速磁浮交通系统半实物仿真平台动力学建模与测试[J]. 实验室研究与探索,2025, 44(2):73-80.

[2] Qingsong Y,Xiaoqing L,Qing S, et al.Dynamic Deformation Behaviors of the Levitation Electromagnets of High-Speed Maglev Vehicle Negotiating a Sharp Horizontal Curve [J].Sensors,2023,23(5):2785-27

收稿日期：2026 年 06 月 29 日.

基金项目：国家重点研发计划资助(2024YFB4303203)，中国中车股份有限公司科技研究开发计划项目(2026CYB505)

作者简介：韩田(1996－)，性别男，籍贯(河北蔚县)，工程师，硕士学位，主要从事磁浮车辆悬浮电磁铁方面的研究；通信方式：E-mail:2972414698@qq.com、联系电话 19104319031

文章编号：484–160

超导电动磁浮系统小间隙运行的动力学性能及工程经济性评估

李海涛[1]，张卫华[1]，黄欢[2]，徐俊起[2]，林国斌[2]
(1.西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心，四川省 成都 610031；2.同济大学 磁浮交通工程技术研究中心，上海 201804)

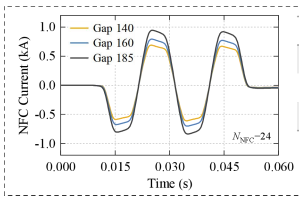
1 引言

超导电动悬浮（Superconducting Electrodynamic Suspension，SC-EDS）列车能够在超高速条件下实现被动悬浮与导向，但较大的工作间隙（通常指横向工作间隙），会削弱车轨电磁耦合，并增加地面零磁通线圈（Null Flux Coill，NFC）材料用量和推进能耗。因此，减小工作间隙对于提升系统能效和降低基础设施成本具有重要意义。然而，较小的工作间隙也对车辆动力学性能提出了更高要求，这是由于 SC-EDS 系统固有阻尼较低，且对轨道不平顺、电磁力波动及极端扰动具有较高敏感性。针对这一矛盾，本文提出了一种面向小间隙运行的 SC-EDS 结构，并引入模态导向的双支路电磁分流阻尼器（Electromagnetic Shunt Damper，EMSD）以改善系统动态性能。

2 减小车轨工作间隙下的动态特性

2.1 电磁特性

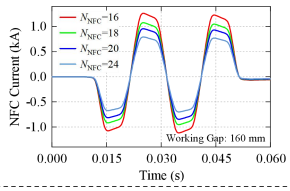
减小车轨工作间隙为 SC-EDS 系统减少轨道线圈材料用量提供可能性。图 1 给出了减小车轨工作间隙和轨道线圈匝数下的感应电流。上述结果说明，减小工作间隙可为降低 NFC 匝数提供一定悬浮裕度，从而减少材料消耗并简化地面线圈布置，但由此引起的电流增大和平衡位置下移仍需在系统设计中综合权衡。



Working Gap / mm	z_0 / mm	I_{NFC_Peak} / kA
140	-18.5	0.68
160	-24.2	0.78
185	-34.0	0.94

N_{NFC}=24

a 不同工作间隙下的感应电流（N_{NFC}=24，v=500 km/h）



N_{NFC}	z_0 / mm	I_{NFC_Peak} / kA
16	-58.9	1.18
18	-44.2	1.05
20	-35.2	0.94
24	-24.2	0.78

Working Gap : 160 mm

b 不同匝数下的感应电流（Gap=160，v=500 km/h）

图 1 不同工作间隙和匝数下零磁通线圈的电磁特性对比

3 结 论

本文建立了全尺寸 SC-EDS 车辆的电磁–动力学联合仿真框架，基于定点理论对双支路 EMSD 进行参数优化，以抑制悬浮架的两个主要横向振动模态。结果表明，将工作间隙由 185 mm 减小至 160 mm 后，车轨电磁耦合增强，在保持相近动力学性能的前提下，悬浮导向线圈匝数可由 24 匝减少至 20 匝。进一步引入多模态 EMSD 后，在耦合扰动作用下，悬浮架横向加速度由 0.76–0.92 m/s²降低至 0.59–0.74 m/s²，垂向加速度由 1.49–1.54 m/s²降低至 1.06–1.09 m/s²。此外，小间隙配置可使推进线圈铝材需求减少约 13.8 t/km；当推进电流由 1000 A 降低至 900 A 时，单个推进线圈的焦耳损耗降低约 19.0%。上述结果表明，工作间隙减小与多模态电磁分流阻尼相结合，可有效提升 SC-EDS 磁浮系统的动态安全性、能源效率和基础设施经济性。

参考文献（References）：

[1] S. Ohashi, H. Ohsaki, E. Masada. Running characteristics of the superconducting magnetically levitated train in the case of superconducting coil quenching. Electrical Engineering in Japan. 2000, 130(1): 937-946.

收稿日期：2026 年 06 月 29 日.
基金项目：国家自然科学基金（52502448，52305133）.
作者简介：第 1 作者(1991 –)，男，重庆，助理研究员，博士，主要从事机电系统振动控制研究；
通信方式：lihaitao@swjtu.edu.cn:、联系电话 17721953865

文章编号：484-161

磁悬浮技术与振动控制领域研究进展、技术瓶颈及发展趋势综述

黄良钦[1]

（1. 汕头市交通运输集团有限公司，汕头 515041）

1 引言

磁悬浮技术依托无机械接触、无摩擦、低噪声、高精度、高速度的核心优势，彻底突破了传统机械接触式运动机构的性能局限，是高端装备制造、轨道交通、精密测控、新能源储能等领域的核心前沿技术。振动控制作为磁悬浮系统稳定运行、性能优化、安全保障的核心支撑技术，直接决定磁悬浮装备的运行精度、服役寿命、安全阈值与应用场景边界。本文紧扣第十四届全国磁悬浮技术与振动控制学术会议征稿主题，系统梳理磁悬浮交通、磁悬浮轴承、磁悬浮新技术及交叉领域三大研究方向的核心科学问题，深度剖析国内外最新研究进展，精准识别当前领域存在的关键技术瓶颈，结合跨学科融合发展趋势，预判技术迭代方向与产业化应用前景。同时，针对系统耦合振动抑制、极端工况稳定控制、多物理场协同优化、智能化精准控振等行业痛点，提出创新发展思路，旨在为我国磁悬浮技术与振动控制领域的基础研究突破、关键技术攻关、科技成果转化及行业高质量发展提供理论参考与实践支撑，助力磁悬浮技术跨领域规模化、高端化、智能化应用。

2 正　文

本文系统梳理了磁悬浮交通、磁悬浮轴承、磁悬浮新技术及交叉三大领域的核心科学问题、最新研究进展、关键技术瓶颈与发展应用前景，得出以下核心结论：

第一，磁悬浮系统振动具有多场耦合、非线性、时变性、强不确定性的典型特征，不同应用场景下的振动机理与控制需求差异显著，多场耦合振动机理不透彻、复杂工况控振精度不足、极端场景适配性差是行业共性核心难题。

第二，我国磁悬浮技术已实现从基础研究到工程示范的跨越式发展，中低速磁悬浮交通、常规磁悬浮轴承、基础隔振驱动技术已达到国际先进水平，国产化自主可控能力持续提升，智能化、精细化、集成化技术创新成果不断涌现。

第三，当前领域仍存在多场耦合基础理论不完善、超高速高精度控振技术短板、极端工况稳定性不足、交叉技术工程化落地难、产业化成本偏高等关键瓶颈，制约了技术高端化、规模化应用。

第四，未来行业将以多场耦合机理深化、智能控振技术升级、跨学科融合创新、极端工况性能优化、产业化落地提速为核心发展方向，技术迭代与产业升级潜力巨大。

第五，磁悬浮技术与振动控制技术可广泛赋能交通、工业制造、精密测控、新能源、航空航天等多个领域，是我国高端制造业升级、交通强国建设、双碳战略落地的核心支撑技术，应用前景广阔、战略价值突出。

参考文献（References）：

[1]张明亮，李嘉伟，申永军，等. 超导磁悬浮列车振动NES控制研究[J]. 力学学报，2025.等

收稿日期：2026 年 06 月 30 日.

基金项目：项目名称（编号）；项目名称（编号）.

作者简介：黄良钦 1966 年出生，性别 男，籍贯 广东省汕头市，职称 高级工程师，学士学位，主要从事交通运输土建工程的研究，通讯 635731968@qq.com，电话 13415151928

文章编号：484-162

超导磁浮交通系统电磁环境研究

朱雯荻[1]，曹君慈[2]，洛启[2]
(1.北京交通大学 电气工程学院，北京 100044；2. 中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮所，吉林 长春 130000)

1 引言

超导高速磁浮列车凭借无接触、低能耗、高速、低噪声等优势，是未来轨道交通的重要发展方向。但其高功率、高速运行特性会引发复杂的高低频电磁干扰，不仅影响列车运行安全，还会对周边设备及人员健康造成潜在危害。因此分析超导电动磁浮系统的磁场环境是十分有意义的。依托有限元法与多物理场耦合方法，剖析该系统电磁干扰的来源、频率特性与耦合机制，为后续的耦合磁场磁屏蔽等工作提供数据支持。

2 正　文

2.1 超导磁浮系统电磁环境的仿真实验研究

为了更好的分析耦合磁场特性，要首先梳理系统三类电磁干扰源及其频谱特性，直流磁场由超导线圈产生，低频时变磁场由 PLG 线圈生成，工作频率满足$f = v/\lambda$，集电线圈因电流畸变产生高频谐波磁场，三类场源作为本次建模与屏蔽分析核心对象。搭建直流磁场仿真模型，以超导线圈为激励，设置 40、65、220、600km/h 四档运行速度，完成多车速下超导磁体磁场仿真计算。建立 PLG 线圈低频磁场仿真模型，完成四种不同运行速度下线圈磁密数值仿真。以集电线圈为高频干扰源搭建仿真模型，统一设置四档车速，完成多工况高频磁场分布仿真，记录不同速度区间线圈磁密变化数据。单一磁场的特性明晰后，开展多场源耦合磁场仿真，将超导线圈、PLG 线圈、集电线圈、车载发射天线作为联合骚扰源，延长运动仿真区间，针对测速定位系统搭建仿真模型，重点对交叉感应环线、地面信号处理单元两类敏感设备开展磁场仿真，输出对应磁密分布云图。整合全部车载磁场源构建轨旁设备仿真模型，采集四个速度工况下轨旁设备平面最大磁场数据，生成轨旁区域耦合磁密分布图。选取轨道梁、轨道板钢筋高磁密区域确定 A-A 横断面，搭建三维有限元多物理场耦合仿真模型，分别完成 40 km/h 与 600 km/h 工况断面磁场求解，绘制两种速度下断面等磁密曲线。全程采用有限元法与多物理场耦合分析手段，完成直流、低频、高频单一场源分建模仿真，以及测速定位、轨旁、土建断面多场源耦合仿真，完成不同速度工况下磁场分布数值计算与图像后处理工作。

3 结　论

本章通过建模与仿真分析，开展高温超导电动磁浮系统电磁干扰与环境特性研究，探究了车速对多频段磁场的影响规律与作用机理。

结果表明，超导磁体磁场稳定、几乎不受车速影响；PLG 线圈主导低频磁场、集电线圈主导高频磁场，后者磁密随车速线性增长；交叉感应环线磁场对车速敏感，220km/h 工况特性显著，空间距离是稳态磁场分布的主要影响因素，该工况下轨旁磁场出现明显衰减。仿真结果显示，系统磁场高度集中于励磁线圈附近，局域性强、空间衰减快。

本文明晰了磁浮系统多频段磁场的速度响应与耦合分布规律，可为系统电磁兼容优化与磁屏蔽设计提供支撑。

参考文献 (References)：

[1] 马光同,杨文姣,王志涛,等. 超导磁浮交通研究进展[J]. 华南理工大学学报（自然科学版）,2019,47(7):68-74,82.
[2] 刘士苋,王磊,王路忠,等. 电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述[J]. 西南交通大学学报,2023,58(4):734-753.

收稿日期：2026 年 06 月 30 日.

作者简介：朱雯荻，女，北京，硕士研究生，主要从事磁浮交通系统磁场分析的研究；
通信方式：E-mail: 24126363@bjtu.edu.cn、联系电话 15910731070

文章编号：484-163

基于 CNN-BiLSTM-CrossAttention 预测 MPC 的悬浮系统控制研究

乔晟[1]，强海燕*[1]，董帅[1]，张向康[1]，孙新兴[1]
(1.上海海事大学 物流工程学院，上海市 201306)

1 引言

磁悬浮系统的强非线性和开环不稳定特征使传统 PID 与线性 MPC 等控制方法难以同时兼顾鲁棒性与非线性动态描述。本文提出 CNN-BiLSTM-CrossAttention 预测模型，融合局部特征提取、双向时序记忆与控制-状态关联能力，并嵌入 MPC 滚动优化在线求解电流增量[1-3]。

2 正 文

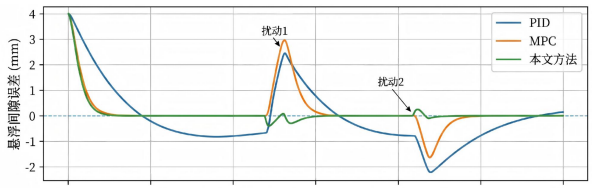
本文首先建立了单点悬浮系统的动力学模型，然后设计出相关的深度学习网络架构，最后结合 MPC 控制得到：

$$\min \sum_{j=1}^{N_p} q_x (r_{k+j} - \hat{x}_{k+j})^2 + \sum_{j=0}^{N_c-1} r_\Delta (\Delta i_{k+j})^2 + \rho \sum_{j=0}^{N_c-1} (i_{k+j} - i_0)^2 \quad (1)$$

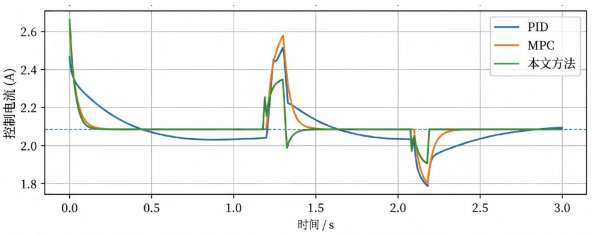
其中，N_P 为预测时域，N_C 为控制时域，q_x 为间隙跟踪误差的权重系数，用于提高间隙跟踪精度，r_Δ 为电流变化率惩罚权重，用于电流变化率，ρ 为稳态电流偏差权重，用于限制稳态能耗，r_{k+j} 为第 $k+j$ 步的参考间隙值，$\hat{x}_{k+j}$ 表示第 $k+j$ 步的间隙预测值，i_{k+j} 表示第 $k+j$ 步的绕组电流。

3 结 论

本文设置线性PID和基于线性化模型的MPC作为对照,并加入相关扰动。仿真结果如图1所示。PID在初始偏差和扰动作用下存在明显超调和较慢的误差衰减；基于线性化模型的MPC能利用约束改善稳态，但线性化预测模型在扰动区间内产生较大短时偏差；本文方法因引入深度学习架构和扰动前馈信息，能够提前修正电流趋势，使扰动后的最大间隙误差显著减小。



（a）



（b）

1 悬浮间隙误差及控制电流对比图

参考文献 (References)：

[1] Jastrzębski M, Kabziński J. Adaptive control of magnetic levitation system based on fuzzy inversion[J]. Scientific reports, 2024,14(1): 24815.

[2] Ke Z, Yi H, Zhang P, et al. Model predictive control based on Q-learning for magnetic levitation platform system[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2024, 76(3): 289-305.

[3] Yao Y, Yang M, Wang J, et al. Multivariate Time-Series Prediction in Industrial Processes via a Deep Hybrid Network Under Data Uncertainty[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(2): 1977-1987.

收稿日期：2026 年 07 月 04 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（52502447）.

作者简介：乔晟(2001－)，男，上海市，硕士研究生在读，主要从事非线性控制、机器学习的研究；
通信方式：E-mail: 202430210019@stu.shmtu.edu.cn； 联系电话：18964559786

文章编号：484–164

磁浮列车迭代学习轨道接缝波动抑制方法

朱昊辰，贺紫纯，李齐财，王连春，周丹峰，李杰
（国防科技大学 智能科学学院，湖南 长沙 410073）

1□问题概述

中低速磁浮列车通过轨道台阶时，轨道不平顺导致悬浮间隙波动，影响了车辆运行平稳性。DIMLC 采用了“标称+补偿”双通道控制律，可在无系统机理模型的前提下，沿迭代方向逐步抵消非重复性阶跃扰动，实现输出对参考轨迹的精确跟踪。基于此，本文将 DIMLC[1]应用于单铁 EMS 悬浮模型的过缝控制，以迭代学习前馈镇定轨道台阶引起的间隙波动。

2□DIMLC 在本实验中的应用

2.1□DIMLC 核心公式

DIMLC的控制律由标称控制器与校正控制器两部分组成：

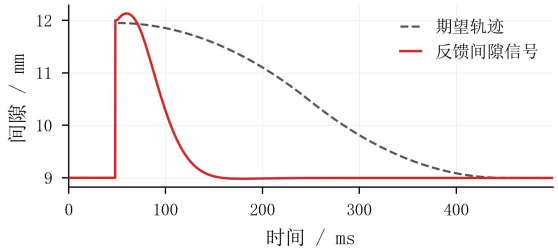
$$u_i(k)=u_{i-1}(k)+\frac{\alpha\, e_{i-1}(k+1)}{c_1+\hat{\phi}_i(k)}-\frac{\beta\,\xi_{i-1}(k)}{c_2+\hat{\phi}_i(k)}$$

式中：$e_i=y_d-y_i$ 为跟踪误差；$\xi_{i-1}=\Delta y_{i-1}-\hat{\phi}_{i-1}\Delta u_{i-1}$ 为集总不确定性；$\alpha,\beta,c_1,c_2>0$ 为可调参数；Δ 为迭代差分算子（$\Delta x_i=x_i-x_{i-1}$）。标称项（第二项）通过对内模求逆计算控制量，实现理想跟踪，校正项（第三项）抵消模型失配与扰动。DIMLC 的突出优势在于纯数据驱动——无需悬浮系统机理模型，每步仅需若干标量乘法加法运算，适合在嵌入式平台上实时运行，且标称与校正两路解耦，可分别调参以适应不同线路条件。

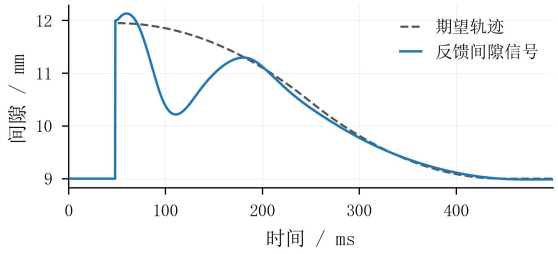
2.2 仿真设置与实验结论

仿真实验中 DIMLC 形成的前馈信号注入 PID 输出端，作为期望电流的补偿量，与 PID 构成并行前馈-反馈架构。仿真使用一个 3mm 的上台阶阶跃信号对单铁悬浮模型进行测试，上台阶信号触发后进行 0.4s 的 DIMLC 控制，使得间隙信号收敛至期望轨迹。

使用文献[2]中提出的磁浮列车悬浮性能评价指标评价算法的控制质量，以 PID 为基线，19 轮迭代后综合指标 J_A 从 3.3810 单调降至 0.9106，改善 73.1%。从曲线看来，该方法起到了一定的优化效果。



a 单独 PID 控制下的间隙变化



b PID+DIMLC 的间隙曲线变化

1□加入 DIMLC 前后控制效果对比

参考文献（References）：

[1] Zhang H, Chi R, Huang B. Data-Driven Internal Model Learning Control for Nonlinear Systems[J/OL]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2025, 36(1): 718-728. DOI: 10.1109/TNNLS.2023.3331367.

[2] 杨清. 面向轨道不确定性的悬浮系统鲁棒学习控制技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2022.

收稿日期：2026 年 07 月 04 日.

作者简介：朱昊辰，男，博士生，从事磁浮列车悬浮控制技术研究；通信方式：zhuhaochen23@nudt.edu.cn

文章编号：484-165

基于前馈神经网络的高速磁浮车体响应修正方法

陈思杰[1,2]，曾国锋[1,2]

（1.同济大学 磁浮交通工程技术研究中心，上海市 201804；2. 高速磁浮运载技术全国重点实验室，山东 青岛 266111）

1 引言

高速磁浮车轨耦合动力学模型能够较好反映车辆动力学行为，但受结构参数摄动、线路不均匀沉降、气动噪声及未建模动力学等因素影响，导致仿真输出与实测加速度在幅值和局部峰值上存在偏差。仅依靠原始物理模型难以全面表征实际运行条件下的车体特征，因此有必要引入实测数据对物理模型输出进行修正[1-2]。

本文面向车体垂向和横向加速度响应，采用“物理模型先验+数据驱动残差学习”的混合建模思想：保留车轨动力学模型给出的基本动力学趋势，用前馈神经网络学习仿真响应与实测响应之间的非线性偏差，并通过响应叠加实现输出修正。

2 数据驱动残差修正方法

2.1 残差预测与响应修正

设第j组样本、第k个采样点的原始仿真响应为y_i,j,k，实测响应为y_meas,j,k，真实残差定义为二者之差。前馈神经网络不直接回归实测响应，而是学习残差映射$f_\theta(\cdot)$，再将预测残差叠加到物理模型输出上，从而在保留物理主趋势的基础上补偿未建模误差：

$$\begin{cases} r_j,k = y_meas,j,k - y_i,j,k \\ \hat{r}_j,k = f_\theta(z_j,k) \\ y_corr,j,k = y_i,j,k + \hat{r}_j,k, \\ e_{corr},j,k = y_{meas},j,k - y_{corr},j,k \\ \quad = r_j,k - \hat{r}_j,k \end{cases}$$

考虑列车振动响应具有显著时间相关性，当前残差不仅与当前仿真响应有关，还受到前序响应状态和运行速度影响。本文构造长度为L的历史滞后窗口，将当前及历史仿真响应、速度等变量组合为输入特征z_j,k：

$$z_j,k = [y_i,j,k, v_j,k, y_i,j,k-1, v_j,k - 1, \ldots, y_i,j,k-L, v_j,k-L]^T$$

2.2 结果与讨论

以 300km/h 工况下车体加速度作为响应输出进行验证。由表 1 可知，车体垂向加速度原始仿真 RMSE 为 0.357，修正后降低至 0.156，改善比例为 56.43%；车体横向加速度原始仿真 RMSE 为 0.344，修正后降低至 0.165，改善比例为 51.97%。两个方向的误差改善比例均超过 50%，表明 FFNN 残差模型能够有效提高物理模型输出响应的仿真精度。

表 1 修正前后的 RMSE 对比

方向	仿真 RMSE	修正 RMSE	改善比例
垂向加速度	0.357	0.156	56.43%
横向加速度	0.344	0.165	51.97%

3 结论

本文面向高速磁浮耦合动力学模型仿真输出与实测加速度之间的偏差问题，提出一种基于数据驱动残差学习的物理模型输出响应修正方法。该方法将原始仿真结果作为物理先验，利用前馈神经网络学习历史响应特征到残差的非线性映射，并通过残差叠加获得修正响应。计算结果表明，修正后垂向和横向车体加速度的 RMSE 改善比例分别达到 56.43% 和 51.97%，说明该方法能够有效补偿未建模动力学因素和工况扰动造成的响应偏差。

参考文献（References）：

[1] Jakub Siłka,Michał Wieczorek,Marcin WoźniakCA1. Recurrent neural network model for high-speed train vibration prediction from time series[J]. Neural Computing and Applications,2022,Vol.34(16): 13305-13318.

[2] Kaveh Mehrzad,Shervan Ataei. Railway crossing vertical vibration response prediction using a data-driven neuro-fuzzy model – Influence of train factors[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,2021,Vol.235(9): 1086-1098.

收稿日期：2026 年 07 月 05 日.

基金项目：项目名称（编号）；项目名称（编号）.

作者简介：陈思杰(1999－)，男，广东省湛江市，硕士，主要从事高速磁浮运行平稳性及数据驱动的研究；

通信方式：cansigit@tongji.edu.cn

文章编号：484-166

快速磁浮钢梁-混凝土梁开环频响相似性分析

姚书贤[1]，曾国锋[1]

(1.同济大学 国家磁浮交通工程技术研究中心，上海 201804)

1 引言

快速磁浮车-轨-桥耦合振动测试揭示了钢梁轻量化条件下快速磁浮系统各层级动力响应变化规律，然而规律是否同样适用于混凝土梁，取决于两种梁在悬浮力作用下是否具有相似的传递特性。全工况的时域耦合仿真计算量较大，且不利于直接识别运行过程传递特性的差异。因此本文基于快速磁浮开环系统构建线性变参数系统(LPV)框架，通过固定典型位置得到局部线性时不变系统(LTI)，构建状态空间开展频域分析[1-2]。以悬浮极点力作为输入，极点处的悬浮间隙作为输出，构建悬浮力-悬浮间隙的频率响应矩阵，评估不同方案的钢梁与混凝土梁开环动态特性的相似性。

2 评价方法

2.1 LTI 模型与误差指标

以车辆位移及速度、轨道梁位移及速度为系统状态量，悬浮极点力 $F=[F_1,...,F_{20}]^T$ 作为输入，对应位置的悬浮间隙 $g=[g_1,...,g_{20}]^T$ 作为输出，通过动力学方程构建 LPV 状态空间，并将车体中心位置固定在梁上某点，得到该位置对应的局部 LTI 模型。

进一步得到 20 个输入、输出对应的开环传递矩阵 G_{gF}，按 5 块悬浮磁铁划分出 5 个 4x4 的对角阵。以钢梁为基准，对混凝土梁第 i 个对角阵定义相对频率响应误差 $ei(\omega)=||G^c_i(j\omega)-G^s_i(j\omega)||F/||G^s_i(j\omega)||F$。在 0.5~40Hz 范围内计算 5 块悬浮磁铁的误差曲线，并以误差峰值作为方案选择依据。

2.2 参数空间

钢梁作为基准梁，混凝土梁由刚度、质量、枕下等效弹簧刚度和阻尼系数 4 个参数表征，每个参数设置从 0.5 到 2.0 的 16 个等间隔离散水平，共计 65536 组设计点。

2.3 筛选结果

计算结果共得到 14 组低误差方案，这些方案传递函数对角阵的最大相对误差均低于 30%，代表性组合如图所示。

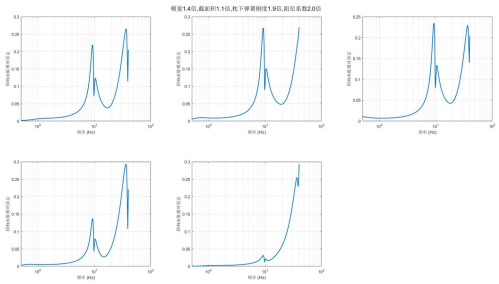


图 1 设计点(1.4,1.1,1.9,2.0)的频响误差曲线

各方案在低频段的误差总体较小，误差峰值主要集中在 8~10Hz 与近 40Hz 频段，两种梁的差异主要集中在峰值附近的窄频带上。这些组合的分布还表明，提高混凝土梁的枕下等效弹簧刚度和阻尼系数可以更容易得到与钢梁相近的开环传递频响特性。

3 结 论

(1)构建了基于冻结轨梁相对位置的悬浮力-悬浮间隙开环频响相似性分析流程。

(2)筛选出 14 组低误差方案，差异主要体现在 8~10Hz 及频带上限附近，轨-梁连接参数是实现钢梁-混凝土梁开环频响特性相似的重要调节量。

参考文献（References）：

[1] Tóth R. Modeling and identification of linear parameter-varying systems[M]. Springer, 2010.

[2] Wang D, Wang C, Li S, Ji K. Numerical investigation on dynamic interactions of non-contact maglev vehicle and two-span steel continuous bridge induced by high-frequency vibration modes. Journal of Vibration and Control. 2025;31(13-14):2811-2823

收稿日期：2026 年 07 月 05 日.

基金项目：项目名称（编号）；项目名称（编号）.

作者简介：姚书贤(2001.9－)，男，江西上饶，硕士生，主要从事磁浮载运技术与系统的研究；通信方式：E-mail:15180397691@163.com、联系电话:15180397

文章编号：484-167

高速磁浮道岔缓和曲线参数动力学适配研究

刘鸣博[1]，曾国锋[1]，朱志伟[1]
(1.同济大学 磁浮交通工程技术研究中心，上海市 201804)

1 引言

高速磁浮道岔通过整体弹性侧弯实现列车换线运行，侧线位线形的平顺性直接影响车辆通过过程中的悬浮稳定性与结构动力响应[1]。道岔侧线曲线参数受导向间隙裕度、悬浮架搭接位置变形能力、横向相对位移及空间布置条件等多重约束，且道岔区通常不具备超高设置条件，列车侧向通过时的未平衡侧向加速度对曲率变化更为敏感，曲率突变易诱发显著的横向瞬态冲击，并进一步激发车辆-道岔耦合振动。缓和曲线作为实现直线与圆曲线平顺过渡的关键线形，其空间尺度与曲率设置方式直接决定局部几何激扰特征的时空演化[2]。因此，有必要从动力学适配性角度揭示侧线位线形变化条件下的动力学激励特征演化规律，为高速磁浮道岔侧线通过性能的提升提供理论支撑。

2 侧线线形的动力学激扰特征演化

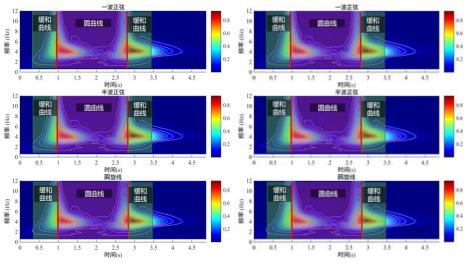
2.1 线形构建与激扰输入特征建模

构建车辆-道岔耦合动力学模型，探究侧线线形特征变化下的系统响应规律。仿真采用 3 编组列车以 98 km/h 通过侧线位道岔，通过引入回旋线、一波正弦线和半波正弦线作为典型过渡线形，以考察不同曲率平顺性对激扰特征的时频影响。为考察缓和区域空间尺度的扩展对激扰演化路径的驱动作用，系统构造了 2~16 m 的线形尺度演变工况，进而全面刻画激扰形态在空间域内的演化过程。

2.2 曲率变化下的激扰特征演化分析

图 1 给出了不同缓和曲线长度下车辆及道岔第二跨横向振动响应的时频特征分析结果。

图 2 进一步以车厢横向加速度有效值为指标，对不同缓和曲线型式及长度下的系统横向激扰水平进行量化对比。



a 车厢及道岔横向振动　　b 车厢时频响应

图 1 列车通过缓和曲线的时频特征分析

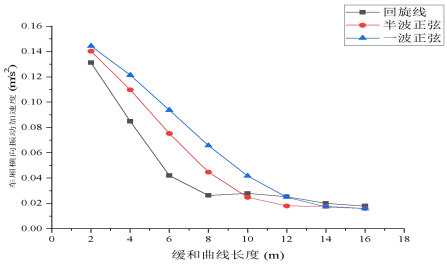


图 2 不同缓和曲线型式及长度下的系统响应特征

3 结 论

（1）回旋线对短缓和段端部激扰峰值控制更优，适合高速磁浮道岔受限空间下侧线线形实现。

（2）缓和曲线过长易使端部冲击演化为持续耦合振动，增加宽频激励与车－岔耦合振动风险。

参考文献 (References)：

[1] Sun Y, Li F, Wang Y, et al. A survey of coupled vibration characteristics and control methods in maglev transportation: challenges, methods and progress[J]. Journal of Railway Science and Technology, 2025.

[2] 米隆，招阳，魏庆朝，等. 磁浮交通系统线路缓和曲线参数取值方法研究[J]. 北京交通大学学报，2007(4).

收稿日期：2026 年 07 月 05 日.

基金项目：国家自然科学基金(52272375)，国家重点研发计划资助（2023YFB4302502）

作者简介：刘鸣博(1996－)，男，黑龙江省七台河市，硕士，主要从事磁浮车轨动力学及轨道不平顺的相关研究；
通信方式：2210772@tongji.edu.cn

文章编号：484-168

高速磁浮道岔侧线线形动力激励特性研究

赵子鸣[1]，曾国锋[1]，朱志伟[1]
(1.同济大学 磁浮交通工程技术研究中心，上海市 201804)

1 引言

高速磁浮道岔侧线线形通过曲率分布的连续变化实现直线与圆曲线之间的平顺过渡，其几何特征直接决定列车通过过程中的侧向导向激励形式与时空分布。既有研究表明，道岔侧线线形设计受缓和曲线参数、圆曲线半径及圆缓组合关系等因素共同约束，是影响车辆—道岔耦合动力响应的重要几何基础[1]；同时，车辆—道岔耦合振动研究指出，结构响应与侧向几何激励之间存在显著耦合关系[2]。

2 研究内容

本文以 EMS 型高速磁浮弹性侧弯道岔为对象，基于车辆—道岔梁—悬浮/导向主动控制耦合模型，研究侧线位线形在不同缓和曲线型式及线形实现路径下的动力学激励差异。

在曲线型式层面，将回旋线、半波正弦型及一波正弦型缓和曲线统一表示为归一化曲率函数，对比其曲率($k(s)$)及其空间导数(dk/ds)、(d^2k/ds^2)的分布特征。在工程实现层面，进一步考虑侧线位由连续曲率向离散空间轨迹转化的过程（直拟曲实现方式），分析曲率分布在空间离散化条件下对车辆通过路径的等效几何激励影响。

选取导向间隙最大偏差、间隙变化率及悬浮间隙响应作为评价指标，用于综合表征不同曲线型式及其线形实现方式对车辆—道岔耦合动力响应的影响。结果如图 1、图 2 所示。

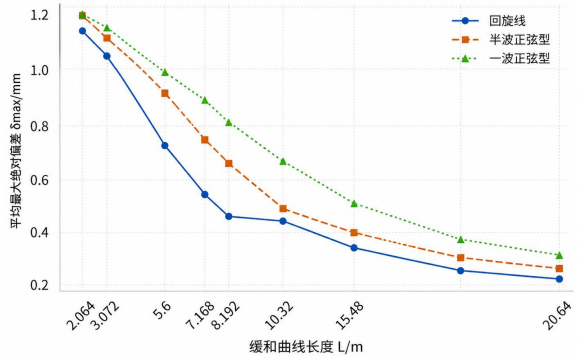


图 1 缓和曲线形式对导向间隙最大偏差的影响

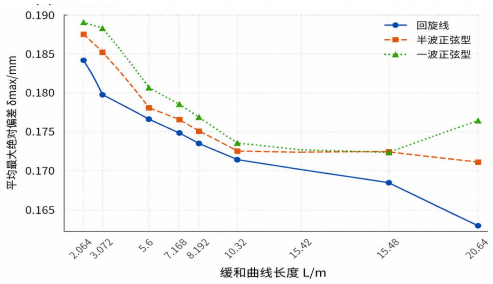


图 2 缓和曲线形式对悬浮间隙最大偏差的影响

3 主要结论

（1）不同缓和曲线形式会形成不同的导向激励特征。回旋线曲率变化较均匀，半波正弦型和一波正弦型曲率变化更易在缓和段局部集中，因而会引起不同的导向间隙波动。仿真结果表明，在 L>0 共同工况中，半波正弦型和一波正弦型相对回旋线的导向间隙最大偏差分别增加约 21.6% 和 40.7%，说明缓和曲线形式差异会明显影响导向响应。

（2）从车辆—道岔耦合响应看，导向间隙对缓和曲线形式更敏感，可直接反映平面曲率激励差异；悬浮间隙主要通过车辆姿态、梁体响应和控制反馈间接受影响，其敏感性弱于导向间隙。车体横向响应也表现出相同趋势，其中一波正弦型相对回旋线的横移 RMS 和摇头 RMS 增幅更明显，表明曲率变化集中会进一步传递为车辆横向动力响应差异。

（3）考虑以直拟曲后，相邻功能件折角和弦线偏差会形成附加不平顺输入，使导向响应进一步放大。典型工况下，导向间隙最大偏差由 0.453 mm 增至 0.644 mm，增加约 42.2%；导向间隙动态 RMS 增加约 67.8%，峰峰值增加约 17.5%。说明功能件离散效应主要表现为横向导向附加激励，后续应将连续曲率激励与离散折角激励共同纳入高速磁浮道岔线形动力学评价。

参考文献

[1] 彭也也, 宋欣悦, 赵春发, 等. 常导高速磁浮交通道岔的平面曲线线形及参数[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(4): 865-873.

[2] 曾国锋, 韩紫平, 刘鸣博, 等. 电磁悬浮型高速磁浮车-岔垂向动力响应[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023,51(3):303-313.

收稿日期： 2026 年 07 月 05 日.

基金项目： 国家自然科学基金(52272375)，国家重点研发计划资助（2023YFB4302502）

作者简介： 赵子鸣(2002—)，男，山西省长治市，硕士，主要从事磁浮道岔运维及线形参数的相关研究；
通信方式：2534260@tongji.edu.cn

文章编号： 484-169

干线运营下高温超导电动磁浮运输能力研究

于晓丹，李得伟*，戴智丞，李俊杰，赵禹舒
（北京交通大学 交通运输学院，北京市 海淀区 邮编 100044）

1 引　言

建设高速磁浮系统是我国完善高速化、多层次综合立体交通网络，支撑交通强国建设和提升高端轨道交通装备自主创新能力的重要方向。高速磁浮运行速度范围为 400～600 km/h，能够有效填补轮轨高速铁路与民航之间的服务层级空白，在中长距离、高时间价值和高强度客运走廊中具有重要应用潜力。随着关键技术逐步成熟，高速磁浮已具备工程化应用条件。然而，在工程建设和运营组织层面，高速磁浮线路能够提供的稳定运输能力尚缺乏系统研究。现有研究主要集中于牵引供电、通信信号和列车运行控制等关键技术研发，针对干线运营的通过能力计算框架和评价体系研究相对不足，且既有轮轨高速铁路运输能力计算方法难以直接适用于高速磁浮系统。因此，有必要开展高速磁浮干线通过能力计算与仿真研究，为工程规划与运营组织提供理论支撑。

2 正　文

2.1 高速磁浮通过能力形成机理分析

从车辆、线路、牵引供电、列控和运营组织等方面分析高速磁浮干线运行特征，辨析其与轮轨高速铁路及中低速磁浮系统运行方式差异，明确高速磁浮线路通过能力的影响因素及形成机理。

2.2 通过能力计算方法构建

建立由运行性能指标、列车追踪指标、断面能力指标以及运营可行性指标组成的能力评价体系。提出区间运行时间、启动与制动时间、制动距离、安全防护距离、最小追踪间隔、枢纽站折返能力及单向小时断面能力等关键指标的计算方法，构建高速磁浮线路通过能力计算框架。

2.3 仿真验证与能力测算

结合典型城市群干线运输场景，设置不同运营速度等级工况开展仿真分析。比较不同速度条件下区间运行时间、启动制动过程、最小追踪间隔、单向小时列车通过能力及单向小时客运能力等指标变化规律，验证所建立计算方法的合理性和适用性。

3 结　论

针对高速磁浮干线运营能力缺乏系统计算方法的问题，构建了高速磁浮线路通过能力计算与仿真验证框架，建立了覆盖运行性能、列车追踪断面能力等方面的评价指标体系，并提出关键能力指标的计算方法。通过典型场景仿真分析，可实现不同速度等级下高速磁浮线路通过能力的量化评估。研究成果可为高速磁浮示范线路规划建设、运营速度选择、发车间隔设计以及运输组织方案制定提供技术支撑。

参考文献（References）：

[1] 姜西. 常导高速磁浮列车追踪间隔研究[J]. 机车电传动，2025(1)：175-181.
[2] 邱莹辉. 600 km/h 高速磁浮列车追踪间隔时间计算方法及车站参数设计研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(3)：122-132.
[3] 潘洪亮，孙敏达，陈义军，等. 基于闭塞时间的中速磁浮线路通过能力分析研究[J/OL]. 西南交通大学学报，2026：1-11[2026-07-03].

收稿日期： 2026 年 07 月 05 日.
基金项目： 高速磁悬浮技术经济特征与关键参数研究（9600023963）；国家自然科学基金资助项目（72471023）；中央高校基本科研业务费专项资金项目（2025JBZX077）
作者简介： 第一作者：于晓丹 （2002—），女，内蒙古乌兰察布人，硕士研究生。E-mail：25120803@bjtu.edu.cn
通讯作者：李得伟 （1982—），男，青海乐都人，教授，博士研究生导师，博士。E-mail：lidw@bjtu.edu.cn

文章编号：484-170

线间距对高速磁浮列车交会时气动与动力学响应的影响分析

王凯文[1]，龙志强[1,2,3]，窦峰山[1,2,3]

（1. 国防科技大学，智能科学学院，湖南，长沙，410073； 2. 国防科技大学，电磁悬浮与推进技术湖南省重点实验室，湖南，长沙，410073； 3.高速磁浮技术装备铁路行业工程研究中心，山东，青岛，266112）

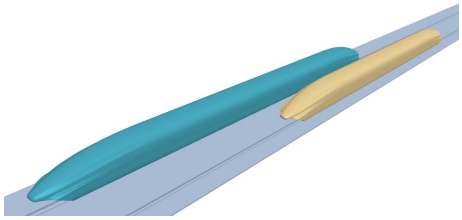
1 引言

高速磁浮列车在交会运行时，两车之间的气动干扰会引发车体表面压力突变及车辆动力学响应加剧[1,2]，直接影响运行安全性与乘客舒适度。线间距（即线路中心距）作为线路设计中的核心几何参数，对交会气动效应具有决定性影响。然而，目前针对不同线间距下磁浮列车交会气动和动力学耦合特性的系统研究尚不充分，相关阈值参数仍有待明确。

2 正　文

2.1 气动特性分析

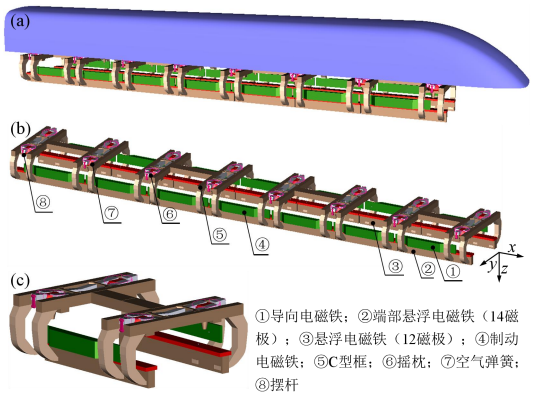
本文基于计算流体动力学与多体动力学耦合仿真方法，构建了高速磁浮列车交会数值计算模型。如图 1，分析了 5.3 m、5.6 m 和 6.0 m 三种线间距工况下，两列车以 600 km/h 相对速度交会时的气动力演化规律与车辆动态响应特征。研究结果显示：线间距越小，交会侧车体表面负压峰值越大，横向气动力及偏航力矩显著上升；同时，线间距对气动效应的影响程度与车速呈正相关，高速条件下小线间距的不利影响进一步放大。



1 高速磁浮列车交会示意图

2.2 动力学响应分析

如图 2，基于气动载荷输入和高速磁浮列车动力学仿真模型，进一步分析不同线间距下磁浮列车的悬浮和导向间隙波动、电磁铁振动加速度及车体振动加速度等动力学响应指标。结果表明，线间距的减小导致悬浮系统调节负担加重，5.3 m 工况下间隙波动幅值已接近控制系统的调节极限；导向力在交会过程中出现显著脉冲，线间距越小脉冲幅值越大，恢复时间延长，对列车横向稳定性构成挑战。综合动力学响应特征，线间距 6.0 m 工况下系统响应裕度明显优于 5.3 m 工况，与 5.6 m 工况差异较小，表明 5.6 m 可作为工程折选值。



2 高速磁浮系统动力学仿真模型

3 结　论

结合气动与动力学仿真结果，建议高速磁浮线路线间距不宜小于 5.3 m，以确保交会时悬浮间隙波动和横向位移保持在安全裕度之内。本文成果可为高速磁浮交通线路参数设计及交会运行安全评估提供定量参考依据。

参考文献（References）：

[1]丁叁叁，姚拴宝，陈大伟. 高速磁浮列车气动升力特性[J]. 机械工程学报，2020，56(8)：228-234.

[2]Feng Y, Zhao C F, Peng Y Y, et al. Influence of levitation bogie structure aerodynamic loads on the dynamic performance of 600 km/h EMS maglev train[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2025, 261: 106070.

收稿日期：2026 年 07 月 05 日.

基金项目：国家自然科学基金重点项目(52332011)；国家自然科学基金联合基金项目(U24B20119).

作者简介：王凯文(1997)，男，安徽省六安市，博士后，博士，主要从事悬浮导向控制、流动控制的研究；通信方式：E-mail:kwwang@csu.edu.cn、联系电话:19918996043

文章编号：485-001

高速磁悬浮电机轴承结构设计对散热的影响

崔阳阳[1]，韩一凡[1]

（1.上海电气电站设备有限公司上海发电机厂，上海市 200240）

1 引 言

磁悬浮轴承技术使高速电机功率密度不断提升，热管理问题日益突出。磁轴承结构不仅决定转子支承特性，更影响电机内部流场与散热。目前针对磁轴承散热的研究多集中于损耗计算，而缺乏对轴承本身温升及其布局影响的系统分析[1]。本文基于流固耦合传热理论，采用数值模拟与理论公式相结合的方法，系统研究磁轴承气隙大小、径向通风孔布局及轴向位置对风摩损耗和散热性能的影响，为高功率密度磁悬浮电机的散热设计提供依据。

2 高速电机磁轴承散热研究

2.1 磁轴承风摩损耗对温度的影响

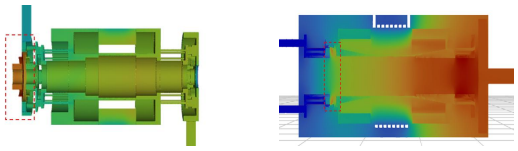
转子与磁轴承定子间的微小气隙内，高速旋转壁面产生强剪切作用，形成显著风摩损耗。根据转子表面风摩损耗理论，损耗 P_f 与气隙尺寸密切相关[2]，其中部件表面摩擦系数 C_f 是气隙尺寸的复杂函数。本文建立磁轴承简化模型，对不同气隙（0.3mm-1mm）下的风摩损耗及结构温升进行数值仿真。结果表明：在相同冷却风量下，气隙越小，风摩损耗越大，磁轴承温升越高。因此，在满足磁轴承动态性能前提下，适当增大气隙可有效降低转子附加损耗。

2.2 磁轴承径向布局对流动传热的影响

径向磁轴承定子铁心背部有通风孔，与气隙风路并联，实际通过气隙的冷却风量占比直接影响风摩损耗和对流换热。本文建立含定子铁心、绕组、灌胶及转子的磁轴承模型，改变通风孔面积，采用 CFD 软件分析气隙通风量占比、风摩损耗及结构温升的变化规律。结果显示：随通风孔面积增大，气隙风量占比下降，风摩损耗减小，但过多的通风孔会导致气隙处流速过低、对流换热能力下降，使结构温升先降后升。因此，需合理设计径向通风孔以平衡风摩损耗与换热能力。

2.3 磁轴承轴向布局对流动传热的影响

轴向磁轴承的布局对电机整体散热效果影响显著。对比两台 MW 级磁悬浮高速电机的热仿真结果发现：当轴向磁轴承布置于电机进气口侧时（图 1a），大流量冷却气体会在进入电机本体前被该结构强烈扰动，不仅自身产生巨大的风摩损耗，还会在轴承前方形成流动死区，导致局部温度过高；而将轴向磁轴承优化布置于两个径向磁轴承之间时（图 1b），气流能够更加均匀顺畅地流经电机内部，有效避免了死区的形成，显著改善了电机内部的温度均匀性，使整机最高温度大幅下降。



a 轴向磁轴承于进气口侧　　b 轴向磁轴承于电机中部

图 1 轴向磁轴承不同布局下的温度分布

3 结 论

1）磁轴承气隙大小是影响风摩损耗的关键因素，气隙越小损耗越大，在满足性能前提下适当增大气隙可有效降低转子附加损耗。

2）径向磁轴承通风孔布局会显著影响其流动传热，需合理设计通风孔。

3）轴向磁轴承布局对电机整体散热起决定性作用，位于进气口侧易导致流动死区和局部过热，而位于电机中部可使气流分布更均匀，显著提升散热效果。

参考文献（References）：

[1] 刘斌，余中军，付佳．径-轴向磁轴承冷却设计及温度场分析[J]．中国电机工程学报，2024，44(12)：4945-4955.

[2] 邢军强，王凤翔，张殿海，等．高速永磁电机转子空气摩擦损耗研究[J]．中国电机工程学报，2010，30(27)：14-1.

收稿日期：2026 年 04 月 13 日.

基金项目：无.

作者简介：崔阳阳(1985－)，女，山东省威海市，高级工程师，硕士，主要从事大型汽轮发电机及特种电机通风散热冷却的研究；通信方式：E-mail: cuiyy2@shanghai-electric.com

文章编号：485-002

主动磁悬浮轴承结构设计研究综述

杨杰[1]，吴洪涛[2]，秦耀[2]，胡海林[2]
(1.上海电机学院 电气学院，江西 赣州 341000；2.江西理工大学 永磁磁浮技术与轨道交通研究院，江西 赣州 341000)

1 引言

主动磁悬浮轴承通过定子电磁铁与转子之间的电磁作用力，实现转子在空间中的无接触支承。与滚动轴承[1]和滑动轴承相比，AMB 具有无机械磨损、适于真空与洁净环境、转速上限高、阻尼和刚度可主动调节等优势. 然而，AMB 并不是单纯依靠控制器即可实现高性能运行的系统.其可获得的承载能力、磁通利用率、漏磁水平、线圈发热、气隙敏感性和故障安全边界，本质上都首先由结构本体设计决定. 从近年来的发展趋势看，结构设计问题正逐渐前移并成为研究核心：一方面，传统径向磁轴承与轴向磁轴承分置方案虽然成熟，但部件数量较多、轴向尺寸较大、装配精度要求高，不利于系统紧凑化；另一方面，随着高功率密度和小型化需求增强，如何在有限体积内实现更高承载能力、更低损耗和更优稳定性，已成为结构设计必须解决的问题[2].

2 AMB 结构设计关键问题

主动磁悬浮轴承结构设计常用的分析方法包括等效磁路法、解析建模、有限元分析和实验样机验证。等效磁路法适用于概念设计与参数初选，可快速评估极靴尺寸、气隙长度、磁轭截面等参数对承载能力的影响；解析建模适合揭示结构参数与磁场分布之间的规律关系；从近年研究看，主动磁悬浮轴承结构设计大体沿着四条路线演进.第一条路线是对传统径向和轴向结构进行局部优化，包括极数调整、极靴改形和磁路重构，以提高承载能力和改善耦合问题.第二条路线是发展永磁偏置混合结构[3]，通过将静态承载与动态调节分离，降低纯电磁结构的持续功耗.第三条路线是径向—轴向一体化和多自由度复合支承结构，目标是在更少部件和更短轴向尺寸下获得多方向稳定支承.第四条路线则是磁轴承与驱动电机的一体化集成，通过支承与驱动共平台设计来实现整机紧凑化和高功率密度.

3 结 论

主动磁悬浮轴承结构设计研究正在从传统“径向磁轴承 + 轴向磁轴承”的分立思路，逐步走向混合化、多极化、一体化和高集成化。结构设计已经不再只是控制系统的附属问题，而是决定承载能力、磁通利用率、功耗水平、体积尺寸、制造性和长期可靠性的核心环节。当前国内外代表性研究已经在径向主动磁悬浮轴承、轴向主动磁悬浮轴承、永磁偏置混合磁轴承、径向—轴向一体化复合结构以及无轴承电机集成结构等方面形成较清晰的发展脉络，但在统一评价、结构比较、工程验证和新拓扑探索方面仍有较大提升空间。

参考文献 (References)：

[1] 张维煜，朱熀秋，鞠金涛，等. 磁悬浮轴承研究现状及其发展[J]. 轴承，2016(12)：56-63.
[2] 李媛媛，朱熀秋，朱利东，等. 磁悬浮轴承发展及关键技术研究现状[J]. 微电机，2014，47(6)：69-73.
[3] 吴华春，涂星，周建，等. 磁悬浮转子不平衡振动控制研究综述[J]. 轴承，2022(3)：1-9.

收稿日期：2026 年 04 月 13 日.
基金项目：国家重点研发计划（2024YFB4303201-5）
作者简介：杨杰(1979-)，男，安徽蚌埠，教授，博士，主要从事轨道交通运输、智能控制方面的研究；
E-mail:yangjie@jxust.edu.cn、联系方式：13576786659

文章编号：485-003

一种多环靶盘式磁轴承建模与径向稳定性分析

李勇群[1,2]，秦　耀[1,2]，杨　杰[2,3]

(1.江西理工大学 电气工程与自动化学院，江西 赣州 341000；2.江西理工大学 磁浮轨道交通装备江西省重点实验室，江西 赣州 341000；3.上海电机学院 电气学院，上海 201306)

1 引言

传统的五自由度(5-DOF)磁悬浮支承方案通常由两组径向磁轴承和一组轴向磁轴承组成，这种分立式结构虽然控制逻辑清晰，但存在执行器数量多、轴向尺寸冗余、系统功耗高以及控制系统复杂等工程瓶颈. 针对该问题，本文提出一种多环靶盘式磁轴承结构，该结构通过三个 120°分布的 U 型电磁铁实现对轴向和偏转自由度的主动控制，并利用聚磁齿产生的磁阻力实现径向自由度的被动自稳定，构成了 3 主动与 2 被动的集成化悬浮方案.

2 结构拓扑与工作原理

图 1 所示为靶盘式主动磁轴承样机结构图. 在理想状态下，各 U 型磁铁极靴截面与环状靶盘上表面突出的聚磁齿的一部分是完全重合的. 当环状靶盘发生径向偏移时，U 型磁铁与聚磁齿间的正对面积就会减小，进而增大磁阻. 根据磁阻最小原理，此时三个 U 型磁铁电磁力合力的径向分力将抑制这种径向偏移，从而实现径向自稳定.

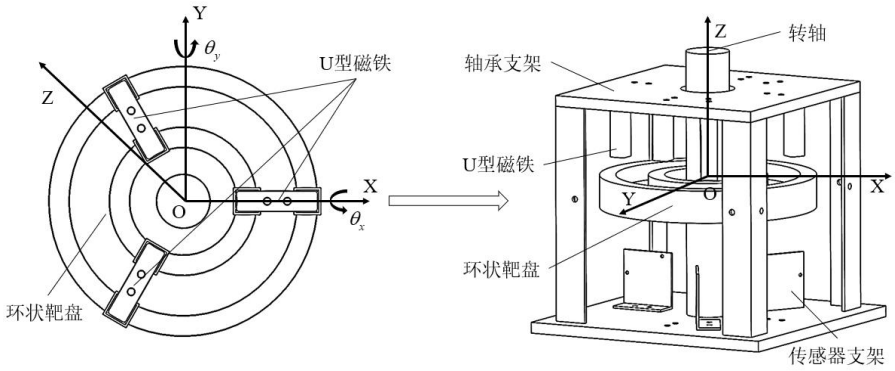


图 1 靶盘式主动磁轴承样机结构图

建立图 1 所示样机的数学模型，并代入各项电磁参数，可推导出环形靶盘在受到径向扰动（即 XOY 平面内的扰动）时，其被动径向电磁恢复力与偏移量之间的关系，并绘制图 2 所示径向电磁恢复力 F_r -偏移量 x_0y_0 曲面.

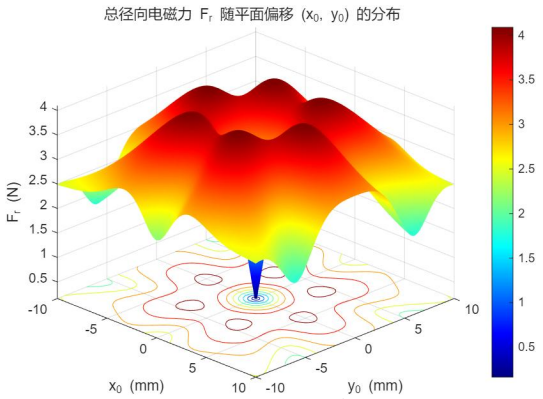


图 2 径向电磁恢复力-偏移量曲面

图 2 表明该结构在小扰动条件下能够提供近似线性的被动正刚度，而且在较宽工作区间内均可形成始终指向平衡点的恢复性约束. 在大偏移区域内，由扰动引起的等效磁路长度显著增加，聚磁齿间的磁耦合作用减弱，恢复力增长趋势受到抑制.

3 结　论

本文提出了一种多环靶盘式磁轴承结构，并建立了考虑径向偏移的系统模型. 理论分析表明，该结构可通过三个电磁铁实现对轴向及两个偏转自由度的主动控制，并在小扰动条件下能够利用聚磁齿错位引起的磁阻恢复力实现径向被动自稳定.

参考文献 (References)：

[1] 张仁坤，徐园平，周瑾等. 磁悬浮柔性转子无试重不平衡量分布优化方法[J]. 振动工程学报，2025，38(11)：2609-2618.

[2] 赵川，孙凤，裴文哲等. 永磁悬浮技术的实现机理与发展现状[J]. 机械工程学报，2023，59(17)：189-207.

收稿日期：2026 年 04 月 13 日.

基金项目：国家重点研发计划(2024YFB4303201-5).

作者简介：李勇群(2002－)，男，江西南昌人，硕士研究生，主要从事智能控制理论与应用、磁悬浮控制技术的研究；通信方式：E-mail:19870816065@163.com

文章编号：485–004

磁悬浮转子电磁激振器静态力参数辨识方法

史申奥[1]，周瑾[1]，曾磊[1]

（1. 南京航空航天大学 机电学院，江苏省 南京市 210016；）

1 引言

磁悬浮轴承因非接触支承的优势在高速旋转机械中广泛应用，为对此类系统进行转子动力学研究，可在转子中间位置安装电磁激振器以施加可控激振力。在整机悬浮运行状态下，由于电磁激振器通常缺乏外部力传感器，且常用的离线标定法会破坏系统原始边界条件，导致其实际输出力难以准确获取[1]。同时，受重力静挠度和安装偏心等因素影响，激振器处的实际气隙往往偏离设计值，使得基于理想磁路的理论电磁力模型存在偏差[2]。为此，本文将闭环磁悬浮轴承作为虚拟力传感器，提出一种电磁激振器静态力参数原位辨识方法。

2 静态力参数原位辨识方法

在转子静态悬浮状态下，利用两端已标定的支承磁悬浮轴承作为虚拟力传感器，通过测量支承力变化间接获取中间激振力。为消除转子重力等常值干扰，以激振器完全断电为基准状态进行增量差分。利用两端磁悬浮轴承位移控制条件，建立增量静力平衡方程。由两端支承力增量之和，可获得第 j 个阶梯工况下的实际激振力测量值 $\hat{F}_{exc}^{(j)}$，转子外力受力分析如图 1 所示。

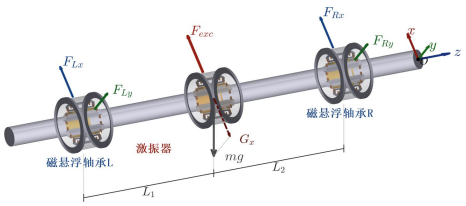


图 1 三支承转子受力分析示意图

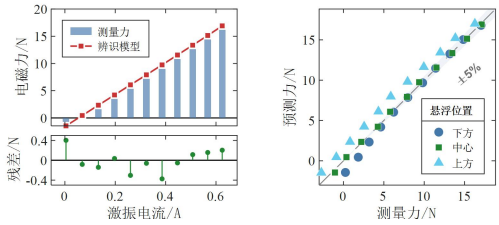
考虑到等效气隙偏移量δ_0和实际电磁力常数 k，构建非线性最小二乘优化的目标函数：

$$J(k,\delta_0)=\sum_{j=1}^{n}\left[\hat{F}_{exc}^{(j)}-F\left(x_{mid}^{(j)},i_x^{(j)},k,\delta_0\right)\right]^2 \tag{1}$$

采用信赖域反射算法在物理约束边界内求解该二维优化问题，实现参数辨识。

3 实验验证与结果分析

在磁悬浮转子实验台上开展了阶梯稳态力递增实验，激振器偏置电流设定为 1 A，控制电流逐级递增。图 2a 以柱线组合展示了中心悬浮位置下的辨识拟合效果，柱体为测量力，折线为模型预测力，拟合决定系数 R^2 约为 0.99，精度较高。同时，辨识结果显示实际电磁力常数仅为理论设计值的 38%左右，表明若不经标定直接使用理论公式会导致较大误差。为分析位置鲁棒性，图 2b 给出了交叉验证结果：以中心位置标定的参数预测邻近悬浮位置的激振力，最大力偏差在 2.11 N 以内，验证了中心标定参数在邻近工作点的适用性。



a 实验辨识力拟合效果　b 交叉验证力预测对比

图 2 静态力参数实验辨识与验证结果

4 结论

实验证实，实际电磁力常数约为理论值的 38%，体现了标定的必要性。多悬浮位置验证表明，中心位置标定参数对邻近悬浮位置的力预测偏差接近± 5%，证明了该方法的准确性与位置鲁棒性，为后续转子动力学实验提供了可靠的激振力输入。

参考文献（References）：

[1] SANKAR B, SEKHAR A S, JANA S. Estimation of magnetic bearing constant in active magnetic bearings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 198: 110411.

[2] JIANG H, SU Z, WANG D, et al. Multiparameter identification for active magnetic bearing with uncertainties based on a coupled nonlinear model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 10431-10441.

收稿日期： 2026 年 04 月 14 日.

基金项目： 国家科学自然基金项目（52475060）

作者简介： 史申奥(2001)，男，湖北省武汉市，硕士研究生，主要从事磁悬浮轴承的研究；

通信方式：E-mail: shenaoshi@nuaa.edu.cn、15827108210

文章编号：485–005

不平衡磁拉力下磁悬浮转子动力学特性研究

蔡文龙，周瑾，江琦琦

(1. 南京航空航天大学 机电学院，江苏省 南京市 邮编 210016)

1 引 言

由于制造公差、装配误差及运行扰动等因素的影响，转子中心不可避免地偏离电机定子的几何中心，导致气隙分布不均，从而产生不平衡磁拉力（UMP）。与传统机械轴承系统相比，磁悬浮轴承系统具有轴承刚度较低、轴承与转子之间气隙较大的特点，因此，不平衡磁拉力更易干扰系统控制精度，增加控制负担，甚至诱发系统失稳。本文以直驱式磁悬浮转子系统为研究对象，在磁悬浮轴承-转子系统模型中引入不平衡磁拉力，并对系统动力学特性展开研究。重点分析了不平衡磁拉力中关键参数对转子系统稳定性及振动特性的影响；在此基础上，进一步考虑不平衡磁拉力作用下不同 PID 控制参数对系统稳定性的影响。从而为转子系统在不平衡磁拉力作用下的稳定运行提供参数选取依据。

2 正 文

2.1 不平衡磁拉力解析模型

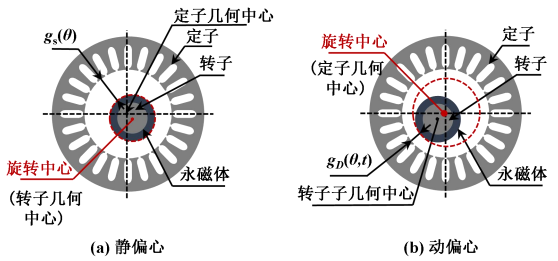


图 1 转子常见偏心故障类型

如图 1 所示，转子常见偏心故障主要为静偏心与动偏心。对于一对极的表贴式永磁同步电机而言，一定偏心率下，偏心距与不平衡磁拉力呈现线性关系，其不平衡磁拉力解析式可写为：

$$f_{ump} = k_{ump} \cdot e$$

式中，k_{ump} 为不平衡磁拉力刚度，其主要与电机结构参数与永磁体参数有关。

2.2 考虑不平衡磁拉力的磁悬浮柔性转子模型

本文采用 Timoshenko 梁单元对转子进行有限元建模，考虑不平衡磁拉力下磁悬浮柔性转子的运动微分方程可以写为：

$$M_r\ddot{q} + (C_r + \omega G_r)\dot{q} + (K_r - K_{ump} - k_h T_a^{\mathrm{T}} T)q = k_i T_a^{\mathrm{T}} i_a + T_u^{\mathrm{T}} F_u$$

根据上式可知，由偏心引发的不平衡磁拉力，其物理本质表现为对系统施加了一个全局范围内的负刚度矩阵。该负刚度会削弱磁悬浮轴承提供的支撑刚度，导致系统失稳。

2.3 不平衡磁拉力下系统动力学特性分析

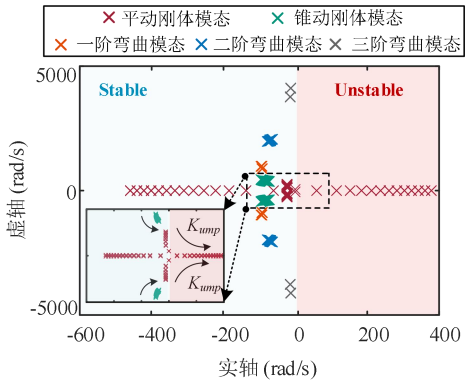


图 2 不同不平衡磁拉力刚度下各阶模态根轨迹

3 结 论

仿真结果表明，不平衡磁拉力主要影响磁悬浮转子系统的刚体模态，容易导致系统失稳，而对弯曲模态的影响较小；在 PID 控制参数中，比例系数 P 的增大能够提高磁悬浮轴承的支撑刚度，进而削弱不平衡磁拉力对系统的影响。

参考文献（References）：

[1] 吴海同. 磁悬浮高速永磁电机偏心不平衡分析与补偿研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.

[2] Han X, Liu G, Le Y, et al. Unbalanced magnetic pull disturbance compensation of magnetic bearing systems in MSCCs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(4): 4088-4097.

收稿日期： 2026 年 04 月 14 日.

基金项目： 国家自然科学基金（52475060）.

作者简介： 蔡文龙(2002－)，男，硕士研究生，主要从事磁悬浮转子系统振动抑制研究；通信方式：SZ2405067@nuaa.edu.cn，电话 17770231710

文章编号：485-006

磁悬浮分子泵不平衡交叉解耦控制研究

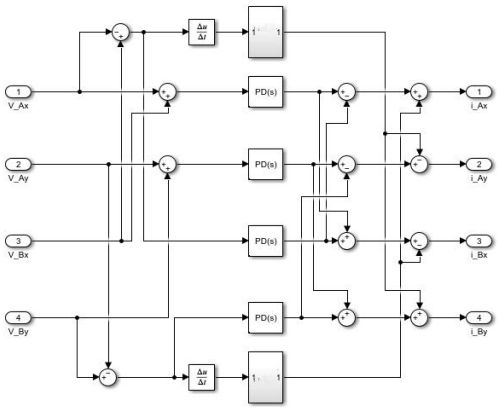
张原诚[1]，温鹏[2]，张鹏辉[2]，冯悦昕[1]，徐敬淳[1]，邓自刚[2]
(1. 西南交通大学 信息科学与技术学院，四川省 成都市 611756；
2. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031)

1 引　言

随着真空技术向高清洁、长寿命方向发展，磁悬浮分子泵凭借其无油污染、无摩擦磨损等优势，已成为真空工业的主流选择[1]。然而，磁悬浮分子泵转子是一个典型的多变量、非线性、强耦合系统。工业上常用的分散 PID 控制方法将磁悬浮分子泵径向四自由度直接作为四个单自由度去控制，这种控制方式无法考虑两端径向磁轴承在一组相互正交的 X 和 Y 控制通道上的耦合，又无法处理当转子处于高速旋转状态时陀螺力矩产生的交叉耦合效应导致的X与Y方向耦合[2]，极易引发系统失稳。此外，由于转子质心与几何中心不重合，同步不平衡振动会随转速剧烈增长。因此，实现高效的不平衡交叉解耦控制抑制磁悬浮分子泵转子振动，是提升磁浮分子泵性能的有效方式。

2 正　文

2.1 交叉解耦控制

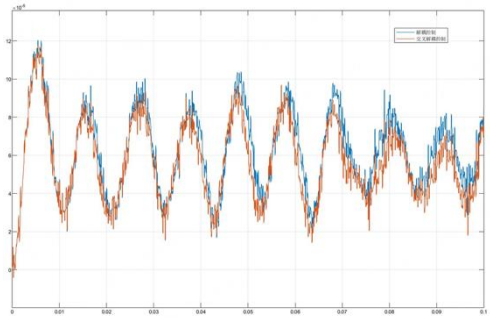


1 交叉解耦控制框图

分散 PID 控制齐次矩阵微分方程中存在非对角矩阵使 X、Y 方向及 A、B 两端耦合在一起，为解除单方向 A、B 两端耦合，通过“COG（Center of Gravity）坐标”控制将单方向的 A、B 两端耦合解除，但 X、Y 方向由于陀螺矩阵仍相互影响。为此，添加修正项即控制系统中添加交叉回路使 X、Y 方向的耦合完全解除，齐次矩阵微分方程中仅存在对角矩阵。

2.2 仿真对比及实物测试

在 Simulink 搭建四自由度磁悬浮分子泵模型及两种控制系统，通过仿真对比及在磁悬浮分子泵上进行实物测试发现交叉解耦控制效果最佳。



2 解耦控制及交叉解耦控制仿真结果

3 结　论

本文通过对“COG 坐标”控制方式添加修正项使四自由度控制系统实现完全解耦。并通过仿真实验及实物测试得到这种完全解耦的交叉解耦控制增加悬浮的稳定性并有效减小振幅。

参考文献（References）：

[1] 付磊，徐向波，李俊峰. 无转速传感器的磁悬浮分子泵陀螺效应抑制[J]. 光学精密工程, 2024, 32.

[2] XIANG Biao, XU Jian-min, LIU Zhi-kai, et al. Vibration characteristics and cross-feedback control of magnetically suspended blower based on complex-factor model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2023, 556.

收稿日期： 2026 年 04 月 14 日.

作者简介：张原诚(2000－)，男，辽宁北票，博士生，主要从事电磁悬浮与磁浮轴承相关研究；通信方式：E-mail：yc_zhang@my.swjtu.edu.cn、联系电话：15124079353

文章编号：485–007

电磁悬浮系统辨识与鲁棒 MPC 控制研究

徐敬淳 [1]，冯悦昕 [1]，张鹏辉 [2]，张原诚 [1]，邓自刚 [2]
(1 西南交通大学 信息科学与技术学院，四川省 成都市 611756；
2.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031)

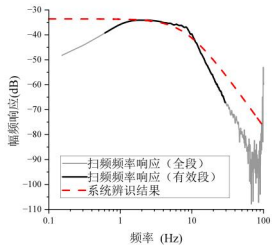
1 引 言

电磁悬浮系统虽具有无接触、低摩擦和响应快等优点，但同时存在开环不稳定、非线性强以及易受模型失配和扰动影响等问题。本文围绕工作点附近线性模型获取与鲁棒控制补偿展开研究。

2 正 文

2.1 模型获取与系统辨识

根据电磁力解析关系并在稳定悬浮点附近线性化，建立二阶小扰动模型。辨识实验在闭环下进行，采用 chirp 扫频结合 Welch 方法和相干性加权完成二阶频域辨识。结果表明，该模型能够反映系统低频主导动态。



1 系统辨识结果

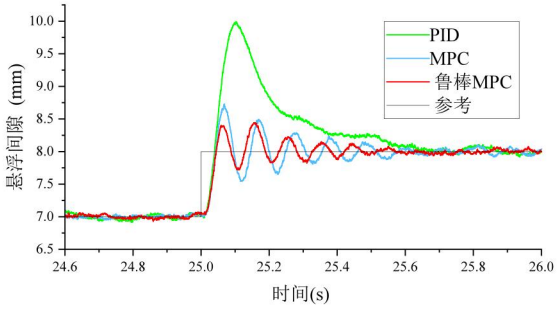
2 实验平台

2 基于 Tube 思想的鲁棒 MPC

本文采用“名义 MPC + 局部误差反馈补偿”的复合结构。名义 MPC 负责滚动优化和约束处理；局部反馈项用于修正实际状态与名义轨迹之间的偏差，以抑制模型失配和外部扰动影响。反馈增益通过局部状态反馈方法配置，使误差动态保持有界。该方法借鉴 Tube MPC 的思想，在保留 MPC 优化优势的同时提升了闭环鲁棒性。

2.3 实验验证

本文在稳定悬浮、阶跃响应、冲激扰动以及正弦/三角波参考跟踪等工况下，对 PID、常规 MPC 与鲁棒 MPC 进行了对比测试。结果表明，基于模型预测的控制方法整体优于传统 PID，而鲁棒 MPC 在稳态保持、超调抑制、扰动恢复和变参考跟踪等方面进一步表现出更均衡的综合性能。



3 不同控制策略下系统阶跃响应图

3 结 论

本文针对单自由度电磁悬浮系统开展了建模、辨识与控制研究，获得了可用于控制器设计的二阶线性预测模型，并进一步构建了体现 Tube 思想的鲁棒 MPC 控制方法。实验结果说明，加入状态误差反馈补偿后，系统在超调抑制、扰动恢复和变参考跟踪中的综合表现优于常规 MPC 与 PID。

参考文献 (References)：

[1] MAYNE D Q, RAWLINGS J B, RAO C V, 等. Constrained model predictive control: Stability and optimalityq[J].

[2] VAN VUUREN P A, VAN SCHOOR G, VENTER W C. LTI Modelling of Active Magnetic Bearings by Means of System Identification[J/OL]. SAIEE Africa Research Journal, 2011, 102(3): 66-75.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.

作者简介：徐敬淳(2001 –)，男，江苏南京，硕士生，主要从事电磁悬浮与磁浮轴承相关研究；通信方式：E-mail：xujingchun@my.swjtu.edu.cn、联系电话：13912904849

文章编号：485–008

基于 Bi-LSTM 的磁悬浮转子系统动力学数据驱动建模方法

江琦琦[1]，周瑾[1]，金超武[1]，徐园平[1]，张越[1]，周扬[1]
(1.南京航空航天大学 机电学院，江苏 南京 210016)

1 引　言

磁悬浮转子动力学模型是指导悬浮控制器设计的重要前提。而实际转子结构不对称、电控系统构差异及转子各自由度间的运动耦合等系统结构误差及转子固有特性均会加剧转子动力学的变化，导致传统理论模型难以有效反映真实转子动力学行为，降低了实际控制器的控制效果。

尽管已有文献开展了相关研究，并将其逐步考虑进传统动力学模型中，但其依赖大量的物理先验知识，实际理论模型构建难度大且缺乏系统性的方法进行统一数学描述。数据驱动建模方法[1]利用实验数据来构建模型的高保真建模方法，是一种高效且系统性的建模方法，但其模型预测精度依赖训练数据的选取，目前磁悬浮转子领域缺乏相关研究。

针对上述问题，本文提出了一种基于 PRBS 激励信号的磁悬浮转子系统动力学 Bi-LSTM 数据驱动建模方法，并在两台系统结构误差不同的实验台上进行测试，结果验证了该方法的有效性。

2 正　文

2.1 数据驱动建模方法

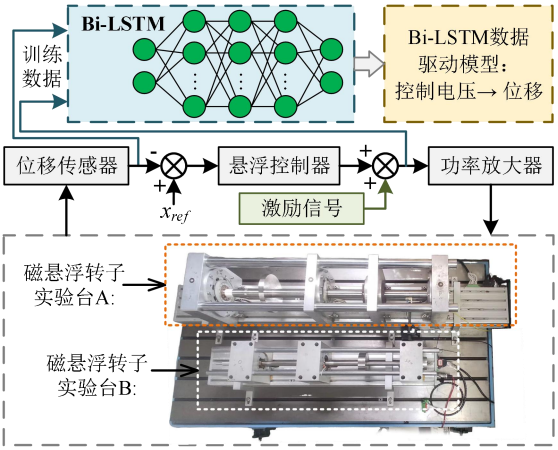


图 1 基于 Bi-LSTM 数据驱动建模架构

如图 1 所示，在激励信号作用下采集转子控制电压作为输入，转子位移作为输出，训练 Bi-LSTM 神经网络，获得磁悬浮转子数据驱动模型。

2.2 实验结果

图 2 为 LSTM、CNN-LSTM 及 Bi-LSTM 三种不同数据驱动模型的位移响应预测效果。

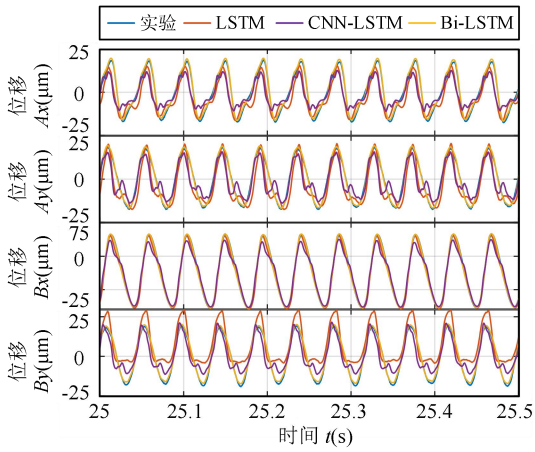


图 2 不同数据驱动模型预测效果

3 结　论

针对系统结构误差引起的磁悬浮转子动力学建模误差，本文提出了一种基于 Bi-LSTM 的磁悬浮转子动力学数据驱动建模方法，实验结果表明该数据驱动模型可以反映动力学模型误差，模型的精度与训练信号频带长度、幅值呈正相关的关系。

参考文献（References）：

[1] Paixão J, Platzer A, Rodriguez J, et al. Data-driven identification-free approach for nonlinear structural dynamics[J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113(15): 18999-19021.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.
基金项目：国家自然科学基金（52475060）.
作者简介：江琦琦(1998 年)，男，江西省上饶市，博士研究生，主要从事磁悬浮轴承控制研究；通信方式：E-mail:qqj77@nuaa.edu.cn、联系电话:15601592328.

文章编号：485-009

基于 LMI 的磁悬浮轴承系统渐近预测控制

高俊[1]，金超武[1]，董琦[1]，曾俊豪[1]，曹帅康[1]，周瑾[1]
(1. 南京航空航天大学 机电学院，江苏 南京 210016)

1 引言

磁悬浮轴承(AMB)系统主要由磁悬浮轴承-转子、功率放大器、位移传感器和控制器四个子系统组成。其各子系统间的能量流和信息流在传递过程中不可避免地存在时间滞后，同时各个子系统自身的能量转换过程也存在着明显的时滞现象。当时滞量较大时，控制决策无法及时应对系统动态，会导致系统抗扰动能力变差，甚至引发振荡或失稳。传统的预测控制策略如 Smith 预估器对模型不确定性及计算误差高度敏感，为克服这一挑战，本文提出一种基于渐近预测器(Asymptotical Predictors, ASP)的控制方案。该方法不要求预测状态与实际状态完全等价，而是通过构造类观测器结构，使预测值渐近收敛于未来状态，从而提升了补偿算法的鲁棒性。

2 渐近预测控制设计

ASP 的核心在于提出一个动态模型，使得预测状态$\boldsymbol{x}_p(t)$渐近收敛于未来时刻的状态$\boldsymbol{x}(t+d)$。预测器的动态方程表示为：

$$\dot{\boldsymbol{x}}_p(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_p(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{L}(\boldsymbol{x}_p(t-d) - \boldsymbol{x}(t))$$

其中，$\boldsymbol{x}_p \in \mathbb{R}^n$是预测状态，$\boldsymbol{L}$为待设计的增益矩阵。定义等效预测误差为$\boldsymbol{e}_p(t) = \boldsymbol{x}_p(t-d) - \boldsymbol{x}(t)$。当预测误差收敛于零时，$\boldsymbol{x}_p(t)$即可预测$d$秒后的系统状态。

3 稳定性与仿真分析

预测误差$\boldsymbol{e}_p$的动态方程满足$\dot{\boldsymbol{e}}_p(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{e}_p(t) + \boldsymbol{L}\boldsymbol{e}_p(t-d)$。为保证系统在时滞 d 下的稳定性，本文采用线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequalities, LMI)方法进行设计。系统渐近稳定的充分条件是存在对称正定矩阵$\bar{\boldsymbol{P}}$、$\bar{\boldsymbol{S}}$、$\bar{\boldsymbol{Q}}$及矩阵$\boldsymbol{U}$、$\bar{\boldsymbol{Y}}$、$\bar{\boldsymbol{W}}$满足如下不等式：

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Psi} & \boldsymbol{U} - \bar{\boldsymbol{Y}} + \bar{\boldsymbol{W}}^T & d\bar{\boldsymbol{P}}\boldsymbol{A}^T & -d\bar{\boldsymbol{Y}} \\ * & -\boldsymbol{Q} - \bar{\boldsymbol{W}} - \bar{\boldsymbol{W}}^T & d\boldsymbol{U}^T & -d\bar{\boldsymbol{W}} \\ * & * & -d\bar{\boldsymbol{S}} & \boldsymbol{0} \\ * & * & * & -d\bar{\boldsymbol{P}}\bar{\boldsymbol{S}}^{-1}\bar{\boldsymbol{P}} \end{bmatrix} < 0$$

其中，$\boldsymbol{\Psi} = (\boldsymbol{A}\bar{\boldsymbol{P}} + \bar{\boldsymbol{P}}\boldsymbol{A}^T + \bar{\boldsymbol{Y}} + \bar{\boldsymbol{Y}}^T + \bar{\boldsymbol{Q}})$。针对式中存在的非线性项$\bar{\boldsymbol{P}}\bar{\boldsymbol{S}}^{-1}\bar{\boldsymbol{P}}$，本文采用改进锥互补线性化(Modified Cone Complementarity Linearization, MCCL)算法进行求解。该算法通过迭代确定增益$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{U}\bar{\boldsymbol{P}}^{-1}$，从而在时滞 d 下保持预测稳定性。

完成增益矩阵$\boldsymbol{L}$ 设计后，将预测器输出的即时状态估计值$\hat{x}_{p1}(t)$反馈至 PID 的输入端，代替测量信号，构建基于状态预测的闭环控制结构。两种控制策略下的转子位移信号如图 1 所示，这种结构能够预补偿系统的纯滞后相位损失，从而减小转子的振幅。

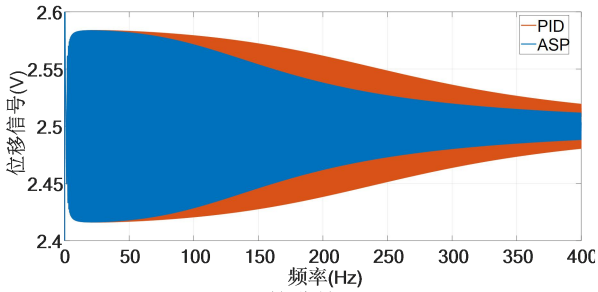


图 1 位移信号对比

4 结论

本文针对磁悬浮轴承系统在能量转换与信息传递中的时滞问题，设计了一种渐近状态预测器。该方法通过类观测器结构实现对系统状态的渐近预测，从而消除了时滞对控制器的影响。仿真研究表明，基于 LMI 设计的预测增益能有效提高系统在时滞情况下的扰动补偿能力，显著增强了磁悬浮轴承系统的稳定性能。

参考文献 (References)：

[1] Najafi M. Stabilization techniques for large input-delay systems with uncertainty[M]//Control Strategy for Time-Delay Systems. Academic Press, 2021: 83-110.

[2] Fridman E, Selivanov A. Using delay for control[J]. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, 2025, 8(1): 101-126.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.

基金项目：国家科学自然基金项目(52275059)；国家科学自然基金项目(52475060)；国家科学自然基金项目(51875275)

作者简介：高俊(2002)，男，湖北省荆州市，硕士研究生，主要从事磁悬浮轴承控制技术的研究；
通信方式：E-mail: gaojun1012@nuaa.edu.cn、18627060839

文章编号：485-010

考虑不确定性的磁悬浮轴承功放板振动响应研究

郝柳清[1] 徐园平[1] 金超武[1] 周瑾[1] 郭勤涛[1]

（1.南京航空航天大学 机电学院，江苏省 南京市 210016）

1 引　言

磁轴承功放板常安装在高速转子附近，长期承受强烈的振动激励。其动力学建模过程中存在显著的参数不确定性，极大增加了功放板振动响应的预测难度。针对此问题，本文根据多组模态实验结果，分别实现基板的不确定性正反向传递与附带器件电路板的不确定量化，进而基于模型确认准则，完成功放板的模型确认。最后，在考虑参数不确定性的情况下，对功放板开展随机振动响应预测。

2 基板不确定性传递与模型确认

2.1 不确定性反向传递

将多组模态实验的各阶模态频率拟合为高斯分布。运用分布代数法[1]得到不确定参数的标准差，以各阶模态频率均值为目标，修正得到不确定参数均值。

2.2 不确定性正向传递

基于反向传递得到不确定参数的高斯分布，并在此基础上进行蒙特卡洛抽样，将样本代入响应面模型计算，得到各阶模态频率的高斯分布。

2.3 模型确认

3 附带器件功放板不确定分析

3.1 基于 Wasserstein 距离的不确定量化

Wasserstein 距离是一种基于最优传输理论的不确定性度量方法，可用于刻画不同概率分布之间的差异[2]。附带器件功放板不确定量化结果如图 1 所示，由图可见，三个不确定参数的后验分布标准差均显著减小，表明参数不确定性得到了有效降低。

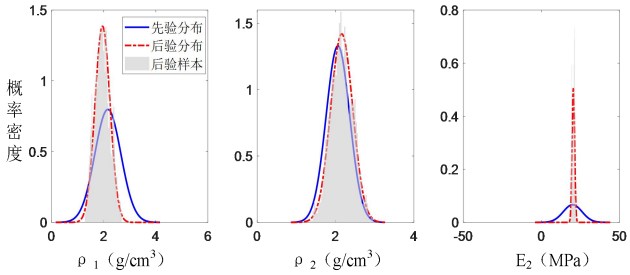


图 1 不确定量化结果图

3.2 不确定性正反向传递

3.3 模型确认

4 考虑不确定性的振动响应预测

5 结　论

本文根据多组模态实验数据，完成了功放板基板及其附带器件有限元模型的模型确认。基于此确认模型，在考虑参数不确定性的情况下，开展了功放板的随机振动响应预测，并通过实验验证了预测结果的准确性与可靠性。

参考文献（Reference）：

[1] 刘济稳.某航空电子设备有限元建模与热-机疲劳寿命预测[D].南京：南京航空航天大学，2025

[2] 杨乐昌, 韩东旭, 王丕东. 基于 Wasserstein 距离测度的非精确概率模型修正方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(24):300-311.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.

基金项目：项目名称（编号）；项目名称（编号）.

作者简介：郝柳清(2001－)，男，河南省周口市，硕士生，主要从事磁悬浮轴承控制器不确定分析的研究；

通信方式：haoliuqing@nuaa.edu.cn

文章编号：485–011

环形永磁电动悬浮轴承悬浮力与损耗特性分析

冯悦昕[1]，张天胤[2]，张原诚[1]，邓自刚[2]
(1. 西南交通大学 信息科学与技术学院，四川省 成都市 611756；
2. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031)

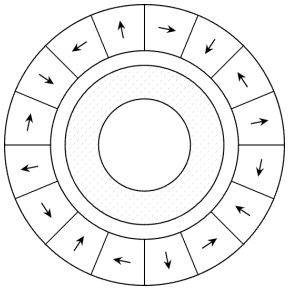
1 引 言

电动悬浮轴承（EDB）利用旋转导体与永磁体相对运动产生的涡流斥力实现无接触悬浮，具有结构简单、无需主动控制等优点，可与电磁阻尼器结合，或应用于电磁悬浮保护轴承等超高速场景。永磁体构型上，同极性环形磁体可有效控制涡流损耗；Halbach 阵列可提高磁场利用率。针对 Halbach 阵列下的电动悬浮轴承，其电磁力与损耗特性尚缺乏定量分析。本文将建立有限元模型，对极对数的影响进行分析，定量揭示其力学与损耗规律。

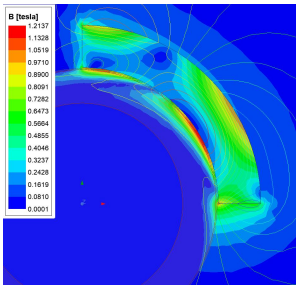
2 正 文

2.1 模型与工况

研究对象为实心导体转子－环形 Halbach 永磁阵列电动悬浮轴承，如图 1 所示。取 1/4 模型以输出净径向恢复力，进行电磁仿真。由图 2 可见，磁场高度集中于转子侧，外侧漏磁显著衰减。且实心转子旋转后，磁场趋向于集中在表层。



1 电动悬浮轴承结构



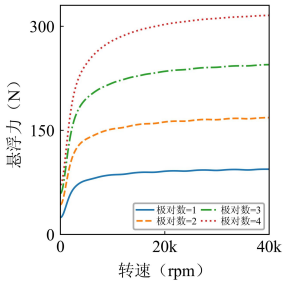
2 电磁仿真结果

2.2 悬浮力特性

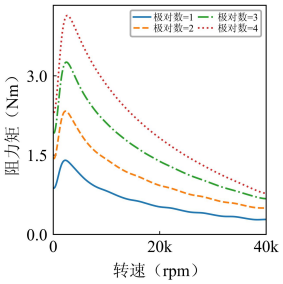
图 3 为不同极对数下径向悬浮力随转速的变化曲线，均呈低速快速上升、高速趋于饱和的特征。同一转速下高极对数始终提供更大升力，且实际起浮转速随极对数增大而降低。

2.3 损耗特性与升阻比

图 4 展示了不同极对数下阻力矩随转速的变化，其峰值与涡流损耗均随极对数同步增大，且增幅与饱和升力相当，表明高极对数带来的升力提升与涡流损耗增加之间存在强耦合关系。提高极对数会使转折速度向后移动，在中低转速工作段，高极对数的综合优势不明显，工程选型应以工作转速和允许损耗为主要约束。



3 悬浮力与转速关系



4 阻力矩与转速关系

3 结 论

本文对环形 Halbach 永磁阵列 EDB 进行了电磁仿真分析，主要结论如下：饱和升力与极对数近似成正比；升阻比与极对数弱相关，工程选型应以工作转速和允许损耗为约束；起浮完成转速随极对数增大而提前，对起浮转速要求较高的场合宜选高极对数方案。

参考文献（References）：

[1] Kublin T, Grzesiak L, Góźdź M. Experimental validation of a modified Halbach array for improved electrodynamic suspension efficiency[J]. Energies, 2026, 19(3): 649.

[2] Detoni J G, Impinna F, Tonoli A, et al. Unified modelling of passive homopolar and heteropolar electrodynamic bearings[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(19): 4219-4232.

收稿日期： 2026 年 04 月 15 日.

作者简介：冯悦昕(2001－)，男，江苏南京，博士生，主要从事电磁悬浮与磁浮轴承相关研究；通信方式：E-mail：kevin.fengyuexin@gmail.com、联系电话：13016952393

文章编号：485-012

基于无模型无差拍的无轴承电机电流控制方法

蔡滨泽，张宇豪，金超武，丁嵩，周瑾
(1.南京航空航天大学 机电学院，江苏省 南京市 210016；)

1 引　言

无轴承电机的悬浮力由悬浮绕组电流决定，因此电流内环性能直接影响转子的悬浮精度、动态稳定性及振动抑制效果。在偏心、重力及外部扰动作用下，悬浮电流给定通常为交流信号，因而要求电流控制器具备较高的响应速度和跟踪精度。传统 PI 控制难以快速跟踪交流信号，而无差拍电流控制具有动态响应快、跟踪精度高的优点，更适用于悬浮控制内环。为进一步降低无差拍电流控制对参数依赖并抑制慢时变扰动，本文使用一种改进的无模型无差拍电流控制方法，引入斜坡扰动模型补偿环节，以提升无轴承电机悬浮控制性能。

2 无轴承电机电压方程模型

由于无轴承电机悬浮磁场与转矩磁场耦合的特性，其悬浮绕组电压方程可表示为式(1)

$$\begin{bmatrix} u_{Bd} \\ u_{Bq} \end{bmatrix} = R_B \begin{bmatrix} i_{Bd} \\ i_{Bq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_B & 0 \\ 0 & L_B \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Bd} \\ i_{Bq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r L_B \\ \omega_r L_B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Bd} \\ i_{Bq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Mx & -My \\ My & Mx \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Md} \\ i_{Mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M\dot{x} - \omega_r My & -M\dot{y} - \omega_r Mx \\ M\dot{y} + \omega_r Mx & M\dot{x} - \omega_r My \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Md} \\ i_{Mq} \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中R_B、L_B、ω_r为悬浮绕组电阻、自感，电角速度。M为悬浮绕组与转矩绕组之间的互感系数，x、y表示转子在d-q坐标系中的偏心位移分量。

根据无模型控制理论[2]，可以将式(1)写成式(2)形式

$$\frac{d}{dt}\boldsymbol{I}_{dq} = \boldsymbol{\alpha}_{dq}\boldsymbol{U}_{dq} + \boldsymbol{F}_{dq} \tag{2}$$

其中 $\boldsymbol{I}_{dq}=[i_{Bd},i_{Bq}]^T$，$\boldsymbol{U}_{dq}=[u_{Bd},u_{Bq}]^T$，$\boldsymbol{F}_{dq}=[F_{Bd},F_{Bq}]^T$

3 无模型无差拍电流控制

由于当前时刻的采样电流是上一时刻的逆变器输出电压的激励造成的，采样电流和作用电压存在一拍的延迟，可以通过电流预测的方式反算出下一时刻的作用电压，达到补偿一拍延迟的效果。其作用电压可写成式(3)、式(4)形式

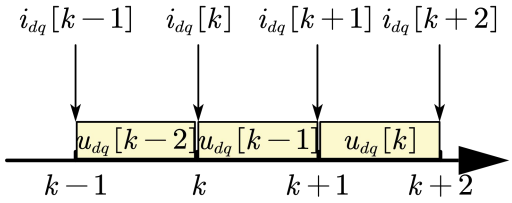


图 1 悬浮绕组电流控制时序图

$$u_{dq}[k+1] = \frac{i_{dq}[k+2] - i_{dq}[k+1]}{T_s \cdot \alpha_{dq}} - \frac{F_{dq}[k+1]}{\alpha_{dq}} \tag{3}$$

$$\begin{cases} e = i_{dq} - \hat{i}_{dq} \\ \frac{d}{dt}\hat{i}_{dq} = \alpha_{dq}u_{dq} + \hat{F}_{dq} + \beta_1 e \\ \dot{z}_1 = \beta_2 e \\ \dot{\hat{F}}_{dq} = \frac{1}{\mu}\beta_2 e - \frac{w_0(1-w)}{2\mu}\left(\hat{F}_{dq} - \bar{z}\right) \end{cases} \tag{4}$$

其中 F_{dq}[k+1]为 ESO 观测的扰动信号

4 结论

本研究通过使用无模型无差拍电流控制器替代传统 PI 电流控制器，提升了电流内环的响应速度，从而提高无轴承电机转子的悬浮精度与稳定性，也为振动抑制提供更好的内环性能。

参考文献 (References)：

[1] Hua Y, Zhu Y, Wang X, et al. Model-Free Predictive Control of Bearingless IPMSM Under Parameter Disturbance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025: 1-10.

[2] Fliess M, Join C. Model-free control[J]. International Journal of Control, 2013, 86(12): 2228-2252.

收稿日期：2026 年 04 月 15 日.

基金项目：国家科学自然基金项目(52275059)；国家科学自然基金项目(52475060)；国家科学自然基金项目(51875275)

作者简介：蔡滨泽(2002)，男，广东省汕尾市，硕士研究生，主要从事无轴承电机控制的研究；
通信方式：E-mail: bin_cai@nuaa.edu.cn、18927933217

文章编号：484-013

五自由度悬浮无轴承开关磁阻发电机机理分析

王泽林[1]，顾菊平[1]，曹鑫[2]，王晓琳[2]，刘泽远[3]，蔡骏[4]
(1.苏州科技大学，江苏 苏州 215009；2.南京航空航天大学，江苏 南京 211106；3.南京邮电大学，江苏 南京 210023；4.南京信息工程大学，江苏 南京 210044)

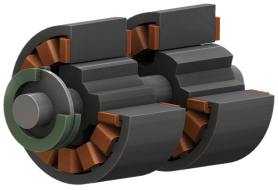
1 引言

无轴承开关磁阻发电机（Bearingless Switched Reluctance Generator，简称 BSRG）兼具可靠性高、无机械摩擦、转速高等优势，在飞轮储能、分布式发电、航空航天等领域具有广阔的应用前景[1,2]。针对 BSRG 运行机理复杂问题，本文构建了 12/4 极 BSRG，并分析其运行机理。

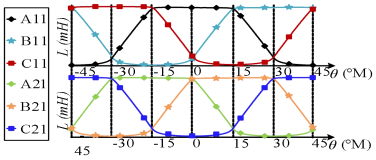
2 无轴承开关磁阻发电机

2.1 无轴承电机结构

本文所提 12/4 极 BSRG 结构示意图如图 1 所示。其中，包括双转子与双定子，与轴向磁轴承构成五自由度悬浮系统。该 BSRG 电感分布如图 2 所示，可实现全周期连续发电。



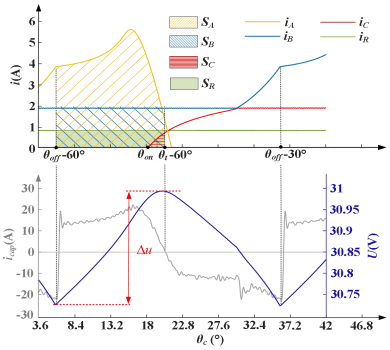
1 无轴承开关磁阻发电机结构示意图



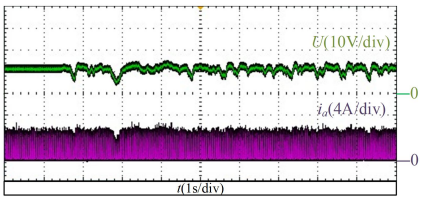
2 无轴承开关磁阻发电机电感分布示意图

2.2 BSRG 发电电压分析

通过动态仿真，可得三相电流、负载电流、电容电流以及 BSRG 输出电压的仿真波形，如图 3 所示。设电容电流值为 0 时刻 A 相的电角度为 0。当转子角度为θ_{off}时，U_o开始上升。



3 电压纹波解析示意图



4 发电电压与电流波形图

图 4 为转速在 4200r/min 时，BSRG 输出相电压为 10V，BSRG 在切断外部电源后仍能输出电压，这验证了 BSRG 满足有效发电条件。

3 结 论

为了解决BSRG转矩悬浮耦合，运行机理不明晰等因素，本文提出了一种解耦的BSRG，通过对其运行机理进行分析，实现五自由度悬浮发电，由实验可得，当转速达到 4200r/min可有效发电。

参考文献（References）：

[1] 刘泽远,李昂,蔡骏,等.一种三自由度无轴承开关磁阻电机的控制与实现[J].中国电机工程学报,1-12.
[2] 石凡,王宏华,李昊,等.一种计及定转子磁极磁阻的单绕组无轴承开关磁阻电机新型数学模型[J].电工技术学报,2024,39(24):7712-7727.

收稿日期：2026 年 04 月 15 日.
基金项目：国家自然科学基金项目（52377056，52377061）.
作者简介：**王泽林**(1993－)，男，讲师，博士研究生，主要从事无轴承电机、磁悬浮轴承技术的研究；
通信方式：E-mail:zlw@usts.edu.cn

文章编号：485-014

基于改进重复控制-ESO 的 AMB 振动抑制

原东昇[1]，赵兵健[1]，尹忠刚[1]，王森炜[1]，张新玉[1]
(1.西安理工大学 电气工程学院，陕西省 西安市 710054)

1 引言

针对主动磁悬浮转子（AMB）系统的不平衡补偿可以分为不平衡补偿控制与自动平衡控制。本文针对多源激励下的磁悬浮轴承系统建立了磁悬浮主轴承转子系统模型，研究了一种分数阶重复控制-扩展状态观测器（Fractional-order Repetitive Control – Extended State Observer，FRCESO）的振动抑制策略，通过观测器观测 AMB 系统中的振动，再通过前馈补偿，实现对振动的抑制，仿真验证了该算法具有良好的振动抑制能力。

2 模型与算法

根据牛顿第二定理和转子动力学原理，可以推导出径向四自由度主动式磁悬浮轴承系统转子动力学数学模型：

$$MT_q^{-1}\ddot{q}+GT_q^{-1}\dot{q}-L_fK_xq=L_fK_iI+F_u \tag{1}$$

本文所设计的观测器，扩展状态观测器负责对多频振动以及外界施加的基础振动的估计，然后由分数阶重复控制主要对不平衡振动以及传感器跳动的转子转速多频振动进行抑制补充扩展状态观测器的估计能力，观测器框图如图 1 所示。

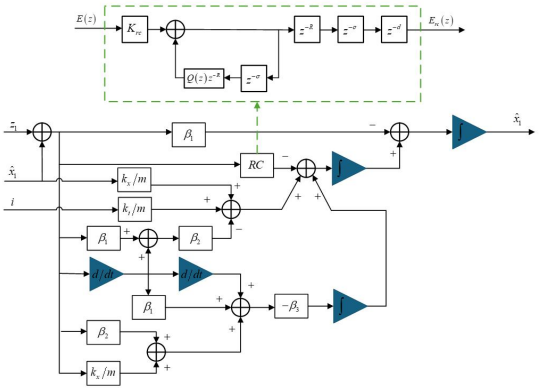


图 1 改进分数阶重复控制扩展状态观测器

3 仿真

在 Simulink 中搭建了四自由度磁悬浮转子模型。图 2 和图 3 分别为转子质量不平衡振动下转子位置波形与振动的估计波形，可以发现本文所研究 FRCESO 算法转子的位置波形比线性扩展状态观测器（LESO）转子位置波动降低了 68.62%。

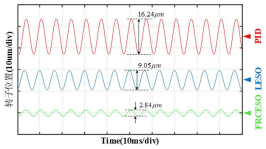


图 2 转子位置

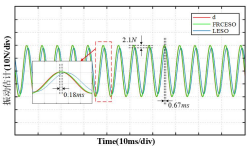


图 3 振动估计结果

4 结　论

FRCESO 的振动抑制策略能够实现 AMB 转子的稳定悬浮，并且在多种激励源下能够大幅缩减转子轴心振幅，实现转子的稳定悬浮，提高了系统的抗扰性能，在转子质量不平衡振动下的转子位置波动仅 2.84μm。在多种激励下，相比 LESO 算法转子位置波动减小了 65.24%。

参考文献（References）：

[1] 韩邦成，刘洋，郑世强．重复控制在磁悬浮高速转子振动抑制中的应用[J]．振动·测试与诊断，2015,35(03):486-492,591.

[2] CUI Pei-ling, LI Sheng, ZHAO Guang-zai, et al. Suppression of Harmonic Current in Active-Passive Magnetically Suspended CMG Using Improved Repetitive Controller[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016,21(4):2132-2141.

收稿日期：2026 年 04 月 15 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（52207016）.

作者简介：原东昇(1989)，男，甘肃省陇西县，副教授，博士，博士后。主要从事磁悬浮轴承、永磁同步电机的高性能控制和故障诊断；

通信方式：E-mail: dsyuan@xaut.edu.cn、联系电话:18710560991

文章编号： 485-015

传统五自由度主动磁轴承与靶盘式主动磁轴承结构对比分析

秦耀[1,2]，杨杰[1,3]，胡海林[1,2]

(1.江西理工大学 磁浮轨道交通装备江西省重点实验室，江西 赣州 341000；2.江西理工大学 电气工程与自动化学院，江西 赣州 341000；3.上海电机学院 电气学院，上海 201306)

1 引　言

传统五自由度主动磁轴承通常由两组径向磁轴承和一组轴向磁轴承组成，可实现转子五个自由度的主动控制[1]。但该结构存在执行器数量多、控制通道复杂、轴向尺寸较大和集成度不足等问题。本文提出的靶盘式主动磁轴承采用三个周向均布的 U 型电磁铁和同心多环聚磁齿靶盘，将轴向悬浮、倾转调节和径向被动恢复集成于同一结构中。

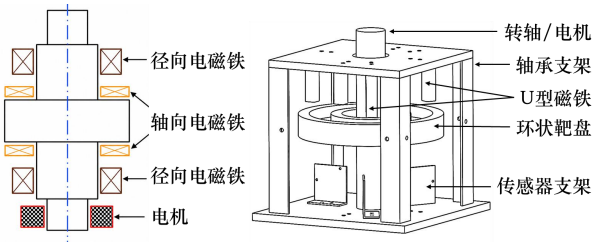
2 结构对比与优势

（1）**传统结构分体布置，系统复杂。**如图 1(a)所示，传统五自由度主动磁轴承通常需要两组径向磁轴承和一组轴向磁轴承，分别完成径向、倾转和轴向支承[2]。该类结构支承功能完整，但径向与轴向单元沿转轴方向分体布置，导致轴向长度较大，同时增加了传感器、功率放大器和控制通道数量，使系统硬件组成和控制实现均较为复杂。

（2）**靶盘式结构集成度更高。**如图 1(b)所示，本文结构将三个 U 型磁铁集中布置在同一环状靶盘界面上，利用单一靶盘完成多自由度支承功能。三路电磁力同步变化时可实现轴向悬浮，差动变化时可产生倾转调节力矩，因此仅依靠三个主动通道即可完成轴向和倾转自由度控制，结构更加紧凑。

（3）**径向自由度具备被动恢复能力。**当转子发生径向偏移时，U 型磁铁与靶盘聚磁齿之间产生错位，局部气隙和磁路磁阻发生重新分配，并形成指向中心位置的径向恢复力。与图 1(a)中的传统径向主动支承不同，图 1(b)所示结构无需独立径向主动磁轴承，即可获得一定的径向自回中能力，从而降低主动控制需求。

（4）**综合优势更加突出。**相比传统五自由度主动磁轴承，靶盘式结构减少了主动执行器和控制通道数量，缩短了轴向尺寸，提高了结构紧凑性和集成度。同时，其径向被动恢复特性有助于提升系统抗扰能力。类似的一体化、复合式磁轴承结构也是提升磁轴承系统紧凑性的主要发展方向[3]。



a 传统五自由度轴承结构　　b 靶盘式轴承结构

1 磁悬浮轴承结构

3 结　论

传统五自由度主动磁轴承结构成熟，但存在体积大、控制系统复杂和集成度不足等问题。本文靶盘式主动磁轴承通过单靶盘界面、三个 U 型磁铁和同心多环聚磁齿的结构设计，实现了轴向与倾转主动控制、径向被动恢复的三主动两被动悬浮模式。该结构在减少控制通道的同时增强了系统紧凑性和径向稳定能力，并有助于降低硬件配置复杂度，为高速旋转装备中的高集成磁悬浮支承提供了一种新的结构方案。

参考文献（References）：

[1] Maslen E H, Schweitzer G, Bleuler H, et al. Magnetic Bearings - Theory, Design, and Application to Rotating Machinery[M]. 2009.

[2] Knospe C R. Active magnetic bearings for machining applications[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(3):307-313.

[3] Xu S, Fang J. A Novel Conical Active Magnetic Bearing With Claw Structure[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(5): 1–8

收稿日期： 2026 年 05 月 08 日.

基金项目：江西省研究生创新专项资金项目（YC2024-B217）；国家重点研发计划（2024YFB4303201-5）.

作者简介：秦耀(1998－)，男，江西九江人，在读博士研究生，主要从事自抗扰控制技术、磁悬浮控制技术的研究；通信方式：E-mail:18270237193@163.com、联系电话:18270237193.

文章编号：485-016

磁悬浮飞轮不平衡与传感器谐波振动抑制研究

陈诗琪，刘昆，魏静波
（中山大学 航空航天学院，广东省 深圳市 518000）

1 引 言

在磁悬浮飞轮的实际加工过程中，由于工艺精度限制及材料本身缺陷等因素，飞轮结构往往存在质量分布不均的现象[1]。这会导致飞轮转子在高速旋转时产生周期性的不平衡干扰力，从而产生与飞轮转速同频的振动。同时位移传感器在对转子位置进行实时测量时，也可能因测量误差而引入额外的倍频干扰。这些周期性扰动虽然微小，但长期作用于系统时，会对磁悬浮飞轮的姿态控制精度及长期运行稳定性构成影响。

本文以磁阻力磁悬浮飞轮为研究对象，采用同频信号放大器和陷波滤波器对由质量不均引起的与转速同频的振动力和位移传感器测量误差造成的倍频扰动进行主动抑制，通过广义根轨迹分析方法证明系统的稳定性，并通过 Simulink 仿真验证所提出方法的有效性。

2 磁悬浮飞轮系统建模

磁悬浮飞轮的工作系统由磁悬浮轴承、飞轮转子、位移传感器、功率放大器和控制器五部分组成[2]。图 1 给出了磁悬浮飞轮单自由度控制系统的组成框图。

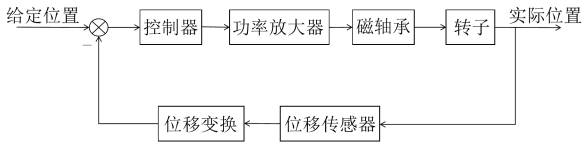
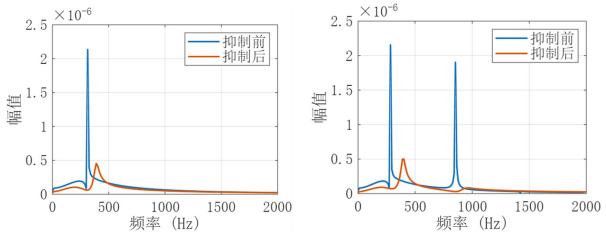


图 1 磁悬浮飞轮系统框图

对转子 X 方向径向平动的动力学模型进行拉普拉斯变换可以得到磁轴承－转子系统位移关于电流的传递函数：

$$G_0(s)=\frac{X(s)}{I(s)}=\frac{K_a}{ms^2-K_h}$$

本文采用同频放大器对不平衡干扰进行抑制。随后引入位移传感器误差产生的倍频扰动，采用将信号放大器与陷波滤波器串联的设计对双重扰动进行抑制。



a 不平衡干扰　　b 双重干扰

图 2 加入控制器前后转子位移频谱图

3 仿真结果与分析

对加入控制器前后的转子位移作 FFT 图如图 2 所示。可以看出两种干扰情况下对应的频点信号都得到了有效抑制。

4 结 论

本文对磁悬浮飞轮系统进行了建模分析，分别对质量分布不均导致的微振动及其与位移传感器误差共同作用产生的微振动进行了控制器设计与分析，并分别通过仿真验证了方法的有效性。

参考文献（References）：

[1] 刘彬，房建成，刘刚．基于 TMS320C6713B+FPGA 数字控制器实现磁悬浮飞轮主动振动控制[J]．光学精密工程，2009，17(01)：151-157.

[2] 段一戬．十二极异极径向混合磁悬浮轴承的研究[D]．桂林理工大学，2021.

收稿日期： 2026 年 05 月 15 日.

基金项目： 项目名称（编号）；项目名称（编号）.

作者简介： 陈诗琪(2003－)，女，广东中山，硕士生，主要从事磁悬浮飞轮控制的研究；通信方式：chenshq65@mail2.sysu.edu.cn

文章编号：485-017

磁悬浮转子系统不平衡振动的有限时间复合控制

彭增德[1,2]，尚天赐[1,2]，窦峰山[1,2]，龙志强[1,2]

(1.国防科技大学 智能科学学院，湖南省 长沙 410073；

2.国防科技大学 电磁悬浮与推进技术湖南省重点实验室，湖南省 长沙 410073)

1 引言

转子不平衡振动是制约系统性能与转速提升的关键因素，尤其在穿越临界转速等暂态过程中，实现振动的快速抑制与传递力抑制面临挑战[1]。现有研究主要通过自动平衡与不平衡补偿策略应对同频振动[2]。但缺乏对位移刚度力的直接前馈抵消且观测、反馈环节多为渐近收敛，振动抑制性能受限。为此，提出一种融合位移刚度力前馈与有限时间收敛的复合控制方法，实现暂态过程中振动与传递力的协同抑制。

2 同频振动抑制控制方法

2.1 动力学建模

考虑不平衡扰动力，五自由度动力学模型为：

$$M\ddot{q}+C\dot{q}-T_{bo}^{T}K_{h}T_{bo}q=T_{bo}^{T}K_{i}I+DF_{d} \tag{1}$$

其中 k_h 与 K_i 为电磁力位移刚度系数与电流刚度系数矩阵，T_{bo} 为坐标转换矩阵，F_d 为不平衡扰动力。

2.2 有限时间复合控制方法

有限时间复合控制系统结构如图 1 所示，由位移刚度力前馈补偿器(FC)、有限时间同频窄带扩张状态观测器（FT-SNBESO）与有限时间终端滑模控制（FT-TSMC）构成。

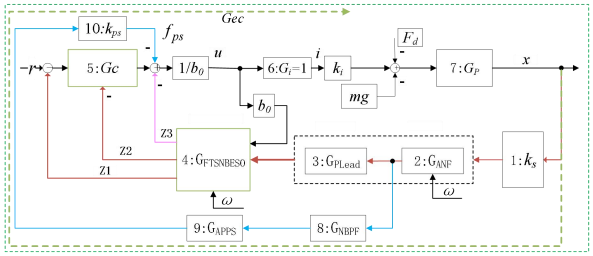


图 1 同频振动抑制有限时间复合控制系统图

（1）位移刚度前馈律设计

通过基于反馈环节等效增益与电磁力线性化模型生成前馈补偿力，从物理源头抵消导致振动传递的位移刚度力。

（2）有限时间复合控制器设计

令 g 为切换幂函数，FT-SNBESO 误差方程为：

$$\begin{cases}\dot{e}_1=e_2-\beta_1 g(e_1,\ell_1)\\ \dot{e}_2=e_3-\beta_2 g(e_1,\ell_2)\\ \dot{e}_3=\dot{F}_d(t)-\beta_3 g(e_1,\ell_3)-\beta_3\lambda^3 sGe_1\end{cases} \tag{2}$$

并结合非奇异幂次积分型复合滑模面与有限时间幂次趋近律，提高收敛速度与抖振抑制性能。

2.3 系统有限时间收敛稳定性分析

通过设计 FT-SNBESO、有限时间非奇异滑模面及有切换律的结构和参数，并基于李雅普诺夫稳定性理论分析，可以确保所述被控系统的跟踪误差在有限时间内收敛至零附近的一个有界小邻域内。

3 仿真及实验验证

在变转速下且主导激励源由质量偏心激励切换为位移刚度激励时，所提方法能快速收敛，且收敛时间与响应幅值收敛均优于对比方法。

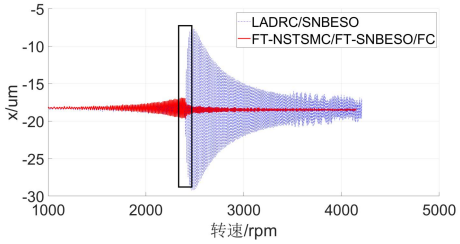


图 2 变转速且激励源大扰动切换轴心轨迹

4 结 论

提出了一种分层式有限时间复合抗扰控制方法，该方法在提升动态响应速度、抑制振动传递及变工况鲁棒性方面的有效性，在变转速下同步振动位移幅值降低 25%以上，收敛时间缩短约 26%。

参考文献（References）：

[1] SCHWEITZER G, MASLEN E H, 等.磁悬浮轴承理论、设计及旋转机械应用[M].北京:机械工业出版社, 2012.

[2] 吴华春,龙志强,周瑾,等.磁力轴承 ——过去、现在和未来[J].轴承,2024,(7): 1-13.

收稿日期：2026 年 02 月 08 日.

基金项目：国家自然科学基金联合基金资助项目(编号：U24B20119)，国家自然科学基金项目（编号：52332011）.

作者简介：彭增德(1990－)，男，湖南省邵阳市，博士研究生，主要从事电磁悬浮与发射、定位测速技术的研究；通信方式:pengzengde15@nudt.edu.cn、联系电话:15074813207

文章编号：485-018

基于有限集与无偏移的磁轴承双层预测控制

李启森[1]，王昊泽[1]，郭吉祥[1]
(1.西北工业大学 民航学院，陕西省 西安市 710072)

1 引言

主动磁悬浮轴承（AMB）面临开环不稳定与极小的气隙物理约束。传统“PID/超前-滞后+PD”控制受限于底层脉宽调制（PWM）的执行延迟与相位滞后，在突发大冲击下极易因位移超调引发“撞机”。为打破机电双环的执行迟滞瓶颈，本文提出一种新颖的双层串级预测控制架构：外环（位移环）采用无偏移 MPC（OF-MPC）实现全局最优约束规划，内环（电流环）引入有限控制集预测控制（FCS-MPC）实现电磁力的快速无差拍执行。

2 磁轴承双层预测控制系统设计

2.1 基于增广观测的位移环 OF-MPC 设计

将外部扰动载荷等效为增广状态，设计稳态卡尔曼滤波器实时重构不可测速度与未知扰动。外环（位移环）OF-MPC 在满足气隙与电流硬约束的前提下，滚动求解二次规划（QP）问题，向内环输出全局最优参考电流指令，以实现无静差跟踪[1]。

2.2 有限控制集的电流环 FCS-MPC 设计

为确保外环最优指令不被执行延迟折损，内环摒弃传统 PWM 调制。内环 FCS-MPC 直接遍历单相 H 桥的 3 种离散电压矢量 $\upsilon \in \{+V_{dc}, -V_{dc}, 0\}$，代入电气预测模型并计算绝对误差代价函数[2]。通过直接输出使误差最小的开关状态，彻底消除调制环节，赋予电流逼近物理极限的瞬态爬升率。

2.4 仿真结果与分析

在 Simulink 中搭建了包含线性电磁力与 H 桥真实开关动态的高保真模型，并与“超前-滞后+PD”及“OF-MPC+PD”进行对比。

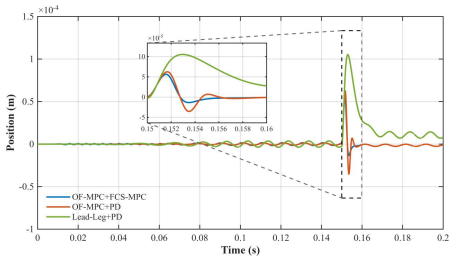


图 1 单自由度双层 MPC 仿真位移对比结果

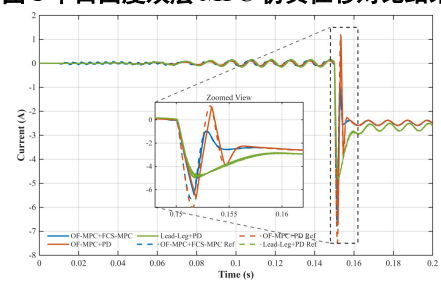


图 2 单自由度双层 MPC 仿真电流对比结果

由上可得，在变频不平衡力与突发冲激的扰动下，双层 MPC 架构调节速度更快，超调量更低。

3 结　论

本文所提双层 MPC 架构，通过时间尺度的机电解耦，突破了传统 PWM 环的执行迟滞瓶颈，将瞬态冲击超调大幅降低，同时调节速度增加，拓宽了高速旋转机械的安全运行边界。

参考文献（References）：

[1]Bonfitto, Angelo, Molina, Luis Miguel Castellanos, Tonoli, Andrea , et al. Offset-Free Model Predictive Control for Active Magnetic Bearing Systems[J]. Actuators,2018,7,(3).

[2]Tarisciotti, Luca, Ahumada, Constanza, Papini, Luca , et al. Finite Control Set Model Predictive Control for a Wheatstone Bridge Active Magnetic Bearing[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, 61, (5):7504-7516.

收稿日期： 2026 年 04 月 02 日.

基金项目： 无

作者简介： 李启森(2003－)，男，山西省汾阳市，硕士，主要从事磁悬浮轴承先进控制技术的研究；
通信方式：liqisen@mail.nwpu.edu.cn

文章编号：485-019

余热发电机用主动磁悬浮轴承试验研究

贺艳晖，杨文刚，甘杨俊杰，熊豪利

（中车株洲电机有限公司，湖南株洲，412000，中国）

1 引言

针对有机朗肯余热发电系统，从磁轴承-转子轴系动力学、磁轴承承载力、磁轴承控制稳定性、余热发电机温升特性等方面对磁悬浮轴承余热发电机进行了详细研究，为磁悬浮轴承高速旋转机械的将来或潜在使用者提供一些工业应用信息和试验研究方法。

2 试验分析

试验系统为余热回收系统，电机及磁轴承冷却通过有机工质 R245fa 冷却。系统最大功率 75kW，电机作为发电机运行，运行转速 25000rpm。图 1 为实际按照的系统图。

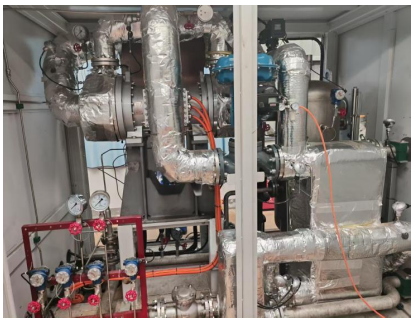
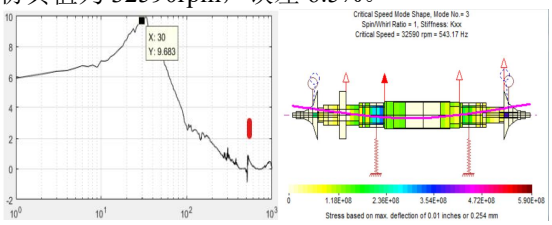


图 1 余热发电系统试验台

2.1 转子模态及临界转速测量

电机转子模态测量结果与仿真结果对比如图 1 所示。临界转速测量值约为 510Hz （30600rpm），有限元仿真值为 32590rpm，误差 6.5%。



(a)控制器扫频结果　　(b) 有限元反正结果

图 1 转子模态测量结果对比

2.2 磁轴承载荷对比分析

实际静态悬浮时，各承载力方向的实际电流值与预测值如表 1 所示。

表 1 磁力轴承电流测量值

自由度	MBx	MBy	IBx	IBy
分解载荷 N	108.7	108.7	56.8	56.8
分解预测电流 A	0.61	0.61	0.33	0.33
实际测量电流 A	0.625	0.62	0.36	0.35
预测电流实际电流误差	1.7%	1.61%	8%	6%

可以看到，预测电流与实际测量电流非常接近，误差不超过 10%，误差主要来源于未考虑电机单边磁拉力及同轴度带来的电流刚度系数偏差。

2.3 磁轴承性能测试

静态灵敏度函数如表 2 所示，电机全转速范围内振动不超过 25μm，符合 ISO14839 及 API617 标准规定的 A 区振动范围规定。

表 2 磁力轴承灵敏度测量表

自由度	模态频率/Hz	模态增益/dB	ISO14839 标准
MBx	30	9.68	B 区
MBy	33	10.49	B 区
IBx	55	9.09	A 区
IBy	67	8.38	A 区
Z	30	11.57	B 区

2.4 整机温升测量

发电机并网功率约 70kW，运行转速 25000rpm。运行过程中，外轴磁温升最高，温升 70K，符合设计绝缘要求。试验全过程振动稳定，磁轴承余热发电机通过了客户耐久温升试验考核。

3 结　论

通过全面的试验研究与分析，验证了磁悬浮轴承在余热发电系统的可行性，也为磁轴承在工程实际应用提供一些参考。

参考文献（References）：

[1] 吴华春，龙志强，周瑾等. 磁力轴承——过去、现在和未来 [J]. 轴承, 2024(07), 1-13.

[2] 贺艳晖，甘杨俊杰，周　亮. 主动磁悬浮轴承在余热发电机的应用研究 [J]. 2022, 57 (3), 657-664.

收稿日期： 2026 年 04 月 06 日.

基金项目： 大功率工业动力系统用高效磁动力装置（项目编号 2024ZD0606700）.

作者简介： 贺艳晖(1980－)，男，湖南省衡阳市，正高级工程师，博士，主要从事磁轴承设计、电力电子技术的研究；E-mail:huihuigui@126.com、联系电话：15673326156

文章编号：485-020

基于差动原理的四极磁轴承自感测技术研究

郭吉祥[1]，王昊泽[1]，李启森[1]
(1.西北工业大学民航学院，陕西省西安市 邮编 710072)

1 引言

磁轴承系统中位移检测性能直接影响系统稳定性与控制精度。传统外置位移传感器存在结构复杂、成本较高等问题，而基于电磁耦合原理的自感测方法具有结构紧凑和易于集成的优势。然而，该方法的检测精度易受参数匹配及非线性特性影响，有必要开展系统分析与优化研究。

2 正　文

2.1 原理与建模

针对四极磁轴承结构，每极配置控制线圈、激励线圈及感应线圈，通过电磁耦合作用获取与转子位移相关的检测信号。利用对称结构进行差动处理，实现对位移变化的敏感检测，并有效抑制共模干扰。

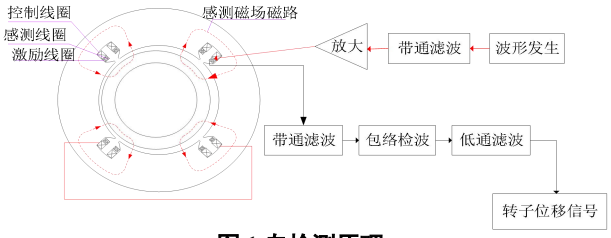


图 1 自检测原理

2.2 仿真与参数分析

基于 Maxwell 平台建立电磁模型，对线圈匝数、激励频率及电感等关键参数进行仿真分析。在不同工况条件下获得位移—电压特性曲线，并对检测性能进行评价，从而筛选满足工程需求的参数范围。

2.3 实验验证

在仿真优化参数基础上，搭建自感测检测电路系统，对感应信号进行处理并获取位移相关输出。实验结果表明，检测信号能够稳定反映转子位移变化，其变化趋势与仿真结果具有较好一致性，验证了系统设计的有效性。

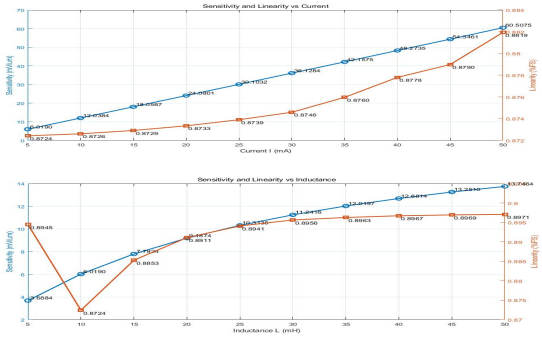


图 2 线性度、灵敏度随电流、电感变化

2.4 结果分析

综合仿真与实验结果可知，在所研究参数范围内，系统输出特性整体呈近似线性变化，但不同工况下仍存在一定差异。激励频率、电感参数及线圈结构均对检测性能产生显著影响，其中部分参数区间可实现较优的线性度与灵敏度匹配关系。

3 结　论

本文围绕四极磁轴承自感测位移检测问题，开展了电磁仿真与实验研究。结果表明，通过合理匹配激励条件与电磁参数，可实现对检测性能的有效优化。该方法在保证较高灵敏度的同时具备良好的线性特性，具有一定工程应用价值，并可为磁轴承一体化检测系统设计提供参考。

参考文献 (References)：

[1] 张利胜，王坤，郑世强. 磁轴承用新型自感位移传感器设计与实验研究[J]. 仪器仪表学报，2018，39(01)：100-109.
[2] 任双艳，边春元，刘杰. 自检测磁轴承系统转子位置检测方法的研究[J]. 机械科学与技术，2008，(06)：815-818.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.

作者简介：郭吉祥(2001－)，男，山东省德州市，硕士研究生，主要从事磁悬浮轴承自感测的研究；通信方式：E-mail：guojix@mail.nwpu.edu.cn

文章编号：(CSMLTVC14-485-021)

轴向电磁轴承等效磁路建模与涡流损耗分析

王梓昊[1]，李红伟[1]，李俊坤[1]，于文涛[1]，陈信维[2]，丁印恕[2]

(1.山东大学 电气工程学院，山东省 济南 250061；2.山东明天机械集团股份有限公司，山东省 济南 250206)

1 引言

磁悬浮轴承一种利用电磁力将转轴稳定悬浮在给定位置的一种高性能轴承，与传统机械轴承相比，其具有无接触、无需润滑、无磨损、高转速、低功耗等优势，如今已广泛应用于新能源发电、飞轮储能、航空航天等领域。但在实际工况中，轴向电磁轴承的推力盘通常会发生轴向振动，从而使铁心感应出交变磁场；而由于其实铁心结构，铁心会产生显著的涡流损耗。然而，现有文献仅针对控制电流交变或推力盘轴向振动单一工况下的轴向电磁轴承涡流损耗进行计算，目前缺乏关于实际工况下铁心涡流损耗的研究分析。为此，本文建立了推力盘轴向正弦振动与控制电流交变同时作用的轴向电磁轴承非线性等效磁路模型，提出了铁心涡流损耗解析计算方法，并利用有限元仿真进行了验证。

2 轴向电磁轴承等效磁路建模

本文假设推力盘在中心位置处沿轴向正弦振动，推导得到推力盘轴向位移与定子线圈电流的定量关系。进一步地，按图 1 将铁心与气隙划分为 15 个单元，确定等效磁阻划分区域，建立轴向电磁轴承等效磁路模型，如图 2 所示。

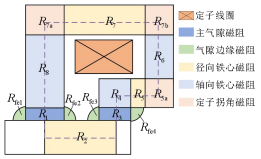


图 1 磁阻区域划分

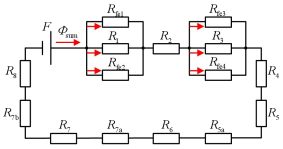


图 2 等效磁路模型

3 面向实际工况的涡流损耗计算方法

3.1 涡流场建模及涡流损耗解析计算方法

以铁心单元 2 为例，其在一个推力盘轴向振动周期 T 的瞬时涡流损耗 P_{2e} 解析表达式：

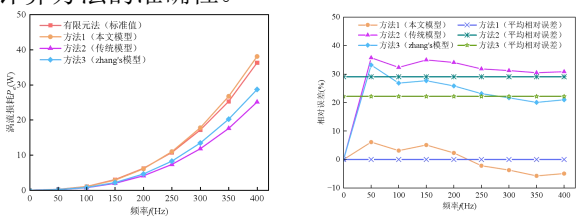
$$p_{2e}=\frac{|\Phi_{\mathrm{sum}}^{\mathrm{d}}\cdot\coth(\alpha t_{\mathrm{d}})|^2}{\pi\mu_0^2\mu_{rt}^2\sigma\delta^3}\ln\frac{r_4}{r_1}\cdot\frac{\sinh(2t_d/\delta)-\sin(2t_d/\delta)}{\cosh(2t_d/\delta)+\cos(2t_d/\delta)}$$

因此，可以得到轴向电磁轴承铁心在一个推力盘轴向振动周期的平均涡流损耗为：

$$P_e=\frac{\omega}{\pi}\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}}(p_{2e}+p_{4e}+p_{5e}+p_{6e}+p_{7e}+p_{8e})dt$$

3.2 涡流损耗理论计算与有限元仿真分析

本文以有限元仿真得到的涡流损耗作为标准值，评估了三种方法在解析计算涡流损耗时的精度，如图 3 所示。可以看出，方法 2（传统模型）和方法 3（zhang's 模型）[2]与标准值偏差较大，最大平均相对误差可达 29.02%和 22.12%；相比之下，方法 1（本文模型）的铁心涡流损耗计算值与标准值之间最大相对误差仅为 6.11%，最大平均相对误差仅有 0.01%，验证了本文涡流损耗解析计算方法的准确性。



(a) 计算结果　　(b) 相对误差

图 3 振幅为 0.02mm 时涡流损耗随频率变化的曲线

4 结　论

本文建立了推力盘轴向振动与控制电流交变同时作用的轴向电磁轴承等效磁路模型。根据铁心内部磁场分布特征，推导得到了轴向电磁轴承涡流损耗解析表达式。最后通过仿真实例，验证了本文涡流损耗计算方法的准确性。

参考文献 (References)：

[1]Zhu L, Knospe C R. Modeling of nonlaminated electromagnetic suspension systems [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(1): 59-69.

[2] MS Zhang and YS Tian. Frequency domain modeling of eddy current loss for magnetic thrust bearings[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2013, Vol. 227(7): 718-728.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.

基金项目：无

作者简介：王梓昊(2001－)，男，河南省安阳市，硕士研究生，主要从事轴向电磁轴承铁心损耗研究；通信方式：E-mail:zihaowang1225@163.com、联系电话：18211638498

文章编号：485–022

磁悬浮轴承无转速传感器解耦控制研究

徐崎凡[1]，冯汉升[1]，刘文政[1]
（1. 合肥综合性国家科学中心能源研究院，安徽 合肥 230031）

1 引　言

磁悬浮轴承系统是一个多输入多输出、强耦合的机电一体化系统[1]，在中高速工况下会出现显著的陀螺耦合效应，需要对系统进行解耦控制。然而，传统解耦算法[2]依赖实时转速信息，当实际系统不能通过外部条件获得精确转速信息，如转速传感器安装受限、电磁干扰等，解耦控制效果将会大大降低甚至失效。

针对上述问题，本文提出一种基于四阶广义积分锁频环（Fourth-Order Generalized Integrator Frequency-Locked Loop, FOGI-FLL）的交叉反馈解耦控制方法，实现无转速传感器下磁悬浮轴承系统的解耦控制，提高系统控制性能。

2 四阶广义积分–锁频环

四阶广义积分器-锁频环的结构如图 1 所示。

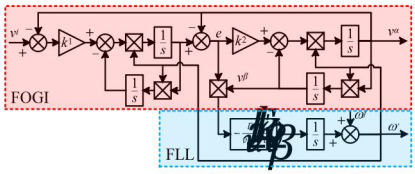


图 1 四阶广义积分–锁频环结构框图

四阶广义积分模块用于提取输入信号中转速同频分量及其正交成分，锁频环模块利用正交信号精确估计实时转速。

3 交叉反馈控制

交叉反馈控制框图如图 2 所示，通过引入速度交叉反馈项，得到补偿电流产生补偿电磁力抵消陀螺耦合力，实现多自由度解耦控制。

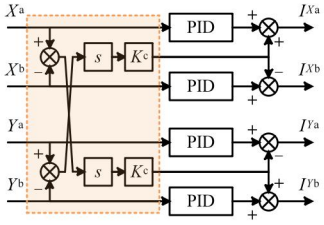


图 2 交叉反馈控制框图

4 仿真研究

转速观测仿真结果如图 3 所示，四阶广义积分-锁频环在较短时间内跟随给定频率，且受谐波等影响最小，表明该方法能够对转速进行有效估计。

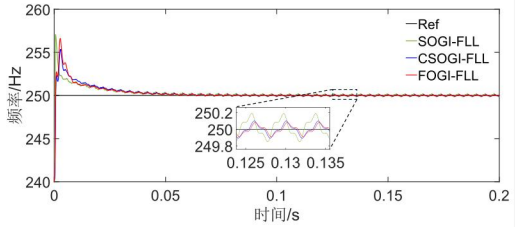


图 3 转速观测仿真结果

解耦控制仿真结果如图 4 所示，当 a 端 x 方向发生位移突变后，其他自由度并未出现明显的位移波动，表明该方法能够实现系统解耦。

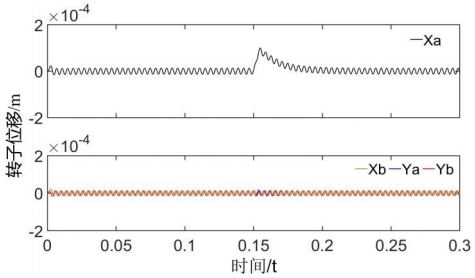


图 4 解耦控制仿真结果

5 结　论

本文以无转速传感器的磁悬浮轴承系统为研究对象，首先利用四阶广义积分-锁频环精确估计转速，其次采用交叉反馈控制进行系统解耦，最后通过仿真验证本文提出方法的有效性。

参考文献（References）：

[1] Jiang H, Su Z Z, Wang D, et al. Multiparameter Identification for Active Magnetic Bearing with Uncertainties Based on a Coupled Nonlinear Model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 10431-10441.

[2]沈钺，孙岩桦，王世琥，等. 磁悬浮飞轮系统陀螺效应的抑制[J]. 西安交通大学学报，2003(11): 1105-1109.

收稿日期： 2026 年 04 月 14 日.

基金项目： 无.

作者简介： 徐崎凡(1998－)，男，辽宁省葫芦岛市，初级，硕士，主要从事磁浮轴承高速电机研究；
通信方式：E-mail: qifanxu@ie.ah.cn

文章编号：485-023

磁悬浮轴承变偏置电流下的性能研究

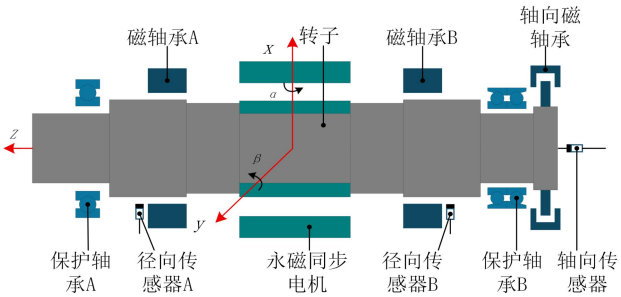
王欢，赵川，赵海宁，孙凤，徐方超
（沈阳工业大学 机械工程学院，辽宁 沈阳 110870）

1 引言

主动磁悬浮轴承可以通过电磁力实现转子无接触支撑[1]。凭借无机械摩擦、无需润滑、无需维护等优点，被广泛应用于航空、医疗、储能以及食品等领域[2]。然而，随着应用工况的日益复杂，如何进一步降低系统运行功耗并保持转子的动态稳定性，仍是当前面临的重要挑战。因此，本文提出一种全工作周期的变偏置电流分配策略，并分析变偏置电流控制下转子系统的静态和动态特性。

2 磁悬浮轴承数学模型

磁悬浮轴承实验台转子及其组件布置如图 1 所示。采用两组径向磁悬浮轴承和一组轴向磁悬浮轴承实现转子的五自由度运动控制，对转子进行受力分析，建立转子系统的动力学模型。



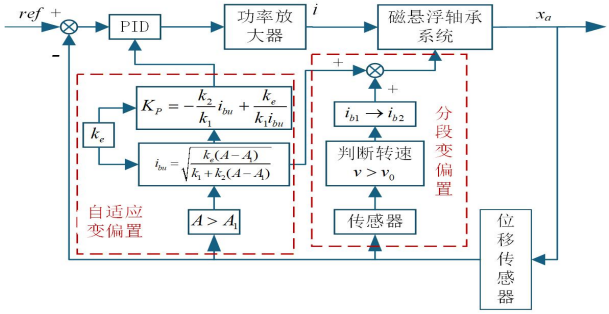
1 磁悬浮轴承实验台结构示意图

根据牛顿运动定律得到转子简化的动力学方程如下：

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_{xa} + F_{xb} - mg - f_x \\ m\ddot{y} = F_{ya} + F_{yb} - f_y \\ m\ddot{z} = F_z \\ J_x\ddot{\alpha} = F_{ya}l_a - F_{yb}l_b - J_z\omega\dot{\beta} \\ J_x\ddot{\beta} = -F_{xa}l_a + F_{xb}l_b + J_z\omega\dot{\alpha} \end{cases}$$

3 全周期变偏置电流分配策略

在保证转子稳定控制的前提下降低系统功耗，本文提出一种全工作周期变偏置电流分配策略，控制框图如图 2 所示。策略分为两部分：一是转子在起浮与升速阶段采用的分段变偏置控制，根据转速动态切换偏置电流以降低功耗；二是转子达到工作转速后引入自适应变偏置控制，在维持低偏置电流的基础上，根据转子实时振幅动态调节电流，当转子受到干扰时，提高偏置电流，改善动态性能。



2 全工作周期变偏置电流分配策略

4 实验验证

搭建五自由度磁悬浮轴承系统的控制框图，在 PID 控制下实现转子稳定起浮后，分别在静态和旋转工况下切换偏置电流分析转子位移变化，通过引入外部干扰验证自适应变偏置电流策略的有效性。

5 结 论

本文介绍了五自由度磁悬浮轴承系统的结构和原理、动力学模型和变偏置电流分配策略的设计。结果表明，变偏置电流分配策略在磁悬浮轴承系统应用的可行性，在保持转子稳定悬浮的基础上降低系统功耗。

参考文献（References）：

[1] 吴华春，龙志强，周瑾，等．磁力轴承——过去、现在和未来[J]．轴承，2024(7)：1-13.
[2] 熊万里，孙文彪，刘侃，等．高速电主轴主动 磁悬浮技术研究进展[J]．机械工程学报，2021，57(13)：1-17.

收稿日期：2026 年 04 月 23 日.
基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFB3410002）；兴辽英才计划（XLYC2503136）.
作者简介：王欢(2001－)，女，山东省菏泽市，硕士，主要从事磁悬浮系统及其控制方法的研究；
通信方式：E-mail: wanghuan@smail.sut.edu.cn、联系电话 17306368492

文章编号：485–024

多极独立磁轴承电流分配与节能控制策略研究

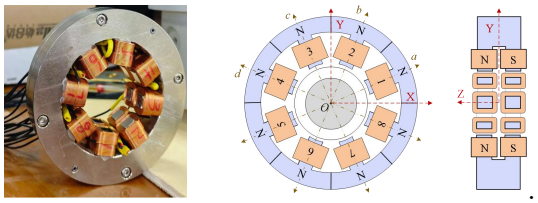
沈航，赵川，孙凤，金俊杰
（沈阳工业大学 机械工程学院，辽宁 沈阳 110870）

1 引言

随着旋转机械向高速、高精度及低能耗方向发展，传统接触式轴承已难以满足高端装备需求。磁悬浮轴承虽具无接触、高动态响应等优势，但基于固定偏置电流的差动控制在稳态运行中仍存在持续励磁损耗与温升问题[1]。针对这一不足，本文以同极型磁轴承为对象，提出一种多极独立电流控制策略，构建电流分配方法。在满足悬浮力与稳定性要求的前提下，对工作的磁极电流进行优化分配，以实现磁极输出均衡化及稳态损耗降低，从而提升系统能量利用效率与动态控制性能。

2 同极型磁悬浮轴承电流分配策略

本文所研究的同极型磁悬浮轴承结构如图 1 所示，由八个磁极沿圆周方向均匀分布，相邻磁极间隔为 45°，协同作用于转子以产生径向悬浮力。各磁极均采用同极性偏置磁场设计，使磁通在磁路中保持单向分布，从而避免传统异极结构中磁通周期性反转所引起的铁损与涡流损耗[2]。



1 同极型磁悬浮轴承结构示意图

在满足目标电磁合力约束的前提下，以各磁极电流幅值最小化为优化目标，抑制局部磁极电流过大现象，从而降低绕组铜耗与热负载，并提升系统运行的均衡性与可靠性。由此，可将控制力分配问题等效转化为无约束优化问题：

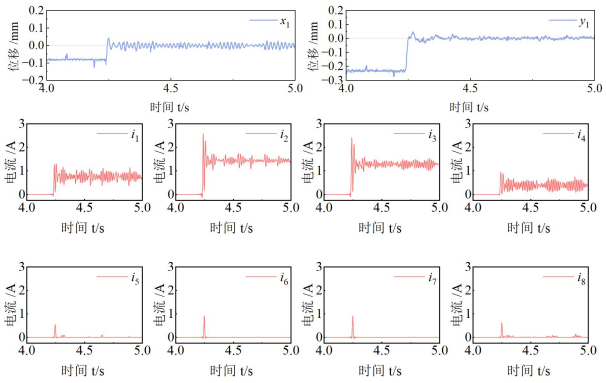
$$\min_F \frac{1}{2}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}, \qquad \text{s.t.}\ \boldsymbol{E}\boldsymbol{F}=\boldsymbol{F}_{\exp} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{F}_{\exp}=\left[F_x,F_y\right]^{\mathrm{T}}$ 为磁轴承系统的期望合力，$\boldsymbol{F}=\left[F_1,F_2,F_3,\ldots,F_8\right]$ 为各磁极产生的电磁力分量，$\boldsymbol{E}$ 为磁极方向矩阵。

由式(1)可知，其目标函数为标准二次型形式，属于典型的最小二乘优化问题，可通过解析方法求得最优解。结合电磁力—电流关系模型，反求对应的磁极工作电流，从而实现电流的优化分配。

3 实验分析

基于所提出的多极独立电流分配策略进行起浮实验，实验结果如图所示。结果表明，系统在起浮过程中主要由四个磁极参与承载，其中竖直方向的两磁极电流幅值较大，承担主要支撑力，而其余磁极电流相对较小，主要起辅助调节作用，体现了电流分配的合理性与力输出的方向选择性。



2 起浮实验的转子位移及各磁极电流

4 结 论

本文针对同极型磁悬浮轴承差动控制中偏置电流能耗问题，提出多极独立电流控制及分配策略。通过构建以悬浮力约束、力平方和最小为目标的优化模型，实现磁极电流的独立调节与分配。结果表明，在保证系统稳定性与动态性能的前提下，该方法可有效降低稳态能耗并提升能量利用效率。

参考文献（References）：

[1] Nehal T H, Hamanah W M, Abido M A. Advancements in optimization techniques for active magnetic bearing systems: current trends and future directions[J]. IEEE Access, 2025, 13:11392-11419.

[2] Hsiao D C, Hsieh M F. Design and implementation of novel homopolar magnetic bearings incorporated in reaction wheel for satellite attitude control[J]. IEEE Access, 2023, 11: 66374-66381.

收稿日期：2025 年 04 月 24 日.
基金项目：国家重点研发计划（2024YFB3410002）；辽宁省科技计划联合计划项目重点研发项目（2025JH2/101800446）.
作者简介：沈航（1997－），男，辽宁省沈阳市，博士研究生，主要从事磁悬浮轴承控制、转子振动抑制的研究；
通信方式：shenhang@smail.sut.edu.cn、联系电话：18240144098

文章编号：485-026

电磁轴承-柔性转子系统的建模与控制研究

侯磊[1]，王起凡[1]
(1.哈尔滨工业大学 航天学院，黑龙江省哈尔滨市 邮编 150001)

1 引　言

电磁轴承在当今社会应用广泛，与传统轴承相比，能够杜绝因摩擦产生的损耗，能极大节省维护成本并延长使用寿命。当前对于电磁轴承-柔性转子的动力学模型大多采用简单的有限元建模方法，缺乏对实验中常见的转子径向轴跳动、不对中等情况的建模分析，建立的动力学模型与试验结果难以吻合，难以精确描述电磁轴承-柔性转子系统的动力学特性与参数演化规律，存在较大提升空间。

2 正　文

2.1 研究内容

本文针对电磁轴承-柔性转子系统的动力学建模与振动控制问题，提出了综合考虑非线性磁拉力、转子径向轴跳动、联轴器不对中的动力学建模方法，并进行了实验验证。详细内容如下：

（1）本文针对 16 磁极电磁轴承的磁拉力与控制电流、转子偏心位移的关系进行精确建模，采用等效磁路方法，建立 16 磁极的磁阻模型。采用有限元方法进行柔性转子建模，对转子径向轴跳动与联轴器不对中进行实验测量，并加入到动力学模型中，提高建模精确性。

（2）考虑真实使用电磁轴承的燃气轮机高压转子模型，设计电磁轴承-柔性转子模拟实验平台，结合 ANSYS Maxwell 与 Worbench 软件对模拟实验平台进行动力学仿真分析。设计完成后制造电磁轴承-柔性转子实验台，用于实现动力学建模验证与振动控制研究。

（3）在实验平台上对建立的电磁轴承-柔性转子系统进行动力学模型验证研究，开展扫频测试，计算柔性转子系统临界转速。开展电磁轴承-柔性转子系统振动控制仿真与实验研究，验证动力学仿真模型的有效性。

2.2 测试结果

在 16 磁极电磁轴承-柔性转子系统实验平台（如图 1 所示）进行稳态扫频测试，验证动力学模型的正确性。实验过程中采用激光对中仪测量传感器节点处转子的径向跳动与角度，同时定量测量联轴器的不对中，并将其加入到动力学模型中。结果显示，实验台的柔性一阶临界转速约为 3200rpm，与动力学模型求解得到的 3257rpm 差距为 1.75%，具备较高精度。

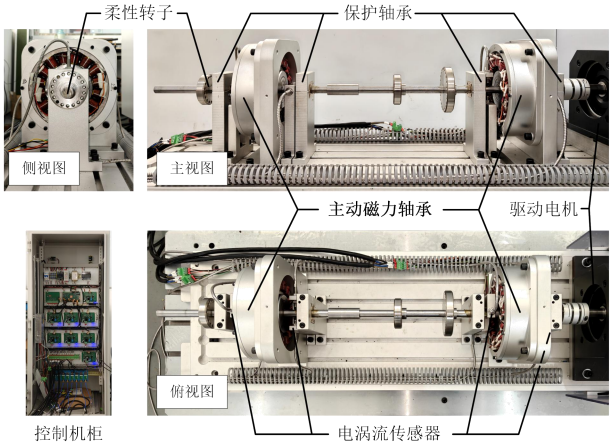


图 1 电磁轴承-柔性转子系统模拟实验平台

3 结　论

本文提出了一种电磁轴承-柔性转子系统动力学建模方法，考虑磁拉力非线性、转子径向轴跳动与联轴器不对中，设计并制造了电磁轴承-柔性转子系统模拟实验平台，实验验证了建模的精确性。

参考文献（References）：

[1] 汤加钰，祝长生．电磁轴承-柔性转子系统过一阶弯曲临界转速区的控制器设计及振动特性[J]．振动工程学报，2025，38(07)：1474-1485.

[2] 程柳峰，陈亮亮，靳晓光，等．基于多维可视化的电磁轴承-柔性转子系统多目标优化控制[J]．振动与冲击，2025，44(4)：40-51，117.

收稿日期：2026 年 05 月 12 日.

基金项目：国家重点研发计划（No. 2023YFE0125900）；国家自然科学基金（Nos. 12422213, 12372008）.

作者简介：侯磊(1987 年 9 月－)，男，吉林省梅河口人，教授，博士生导师，主要从事非线性动力学与振动控制的研究；通信方式：E-mail: houlei@hit.edu.cn、联系电话 18003667477

文章编号：485–027

基于多频激励的磁悬浮轴承在线辨识方法

李久俊[1]，蒋栋[1]，孙天赐[1]
(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院，湖北省武汉市 430074)

1 引 言

主动磁悬浮轴承(Active Magnetic Bearing, AMB)是一种借助电磁力实现转子无接触悬浮的支承装置，具有无磨损、低功耗、无需润滑等优点。对 AMB 的高性能控制依赖对系统传递函数精确的建模。本文基于离散区间二进制序列(Discrete Interval Binary Sequence)和叠加正弦波信号作为激励信号，结合 Goertzel 算法实现了频率响应的高效在线计算，并在 AMB 平台上开展实验。实验结果表明所提出的基于多频激励的在线辨识方法可以快速和准确的辨识多轴磁悬浮轴承的位置环响应。

2 正 文

2.1 主动磁悬浮轴承

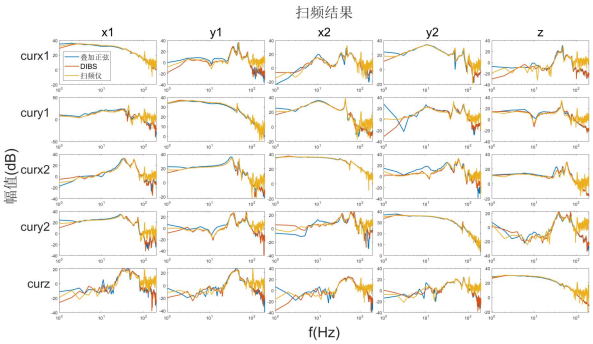
AMB 避免了定转子间的机械摩擦，显著提升了运行转速上限及使用寿命，近年来在飞轮储能、高速机床、航空航天等领域得到广泛的应用[1]。但 AMB 作为开环不稳定的非线性系统，必须依靠闭环反馈控制才能实现转子的稳定悬浮，而闭环控制器的性能，包括响应速度、闭环稳定性、抗干扰能力等，均依赖于对系统动态模型的精确辨识。

2.2 基于多频激励的在线辨识方法

传统的 AMB 系统辨识通常依赖单频正弦扫频，该方法虽然精度较高，但效率较低，辨识时间长且依赖于专业的频率响应分析仪。控制软件中在辨识的扰动注入环节加入叠加正弦波和 DIBS 信号能够同时向系统注入多个频率的激励，同时具有高度可定制的频谱分布，能够有效提升辨识速度[2]。

同时，针对在线辨识的需求，本文采用 Goertzel 算法。Goertzel 算法是一种离散傅里叶变换（DFT）算法，只提取特定频率的幅值和相位信息，占用计算资源少，适用于嵌入式平台。

本文针对五自由度磁悬浮轴承转子系统在控制软件中开发了基于多频激励的在线辨识算法，在静态悬浮条件下开展位置环响应辨识实验，并与商用频率响应分析仪对比，实验结果如图 1 所示。在五个位置环上辨识了 1-200Hz 的频率响应，与基于正弦扫频的商用频率分析仪辨识结果相比实现了主要频率响应的一致，但辨识时间缩短了 90%，证明了方法的有效性。



1 实验结果：五轴位置环频率响应

3 结 论

本文提出了一种面向 AMB 的在线系统辨识方法，结合多频激励以及 Goertzel 算法，实现了 AMB 的高效、精准辨识。实验结果表明，该方法在保证辨识精度的情况下，将辨识时间缩短了 90%，为 AMB 的高性能控制提供了模型基础。

参考文献 (References)：

[1] D. Jiang and P. Kshirsagar, Analysis and Control of a Novel Power Electronics Converter for Active Magnetic Bearing Drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2222-2232.

[2] H. Nian, M. Li, B. Hu, L. Chen et al, Design Method of Multisine Signal for Broadband Impedance Measurement[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(3): 2737-2747.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家自然科学基金 52477189

作者简介：李久俊(出生年 2004)，男，籍贯辽宁省大连市，学士，主要从事主动磁悬浮系统辨识的研究；通信方式：u202212120@hust.edu.cn、13909849269

文章编号： 485-028

基于 ADRC-IANF 的磁轴承转子振动抑制方法

温杰 [1]，李婷 [1*]，马添翼 [1]
（1. 北京印刷学院 机电工程学院，北京 102600）

1 引言

主动磁悬浮轴承（AMB）具有无接触、无摩擦和无需润滑等优点，在高速旋转装备中得到广泛应用。然而，转子制造误差、装配偏差及质量不平衡会引起同步不平衡振动，降低控制精度并影响系统稳定性。传统自适应陷波器（ANF）能够在线抑制同步振动，但存在低速收敛慢、相位滞后及非同步扰动抑制能力不足等问题；主动抗扰控制（ADRC）具有模型依赖小、鲁棒性强的特点，但难以针对同步振动进行精确分离。

针对现有方法的不足，本文提出一种 ADRC 与改进自适应陷波器（IANF）相结合的复合控制策略（ADRC-IANF），实现同步不平衡振动与非同步扰动的协同抑制，提高磁轴承转子的振动控制性能。

2 系统建模与控制方法

2.1 四自由度磁轴承模型

建立考虑陀螺效应与不平衡扰动的四自由度磁轴承转子动力学模型，其动力学方程可表示为：

$$M\ddot{q}+G\dot{q}=L_f F+F_d$$

磁轴承采用差分驱动方式，在平衡点附近对电磁力进行线性化处理，可得：

$$f_{ax}=k_i i_{xa}+k_s x_{xa}$$

2.2 复合控制架构

构建“同步扰动分离－残余扰动补偿”复合控制架构，利用 IANF 抑制同步不平衡振动，ADRC 补偿残余扰动，两者协同生成控制量，实现转子振动的有效抑制：

$$u=u_{\mathrm{ADRC}}-u_{\mathrm{IANF}}=\left[k_p(r-\hat{x}_1)+k_d(\dot{r}-\hat{x}_2)-\frac{\hat{f}}{b_0}\right]-\left[k_a v\sin(\hat{\omega}t+\hat{\phi})\right]$$

位移信号经 IANF 实现同步扰动在线分离后输入 ADRC，由 LESO 估计并补偿剩余扰动，最终融合两者输出生成控制电流，实现磁轴承转子振动的协同抑制。

3 仿真实验与结果分析

基于 MATLAB 建立磁轴承转子系统仿真模型，对所提 ADRC-IANF 控制策略进行验证，并与其他控制方法进行对比分析。

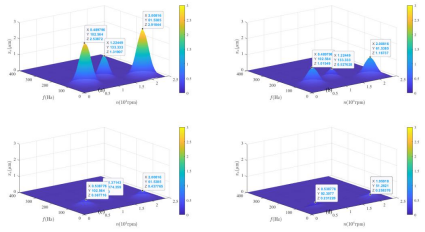


图 1 全速范围内转子振动响应的瀑布效应. (a) 无控制. (b) PID 控制. (c) ADRC-ANF. (d) ADRC-IANF.

仿真结果表明，所提 ADRC-IANF 策略在全转速范围内实现了 90%以上的振动峰峰值抑制，并将稳态平均振动幅值降低 82.4%，综合性能优于 PID 和 ADRC-ANF 控制策略。

3 结　论

仿真结果验证了 ADRC-IANF 复合控制策略对磁轴承转子不平衡振动的有效抑制能力，具有良好的鲁棒性和宽转速适应性，为高速磁轴承系统控制提供了新的思路。

参考文献（References）：

[1] Ye C, Lu J, Wan S, et al. Structure and characteristic analysis of a novel magnetic bearing without thrust disk[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 590: 171588.
[2] 仝宇,田中梁,乔朝阳,等.基于改进自适应陷波器的电磁轴承支承转子自动平衡控制[J].振动与冲击,2023,42(08):51-61+78.
[3] Gong L, He P, Dai D, et al. Vibration Suppression of AMBs-High Speed Motor Using an Enhanced Linear Extended State Observer[J]. IEEE Access, 2025.

收稿日期： 2026 年 05 月 21 日.

基金项目： 中国自然科学基金的支持（No.62403065）；北京市教委科研计划（No.KM202310015003）；北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划项目（No.BPHR20220107）.

作者简介： 温杰(2000 年－)，男，山西省吕梁市，硕士研究生，主要从事磁轴承控制的研究；通信方式：13081888673@163.com；联系电话:13081888673
李婷（1990 年－）,女，山东省，博士，副教授，主要研究方向强化学习、复杂非线性系统的最优控制；通信方式：liting@bigc.edu.cn；联系电话:15510370292

文章编号：485-029

计及时滞及扰动的混合磁轴承延迟补偿型滑模控制

单开宇[1,2]，王珂[1,2]，张伟[1,2]，朱进权[1,2]，葛琼璇[1,2]

（1. 高密度电磁动力与系统全国重点实验室 中国科学院电工研究所 北京市 100190；2. 中国科学院大学，北京市 100049）

1 引言

飞轮储能系统具有响应速度快、瞬时功率高、效率高、维护成本低、使用寿命长等优点。混合磁浮轴承作为飞轮储能系统的关键部件，由于其无摩擦、无需润滑、主动控制等优点，得到了广泛的应用。然而，磁悬浮旋转机械在运行时不可避免地受到时滞效应和扰动的影响，严重时将导致飞轮储能系统失稳。传统的比例-积分-微分控制（PID）难以同时有效应对时滞效应和扰动。为保证飞轮储能系统的稳定运行，本文提出了基于延迟补偿的滑模控制策略 (TDCSMC)。

2 正　文

2.1 磁浮轴承模型

混合磁轴承状态方程如下：

$$m\ddot{x}(t)=k_i i(t)+k_x x(t)+d(t) \tag{1}$$

其中 $x(t)$为转子位移；$i(t)$为控制电流；m 为转子质量；k_i 为电流刚度；k_x 为位移刚度；$d(t)$为有界扰动，$|d(t)|\leqslant D_m$，然而系统避免不了输入时滞，因此系统在含有输入时滞的状态方程应为：

$$\begin{cases}\ddot{x}(t)=\dfrac{k_i}{m}i(t-\tau)+\dfrac{k_x}{m}x(t)+\dfrac{d(t)}{m}\\ \ddot{x}(t)=\dfrac{k_i}{m}u(t-\tau)+\dfrac{k_x}{m}x(t)+\dfrac{d(t)}{m}\\ i(t-\tau)=u(t-\tau)\\ |\sigma(t)|=\left|\dfrac{d(t)}{m}\right|\leq\bar{\sigma}\end{cases} \tag{2}$$

为解决磁浮轴承的系统输入时滞的问题，将补偿量$\xi(t)$与$\zeta(t)$引入到误差，由此利用修正后的误差选取磁轴承-转子系统积分滑模面为：

$$s(t)=\lambda_1\tilde{e}(t)+\lambda_2\int e(\tau)d\tau+\dot{\tilde{e}}(t) \tag{3}$$

指数的趋近率定义为：

$$\dot{s}(t)=-Gsgn(s)-ks \tag{4}$$

由此可得到系统的控制律为：

$$u(t)=\frac{m}{k_i}(\lambda_1\dot{e}(t)+\lambda_2 e(t)+Gsgn(s)+ks) \tag{5}$$

2.2 实验结果

在飞轮储能系统实验平台上进行静浮延迟实验，实验结果如图 1 所示。

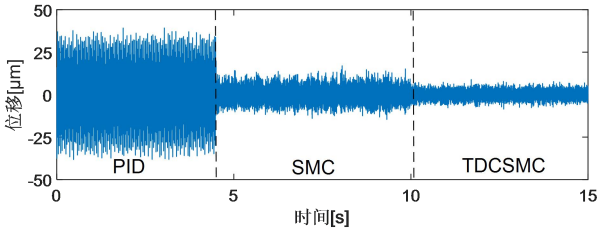


图 1 PID、SMC 和 TDCSMC 位移响应对比

3 结　论

针对飞轮储能系统中的旋转机械受到时滞效应和外界扰动问题，本文采用基于延迟补偿的滑模控制策略。实验结果表明，所提控制方法相比 PID 控制和 SMC 策略显著减小转子位移波动，确保了飞轮储能系统的稳定运行。

参考文献 (References)：

[1] 马彦超.磁悬浮刚性转子系统时滞动力学特性与控制研究[D].南京航空航天大学,2022.

[2] Jin C, Hong Z, Cui G, et al. Adaptive Smith predictive active disturbance rejection control of magnetic suspended rotor system considering time delay[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（52302458）；

作者简介：单开宇(2000－)，男，辽宁省沈阳市，博士，主要从事磁浮轴承控制、电机控制研究；

通信方式：E-mail:shankaiyu@mail.iee.ac.cn、联系电话:13390140929

文章编号：485-030

基于等价输入干扰的磁浮轴承不平衡补偿控制

张伟[1,2]，王珂[1,2]，单开宇[1,2]，朱进权[1,2]，葛琼璇[1,2]

(1. 高密度电磁动力与系统全国重点实验室 中国科学院电工研究所 北京市 100190；2. 中国科学院大学，北京市 100049)

1 引言

主动磁轴承（AMB）因其无接触、免润滑的工作特性而得到广泛应用。然而，转子不平衡会引起同步振动，降低系统性能。现有方法存在计算复杂度高或在多自由度系统中耦合性强的问题。针对这些不足，本文提出一种基于等价输入干扰的不平衡补偿方法，实现了同步振动的解耦补偿，并提高了系统的鲁棒性。

2 磁浮轴承模型与所提控制方法

2.1 考虑不平衡力的磁浮轴承四自由度建模

考虑不平衡力的转子四自由度的受力和力矩，建立动力学模型如式（1）所示。

$$\begin{cases} J_x\ddot{\phi}_x + J_z\omega\dot{\phi}_y = -l_{mu}F_{uy} + l_{md}F_{dy} - \varepsilon_z u_\varepsilon(\omega^2\sin\theta - \dot{\omega}\cos\theta) \\ m\ddot{x} = F_{ux} + F_{dx} + u_\varepsilon(\omega^2\cos\theta + \dot{\omega}\sin\theta) \\ J_y\ddot{\phi}_y - J_z\omega\dot{\phi}_x = l_{mu}F_{ux} - l_{md}F_{dx} + \varepsilon_z u_\varepsilon(\omega^2\cos\theta + \dot{\omega}\sin\theta) \\ m\ddot{y} = F_{uy} + F_{dy} + u_\varepsilon(\omega^2\sin\theta - \dot{\omega}\cos\theta) \end{cases} \tag{1}$$

式中：m 为转子质量；J_x=J_y=J 为转子的赤道转动惯量；J_z 为转子的极转动惯量；F_{ux}、F_{dx}、F_{uy}、F_{dy} 分别为上端和下端径向 AMB 在 x 和 y 方向上产生的电磁力；l_{mu} 和 l_{md} 分别表示从上和下 HMB 到质心平面的距离。u_ε是转子径向不平衡量；ε_z 是转子的轴向不平衡偏移量；ω为转子的瞬态转速；θ为转子角度，且θ=θ_r+α_r，α_r 为不平衡初始位置角，θ_r 为转子旋转角。当转子以恒定角加速度 a(rad/s²)匀加速运行时，θ_r=$at^2/2$，ω=$\dot{\theta}$=at，$\dot{\omega}=\ddot{\theta}=a$；当转子以恒转速$\omega$运行时，$\theta_r$=$\omega t$，$\dot{\omega}=\ddot{\theta}=0$。

2.2 所提控制方法

根据所建立的本体动力学模型，进行每个自由度的等价输入干扰的磁浮轴承不平衡补偿控制设计，经过状态观测以及扰动选频后，补偿到控制器输出，控制框图如图 1 所示。

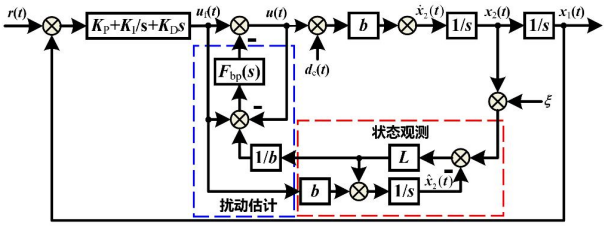


图 1 基于等价输入干扰的不平衡补偿控制

图 2 展示了在转速为 3000 r/min 时补偿前后的位移响应。在启动补偿后，四个位移通道的振动幅值均显著降低，并在 1 秒内趋于稳定，这表明补偿精度较高。

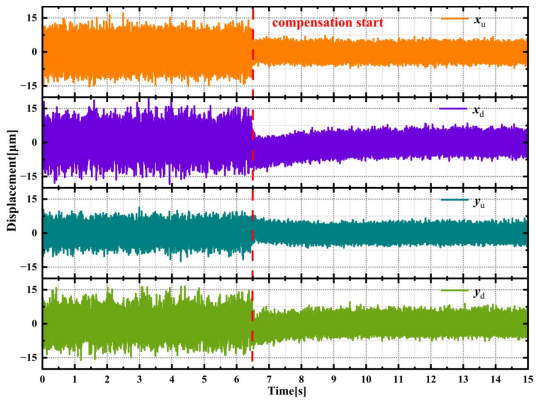


图 2 3000rpm 下补偿前后四路位移对比

3 结论

针对磁浮轴承转子质量不平衡带来的同步振动问题，本文提出了一种结合等价输入干扰控制的不平衡补偿方法。实验结果表明，该方法显著提升了振动抑制性能，并增强了系统鲁棒性。

参考文献（References）：

[1] 黄刚, 袁崧琳, 于惠钧, 等. 基于等价输入干扰滑模观测器的磁悬浮轴承控制[J]. 轴承, 2024, (07):80-86+94.

[2] 王军晓, 陈林杰, 俞立. 基于等价输入干扰滑模观测器的磁悬浮球系统模型预测控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(01):137-146

收稿日期： 2026 年 05 月 24 日.

基金项目： 国家自然科学基金项目（52302458）；

作者简介： 张伟(2002－)，男，山东省济南市，博士，主要从事磁浮轴承控制、电机控制研究；

通信方式：E-mail:zhangwei@mail.iee.ac.cn、联系电话:15098868183

文章编号：485-031

不同偏置电流作用下磁轴承参数鲁棒性分析

胡瑞行[1]，宋春生[1,2]，马欣[1]，吴华春[1,2]，江友亮[1]

(1.武汉理工大学 机电工程学院，湖北省 武汉 430070；2.湖北省磁悬浮工程技术研究中心，湖北省 武汉 430070)

1 引言

随着高速旋转机械向高速化、高精度及智能化方向发展，磁悬浮轴承因具有无接触支承、无机械磨损及主动可控等优点，在航空发动机、飞轮储能及高速电机等领域得到了广泛应用。偏置电流作为磁悬浮轴承的重要运行参数，不仅决定电磁力线性化工作点，而且直接影响电流刚度、位移刚度及系统动力学特性。实际工程中，不同运行工况通常对应不同的偏置电流设置，使得系统名义模型及参数不确定性对闭环稳定性的影响存在明显差异。然而，目前相关研究主要集中于偏置电流优化及控制策略设计，对于不同偏置电流作用下系统参数鲁棒稳定性的定量分析仍相对不足。因此，有必要建立统一的鲁棒性分析框架，研究不同偏置电流条件下系统参数摄动对闭环稳定性的影响规律。

2 正文

2.1 不同偏置电流磁悬浮轴承动力学建模

开展不同偏置电流下磁悬浮轴承动力学建模。依据 12 磁极结构如图 1，先建立理想磁路线性化电磁力模型；结合陀螺效应，建立四自由度耦合转子动力学方程，分析不同偏置电流下电磁力、惯性力与陀螺力耦合关系，为系统仿真与不确定性评估提供理论支撑。

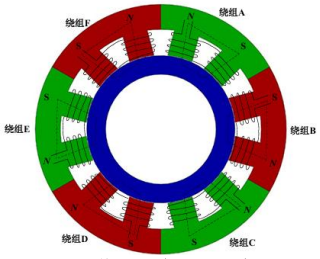


图 1 磁悬浮轴承示意图

2.2 基于 v-gap 度量的系统不确定性评估

完成建模后，随后，以电流刚度、位移刚度、模态频率、模态振型及转子阻尼五类典型参数作为不确定性对象，引入 v-gap 度量方法，对不同偏置电流条件下模型参数摄动引起的闭环鲁棒稳定性变化进行定量评价，分析不同参数摄动对应 v-gap 变化规律及系统鲁棒性变化特征。结果表明，前三者摄动影响有限，模态频率摄动对稳定性影响显著，需在控制器设计中重点考量，为鲁棒控制提供仿真支撑，如下图 2 为电流刚度摄动。

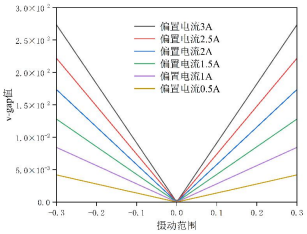


图 2 电流刚度摄动与 v-gap 值

3 结论

研究结果表明，不同偏置电流对应的名义模型具有不同的鲁棒稳定特性，其中模态频率摄动对系统闭环稳定性的影响最为显著，而电流刚度、位移刚度及模态振型摄动表现出较好的鲁棒容忍能力；随着偏置电流变化，各类参数摄动对系统鲁棒稳定性的影响呈现不同敏感性。

参考文献 (References)：

[1]虞烈，袁崇军。磁悬浮轴承理论与应用 [M]. 北京：机械工业出版社，2019.

[2] 冉少林. 基于鲁棒控制的磁悬浮柔性转子建模及稳定性控制研究[D].武汉： 武汉理工大学，2019.

[3] 张浩，谢振宇，黄云龙，等. 基于变偏置电流方式的交叉反馈控制策略研究 [J]. 机械与电子，2017，35 (05)：45-50.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：磁轴承变偏置电流分配策略与低功率鲁棒控制研究 2024YFB3410002.

作者简介：宋春生(1981－)，男，河北唐山，教授，博士，主要从事机械主动控制与磁悬浮主动隔振技术的研究；通信方式：E-mail:song_chsh@163.com、联系电话:13437161368

文章编号：485-032

基于 LGC 的磁轴承系统自适应反演滑模控制

苗贶生 [1]，李婷 [1*]，马添翼 [1]
（1. 北京印刷学院 机电工程学院，北京 102600）

1 引言

磁悬浮轴承虽无摩擦免润滑，但系统多变量、强耦合、非线性且开环不稳定，传统控制易失稳。现有 PID、ADRC 等方法存在抖振、奇异性或依赖模型等问题。本文提出一种基于逻辑高斯圆（LGC）的自适应反演滑模策略，离线优化系数并在线补偿扰动，有效抑制抖振，兼顾快速性、精度与鲁棒性。

2 磁轴承系统建模和控制策略

2.1 磁轴承系统建模

首先通过建立多维直角坐标系并综合考虑转子的陀螺效应与质量不平衡力干扰，推导了径轴向四自由度非线性动力学模型。

对非线性电磁力进行了线性化处理并定义了组合控制电流，最终其形式可表示为：

$$\ddot{\zeta}(t)=f(\zeta;t)+g(\zeta;t)U+d(t)$$

2.2 基于 LGC 自适应反演滑模控制策略设计

在系统建模基础上，提出了一种基于 LGC 改进的磁轴承自适应反演滑模控制策略。该控制策略的整体拓扑结构和四层闭环框架。

自适应反演滑模控制层对系统进行有效降阶与逐步分解，最终自适应律设计为：

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= -c_1e_1^2+e_1e_2^2-h\sigma_1-h\beta|\sigma|+F\sigma-\bar{F}|\sigma| \\ &\le -c_1e_1^2+e_1e_2-h\sigma^2-h\beta|\sigma|\end{aligned}$$

3 仿真实验与结果分析

为了验证所提出的控制策略在主动磁轴承系统中的控制性能与优越性，本节开展了对比研究。图 1 展示了三种控制器在运行阶段的电流响应曲线及局部抖振细节对比。

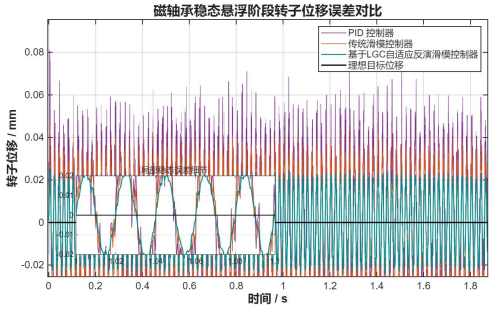


图 1 稳定悬浮位移控制误差对比

4 结　论

本文提出基于 LGC 算法的磁轴承自适应反演滑模控制策略。融合反演设计、滑模鲁棒性与自适应补偿，并利用 LGC 混沌映射全局寻优，显著提升稳态精度。仿真表明，该方法起浮响应快、超调低，有效抑制抖振，在参数突变或大扰动下可快速恢复，动静态特性及控制电流品质均明显改善。

参考文献（References）：

[1] 胡佳成,吴华春,方康平,等.永磁轴承结构综述[J].轴承,2023,(07):1-7.

[2] Saha, Sudipta, et al. "Finite-time adaptive higher-order SMC for the nonlinear five DOF active magnetic bearing system." Electronics 10.11 (2021): 1333.

[3] Wang, Jinpeng, et al. "Logistic-gauss circle optimizer: theory and applications." Applied Mathematical Modelling 143 (2025): 116052.

收稿日期：2026 年 05 月 22 日.

基金项目：中国自然科学基金的支持（No.62403065）；北京市教委科研计划（No.KM202310015003）；北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划项目（No.BPHR20220107）.

作者简介：苗贶生(2002－)，男，河北省邯郸市，硕士研究生，学位，主要从事磁轴承控制的研究；通信方式：E-mail:2312604835@qq.com、联系电话：18849026447

文章编号：485-033

基于逆向 Bertotti-IPI 的 AMB 电磁损耗滞后前馈补偿控制

原东昇[1]，王森炜[1]，尹忠刚[1]，赵兵健[1]，张新玉[1]
(1.西安理工大学 电气工程学院，陕西省 西安市 710054)

1 引言

主动磁悬浮轴承（Axial Magnetic Bearings）铁芯材料存在强烈的磁滞非线性与动态涡流效应，这些会导致实际输出电磁力相比于控制电流产生严重的相位滞后，进而引发转子轨迹跟踪时的高频振荡甚至失稳。

针对上述问题，本文提出了一种基于 Bertotti 损耗分解理论的逆向 Bertotti-IPI 模型（Bertotti - Improved Prandtl-Ishlinskii Model）的前馈补偿控制策略。该策略通过建立磁滞与涡流逆动力学模型，对控制器输出电流进行前馈补偿，从而显著提升了静态悬浮下磁轴承的轨迹跟踪精度。

2 模型与算法

针对单自由度差动磁轴承，本文根据 Bertotti 损耗分解理论和转子动力学理论，以轴承定子硅钢测量 B-H 数据为基础，建立了以 IPI 磁滞模型为基础的全链路前向动力学模型，且设计了逆向 Bertotti-IPI 模型前馈补偿器，对铁芯动态磁滞与涡流损耗以及转子高频运动的机械惯性引发的非线性阻力进补偿，以频率为 50Hz、幅值为 10μm 的正弦输入为例，削弱了正弦跟踪下的稳态幅值误差与相位滞后，系统前馈补偿器如图 1 所示。

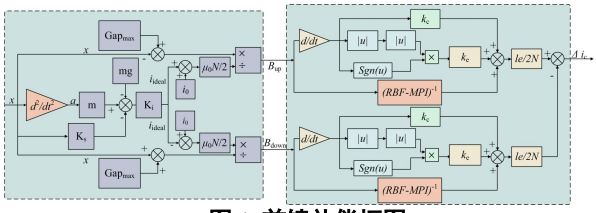


图 1 前馈补偿框图

3 仿真

在 Simulink 中搭建了单自由度差动式磁悬浮轴承模型。图 2 为磁轴承转子位置对比波形，仿真结果表明，系统实际位移的稳态幅值误差由 38.40%被有效抑制至 29.80%；补偿后系统等效相位滞后由 9.90° 降至 3.78° ，相较于无补偿状态，相位跟踪精度提升了 61.82%。

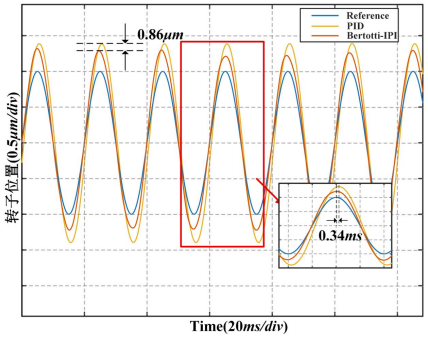


图 2 转子位置

4 结　论

基于逆向 Bertotti-IPI 模型的前馈控制策略能够有效解决由磁滞效应以及涡流效应引起的 AMB 系统的非线性滞后问题，并且在 50Hz 的正弦轨迹下，转子等效相位滞后仅 3.78° 。系统的相位跟踪幅减小了 61.82%，转子位置的动态幅值误差绝对量减小了 0.86μm。

参考文献（References）：

[1] JIANG H, SU Z, WANG D, et al. Analysis and Compensation of Hysteresis Effect on Electromagnetic Force in Axial Magnetic Bearings[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023,38(02):1143- 1154.

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（52207016）.

作者简介：原东昇(1989)，男，甘肃省陇西县，副教授，博士，博士后。主要从事磁悬浮轴承、永磁同步电机的高性能控制和故障诊断；

通信方式：E-mail: dsyuan@xaut.edu.cn、联系电话:18710560991

文章编号：485–034

基于高斯过程的飞轮电池学习模型预测控制

张维煜，李志斌，吴瑶
(1.江苏大学 电气信息工程学院，江苏省 镇江市 212013)

1 引　言

飞轮电池系统对其自身随时间变化的非线性特性以及实际运行条件下的随机干扰极为敏感。传统的飞轮电池模型预测控制（MPC）通常基于具有较大动态精度限制的离线矢量力学模型进行研究，这导致传统 MPC 方法无法解决模型在线优化及不确定性定量补偿等问题。针对上述缺陷，本文提出了一种基于局部稀疏优化高斯过程的学习型模型预测控制方法。首先，将系统残差部分和矢量力学模型的观测动力学分别建模为高斯过程回归过程；其次，引入基于筛选局部磁密度感应点的稀疏化高斯过程，并设计动态扩散优化机制以降低计算负担；此外，提出基于卡尔曼滤波高斯过程的学习型模型预测理论，确保所提方法的实际应用可行性。

2 飞轮电池高斯过程学习模型

设被控系统由离散时间非线性方程建模如下：

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f(x_k,u_k)+B_d(g(x_k,u_k)+\omega_k) \\ y_k &= d(x_k)+v_k \end{aligned} \tag{1}$$

其中，$x_k \in \mathbb{R}^n$，$u_k \in \mathbb{R}^m$，$y_k \in \mathbb{R}^h$ 分别为时刻 k 的系统状态、控制输入与测量输出；$B_d \in \mathbb{R}^{n\times d}$ 表示转移矩阵，$f(x_k,u_k)$ 为系统动力学标称模型；$w_k = g(x_k,u_k)+\omega_k \in \mathbb{R}^d$ 为经高斯过程学习的未建模动态，由状态相关残差模型 $g(x_k,u_k)$ 与独立同分布过程噪声 $\omega_k \sim N(0,\sigma_n^2)$ 共同构成；$d(x_k)$ 为受独立同分布噪声 $v_k \sim N(0,\sigma_m^2)$ 扰动的观测模型。

本文的核心研究目标是设计一种学习型模型预测控制策略，为此，本章将该控制问题转化为如下优化问题：

$$\begin{aligned} &\min_u J(x_k,u_k) \\ s.t. &x_{k+1} = f(x_k,u_k)+B_d(g(x_k,u_k)+\omega_k) \\ &y_k = d(x_k)+v_k \\ &u_k = \kappa(x_k) \\ &x_k \in X, u_k \in U, k \in \mathbb{N}_0 \end{aligned} \tag{2}$$

其中，$u_k = \kappa(x_k)$ 为闭环系统控制律。

3 飞轮电池学习模型预测控制

考虑到飞轮电池系统的控制响应速度，需对控制律序列进行优化，以减小预测区间的不确定性。因此将控制律约束为如下线性状态反馈控制器形式：

$$\kappa_k(x_k) = K_i(\mu_k^x - x_k)+\mu_k^u \tag{3}$$

式中，μ_k^x 为预测状态均值，μ_k^u 为预测输入均值。为减小计算负担，反馈增益 K_i 需在优化前预先选定，并针对施加输入的均值。

4 结　论

本章所提方法，既保留了机理模型的可解释性与控制稳定性，又发挥了高斯过程非参数学习的非线性拟合能力与不确定性量化优势，突破了传统飞轮电池 MPC 控制的性能瓶颈。

参考文献 (References)：

[1] 张维煜, 朱焜秋. 飞轮储能关键技术及其发展现状[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 141-146.

[2] 张鹏, 祝长生, 李翁衡. 基础冲击作用下弹性支撑的电磁轴承柔性转子系统振动特性及瞬态振动主动抑制策略[J]. 振动工程学报, 2024: 1-10.

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：国家自然科学基金（52077099）；江苏省优秀青年基金（BK20250152）.

作者简介：张维煜(1986)，女，籍贯吉林省辽源市，江苏大学电气信息工程学院教授，电力电子及电力传动博士学位，主要从事飞轮电池的研究；通信方式：E-mail: zwy@ujs.edu.cn、联系电话：13094961658

文章编号：485–035

考虑复杂扰动的车载飞轮电池多模式自适应控制策略

张维煜，梁润泽
(1.江苏大学 电气信息工程学院，江苏省 镇江市 212013)

1 引言

车载磁悬浮飞轮电池系统是新能源汽车领域有潜力的动力电池，有快速充放电、长寿命、无化学污染等优势，能回收制动能量、稳定运行并提升整车可靠性。但实际应用中，该系统易受复杂道路条件扰动，单一控制器难兼顾静态参数设定与动态工况变化的矛盾。传统 PID 控制在正常路况表现尚可，复杂工况下鲁棒性不足、易失稳；常用鲁棒控制策略能应对多种干扰，但设计复杂、响应慢，难满足实时性要求。为解决这些问题，本文提出基于不同道路条件的车载飞轮电池多模式自适应控制策略。在 CARSIM 中建立复杂工况仿真模型，量化道路参数干扰强度，动态调整控制参数，匹配最优控制算法。该策略提升了系统抗扰能力与稳定性。

2 系统模型

车载碟形磁悬浮飞轮电池由金属飞轮、混合磁轴承、无刷直流电机组成，含 5 自由度（径向、扭转、轴向）位移传感器与辅助轴承，保障极端工况安全。通过 CARSIM 建立车-路耦合动力学模型，输出车辆 5 自由度加速度；结合 ADAMS 搭建飞轮动力学模型，量化单扰动、高频扰动、多扰动、瞬时强脉冲扰动四类路况对飞轮的影响，为控制策略设计提供依据。

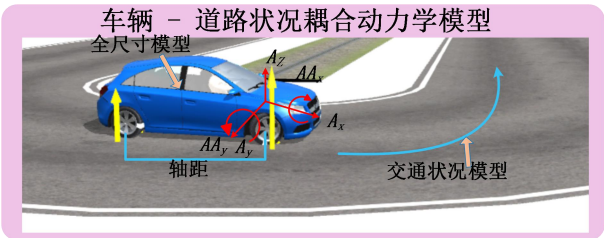


图 1 车—路况耦合动力学模型

3 多模式自适应控制策略

采用上层决策+下层执行架构，上层识别路况并切换控制模式，下层调用对应控制器。针对不同道路条件的扰动特征，所提多模式自适应控制策略匹配最优算法：在直行、转弯、缓坡等单扰动路况，采用参数随车速、坡度及转弯半径动态调整的传统 PID 控制，抑制单向弱扰动；遇到颠簸路等高频扰动路况时，切换为微分优先 PID，避免高频噪声放大；而在地下车库、连续弯道等多扰动路况，引入分数阶 PID 补偿相位滞后；若遭遇滑坡、侧滑等瞬时强脉冲扰动，采用 RBF 神经网络与粒子群优化结合的 PID 控制，应对突发强扰动，防止飞轮超间隙偏移。系统采用双闭环控制：外环感知加速度/位移扰动、触发模式切换；内环执行电磁力/电流精准调控，保障多工况自适应稳定。

4 结论

本文设计的车载飞轮电池多模式自适应控制策略，通过路况分类与模式匹配，解决了传统 PID 在复杂扰动下鲁棒性差的问题。该策略结构简洁、计算量小、工程易实现，有效提升飞轮电池的运行稳定性与抗扰能力，为车载磁悬浮飞轮电池的实际应用提供技术支撑。

参考文献（References）：

[1] Zhang W Y , Gu X W ,Ji H T , Robust sensorless control of vehicle-mounted flywheel battery against continuous road disturbances, *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, vol. 11, no. 5, pp. 12052-12062, Oct. 2025.

[2] Zhang W Y, Li Z B,Trajectory tracking control based on NP-RMPC with the uncertain model parameters for magnetic bearing-rotor system, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2025

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：国家自然科学基金（52077099）；江苏省优秀青年基金（BK20250152）.

作者简介：张维煜(1986)，女，籍贯吉林省辽源市，江苏大学电气信息工程学院教授，电力电子及电力传动博士学位，主要从事飞轮电池的研究；通信方式：E-mail: zwy@ujs.edu.cn、联系电话：13094961658

文章编号：485-036

路况干扰下车载飞轮电池自适应控制策略

张维煜，能浩然

(江苏大学 电气信息工程学院，江苏省 镇江市 邮编212013）

1 引 言

车载飞轮电池工作时难以避免路况造成的复杂干扰。系统结构和动力学模型参数会实时变化，这显著增加了实现鲁棒稳定性的控制难度。为此，本文提出一种基于路况的自适应切换迭代学习控制(ASILC)策略以提升控制系统的鲁棒性，通过路况补偿因子在低复杂度前提下，较传统ILC提升了误差预测精度。基于自适应阈值与峰值预测的实时控制方案适配车载场景，解决了汽车飞轮电池磁轴承在不同工况下的稳定性与鲁棒性问题。

2 ASILC 设计与误差补偿

自适应切换迭代学习控制策略的控制速率为：

$$I_{c,k+1}(t+1)=(1-\sigma)\cdot I_{p,k+1}(t)+\sigma(I_{c,k}(t)+\mu e_k(t)) \quad ((1)$$

其中 σ 是位移调节因子，其值为 0 或 1，用于根据峰值误差的大小来调整控制规则，即：

$$\sigma=\begin{cases}0 & |e(t_p)|\geq 0.02\text{mm}\\ 1 & |e(t_p)|\leq 0.02\,\text{mm}\end{cases} \quad (2)$$

其中，t_p 表示峰值时间，$e(t_p)$ 表示峰值误差。

$$e(t_p)=y_d(t_p)-y_k(t_p) \quad (3)$$

其中，$y_d(t_p)$ 表示峰值时刻的预期位移，$y_k(t_p)$ 表示峰值时刻的实际位移。磁轴承系统线性化后的电流-位移函数关系为：

$$\begin{cases}\begin{bmatrix}i_{x1}\\ i_{y1}\end{bmatrix}=-\dfrac{k_{xy1}}{k_{ixy1}}\begin{bmatrix}x_1\\ y_1\end{bmatrix}\\ \begin{bmatrix}i_{x2}\\ i_{y2}\end{bmatrix}=-\dfrac{k_{xy2}}{k_{ixy2}}\begin{bmatrix}x_2\\ y_2\end{bmatrix}\\ i_z=-\dfrac{k_z}{k_{iz}}z\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}\begin{bmatrix}i_{x1}\\ i_{y1}\end{bmatrix}=-\dfrac{H_m h_m}{N_3}\begin{bmatrix}x_1\\ y_1\end{bmatrix}\\ \begin{bmatrix}i_{x2}\\ i_{y2}\end{bmatrix}=-\dfrac{3F_m}{N_r S_r}\begin{bmatrix}x_2\\ y_2\end{bmatrix}\\ i_z=\dfrac{F_m}{S_z N_z}z\end{cases} \quad (4)$$

根据飞轮位移波动设计一个新的辅助电流曲线作为参考，如公式(5)所示。

$$I_k=\begin{cases}I_0+I_P\cdot\sin\left(\dfrac{\pi}{2}\cdot(\dfrac{t-t_p+t_r}{t_r})\right) & t_p-t_r<t\leq t_p\\ I_0+I_P\cdot\sin\left(\dfrac{\pi}{2}\cdot(\dfrac{t-t_p+t_r}{t_d})\right) & t_p<t\leq t_p+t_r\\ I_0 & t<t_p, t\geq t_p+t_r\end{cases} \quad (5)$$

其中 I_k 是某一时刻的控制电流，I_0 是预期位移时的电流，I_p 是峰值时刻所需的控制电流。

3 道路特征误差补偿

在输入控制策略中，我们使用 p 型算法进行输入控制，同时使用 ILC 方法进行误差处理。该方法分析连续采样和最大值的误差变化，反复修正新的误差，准确预测趋势。它能快速收敛到理想控制，并能有效抑制干扰。

$$e^*_{k+1}(t)=e_{k+1}(t)+E^*_k(t) \quad (6)$$

其中 $e^*_{k+1}(t)$ 是经过第k+1次迭代ILC 学习后的误差输入，$e_{k+1}(t)$ 是系统在第k+1次迭代时的实际输出与预期值之间的差值，$E^*_k(t)$ 是利用第 k 次误差信息来修正第k+1次误差的迭代补偿误差。

$$E^*_k(t)=A\frac{|e_k(t)|}{\delta}|\Delta e(t)| \quad (7)$$

$$\Delta e(t)=e_k(t+1)-e_k(t) \quad (8)$$

其中，$\Delta e(t)$ 表示下一采样时刻的误差与当前采样时刻的误差之间的差值，它反映了误差变化的趋势。δ 是误差范围参数。数值 A 为修正系数，在实验过程中需确定合适的修正系数.

$$A=\frac{E^*_k(t)\delta}{|\Delta e(t)||e_k(t)|} \quad (9)$$

4 结论

本文提出了一种自适应切换迭代学习控制策略，旨在提升飞轮电池在复杂路况下的稳定性和鲁棒性。首先基于悬架力模型推导出作为时间函数的期望电流曲线。针对不同道路条件，采用基于路面特征的特定迭代方法并引入误差补偿机制。实验验证了该策略具有优异的稳定性和鲁棒性

参考文献 (References)：

[1] Y. G. Sun, J. Xu, et al. Adaptive neural-fuzzy robust position control scheme for magnetic train systems with experimental verification[J]. IEEE Trans. Ind. Electron, 2019, 66(11): 8589-8599,

[2] S. Q. Zheng, J. Y. Yang, X. D. Song,et al. Tracking compensation control for nutation mode of high-speed rotors with strong gyroscopic effects[J]. IEEE Trans. Ind. Electron, 2018,65(5): 4156-4165. 3422

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.
基金项目：国家科学自然基金项目（52077099）
作者简介：张维煜（1986），女，籍贯（吉林省辽源市），江苏大学电气信息工程学院教授，电力电子及电力传动博士学位，主要从事飞轮电池的研究；通信方式：E-mail: zwy@ujs.edu.cn、联系电话：13094961658

文章编号：485–037

基于多物理场耦合函数的车载飞轮电池控制策略

刁小燕，尹鸿源，张维煜
(江苏大学 电气信息工程学院，江苏省 镇江市 邮编 212013）

1 引　言

车载磁悬浮飞轮电池系统是电磁场、温度场与固体场相互交织的复杂非线性系统。车辆在紧急避障工况下，飞轮转子偏心加剧，电磁力变化导致温升，温升引起材料特性改变与结构变形，变形又反作用于电磁场，形成强交叉耦合。传统PID控制器依赖精确模型，难以适应参数时变；现有滑模控制虽具鲁棒性，但缺乏对多物理场耦合状态的实时感知与参数自适应能力。本文通过双向耦合分析提取耦合特征函数，并动态映射至滑模控制器参数，提出一种物理场驱动的强鲁棒控制策略。

2 多物理场耦合分析

车载飞轮电池运行时，电磁场、温度场与结构场之间存在双向耦合。线圈通电产生焦耳热，引起温升；温度变化影响材料电导率、磁导率及永磁体性能；电磁力引起磁致伸缩变形；热应力改变结构尺寸；结构变形反作用于气隙磁密，形成完整闭环。

铜耗与铁耗是电磁场中主要的能量损耗来源，二者共同决定了温度场的热源强度。温度升高导致绕组电阻率增大，形成正反馈效应：损耗增加→温升→电阻增大→损耗进一步增加。同时，永磁体剩磁随温度升高而衰减，磁导率亦随温度变化，这些材料特性的改变直接影响电磁力的输出特性。

磁场作用下铁磁材料发生磁致伸缩现象，表现为材料在磁化方向上的尺度变化。该变形虽在微米量级，但在精密悬浮控制中不可忽略。此外，机械应力会反向影响材料的磁特性（压磁效应），形成电磁场与结构场之间的双向耦合。温度变化引起的热膨胀进一步改变结构尺寸，气隙长度随之波动，进而影响磁路磁阻与电磁力。

综合上述效应，电磁力常数、气隙及饱和磁场密度均实时变化。定义耦合强度指标η：

$$\eta = \left|\frac{\Delta K_f}{K_{f0}}\right| + \left|\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right| + \left|\frac{\Delta B_{\mathrm{sat}}}{B_{\mathrm{sat}0}}\right| \tag{1}$$

该指标量化了三者相对变化率的叠加效应，反映多物理场耦合的实时强度。进一步提取电磁-热耦合、热-力变形耦合与电磁耦合三个子指标，通过加权融合得到实时特征向量，用于控制器参数映射。

3 基于耦和特征函数的滑模控制策略

设计滑模控制器，定义跟踪误差与滑模面。将耦合特征函数动态映射至控制器参数，使控制增益随多物理场耦合状态实时调整：耦合增强时提高增益以保证鲁棒性，耦合减弱时降低增益以减小能耗与抖振。控制器引入状态监视器实现滑模控制与PID控制的平滑切换—大误差时启用滑模控制，小误差时切换至PID控制以抑制抖振。该策略无需在线系统辨识，计算量小，易于工程实现。

4 结　论

本文建立了电磁-热-固双向耦合分析框架，提取了量化实时耦合强度的特征函数，并动态映射至滑模控制器参数，实现了物理场驱动的自适应控制，为强耦合时变系统的控制提供了新的技术路径。

参考文献（References）：

[1] Zhang W Y, Wu T, Zhou W J. Accurate modeling of saucer-shaped flywheel battery based on magnetic field estimation and virtual air gap transformation[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2025: 10411-10422.

[2] Gong L, Zhu C S. The influence of PID controller parameters on polarity switching control for unbalance compensation of active magnetic bearings rotor systems[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2024: 8324-8338.

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：国家科学自然基金项目（52077099）.

作者简介：

文章编号：485–038

基于工况的车载飞轮电机偏心预测模型策略

张维煜[1]，周文杰[2]
（1.江苏大学 电气信息工程学院，江苏省 镇江市 212013；2.江苏大学 电气信息工程学院，江苏省 镇江市 212013）

1 引言

飞轮电池在车载的剧烈工况下，外部扰动过大常导致磁轴承来不及完全动作，飞轮电机极易产生混合偏心。偏心会引发气隙畸变、不平衡磁拉力（UMP）加剧、电感参数变化，严重威胁系统稳定运行[1]。现有偏心模型未同时考虑实时工况变化与UMP对气隙的反馈作用，也缺少对偏心谐波的精细建模[2]。为此，本文提出一种通用的飞轮电机实时偏心预测模型构建方法。以车辆紧急制动工况为例，首先通过联合仿真获取实时偏移规律，进而引入UMP修正气隙函数，并采用含偏心谐波的改进绕组函数法建立精确电感模型。实验验证了模型的有效性与实时性。

2 实时气隙预测函数构建

为模拟紧急制动工况，采用CarSim与Adams联合仿真，获取车辆在不同减速度下的实时加速度数据。通过分析转子偏移轨迹，将偏移曲线分段拟合。得到拟合偏移量 $r_1(t)$与 $r_2(t)$，进而建立基础气隙预测函数 $G_1(a,\theta,t)$，具体可表示为式(1) 。

进一步考虑UMP的加剧作用。基于Maxwell应力法推导UMP解析式，并计算UMP引起的附加偏移量 r_0。修正后的气隙预测函数为：

$$G_1(a,\theta,t)=\begin{cases} r_{01}+k_a g_0[1+\dfrac{r_1}{g_0}\cos\theta], 0\le t<t_0 \\ r_{02}+k_b g_0[1+\dfrac{r_2}{g_0}\cos\theta], t\ge t_0 \end{cases} \tag{1}$$

其中 k_a, k_b 为不同制动时间下的比例系数，t_0 为转折时间。

2 改进绕组函数与电感模型

偏心后气隙磁场出现丰富的奇次与分数次谐波（如0.5、1.5、2、2.5、4次）。传统改进绕组函数法仅考虑基波，精度不足。本文提取上述主导谐波，将其引入绕组函数构造中，得到优化后的各相绕组函数 $M_{pA}(\theta)$, $M_{pB}(\theta)$ 和 $M_{pC}(\theta)$。结合修正后的气隙函数，计算自感与互感，形成完整电感矩阵，最终建立等效电路模型。

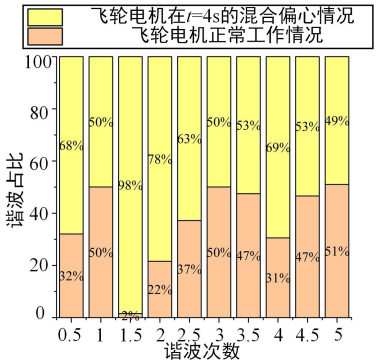


图1 不同紧急制动时间下偏心电机谐波含量变化的比较

3 结　论

本文提出一种考虑UMP反馈作用和实时加速度变化的飞轮电机偏心预测模型通用构建方法。通过联合仿真获得实时偏移规律，利用UMP修正气隙函数，并引入偏心谐波优化绕组函数，显著提高了电感模型精度。实验表明，所建模型能准确预测紧急制动工况下的电流响应，且具有良好的实时性和工况适应性。后续可结合深度学习进一步提升控制系统的智能化水平。

参考文献（References）：

[1] X. Li, X. Wang, W. Zhao, J. Ren, L. Xiong and X. Zhang, “Prediction of post-demagnetization electromagnetic performance for SPMSM considering rotor eccentricity,” *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, vol. 10, no. 4, pp. 9566-9578, Dec. 2024.

[2] W. Y. Zhang, X. X. Zhang, J. X. Yu and Z. Wang, “Accurate modeling of a flywheel motor considering vehicle start-up driving conditions,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 70, no. 6, pp. 6057-6067, June 2023.

收稿日期：2026年05月24日.

基金项目：江苏省优秀青年科学基金（BK20250152）；国家科学自然基金项目（52077099）.

作者简介：

文章编号：485-039

温度影响下磁悬浮轴承铁损机理与仿真分析

董振[1]，宋春生[1,2]，吴华春[1,2]，江友亮[1]
（1.武汉理工大学 机电工程学院，湖北省 武汉 430070；2.湖北省磁悬浮工程技术研究中心，湖北省 武汉 430070）

1 引 言

磁悬浮轴承被广泛用于流体机械、航空航天、能源、军工装备等领域，逐渐成为某些极端特殊环境下的关键支承部件[1]。随着其广泛的应用，其能耗与散热问题也逐渐成为优化的一个方向。在磁悬浮轴承中，铁损是重要的损耗组成部分[2]。传统的损耗计算模型，如 Borttoti 铁损模型[3]，没有考虑温度的影响，但实际上温度会通过影响材料的电磁参数，对铁损造成一定的影响，影响铁损计算的准确性，对磁悬浮轴承的热管理造成影响。

基于此背景，本文对磁悬浮轴承的铁损机理进行了研究分析，得出了一种考虑温度影响的铁损计算模型，通过仿真分析了其准确性。并设计了一个铁损测量装置。

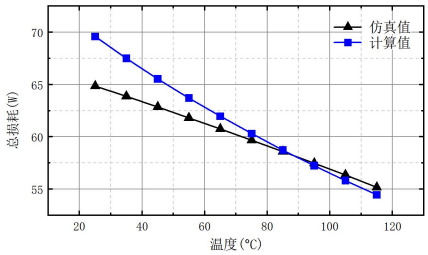
2 正 文

2.1 考虑温度影响的磁悬浮轴承铁损模型

通过叠片假设，可以得到磁悬浮轴承转子铁损与气隙磁场的关系。再利用谐波分解求得气隙磁场后，即可求得不考虑温度影响的铁损。

考虑温度变化对磁导率和电导率的影响后，对原铁损模型进行修正，得到考虑温度影响的磁悬浮轴承铁损模型。

2.2 铁损模型准确性仿真分析



1 损耗仿真计算数据对比图

利用电磁分析软件 MAXWELL，对铁损模型进行仿真验证，仿真对比结果如图 1 所示。

与仿真结果相比，最大误差为 7.1%，在大于 80 摄氏度的高温区最大误差小于 2%，说明在高温区铁损计算模型与仿真所得结果非常符合 ，可以有效预测温度升高对铁损产生造成的影响。

2.3 铁损测量实验装置

为了进一步进行后续的实验，设计了一种径向磁悬浮轴承铁损测量实验装置，包括：真空舱、支撑单元、驱动单元、磁悬浮轴承单元和测量单元。可以通过逐步分离损耗的方法，测量出磁悬浮轴承的铁损，后续可以进一步验证铁损模型的可靠性。

3 结 论

从计算值与仿真结果的比较中可以看到，该铁损计算模型对总铁损随温度影响的预测比较准确，但对磁滞损耗方面的误差仍然存在，后续还有优化的空间。

参考文献（References）：

[1] 吴华春，龙志强，周瑾，等.磁力轴承——过去、现在和未来[J]. 轴承，2024（7）：1-13.

[2] 闫旭，金超武，熊峰，等. 径向磁悬浮轴承铁损特性研究[J]. 测试技术学报，2020，34（1）：68-73, 76.

[3] Han B，Liu X，Huang Z，等. Loss Calculation, Thermal Analysis, and Measurement of Magnetically Suspended PM Machine[J] . IEEE Transactions on Industrial Electronics，2018，65（6）：4514-4523.

收稿日期：2026 年 5 月 25 日.

基金项目：高效高速/高负载磁轴承典型装备集成关键技术研究及应用示范（2024YFB3410005）.

作者简介：宋春生(1981－)，男，河北唐山，教授，博士，主要从事机械主动控制与磁悬浮主动隔振技术的研究；
通信方式：E-mail:song_chsh@163.com、联系电话:13437161368

文章编号：485-040

基于轴向定子扩轭的主被动磁轴承设计与优化

陈欣然[1]，王开璇[1]，乐韵[1]，王坤[1]

（1.北京航空航天大学 大科学装置研究院，北京 100191；2.极弱磁场国家重大科技基础设施研究院，浙江 杭州 310051）

1 引言

磁悬浮轴承由于无需润滑、无摩擦、高速运行等特点，在涡轮分子泵、空气压缩机、心脏泵等领域得到了广泛的应用[1-2]。现有研究的主被动磁轴承大多采用增加定子轭部径向宽度的方法来减弱磁饱和、提升承载力，但不适用于定子外径有限的结构。为此，本文提出一种轴向加宽定子轭的高集成主被动磁轴承结构，并利用等效磁荷法建模优化，实现缓解轭部磁饱和，提升承载力的效果。

2 轴向扩轭主被动磁轴承建模分析

带有磁轴承定子轭部轴向加宽结构的磁悬浮电机三维剖面图与提出的主被动磁轴承结构分解图如图 1 所示。

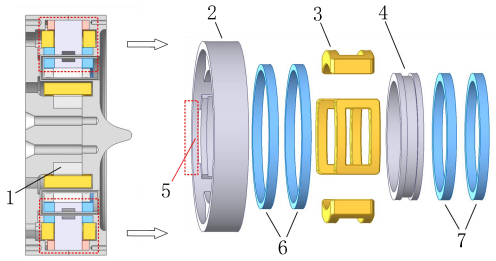


图 1 带有轴向定子扩轭结构的主被动磁轴承位置及其分解图。（1）电机。（2）磁轴承定子。（3）线圈。（4）磁轴承转子。（5）轴向加宽定子轭部。（6）定子永磁体。（7）转子永磁体。

通过等效磁荷法对所提结构进行建模，利用轴向交替充磁的永磁体提供偏置磁场，控制电流提供控制磁通实现系统的支承，控制电路模型如图 2 所示。将结构改进前后磁轴承承载力与磁饱和参数变化情况对比分析，得到如表 1 所示的结果。

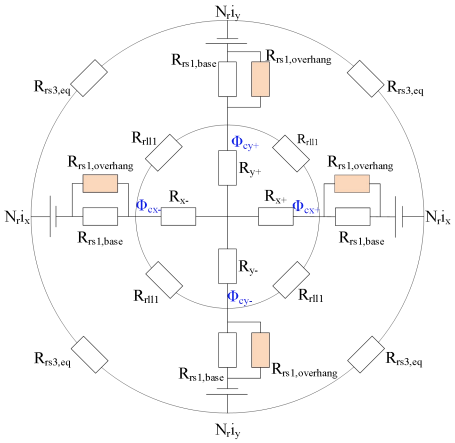


图 2 改进结构的控制磁路模型

表 1 优化结果

参数	传统结构	优化结构
最大承载力(N)	12.06	14.45
定子轭部磁密(T)	1.25	0.95
体积（百分比）	1	1.18

3 结论

为减弱磁饱和、提升承载力，本文设计了一种基于轴向定子扩轭结构的高集成主被动磁轴承，并通过建模与有限元仿真证明了所提结构的有效性。

参考文献（References）：

[1] 熊万里,孙文彪,刘侃,等.高速电主轴主动磁悬浮技术研究进展[J].机械工程学报,2021,57(13):1-17.

[2] Le Y, Wang D, Wang K, et al. A Novel Three-Degree-of-Freedom Hybrid Magnetic Bearing for Air Compressors[J], IEEE Transactions on Energy Conversion: 2024, 39(03), 1782-1792.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：无

作者简介：陈欣然(2001－)，女，河南郑州，博士研究生，学士学位，主要从事磁悬浮轴承的研究；通信方式：rrchen@buaa.edu.cn，联系电话：15037281108

文章编号：485-041

隔离型磁轴承磁力特性分析

支涵，张剑民，袁翼繁，周冉，郭辉，孙凤
（沈阳工业大学 机械工程学院，辽宁省 沈阳市 邮编 110870）

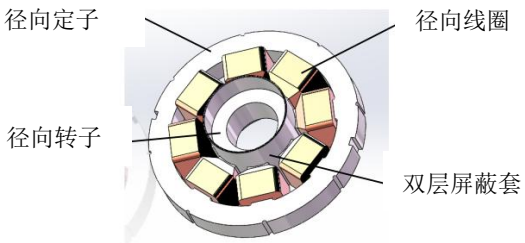
1 引　言

为满足极端工况下的可靠运行需求，隔离型磁轴承通过金属屏蔽套隔绝定转子与冷却介质，有效防止了腐蚀与磨损。由于隔离套改变了磁路磁阻，电磁力特性变得复杂。本文建立了隔离间隙与材料特性的等效磁路模型，分析了其对磁通与悬浮力的影响，揭示了电磁力的非线性规律[1]，为复杂工况下磁轴承的结构优化与高性能控制提供了理论依据。

2 结构设计与模型建立

2.1 结构设计

隔离型径向磁悬浮轴承结构如图 1 所示，通过四自由度磁力约束实现转子悬浮控制。



1 隔离型径向磁悬浮轴承

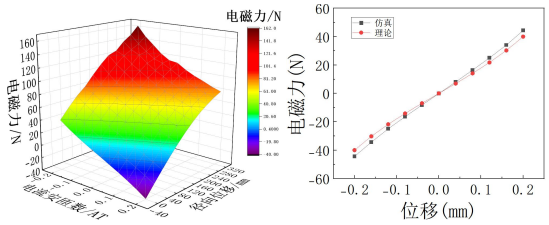
2.2 模型建立

采用等效磁路法建立隔离型磁轴承电磁力解析模型。

$$F_x = k^2 \frac{\mu_0 S N^2}{4} \left[\frac{(I+i_x)^2}{\left(\frac{d_1+d_2}{\mu_r}+\delta+x\cos\alpha\right)^2} - \frac{(I-i_x)^2}{\left(\frac{d_1+d_2}{\mu_r}+\delta-x\cos\alpha\right)^2} \right] \cos\alpha \quad (1)$$

3 特性分析

通过有限元仿真对耦合、承载力及刚度特性进行对比分析，验证了所提理论模型的正确性与有效性，为其工程应用奠定了基础。

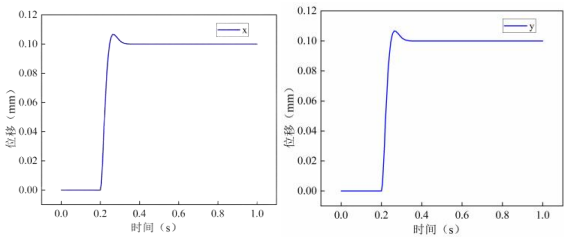


a 耦合分析　　b 承载力分析

2 特性分析

4 实验验证

搭建了磁悬浮轴承-转子实验平台，通过开展静止悬浮、阶跃响应及高速旋转等多项性能实验，全面验证了隔离型径向磁轴承在极端工况下的悬浮能力与运行稳定。



a X 方向阶跃仿真　　b Y 方向阶跃仿真

3 阶跃仿真

5 结　论

本文提出了一种隔离型磁轴承结构，研究表明，该方案在有效规避极端工况下腐蚀与磨损风险的同时，可实现转子的稳定悬浮，为隔离型磁轴承的结构优化与工程化应用提供了可靠的理论支撑。

参考文献（References）：

[1] R. Zhang, X. Song, Z. Cui, et al. Modeling and control of a novel isolated radial active magnetic bearing[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2023, 61(5):1-5.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家重点研发计划（2024YFB3410002）.

作者简介：支涵(2000 年－)，男，辽宁省锦州市，硕士，主要从事隔离型磁轴承结构设计与特性的研究；
通信方式：E-mail:zhihan@smail.sut.edu.cn、联系电话：15174287892

文章编号：485-042

同心双环轴向磁轴承电流分配策略研究

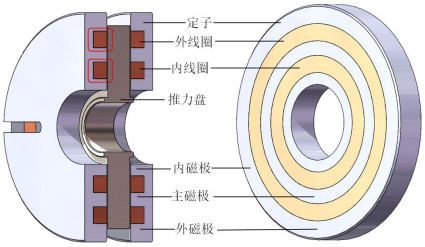
纪亚群 赵川 张勤伟 金俊杰 孙凤 徐方超
（沈阳工业大学 机械工程学院，辽宁 沈阳 110870）

1 引言

磁悬浮轴承具有无机械接触、无需润滑、响应速度快等优点，在旋转机械领域中有着广泛的应用前景[1]。为降低传统差动控制固定偏置电流带来的静态功耗并提升多线圈电磁力调控能力，本文提出同心双环轴向磁轴承四线圈独立驱动的电流分配策略，并分析其动态特性。

2 同心双环轴向磁轴承

同心双环轴向磁轴承主要由定子、转子推力盘、内环线圈、外环线圈等部分组成[2]如图 1 所示。双线圈反向通电时，可以形成以主磁极为公共磁极的双磁路，并通过调节内外环线圈电流的大小从而调节电磁力实现转子轴向位置的控制。



1 同心双环轴向磁轴承结构

根据等效磁路法推导的单个定子的磁力公式：

$$F=\frac{\mu_0 N^2}{2x^2}\cdot\frac{A_w A_z i_w^2+A_n A_z i_n^2+A_w A_n (i_w-i_n)^2}{A_w+A_z+A_n}$$

$$\alpha=KA_w(A_z+A_n)$$

$$\beta=KA_w A_n$$

$$\gamma=KA_n(A_z+A_w)$$

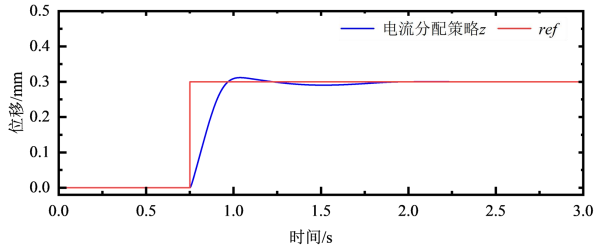
3 电流分配策略仿真研究

设计同心双环轴向磁轴承电流分配策略如下：

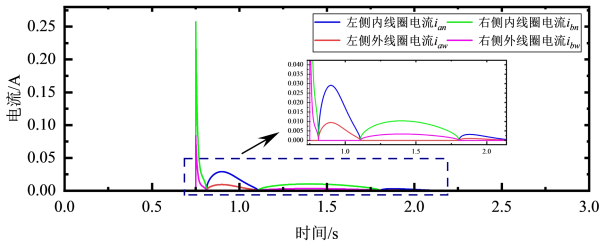
$$r_{cu}=\frac{R_w\gamma-R_n\alpha+\sqrt{(R_n\alpha-R_w\gamma)^2+4R_wR_n\beta^2}}{2R_w\beta}$$

$$i_w=r_{cu}\cdot i_n$$

对磁悬浮轴承进行阶跃响应仿真分析如图 2 所示。由图 a 转子位移响应可知，在阶跃信号作用下，转子能够跟踪给定位移并稳定在目标值附近；同时由图 b 可知四个线圈电流均可以根据电流分配策略进行分配。



a 转子位移



b 线圈电流

2 阶跃仿真

4 实验验证

搭建同心双环轴向磁轴承转子系统实验平台，分析在电流分配策略下磁悬浮轴承的阶跃响应实验与转速实验。

5 结 论

本文介绍同心双环轴向磁轴承的结构、工作原理和电流分配策略的设计，结果表明同心双环的电流分配策略的可行性。

参考文献 (References)：

[1] 王东，姜豪，苏振中，等. 船用磁悬浮轴承关键技术与发展综述[J]. 中国电机工程学报，2020，40（20）：6704-6715.

[2] 王晓光，侯磊磊，付靖，等. 叠片铁芯式轴向冗余磁悬浮轴承的设计[J]. 轴承，2017，（12）：30-34.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家重点研发计划（2024YFB3410002）.

作者简介：纪亚群（1999-），男，黑龙江大庆，硕士，主要从事磁悬浮系统及其控制方法的研究；

通信方式：E-mail:2795282166@qq.com、联系电话：13352436178

文章编号：485-043

基于分数阶建模的实心磁轴承改进型 ESO 振动抑制

禹春敏[1]，周扬忠[1]，钟天云[1]，鲍旭聪[2]
(1.福州大学 电气工程与自动化学院，福建省 福州市 350108；2.南京航空航天大学 自动化学院，江苏省 南京市 211106)

1 引言

针对实心磁轴承系统中由涡流效应引发的强非线性控制问题，本文提出了一种基于分数阶建模的改进型扩张状态观测器（FESO）方法。首先，理论分析表明涡流效应会导致实心磁轴承呈现显著的分数阶特性；然后针对该问题，采用分数阶系统辨识方法建立了实心磁轴承高精度动力学模型。与传统基于线性模型的 ESO 相比，所提出的 FESO 能有效解决振动抑制性能不足的问题。

2 分数阶系统辨识与改进型 ESO 设计

为了获得磁轴承精确模型，采用系统辨识对系统输入、输出数据的分析，直接拟合出高精度的系统数学模型。本文从最简单的 I 型模型结构开始不断增加模型要素。I 型和 II 型模型仍有一定的误差，III 型模型与实验数据表现出高度一致性，模型等效为公式（1）所示。基于该传递函数设计的改进型 ESO 控制器（FESO）如图 1 所示。

$$\hat{G}(s)=\frac{1683}{s^{2.64}+4.04e4s-2.15e5s^{0.75}-1.27e7} \quad (1)$$

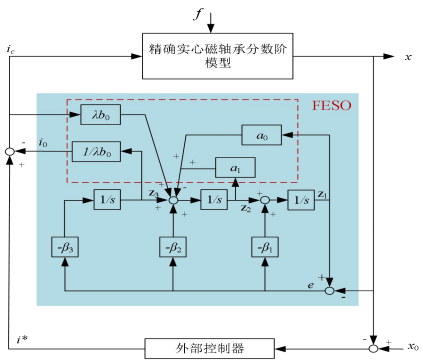


图 1 改进型 ESO 控制框图

3 仿真结果

为了验证 FESO 抗正弦扰动性能，向系统中注入幅值 0.1A，频率在 1~200 Hz 之间的一系列正弦电流，各个频率下的转子振幅如图 3-16 所示，在低频时惯性效应较弱，PID 在 10Hz 出现最大振动峰值 23.4μm。。

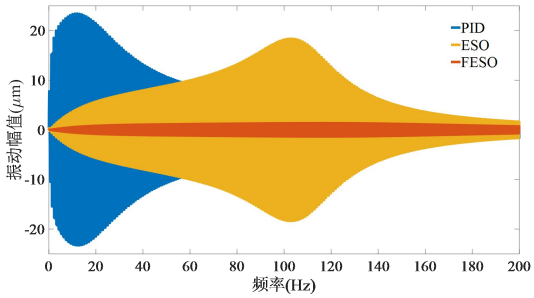


图 2 正弦扰动下转子振动幅值

4 结论

本章基于实心磁轴承分数阶模型设计了 FESO，并进行了仿真验证，相比传统 ESO 不仅显著提升了观测器增益的稳定上限，还有效避免了共振点问题，从而在更宽频带内实现了对系统扰动的精确估计与补偿，改善了系统的动态性能与鲁棒性。

参考文献（References）

[1] Zhang Y，Xu Y，Zhou J，et al．Vibration Control of AMB-Rotor System Under Base Motions Based on Disturbance Observer[J]．IEEE/ASME Transactions on Mechatronics，Early Access，2025：1-10．

[2] 金超武, 曹迎庆, 周瑾, 等. 采用模型幅值 ESO 的磁悬浮转子抗干扰性能[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(04): 870-878.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.
基金项目：高速电机用混合型实心磁悬浮轴承控制策略研究（JAT231004）.
作者简介：禹春敏（1991-），男，江苏省高邮市，副研究员，博士，主要从事磁悬浮轴承本体与控制的研究；
通信方式：E-mail：ycm@fzu.edu.cn

文章编号：485-044

五自由度磁悬浮轴承系统μ综合控制方法研究

杨宇硕 赵川 张勤伟 孙凤 于洪霞
（沈阳工业大学 人工智能学院，辽宁省 沈阳市 110870）

1 引言

磁悬浮轴承具有无接触、低损耗和主动控制等优点，但其系统本身具有开环不稳定、参数摄动敏感等特点，控制器设计对鲁棒性要求较高[1]。μ综合控制方法能够在结构化不确定性条件下兼顾系统稳定性与性能约束。然而，μ综合控制效果很大程度上依赖加权函数的合理选取，传统加权函数设计通常依靠经验反复调整，设计效率较低[2]。为此，本文采用粒子群优化算法对加权函数参数进行优化，并结合μ综合方法完成磁悬浮轴承鲁棒控制器设计。

2 鲁棒控制器设计

2.1 磁悬浮轴承不确定模型建立

以单自由度磁悬浮轴承系统为例，建立含参数不确定性的动力学模型。考虑电磁参数和驱动环节的建模误差，将位移刚度和电流刚度引入结构化不确定性描述。系统状态空间模型可表示为：

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

通过该模型能够描述磁悬浮轴承在参数摄动条件下的动态特性，为后续μ综合控制器设计提供广义对象基础。

2.2 加权函数设计

为兼顾系统的跟踪性能、扰动抑制能力和控制输入约束，构造性能加权函数 Wp 和控制加权函数 Wu。其中 Wp 采用低通滤波器形式以增强低频跟踪和扰动抑制能力；Wu 采用高通滤波器形式以限制高频控制增益，避免控制输入过大。

加权函数结构设计为：

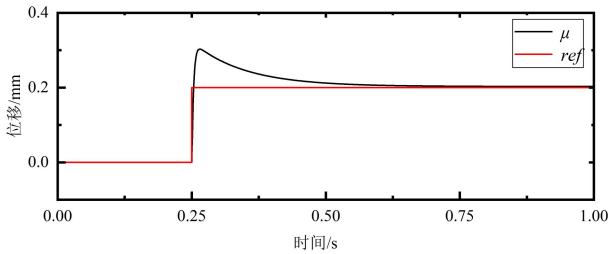
$$W_p(s) = \frac{s / M_p + \omega_{bp}}{s + \omega_{bp} A_p}$$

$$W_u(s) = k_u \frac{s + \omega_{bu} / M_u}{\varepsilon_u s + \omega_{bu}}$$

粒子位置定义为：

$$x = [M_p, \omega_{bp}, A_p, M_u, \omega_{bu}, \varepsilon_u, k_u]$$

采用粒子群优化算法对权函数参数进行寻优。以闭环综合性能指标为目标函数，对不同权函数参数组合进行评价。优化得到的参数用于构建广义系统，并通过μ综合方法求解鲁棒控制器。阶跃仿真结果如下图 1。



1 阶跃仿真

3 结 论

本文提出了一种基于粒子群优化加权函数的磁悬浮轴承μ综合控制方法，仿真结果表明，所设计控制器能够实现磁悬浮轴承系统稳定控制，并在参数不确定条件下保持较好的鲁棒性。.

参考文献（References）：

[1] 曹智. 用于高速电机的主动式磁悬浮系统关键技术研究[D]. 南京：东南大学，2022.

[2] 李渊文，祝长生. 主动电磁轴承μ控制器的多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报，2023. 43(15)：6138-6148.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家重点研发计划（2024YFB3410002）.

作者简介：杨宇硕(2002－)，男，河北邢台，硕士，主要从事磁悬浮系统及其控制方法的研究；通信方式：E-mail: 2898229450@qq.com

文章编号：485-045

基于LQR阻尼引导MPC的磁轴承转子系统振动控制

王汇根[1]，周金祥[1]，郑世强[1]
(1.北京航空航天大学 大科学装置研究院，北京市海淀区 邮编 100191)

1 引言

在主动磁悬浮（AMB）转杯纺纱电机中，加工误差与换不同纺杯需求使转子不平衡不可避免。高速运行时，由不平衡引起的振动及交叉耦合效应会严重影响纱线质量。尽管 AMB 具备多自由度可控性[1]，现有控制方法仍存局限：广泛应用的无模型 PID 控制面临参数整定困难，且忽略了系统间耦合；传统零位移控制在高速工况下则严重受制于功率放大器带宽[2]。

为提升转子位移控制精度，本文提出一种基于线性二次型调节器（LQR）阻尼引导的全维仿射鲁棒模型预测控制（MPC）方法，以实现转子的低振动控制。

2 基于 LQR 阻尼制导的 MPC 方法

为实现转子低振动控制，需采用涵盖模型参数及功率放大器与 AMB 线圈动态特性的综合控制方法。针对高阶标准 MPC 因限制预测时域以防求解器崩溃，导致系统极点逼近虚轴进而损害长期阻尼特性的缺陷，本文设计了由 LQR 强阻尼引导的底层反馈矩阵 U_{active}，以渐近逼近 LQR 结构。该综合控制律既继承了 LQR 的鲁棒阻尼与全局极点配置能力，又保留了 MPC 严格处理物理极限约束的优势。通过基于实时位置和速度构建的控制序列以驱动系统归零，同时综合考虑位移、速度和电流，最终实现了系统的精确解耦与低振动控制。

代价函数定义为方程 1。实验平台如图 1 所示。

3 结　论

本文所提出的控制方法实现了以下显著成果：

提升了系统鲁棒性：能够有效抑制极端扰动工况下的瞬态冲击响应。

$$
\begin{aligned}
\min_{v,U,\varepsilon} \quad & \sum_{k=1}^{P}(x_{nom}^{T}(k)Qx_{nom}(k)+\Delta v^{T}(k)R\Delta v(k) \\
& \qquad +\rho\varepsilon_k^2)+\lambda\| U_{active}-U_{target}\|_F^2 \\
\text{s.t.} \quad & x(k+1)=Ax(k)+Bu(k)+e(k) \\
& x_{nom}(k)=A^k x(0) \\
& u(k)=v(k)+U_k\mathbf{e} \\
& \Delta v(k)=v(k)-v(k-1) \\
& x_{min}-\varepsilon_k \leqslant x(k+1) \leqslant x_{max}+\varepsilon_k, \quad \varepsilon_k \geqslant 0 \\
& u_{min} \leqslant u(k) \leqslant u_{max} \\
& \forall \mathbf{e}\in\mathcal{W}, \quad k\in\{1,2,\ldots,P\}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

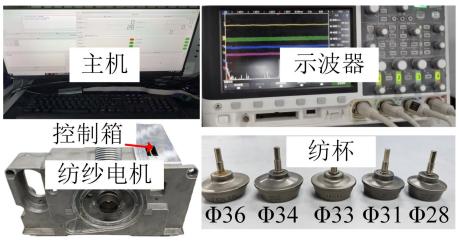


图 1 实验平台示意图

实现了高精度解耦：通过深度融合模型参数，实现了高速运行状态下的精确解耦控制。

优化了计算资源：采用分段增益调度策略，大幅降低了算法的计算时长。

实现了卓越的减振效果：在多种纺杯配合下，其位移控制精度均优于 PID 与标准 MPC 算法。

参考文献（References）：

[1] Schweitzer G, Maslen E H. 磁悬浮轴承：理论、设计及旋转机械应用[M]. 北京：机械工业出版社，2012：20-22.

[2] Xiang B, Li Z, Wong W. Stiffness Identification of Magnetic Suspension System Based on Zero-displacement and Zero-current Models[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 171: 108901.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家自然科学基金资助项目（62225301）.

作者简介：王汇根(1998－)，男，河北省邢台市，博士研究生，主要从事磁悬浮轴承控制的研究；
通信方式：wanghuigen@buaa.edu.cn、联系电话：15128507665

文章编号：485-046

基于扩张状态观测器的磁悬浮轴承反步控制

张勤伟，赵川，孙凤，金俊杰，徐方超
（沈阳工业大学 机械工程学院，辽宁 沈阳 110870）

1 引言

磁轴承技术因其转速高、可主动控制、无接触摩擦及寿命长等优点，已广泛应用于航空航天和工业控制等领域。工业中常用的磁轴承主要用于支撑旋转轴，典型装置包括磁悬浮电机、磁悬浮分子泵、磁悬浮压缩机等涡轮机械。然而，磁轴承本身具有负刚度特性，导致系统存在固有不稳定性；同时，磁轴承系统易受参数摄动和外部扰动影响，使转子偏离平衡位置。为了控制转子位置，必须主动调节线圈电流以产生所需的电磁力。为此，本文提出一种基于状态观测器反步控制策略，以提高主动磁轴承支承转子系统的鲁棒性。

2 扩张状态观测器设计

考虑一个二阶非线性单输入单输出系统为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, t, w(t)) + bu \\ y = x_1 \end{cases}$$

为了估计系统状态，使用以下输入为 u 和 y 的线性 ESO:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_1 = \hat{x}_2 + l_1(x - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{z}}_2 = \hat{x}_3 + b_0 u + l_2(x - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{z}}_3 = l_3(x - \hat{x}_1) \end{cases}$$

式中，z 为状态向量的跟踪量，包括 z_1 跟踪 x_1，z_2 跟踪 x_2，z_3 跟踪 x_3。

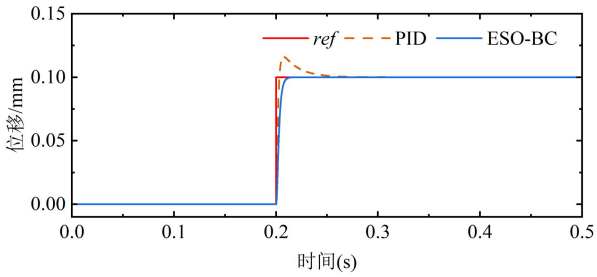
极点位置进行配置可得：

$$[l_1 \quad l_2 \quad l_3] = [3\omega_0 \quad 3\omega_0^2 \quad \omega_0^3]$$

其中，ω_0 为观测器带宽。这样使得调整参数减少有利于调节。

3 仿真分析

为了验证扩张状态观测器的反步控制（ESO-BC）策略的正确性与可行性，进行仿真验证。以磁轴承转子一端位移响应为例，分析转子位移的阶跃响应如图 1 所示,在 0.2s 时施加 0.1mm 阶跃信号，PID 控制的最大超调量为 15%，ESO-BC 无超调量。此外，PID 控制的响应时间约为 0.06s，ESO-BC 的响应时间约为 0.01s。仿真结果表明，ESO-BC 减小了的超调量和响应时间，提升了系统的动态性能。



1 PID 控制与 ESO-BC 的位移响应

3 实验验证

搭建磁悬浮轴承实验系统，并分析 PID 控制和 ESO-BC 控制策略下磁悬浮轴承系统的起浮实验、升速实验，以及不同策略下转子的轴心轨迹变化。

4 结论

本文介绍磁悬浮轴承实验系统空置状态观测器设计以及与不同控制策略进行仿真分析。结果表明，ESO-BC 策略在磁悬浮驱动器系统的可行性和提高磁轴承系统的鲁棒性。

参考文献（References）：

[1] 吴华春,龙志强,周瑾,等.磁力轴承——过去、现在和未来[J].轴承,2024,(07):1-13.

[2] 王浩,龙志强,丁明强,等.基于改进模型辅助ESO的磁轴承-转子系统自抗扰控制[J]. 轴承,2024,(07):132-137.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFB3410002）

作者简介：张勤伟(2000－)，男，河南省信阳市，博士，主要从事磁悬浮系统及其控制方法的研究；
通信方式：E-mail: zhangqinwei@smail.sut.edu.cn、联系电话:15290298153

文章编号：485-047

基于 BP 神经网络 PID 的涡旋压缩机轨迹控制

史策[1]，于佳乐[1]，孙凤[1,*]，金俊杰[1]，徐方超[1]，柯丽[2]

（1.沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870.；2.沈阳工业大学电气工程学院，沈阳 110870)

1 引言

无油涡旋压缩机在洁净气体供给领域需求迫切，磁悬浮技术为其非接触运行提供了有效路径。永磁随变机构可提升压缩机运行稳定性与密封性能，但其力学特性复杂，需精准分析[1]。工业控制系统常存在大滞后、非线性等问题，传统 PID 控制难以满足高精度要求[2]。模糊神经网络融合控制策略凭借自学习、自适应优势，可有效改善控制性能[3]。

2 BP 神经网络 PID 的研究内容

2.1 结构及工作原理

磁悬浮直驱无油涡旋压缩机的结构如图 1 所示。三组径向电磁铁与衔铁构成差动驱动单元，通过非接触式差动控制，驱动动涡盘实现平动并兼具防自转功能；四组轴向永磁环呈对称分布，形成永磁随变机构，利用磁斥力实现动涡盘的轴向非接触支撑。

a 驱动装置结构　　b 压缩机结构

图 1 磁驱动装置及压缩机结构

2.2 BP 神经网络 PID 设计

采用最小-最大归一化，将原始输入值映射到[0,1]区间

$$x_{norm}=\frac{x_{raw}-x_{min}}{x_{max}-x_{min}} \tag{1}$$

其中，x_{raw}为原始输入值，x_{max},x_{min}分别为输入量在训练数据中的最小值与最大值,x_{norm}为归一化后得到的值。

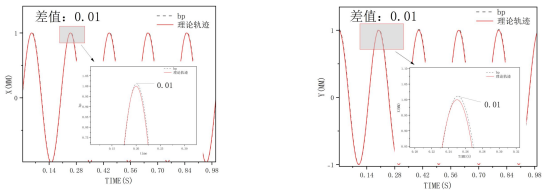
将归一化后得到的x_{norm}输入至训练收敛的神经网络中，神经网络采用 3-6-3 三层前馈结构：输入层 3 个神经元，分别为参考轨迹r_{norm}、实际输出y_{norm}、跟踪误差e_{norm}；隐含层 6 个神经元，激活函数为 tanh 函数；输出层 3 个神经元，直接输出 PID 参数K_p、K_i、K_d。

最后采用逐元素运算将网络输出映射至 PID 参数的实际范围，得到最终控制参数。输出反归一化计算如下：

$$\begin{bmatrix}K_p\\K_i\\K_d\end{bmatrix}=y_{norm}\odot(Y_{max}-Y_{min})+Y_{min} \tag{2}$$

2.3 BP 神经网络 PID 控制器仿真

为验证所提出的神经网络的有效性，在 Simulink 中搭建轨迹跟踪模型。设定动涡盘跟踪一个半径为 1mm、转速为 300r/min 的基准圆形轨迹。对所设计的控制器进行仿真。



a x 方向轨迹跟踪　　b y 方向轨迹跟踪

图 2 轨迹跟踪仿真

3 结　论

本文提出的方法经仿真验证，在 1mm 半径、300r/min 的圆形轨迹跟踪中，实现了动涡盘轨迹的高度吻合，证明了其在精度和平稳性方面的有效性。

参考文献：

[1] 史策，徐方超，孙凤，等。磁力涡旋压缩机永磁随变机构的力学特性 [J]. 西南交通大学学报，2022, 57 (3):597-603

[2] 沈燕妮，张鑫，姚丽青，等. 基于 BP 模糊神经 PID 控制算法的螺栓紧固控制系统研究[J]. 工业控制计算机，2025，38(07)：24-26.

[3] 张印洲. 基于神经网络 PID 控制器的组合式空调机组温度控制方法[J]. 计算技术与自动化，2025，44(02)：80-84.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家自然科学基金面上项目（No.52375258）资助.

作者简介：孙凤(1978－)，男，三级教授，博士，主要从事磁悬浮、机电一体化的研究；通信方式：E-mail:sunfeng@sut.edu.cn、联系电话 18904040100

文章编号：485-048

高转速场景下磁悬浮轴承系统的同频观测算法及其离散化方法研究

雷祖皓[1]，帅逸轩[1]，蒋栋[1]

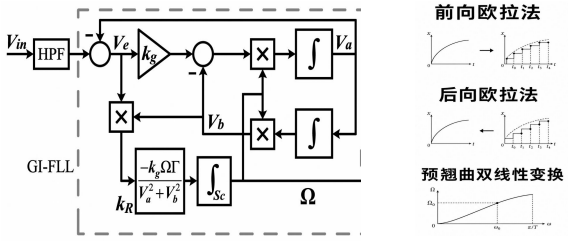
(1.华中科技大学 电气与电子工程学院，湖北省 武汉市 430074)

1 引言

主动式磁悬浮轴承依靠电磁力实现转子非接触支承，具有无磨损、无需润滑和适合高速运行等特点，广泛用于高速电机、飞轮储能等装备[1]。在高转速下，转子不平衡会在位移信号中形成与转速同步的主振成分，频率、幅值和相位反映运行状态。若配置测速传感器，不仅增加硬件成本，也易受到电磁干扰影响。利用位移传感器构造同频观测器，可提取同步分量并估计转速。本文结合二阶广义积分器和锁频环[2]，分析离散实现对观测精度的影响，并引入预翘曲双线性变换提升跟踪性能。

2 同频观测算法原理及离散化实现

2.1 同频观测算法原理

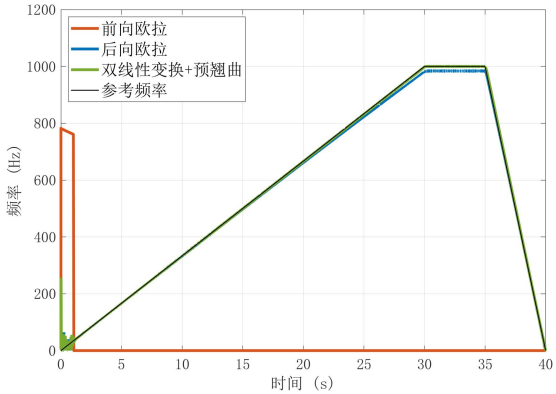


a 同频观测算法　　b 离散化分类

1 同频观测算法原理示意图

图 2(a)为同频观测算法结构。位移信号先经高通滤波，抑制零漂、传感器偏置及低频慢变扰动，再输入二阶广义积分器，提取与转子同步振动对应的同相分量和正交分量。同相分量用于表征主振幅值，正交分量提供相位信息，并与输入误差共同作用于频率锁定环。锁频环实时修正观测角频率，反馈更新积分器参数，从而实现同步分量闭环捕获和转速估计。图 2(b)补充给出离散化分类，包括前向欧拉、后向欧拉和预翘曲双线性变换三种实现，为后文比较不同离散方法在高速跟踪中的精度差异和适用性提供基础。

2.2 不同离散化方法对比



2 三类离散实现下的同频观测算法仿真对比结果

图 2 为三类离散实现的频率跟踪对比。参考频率由低速线性升至一千赫兹，短时保持后降至零。前向欧拉起始阶段误跟踪明显，且未能稳定锁定；后向欧拉可跟随爬升，但高速段存在滞后；预翘曲双线性变换与参考频率几乎重合，可补偿目标频率附近映射误差，更适合高速工况下在线实时观测。

3 结　论

本文针对高转速磁悬浮轴承位移信号中的同频观测问题，建立了高通预处理、二阶广义积分器和频率锁定环相结合的测速方法。对比表明，前向欧拉高速误差较大，后向欧拉响应偏慢，预翘曲双线性变换性能较均衡且改善频率匹配，适合嵌入实时控制程序，具备推广应用价值。

参考文献（References）：

[1] 张维煜，朱焜秋，袁野. 磁悬浮轴承应用发展及关键技术综述[J]. 电工技术学报：2015,30(12):12-20.

[2] 杨才伟，王健，游小杰，王琛琛，詹哲军. 二阶广义积分器锁频环数字实现准确性对比[J]. 电工技术学报：2019,34(12):2584-2596.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家自然科学基金 52477189

作者简介：雷祖皓(2004-)，男，湖南邵阳，本科生，学士，主要从事磁悬浮轴承控制的研究；通信方式：E-mail: ohleizu@163.com、联系电话：19330905523

文章编号：485-049

基于辅助槽调制函数的无轴承磁通切换电机多目标优化方法

郑皓元[1]、陈垚[1、2]、禹春敏[2]
（1 集美大学 轮机工程学院，福建省 厦门市 361000；2、数字能源福建省高校重点实验室（福州大学） 350000）

1 引言

无轴承磁通切换永磁电机（Bearingless Flux Switching Permanent Magnet Motor，BFSPMM）兼具无轴承电机无摩擦、低噪声及磁通切换电机高功率密度、高机械强度等优势[1]。但现有 BFSPMM 悬浮力不足、转矩脉动较大以及电磁耦合等问题严重，限制其在船舶与海洋工程领域的进一步应用。

BFSPMM 是典型的磁场调制电机[2]。本文基于磁场调制理论建立气隙磁场解析模型，推导辅助槽调制函数；以优化转矩表现、悬浮力增强及转矩脉动降低为目标，对电机关键结构参数进行多目标优化，并通过有限元分析验证所提方法的有效性。

2 电机结构和设计方案

2.1 电机结构和磁场调制模型

本文通过在定转子齿部设置辅助槽，提出一种辅助槽调制的 BFSPMM 结构，如图 1 所示。

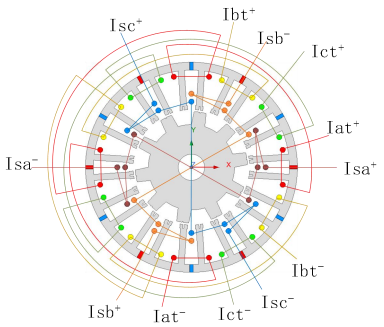


图 1 改进的双绕组 BFSPMM 示意图

基于磁场调制理论，定转子齿槽结构对气隙磁场产生空间调制作用，推导包含定子辅助槽位置、槽宽、槽深的调制函数 $M_{s_r_slot}$，并构建参数化电磁转矩和悬浮力模型。

2.2 多目标优化

基于具有辅助槽调制函数的 BFSPMM 磁场调制模型，采用 NSGA-II 算法对优化变量进行寻优，通过种群迭代获得 Pareto 最优解集。

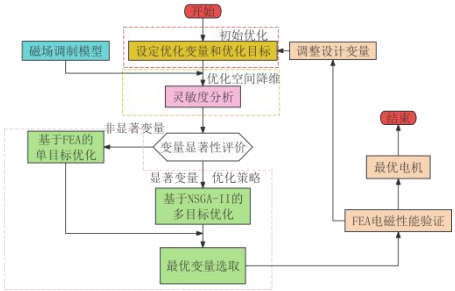


图 2 优化设计流程图

3 结 论

本文提出基于辅助槽的磁场调制模型和多目标优化的无轴承磁通切换永磁电机设计方法。构建气隙磁场解析模型；基于 NSGA-II 对关键结构参数寻优设计，保证转矩输出不变时，降低转矩脉动 51.14%，提升悬浮力控制比 48.23%，减小轴长 14.81%。

参考文献（References）：

[1]梁彤伟,周扬忠,孙康阳.转子五自由度磁悬浮的高承载力无轴承磁通切换电机多目标优化设计[J].电机与控制学报,2025,29(09):93-105.

[2]程明,文宏辉,花为,等.电机气隙磁场调制统一理论及其典型应用[J].中国电机工程学报,2021,41(24):8261-8283

收稿日期：2026 年 05 月 26 日.

基金项目：数字能源福建省高校重点实验室（福州大学）开放基金（KLEDFZU-2026-04）、福建省自然科学基金面上项目（2024J01710）.

作者简介：郑皓元(2002.1－)，男，江苏省邳州市，硕士研究生，主要从事无轴承电机的研究；通信方式：zhenghy@jmu.edu.cn

文章编号： 485-050

基于多信息融合的磁悬浮轴承开关器件开路故障容错控制策略研究

陆志杰[1]，周扬[1]，凌阳熠[1]，周瑾[1]
(1.南京航空航天大学 机电学院，江苏省 南京市 邮编 210016)

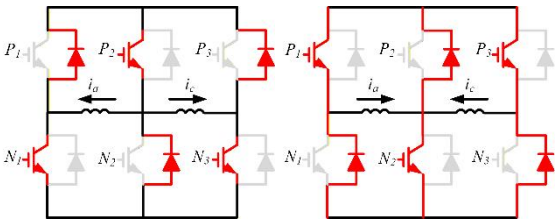
1 引言

功率放大器是磁悬浮轴承电流闭环控制的关键执行单元，其开关器件在高频工作条件下易发生开路故障，进而影响转子稳定悬浮。针对该问题，本文针对三相全桥拓扑结构，建立了正常模式与冗余模式的容错控制框架，并提出了多信息融合的开路故障检测方法，实现了故障发生后的快速识别、冗余切换与系统稳定恢复。该方法可在任一个开关管发生开路故障时实现故障快速识别、冗余模式切换与系统稳定恢复，可为磁悬浮轴承连续可靠稳定运行提供了一种可行的技术方案。

2 开路故障容错控制方法

2.1 三相全桥容错控制策略

通过驱动控制算法重构，三相全桥可实现正常和冗余模式的冗余切换。正常模式下，图 1(a)中红色标注的开关管驱动，为三相半桥 b-t-b 结构，绕组电流由中间桥臂向两侧流出；冗余模式下，图 1(b)中红色标注的开关管驱动，为三相半桥 t-b-t 结构，绕组电流由两侧流入中间桥臂。两种模式下电流方向相反，对参考电流反向处理，保证控制效果一致。其中，开关 00、01/10 和 11 分别实现电流下降、保持和上升，两种模式具备相同完整的调节能力。



(a)正常模式　　(b)冗余模式

图 1 三相全桥拓扑工作模式

2.2 多信息融合故障检测方法

多信息融合故障检测方法选取电流跟踪残差、电流变化趋势、总电流及位移偏差为敏感特征对开路故障进行表征。采用“主判据触发-辅助判据确认”的逻辑融合方式构造模式切换条件。

$$F_{sw}(k)=F_r(k)\wedge(F_{\Delta i}(k)\vee F_{\Sigma}(k)\vee F_x(k))$$

2.3 仿真验证

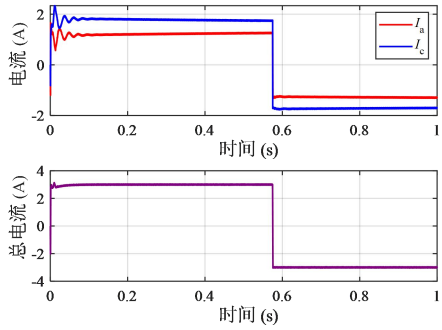


图 1 电流

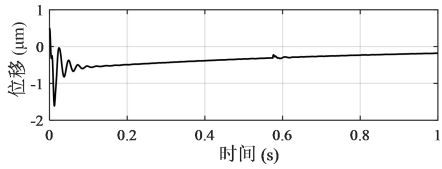


图 2 位移

3 结论

针对功率放大器开关管开路故障，本文建立了三相全桥冗余拓扑及其容错控制方法，提出了多信息融合的故障检测方法。研究表明，发生开路故障时，系统能够快速识别故障并切换至冗余工作模式，并维持转子稳定悬浮。该方法为提高磁悬浮轴承稳定运行提供了一种可行技术方案。

参考文献（References）：

[1] Jiang D, Li T, Hu Z, et al. Novel topologies of power electronics converter as active magnetic bearing drive[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2019, 67(2): 950-959.

[2]张鑫，吴华春，谭书培. 磁轴承半桥功放开关器件容错机制及拓扑重构[J]. 轴承, 2025, (8): 112-119.

收稿日期： 2026 年 05 月 26 日.

基金项目： 国家重点研发计划（2024YFB3410004）.

作者简介： 陆志杰(1998－)，男，籍贯(江苏、泰州市/海陵区)，博士研究生，主要从事磁悬浮轴承的研究；通信方式：luzhijie@nuaa.edu.cn

文章编号：485–052

磁轴承自抗扰与迭代学习复合振动控制

徐铖[1]，赵丹[1]，崔进[1]，齐金明[1]，李帅[1]
（1. 哈尔滨工程大学 机电工程学院，黑龙江省 哈尔滨市 150001）

1 引　言

高速旋转机械因转子质量不平衡会产生与转速同频的周期性扰动，危害系统的安全稳定运行。主动磁悬浮轴承具有主动振动控制的优势，其目前采用的线性自抗扰控制（LADRC）虽能有效观测并实时补偿系统内外总扰动，但对特定的高频周期扰动缺乏无差跟踪机制[1]。为此，本文提出一种结合迭代学习控制（ILC）与 LADRC 的复合控制策略，LADRC 用于保证系统的动态响应并抑制非周期总扰动，ILC 用于精确补偿转子的周期性振动。

2 复合控制策略设计

所提出的复合控制策略原理如图 1 所示。

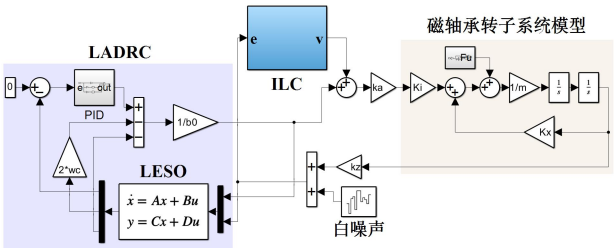


图 1 磁轴承 ILC+LADRC 复合控制策略结构图

其中，LADRC 部分构建如下线性扩张状态观测器（LESO），以实时估计并补偿总扰动：

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}(z_1 - y) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}(z_1 - y) + \dfrac{k_{xz}}{m} z_1 + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}(z_1 - y) \end{cases} \tag{1}$$

式中，y 为转子位移；z_1、z_2、z_3 分别为位移、速度和总扰动的估计值；β_{01}~β_{03} 为观测器增益；$(k_{xz}/m)z_1$ 为引入的固有悬浮刚度分量，以减轻观测器负担。

ILC 引入包含前序信息的离散学习率[2]：

$$v_k(n) = 0.98 v_{k-1}(n) + e_{k-1}(n) \tag{2}$$

3 仿真验证与分析

设定磁轴承转子系统运行转速为 12000 rpm。进行三种控制策略的仿真对比，仿真结果如图 2 所示：0~0.5 s 采用 PID 控制，0.5~ 1.0 s 采用 LADRC 控制，1.0~ 1.5 s 采用 ILC+LADRC 控制，转子振动幅值分别约为 2.3μm、1.1μm、0.35μm。可见，ILC+LADRC 控制策略精确补偿了同频不平衡力，径向跳动振幅发生显著衰减。

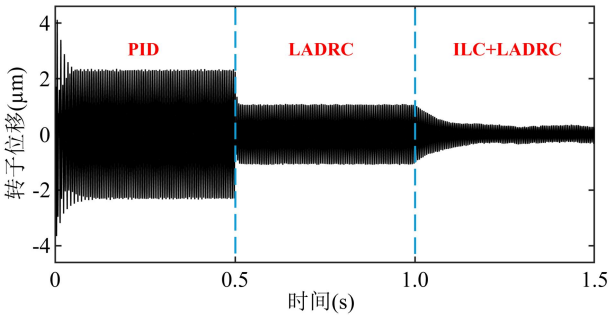


图 2 三种控制策略振动抑制效果对比

4 结　论

本文提出的 ILC+LADRC 复合控制策略有效结合了 LADRC 抗非周期随机干扰力强与 ILC 对周期信号无差跟踪的优势，能显著抑制高速磁悬浮转子的径向同频振动。

参考文献（References）：

[1] Guo B, Bacha S, Alamir M, et al. Generalized Integrator-Extended State Observer With Applications to Grid-Connected Converters in the Presence of Disturbances[J].IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020, 29(2):744-755.

[2] Hui G, Longxiang X, Yili Z. Unbalance Vibratory Displacement Compensation for Active Magnetic Bearings[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26 (1): 95-103.

收稿日期：2026 年 05 月 29 日.

基金项目：国家自然科学基金面上项目（52275098）；国家自然科学基金面上项目（51675111）.

作者简介：徐铖（1995 – ），男，重庆市，讲师，博士，主要从事磁悬浮控制技术、机械振动控制的研究；通信方式：chengxu@hrbeu.edu.cn

文章编号：485-053

电磁轴承软开关三电平开关功率放大器的研究

周民主[1]，陈亮亮[1]，靳晓光[1]，
（1 南昌航空大学 信息工程学院，江西省 南昌市 330063。）

1 引言

主动电磁轴承通过调节励磁线圈电流产生可控电磁力，实现转子非接触悬浮，其功率放大器的动态响应速度、输出电流纹波和运行效率直接影响系统的悬浮精度与稳定性。传统两电平 PWM 硬开关功率放大器虽然结构简单、控制成熟，但在高母线电压和较高开关频率条件下，容易产生较大的线圈电流纹波和开关损耗，进而增加电磁噪声、器件温升和系统能量损耗。针对上述问题，本文开展电磁轴承软开关三电平开关功率放大器研究，旨在兼顾低电流纹波、高动态响应和高效率运行。

2 系统组成

在传统半桥功放的基础上引入三电平 PWM 调制方法。通过使功率电路在充电、续流和放电三种状态之间切换，三电平功放能够在保持较高电流响应速度的同时，降低电感线圈两端电压变化率，从而减小稳态电流纹波。进一步结合并联谐振直流环节软开关思想，设计适用于三电平功率放大器的辅助谐振网络。通过辅助开关、谐振电感和谐振电容的协调工作，在主开关管换流前构造母线零电压凹槽，使主功率开关管在零电压条件下完成状态切换，从而减小开关过程中电压与电流的重叠区域，降低开关损耗和电磁干扰。功放传递函数表达式和控制原理图如下：

$$\frac{I_L(s)}{U_{ref}(s)}=\frac{(K_p s+K_i)V_{in}}{ALs^2+(\lambda K_p V_{in}+AR)s+\lambda K_i V_{in}} \quad (1)$$

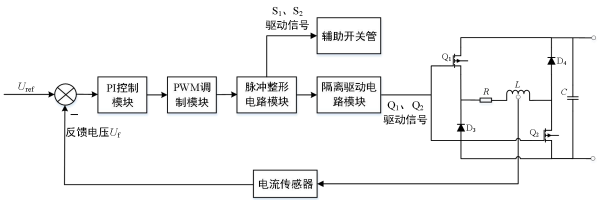


图 1 三电平电磁轴承控制原理图

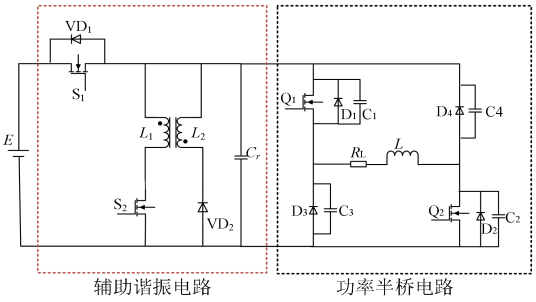


图 2 软开关电磁轴承控制原理图

$$\frac{I_L(s)}{U_{ref}(s)}=\frac{(K_p s+K_i)V_{in}}{ALs^2+(\lambda K_p V_{in}+AR)s+\lambda K_i V_{in}} \quad (1)$$

3 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中针对三电平软开关功率放大器输出纹波进行仿真分析，结果如下图 3 所示

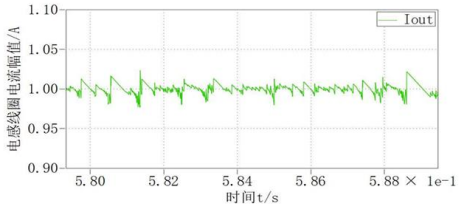


图 3 三电平软开关功率放大器输出纹波

三电平软开关功率放大器的输出纹波在母线电压 48V，50Khz 的条件下输出纹波为 80mv

4 结论

本文通过将三电平控制和软开关结合的主动电磁轴承功率放大器系统，合理设置 PI 控制器参数，实现减小电磁轴承线圈稳态电流纹波并提高系统动态响应，提高系统效率。

参考文献（References）：

[1] 贺西，何亚屏，李嘉. 磁悬浮轴承开关功率放大器及其电流控制策略优化研究[J]. 控制与信息技术, 2021, 470(02): 41-48.

[2] 余忠磊，祝长生. 二电平电流型开关功率放大器稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(2): 306-315.

收稿日期：2026 年 05 月 30 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（12062014，51967015）

作者简介：周民主（2000-），男，江西上饶人，硕士研究生，主要从事电磁轴承功率放大器的研究；通信方式：.2986349386@qq.com

文章编号：485–054

高负载多极独立磁力轴承拓扑及冗余容错研究

徐天宇[1]，吴华春[1,2]，胡业发[1,2]，宋春生[1,2]，江友亮[1,2]
(1.武汉理工大学 机电工程学院，湖北省 武汉市 430070；2.湖北省磁悬浮工程技术研究中心，湖北省 武汉市 430070)

1 引言

磁力轴承具有无摩擦、无磨损、无需润滑和密封、支承特性可调等优点[1]。然而现有磁力轴承在应对复杂工况时，磁极利用率不足限制了其重载能力，且在系统部件突然失效时面临转子完全丧失约束力的风险[2]。因此针对现有差动磁力轴承重载能力受限、磁极利用不充分、可靠性低等问题，本文将构建高负载多极独立磁力轴承拓扑并对其冗余特性进行研究，能够有效克服现有结构的局限性。

2 研究内容

2.1 多极独立磁力轴承拓扑及控制策略

如图 1 所示，多极独立磁力轴承通过对各磁极的极柱宽度和绕组线圈匝数的差异化设置，以适配其在非均匀下的载荷分布。此外根据高负载受力需求，仅在定向控制力方向的±90°扇区内选择有效独立磁极合成所需控制力以减少非必要的磁极导通，且出现磁极故障的情况下通过重构剩余健康磁极实现最优电流配置，维持转子的力学平衡状态。

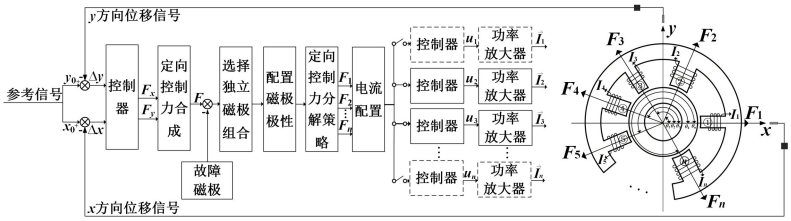


图 1 多极独立磁力轴承拓扑结构及控制策略

2.2 磁极故障冗余容错分析

如图 2 所示，当磁极未发生故障时，将有效扇区内的独立磁极进行组合并配置极性形成有效工作磁路，并通过电流配置以输出最大控制力。

如图 3 所示，通过对各独立磁极的实时电流监测，当面临磁极突发故障时，控制系统能够及时去除故障磁极，在有效工作区间内重新选择剩余健康独立磁极进行组合以形成有效工作磁路并获取最优励磁电流配置矩阵。通过以各独立磁极为单位配置的控制器输入控制信号至功率放大器输出正向或负向控制电流，调节各独立磁极电磁力，使合成的电磁力矢量完全替代故障前的控制力，实现转子在故障状态下的高可靠稳定悬浮。

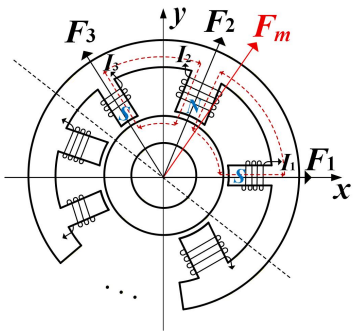


图 2 磁极未故障时的磁极组合及其有效工作磁路图

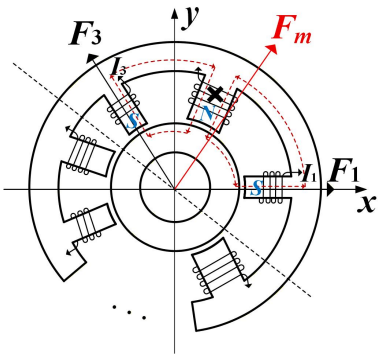


图 3 磁极故障时的磁极组合及其有效工作磁路图

3 结 论

本文所提出的多极独立磁力轴承拓扑结构及控制策略，在出现部分磁极失效时能够快速有效地进行冗余重构，可显著提升系统在面向高负载工况下的运行可靠性。

参考文献（References）：

[1] Yang G, Shi Z, Mo N, et al. Research on active magnetic bearing applied in Chinese modular high-temperature gas-cooled reactor[J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 77: 352-360.

[2] Cheng B, Cheng X, Song S, et al. Fault-tolerant control of magnetically-levitated rotor with redundant structures based on improved generalized linearized EMFs model[J]. Sensors, 2021, 21(16): 5404.

收稿日期：2026 年 05 月 31 日.

基金项目：国家重点研发计划：节能型多极独立高冗余磁轴承结构设计与磁滞损耗机理研究（2024YFB3410001）.

作者简介：徐天宇(2002－)，男，湖北省武汉市，硕士研究生，主要从事磁悬浮轴承技术研究；

通信方式：E-mail: 361168@whut.edu.cn 联系电话：18271821823

文章编号：485–055

多对极径向磁轴承拓扑设计及控制策略研究

廖振华[1]，吴华春[1,2]，胡业发[1,2]，宋春生[1,2]，江友亮[1,2]

(1.武汉理工大学 机电工程学院，湖北省 武汉市 430070；2.湖北省磁悬浮工程技术研究中心，湖北省 武汉市 430070)

1 引言

磁轴承能够无摩擦运行、增强运行可靠性，在高速、洁净、低功耗、低振动等应用场景具有机械轴承无法比拟的优势[1,2]。在面对不同应用场景，磁轴承承载力的要求也不同，然而磁轴承的设计需要耗费大量时间、成本以及机械和电气工程方面的专业知识，因此优化紧凑、高效、低功耗、可靠的磁轴承系统成为了该领域的一个关键研究重点。本文基于多对极径向磁轴承工作原理，提出了一种通用化多对极径向磁轴承的拓扑设计方法，旨在适配不同载荷需求；建立位置定向控制策略，在消除干扰力的条件下实现最佳承载能力。

2 研究内容

2.1 多对极径向磁轴承工作原理

如图 1 所示，对当前时刻满足以下任一条件的磁对极不予励磁：（1）当前时刻气隙变化量小于 0；（2）位置处于当前时刻转子偏移的垂直方向。以此达到同时降低磁滞损耗、涡流损耗与铜损耗的目的。

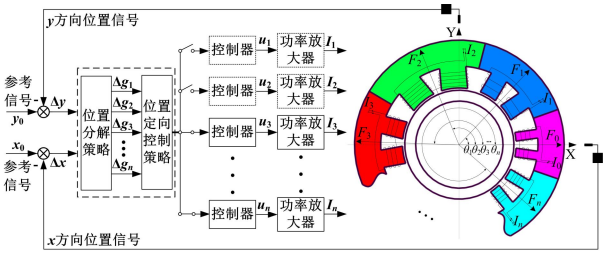


图 1 多对极径向磁轴承工作原理

2.2 通用化多对极径向磁轴承拓扑设计

如图 2 所示，通过网格搜索法优化多维拓扑参数，实现各磁对极的非均匀布局、差异化极柱宽度与绕组线圈匝数，从而满足不同载荷需求。

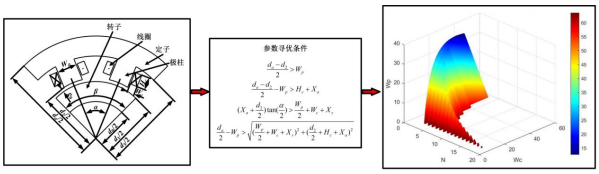


图 2 多对极径向磁轴承拓扑设计

2.3 位置定向控制策略研究

分析承载力垂直方向的干扰力，构建线性规培优化模型，以消除各方向上干扰力为目的，获得初步励磁矩阵，再以承载力最大化为目标，优化励磁分配策略，如图 3 所示。

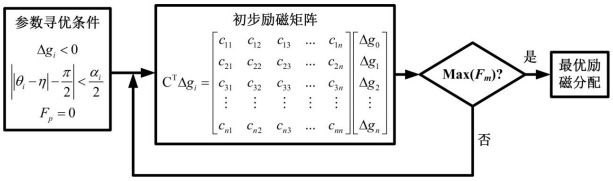


图 3 位置定向控制策略流程图

3 结 论

本文提出的多对极径向磁轴承拓扑设计及控制策略，通过多维参数空间网格寻优，通用化拓扑设计流程，构建了位置定向控制策略以保障最佳承载能力，为高端装备的磁悬浮支撑系统提供了理论技术支撑，具备良好工程应用价值。

参考文献（References）：

[1] 吴华春，龙志强，周瑾，等.磁力轴承——过去、现在和未来[J].轴承，2024，(07)：1-13.

[2] Zhang P, Feng Y, Wen P, et al. Structure design, analysis, and optimization of 12-pole radial magnetic bearing[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2025, 17(6)：16878132251344675.

收稿日期：2026 年 05 月 31 日.

基金项目：节能型多极独立高冗余磁轴承结构设计与磁滞损耗机理研究（2024YFB3410001）.

作者简介：廖振华(1999－)，男，重庆市铜梁区，博士，主要从事磁悬浮轴承、振动控制的研究；通信方式：E-mail:jasticpin@whut.edu.cn、联系电话:15671597858

文章编号：485-056

多极独立磁轴承功放拓扑及其控制策略研究

毛琳博[1]，吴华春[1,2]，文湘隆[1,2]，胡业发[1,2]，宋春生[1,2]
(1.武汉理工大学 机电工程学院，湖北省 武汉市 430070；2.湖北省磁悬浮工程技术研究中心，湖北省 武汉市 430070)

1 引言

多极独立磁轴承将定子划分为多个物理与磁路独立的磁极单元，大幅提升了系统的容错率与运行可靠性，在高性能旋转机械领域具有显著优势[1]。但多极独立驱动导致功率放大器通道数量随磁极对数呈线性激增，庞大的高频开关器件数量引发了严重的散热难题与极高的制造成本[2]。针对上述问题，本文提出一种新型共桥臂功放拓扑结构及与力定向控制协同的控制策略，在大幅削减开关器件数量的同时，解决电流应力集中与磁极间的交叉耦合问题。

2 研究内容

2.1 多极独立磁轴承功放拓扑

为突破硬件瓶颈，本文提出面向多极独立驱动的 N+1 结构共桥臂功率放大器拓扑。该拓扑复用一个公共桥臂作为所有负载的回流路径，将开关器件总数从 4N 削减至 2(N+1)。为了最大程度地优化了公共桥臂的电流应力，在拓扑硬件接线上进行了一项关键重构：相邻磁极极性反向配置。在物理连接层，将相邻两个磁极线圈在接入桥臂时的电流参考正方向交替对调，如图 1 所示，大幅削减了硬件成本并减小电流应力集中。

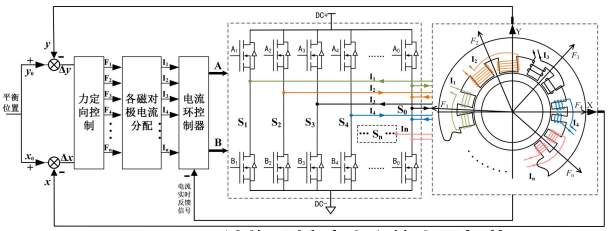


图 1 N+1 结构共桥臂功率放大器拓扑图

2.2 控制策略分析

为实现各磁极的独立控制并实现电磁力的精准分配，本文引入了一种基于极坐标解算与广义逆矩阵分配的力定向控制策略，根据位移偏差计算并合成定向控制力，采用单边激活策略，同时根据转子的偏移状态，获取各工作磁极所需的电磁力大小，如图 2 所示。然后再通过定向控制力矢量分解得到各磁极所需电磁力，结合各磁极的结构参数得到工作所需电流大小与对应一个开关周期内负载桥臂的功率器件占空比，如公式 1 所示，对各个磁极的电流进行精确地控制。

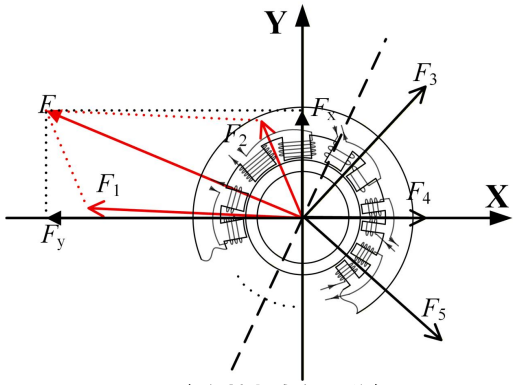


图 2 定向控制力矢量分解图

$$\begin{cases} L\dfrac{di(t)}{dt}+Ri(t)+2U_{on}=DU_d \\ L\dfrac{di(t)}{dt}+Ri(t)+2U_{on}=(1-D)U_d \end{cases} \tag{1}$$

3 结论

研究结果表明，通过 N+1 共桥臂拓扑结构优化，系统开关器件总数缩减了近 50%，且有效抑制了公共桥臂的电流热应力集中；可以有效消除磁极间的交叉耦合损耗。

参考文献（References）：

[1] 吴华春，龙志强，周瑾，等.磁力轴承——过去、现在和未来[J].轴承，2024，(07)：1-13.
[2] 刘程子,贾丽焱,杨艳,等.一种具有容错功能的多桥臂开关功放电路[J].中国电机工程学报,2024,44(20):8279-8291.

收稿日期：2026 年 05 月 31 日.
基金项目：节能型多极独立高冗余磁轴承结构设计与磁滞损耗机理研究(2024YFB3410001)
作者简介：毛琳博(2002－)，男，河南南阳，硕士研究生，主要从事磁悬浮轴承结构与控制研究；
通信方式：E-mail:514377168@qq.com

文章编号：485-057

人工肾脏泵用磁悬浮轴承的抗扰动控制研究

张彬[1]，孙凤[1]，金俊杰[1]，张晓友[1,2]，刘展朋[1]，徐程程[1]，
(1.沈阳工业大学 机械工程学院，辽宁省 沈阳市 110870；2.日本工业大学 机械工学院，日本 埼玉 345-8501)

1 引言

终末期肾病患者增多[1]，便携式与植入式人工肾成为重要发展方向。人工肾脏泵转子需在血液中高速旋转，传统轴承易引发溶血、血栓和磨损。磁悬浮轴承可实现无接触支撑，提高可靠性[2]。但流体扰动可能导致转子波动与失稳。本文围绕其抗扰动控制开展研究。

2 磁悬浮轴承抗扰动控制

2.1 人工肾脏泵的结构及工作原理

图 1 为磁悬浮人工肾总体结构。该泵由定子、转子和流体腔组成，采用单自由度磁悬浮离心结构。定子线圈用于转子驱动和轴向悬浮控制。工作时，血液从顶部进入，在高速旋转产生的离心力作用下分离，红细胞由切向出口排出，血浆及废液由底部流出，从而降低摩擦、溶血和血栓风险。

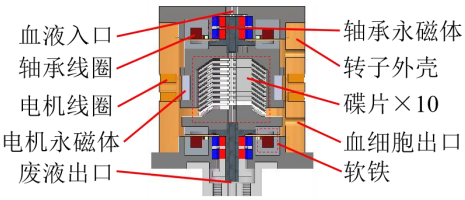


图 1 磁悬浮人工肾泵剖面图

2.2 H∞鲁棒控制器设计及实验验证

图 2 为混合灵敏度 H∞控制器的系统框图。

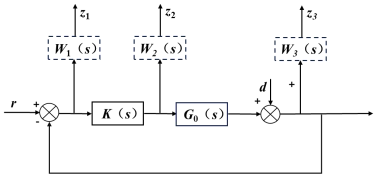
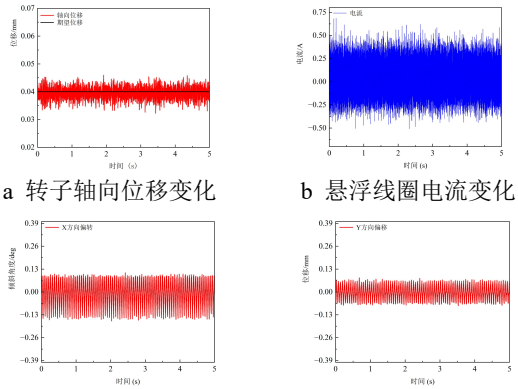


图 2 混合灵敏度 H∞控制框图

图三为 2500r/min 空载状态下抗扰动实验结果。通液后轴向位移波动约 11.15μm，线圈电流稳定在-0.5~0.625A。较空载仅增加 4.2%，说明 H∞控制器能有效抑制流体扰动；径向偏转和偏移虽增加，但仍处于安全范围。



a 转子轴向位移变化　　b 悬浮线圈电流变化

c 转子在 X 方向偏转变化　　d 转子在 Y 方向偏移变化

图 3 转子的旋转抗扰实验

3 结论

结果表明，所设计的 H∞鲁棒控制器可在通液工况下保持转子高精度稳定悬浮，验证了控制方法的有效性。

参考文献（References）：

[1] KARAGEORGOS F F, NEIROS S, KARAKASI K E, et al. Artificial kidney: challenges and opportunities[J]. World Journal of Transplantation, 2024, 14(1): 89025.

[2] DUTTA D, BISWAS P K, DEBNATH S, et al. Advancements and challenges in active magnetic bearings: a comprehensive review of performance, control, and future prospects[J]. IEEE Access, 2024, 13: 3051-3071.

收稿日期：2026 年 06 月 05 日.

基金项目：国家重点研发计划（2024YFB3410002），国家自然基金项目（52375258，52405284），辽宁省科技厅项目（2023-BSBA-263），辽宁省教育厅项目（JYTMS20231191， LJ222410142008，LJ212410142015），中国博士后科学基金（2024M762160）资助。

作者简介：张彬(2000)，男，辽宁省沈阳市，硕士，主要从事磁悬浮肾脏泵的研究；
通信方式：E-mail:691727022@qq.com、联系电话：18802465306

文章编号： 485-058

空压机应用混合式磁悬浮轴承可行性分析

陈艳霞[1,2]，魏志韬[1,2]

(1. 珠海格力电器股份有限公司，广东 珠海 519070；2. 广东省高速节能电机系统企业重点实验室，广东 珠海 519070)

1 引言

随着磁悬浮空压机、鼓风机应用领域拓展，高温空气环境下的轴承可靠性成为关键问题。如果高温影响了高速旋转的转子受到的磁轴承承载力，会导致控制稳定性[1]降低甚至失稳停机保护，存在产品失效的安全隐患。本文假定定子铁芯等部件耐热的条件下，对混合式磁轴承中磁钢等核心零部件进行分析，评估其在高温环境下的安全性。

2 分　析

2.1 混合式磁轴承结构对比

本文分析的混合式磁轴承为三自由度结构，磁钢作为偏置磁场源头，其性能受温度影响最大，故为主要分析对象。

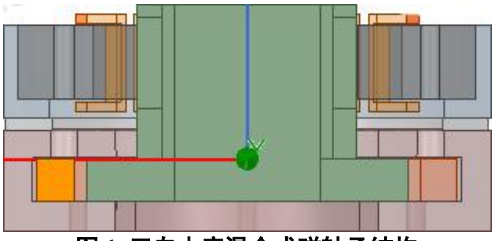


图 1 三自由度混合式磁轴承结构

2.2 磁钢性能分析

磁钢产生不可逆退磁的因素主要是高温、强反向磁场以及环境腐蚀三个方面，磁悬浮轴承使用环境无强反向磁场存在，因此主要针对高温、环境腐蚀进行分析。

钕铁硼磁钢易锈蚀，采用厚度≥15μm 的镍铜镍复合镀层，经 PCT 试验验证可有效防止基体腐蚀[2]。磁钢不可逆退主要由高温和反向磁场引起。

依据 GB/T 13560-2017，对 38UH 磁钢进行加热冷却实验。结果显示，在 160℃及以下温度保温 2h 后冷却，磁通量不可逆损失率均小于 5%，符合国标要求；而在 170℃及以上时，损失率超标。因此，确定磁钢最高安全工作温度为 160℃，高于现有设备要求的 150℃，满足使用需求。

2.3 高温承载力仿真分析

考虑 150℃时磁钢剩磁衰减约 13%：磁钢矫顽力 Hc 参数分别为 12.23kOe（常温）/10.6kOe（150℃高温磁性能降低 13%），磁钢剩余磁感应强度 Br 从 1.22T 降低至 1.06T。对轴承进行电磁仿真。

(1) 径向承载力：常温气隙磁感应强度约 0.77T，150℃时降至 0.67T，径向出力降低约 6%。

(2) 轴向承载力：常温气隙磁感应强度 0.55/0.5T，150℃下约 0.485/0.45T，出力降低约 15%。

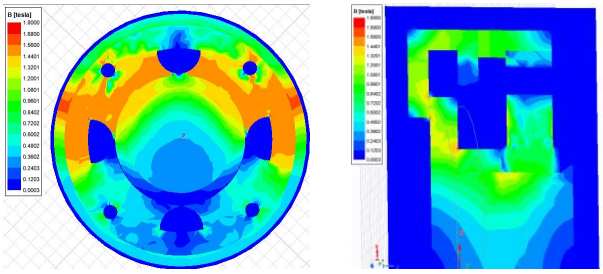


图 2 混合式磁轴承在 150℃下磁密分布

3 结　论

(1) 在闭合回路中，磁钢工作点 H 偏小 B 偏大，退磁曲线中更靠近饱和点更不易发生退磁。

(2) 38UH 磁钢在闭合回路中抗退磁能力强，160℃以下热态磁通损失满足国标，可用于 150℃环境。

(3) 150℃高温下，径向出力降低约 6%，轴向出力降低约 15%。

(4) 鉴于混合式轴承实际工作电流≤1A，通过提高电流 0.1-0.2A 即可补偿出力损失，满足控制器稳定要求。

综上理论分析，验证 150℃混合式磁轴承结构可满足空压机的使用需求。但高温情况下混合式磁轴承与控制器实际运行情况能否满足要求还需进行动态验证。

参考文献（References）：

[1] 胡业发,等.磁力轴承的基础理论与应用[M].第一版.北京：机械工业出版社，2006.

[2] 刘朝晖,刘丽华,关玉,等.烧结 NdFeB 磁钢表面层抗腐蚀实验分析[J].微特电机,2010,38(4):39-41+72.

收稿日期： 2026 年 06 月 10 日.

作者简介： 陈艳霞(1997-)，女，湖北省荆州市，初级电气工程师，学士学位，主要从事磁悬浮轴承的研究。

通信方式：2393564812@qq.com

文章编号：485–059

磁悬浮轴承不对称偏置电流分配策略

武毅东，赵川，孙凤，张勤伟
（沈阳工业大学 机械工程学院，辽宁 沈阳 110870）

1 引言

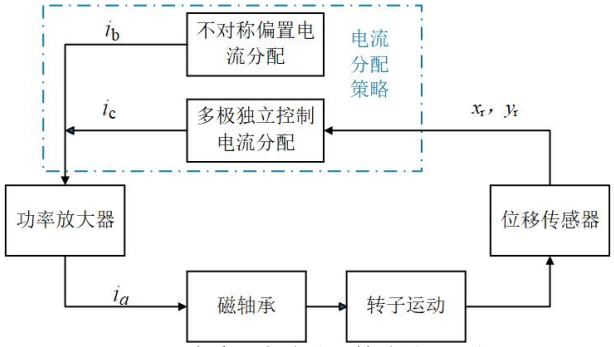
磁轴承技术因其转速高、可主动控制、无接触摩擦及寿命长等优点，已广泛应用于航空航天和工业控制等领域。工业中常用的磁轴承主要用于支撑旋转轴，典型装置包括磁悬浮电机、磁悬浮分子泵、磁悬浮压缩机等涡轮机械。由于磁悬浮轴承具有开环不稳定性，工业上常引入定常偏置电流，以差动方式对磁悬浮轴承-转子系统进行控制。这种线性近似方法忽略了非线性轴承力高次项，定常偏置电流的引入还会增加系统的损耗，造成线圈发热，增加了系统额外的功耗。为此，本文提出一种不对称偏置电流分配策略，以减少主动磁轴承转子系统的功耗。

2 不对称偏置电流分配策略

常规差动定偏置策略为两个相对的电磁铁构成一对差动电磁铁，偏置电流都设置为固定的 I_0，控制电流关于偏置电流 I_0 对称变化。偏置电流 I_0 的引入便于线性化控制，为轴承提供刚度，但也由此造成额外的功耗。

不对称偏置电流分配策略的思想为考虑转子重力 G 进行电流分配，使得两个相对的电磁铁上下磁极初始偏置电流不同，通过独立控制提升系统的工作稳定性。此时各个磁极上的偏置电流 I_{b1} 到 I_{bn} 不同，即保留了偏置电流便于线性化和提供系统静态刚度的优点，同时，各磁极上的偏置电流所提供的电磁力值之和等于重力，保证转子在中心点附近的稳定悬浮，还减小了偏置电流，降低了系统的功耗。

磁轴承系统控制框架可以写成如图 1 的框图形式，其中电流的分配由偏置电流分配策略和磁轴承控制电流分配控制策略组成。然后将电流分配方法与功率放大器模型、磁轴承模型、转子运动方程、位移传感器模型相结合，建立系统的闭环被控对象模型，以保证系统的稳定性和抗干扰性。



1 不对称偏置电流分配策略控制框架

3 仿真分析与实验验证

为了验证不对称偏置电流分配策略的正确性与可行性，进行仿真验证。并搭建磁悬浮轴承实验系统，分析不对称偏置电流分配策略控制和常规差动偏置控制策略下磁悬浮轴承系统的起浮实验、升速实验，以及不同策略下转子的轴心轨迹变化。

4 结论

本文介绍了磁悬浮轴承系统控制策略，并对不同控制策略进行仿真分析和实验验证。结果表明，不对称偏置电流分配策略在磁悬浮驱动器系统的可行性，能有效降低磁悬浮轴承轴承系统的功耗。

参考文献（References）：

[1] 吴华春,龙志强,周瑾,等.磁力轴承——过去、现在和未来[J].轴承,2024,(07):1-13.

[2] YAO Y C, REN G X, YU S Y. Time-scale separation control for a class of current distribution strategy in AMBs-rotor system with bounded bus voltage[J].IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(3): 4147-4157.

收稿日期：2026 年 06 月 28 日.

基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFB3410002）

作者简介：武毅东(2000－)，男，山西省长治市，硕士，主要从事磁悬浮轴承系统及其控制方法的研究；
通信方式：E-mail: wuyidong@smail.sut.edu.cn、联系电话:18534594089

文章编号：485-060

基于端口哈密顿神经网络建模的磁轴承 IDA-PBC 控制研究

郭旭瑞[1]，王小虎[1]，迟观涛[1]
(1.西南石油大学 机电工程学院，四川省 成都市 610500)

1 引言

磁轴承系统由于其强非线性及其外部扰动等问题，使得对其系统的建模存在误差，常规控制方法难以保证稳定运行，严重影响悬浮稳定性控制。

端口哈密顿神经网络（PHNN）以哈密顿系统理论为基础构建神经网络模型，能够精准拟合磁悬浮轴承复杂的动力学特征，再结合互联阻尼分配无源控制（IDA-PBC）策略，再依托能量传递与损耗的规律，从能量层面来实现对磁悬浮系统的动态调控。

2 端口哈密顿神经网络建模

由于磁悬浮轴承具有非线性强耦合，多物理变量等因素，传统建模方式依赖理想化假设，难以精准刻画系统真实动态运行特性，模型泛化性与适用性较差。本文融合端口哈密顿物理结构约束与神经网络非线性逼近优势，提出基于端口哈密顿神经网络（PHNN）的建模方法。端口哈密顿系统能够将原系统写成：

$$\frac{d}{dt}x=\left[J-R\right]\nabla_X H\left(x\right)+Bu \qquad (1)$$

3 IDA-PBC 控制

通过端口哈密顿神经网络得到现有不稳定的磁轴承模型，为了使得现有磁轴承系统稳定，我们通过设计闭环系统的哈密顿能量 H_d。该闭环系统是我们期望转子位于平衡位置时的系统能量。

假设该闭环系统也是端口哈密顿系统，则有：

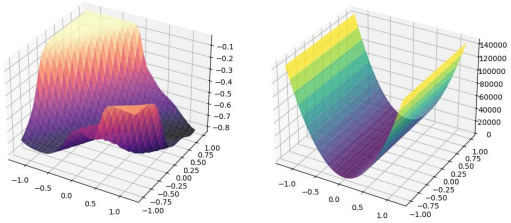
$$\frac{d}{dt}x=\left[J_d-R_d\right]\nabla_x H_d\left(x\right) \qquad (2)$$

我们通过式（1）和式（2），可以得状态反馈控制策略：

$$\begin{cases} u=B^*\left\{E_d\nabla_d\left(x\right)-E\nabla_x H\left(x\right)\right\} \\ B^*=\left(B^T B\right)^{-1}B^T \\ E_d=J_d-R_d \\ E=J-R \end{cases} \qquad (3)$$

通过设置期望哈密顿量，并配置能量及耗散等参数，来实现对磁悬浮轴承的控制。

4 结论



a PHNN 建模　　b 期望模型

图 1 哈密顿系统图

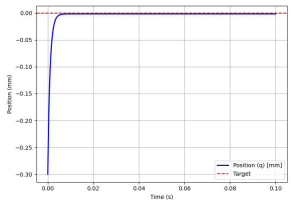


图 2 IDA-PBC 控制结果

仿真结果表明基于 PHNN 的精确模型辨识，结合预设期望模型，设计出的 IDA-PBC 控制器，能够实现磁悬浮轴承在目标区域内的精确控制。

参考文献 (References)：

[1] Greydanus S, Dzamba M, Yosinski J. Hamiltonian Neural Networks[EB/OL]. arXiv preprint arXiv:1906.01563, 2019.

[2] Wu Y ,Zhang K H ,Duan H .State－Hamiltonian Neural Networks for learning dynamical systems[J].Physica D: Nonlinear Phenomena,2025,483134994-134994.

收稿日期：2026 年 06 月 30 日.

基金项目：太行国家实验室研究项目（A2063）.

作者简介：郭旭瑞(2002－)，男，四川省成都市，硕士研究生，主要从事磁悬浮轴承控制的研究；
通信方式：751693545@qq.com；联系电话:13258225328

文章编号：486-061

SiC 功放驱动下磁轴承负载变化的端部过电压自适应抑制方法

李博文[1]，于洁[2]
（青岛大学 电气工程学院 山东省 青岛市 邮编 266071）

1 引言

碳化硅（SiC）开关功率放大器可提高磁悬浮轴承线圈电流的动态响应能力，但其高 d*v*/d*t* 电压脉冲易在“功放—电缆—负载线圈”系统中激发行波反射，引起负载端过电压和振铃。已有驻留电平调制方法可抑制该现象，但负载线圈参数变化会使固定驻留时间偏离最优值。为此，本文提出一种基于负载端电压峰值反馈的自适应抑制方法，在线修正驻留时间，以适应不同负载条件下的过电压抑制需求。

2 负载变化下的自适应抑制

2.1 自适应驻留时间调整方法

在原有驻留电平调制基础上，本文引入负载端电压峰值反馈，对驻留时间 t_d 进行在线修正。定义归一化过电压评价指标为

$$J(k)=\frac{U_{L,peak}(k)}{V_{dc}} \tag{1}$$

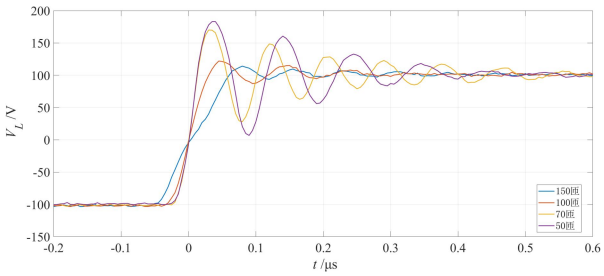
驻留时间更新形式可写为：

$$t_d(k+1)=t_d(k)+\Delta t_d(k) \tag{2}$$

若调整后 $J(k)$减小，则保持当前搜索方向；若 $J(k)$增大，则反向搜索并适当减小步长，从而使驻留时间逐步逼近当前负载条件下的较优值。

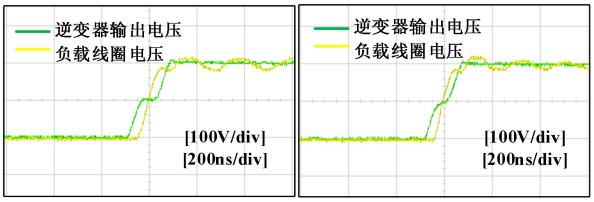
2.2 结果

为引进负载端变化自适应调整方法前，负载发生变化时端部过电压波形如图 1 所示。



1 改进两电平抑制

引入本文自适应抑制方法后，在线修正驻留时间 t_d，抑制后效果如图 2 所示。



a 线圈 100 匝　　b 线圈 70 匝

2 不同负载下抑制效果

3 结论

本文针对磁轴承负载变化导致固定驻留时间抑制效果下降的问题，提出了一种基于负载端电压峰值反馈的自适应驻留时间调整方法。实验结果表明当负载线圈参数发生变化时端部过电压能得到有效抑制。该法无需附加硬件，可提高磁轴承驱动系统在负载变化条件下的运行可靠性。

参考文献（References）：

[1] 王东，姜豪，苏振中，等. 船用磁悬浮轴承关键技术与发展综述 [J]. 中国电机工程学报.
[2] 李博文,于洁,常青云,等.SiC 功放驱动下磁轴承端部过电压及其抑制方法研究[J/OL].中国电机工程学报.

收稿日期：2026 年 06 月 30 日.
基金项目：山东省自然科学基金项目(ZR2025MS818).
作者简介：李博文(2000－)，男，河南省周口市，无，硕士研究生，主要从事磁悬浮的研究；通信方式：E-mail:lbw450013916@126.com、联系电话:17724805319

文章编号：485–062

磁悬浮双转子系统的过模态振动抑制研究

丁英杰[1]，王念先[1]

（1. 武汉科技大学 机械工程学院，湖北省武汉市 430081）

1 引　言

磁悬浮双转子系统具有内外转子转速差、中介轴承耦合及多模态相互作用等特点，跨越临界转速的过程中易产生振动放大和稳定性下降等现象。针对该问题，本文建立磁悬浮双转子有限元模型，分析低阶弯曲模态特性，并设计滑模控制方法抑制过模态过程中的瞬态位移响应。

2 正　文

2.1 转子结构

本文采用有限元法对磁悬浮双转子系统进行建模，如图 1 所示。转子共划分 10 个节点，其中节点 3#、6#、10#布置磁悬浮轴承，节点 4#、7#通过中介轴承连接内外转子。

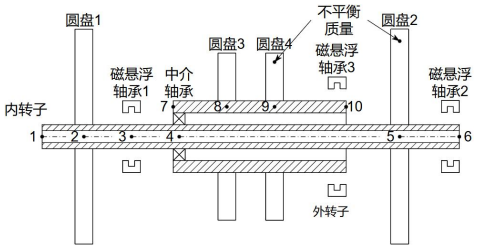


图 1 磁悬浮双转子系统模型

对上述有限元模型进行数学建模，系统的动力学方程可表示为：

$$M\ddot{q}+(C+\Omega G)\dot{q}+Kq=B_mF_{\mathrm{mag}}+B_d d(t)$$

其中，q 为系统广义位移向量，M、C、G、K 分别为质量、阻尼、陀螺和刚度矩阵，Ω 为转速，F_{mag} 为磁轴承控制力，B_m、B_d 为控制输入和外界扰动分配矩阵，$d(t)$为外界扰动的等效激励。系统写为状态空间的形式为：

$$\dot{x}=Ax+B_fF_{mag}+B_d^{ss}d(t)$$

2.2 内转子模态计算结果

为验证有限元模型的准确性，对内转子模态进行计算，并与解析模型进行对比，如表 1 所示。结果表明，所建立模型能够准确地反映内转子的低阶模态特性，可为后续过模态振动抑制分析提供依据。

2.3 过模态过程分析

根据表 1 所示结果，内转子一阶弯曲对应临界转速约为 5787r/min，低于目标转速 6000r/min。设定内转子转速由低速逐渐升至 6000r/min，以构造过模态运行工况。

表 1 临界模态对比

	频率/hz		误差/%
	解析模型	有限元模型	
一阶弯曲	97.5	96.452	1.09
二阶弯曲	169.8	161.88	4.89

2.4 控制器设计

针对磁悬浮双转子系统过模态过程中的振动抑制问题，本文采取滑模控制算法。以转子预定悬浮位置作为期望状态，控制目标是在系统跨越临界转速区域时，使转子位移误差及其变化率尽快收敛。控制输入为主动磁轴承控制电流及位移响应。

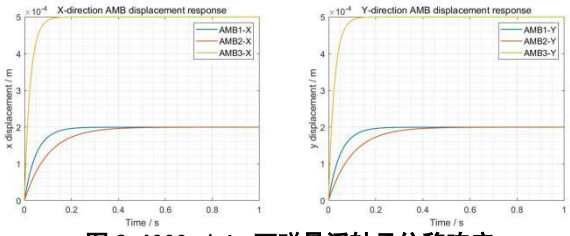


图 2 6000r/min 下磁悬浮轴承位移响应

3 结　论

本文建立磁悬浮双转子系统有限元模型，获得了低阶弯曲模态特性，并基于模态结果确定过模态分析对象。针对临界转速跨越过程中的振动放大问题，设计滑模控制方法，为磁悬浮双转子系统过模态振动抑制和全转速域稳定运行提供依据。

参考文献（References）：

[1]Wang D, Wang N, Chen K. Unbalance response of a magnetic suspended dual-rotor system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(15): 5758-5772.

[2]周扬，周瑾，王艺宇，等. 考虑界面接触的磁悬浮轴承-转子系统建模及鲁棒控制[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(4): 755-765.

[3]Papageorgiou D, Santos I. Sliding mode control of active magnetic bearings-a cascaded architecture[J]. IFAC-PapersOnLine, 2023, 56(2): 2480-2485.

收稿日期：2026 年 07 月 01 日.

基金项目：项目名称（编号）；项目名称（编号）.

作者简介：王念先（1987—），男，教授，博士生导师，主要研究方向为磁悬浮轴承、液压系统，E-mail：wangnianxian@wust.edu.cn。

丁英杰（2002—），男，硕士研究生，主要研究方向为磁悬浮轴承，E-mail：1529165642@qq.com。

文章编号：485-063

基于扰动观测的轴向磁轴承低功耗控制研究

范雯[1]，刘虎[1]，王凯正[1]
(1.北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100191)

1 引 言

主动磁悬浮轴承技术是一种先进的支承技术。该技术通过控制器主动控制电磁力，实现定子、转子之间的无接触旋转，相较于传统机械轴承具有转速高、无需润滑、可在真空环境运行等显著优势。如今，磁悬浮轴承已广泛应用于各种领域，在生命科学、交通运输及航空航天等领域展现出卓越的竞争力。

本研究提出一种基于自抗扰控制（ADRC）思想的低功耗控制架构。该架构利用扩张状态观测器（ESO）实时估计并补偿转子轴向扰动，并与自适应偏置电流策略相结合，使系统兼具低功耗与强抗扰性能。

2 正 文

2.1 基于自抗扰控制技术控制器设计

系统架构设计如图 1 所示。

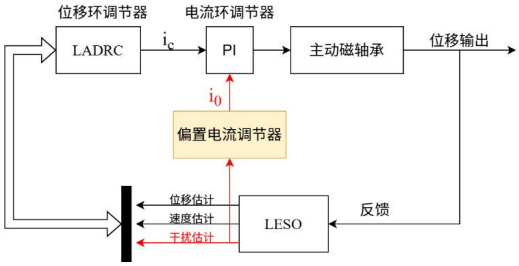
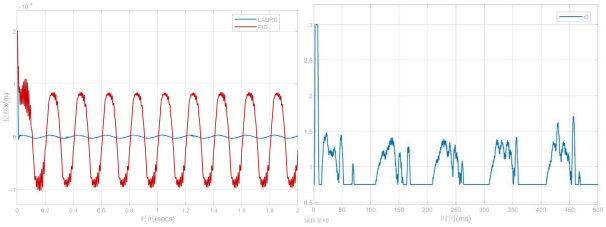


图 1 系统架构设计

2.2 基于干扰观测的低功耗策略设计

$$i_0=\begin{cases}\dfrac{i_{max}}{8} & \text{当}\sqrt{\dfrac{|z_3\cdot m|s_0^2|x|}{k\delta\left(1-\frac{|x|}{s_0}\right)}}<\dfrac{i_{max}}{8}\\ \sqrt{\dfrac{|z_3\cdot m|s_0^2|x|}{k\left(1-\frac{|x|}{s_0}\right)}} & \text{当}\dfrac{i_{max}}{8}\le\sqrt{\dfrac{|z_3\cdot m|s_0^2|x|}{k\delta\left(1-\frac{|x|}{s_0}\right)}}<\dfrac{i_{max}}{2}\\ \dfrac{i_{max}}{2} & \text{当}\sqrt{\dfrac{|z_3\cdot m|s_0^2|x|}{k\delta\left(1-\frac{|x|}{s_0}\right)}}\ge\dfrac{i_{max}}{2}\end{cases}$$

2.3 低功耗策略仿真



a LADRC 与 PID 对比图　　b 变偏置电流

图 2 系统仿真结果

3 结 论

本文通过将扰动估计值纳入偏置电流调控逻辑，建立了偏置电流与位移、干扰力之间的量化函数关系，形成了可根据工况动态调整偏置电流的低功耗控制策略。

仿真对比结果显示，在300N扰动条件下，LADRC+变偏置方案相较PID+变偏置方案能量损失减少8.6%，且位移响应更为平稳。PID+变偏置方案相比PID+固定偏置方案能量损失减少84.7%，LARDC+变偏置方案相比PID+固定偏置方案能量损失减少86.0%。

参考文献（References）：

[1] Huang Z, Li C, Zhou Z, et al. Magnetic Bearing: Structure, Model, and Control Strategy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024,131(5-6): 3287-3333

[2] Yao Y, Ren G, Yu S. Division Linearization Zero-Bias Current Control for AMBs-Rotor System With Uncertainties and Saturation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023,70(10): 10557-10566

收稿日期：2026 年 07 月 03 日.

基金项目：无

作者简介：范雯(2000.09)，女，黑龙江省牡丹江市，硕士，主要从事磁轴承控制的研究；
通信方式：18376117@buaa.edu.cn、联系电话:13520014925

文章编号：485–064

重力效应下不平衡 Jeffcott 转子多脉冲混沌动力学研究

周莎 [1]
(1. 燕山大学 建筑工程与力学学院，河北省 秦皇岛 066004)

1 引言

磁悬浮轴承-转子系统在运行中受重力、不平衡激励及轴承力非线性等因素影响，常呈现复杂的非线性振动乃至混沌运动，影响系统的运行稳定性与可靠性. 为深入理解此类非线性振动机理，可借助转子动力学经典模型 Jeffcott 转子开展基础性研究，其非线性响应特性对磁悬浮轴承转子系统具有重要参照价值.

2 全局动力学分析与多脉冲跳跃轨道

本文以计及重力效应的不平衡 Jeffcott 转子[1]为对象，研究其在 1:1 内共振与主共振条件下的多脉冲混沌动力学. 通过分析该系统相空间中的全局分岔结构，识别多脉冲跳跃轨道的存在性，解析给出系统呈现 Smale 马蹄意义下混沌运动的参数区域。进一步将全局解映射回物理空间，揭示了转子系统在局部模态与耦合模态之间进行模态转换的动力学机制.

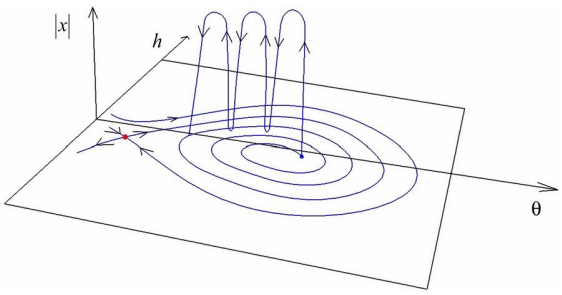


图 1 三脉冲跳跃轨道

研究表明，重力的引入导致系统产生模态局部化现象，在阻尼和周期激励的小摄动下，系统可产生单脉冲乃至多脉冲同宿轨道(图 1)，对应转子在物理空间中大幅度的模态跳跃行为. 理论分析进一步表明，当系统参数满足特定条件时，存在 Silnikov 型同宿轨道，从而在 Smale 马蹄意义下产生混沌运动.

3 结论

本文研究了计及重力效应的不平衡 Jeffcott 转子在多脉冲同宿轨道意义下的混沌动力学行为. 结果表明：重力效应使系统在无摄动时即存在同宿/异宿结构；在阻尼与周期激励下，系统存在 Smale 马蹄意义下的混沌运动，表现为多脉冲跳跃轨道，对应物理空间中模态的反复切换. 该工作为磁悬浮轴承转子系统的非线性振动分析与稳定性设计提供了理论参考.

参考文献 (References)：

[1] Yabuno H, Kashimura T, Inoue T, et al. Nonlinear normal modes and primary resonance of horizontally supported Jeffcott rotor[J]. Nonlinear Dynamics: 2011, 66: 377–387.

[2] Haller G. Chaos Near Resonances[M]. New York：Springer, 1999.

收稿日期：2026 年 7 月 4 日.

作者简介：周莎(1986—)，女，湖北黄冈，副教授，博士，主要从事非线性振动与波动的研究；
通信方式：E-mail:lilyzhou191@hotmail.com.

文章编号：485-065

基于自抗扰控制的磁悬浮动量球转速控制研究

龚春燕[1]，刘虎[1]，王凯正[1]
(1.北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100191)

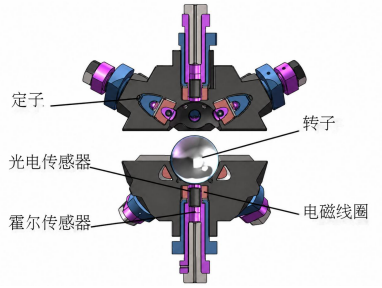
1□引言

磁悬浮动量球可实现多自由度力矩输出并通过无接触支撑降低摩擦和微振动，是新型姿态执行机构的重要方向[1,2]。但其悬浮力与驱动转矩存在明显耦合，转速控制精度要求较高。本文采用自抗扰控制方法，利用扩张状态观测器估计系统总扰动，并通过扰动补偿改善转速控制性能[3]。

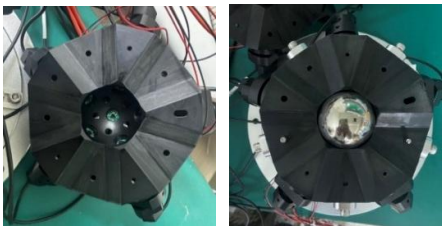
2□正文

2.1 磁悬浮动量球结构

本文研究的磁悬浮永磁动量球由转子、定子外壳、线圈、传感器探头四部分构成（图 1 所示），转子为沿 z 轴磁化的实心钕铁硼磁球。12 组探头设于各面中心，每组集成霍尔、光电传感器与驱动线圈，分别检测磁场信号、位置并输出电磁作用。如 2 所示，12 个线圈形成 6 对空间对称绕组，可同时输出悬浮力与驱动转矩，实现任意方向转动。



1□磁悬浮动量球结构图

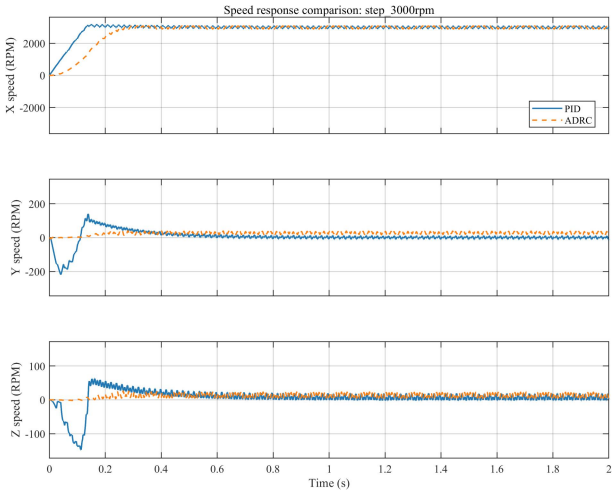


a 上球面　　b 下球面

2□磁悬浮永磁动量球上下球面实物图

2.2□仿真验证

基于 MATLAB 建立闭环仿真模型，与 PID 控制进行对比。目标转速仅施加于 X 轴，Y/Z 轴参考为 0，位置环固定采用 PID。3000 RPM 阶跃结果表明，两种方法均能实现 X 轴跟踪；ADRC 超调量由 PID 的 5.59%降至 2.88%，Y/Z 轴峰值耦合响应由 219.43/147.65 RPM 降至 40.29/26.39 RPM，说明其响应更平稳、非目标轴耦合抑制能力更好。球心位移未超过±0.9 mm 机械气隙限制。



3□3000 RPM 阶跃指令下的三轴转速响应

表 1□阶跃指令下主要性能指标（单位：RPM）

控制器	X 轴超调量/%	X 轴调节时间/s	Y/Z 轴峰值
PID	5.59	0.321	219.43/147.65
ADRC	2.88	1.993	40.29/26.39

3□结论

本文并采用自抗扰控制方法进行转速控制，仿真结果验证了该方法用于单轴转速跟踪的可行性。与 PID 控制相比，自抗扰控制在阶跃指令下具有更小超调量和更好的非目标轴耦合抑制能力。

参考文献（References）：

[1] HAEUSSERMANN W. The spherical control motor for three axis attitude control of space vehicles[R]. NASA TM X-50071, Washington, D.C.: NASA, 1959.
[2] Chabot J., Schaub H. Spherical magnetic dipole actuator for spacecraft attitude control[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2016, 39(4): 911-915.
[3] Han J. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.

收稿日期：2026 年 07 月 04 日.

作者简介：龚春燕(2003－)，女，广西桂平市，硕士研究生，主要从事磁悬浮动量球系统的研究；通信方式： gcy2025@buaa.edu.cn

文章编号：485-066

磁悬浮心脏泵磁力耦合特性及抗扰控制研究

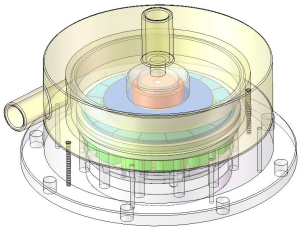
李振龙[1]，张晓友[1,2]，孙凤[1]，徐方超[1]，金俊杰[1]
(1.沈阳工业大学 机械工程学院，辽宁 沈阳 110870；2.日本工业大学 机械工学院，日本 琦玉 345-8501)

1 引言

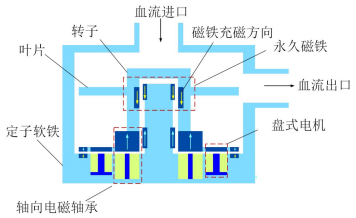
磁悬浮人工心脏泵[1]作为心衰治疗的核心替代方案，有效解决了心脏移植的供体短缺问题。然而当前第三代磁悬浮人工心脏泵存在结构复杂、控制难度大、电机与磁轴承磁力耦合干扰影响悬浮稳定性等问题。因此，本文基于一种新型磁悬浮轴承系统，开展了磁轴承与盘式电机的耦合建模、特性分析、控制器设计[2]与实验验证研究。

2 磁悬浮心脏泵

磁悬浮心脏泵系统主要由三大部分组成：磁悬浮转子组件、定子组件、叶轮，结构方案如图 1 所示。转子组件包括离心式叶轮、磁悬浮轴承的永磁环及盘式电机的永磁转子。定子组件包括轴向主动磁悬浮线圈、盘式电机驱动绕组以及定子铁芯。



a 整体模型

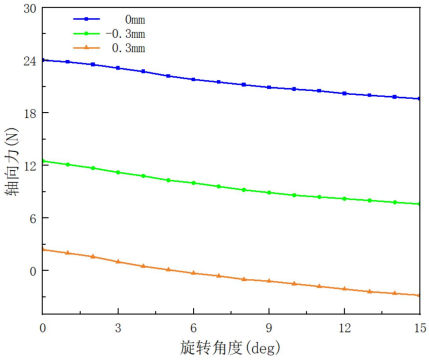


b 剖面图

1 磁悬浮心脏泵整体结构

3 心脏泵系统磁力耦合特性分析

针对人工心脏磁悬浮轴承与盘式电机，完成了电磁建模与轴向耦合特性的系统分析。在额定工况电流下，转子所受轴向力随旋转角度变化曲线如图 2 所示。在任意固定气隙下，总受力均随机械相角呈现周期性波动。以平衡位置为例，当转子由 0°旋转至 15°时，总合成轴向力由 12.5N 下降至 7.6N，其波动幅值约为 4.9N，联合激磁下的轴向力波动趋势与幅值，与盘式电机自身的轴向力特征吻合。



2 磁悬浮心脏泵整体结构

4 仿真与实验验证

建立包含负刚度项与集总扰动项的转子二阶非线性动力学模型，设计改进型非奇异终端滑模控制器。搭建心脏泵磁悬浮轴承实验平台，开展系统性实验研究。

5 结 论

本文围绕系统结构设计、电磁建模与耦合特性分析、抗扰控制器设计及实验验证开展了系统性研究。结果证明，ESO 复合抗扰策略对电机轴向耦合扰动具有良好的抑制效果。

参考文献 (References)：

[1] Sahebi K, Niroomand O, Badri G, et al. Design and prototyping of a magnetically and hydrodynamically suspended blood pump via multiobjective optimization[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 26171.

[2] Shi S, Dai L, Min H, et al. Non-singular terminal sliding mode controller design for nonlinear systems with prescribed convergence time guarantees[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2024, 34(4): 2597-2613.

收稿日期：2026 年 07 月 05 日.

基金项目：国家自然基金项目（52405284）；辽宁省教育厅项目（LJ222410142008）；辽宁省科技厅项目（2023-BSBA-263）.

作者简介：李振龙(2000－)，男，山东省菏泽市，博士，主要从事磁悬浮心脏泵及其控制方法的研究；

通信方式：E-mail: lizhenlong@smail.sut.edu.cn、联系电话：15269098023

文章编号： 485-067

计及材料温-频特性的磁轴承铁耗解析计算方法

姜豪[1,2]，肖舸[1,2*]，刘奇[1,2]，薄凯[1,2]

(1.海军工程大学 电磁能技术全国重点实验室，湖北省 武汉 430030；2.湖北东湖实验室，湖北省 武汉市 430205)

1 引言

当前近年来，磁轴承推广应用趋势加快，而铁耗的准确计算对磁轴承温升评估和应用至关重要。现有的铁耗解析计算方法精度较低，极少考虑磁轴承的磁特性和磁密非正弦特性等因素。有限元虽可计算不同温度下的电磁性能，但需预先拟合温度与铁耗系数，计算效率偏低。因此，亟须提出一种计及材料复杂温-频特性的快速铁耗计算方法，为磁轴承铁耗的精准高效评估提供解决方案。

2 计及磁轴承材料磁特性和磁密非正弦特性的铁耗计算方法

2.1 材料复杂特性

测量不同温度和频率下铁心材料（硅钢片35WW270）的铁耗性能，结果如图1所示。可以看出，在研究的温度和频率范围内，温度上升会引起铁耗减小，频率会导致铁耗显著增大。

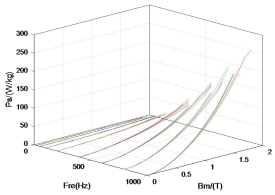


图1 不同温度和频率下铁心材料（硅钢片35WW270）的铁耗性能

2.2 改进铁耗计算方法设计

本文在传统非线性分布磁路法上[1]，提出一种计及复杂温-频特性的磁轴承铁耗计算方法，算法流程和原理如图2所示。

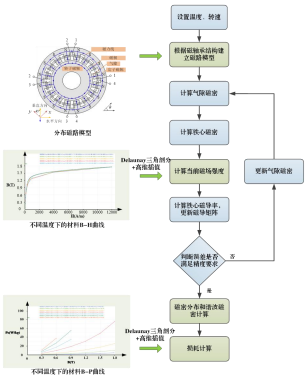
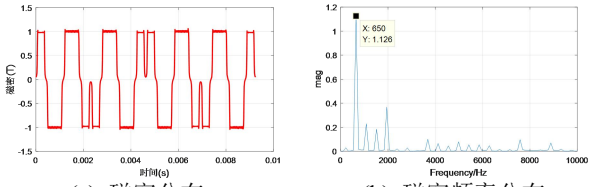


图2 计及复杂温-频特性的铁耗计算流程

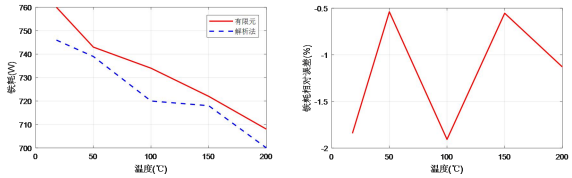
2.3 方法验证

为验证方法有效性，以某磁轴承样机为对象，对比解析法与有限元法分析温度的影响结果，计算磁轴承的磁密分布与铁耗结果如图3-4所示。



(a) 磁密分布　　(b) 磁密频率分布

图3 磁轴承的磁密和频率分布特性（18℃）



(a) 铁耗　　(b) 相对误差

图4 不同温度下磁轴承的铁耗及其误差

不同方法下的平均耗时与最大误差对比结果如表1所示。可见本文提出的计及材料温-频特性和磁密非正弦特性的解析方法计算效率优势显著，且最大误差不超过4.5%，能够实现不同温度下磁轴承铁耗的快速精准计算。

表1 计算时间和误差

性能指标	电磁力		铁耗	
	有限元	解析法	有限元	解析法
平均耗时	52s	0.37s	184s	0.33s
最大误差	-	4.4%	-	1.9%

3 结论

针对传统铁耗计算难以考虑温度等因素影响，本文提供了一种快速准确评估磁轴承铁耗解析计算方法，可定量评估材料复杂磁特性对磁轴承铁耗的影响，利用仿真对方法的计算精度和效率进行了验证。

参考文献（References）：

[1] JIANG H, SU Z, WANG D. Analytical calculation of active magnetic bearing based on distributed magnetic circuit method[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 36(3): 1841-1851.

收稿日期： 2026年07月05日.

基金项目： 湖北省自然科学基金项目(2024AFB340)；国家自然科学基金项目(52477046).

作者简介： 姜豪(1995－)，男，湖北黄冈，讲师，博士，主要从事磁悬浮电机技术研究；通信方式：E-mail:jianghao23@nue.edu.cn

文章编号：485-068

基于多频变角度搜索的 AMB 不平衡振动抑制

方泽宇[1]，胡宏锦[1]，曹广忠[1]，黄苏丹[1]
（深圳大学 机电与控制工程学院，广东省 深圳市市 邮编 518060）

1 引 言

主动磁轴承（AMB）高速转子因质量偏心及传感器径向跳动等易产生同频及倍频振动，影响悬浮精度与控制负担[1]。文献[1]在四自由度刚性转子模型上提出多频电流补偿及变步长迭代搜索；文献[2]给出变角度搜索（VAS）不平衡补偿，可在 PID 悬浮控制运行下在线更新同步补偿力。各平动—转动通道扰动形式不同，多谐波 VAS 分通道扩展尚缺验证。

本文在四自由度 Simulink 模型（30000 r/min，Ts=1×10^{-10}s）中将 VAS 扩展至 1×/2×/3×转频，针对 AX/AY/BY/BX 分通道配置多频 VAS、cos 对齐单频 VAS 及+cos 前馈，以原始位移为反馈、补偿力叠加于不平衡路径，启动在线搜索，验证平动通道协同抑制效果。

2 多频变角度搜索算法

设通道位移 x(t)，每转 N 点采样。n 阶同步系数由正交分解得：

$$\begin{cases} a_n = \frac{2}{N}\sum x\sin(n\omega t) \\ b_n = \frac{2}{N}\sum x\cos(n\omega t) \\ A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \end{cases} \quad (1)$$

补偿力取为：

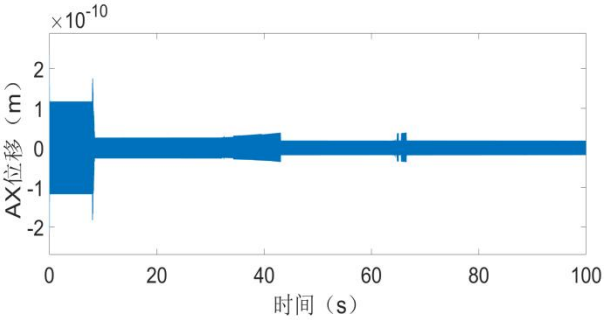
$$F_{\text{comp}} = -k\sum[\alpha_n\sin(n\omega t) + \beta_n\cos(n\omega t)] \quad (2)$$

式中，k=wr×10^{-5}为补偿力标度系数，与 Simulink 模型中 Fx、Fy 扰动幅值一致；wr 为转子角速度(rad/s)；αn、βn 为 n 阶同步补偿系数；A_obj 为各阶目标振动幅值。

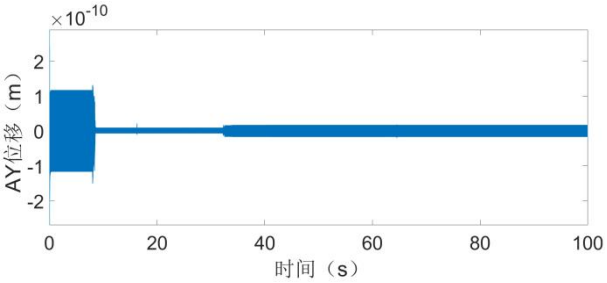
经 Sum 负端叠加。VAS 在(α，β)平面沿角 θ 步进Δr，每转按

$$\Delta\theta = \arctan\left[\frac{A_n(k-1)-A_{\text{obj}}}{A_n(k)-A_{\text{obj}}}\right] \quad (3)$$

调整 Φ；An 改善则更新系数，否则回退最优。本文将式(2)扩展为 n=1,2,3 独立搜索；AY 因 Fy∝cos(ωt)做 cos 对齐；BX 取+cos 前馈。



a X 方向径向位移



b Y 方向径向位移

图 1 四自由度主动磁轴承平动通道振动抑制仿真结果

3 仿真结果

图 1(a)为 AX 通道 X 向径向位移，多频 VAS 补偿 8s 后 1×振动显著降低；图 1(b)为 AY 通道 Y 向径向位移，AY cos 对齐 VAS 与 BY 单频 VAS 联补后稳态幅值更低。转速 30000 r/min，Ts=1×10^{-4}s。

AX 通道 1×振动由±1.2×10^{-10} m 降至±0.3×10^{-10} m（约 75%）；AY+BY 联补 Y 向振动由±1.2×10^{-10}m 降至 ±0.2×10^{-10}m（约 83%）。分通道 VAS 有效抑制平动同步振动，验证方法有效性。

参考文献 (References)：

[1] 王忠博,毛川,祝长生. 电磁轴承高速电机转子多频振动的电流补偿控制[J]. 中国电机工程学报,2018,38(1): 275-284, 365.

[2] 巩磊,祝长生. 基于变角度搜索算法的磁悬浮高速电机刚性转子系统的不平衡补偿方法[J]. 中国电机工程学报,2021,41: 6769-6778.

收稿日期：2026 年 07 月 05 日.

基金项目：深圳市自然科学基金面上项目（JCYJ20250604182631042）

作者简介：方泽宇(1994)，男，广东普宁，无，学士，主要从事磁悬浮控制的研究；通信方式：E-mail:2510095007@mails.szu.edu.cn、联系电话：15918804367

文章编号：486-001

自主转向式直线电机设计方法研究

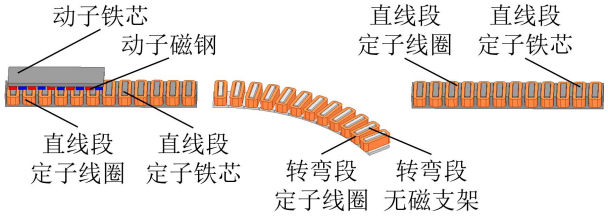
章懰[1]，刘习凯[1]，印欣[2]
（1. 北京航空航天大学 宁波创新研究院，浙江 宁波 315832；2. 雅科贝思精密机电（杭州）有限公司，杭州 310053）

1 引言

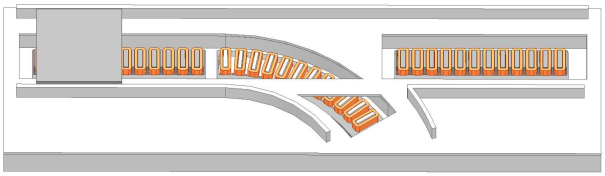
传统工业传输线通常采用皮带和链条传动机构，这种方式存在灵活性差、定位精度低等缺点，难以满足现代工业对智能化的生产需求[1]。因此，基于直线电机的柔性工业传输线成为了一大研究热点[2]。然而，传统直线电机只能做一维运动，当轨道存在分叉方向时，仅靠电机自身无法切换运行方向。因此，本文提出了一种可自主转向的新型直线电机结构。

2 可自主转向的新型直线电机结构

如图 1(a)所示，本文提出的电机，其动子和直线段定子结构与传统电机类似，但在分叉位置增设了转弯段定子。其中直线段定子采用有铁芯结构，转弯段定子采用无铁芯结构。当动子需转弯时，直线段通电产生反向电磁推力，使动子减速，同时转弯段通电产生正向电磁推力，牵引动子转弯行进；当动子需直线运动时，直线段通电以产生正向电磁推力，使动子加速，依靠惯性通过分叉位置，进入下一个直线段定子的牵引范围，此时转弯段不通电，即不会对动子产生干扰。并且，如图 1(b)所示，在轨道上增加护轨，以进一步保障动子的稳定运行。以直线运动为例，图 2 为电机动子速度波形图。由图可知，电机动子可顺利通过分叉路段。

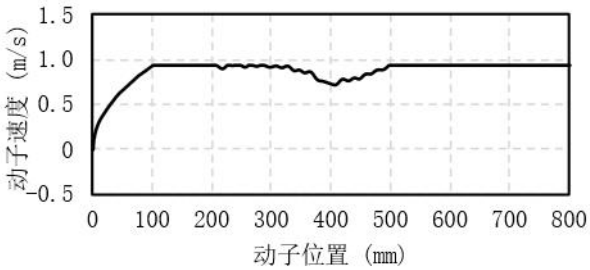


a 核心电磁结构



b 系统机械结构

1 电机结构示意图



2 电机动子直线运动速度波形图

3 结 论

本文通过增设转弯段定子，使得电机动子既可以受转弯段电磁推力牵引转弯运行，也可以靠惯性直线运行，实现了电机运动方向的自主切换。

参考文献（References）：

[1] YU Wei, HUANG Xu-Zhen, ZHANG Yi-Wei, et al. Minimum-spacing optimized winding switching control for winding-segmented PMLSM with multiple movers[J]. IEEE Trans. Ind. Electron.: 2026, 73(2): 2885-2895.

[2] LI Jing, HUANG Xu-Zhen, ZHOU Bo, et al. Design criterion for dual-modular permanent magnet linear synchronous motor with long stroke and high flexibility[J]. IEEE Trans. Ind. Electron.: 2022, 69(10): 10428-10436.

收稿日期：2026 年 04 月 09 日.

基金项目：宁波市甬江人才工程项目（2023A-050-G; 2022A-160-G）；宁波市自然科学基金项目（2024J042）.

作者简介：章懰(1994－)，男，浙江宁波，副研究员，博士，主要从事永磁电机结构设计与机理分析的研究；通信方式：liuzhang@buaa.edu.cn.

文章编号：486-002

恒力磁浮低宽频隔振系统动力学设计与调控方法

亓文豪[1]，高秋华[1]，张文明[1]
(1.上海交通大学 机械与动力工程学院，上海市 200240)

1 引言

星载光学相机、惯性测量单元等精密载荷对环境振动极为敏感。机动变轨和姿态微调等诱发的低频宽带微振动，会直接破坏载荷平台稳定性，恶化在轨成像质量、降低测量精度、增大指向误差甚至危及结构安全，严重制约航天器在轨服役性能。

恒力磁浮隔振技术依靠非接触永磁力实现动静平台隔离，可有效阻断振动在振源与精密载荷之间的传递，具有工作频带宽、隔振行程大、服役寿命长等优点。本文围绕恒力磁浮隔振系统的动力学设计与调控方法，开展了磁恒力生成机理、多工况动态调控策略及隔振系统集成设计等方面的研究。

2 正　文

受永磁体与高导磁材料在特定方位下的磁滑移现象启发，提出非接触式磁恒力构建方法。分析高导磁材料引发的磁场非均匀分布规律，揭示磁恒力产生机理；设计高导磁动子－径向磁化定子同轴磁浮结构，阐明端部非均匀磁场对零刚度磁恒力的作用机制；建立磁定子理论模型，推导轴向、方位角及径向磁场强度分量；通过磁场分析，构建结构参数与恒力间的幂律关联。

基于无源磁恒力，提出恒力磁浮隔振系统设计方法。引入互斥磁偶极子高阶刚度非线性，实现系统刚度调制；建立包含粘滞阻尼、库仑阻尼与非线性对称刚度的动力学模型，系统探究恒力磁浮隔振机理及复合阻尼下的动力学特性，揭示阻尼与激励幅值对振动传递特性的影响规律。针对非线性隔振系统负载与行程调控难点，提出负载适配与行程缩放方案；通过调控磁恒力单元与磁约束边界的刚度匹配关系，实现承载能力与磁浮行程的独立解耦调节，且维持刚度特性稳定。

面向多向振动防护需求，开展多自由度磁浮隔振平台集成研究。针对原子力显微镜多向解耦抑振、控制力矩陀螺隔振与传扭需求，分别研制正交串联构型与 3PSS-Delta 并联构型磁浮隔振平台，分析其运动学与力学特性；建立含基础振动激励的动力学方程，通过理论分析与实验验证，证实两类构型平台具备低宽频隔振性能。

3 结　论

本文提出了非线性隔振系统的磁恒力构造方法，系统阐明了恒力磁浮低宽频隔振机理与负载-行程调控技术，开发了单/多自由度恒力磁浮隔振平台样机，研究了其动力学响应与振动传递特性，可为航天装备的低宽频振动控制提供理论基础与技术支撑。

参考文献：

[1]Wen-Hao Qi, Fan-Chi Zeng, et al. Zero-stiffness Maglev for ultra-low frequency vibration isolation with tunable large-stroke and multiple loads[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2026, 310: 111054.

[2]Wen-Hao Qi, Tian-Yu Zhao, Qiu-Hua Gao, et al. A magnetically levitated platform with multi-directional quasi-zero stiffness for low-frequency vibration protection[J]. Engineering Structures, 2025, 341: 120823.

[3]Wen-Hao Qi, Tian-Yu Zhao, Qiu-Hua Gao, et al. 3-DOF decoupled magnetic platform for optical low-frequency vibration isolation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2025, 300: 110429.

收稿日期：2026 年 04 月 10 日.

基金项目：

作者简介：亓文豪（1997），男，山东省，博士，主要从事非线性振动分析与控制、磁浮隔振系统设计与调控研究；
通信方式：E-mail: qiwenhao@sjtu.edu.cn、联系电话：15965610589

文章编号：486–003

基于磁场调控的准零刚度抗磁悬浮加速度计

孙汉超[1]，汪阳[1]，徐园平[1]
（1. 南京航空航天大学 机电学院，江苏省 南京 210016）

1 引　言

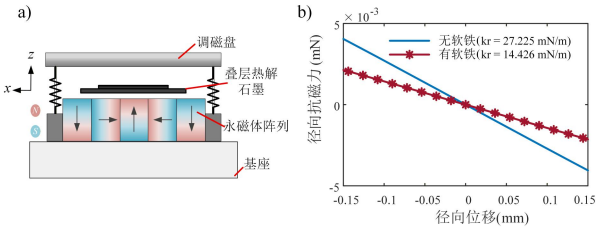
抗磁悬浮加速度计因其无接触支撑、摩擦损耗小和低频响应能力强等特点，在低频高灵敏惯性测量领域具有良好的应用前景。对于此类传感器而言，降低敏感元件的等效径向刚度、减小固有频率，是提升位移灵敏度和低频检测性能的关键。

基于此，本文提出一种基于 Halbach 阵列主磁场、双层热解石墨敏感元件及被动软磁调场结构的准零刚度抗磁悬浮加速度计方案，旨在通过敏感元件优化与全局磁场曲率调控相结合，在保持稳定悬浮的前提下进一步降低径向刚度并提升灵敏度。

2 正　文

2.1 结构与建模

所提出的结构以下方 Halbach 阵列作，采用由大尺寸下层热解石墨片和小尺寸上层热解石墨片组成的双层敏感元件，在 Halbach 阵列上方布置被动软磁调场结构，通过改变回磁路径对中心工作区局部磁场分布进行非侵入式调节。建模中采用有限元分析磁场分布，并基于磁势能法求取平衡位置附近的悬浮力与刚度，以径向刚度、轴向刚度和位移灵敏度作为主要评价指标。



a 结构示意图　　b 调磁效果仿真分析

1 结构与仿真分析图

2.2 准零刚度机理

敏感元件结构能够利用上下两层不同半径的热解石墨片在不同空间位置处所受磁场分布差异，形成对径向刚度的不同贡献[1]。该结构为进一步提升灵敏度和降低固有频率提供了基础。

2.3 软磁调场分析

在双层热解石墨准零刚度结构基础上，进一步引入软磁调场结构。初步仿真结果表明，软磁结构能够改变主磁阵列的回磁路径[2]，使中心工作区局部磁场分布及其曲率发生变化，从而引起等效径向刚度的变化。

3 结　论

本文提出了一种基于 Halbach 阵列、双层热解石墨敏感元件和软磁调场结构的准零刚度抗磁悬浮加速度计方案。分析表明，双层热解石墨结构能够有效降低系统径向刚度并形成准零刚度工作区，被软磁调场则可进一步改变中心工作区局部磁场分布和等效刚度。后续将围绕调场结构参数优化与样机实验验证展开研究。

参考文献（References）：

[1] Wang Y，Xu Y，Yang L，et al. An ultra-sensitive diamagnetic levitation accelerometer with quasi-zero-stiffness structure [J]. Measurement，2025，245 116651-116651.

[2] Ya W，Yajie X，Feng W，et al. A passive shimming method for Halbach magnet based on magnetic sheet arrays [J]. Journal of Magnetic Resonance，2022，339 107210-107210.

收稿日期： 2026 年 04 月 14 日.

基金项目： 国家自然科学基金面上项目，52275537

作者简介： 孙汉超(2001－)，男，安徽省芜湖市，硕士研究生，主要从事抗磁悬浮加速度计的研究；通信方式：sunhc66@nuaa.edu.cn

文章编号：486–004

磁悬浮电机低损耗断电补偿控制方法

张瀚林[1]，周瑾[1]，韩晓明[1]，周扬[1]
（1.南京航空航天大学 机电学院，江苏省 南京市 邮编 210016）

1 引言

相较于传统轴承，主动式磁悬浮轴承（Active Magnetic Bearing, AMB）凭借主动振动控制、无摩擦、高速直驱等诸多优势，被广泛应用于高速流体机械中。然而，电网系统过流等原因均有可能导致 AMB 系统断电，极易使高速运动的转子跌落，对转子及保护轴承造成严重损伤，甚至人员及设备损伤。因此断电补偿控制（Power Failure Compensation Control，PFCC）通过将转子降速时的旋转动能转化为电能，支承转子稳定悬浮，对于提升 AMB 系统的可靠性及稳定性至关重要，为进一步降低跌落转速，需最小化功率回路损耗。传统的 PFCC 方法仅针对开关损耗进行优化，忽略了导通损耗的影响，系统效率仍具备提升空间。因此，本文提出了一种兼顾两者的低损耗 PFCC 方法，通过理论分析与仿真验证了其有效性与可行性。

2 低损耗断电补偿控制方法

2.1 热损耗分析

断电后电机工作于发电模式，逆变器每相桥臂的导通损耗为：

$$P_c = V_c \cdot I_{i_rms}$$

式中，V_c 为功率开关的导通压降，I_{i_rms} 为每相电流有效值。将 AMB 视为恒功率负载，为了降低导通损耗 P_c，需减小 I_{i_rms}，即提高发电机的功率因数。

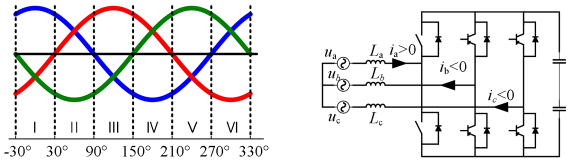
在母线电压一定时，减小开关损耗的方法为减少开关数量。对于三相三线制 Y 型接法的电机，电流始终满足：

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

在该约束条件下，只需控制其中两相的电流即可实现三相功率因数校正。

2.2 六步 PWM 原理分析

在六步 PWM 中，相电压被分为 6 个 60°区间，如图 1(a)所示。在每个区间内，绝对值电压最高的相控制器被禁用，对应桥臂的开关关断，图 1(b)为扇区 I 的电路工作情况。



a. 60°扇区划分　　b. 扇区 I 电路图

图 1 六步 PWM 原理图

2.3 仿真验证

图 2 展示了六步 PWM 断电补偿控制逆变器的三相电流，功率因数高达 0.9901。

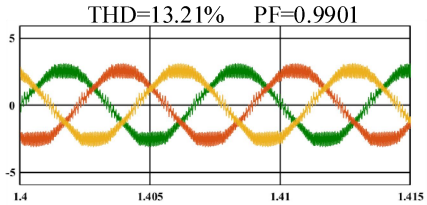


图 1 六步 PWM 原理图

3 结论

所提低损耗 PFCC 方法在实现发电机高功率因数运行的同时，有效抑制了导通损耗，并使开关损耗降低了 33%，显著提升了系统的转换效率。

参考文献（References）：

[1] Gang, Liu, Kun, et al. A Novel Power Failure Compensation Control Method for Active Magnetic Bearings Used in High-Speed Permanent Magnet Motor[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2015.

[2] Huber L , Kumar M , Jovanovic M M .Performance Comparison of Three-Step and Six-Step PWM in Average-Current-Controlled Three-Phase Six-Switch Boost PFC Rectifier[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10):7264-7272.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.

基金项目：国家自然科学基金（52475060）.

作者简介：张瀚林(2002－)，男，在读博士研究生，主要从事磁悬浮电机系统稳定性关键技术研究；
通信方式：E-mail:hanlinZhang_1556@nuaa.edu.cn

文章编号：486–005

基于旋转磁场下微型机器人的运动特性研究

王凤林，汪阳，徐园平

(1. 南京航空航天大学 机电学院，江苏省 南京市 210016)

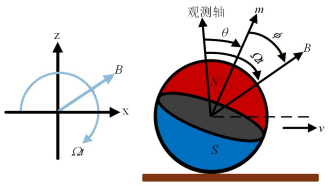
1 引　言

磁驱动微型机器人具有无接触、高安全性的优点，目前已广泛应用于临床医疗领域[1]。磁性微球作为一种微型机器人，因其高磁响应性、良好的生物相容性和运动灵活性，成为了实现精准导航和靶向药物递送的理想载体。已有学者针对其运动特性进行了研究[2]，本文综合考虑旋转磁场下微球所受惯性项、流体粘性项、表面摩擦项及磁驱动项，构建了完整的磁性微球旋转动力学模型，并仿真分析了不同物理参数对微球动力学稳定性的影响规律。

2 正　文

2.1 磁性微球的动力学模型

磁性微球滚动示意图如图 1 所示：



1 磁性微球滚动示意图

根据转动定律，微球运动微分方程表示如下：

$$I\ddot{\theta}+\gamma\dot{\theta}+\mu F_{\mathrm{n}}R\cdot\mathrm{sgn}(\dot{\theta})=mB\sin(\Omega t-\theta) \qquad (1)$$

式中，I 为微球转动惯量，γ 为粘滞阻力系数，μ 为摩擦系数，F_{n} 为正压力，R 为微球半径，m 为磁矩，B 为磁场强度，Ω 为旋转磁场角频率，θ 为方位角。

为探究微球旋转与驱动磁场的关系，引入滞后角 $\phi=\Omega t-\theta$ 和无量纲时间 $\tau=\Omega t$ 得到动力学方程：

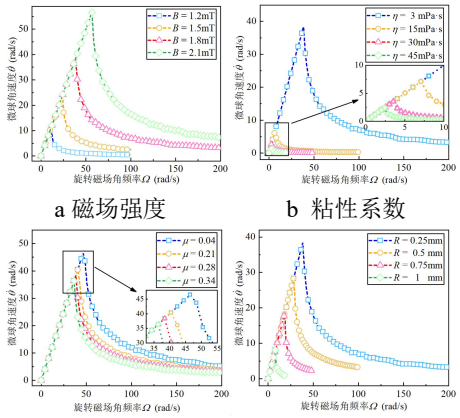
$$\phi''+\alpha\phi'+\beta\sin\phi=\delta \qquad (2)$$

式中：$\alpha=\dfrac{\gamma}{I\Omega}$；$\beta=\dfrac{mB}{I\Omega^2}$；$\delta=\dfrac{\gamma\Omega+\mu F_{\mathrm{n}}R\,\mathrm{sgn}(1-\phi')}{I\Omega^2}$。

2.2 仿真结果及分析

基于龙格-库塔法计算式(2)得到微球角速度随角频率的响应曲线（图 2(a)-(d) ）。结果表明微球运动随旋转磁场角频率增加呈现同步和异步区。在同步阶段，微球角速度随驱动频率线性增加；当驱动频率超过临界值后，系统进入异步阶段，受流体粘性阻矩和表面摩擦转矩的作用，角速度呈现非线性下降趋势。

仿真不同物理参数表明，磁场强度从 1.2mT 增加至 2.1mT，同步线性区的频率范围增加 5 倍左右，失步频率峰值向高频方向移动，最大角速度为 56rad/s。流体粘度系数和摩擦系数对运动起到制约作用，导致系统提前发生失步。此外，虽然增大微球粒径能提升载药量，但流体阻力矩随粒径增大呈立方次增长，导致大粒径微球的动力学稳定性差及失步频率峰值明显下降。



a 磁场强度　b 粘性系数

c 摩擦系数　d 微球粒径

2 不同物理参数下微球旋转速度的响应曲线图

3 结　论

本文通过理论建模与仿真分析表明，微球运动模式与频率相关；系统失步的临界频率 Ω_{c} 和最大角速度 $\dot{\theta}$ 受磁场强度、粘性系数、摩擦系数和微球粒径等参数调控，其中，调控驱动磁场强度 B 是微球驱动控制最有效的方法。研究结果可为后续磁微型机器人用于临床药物定点运输提供理论基础。

参考文献（References）：

[1] Landers C F, Hertle L, Pustovalov V, et al. Clinically ready magnetic microrobots for targeted therapies[J]. Science (New York, N.Y.), 2025, 390(6774): 710-715.

[2] Gao H, Zhao Z, Doi M, et al. Response of a magnetic particle to rotating magnetic field in viscoelastic fluid[J]. Physical review. E, 2025, 112(5-2): 055417.

收稿日期：2026 年 04 月 14 日.

基金项目：抗磁悬浮倾角敏感元件动态稳定悬浮机理与调控方法（52275537）.

作者简介：王凤林（2003-），女，四川省广元市，硕士研究生在读，主要从事磁驱动技术、微型机器人的研究；通信方式：E-mail: wfenglin@nuaa.edu.cn

文章编号：486-006

基于 LQR 控制的三自由度高温超导磁浮隔振台

吴家丰[1]，郑珺[1*]，李渠荣[1]，雷武阳[1]
（1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610000）

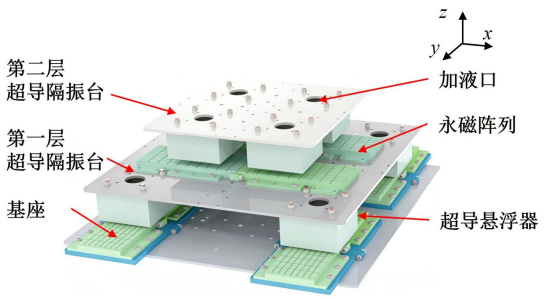
1 引言

振动控制是制约精密设备发展的关键瓶颈。高温超导磁悬浮隔振技术虽具备无源自稳定、纵向无磁阻等优势，但垂向隔振性能仍有待提升[1]。因此，提出了一种三自由度高温超导磁浮隔振台。首先，介绍了该隔振台结构，依托纵向无磁阻特性实现了水平被动隔振，利用线圈控制实现垂向主动隔振。其次，基于毕奥-萨伐尔定律和磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 法，建立了三自由度等效动力学模型。接着，提出了一种基于LQR的垂向主动控制方法。最后，分析了隔振台的三自由度振动响应特性。

2 正　文

2.1 三自由度高温超导磁浮隔振台结构

隔振台采用三层结构，分别为基座、第一层超导隔振台与第二层超导隔振台。基座为第一层超导隔振台提供磁场源。第一层超导隔振台通过磁通钉扎力提供垂向悬浮力，依托纵向无磁阻特性实现 y 向被动隔离，利用线圈电磁力实现 z 向主动隔振。此外，其上方永磁阵列为第二层提供磁场源。第二层超导隔振台通过磁通钉扎力承载设备，并依托纵向无磁阻特性实现 x 向振动隔离。



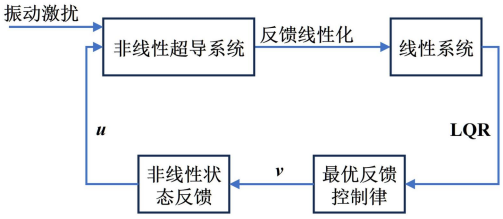
1 三自由度高温超导磁浮隔振台

2.2 动力学模型

首先，基于毕奥-萨伐尔定律和磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 法建立单个超导悬浮器的磁刚度模型。其次，通过振动衰减实验获得单个超导悬浮器的磁阻力模型[2]。最后，将超导悬浮器等效为弹簧阻尼系统，构建高温超导磁浮隔振台的动力学模型。

2.3LQR 垂向主动控制器

通过非线性状态反馈将隔振台模型反馈线性化为线性系统，并在此基础上设计 LQR 最优反馈控制律，最终经逆变换生成实际控制输入，有效抑制振动激扰，提升垂向隔振性能。



2LQR 控制框图

最后在不同扰动信号下，对比了未采用主动控制时隔振台的三自由度振动响应特性。验证了所提 LQR 垂向主动隔振的有效性，以及高温超导磁浮隔振台横、纵向被动隔振的优异性能。

3 结　论

本文提出一种三自由度高温超导磁浮隔振台，利用高温超导磁悬浮纵向无磁阻特性实现水平方向被动隔振，采用 LQR 控制线圈实现垂向主动隔振，可在较大程度上抑制横、纵、垂三自由度的振动干扰。

参考文献（References）：

[1] Zheng J, Zhao YH, Pang P, et al. Improving the safety margin and vibration stability of high-temperature superconducting maglev transport systems: a new approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 74(4): 5383-5396.

[2] Jing Z, Kang Q, Liu W, et al. Hybrid active–passive vibration isolation based on the superconducting magnetic levitation: Modelling, simulation and validation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 226: 112358.

收稿日期： 2026 年 04 月 15 日.

基金项目： 国家自然科学基金委面上项目（52375132）.

作者简介： 郑珺，女，研究员，博士，主要从事超导磁悬浮与电磁推进、直线电机、机电耦合相关的研究；
E-mail: jzheng@swjtu.edu.cn

文章编号： 486-007

高速电磁橇逆向射流气动减阻研究

屈鸣鹤，宋锦豪，王子豪，刘星，刘天涯，王连春，周丹峰，李杰
(国防科技大学 智能科学学院，湖南省长沙市 410073

1□引言

电磁橇作为一种能够提供超高速、高加速度测试环境的新型地面试验设施，在航空航天飞行器的气动热力学环境模拟、结构动力学测试以及未来航天发射技术中具有不可替代的应用价值[1-3]。随着电磁橇运行速度不断提高，气动阻力急剧增加，不仅会大幅提高推进系统的能耗需求，而且会对电磁橇结构稳定性产生影响[4]。因此，探索高效的气动减阻技术已成为电磁橇安全平稳运行有待解决的关键问题。

本文针对亚声速电磁橇运行时的气动阻力特性，提出阵列式逆向合成射流的减阻方法。首先，建立活塞式合成射流激励器的数值计算模型，并通过热线测速实验验证计算方法的可靠性；在此基础上，深入研究激励器在不同频率和相位下的射流时空演化特性；此外，建立了全尺寸橇车-轨道耦合模型并结合试验测试验证了计算方法的合理性；最后，将射流激励器阵列于橇车磁体迎风面，揭示了阵列激励器逆向合成射流涡环演化特性及流场重构过程，分析了阵列射流的梯度幅值与非同步相位调控下流场拓扑重构的演化特性。研究有望为航空航天地面高速试验平台的减阻设计提供新的理论依据与设计参考。

2□电磁橇气动仿真及实验分析

2.1□计算模型与方法

采用全尺寸电磁橇-轨道耦合模型，电磁包括橇车车体、隔振元件、超导磁体、导流罩结构、制冷系统以及车载传感器等；轨道包括轨道梁、钢轨、牵引线圈组和悬浮线圈等设备。橇车总长为 4.72m，总宽度为 1.58m，总高度 H 为 0.973m。考虑到橇车-轨道耦合模型的复杂性，不仅需要精准模拟橇车与轨道的近壁面效应，还需要准确捕捉射流“吹-吸”过程中的涡环演化特征。而 Realizable k-ε湍流模型在已有研究中表现出对气动力计算精度高的优越性，且该模型在预测强逆压梯度下的大曲率涡结构演化方面具有显著的优势。因此本文采用 Realizable k-ε湍流模型来进行数值仿真。

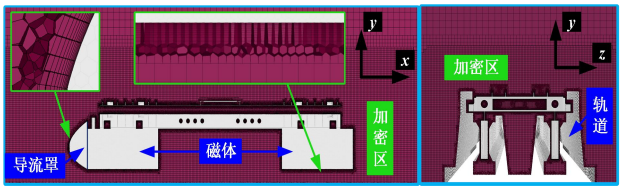


图 1 计算域网格

2.2□电磁橇逆向射流气动减阻仿真分析

基于橇车磁体迎风面的几何轮廓、尺寸特征及关键流场分离区域分布，确定了合成射流激励器的射流孔尺寸、腔体结构、安装高度等核心参数，确保射流能够直接作用于磁体前方的高压区与流场分离区，实现最大化控制效果。为实现对流场的全域覆盖与精细化调控，将阵列式射流激励器沿磁体迎风面特征区域进行垂向分布式布置，以主动射流激励结构替代原有的被动导流罩结构实现对流场的动态主动调控。按照激励器的布置位置与功能分区，对各射流激励器进行统一编号与命名，其具体的结构参数、布置形式及编号规则如图 2 所示。

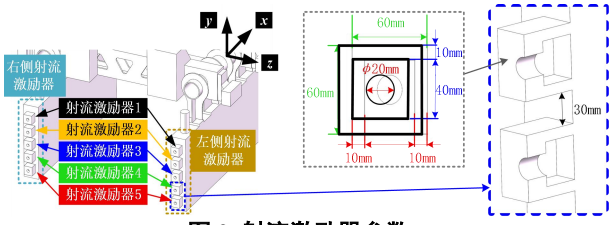


图 2 射流激励器参数

收稿日期： 2026 年 04 月 15 日.

基金项目： 国家自然科学基金（92271110）；湖南省自然科学基金青年学生基础研究项目（2026JJ90181）.

作者简介： 屈鸣鹤(1997 年生)，男，北京市丰台区，无，博士研究生，主要从事电磁橇空气动力学研究；通信方式：quminghe@nudt.edu.cn:、联系电话 18518089795

2.3 逆向射流气动减阻特性分析

数值仿真得到了无射流时橇车的气动阻力为11.43kN，其中压差阻力为11.19kN。压差阻力是气动阻力的主要来源，其高压区域主要分布在橇车前端横梁和前侧两个磁体的迎风面，如图3所示。

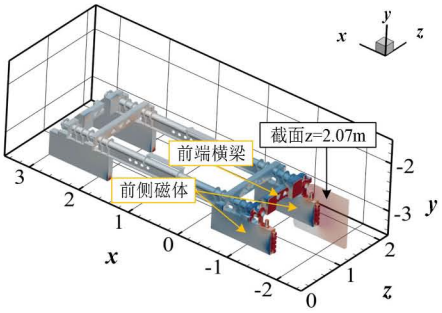


图3 电磁橇迎风面静压云图

通过以阵列式射流激励为核心开展参数化研究。橇车磁体迎风面阵列的射流激励器工作频率相同（f=100Hz），但不同方案中射流板的位移幅值不同。同步射流两侧的射流激励器无相位差，射流吹程、吸程完全同步，且该方案可实现有效减阻效果，如图4所示。

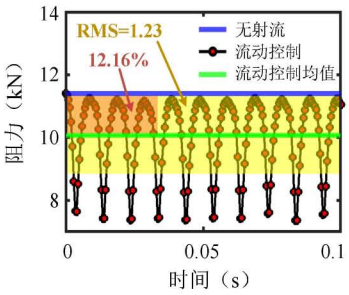


图4 逆向射流气动减阻图

3 结　论

本文针对电磁橇气动减阻的需求，提出了一种活塞式合成射流主动控制方法。通过理论分析、数值模拟并结合地面试验验证，系统揭示了亚声速环境下电磁橇阵列式逆向合成射流涡环演化规律及气动减阻效果。中心强化的梯度幅值流动控制通过能量集中机制，诱导生成了具有高环量与长驻留特性的主涡结构，有效克服了逆向强剪切流的耗散作用。本文所提出的强梯度逆向射流方法可在橇车迎风面形成等效虚拟外形，有效降低橇车磁体迎风面的高静压，从而减小压差阻力。同步射流吸程会导致流场重构稳定性下降，引发阻力大幅波动，但可有效实现气动减阻效果。

参考文献（References）：

[1] 马伟明，鲁军勇．电磁发射技术的研究现状与挑战[J]．电工技术学报，2023，38(15)：3943-3958.

[2] 罗世彬，刘庆浩，黄嘉，等．电磁悬浮助推空天飞行器气动关键技术分析[J]．飞行力学，2020，38(5)：1-7.

[3] 李兵，李卫超，荆从凯．电磁发射系统研究现状及应用展望[J]．兵器装备工程学报，2023，44(10)：166-177.

[4] QU M H, WANG L C, JIN Q D, et al. Nonlinear dynamics of Nishimura model-based fractional-order vibration isolation system under the synergistic effect of aerodynamic lift and harmonic excitation[J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113: 12693-12717.

文章编号：486-008

基于 BP 神经网络的超导电动磁浮列车电磁力计算方法

徐嘉跃[1,2]，徐俊起[1,2]，黄欢[1,2]，王梦林[3]，伍卫凡[3]

（1. 同济大学 交通学院，上海 201804；2. 同济大学 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海 201804；3. 中国铁路设计集团有限公司，天津 300308

1 引言

超导电动磁浮列车中，超导磁体与悬浮导向线圈之间的电磁力是影响列车悬浮与导向性能的关键因素。传统方法在互感偏位移导数求解过程中计算效率较低，难以满足高效运行条件下的列车动力学仿真需求。为此，提出一种基于神经网络的互感偏位移导数计算方法，并结合动态电路方程与电磁力模型实现电流和电磁力的高效求解。

2 正　文

2.1 基于 BP 神经网络互感偏位移导数预测的电磁力模型

超导电动磁浮列车中，基于离散 Neumann 公式的电磁力求解过程中存在重复积分计算量大、效率较低的问题。因此，本文提出一种基于 BP 神经网络的电磁力计算方法。首先，以超导磁体与悬浮导向线圈之间的相对位移和姿态参数作为输入，以互感偏位移导数作为输出，构建训练样本集并完成神经网络训练。随后，将神经网络预测得到的互感偏位移导数代入悬浮导向线圈的电路方程中，计算超导磁体所受电磁力。

2.2 仿真结果与分析

选取一组悬浮导向线圈与一个超导磁体作为研究对象，分别采用 BP 神经网络方法和离散 Neumann 方法计算互感偏位移导数，并在此基础上结合电路方程求解电磁力。如表 1 所示为互感偏位移导数计算误差，由表 1 可见，训练得到的神经网络能够较准确地预测互感偏导数，如表 2 所示为两种方法的电磁力误差，磁阻力、导向力和悬浮力的均方根误差分别为 25.05N、24.90N 和 11.31N，平均绝对误差分别为 14.18N、12.21N 和 6.84N，说明该方法能够较准确地完成电磁力计算。同时，所提方法用时 0.014s，相比离散 Neumann 方法 0.038s 的计算时间，计算效率提高约 2.7 倍。

表 1 互感偏位移导数计算误差

偏导数	MSE	RMSE	MAE
$\frac{\partial \boldsymbol{M}}{\partial \boldsymbol{x}}$	2.28×10^{-10}	1.51×10^{-5}	7.62×10^{-6}
$\frac{\partial \boldsymbol{M}}{\partial \boldsymbol{y}}$	1.03×10^{-10}	1.01×10^{-5}	4.72×10^{-6}
$\frac{\partial \boldsymbol{M}}{\partial \boldsymbol{z}}$	7.82×10^{-11}	8.84×10^{-6}	5.00×10^{-6}

表 2 电磁力计算误差

电磁力	MSE	RMSE	MAE
磁阻力	6.28×10^{2}	25.05	14.18
导向力	6.20×10^{2}	24.90	12.21
悬浮力	1.28×10^{2}	11.31	6.84

3 结　论

本文构建了一种基于 BP 神经网络的互感偏位移导数预测方法，并结合电路方程实现了电磁力高效计算。结果表明，该方法能够较准确地预测互感偏位移导数，同时显著提高电磁力计算效率，可为超导电动磁浮列车动力学快速计算提供新的计算思路。

参考文献（References）：

[1] 张娟, 赵春发, 冯洋, 等. 超导磁浮列车电动悬浮导向力学特性研究[J]. 机械, 2020, 47(09): 25-32.

[2] 王小农, 黄靖宇. 超导电动磁浮列车悬浮和导向特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(10): 1482-1489.

收稿日期：2026 年 04 月 27 日.

基金项目：国家自然科学基金（52232013, 52502448）；中央高校基本科研业务费专项资金（22120230311）.

作者简介：徐嘉跃(2000－)，男，河北石家庄人，在读研究生，主要从事电动超导磁浮列车动力学的研究；通信方式：E-mail:2512227@tongji.edu.cn

文章编号：486-009

数据驱动的 Stewart 平台时序卷积网络建模方法

周琦瑞[1]，刘耀宗[1,2*]，粟籽华[1]

(1. 国防科技大学 智能科学学院，湖南省长沙市 410073

2. 国防科技大学装备状态感知与敏捷保障全国重点实验室，湖南省长沙市 410073)

1 引言

针对 Stewart 平台传统动力学建模复杂度高、参数辨识难和对未建模动态敏感等问题[1]，提出了一种基于时序卷积网络(Temporal Convolutional Network, TCN)的数据驱动动力学建模方法。模型以基台运动及负载台历史运动为输入，递推预测负载台加速度响应。同时引入迁移学习策略，利用小样本实验数据对仿真预训练模型参数进行微调，以弥合仿真与实际平台间的域偏差。

2 仿真源域的 TCN 递推建模与验证

为获取充分的训练样本以捕捉平台的宽频动力学行为，对 Simulink 中的 Stewart 平台动力学仿真模型，施加高斯白噪声作为基台 6 自由度(DoF)位姿激励信号。TCN 输入特征为当前t_k时刻基台加速度/角加速度(acc)，速度/角速度(vel)，位移/姿态(pos)，以及t_{k-1}时刻负载台速度/角速度(vel)与位移/姿态(pos)，经长度为 10 的历史窗口构建序列样本。网络采用三层膨胀因子分别为 1，2，4 的因果卷积以扩大感受野，经全局池化与全连接层输出负载台 acc 预测值。测试结果如图 1 所示，模型在仿真测试集上 6DoF 决定系数R^2均接近 1。

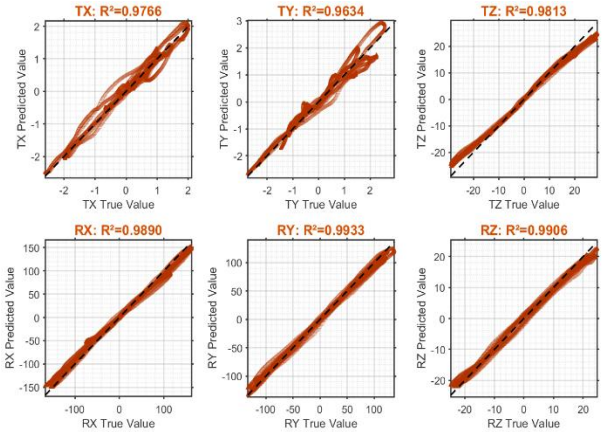


图 1　TCN 模型对 simulink 仿真数据集的预测

3 面向实验的迁移学习域适应

实验中测得加速度信号，通过非线性最小二乘正弦拟合重构角速度信号，进而积分获得速度与位移。将 8,9,10,11,13 Hz 实验数据合并后微调预训练 TCN 网络，冻结卷积层权重以保留通用时序特征，仅更新全连接层以适应实验分布偏移。在未参与的 12 Hz 数据上测试，微调后模型的均方根误差较原始仿真模型显著降低，决定系数R^2均在 0.9 以上，有效校正了相位滞后与幅值偏差。

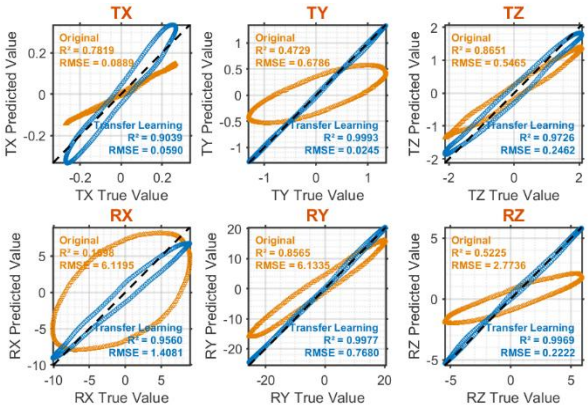


图 2　迁移学习前后模型对实验数据集的预测对比

4 结论

本文针对 Stewart 平台提出了一种基于数据驱动的动力学建模方法，基于原理仿真模型预训练 TCN 递推架构，基于正弦实验数据通过迁移学习微调模型参数，成功实现了 Stewart 平台动力学的数据驱动实验建模，能够有效替代 Stewart 平台传统动力学模型，实现对振动响应的有效预测。

参考文献 (References)：

[1] Zheng Li, Hongwang Du, Jitao Si, et al. Rigid-flexible coupling dynamic modeling and validation of a helicopter rescue simulator based on an inverted Stewart platform[J]. Ocean Engineering, 2025, Vol.319(000): 120164

收稿日期：2026 年 04 月 27 日.

基金项目：国家自然科学基金（52572426）

作者简介：周琦瑞(2003－)，男，江西省宜春市，硕士研究生，电磁悬浮与推进；

通信方式：1194897924@qq.com、联系电话：15675131389

通信作者：刘耀宗(1973－)，研究员，博士，博士生导师，磁悬浮技术，振动主动控制；yzliu@nudt.edu.cn

文章编号：486-010

基于高阶代理模型的大气隙电磁铁结构优化

尹茹沁[1]，周瑾[1]，张越[1]，金超武[1]，高晴利[1]
（1.南京航空航天大学 机电学院，江苏省 南京市 邮编 210016）

1 引言

磁悬浮系统已广泛应用于物料搬运等大气隙悬浮领域，传统电磁悬浮系统需持续提供电流，存在电流易过载、能耗损耗大等缺陷。相比之下，混合电磁悬浮系统采用永磁体吸力平衡悬浮物体自重，可有效降低能源损耗。为此，本文设计了一种应用于大气隙的单自由度混动电磁铁，通过永磁提供基础吸力，电磁进行辅助调节，实现具有大范围调节能力的大气隙混合磁悬浮系统。

2 高阶代理模型及结构优化

2.1 适用于大气隙的混动电磁铁模型

针对悬浮气隙较大的特殊需求，本文设计了一款混动电磁铁模型。

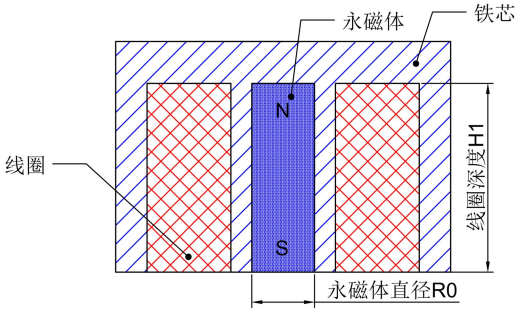


图 1 混动电磁铁模型

2.2 基于等效磁荷法的高阶代理模型

根据等效磁荷法得到该模型的基础理论模型，但由于大气隙下理论计算模型存在较大误差，采用 COMSOL 联合 MATLAB 仿真建立高阶修正项，减小理论计算误差，最终得到吸力理论模型如下。

$$F_{total}=\frac{\pi}{\mu_0}\int_0^{R_{obj}}\left[B_{sat}(R,H)\cdot\tanh\left(\frac{|w_{pm}(R,H)\cdot B_{pm}(r)+w_{coil}(R,H)\cdot I\cdot B_{coil}(r)|}{B_{sat}(R,H)}\right)\right]$$

2.3 基于遗传算法的结构优化

选取最影响电磁铁吸力的两个参数（永磁体直径、线圈高度），在代理模型的基础上进行遗传算法优化。以总吸力及吸力调节范围为目标，建立目标函数如下。

$$Fitness=\alpha\left(F_{8A}-F_{0A}\right)+\beta F_{8A}$$

在基于遗传算法的优化下迭代得到两个参数在该目标函数下的最优解。

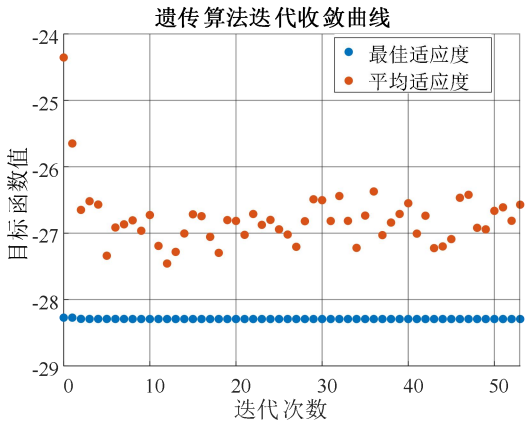


图 2 遗传算法优化收敛曲线

3 结论

本文提出并设计了适用于大气隙工况的混动电磁铁装置，通过建立代理模型降低遗传算法结构优化的成本，最终得到了兼具大气隙吸力需求和调节范围需求的混动电磁铁。

参考文献（References）：

[1] Zhao C., Oka K., Sun F., et al. Design of zero-power control strategy with resisting tilt of hybrid magnetic levitation system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11): 11394-11402.

[2] LIU You-Wei, WU Xin-Jun, SONG Yun. 基于等效面磁荷的开放式永磁磁路解析计算与有限元仿真验证[J]. 磁性材料及器件, 2021, 52(2): 17-23.

收稿日期： 2026 年 05 月 14 日.

基金项目： 项目名称（编号）；项目名称（编号）.

作者简介： 尹茹沁(2002－)，女，籍贯(江苏省、南京市)，硕士研究生，主要从事磁悬浮的研究；通信方式：E-mail：yinruqin@nuaa.edu.cn

文章编号：486–011

基于数据的磁悬挂天平轴向系统稳定裕度估计

周旭[1]， 窦峰山[1,2*]，龙志强[1,2]

(1. 国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073；2. 国防科技大学装备状态感知与敏捷保障全国重点实验室，湖南省长沙市 410073)

1 引言

磁悬挂天平系统为空气动力测试提供了一种理想的模型支撑方式。由于其悬挂系统本身是开环不稳定的，确保其闭环稳定性并使其在运行中抵御各类不确定性，是核心研究课题。然而，现有研究较少关注系统在控制器设计时的稳定性度量问题。为此，本文旨在研究一种基于轴向悬挂系统输入和全状态数据的闭环稳定裕度估计方法，并在某型磁悬挂天平上进行实验验证。

2 速度信号提取与稳定裕度计算

磁悬挂天平的轴向悬挂系统为典型的单输入单出二阶系统。若仅基于输入输出数据估计稳定裕度，由于系统状态不完全可观测，将损失关键动态信息。为此，本文在引入速度信号的基础上，对原控制器进行重构，旨在提高稳定裕度估计的精度。

本文基于移动时间窗口的迭代学习跟踪微分器(IL-TD)对速度信息进行提取。设 N_{IL} 为学习窗口的长度，则时间窗口为 $[k-N_{\mathrm{IL}},k]$ 的 IL-TD 为：

$$\begin{cases} x_1(j,l+1)=x_1(j,l)+hx_2(j,l) \\ x_2(j,l+1)=x_2(j,l)+hu_{IL}(j,l) \\ \hat{y}_1(k)=x_1(N_v,l+1) \\ \hat{y}_2(k)=x_2(N_v,l+1) \end{cases} \tag{1}$$

其中，$j\in[1,N_v]$，$l\in[k-N_{\mathrm{IL}},k]$，$N_v$ 为总迭代次数，$u_{IL}(j,l)$ 的表达式为：

$$\begin{aligned} u_{IL}(j,l)=&R^2\left(y_1(l)-x_1(j,l)\right)-2Rx_2(j,l) \\ &+L_r u_{up}(j-1,l)+L_g R^2\left(y_1(l)-x_1(j-1,l)\right) \end{aligned} \tag{2}$$

其中，$L_r\in(0,1)$ 为鲁棒系数，$L_g\in[0,1)$ 是学习增益。

设输出的增广为 $\tilde{\boldsymbol{y}}_k=\begin{bmatrix} y_k \\ \hat{y}_{2,k} \end{bmatrix}$。由于原轴向闭环系统已通过给定的控制器 $\boldsymbol{K}(z)$ 内部稳定，当引入速度的误差时，稳定控制器可以设计为：

$$\boldsymbol{K}_n(z)=\begin{bmatrix} \boldsymbol{K}(z) & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \tag{3}$$

通过选择稳定控制器 $\boldsymbol{K}_n(z)$，得到的控制信号与由原始反馈控制器 $\boldsymbol{K}(z)$ 提供的控制信号相同。

最终，轴向闭环系统稳定裕度的数据驱动表达式为：

$$\hat{b}_s(G,K)=\sigma_{\max}^{-1}\left(\mathcal{I}_{d,s}\mathcal{K}_{K,s}\right) \tag{4}$$

其中，$\mathcal{I}_{d,s}$ 为受控对象稳定像表示的数据驱动实现，可基于子空间辨识方法，通过增广的输出数据与输入数据获得；$\mathcal{K}_{K,s}$ 为控制器稳定核表示的数据驱动实现，可通过构造控制器(3)的 Toeplitz 矩阵得到[1]。

3 实验结果

图 1 显示了基于全状态信息的稳定裕度估计和基于单维输出的稳定裕度估计的结果对比。两种方法所估计的结果最终都会收敛于真实值，但本文所提出的方法在 $s=140$ 时就已经等于真实值了。对于实际工程而言，进一步减少了计算的复杂度，缩短了计算的时间。

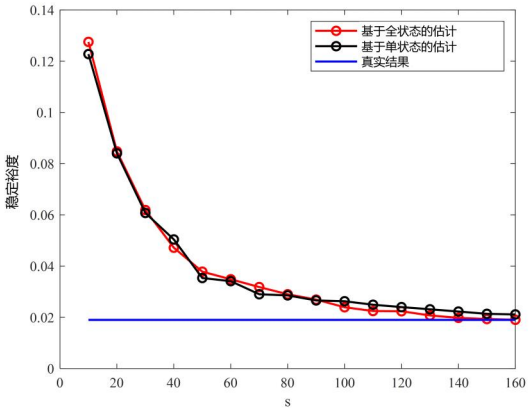


图 1 两种方法的对比

参考文献 (References)：

[1] Xu Zhou, Biao Yang, Fengshan Dou, et al. A data-driven framework for stability margin estimation in magnetic suspension and balance systems[J]. Control Engineering Practice,2026,168: 106727.

收稿日期： 2026 年 02 月 05 日.

基金项目： 国防科技大学自主创新科学基金(23-ZZCX-JDZ-25)，国家自然科学基金项目(编号: U24B20119)

作者简介： **周旭**(1997－)，男，湖南省长沙市，博士研究生，电磁悬浮与推进；

通信方式：zhouxu19@nudt.edu.cn、联系电话:15345237279

文章编号：486–012

基于物理信息高斯过程回归的磁悬挂天平系统电磁力混合建模方法

杨彪[1]，窦峰山[1,2*]，龙志强[1,2]

(1. 国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073

2. 国防科技大学装备状态感知与敏捷保障全国重点实验室，湖南省长沙市 410073)

1 引言

磁悬挂天平系统利用电磁力将飞行器模型悬挂于风洞试验段内，消除了机械支撑干扰，具有无流场干扰、全自由度控制、无接触测量等优点[1]。其性能核心在于对线圈阵列与模型内永磁体间产生的电磁力/力矩进行精确的预测与闭环控制。因此，建立能准确映射控制电流、模型位姿与最终电磁力的高保真模型，对满足现代航空航天领域对测试精度与动态稳定性的严苛要求至关重要。

2 物理信息高斯过程回归建模框架

基于物理信息高斯过程回归（PIGP）建模框架主要包括两部分：一是从物理第一性原理出发，建立未考虑磁轭影响的自洽场解析-数值模型（SC-ANM），该模型可高保真预测未考虑磁轭影响的有限元模型结果，保证整个框架的基本物理原理的正确性；在此基础上，针对 SC-ANM 与包含磁轭的有限元模型基准之间的系统性残差，利用高斯回归模型来学习这部分系统性残差并进行补偿。

3 实验验证

为评估 PIGP 模型的预测精度与泛化能力，使用独立测试集对其进行严格验证。图 1 对 PIGP 和 SC-ANM 在力/力矩分量上的预测结果与 FEM 基准值进行了比较。PIGP 的预测点紧密聚集在理想的 $y=x$ 对角线周围，展现出极佳的一致性。相反，SC-ANM 的预测点则表现出显著的离散和系统性偏差，尤其是在侧向力及所有力矩分量上。此外，PIGP 在所有分量上的 R^2 值均超过 0.985，而 SC-ANM 的 R^2 值在 T_x 分量上低至 0.53。表 1 揭示了 PIGP 模型的决定性优势。SC-ANM 的归一化均方根误差（NRMSE）在 8.3%至 13.5%之间，而 PIGP 误差都小于 2.2%。在平均绝对误差（MAE）和均方根误差（RMSE）上，也体现了数量级的改进。

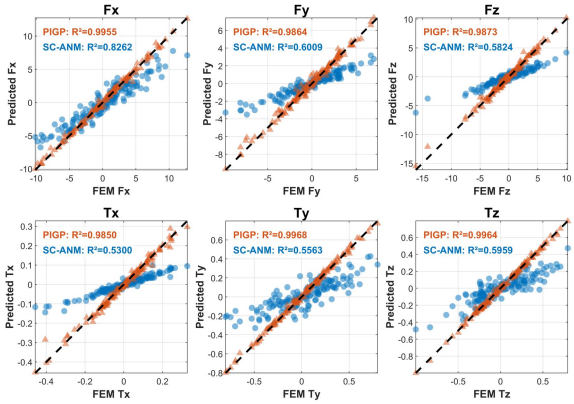


图 1 PIGP 和 SC-ANM 在力/力矩分量上的预测结果

表 1 PIGP 和 SC-ANM 误差指标统计结果

Var	Model	R^2	MAE	RMSE	NRMSE(%)
F_x	SC-ANM	0.8262	1.5141	1.9083	8.3333
	PIGP	0.9955	0.2067	0.3084	1.3467
F_y	SC-ANM	0.6009	1.4825	1.9643	11.7090
	PIGP	0.9864	0.2534	0.3625	2.1606
F_z	SC-ANM	0.5824	1.6125	2.2313	8.5397
	PIGP	0.9873	0.2616	0.3897	1.4916
T_x	SC-ANM	0.5300	0.0728	0.0958	12.2110
	PIGP	0.9850	0.0109	0.0171	2.1782
T_y	SC-ANM	0.5563	0.1717	0.2163	13.4960
	PIGP	0.9968	0.0143	0.0184	1.1495
T_z	SC-ANM	0.5959	0.1575	0.1974	11.0130
	PIGP	0.9964	0.0146	0.0187	1.0439

4 结论

本文建立 PIGP 模型，有效结合了第一性原理模型的可解释性与泛化能力，以及非参数贝叶斯回归的灵活学习能力，实现了对电磁力的高保真建模。

参考文献（References）：

[1] Biao Yang, Fengshan Dou and Wentao Xia, et al. Design and Implementation of the 5-DOF Multidimensional Pose Measurement System for the Magnetic Suspension and Balance System [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 1-12.

收稿日期： 2026 年 02 月 06 日.

基金项目： 国防科技大学自主创新科学基金（23-ZZCX-JDZ-25）；国家自然科学基金项目（编号: U24B20119）

作者简介：杨彪(1998－)，男，湖南省长沙市，博士研究生，电磁悬浮与推进；

通信方式：yangbiao16@nudt.edu.cn、联系电话:18163713144

文章编号：486–013

基于迭代学习的磁悬挂天平干扰补偿控制

刘子钰[1,2]，窦峰山[1,2]，龙志强[1,2]

(1. 国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073

2. 国防科技大学电磁悬浮与推进技术湖南省重点实验室，湖南省长沙市 410073)

1 引言

在空气动力学实验中，气流速度的快速变化不可避免地引发气动力剧烈波动。此类动态扰动不仅破坏了模型的力平衡状态，还对主动控制系统提出了极高的响应速度与补偿精度要求。传统的反馈控制策略往往依赖实时误差进行调节，在面对具有强时变性、重复性特征的气动干扰时，难以实现快速且精准的前馈补偿，导致模型姿态出现滞后振荡甚至失稳。为突破这一瓶颈，本文提出引入迭代学习控制（Iterative Learning Control, ILC）算法，充分利用风洞实验中周期性或准周期性操作条件下气动力扰动的历史数据，通过逐次迭代不断提取并逼近气动干扰的内在变化规律，构建高精度的前馈补偿信号。该方法将“学习”机制嵌入到主动抗干扰控制框架中，显著提升电磁执行机构对气动阻力的动态跟踪与抵消能力，从而在保证磁悬挂系统稳定性的前提下，大幅增强整个控制系统的动态抗干扰性能、响应速度与稳态精度。

2 迭代学习前馈补偿控制器设计

由于所采用的悬挂模型为无机翼回转体导弹构型，在平衡位置（即攻角与偏航角均为零）时，模型主要承受轴向气动阻力的作用。基于这一特性，ILC 前馈补偿器仅需针对轴向自由度进行设计，从而显著简化了学习控制器的复杂度。该轴向ILC补偿框架的结构如图1所示。

针对ILC控制，其输出预测表达式为：

$$\tilde{Y}(n)=\Lambda x(0,n)+\Phi\tilde{U}(n)=\Phi\tilde{U}(n)$$

为了使系统输出 $y(k,n)$ 的跟踪误差 $e(k,n)$ 沿迭代轴 n 渐近收敛，设计代价函数如下：

$$J=\min(E^T(n+1)QE(n+1)+\tilde{U}^T(n+1)P\tilde{U}(n+1))$$

最终推导出 ILC 的控制律为：

$$\begin{aligned}U(n+1)&=U(n)+\tilde{U}(n+1)\\&=U(n)+(\Phi^TQ\Phi+P)^{-1}\Phi^TQE(n)\end{aligned}$$

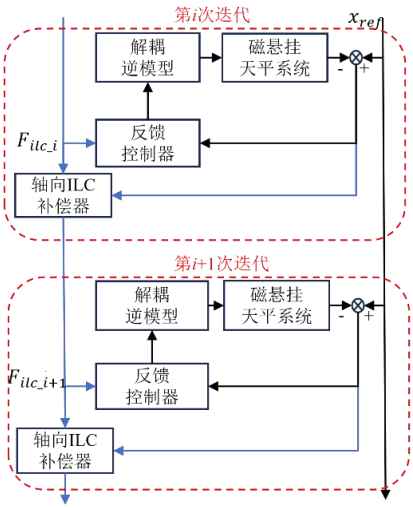


图 1 ILC 前馈补偿控制框图

3 仿真

设计 0-20m/s 的变速风洞仿真，通过迭代学习更新气动阻力扰动序列，并将其补偿至控制器中，实现轴向轨迹控制精度的提升，仿真结果如图 2 所示。

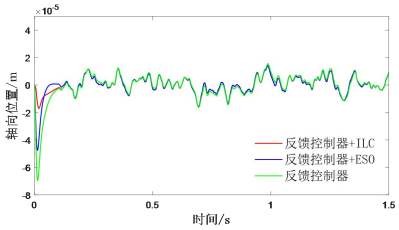


图 2 ILC 补偿的抗干扰控制效果

4 结论

应对风洞变速阶段气动力冲击时，有 ILC 补偿的控制器使得磁悬挂模型偏离平衡位置的最大偏移量下降。这说明基于 ILC 的补偿策略有效地提升了控制器对风洞变速阶段气动力的抵抗能力。

参考文献（References）：

[1] Xu Zhou, Biao Yang, Fengshan Dou, et al. A data-driven framework for stability margin estimation in magnetic suspension and balance systems[J]. Control Engineering Practice,2026,168: 106727.

收稿日期：2026 年 02 月 07 日.

基金项目：国防科技大学自主创新科学基金(23-ZZCX-JDZ-25)，国家自然科学基金项目(编号: U24B20119)

作者简介：刘子钰(1999－)，男，湖南省长沙市，博士研究生，电磁悬浮与推进；

通信方式：liuziyu1222@nudt.edu.cn、联系电话:18973754267

文章编号：486-014

超高速永磁同步直线电机牵引力与法向力分析

丁明强[1,2]，刘佩兵[1,2]，翟明达[1]，龙志强[1]
（1.国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410073
2.西北机电工程研究所,陕西省咸阳市 712099；）

1 引言

超高速电磁橇利用直线电机提供的牵引力或反推力实现牵引或制动，永磁同步直线电机作为超高速电磁橇系统牵引制动的执行系统，其牵引制动特性会直接影响系统的运行性能，同时由于直线电机牵引时产生的法向力也会对系统产生影响，因此考虑直线电机牵引制动工况及电机法向力对电磁推进系统的影响是非常必要的。

本文以时速近 1 马赫的超高速电磁橇车为研究对象，采用理论推导、 二维电磁仿真、动力学仿真等方法，得到了超高速电磁橇牵引制动特性和法向力大小，研究了直线电机牵引制动工况及电机法向力对超高速电磁橇动力学的影响，对工程实践具有指导意义。

2 直线电机牵引力和法向力分析

对于直线电机可视为将旋转电机展开，旋转电机的径向对应直线电机的法向（垂直于气隙，产生法向力），旋转电机的切向对应直线的纵向（沿运动方向，产生推力）。

切向（纵向）推力密度由正交磁场分量产生：

$$f_x = \frac{1}{\mu_0} B_x B_y \tag{1}$$

在正弦分布假设下，极距 τ 范围内的磁场能量：

$$W_m = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0} \cdot (\tau \cdot L_{eff} \cdot \delta) \tag{2}$$

转换为推力：

$$F = \frac{\partial W_m}{\partial x} \tag{3}$$

考虑磁场分布的空间周期性，引入推力波形系数和绕组系数，最终得到单位长度推力：

$$f = \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{B_\delta^2}{2\mu_0} \cdot h_m \cdot k_m \cdot \xi \tag{4}$$

直线电机的法向力可表示为：

$$F_n = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0} \cdot 2p\tau L_{eff} \cdot k_n \tag{5}$$

3 直线电机电磁场有限元仿真验证

直线电机二维电磁场有限元仿真步骤如下：

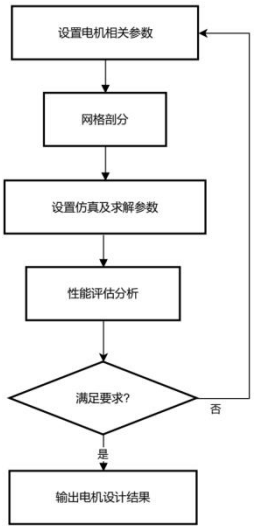


图 1 有限元仿真流程图

4 结论

针对超高速电磁橇的动力核心—直线电机采用理论推导、 二维电磁仿真和动力学仿真等方法，理论层面建立了永磁同步直线直线电机数学模型。通过将旋转电机理论拓展至直线电机，确定了直线电机推力与法向力表达式，仿真建模验证了理论分析的正确性与适用性，对推进超高速电磁推进技术的工程化应用具有直接指导意义。

参考文献（References）：

[1] 鲁军勇,马伟明著. 电磁发射用直线电机理论与技术[M]. 北京：科学出版社,2025.

[2] 李冠醇,李杰,陈强. 应用于高速滑撬的电动悬浮和电磁推进系统设计[J]. 推进技术,2017,38(7): 1468-1474.

收稿日期：2026 年 02 月 08 日.

基金项目：国家重点研发计划课题（2023YFB4302102）

作者简介：丁明强(1999－)，男，吉林省四平市，硕士研究生，电磁悬浮与推进；
通信方式：dingmingqiang@nudt.edu.cn、联系电话:13364558322

文章编号：486–015

LSM 无位置传感器矢量控制整体性能分析

金玉鑫，顾世杰，陈强，李杰
（1. 国防科技大学 智能科学学院，湖南省长沙市 410073）

1 引 言

直线同步电机(LSM)的无位置传感器控制系统是一个包含位置环、电流环与状态观测环的多环耦合系统。现有研究多集中于滑模观测器(SMO)、模型参考自适应等单一观测器设计，缺乏对“控制器-观测器”闭环整体性能的系统分析。而无感位置估计作为反馈环节，其动态特性直接影响系统稳定与动态响应。为此，本文首次将观测器等效为反馈延迟环节，对包含位置环、电流环与无感环的完整系统进行建模与性能分析。

2 基于 SMO 的无位置传感器设计

采用 SMO 对反电势进行估计，通过李雅普诺夫稳定性理论设计滑模增益，保证观测误差渐近收敛。进一步设计锁相环从估计反电势中提取位置与速度信号，构成无感反馈环节。

3 无感控制系统建模与性能分析

3.1 系统整体结构

在传统位置-电流双环矢量控制基础上，引入无感观测环节。电流环因其较高带宽可等效为一阶惯性环节。将无感观测器处理为带固定时延 T_2 的反馈环节，系统结构如图 1 所示。

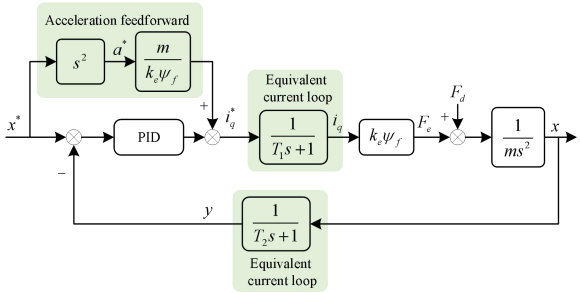


图 1 LSM 无感矢量控制系统框图

3.2 稳定性与稳态性能分析

推导系统闭环传递函数，并基于劳斯稳定判据，确定反馈时延 T_2 的稳定边界。利用终值定理分析系统在匀速、匀加速和变加速等典型运动轨迹下的跟踪性能，证明系统可实现零稳态位置误差。

$$G_{cl}(s)=\frac{(T_2s+1)(k_dk_e\psi_fs^2+k_pk_e\psi_fs+k_ik_e\psi_f+ms^3)}{ms^3(T_1s+1)(T_2s+1)+(k_ds^2+k_ps+k_i)k_e\psi_f} \tag{1}$$

3.3 动态性能分析

通过伯德图分析开环频率特性，研究 T_2 对系统相位裕度、带宽及动态响应的影响。结果表明，时延增大会降低系统相位裕度，限制控制系统带宽，影响阶跃响应速度与超调。该分析为观测器动态指标提出明确约束，可用于指导观测器参数优化。

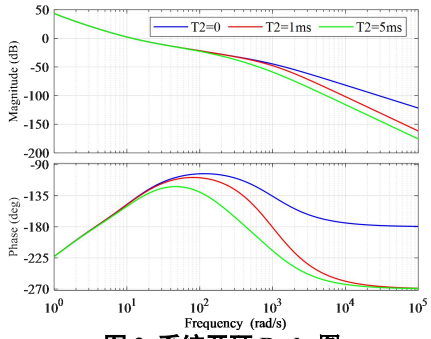


图 2 系统开环 Bode 图

4 结 论

本文对包含无感观测环节的 LSM 矢量控制系统整体进行分析。通过将观测器等效为时延环节，系统分析了反馈延迟对系统稳定与动态响应的影响。结果表明，系统虽能在一定时延内保持稳定，但仍需在设计观测器时尽可能提升动态响应速度、减小时延，以确保控制系统具有良好的跟踪性能与鲁棒性。该方法对无感控制系统性能评估与观测器-控制器协同设计具有指导意义。

参考文献：

[1] Chen Z., Dawara A. Zhang X., et al. Adaptive Sliding Mode Observer-Based Sensorless Control for SPMSM Employing a Dual-PLL[J]. IEEE Trans. Transp. Electrif., 2022, 8(1): 1267-1277.

[2] Yang Y., Sun X., Cai F. Speed Sensorless Control of IPMSM With Model Predictive Current Control Plus Finite Position Set MRAS Observer[J]. IEEE Trans. Transp. Electrif., 2025, 11(1): 4755-4764.

收稿日期： 2026 年 02 月 08 日.

基金项目： 国防科技大学自主科研基金项目（2025-ZZCX-JDZ-29）.

作者简介： 金玉鑫(1996－)，女，山东临邑，博士研究生，主要从事直线电机定位测速、无感控制技术研究；
通信方式：E-mail:jinyuxin18@nudt.edu.cn

文章编号：486-016

电磁弹射技术综述

赵智宇[1]，李久超[1]，朱瑞[1]
(1.原陆军装甲兵学院士官学校，长春　130117)

1 引言

随着科技的进步，电磁弹射技术应运而生，其通过储能单元、脉冲功率变换器与直线电机的协同工作，实现了能量转化效率的大幅提升，该技术以电磁感应原理为基础，将电能直接转化为直线运动的机械能，实现对被弹射物体的精准、高效加速，从根本上解决了传统弹射技术的不足。

2 正文

2.1电磁弹射技术的系统组成与核心原理

电磁弹射技术的核心是电能、电磁能、机械能的高效转化，通过直线电机、储能系统、脉冲功率变换系统、控制系统四大核心模块协同工作，实现对被弹射物体的平稳、精准、高效加速。

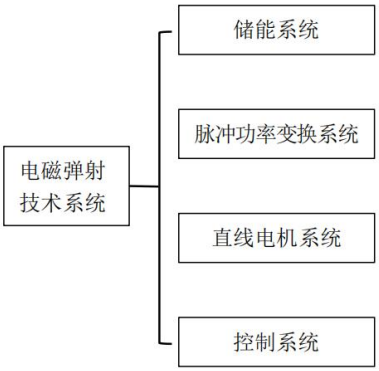


图1 电磁弹射技术系统组成图

该技术的主要原理是由电网向储能系统充电、并进行稳压与整流，实现储能的目的，在收到弹射指令后，通过脉冲功率变换系统将储能系统瞬时释放的电能转化为高频脉冲交流电，并传递给直线电机系统，直线电机产生定向电磁力，推动被弹射物体沿轨道加速，控制系统主要完成状态监测和参数调节，确保达到要求速度，而后控制活动部分制动并复位，储能系统重新充电，为后续发射做准备。

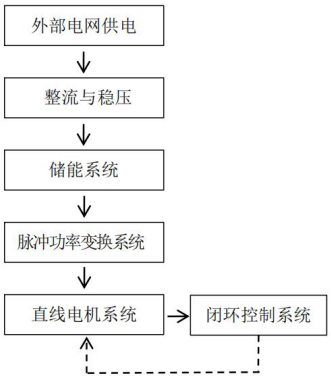


图 2 电磁弹射技术工作原理图

2.2电磁弹射技术的特点

该发射技术有响应速度快、能量转换效率高等优势，相比传统的蒸汽发射技术更符合时代的需求。

2.3电磁弹射技术的应用领域

该技术在军事、航天、民用等诸多领域得到广泛应用，典型的应用案例包括航母舰载机弹射、舰艇武器发射、微重力科学实验、全电化平台等。

3 结论

电磁弹射技术虽有很多优势，但也存在一定不足，像核心材料成本高、极端环境适应性差等。未来，电磁弹射技术有望攻克现有缺陷，实现全域普及、成本降低、性能升级，为我国国防建设与工业高水平发展提供强劲支撑。

参考文献

[1] 刘希军,张昆仑,刘国清.面向舰载机电磁弹射器的双边直线感应电机研究[J].系统仿真学报,2016,28(4):951-956.

[2] 丁国良.舰载机磁悬浮电磁弹射技术的研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.

收稿日期： 2026 年 04 月 10 日.

基金项目： 无

作者简介： 赵智宇(1991 年生)，男，内蒙古敖汉旗，讲师，硕士，主要从事装甲装备运用的研究；通信方式：E-mail:18240001797@163.com，联系电话：18240001797

文章编号：486–017

超高速线圈式永磁涡流制动性能研究

胡瀚文[1]，张德旺[2]，伍思燚[1]，赤铭昂[1]，石洪富[3]，邓自刚[1]

（1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省成都市 邮编：610031）

（2. 西南交通大学 信息科学与技术学院，四川省成都市 邮编：610031）

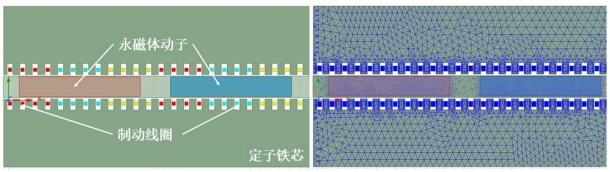
（3. 西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心，四川省成都市 邮编：610031）

1 引　言

线圈式永磁涡流制动（Coil-type permanent magnet eddy current brake, CTPMECB）因其结构简单、趋肤效应弱、性能可靠等优点，成为超高速磁浮的重要制动方式。本文首先基于周期性边界在 Maxwell 中建立全尺寸电磁仿真模型。其次，阐明了不同电阻下的制动线圈制动力-速度变化规律。最后，在 Matlab 中搭建动力学模型，分析了 1500 km/h 速度级的制动性能。

2 仿真分析

CTPMECB 的电磁仿真模型如图 1 所示，由双侧定子铁芯和永磁体动子组成。制动线圈绕组嵌装于铁芯齿槽内部，沿水平方向呈周期性阵列排布，动子永磁体则位于定子铁芯之间的间隙区域。



(a) 结构示意图　　(b) 网格剖分图

图 1 CTPMECB 二维有限元仿真

基于上述建立的仿真模型，开展了不同电阻下的制动力随速度变化规律的分析。不同电阻下的制动力曲线如图 2 所示。四种电阻的取值满足 $R_1>R_2>R_3>R_4$。随着线圈电阻的增加，转折速度 v_s（制动力最大值所对应的速度点）逐渐向右偏移，即 $v_{s1}>v_{s2}>v_{s3}>v_{s4}$。电阻越大，转折速度也越大。

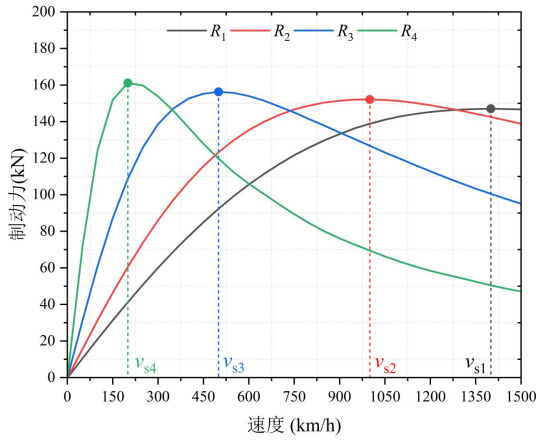


图 2 不同电阻下的制动力曲线

3 制动性能分析

利用电磁仿真模型计算不同速度和线圈电阻下的制动力。接着通过高阶多项式拟合离散数据，建立制动力与速度之间的函数关系。最后，将该函数模型封装至 Simulink 的 Fcn 模块中，用于分析不同质量及初速度下制动力、加速度、速度及位移随时间的变化规律，其 Simulink 动力学模型如图 3 所示。

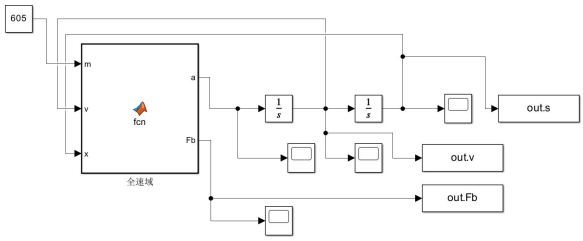


图 3 Matlab 动力学仿真

参考文献（References）：

[1]张卫华，邓自刚，毕海权，等. 低真空超高速轨道交通研究进展与思考[J]. 机车电传动，2025，(01)：1-13.

收稿日期： 2026 年 04 月 10 日.

基金项目： 四川省自然科学基金项目（2026NSFSC1312）、四川省博士后创新人才支持项目（BX202521）、高速磁浮运载技术全国重点实验室开放基金（SKLM-SFCF-2025-015）

作者简介： 胡瀚文(2001－)，男，甘肃兰州人，硕士研究生，主要从事涡流制动的研究； E-mail:hhw9900@outlook.com. 联系电话：19382052798

文章编号：486–018

抗磁悬浮隔振系统多自由度刚度协同调控方法

李永文，汪阳，徐园平
（南京航空航天大学 机电学院，江苏省 南京 210016）

1 引言

精密测量、微纳操作及光学实验等领域对低频复杂微振动抑制具有重要需求。相关对象通常具有小型化、轻量化和高集成度特征，因此亟需发展面向小载荷对象的小型化多自由度低频隔振系统。

抗磁悬浮技术具备无机械接触、低摩擦、低能耗等特点，并有望实现较低等效刚度与紧凑结构，因此，在小型化的低频隔振领域中展现出独特的应用潜力。

本文提出一种针对抗磁悬浮隔振系统的多自由度刚度协同调控方法，以提高系统在复杂多变的振动环境中的振动抑制能力。

2 正　文

2.1 抗磁悬浮隔振结构

该隔振系统主要由刚度可调的弹性环节和位移检测单元，如图 1 所示。刚度可调的弹性环节由抗磁悬浮弹性环节与刚度调节线圈对共同构成，如图 2（a）。位移检测单元由对称分布的七个霍尔传感器（A，B，C，D，E，F，G）构成，如图 2（b）。

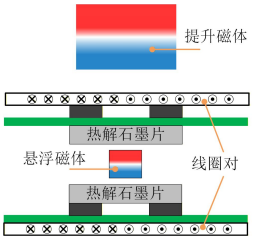
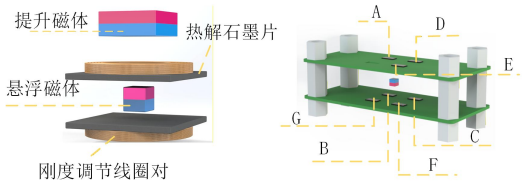


图 1 抗磁悬浮隔振系统示意图

2.1 多自由度刚度协同调控方法

当外界发生振动时，位移检测单元获取悬浮单元的多自由度位移信号，并分析出悬浮单元振动信号在各自由度频率、振幅以及加速度信号，结合开环控制下线圈电流对系统多自由度刚度的独立调控规律，以减小悬浮单元振动方向加速度、振幅为目标，控制线圈对的电流大小，实现系统刚度在指定方向上的最优配置，从而提高系统的隔振性能。



a 刚度可调的弹性环节　　b 位移检测单元

图 2 抗磁悬浮隔振系统各部分组成示意图

3 结　论

本文提出了一种基于抗磁悬浮技术的多自由度刚度协同调控方法，用于提升低频隔振系统在复杂振动环境中的抑制性能。该方法通过调节系统的多自由度刚度，实现了在不同振动方向上的最佳隔振效果，为小载荷对象多自由度低频隔振提供可行的解决方案。

参考文献（References）：

[1] Lin R ,Li Y ,Qian J , et al. Design of a vibration isolation platform for atomic force microscope based on flexural structure[J].Precision Engineering,2024,89113-120.

[2] Xiaoqing S ,Bintang Y ,Yulong G , et al. Integrated design, fabrication, and experimental study of a parallel micro-nano positioning-vibration isolation stage[J].Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2020,66.

收稿日期： 2026 年 04 月 14 日.

基金项目： 抗磁悬浮倾角敏感元件动态稳定悬浮机理与调控方法（52275537）.

作者简介： 李永文(2001－)，性别男，重庆市忠县，硕士研究生，主要从事抗磁悬浮技术的研究；通信方式：E-mail: yongwl@nuaa.edu.cn

文章编号：486–019

自感式位移传感器动态阻抗建模

冯耀琦[1]，李红伟[1]，于文涛[1]，陈信维[2]，孙坤[2]，丁印恕[2]
（1. 山东大学 电气工程学院，山东济南 250061
2. 山东明天机械集团股份有限公司，山东济南 250206）

1 引言

随着主动磁悬浮轴承转子转速的提升[1]，对自感式位移传感器的检测精度提出了更高的要求。传统的静态阻抗定义为磁轴承转子具有固定不变的位移时，磁滞、涡流等效应均达到稳态后的传感器阻抗。高转速运行的电磁轴承的转子会发生不可避免的振动，引起传感器铁磁材料内部的涡流、磁滞效应发生瞬时变化。为了获得更加精确的阻抗建模，进而在此基础上获得更加准确的输出电压模型，必须将这些物理过程的瞬时变化考虑到传感器阻抗建模内，称之为动态阻抗。

2 传感器动态阻抗的推导及分析

2.1 传感器动态阻抗推导

本研究设计了一个标称气隙为 1.2mm 的八定子磁极的径向自感式位移传感器，传感器的结构示意简图如图 1 所示：

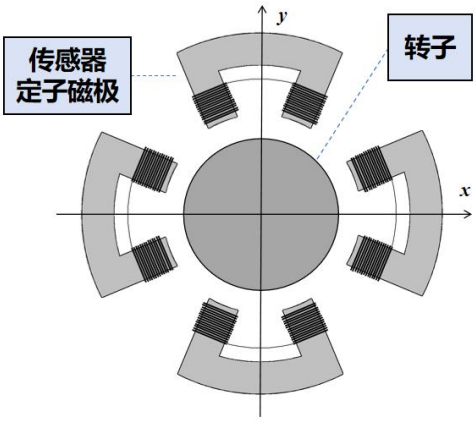


图 1 八定子磁极自感式位移传感器结构示意简图

由于转子沿 x 方向和 y 方向的位移具有对称性，本文只对转子在 x 方向发生振动位移时展开研究。设转子在 x 轴发生正弦周期振动：

$$x(t)=X\sin(\Omega t+\theta) \tag{1}$$

式中 X 为转子的振幅；Ω为转子振动的角频率，其值为 $2\pi f_1$, f_1 为转子振动的频率；θ为振动的初始相位，其取值不影响阻抗分析，取$\theta=0$。

转子发生振动时，自感式位移传感器的线圈所在磁路的气隙长度会不断地发生变化，影响磁路中磁通随激励电源正弦变化的规律，导致涡流、磁滞效应发生瞬时变化，最终影响阻抗的瞬时数值。

根据法拉第电磁感应定律、磁路欧姆定律和式(1),考虑磁路气隙长度瞬时变化带来的影响和涡流效应、磁滞效应、层间效应、漏磁及气隙边缘效应的自感式位移传感器动态阻抗推导过程如图 2 所示。

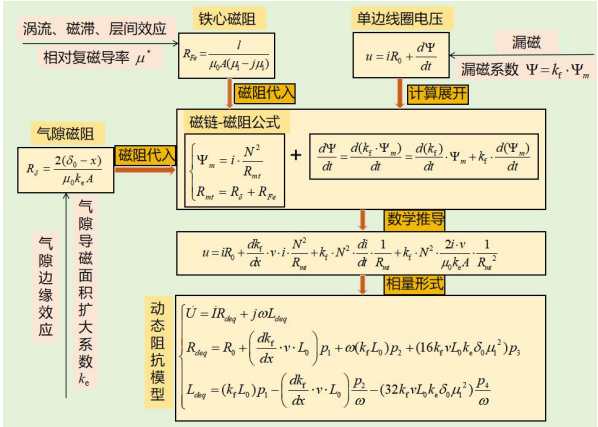


图 2 动态阻抗推导流程图

图中，l 为单边线圈磁路所在定子和转子铁心的总磁路长度；A 为磁路导磁面积；μ_0 为真空磁导率；μ_1 为相对磁导率实部和虚部[2]，k_e 为气隙导磁面积扩大系数；k_f 为漏磁系数；Ψ为单边线圈磁路的磁链，Ψ_m 为单边线圈磁路的主磁链；R_{Fe} 为铁心磁阻，R_δ为气隙磁阻；δ_0 为传感器的标称气隙；R_{mt} 为单边线圈磁路总磁阻；N 为线圈匝数；i 为线圈电流；R_0 为线圈直流电阻；L_0 为转子

收稿日期：2026 年 04 月 15 日.
基金项目：项目名称（编号）；项目名称（编号）.
作者简介：第 1 作者(2001－)，男，山东省高唐县，在读研究生，主要从事主动磁悬浮轴承自感式位移传感器的研究；通信方式：E-mail:202414638@mail.sdu.edu.cn、联系电话:19510184865

不发生位移且忽略铁心磁阻的基准电感；v 为线圈的振动速度；ω 为线圈激励电源角频率，其值为 $2\pi f_0$，f_0 为正弦电压激励源频率；R_{deq} 为等效动态电阻；L_{deq} 为等效动态电感；p_1、p_2、p_3 和 p_4 为数学推导得到的阻抗计算多项式，其数值随 x 的变化而变化。

2.2 传感器动态阻抗与传统静态阻抗对比

取 X 为 0.6mm、f_0 为 50kHz、f_1 为 1000Hz 对所设计的传感器的动态阻抗和传统静态阻抗进行对比，其中，气隙导磁面积扩大系数 k_e 和漏磁系数 k_f 取值通过参考文献[3]中基于实测数据的工程经验拟合公式计算得到。进行了一个振动正弦周期的动态电感和电阻与传统静态电感和电阻随位移的变化趋势的对比，如图 3 和图 4 所示，其误差分析如图 5、图 6 所示。

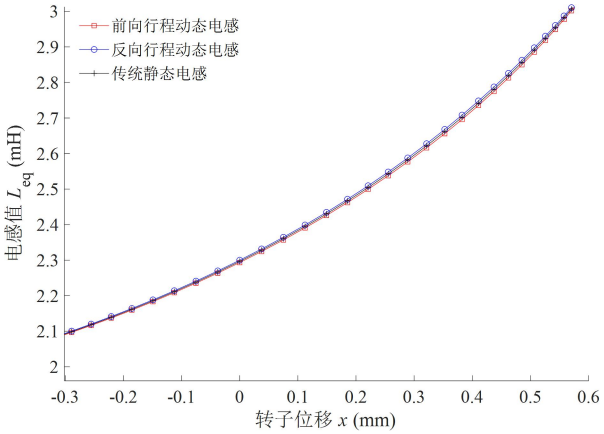


图 3 动态电感与静态电感对比图

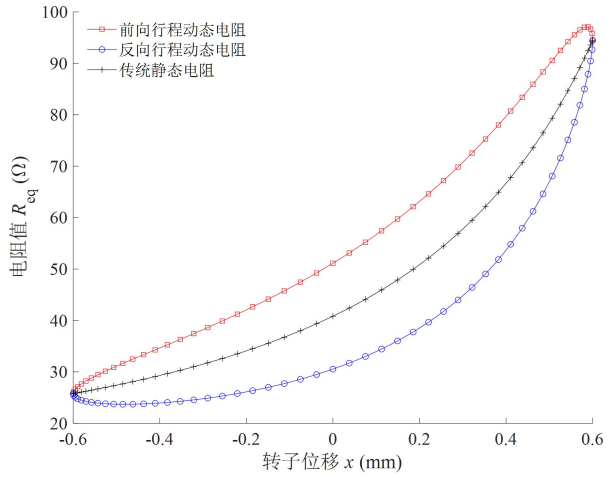


图 4 动态电阻与静态电阻对比图

规定传感器转子的前向行程为转子靠近定子磁极的运动过程，反向行程为转子远离定子磁极的运动过程。由图 2 的动态阻抗模型可知，其中含有的速度项 v 是矢量，具有方向属性，其数值在同一位置的不同行程符号相反，这就导致动态阻抗数值会在同一位移处略有不同。

分析图 3、图 5 可知，在前向行程中，动态电感的数值均略低于传统静态电感，在反向行程中，其数值均略高于传统静态电感，三者变化趋势基本相同，前向行程与反向行程的动态电感数值与传统静态电感的数值相对误差在 0.4mm 处达到最大值，约为 0.23%。另外，在±0.6mm 处，转子振动速度为 0，动态电感的数值等于传统静态电感的数值。

分析图 4、图 6 可知，在前向行程中，动态电阻的数值均略高于传统静态电阻，在反向行程中，其数值均略低于传统静态电阻，三者变化趋势基本相同，前向行程与反向行程的动态电阻数值与传统静态电阻的数值相对误差在位移原点处达到最大值，其中，前向行程动态电阻与传统静态电阻的最大相对误差约为 20%，反向行程动态电阻与传统静态电阻的最大相对误差约为 34%。同样的，在±0.6mm 处，转子振动速度为 0，动态电阻的数值等于传统静态电阻的数值。

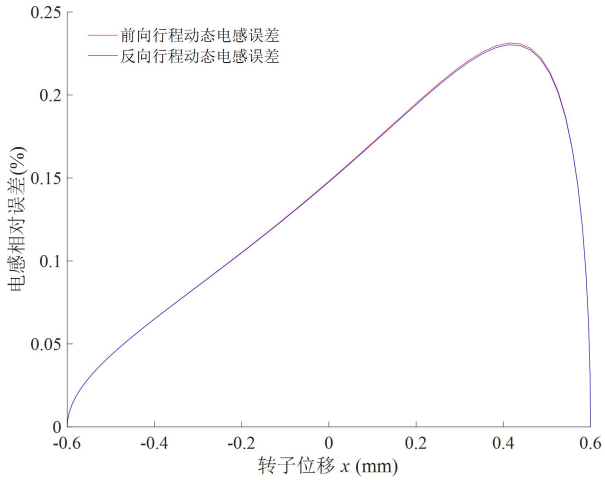


图 5 动态电感与静态电感相对误差图

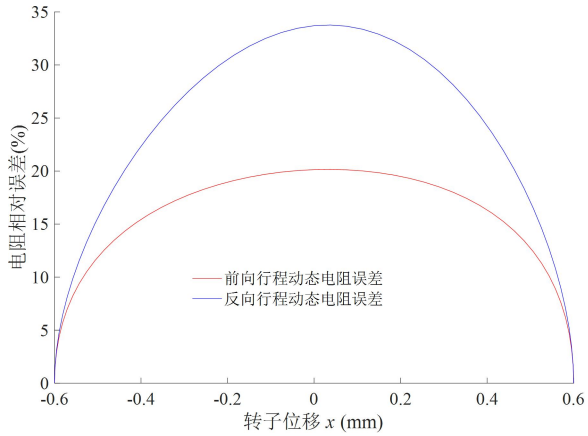


图 6 动态电阻与静态电阻相对误差图

3 结 论

本文针对一个适用于主动磁悬浮轴承的、标称气隙为 1.2mm 的八定子磁极的径向自感式位移传感器，研究了转子发生振动位移时，其暂态的涡流、磁滞等物理过程对线圈阻抗产生的影响，定义考虑了上述影响的线圈阻抗为动态阻抗。在给定工况下研究对比了动态电阻和电感与传统静态电阻和电感的变化趋势和误差关系，得出结论：

(1) 动态阻抗含有的转子振动速度项会导致

转子在同一位移量不同的位移方向下,动态阻抗的数值略有区别，且与传统静态阻抗同样有区别，但趋势相同。即前向行程时，动态电阻的数值高于传统静态电阻，动态电感的数值低于传统静态电感；反向行程时，动态电阻的数值低于传统静态电阻，动态电感的数值高于传统静态电感。动态电阻与传统静态电阻的相对误差在位移原点处达到最大值，前向行程的动态电阻与传统静态电阻最大相对误差约为 20%，反向行程的动态电阻与传统静态电阻最大相对误差约为 34%。动态电感与传统静态电感的相对误差在 0.4mm 处达到最大值，前向行程与反向行程的动态电感与传统静态电感最大相对误差均约为 0.23%。

(2) 在±0.6mm 处，转子的振动速度为 0，动态电感和动态电阻的数值均等于传统静态电感和电阻，即 v=0 时，动态阻抗模型退化为传统静态阻抗模型。

参考文献（References）：

[1] Hongwei Li,Zongqiang Ren,Rui Chen,et al. Influence of structural parameters on the static performance of self-inductive radial displacement sensor[J]. Measurement Science and Technology,2022,Vol.33(12): 125106.

[2] 陈信维.转子周期振动时自感式位移传感器的建模与动态性能研究[D]. 山东大学,2024.DOI:10.27272/d.cnki.gshdu.2024.007576.

[3] 任宗强. 自感式位移传感器全气隙范围磁路建模[D]. 山东大学,2023.

文章编号：486-020

基于霍尔阵列的磁悬浮平面电机设计

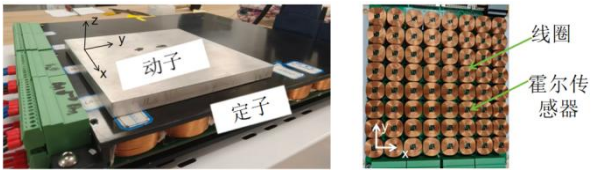
王佳佳，刘春，吴昊，王轶博，徐逢秋
（武汉大学电子信息学院，湖北省武汉市邮编 430070）

1 引言

磁悬浮平面电机（MLPM）在超精密加工与半导体制造领域具有重要应用价值，其六自由度位姿实时检测是实现高精度控制的关键。本文基于二维海尔贝克阵列、多相线圈、霍尔传感器阵列，采用解析磁场模型进行位姿解算，实现了磁浮平面电机的稳定悬浮与六自由度运动控制。

2 正文

本文首先搭建了磁浮运动台闭环控制系统，实物如图 1 所示。该系统由定子、动子、驱动箱及 NI PXI 控制器共同构成。其中定子集成 64 个驱动线圈与 64 路霍尔传感器，动子采用二维海尔贝克阵列，驱动箱内部集成 H 桥驱动模块，控制器负责运行位姿解算与闭环控制算法。



a 动磁式平面电机实物图　　b 霍尔阵列与线圈阵列

图 1 MLPM 控制系统实物图

二维海尔贝克阵列磁场具有正弦分布特性，通过选取呈矩形对称分布的 4 个 3D 霍尔传感器信号 Bx、By 平方的差分组合以及几何位置关系来解算六自由度位姿，z 方向位移与绕 x 转角解算公式如公式(1)(2)所示，同理可求出其余 4 个自由度。

$$z = -k\,ln\left(\sqrt{B_{x1}^2 + B_{y1}^2 + B_{x2}^2 + B_{y2}^2}\right) \tag{1}$$

$$Rx = \arcsin\left(\frac{z_{m1}' - z_{m2}'}{y_2 - y_1}\right) \tag{2}$$

其中，Bxi，Byi 为第 i 个霍尔传感器的 x、y 轴磁场分量；y1,y2 为传感器的安装坐标。

通过 Hall 阵列测量磁浮动子的六自由度位置与姿态，实现了闭环控制，其可以实现小范围运动控制。实验结果表明，静态悬浮且高度不超过 10mm 时，x、y 和 z 三个平移方向的标准差均小于 0.04mm，R_x、R_y 和 R_z 三个旋转方向的的标准差均小于 0.035°。在单轴阶跃响应测试中（如图 2 所示），x 与 y 轴均能实现稳定跟随，x、y 方向运动对 z 方向位移存在轻微耦合影响，最大误差为 0.145 mm。在阶跃冲击时刻 x 或 y 存在明显超调，但能快速趋于稳定。

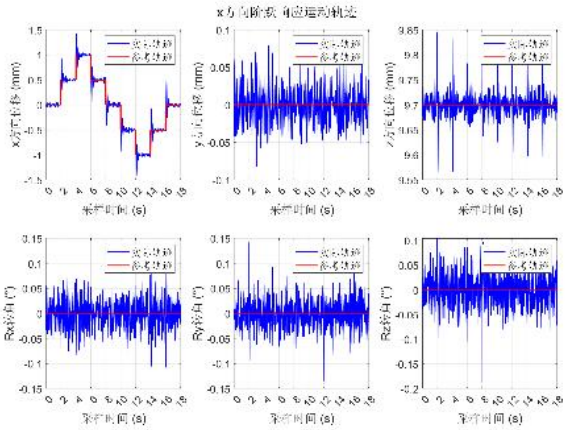


图 2 x 方向阶跃响应测试结果

3 结论

本文基于解析磁场模型与霍尔传感器阵列，实现了二维海尔贝克磁悬浮平面电机在小范围内的稳定悬浮与基本运动控制，验证了解析模型位姿解算方法的有效性。同时发现，系统在运动中存在由磁场耦合、模型失配与传感器误差引起的轻微抖动。为此，后续拟引入反向传播神经网络，以数据驱动方式替代解析模型，实现更鲁棒的位姿解算，进一步抑制运动抖动，提升长行程工况下的轨迹跟踪精度与系统鲁棒性。

参考文献 (References)：

[1]Wang Y, Liu C, Huang Z, et al. Hall-Array-Based Position and Posture Measurement of Mover in MLPM With Extendable Stroke[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2026, 75:1-13.

收稿日期：2026 年 04 月 15 日。

作者简介：王佳佳(出生年 2002)，女，四川省达州市，硕士在读，主要从事磁悬浮平面电机控制的研究；通信方式：E-mail:2025282120141@whu.edu.com、联系电话:18981459781

文章编号：486-022

磁悬浮飞轮储能技术在火电调频中的应用研究

祝保红[1]，李树胜[2]，李光军[3]
(1.北京泓慧国际能源技术发展有限公司，北京市 邮编 010000；)

1 引言

当前火力发电厂调频技术正处于传统技术深度优化、火储联合规模化应用、智能控制全面升级的阶段，核心目标是解决传统火电响应慢、调节精度低、频繁调频损伤设备的痛点，适配高比例新能源并网下的电网调频需求。传统火电机组仍是电网调频的基础力量，核心依赖一次调频（DEH 调速系统）与二次调频（AGC 自动发电控制），但受热力惯性限制，存在明显瓶颈。火储联合是当前火电调频升级的核心路径，通过储能快速响应弥补火电短板，已从示范进入规模化应用阶段。

2 磁悬浮飞轮在火电调频工程中的应用

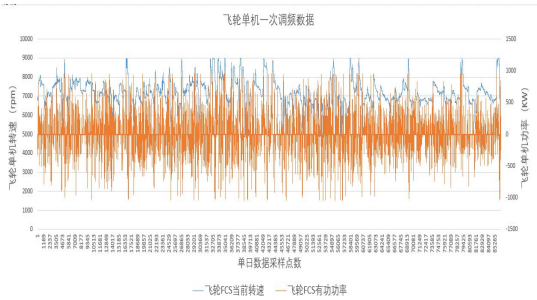
2.1 飞轮储能技术简介

飞轮储能作为一种物理型储能技术（如图1），具有即收即用、峰谷平移、网压稳定等优势，而磁悬浮轴承的应用从根本上消除了传统机械轴承的摩擦损耗，循环寿命突破 20 年，能够完美适配电网严苛的运维要求与长周期服役需求。能够有效提升火电机组调频合格率，避免电网考核罚款，对电质量提升具有重要的工程应用价值与战略意义。

1 飞轮储能系统组成

2.2 工程应用验证

榆能杨伙盘煤电一体化电厂（常被称作“杨火盘电厂”）是陕西榆林能源集团旗下的大型现代化煤电项目，以多项全球首创技术为核心亮点，装机 2×660MW 超超临界燃煤空冷机组，机组一次调频合格率不足 70%，为此配套 8*1MW 磁悬浮飞轮机组进行一次调频补偿，飞轮投入后一次调频合格率提升至 85%，经济效益显著。飞轮投入功率曲线如图 2.



2 飞轮储能装置单日运行能量数据

3 结　论

试点运行数据显示，飞轮储能单元单日累计充放电动作次数达 2000 次以上，最高达 5000 次，运行状态稳定，表明该系统能够适配火电机组高频次、短时充放的运行工况，运行可靠性高。

参考文献 ：

[1] 梁志宏、洪烽，电力级大功率飞轮储能系统耦合火电机组调频技术研究及工程应用[J]，动力工程学报，2024，44(6) 8518-8530.
[2] 张文政、王玮、高嵩，考虑火电运行平稳性的飞轮储能辅助二次调频控制策略[J]，动力工程学报，2024，44(6) ，919-928.
[3] 李 展，刘 磊，杨振勇， 基于过程分解的飞轮储能-火电互助式一次调频分析[J].储能科学与技术，2023，12（9），2854-2861.

收稿日期： 2026 年 04 月 21 日.
基金项目： 项目名称（编号）；项目名称（编号）.
作者简介： 祝保红(1985－)，男，天津市，中级工程师，硕士，主要从事磁悬浮技术、飞轮储能的研究；通信方式：E-mail:zhubaohong2008@126.com、联系电话:13811941436

文章编号：486-023

绕组分段式磁力驱动系统电磁耦合特性研究

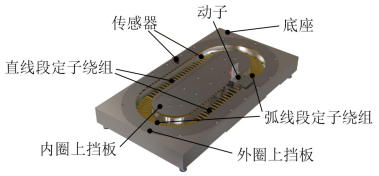
徐成昊，赵川，王鑫，孙凤，唐诗奇，赵轩本
（沈阳工业大学 机械工程学院，辽宁 沈阳 110870）

1 引言

绕组分段式磁力驱动系统是一种初级绕组按需分段激励、次级动子长距离运行的特种电机驱动系统，具有能量利用率高、定子损耗小、系统扩展性强等优势，在轨道交通、柔性物流输送及自动化生产线等领域具有广阔的应用前景。本文针对Halbach阵列动子与分段式定子绕组系统，基于动定子间的电磁耦合关系，提出了一种面向不同耦合区间的分段过渡控制策略。

2 绕组分段式磁力驱动系统

绕组分段式磁力驱动系统主要由底座、分段式定子绕组和动子三部分组成，如图1所示。动子上永磁体组的排列方式采用Halbach阵列，具有提高磁场利用率并降低漏磁等优点，同时还具有气隙磁场分布不均匀、边缘效应显著及耦合长度变化敏感性强等特性，导致动子在跨越分段定子时产生复杂的推力波动、离心扰动以及动态摩擦阻力突变等现象。因此，有必要对动子运动过程中的电磁推力及其空间分布特性进行系统受力分析，建立系统的动力学模型。



1 绕组分段式磁力驱动系统

建立系统的动力学模型：

$$\psi_{fd}=\frac{2}{3}\left[\psi_{fA}\sin\theta+\psi_{fB}\sin\left(\theta+2\pi/3\right)+\psi_{fC}\sin\left(\theta-2\pi/3\right)\right]$$

$$\psi_{fq}=\frac{2}{3}\left[\psi_{fA}\cos\theta+\psi_{fB}\cos\left(\theta+2\pi/3\right)+\psi_{fC}\cos\left(\theta-2\pi/3\right)\right]$$

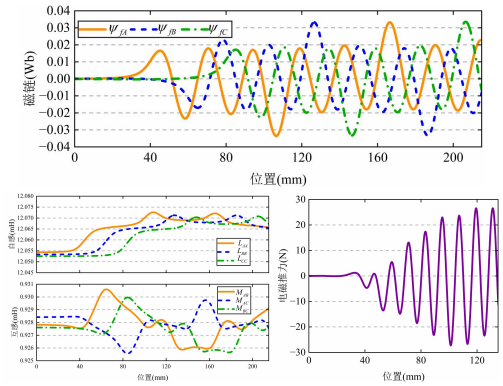
$$\psi_d=L_d i_d+\psi_{fd}\qquad \psi_q=L_q i_q+\psi_{fq}$$

$$F_e=\frac{3\pi}{2\tau}\left(\psi_{fd1}i_{q1}+\frac{\partial\psi_{fq1}}{\partial\theta}i_{q1}+\psi_{fd2}i_{q2}+\frac{\partial\psi_{fq2}}{\partial\theta}i_{q2}\right)$$

$$m\frac{dv}{dt}=F_e-F_l(x)-Bv$$

3 基于动定子耦合关系电磁参数仿真

利用有限元模型（FEM），对系统三相绕组的磁链、电感，电磁推力，进行仿真分析。随动子不同位置，即动定子不同耦合关系的电磁参数变化规律如图2所示.重点分析磁链分布、电感变化及电磁推力等关键因素在过渡过程中的动态演化特性及其对推力波动的影响机理。



2 基于动定子耦合关系电磁参数仿真

4 结　论

本文介绍绕组分段式磁力驱动系统的结构和特性、动力学模型和基于动定子耦合关系电磁参数仿真。结果表明，动子在与定子耦合关系不同时产生复杂的推力波动、离心扰动以及动态摩擦阻力突变等现象，在后续的控制策略中需要进行抑制。

参考文献（References）：

[1] YU W, HUANG X, ZHANG Y, et al. Minimum-spacing optimized winding switching control for winding-segmented PMLSM with multiple movers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2026, 73(2): 2885-2895.

[2] WANG Z, HUANG X, YU W, et al. Thrust and thermal characteristic of multi-mover annular permanent magnet synchronous motor with segmented PCB stator[C]//2025 28th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2025: 568-573.

收稿日期：2026年04月23日.

基金项目：辽宁省教育厅项目（LJ212510142001）.

作者简介：徐成昊(2002年－)，男，山东省高青县，硕士，主要从事磁力驱动系统及其控制的研究；
通信方式：E-mail: cn_xu@smail.sut.edu.cn、联系电话：18265886985

文章编号：486-024

具有重力补偿功能的平板型音圈电机研究

张培峰[1]，张赫[1,2]，吴徐正[1]

（1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院，黑龙江省哈尔滨市 邮编 150001

2. 哈尔滨工业大学 苏州研究院，江苏省苏州市 215104）

1 引言

针对光刻机工件台等高端装备对精密微动台高精度低功耗的悬浮与驱动需求，本文对一种具有重力补偿功能的平板型音圈电机开展研究。传统的磁悬浮微动台采用音圈电机进行主动悬浮，始终存在用于抵消微动台重力作用的功率损耗[1]。为此，本文在平板型音圈电机的结构基础上，在初级线圈中增加永磁体，利用初次级永磁体之间产生的被动悬浮力抵消动子及负载的重力，从而降低主动控制所需的持续电流和系统功耗。该设计保留了音圈电机响应快、无摩擦、行程灵活的优点[2]。

2 电机结构与特性分析

2.1 重力补偿原理与电机结构

本方案通过在音圈电机的初级线圈内部区域引入一块充磁方向为水平方向的永磁体，从而产生被动悬浮力。

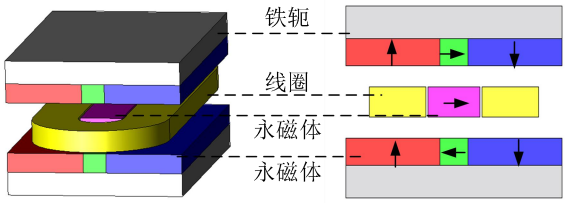


图 1 具有重力补偿功能的音圈电机结构图

2.2 仿真方案设计

为探究永磁体尺寸对重力补偿效果及悬浮力稳定性的影响，本文通过改变中间永磁体的大小及数量，仿真对比了四种永磁体配置方案，分析了各方案在不同运动位置下的悬浮力输出特性。

2.3 输出悬浮力对比分析

仿真结果表明，四种方案均能实现一定程度的被动重力补偿。其中，两块组合方案（27.5mm×28mm×70mm，共两块）的悬浮力随运动位置的变化较小，能够较好地满足悬浮力不因运动产生过大波动与衰减的设计目标。图 2 为输出悬浮力曲线图。图 3 为两块组合方案示意图。

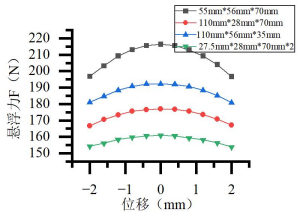


图 2 输出悬浮力曲线

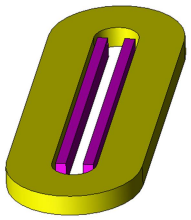


图 3 两块组合方案定子示意图

3 结 论

本文针对主动悬浮技术存在持续损耗的问题，设计了一种具有重力补偿功能的音圈电机。通过仿真对比了四种中间永磁体尺寸方案，其中两块永磁体的组合方案能够获得最稳定的悬浮力输出，但其输出力较小。后续工作将在此基础上进一步优化永磁体尺寸与拓扑结构，探索在保证稳定波动的前提下提升输出力的设计方法。

参考文献（References）：

[1] 廖飞红. 精密运动台主动减振与重力补偿技术的研究[D]. 华中科技大学, 2012.

[2] 柴嘉伟, 贵献国. 音圈电机结构优化及应用综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(06):1113-1125.

收稿日期： 2026 年 04 月 27 日.

基金项目： 项目名称（编号）；项目名称（编号）.

作者简介： 张培峰（2001－），男，河南省濮阳市，学生，硕士研究生，主要从事平板型音圈电机的研究；通信方式：E-mail 25s106120@stu.hit.edu.cn、联系电话：13644608378

文章编号：486–025

多源公差驱动的无铁心永磁直线电机力性能退化评估方法

于水水[1]，张赫[1, 2]，牟俊任[1]，张培峰[1]

(1.哈尔滨工业大学 电气工程及其自动化学院，黑龙江省哈尔滨市 150001

2.哈尔滨工业大学 苏州研究院，江苏省苏州市 215104)

1 引言

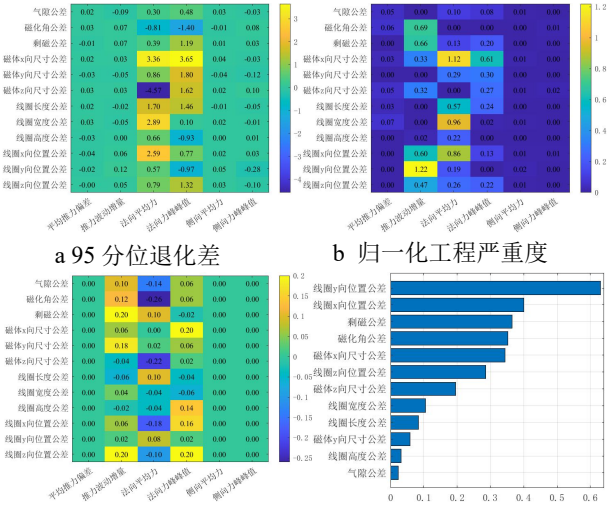
无铁心永磁同步直线电机具有推力密度高、响应快和无齿槽效应等优点，广泛应用于精密运动系统。然而，实际制造和装配过程中存在气隙公差、永磁体剩磁公差、磁化角公差等多源公差。这些公差会引起电机力性能退化，影响电机运行精度和稳定性。现有研究通常侧重于单一公差的影响分析，难以反映多源公差同时存在时的真实退化规律，特别是不同公差之间可能存在耦合作用，使得传统单因素分析难以直接应用于工程公差分配与稳健设计[1]。因此，有必要建立一种全公差条件下的无铁心永磁同步直线电机力性能退化评估方法。

2 评估方法

首先建立含多源公差的无铁心永磁同步直线电机三维力计算模型，通过 Monte Carlo 方法随机生成多组公差样本，并计算各样本下的三维电磁力。随后提取平均推力、推力波动、法向力平均值、法向力峰峰值、侧向力平均值和侧向力峰峰值 6 个指标，并将其转化为相对于名义工况的性能退化量。其次，为评价各类公差的工程影响，将每类公差按样本幅值划分为低公差组和高公差组，分别取最低 25% 和最高 25% 样本。通过比较两组性能退化量，计算 95 分位退化差和超限风险增量。进一步将 95 分位退化差按工程限值归一化，得到工程严重度，并结合指标权重建立综合工程影响排序。

3 评估结果

图 1 依次给出 95 分位退化差、归一化工程严重度、超限风险增量和综合工程影响排序。上述指标分别用于表征风险侧退化幅值、不同性能指标的统一严重程度、超限概率变化以及各类公差的综合影响水平。



a 95 分位退化差　b 归一化工程严重度

c 超限风险增量　d 综合工程影响排序

图 1 多源公差对电机力性能退化的工程影响评估结果

4 结　论

多源公差下电机力性能退化评估结果表明，平均推力偏差整体较小，电机主推力对多源公差具有一定鲁棒性；推力波动和法向力指标更为敏感。综合排序显示，线圈 y 向位置公差、线圈 x 向位置公差、剩磁公差、磁化角公差和磁体 x 向尺寸公差影响较大，应作为后续制造装配和公差控制的重点。

参考文献（References）：

[1] J. W. Jansen, E. A. Lomonova and J. C. Compter, "Analysis of the parasitic forces and torques in coreless linear motors," 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing, China, 2011, pp. 1-6.

收稿日期： 2026 年 04 月 27 日.

基金项目： 无

作者简介： 于水水(2001-)，男，河南省周口市，硕士研究生，主要从事直线电机建模的研究；

通信方式：E-mail:17657636310@163.com

文章编号：486-026

磁悬浮微动台用变磁阻作动器动态磁滞建模研究

吴徐正[1]，张赫[1,2]，张培峰[1,2]
(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院，黑龙江省哈尔滨市 邮编 150001
2. 哈尔滨工业大学 苏州研究院，江苏省苏州市 215104)

1 引言

变磁阻作动器因力密度高、响应快、功耗低，在磁悬浮微动台精密驱动中优势显著。但动态激励下，铁心磁通饱和、涡流迟滞与依赖磁通变化率的动态磁滞强耦合，使磁通－电流－位移关系呈现强非线性，直接降低定位精度与运动平稳性[1]。传统磁等效电路未计入速率相关磁滞与动态损耗，模型精度不足。为此，本文聚焦动态磁滞建模，对计入磁饱和与漏磁的改进非线性磁等效电路模型开展研究，以精准表征动态电磁特性。

2 动态磁滞特性与非线性机理分析

建立变磁阻作动器磁路耦合关系，明确三类核心非线性：

1. 铁心 B－H 曲线引起的磁通饱和非线性；
2. 磁通变化相关的动态磁滞与局部涡流迟滞；
3. 槽漏磁、齿间漏磁导致的磁通分流与旁路效应。

通过磁路分解与磁通路径分析，给出动态磁滞对电磁力与绕组电感的影响规律。

3 考虑动态磁滞的非线性磁等效电路建模

采用 Jiles-Atherton 动态磁滞模型描述依赖磁通变化率的磁滞特性，构建永磁偏磁与线圈励磁分离的非线性磁等效电路，核心思路如下：

1.将磁路划分为永磁体支路与激励线圈支路独立建模，分别表征偏磁磁通与控制磁通的产生与传递路径。

2.主磁路铁心采用分段非线性磁阻，由 B－H 曲线迭代计算饱和磁导率，准确表征磁饱和效应；气隙磁阻作为主磁阻参与公共磁路耦合。

3.两路激励分别配置对应漏磁导并联支路，并统一引入 Jiles-Atherton 动态磁滞环节，形成完整耦合磁路方程组[2]。

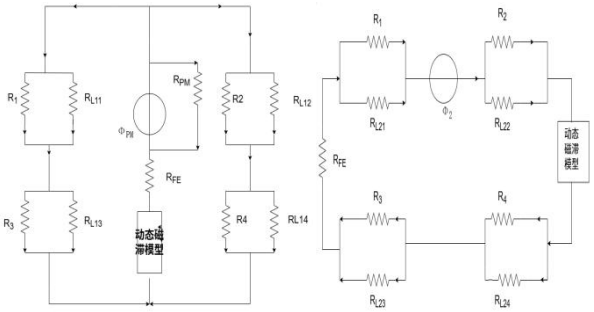


图 1 单独永磁体等效模型[1][2]　图 2 单独线圈等效模型[1][2]

4 结论

所提模型同时计入磁通饱和、漏磁与依赖磁通变化率的动态磁滞，可准确描述变磁阻作动器动态电磁行为。该建模方法适配磁悬浮微动台高速高精度控制需求，为后续磁滞补偿与高精度控制器设计提供精确模型基础。

参考文献：

[1] 陈安林,张鸣,朱煜.超精密微动台变磁阻电机建模[J].中国电机工程学报,2015,35(20).
[2] 胡兰雄. 精密磁阻作动器磁滞建模与控制研究[D].华中科技大学, 2018.

收稿日期：2026 年 04 月 27 日.
基金项目：无.
作者简介：**吴徐正**(2002－)，男，江西省鹰潭市，学生，硕士研究生，主要从事变磁阻作动器的研究；通信方式：E-mail:wxz2946067030@qq.com、联系电话:15180091482

文章编号：486–027

用于磁悬浮隔振系统的集成式多自由度音圈电机设计

娄月轩[1]，张赫[1,2]，张培峰[1]，蔡浩然[1]
(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院，黑龙江省哈尔滨市 邮编 150001
2.哈尔滨工业大学 苏州研究院，江苏省苏州市 215104)

1 引　言

在六自由度磁悬浮隔振系统中，一般需要多个电机才能稳定地实现精确的位置和振动控制[1][2]。然而，多个独立装配的电机会增加系统结构的复杂性与控制系统设计的复杂性[3]。此外，各个音圈电机之间还会产生相互干扰。如果相邻的电机沿水平方向运动，则两侧电机的气隙将不对称。这会降低音圈电机的推力线性度及控制精度，从而影响隔振系统的整体性能。

电机间的相互干扰同样会带来其他问题。气隙较小会对相邻的音圈电机造成机械约束，限制整个隔振系统的行程范围。因此目前隔振系统中使用的音圈电机通常需要较大的气隙。而大气隙音圈电机需要更多体积的永磁体来维持磁场。这将增大电机的整体尺寸，增加成本，并降低推力密度。

2 电机设计

如图 1 所示，本文所提出的电机能够同时产生两个方向的力。它集成了三个关键功能：降低系统刚度、适应不同载荷以及实现稳定悬浮。

为了减少电机间的相互干扰，集成式多自由度音圈电机采用了辅助永磁体。它无需消耗外部能量即可实现定子位置的自动调节。这种设计还实现了更小的气隙，从而减少了所需的永磁体用量。

辅助永磁体能够使定子能够在不消耗能量的情况下实现自动位置调整，以保证电机左右气隙是对中的。每个辅助动子永磁体都会受到两侧辅助定子永磁体的斥力。当电机左右气隙不对称时，两侧的斥力会产生差值，定子会受到与动子偏置方向相同的力，使定子沿导轨随动子一起移动，最终使气隙重新对称。

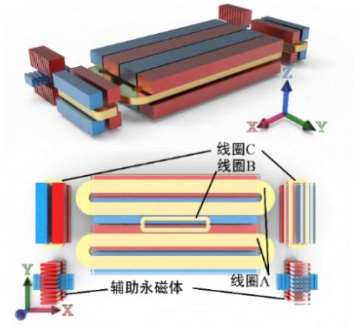


图 1 电机的结构

3 结　论

本文介绍了一种集成式多自由度音圈电机。该电机能够降低磁悬浮隔振系统的结构复杂度与整体装配精度需求，并可适应不同载荷与工作条件。电机的定子还具有被动式自动调节机构，可以减少与其他电机的干扰。此外，所提出的集成式多自由度音圈电机还具有气隙小、尺寸紧凑、推力密度高和成本低等优点。本文通过有限元仿真对该电机进行了分析，并验证了其有效性。

参考文献 (References)：

[1] H. Zhang, B. Kou, Y. Jin, and et al., “Modeling and analysis of a new cylindrical magnetic levitation gravity compensator with low stiffness for the 6-dof fine stage,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp. 1–1, 2014.
[2] C. H. Chen, Y. F. Hu, H. C. Wu, and et al., “Parametric design and experiment of maglev actuators for microgravity vibration isolation system,” International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 58, no. 3, pp. 319–335, 2018.
[3] Q. Q. Wu, N. Cui, S. F. Zhao, and et al., “Modeling and control of a six degrees of freedom maglev vibration isolation system,” Sensors, vol. 19, no. 16, Aug. 2019.

收稿日期：2026 年 04 月 28 日.
基金项目：国家自然科学基金项目（52377044）；中国黑龙江省自然科学基金项目（YQ2024E025）.
作者简介：娄月轩(1995－)，男，辽宁省东港市，学生，博士，主要从事电磁隔振、电磁减振的研究；通信方式：E-mail:2505824176@qq.com、联系电话:15776869893

文章编号：486–028

一种直线驱动用新型永磁导轨研究

娄月轩[1]，张赫[1,2]，张培峰[1]，蔡浩然[1]
（1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院，黑龙江省哈尔滨市 邮编 150001
2. 哈尔滨工业大学 苏州研究院，江苏省苏州市 215104）

1 引　言

直线驱动具有操作简便、时间常数小、效率高等特点。与普通旋转电机相比，直线电机无需其他中间装置即可将电能转化为直线运动机械能。直线导轨作为辅助外部机械子系统，在直线驱动的研发、测试、生产和使用过程中至关重要。直线导轨的作用是支撑和引导运动部件，确保它们能够沿给定方向进行往复直线运动。大多数传统机械导轨采用滚动体结构。滚动体在滑块和导轨之间滚动，将摩擦系数降低到传统滑动导轨的五十分之一左右。然而，传统机械导轨在重载下的摩擦仍然不可忽视。过大的负载会直接缩短导轨的使用寿命。承受更大负载的唯一方法是增大导轨尺寸。同时，传统机械导轨在日常使用中也需要定期维护。恶劣的运行环境也会对传统机械导轨造成损坏。相比之下，磁力导轨不存在这些问题。这是因为磁力导轨利用磁场力使运动部件悬浮[1]。通过增强磁场，完全可以在有限的空间内实现极高的承载能力[2]。而且，磁力导轨无需日常维护。由于不存在实际的物理接触，它更能适应恶劣的运行环境。

2 结构原理及特性分析

本文提出了一种新型永磁导轨拓扑结构，如图 1 所示。该结构采用双边设计，能够在有限的空间内充分增强悬浮力。此外，上下滑块中均设有瓦片状永磁体，用于增强导轨内部磁场，从而进一步提升悬浮力。同时，其 V 形滑块结构确保导轨能够自动回正，提高导轨的精度。这与其他永磁导轨所不具备的。

本文主要采用有限元软件 JMAG 进行分析。通过有限元仿真分析可知，初始状态下竖直支撑方向的悬浮力为 87.2 N，其他两个方向的侧向力很小。此外，还获得了非工作轴位移对悬浮力的影响规律，结果如图 2 所示。

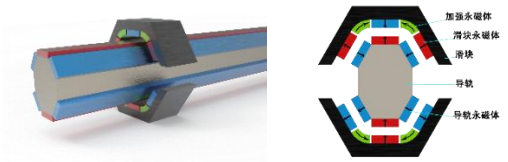


图 1 永磁导轨的结构

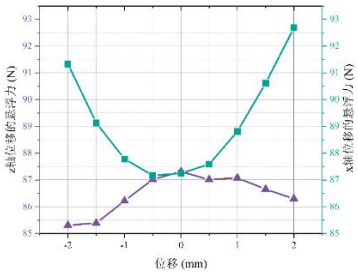


图 2 仿真分析结果

3 结　论

本文设计了一种新型磁导轨，该导轨能够产生较大的悬浮力，可用于线性驱动器的测试和支撑应用。本文阐述了该永磁导轨的拓扑结构及其特点，并分析了不同轴向位移下永磁导轨的悬浮力特性。需要注意的是，本文所提出的永磁导轨单独无法稳定悬浮，需要配合主动导向机构一同使用。

参考文献（References）：

[1] Feng YC, Zheng J, Deng ZJ, et al. Double-layer quasi-Halbach guideway with NdFeB and ferrite materials for HTS Maglev[J]. Journal of Alloys and Compounds, 929.

[2] Song H, Zheng J, Liu M, et al. Optimization and Design of the Permanent Magnetic guideway With the High Temperature Superconductor[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2006, 16(2):1023-1026.

收稿日期：2026 年 04 月 28 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（52377044）；中国黑龙江省自然科学基金项目（YQ2024E025）.

作者简介：娄月轩(1995－)，男，辽宁省东港市，学生，博士，主要从事电磁隔振、电磁减振的研究；通信方式：E-mail:2505824176@qq.com、联系电话:15776869893

文章编号：486-029

磁悬浮直驱无油涡旋压缩机模糊滑模控制器设计

孙凤[1,*]，于佳乐[1]，史策[1]，金俊杰[1]，徐方超[1]，柯丽[2]（沈阳工业大学电气学院）
（1.沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870)

摘要：为提高磁悬浮直驱无油涡旋压缩机轨迹跟踪精度，本文提出自适应模糊滑模控制方法。在传统滑模控制器中引入饱和函数抑制抖振，并设计模糊逻辑系统，根据跟踪误差及其变化率在线调整控制参数，增强自适应能力。Simulink 仿真表明，在跟踪半径 1mm、转速 300r/min 的圆形轨迹时，所提控制器能使动涡盘实际轨迹与理论轨迹高度吻合，实现了快速、平稳、高精度的跟踪，验证了方法的有效性。

关键词：磁悬浮，无油涡旋压缩机，轨迹跟踪，滑模控制。

Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller Design for Maglev Direct-Drive Oil-Free Scroll Compressor

SUN Feng[1,*], YU Jiale[1],SHI Ce[1],JIN Junjie[1],XU Fangchao,KE Li[2]
(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870,)

Abstract: This paper proposes an adaptive fuzzy sliding mode control (AFSMC) method for trajectory tracking in a maglev direct-drive oil-free scroll compressor. Building on conventional sliding mode control with a saturation function to reduce chattering, a fuzzy logic system is designed to adaptively adjust control parameters online based on tracking error. Simulation results for a 1 mm radius, 300 r/min circular path demonstrate close alignment between actual and desired trajectories, validating the method's effectiveness in achieving fast, stable, and high-precision tracking.

Key words:Maglev,Oil-free Scroll Compressor,Trajectory Tracking,Sliding Mode Control.

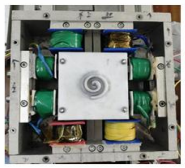
1 引言

为满足洁净压缩气体的高端需求，涡旋压缩机无油化是关键。传统方案难以实现“真无油”[1]。磁悬浮技术凭借其无接触、高精度的优势，为此提供了理想路径[2]。然而，磁悬浮系统的开环不稳定性使其高精度轨迹跟踪面临挑战。传统滑模控制虽鲁棒性强，但存在显著抖振问题[3]。为此，本文提出一种自适应模糊滑模控制方法，旨在抑制抖振，提升轨迹跟踪的综合性能。

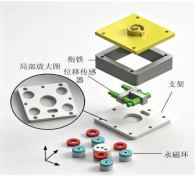
2. 模糊滑模控制器研究内容

2.1 结构及工作原理

磁悬浮直驱式无油涡旋压缩机的驱动装置结构如图 1 所示，三组电磁铁和衔铁组成径向平面电磁驱动单元，通过差动控制驱动单元保证动静涡盘按照预定的轨迹进行移动，径向电磁驱动装置可以完成两个直线运动和一个转动的非接触驱动方式，实现动涡盘的防自转功能，四组上下对称分布的永磁环安装在支架的四个凹槽内形成永磁随变机构，利用斥力实现动涡盘的轴向非接触支撑。



a 驱动装置结构



b 压缩机结构

图 1 磁驱动装置及压缩机结构

2.2 模糊滑模控制器设计

基于牛顿-欧拉定律，并综合考虑差动电磁驱动力、永磁径向辅助力及等效粘性阻尼，建立动涡盘在 X、Y 平动及绕 Z 轴转动（θ）三个自由度上的核心动力学方程如下：

$$\begin{cases} m\ddot{x}=F_{x1}+F_{x2}+4F_m-c\dot{x} \\ m\ddot{y}=F_y+4F_m-c\dot{y} \\ J\ddot{\theta}=[(F_{x2}-F_{x1})H+4F_mL]\theta-c\dot{\theta} \end{cases} \quad (1)$$

式中，F_{x1}、F_{x2}为 X 方向线性化电磁驱动力，F_y为 Y 方向线性化电磁驱动力；$4F_m$为总径向辅助力；$c\dot{x}$、$c\dot{y}$、$c\dot{\theta}$分别为 X、Y 平动及绕 Z 轴自转方向的等

收稿日期：2026 年 04 月 28 日.

基金项目：国家自然科学基金面上项目（No.52375258）资助

作者简介：孙凤(1978－)，男，三级教授，博士，主要从事磁悬浮、机电一体化的研究；通信方式：E-mail:sunfeng@sut.edu.cn、联系电话 1890404010

效粘性阻尼力。

首先定义 x，y 方向的误差：

$$\begin{cases} e=x_d-x \\ \dot{e}=\dot{x}_d-x \end{cases} \tag{2}$$

选取滑模面为

$$s=ce+\dot{e} \tag{3}$$

式中，s 为滑模面变量，c 为滑模面参数，需满足 c＞0 以达到 e 快速收敛到 0 的目的。

控制律如下：

$$u=pe+d\dot{e}-ksat(\frac{s}{\Delta}) \tag{4}$$

式中，c,d>0 为控制参数；k>0 为滑模切换增益；Δ>0 为边界层厚度，sat(.)为饱和函数。

引入误差 e 和误差变化率e_c为输入，Δp、Δd、Δk、ΔΔ为输出的模糊控制器，模糊规则表如下：

表 1 Δp 模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 Δd 模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PB
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	ZO	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NM	NB	NS	ZO
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 3 Δk 模糊规则表

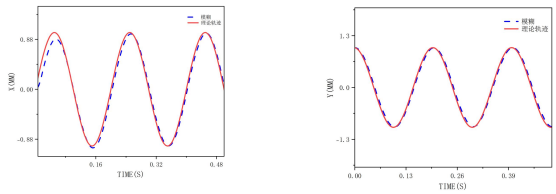
e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NM
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NM	NM	NB
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NB	NB
PB	ZO	NS	NM	NM	NB	NB	NB

表 4 ΔΔ模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO	PS
NS	NM	NM	NS	ZO	ZO	PS	PM
ZO	NM	NS	ZO	ZO	ZO	PS	PM
PS	NM	NS	ZO	ZO	ZO	PS	PM
PM	NM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

2.3 模糊滑模控制器仿真

为验证所提出的模糊滑模控制器的有效性，在 Simulink 中搭建轨迹跟踪模型。设定动涡盘跟踪一个半径为 1mm、转速为 300r/min 的基准圆形轨迹。对所设计的控制器进行仿真，仿真结果表明动涡盘的实际运行轨迹与期望的圆形理论轨迹高度重合，所设计的控制器在全局上具备了卓越的轨迹跟踪能力，能够驱动动涡盘精确复现预设的平动圆周运动。



a x 方向轨迹跟踪　　b y 方向轨迹跟踪

图 2 轨迹跟踪仿真

3 结　论

本文提出的自适应模糊滑模控制方法经仿真验证，在 1mm 半径、300r/min 的圆形轨迹跟踪中，实现了动涡盘轨迹的高度吻合，稳态误差小于±0.015mm，证明了其在精度、抖振抑制和平稳性方面的有效性。

参考文献：

[1] 史策，徐方超，孙凤，等。磁力涡旋压缩机永磁随变机构的力学特性 [J]. 西南交通大学学报，2022, 57 (3):597-603

[2] 翟明达，张博，李晓龙，等。基于模糊 PID 控制的准零刚度磁悬浮隔振平台的设计与实现 [J]. 西南交通大学学报，2023, 58 (4): 886-895.

[3] 靖永志，冯伟，王森，等。基于自适应非奇异终端滑模的悬浮控制策略 [J]. 西南交通大学学报，2022, 57 (3): 566-573.3

文章编号： 486-030

主动电磁悬架用圆筒型永磁直线电机研究

赵冶[1]，张赫[1,2]，牟俊任[1]，刘宇航[1]

1.哈尔滨工业大学 电气工程及其自动化学院，黑龙江省哈尔滨市 150000；

2.哈尔滨工业大学 苏州研究院 江苏省苏州市 215104

1 引言

汽车在道路上行驶过程中会受到不同的干扰，例如道路不平顺、滚动阻力、空气阻力、制动阻力、以及车轮转动过程中受到的侧向作用力和内部摩擦力，这些干扰都会影响车辆的乘坐舒适性和操纵性。车辆悬架系统是弹性连接车身与车桥的重要部分，起到了支撑车身、动态减振、传递力矩的功能[1]。因此，悬架系统的性能优劣对车辆平顺性和安全性起关键作用。主动电磁悬架利用永磁体和线圈的相互作用来抑制汽车车身的振动，具有结构简单、响应迅速、噪声小、不需要任何润滑等优点，可以大幅度提高汽车的乘坐舒适性[2]。直线电机作动器直接输出直线运动，无需多余的动力转换系统，具有结构简单紧凑、传动效率高、响应迅速等优点。本文针对电磁悬架用直线电机在高推力密度与低推力波动方面的实际需求，对一种圆筒型永磁直线电机开展相关研究，以满足目前汽车悬架对舒适性和操纵性的更高需求。

2 结构与特性分析

2.1 结构设计

本文中对主动电磁悬架用直线电机的设计目标与结构参数如下。

表 1 主动电磁悬架作动器设计指标

参数	指标
电机外径	200mm
初级铁心长度	180mm
电机行程	±50mm
气隙	2mm
持续推力	2500N
峰值推力	4500N
推力波动	2%

圆筒型永磁直线电机由初级铁心、初级绕组、次级永磁体组成，如图 1 所示，其中初级绕组采用三相绕组，次级永磁体采用 Halbach 结构。

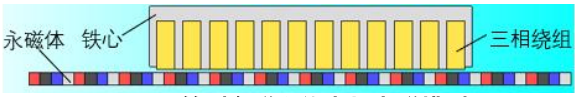
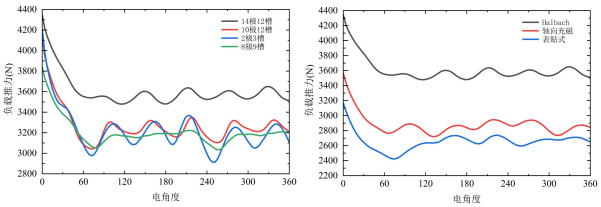


图 1 圆筒型永磁直线电机电磁模型

2.2 性能分析

不同极槽配合、不同永磁体充磁方式都对电机的性能有着显著的影响，对不同极槽配合下的分数槽电机性能进行仿真比较，可以观察到 14p12s 结构在推力性能上具有显著优势。分别对永磁体采用表贴式结构、轴向充磁结构、Halbach 结构时电机性能进行对比，Halbach 结构工作气隙磁密更高、漏磁更小。14p12s Halbach 结构方案具有最佳的推力性能，此时电机平均推力为 3656.1N，推力波动为 1.64%。



a 不同极槽配合推力曲线　　b 不同充磁方式推力曲线

图 2 不同结构电机推力特性曲线

3 结　论

本文针对汽车主动电磁悬架用圆筒型永磁直线电机进行研究，通过对不同极槽配合、永磁体充磁方式的电机性能，得到兼顾高推力密度与低推力波动的设计方案。

参考文献（References）：

[1] 郜浩楠，徐俊，蒲晓晖，等. 面向新能源汽车的悬架振动能量回收在线控制方法[J]. 西安交通大学学报，2020，54(04)：19-26.

[2] 韦伟，李保佐，于松建. 车用电磁悬架系统的结构设计与优化[J]. 机床与液压，2024，52(10)：110-115.

收稿日期： 2026 年 04 月 29 日.

基金项目：

作者简介： 赵冶(2000－)，男，黑龙江省绥化市，博士研究生，主要从事直线电机本体设计与优化研究；通信方式：wkzhy1117@163.com、联系电话 15645551117

文章编号：486-031

磁悬浮隔振台建模与鲁棒控制

蔡浩然[1]，张赫[1,2]，娄月轩[1]，刘宇航[1]

1.哈尔滨工业大学 电气工程及其自动化学院，黑龙江省哈尔滨市 150000；

2.哈尔滨工业大学 苏州研究院 江苏省苏州市 215104

1 引言

磁悬浮隔振台利用电磁原理实现多自由度协同运动，能够在高真空与高洁净环境下稳定运行，在光刻机等高端装备中具有重要应用价值[1]。然而，该平台在六自由度运动控制中面临多重扰动问题，包括音圈电机推力波动、安装误差与质心偏移导致的解耦不彻底等，严重制约了其在高性能隔振系统中的工程化应用[2]。本文针对上述问题，开展控制算法研究，以实现高精度与强鲁棒性。

2 控制策略研究

2.1 系统建模与解耦控制

磁悬浮隔振台采用四组音圈电机矩形对称驱动，以平台上表面几何中心为解算点进行六自由度运动控制。实际系统中，质心与解算点不重合，各电机驱动力存在空间耦合，直接影响控制精度。

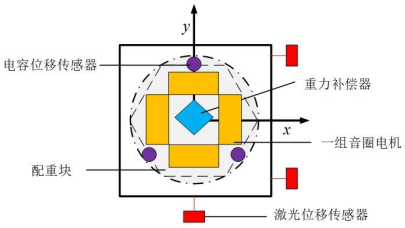
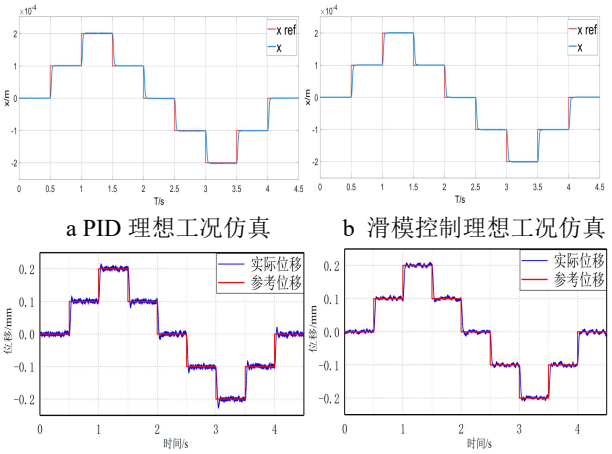


图 1 隔振台基本结构

为此，从位置相关耦合与力相关耦合两个维度建立六自由度动力学模型，前者描述质心旋转导致解算点的附加位移，后者建立各电机驱动力到质心合力/力矩的映射。在此基础上，设计位置解耦矩阵与力解耦矩阵，将解算点处的六维指令控制力分配至四组电机，使多输入多输出系统转化为六个独立单通道，为各自由度控制器独立设计提供基础。

2.2 控制器设计与仿真

在解耦基础上，分别设计基于 ITAE 准则的 PID 控制器与基于超螺旋算法的二阶滑模控制器。在 Simulink 环境中搭建完整的六自由度控制系统仿真模型，于理想工况和非理想工况下对比验证两种控制器的轨迹跟踪精度、动态响应及抗干扰能力。



a PID 理想工况仿真　b 滑模控制理想工况仿真

c PID 非理想工况仿真　d 滑模控制非理想工况仿真

图 2 不同控制方法在不同工况下仿真结果

3 结　论

仿真结果表明，基于超螺旋算法的二阶滑模控制器通过将切换项嵌入高阶导数，从原理上消除了传统滑模的抖振问题，在保留强鲁棒性的同时实现了优于 PID 的轨迹跟踪精度。在引入寄生力扰动与传感器噪声的非理想工况下，二阶滑模控制器仍可保持无超调、调节时间短、稳态波动小的控制性能，验证了该策略在复杂工况下的鲁棒性与工程适用性。

参考文献（References）：

[1] 姜龙滨，丁润泽，丁晨阳，等. 光刻机运动台控制方法研究进展[J]. 激光与 光电子学进展, 2022, 59(09): 45-57.

[2] 李黎川，丁玉成，卢秉恒. 超精密磁悬浮工件台及其解耦控制[J]. 机械工 程学报, 2004, 40(9): 85-88.

收稿日期： 2026 年 04 月 30 日.

基金项目：

作者简介： 蔡浩然(2000－)，男，黑龙江省鸡西市，硕士研究生，主要从事电机驱动控制研究；通信方式：1310819279@qq.com、联系电话 15946725133

文章编号：486-032

三自由度洛伦兹平面电机冷却结构设计与分析

张维[1]，张赫[1,2]，张培峰[1]
(1.哈尔滨工业大学 电气工程及其自动化学院，黑龙江省哈尔滨市 150001
2.哈尔滨工业大学 苏州研究院，江苏省苏州市 215104)

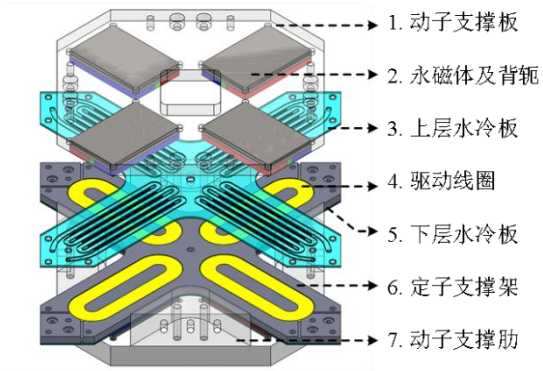
1 引　言

受到安装空间的限制，光刻机用三自由度洛伦兹平面电机往往通过设计较大的绕组电流密度，以达到系统对电磁推力密度的极高需求，然而在相对封闭的环境中，绕组铜损带来的温升不仅会导致绕组绝缘老化、产生永磁体退磁等不可逆损伤，甚至还将影响光刻机系统中激光干涉仪的测量精度及工件台的定位稳定性。

2 正　文

2.1 冷却结构设计

本文所设计的三自由度洛伦兹平面电机相当于由四个音圈电机电磁单元依次旋转 90 度后的集成电机。为了兼顾平面电机冷却效果和机械结构紧凑性要求，设计如图所示冷却结构。在定子线圈的上下两侧均布置有扁平状的铝合金冷却板，将电机的定子和动子传热路径分隔，每块冷却板由上下两片薄板组合而成，两者之间形成水流通道，单侧水冷板高度仅为 1.6mm。



1 三自由度洛伦兹平面电机结构

2.2 冷却性能分析

建立包含多层绕组线圈的高精度电机温度场仿真模型，利用 CFD 仿真方法对比分析横向水道和纵向水道两种冷却方案下的流体特性与温度分布。并建立电机的热网络模型，实现对关键部件温度变化的快速预测，并与 CFD 仿真结果进行对比验证，为电机冷却结构的工程应用提供理论依据。

表 1 两种冷却方案性能对比

参数名称	冷却方案 1	冷却方案 2
绕组最高温度	58.78 ℃	58.34 ℃
冷却板最高温度	23.31 ℃	24.41 ℃

3 结　论

围绕三自由度洛伦兹平面电机的温升抑制问题开展了系统研究。针对额定电流密度达 20.43 A/mm² 的平面电机定子线圈设计了纵向与横向两种强迫水冷结构方案，通过 CFD 仿真得到线圈内铜层最高温度控制在 58.22℃～58.78℃，水冷板温度分布均匀，纵向水道方案在压力损失和流速均匀性方面略优。所构建的热网络模型与 CFD 仿真法相比内层铜温度预测误差仅为 2.37%。

参考文献（References）：

[1] 胡楚雄，周冉，付宏，等. 集成电路装备光刻机发展前沿与未来挑战[J]. 中国科学：信息科学, 2024, 54(01): 130-143..

[2] ZHANG He, KOU Bao-quan, GE Qingwen, et al. Design and Analysis of a High Thrust Linear Voice Coil Motor Using for the Stiffness Test of Linear Motor Servo System[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(2): 1-5.

收稿日期：2026 年 04 月 30 日.
基金项目：无.
作者简介：张维(2000 年)，女，黑龙江省林口县，无，硕士在读，主要从事平面电机的研究；通信方式：E-mail:807738972@qq.com

文章编号：486-033

电磁悬架用圆筒型直线电机涡流效应分析

刘宇航[1]，张赫[1,2]，赵冶[1]

(1.哈尔滨工业大学 电气工程及其自动化学院，黑龙江省哈尔滨市 150001

2.哈尔滨工业大学 苏州研究院，江苏省苏州市 215104)

1 引 言

圆筒型永磁直线电机是汽车主动电磁悬架的核心作动部件。电机运行中铁心产生的涡流损耗不仅影响效率与温升，还会产生电磁阻尼力，导致推力输出下降并影响控制精度。悬架系统在主动工作与被动馈能两种状态下运行速度差异显著[1]，涡流效应的影响程度也随之变化。本文针对悬架用圆筒型直线电机的涡流问题开展研究，分析不同极槽配合下的涡流特性，并提出相应的抑制方案。

2 涡流特性分析与抑制

2.1 空载与负载涡流特性对比

以 14 极 12 槽和 20 极 12 槽两种无背铁 Halbach 结构电机为对象，进行涡流效应分析。两种电机均采用实心铁磁材料 S45C。首先对空载涡流力进行分析，两种电机涡流力均随速度增加而增大，但增幅逐渐趋缓。20 极 12 槽电机空载涡流力明显低于 14 极 12 槽电机。在工作速度 1m/s 时，20 极 12 槽电机的空载涡流力为 280.1N，而 14 极 12 槽电机为 693.5N。

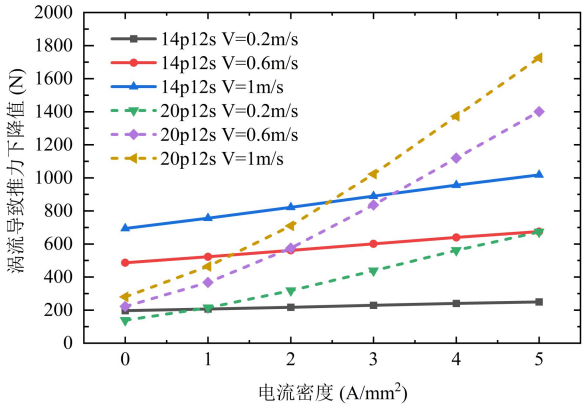


图 1 不同电流密度下涡流效应引起的推力下降曲线

然而负载工况下呈现相反趋势，图 1 给出了考虑涡流效应前后两种电机的推力下降值随电密变化的曲线。当工作速度为 1m/s 时，两种电机的推力下降值均随电密增大而增加，且 20p12s 电机的推力下降幅度显著大于 14p12s 电机：电密为 5A/mm²时，20p12s 电机推力下降达 1726.3N，14p12s 电机为 1018N。

2.2 铁心叠片方式对涡流的抑制效果

为抑制涡流损耗，本文提出初级齿部采用硅钢片 50CS350 轴向叠压、轭部保持实心铁 S45C 的混合结构方案，具体结构如图 2 所示。1m/s 负载工况下，14p12s 电机推力由完全实心结构的 1917.4N 提升至 2312.3N，齿部涡流损耗由 775.3W 降至 440.3W；20p12s 电机推力由 1882.5N 提升至 2371.1N，齿部涡流损耗由 1833.2W 降至 1330.4W。如图 3 所示，14p12s 电机采用混合叠压后齿部涡流明显减小，验证了该方案的有效性。

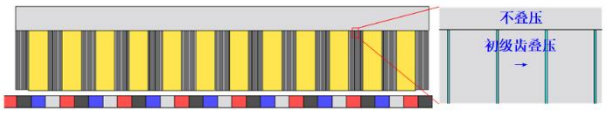


图 2 混合叠压结构示意图

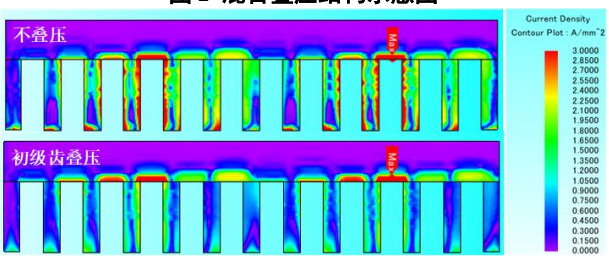


图 3 14 极 12 槽电机初级铁心电流密度云图

3 结 论

本文针对悬架用圆筒型直线电机的涡流问题，对比分析了 14 极 12 槽与 20 极 12 槽两种无背铁 Halbach 结构电机在空载和负载工况下的涡流特性，进一步研究了初级齿部叠片、轭部实心的混合结构对涡流损耗的抑制效果，结果表明该方案可有效降低齿部涡流损耗并提升负载推力。

参考文献（References）：

[1] Gysen, B. L. J , et al. "Design Aspects of an Active Electromagnetic Suspension System for Automotive Applications." IEEE Transactions on Industry Applications 45.5(2009):1589-1597.

收稿日期：2026 年 04 月 30 日.

基金项目：

作者简介：刘宇航(2001－)，男，安徽省太和市，硕士生研究生，主要从事电磁悬架用直线电机本体设计；通信方式：2802318526@qq.com、联系电话 13943733765

文章编号：486–034

基于H_∞控制的电磁式混合型动力吸振器系统设计研究

赵海峰[1,2]，宋春生[1,2]

（1. 武汉理工大学 机电工程学院，湖北省 武汉 430070；2. 湖北省磁悬浮工程技术研究中心，湖北省 武汉 430070）

1 引言

现阶段，在电磁式动力吸振器系统设计研究方面，主要分为半主动、主动、混合型三类。其中，电磁式半主动型动力吸振器研究虽已成熟，但其不可避免被动型制振措施的劣势，存在控制频宽窄、控制效果有限等问题[1]；而电磁式主动型动力吸振器存在耗能高、结构复杂等问题[2]。针对上述问题，本文提出一种新型的电磁式混合型动力吸振器系统，为后期设计工作频带宽的电磁式动力吸振器提供参考。

2 基于H_∞理论的混合控制系统最优设计

在达到被动系统最优设计前提下，本文通过H_∞控制理论可达到有效抑制频率固定的干扰信号的目的。H_∞控制方法则需设计一个如图 1 所示的闭环控制系统来抑制干扰信号d，设计H_∞控制器需要已知控制通道$G(s)$。在进行H_∞控制系统的设计时，要考虑稳定性与性能等多个要求，而H_∞控制器设计的关键在于解决混合灵敏度问题。混合灵敏度问题可简单地看作是，通过合理选择三个加权函数W_1、W_2、W_3，以求解出一个使系统满足稳定性和性能要求的控制器K。

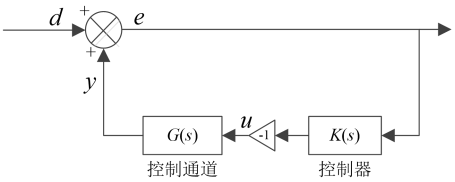


图 1 反馈控制原理框图

3 结 论

对设计的H_∞控制器进行实验验证。实验结果表明，当干扰频率低于 14Hz 时，相较于被动型动力吸振器，混合型动力吸振器能较好发挥控制效果，其最高可达 7dB；当干扰频率为 14Hz 至 16.5Hz 之间时，被动型与混合型动力吸振器均有较好的控制效果；当干扰频率为 16.5Hz 至 18Hz 之间时，仅有混合型动力吸振器能发挥控制效果，且在 17.5Hz 时，混合型动力吸振器的控制效果可以达到 24.8dB；当干扰频率为 18Hz 至 20Hz 之间时，被动型与混合型动力吸振器则会恶化振动状况；当干扰频率位于 20Hz-26.5Hz 之间时，被动型与混合型动力吸振器控制效果均好于不带动力吸振器时，且被动型动力吸振器效果更好。

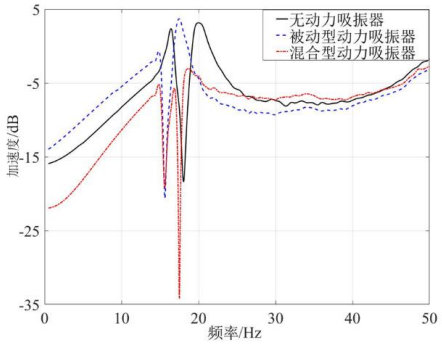


图 2 3 种不同情况下频率响应对比图

参考文献（References）：

[1] 邢昭阳，申永军，邢海军，等. 一种半主动负刚度动力吸振器[J]. 振动与冲击，2021, 40(15):123-128+136.

[2] Cao B, Li C. Design of active tuned mass damper based on robust control[C]// IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering. IEEE, 2012:760-764.

收稿日期： 2026 年 05 月 15 日.

基金项目： 国家自然科学基金青年科学基金（52501397）国家重点研发计划（2024YFB3410005）.

作者简介： 赵海峰(2001－)，男，湖北省襄阳市，在读硕士研究生，主要从事状态监测与可靠性研究；通信方式：E-mail:13797638036@163.com、联系电话:13797638036

文章编号：486-035

电磁悬浮系统电容老化非侵入监测方法

胡海林[1]，吴仁才[2]
(1.江西理工大学 电气工程与自动化学院，江西省 赣州市 341000)

1 引言

电磁悬浮系统支撑电容容值衰减是老化核心表征，会劣化负载电流特性、降低系统稳定性。传统侵入式检测需停机或破坏结构，现有非侵入式方法依赖单一特征、精度不足。本文提出负载电流多域特征融合的非侵入式监测方法，为电力电子元器件老化监测提供新方案。

2 正　文

2.1 电容老化影响与数据采集

电容长期高频放电、受温度影响，容值衰减引发电流波动增大、谐波增多。搭建单点电磁悬浮实验平台，采集不同容值、温度下负载电流，经移动均值法去噪，构建数据集。

2.2 多域特征提取与关联分析

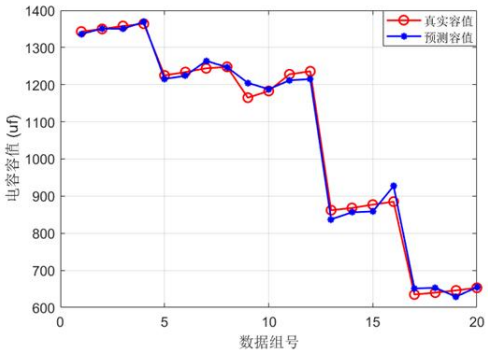
构建时域（峰峰值、RMS）、频域（高频能量占比）、时频域（小波高频幅值）三维特征体系。老化后特征变化显著。并通过皮尔逊/斯皮尔曼系数分析显示，特征与容值呈强非线性负相关，温度与容值强负相关。

2.3 融合模型构建与参数拟合

设计含温度修正项的多域特征非线性融合模型，以峰峰值、RMS 等为输入、容值为输出。采用最小二乘法，基于 20 组全梯度样本拟合参数，完成模型优化。

表 1 多容值下多域特征提取数值

初始容量	最终容量	温度	峰峰值	RMS	高频能量占比	小波高频幅值
1340	1350	40	0.039	0.323	1.5×10^{-3}	5×10^{-4}
1220	1240	50	0.055	0.322	2.4×10^{-3}	4.99×10^{-4}
1150	1220	55	0.057	0.328	6.3×10^{-3}	5.19×10^{-4}
857	880	65	0.122	0.329	8×10^{-3}	5.28×10^{-4}
632	653	75	0.164	0.345	2.3×10^{-2}	5.34×10^{-4}



1 真实容值与预测容值对比图

3 结　论

针对电磁悬浮系统支撑电容老化监测需求，本文提出的多域特征融合非线性模型，有效表征了电流特征、温度与容值的强非线性耦合关系，实测平均相对误差低至 1.51%，在监测精度、非侵入式等实现了综合性能的提升。

参考文献 (References)：

[1] 赵智强，帕孜来·马合木提，李高原.逆变器的电容老化故障诊断方法研究[J].现代电力，2024，41（01）:182-190.
[2] 汪亮，熊剑，张益舟，等.基于器件老化特性的开关电源寿命预测方法[J].电子元器件与信息技术，2025，9(08):10-1

收稿日期： 2026 年 05 月 16 日.
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52262050）；江西省教育厅科学技术研究项目（GJJ2400715）;江西理工大学高层次人才科研专项经费（205200100678）
作者简介： 胡海林(1984－)，性别，籍贯(广东省、深圳市)，职称 副教授，学位 博士，主要从事电机控制、悬浮控制的研究；通信方式：huhailin@jxust.edu.cn:、联系电话:18579055931

文章编号：486-036

超高速磁悬浮碳纤维飞轮储能系统

肖石[1]，吴冬华[1]，唐志远[1]
（1. 高速磁浮运载技术全国重点实验室，山东省 青岛市 邮编 266000；）

1 引言

随着新能源渗透率不断提升，电力系统对快速、高效储能装置的需求日益迫切。飞轮储能作为物理型储能技术，具有高功率密度、响应快、循环寿命长等天然优势，在电力调频和轨道交通再生制动能量回收领域备受关注。

然而，传统金属飞轮受材料强度限制，转速难以突破；普通电磁轴承存在涡流发热，易引发灾难性故障。将磁悬浮技术与碳纤维复合材料相结合，是突破上述技术瓶颈、推动飞轮储能进入“超高速、高能量密度、超高效率”新阶段的关键路径。本文介绍了 USpeed X-1 超高速磁悬浮碳纤维飞轮储能系统的核心技术与关键性能指标。

2 核心技术

2.1 超高速碳纤维转子轮缘

碳纤维复合材料储能密度可达 945.7 Wh/kg，约为高强度钢的 16 倍（见表 1）。碳纤维转子采用纤维缠绕工艺，结合环向（Φ≈90°）和螺旋（Φ<90°）缠绕，获得径向与轴向所需强度和刚度。零涡流磁悬浮系统为转子在真空腔体中提供无接触支撑，实现几乎零摩擦运行，突破临界转速极限。

表 1 不同材料最大储能能力对比

飞轮转子材料	抗拉强度 (MPa)	密度 (kg/m³)	最大圆周速度(m/s)	储能密度 (Wh/kg)
高强铝合金	550	2800	445	41.5
高强度钢	2100	8080	510	56.8
玻纤复合材料	1100	2130	718	320.6
碳纤复合材料	1630	1530	1000	945.7

2.2 零涡流磁钢与磁悬浮轴承

通过制备合适大小、形状的零涡流磁性颗粒，并配合电磁取向控制，制成零涡流磁钢。其电导率仅为 0.012 S/cm（电工钢的 10^{-6}），拉伸失效应力≥1350 MPa（传统磁钢的 19 倍）。基于零涡流软磁与硬磁材料构建的磁悬浮轴承，当转速 600 Hz 时，8 极结构转子总涡流损耗仅约 0.328 W，实现极低损耗与高刚度支撑[2]。

2.3 海尔贝克一体化充磁与非晶电机

采用自研一体化充磁线圈和超高功率 EMP 电磁脉冲充磁装备，通过一次性整体多极 Halbach 磁化，避免传统磁瓦脱落风险，实现正弦、稳定的磁场分布。采用铁基非晶合金制成的外转子超高速电机，磁导率约为硅钢的 6 倍，高频损耗系数仅为硅钢的 1/10，在 36000 rpm 转速下，500 kW 功率输出时体积较同功率硅钢电机缩小 1/8。

2.4 超高速水冷变频器与能量管理

针对 600 Hz 超高频及轨道交通 DC2000V 高压需求，创新采用水冷双电平拓扑结构，仅需极少 IGBT 器件即可实现高压大功率输出，载波扩展至 5.4 kHz 以上，完成超高速双向变频控制。基于空载网压识别的能量管理算法，通过动态辨识牵引网空载电压，智能调整充放电阈值，实现再生制动能量的最优利用

3 结　论

本文提出的 USpeed X-1 超高速磁悬浮碳纤维飞轮储能系统，通过 8 项核心技术协同突破，实现了以下关键性能指标：单机功率 500 kW，容量 5000 Wh，占地仅 1 m²，转子线速度 2400 km/h（2 马赫），循环寿命＞20 年，失效模式为粉末化安全形态，无热失控风险。

参考文献（References）：

[1] Urenco Power Technologies，Flywheel Energy Storage Systems for Rail Applications，IET，2014：12-19.

收稿日期：2026 年 05 月 16 日.

作者简介：肖石(1982 年)，男，山东省潍坊市，正高级工程师，学士，主要从事轨道交通电气技术和磁悬浮技术的研究；通信方式：xiaoshi@cqsf.com、联系电话 13954283979

文章编号： 486-037

基于 PCA-IR 的悬浮斩波器开关电路老化预测

胡海林 [1,2]，罗强 [1,2]，吴洪涛 [1,2]

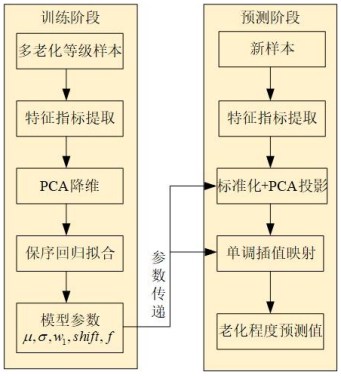
(1.江西理工大学 永磁磁浮技术与轨道交通研究院，江西 赣州 341000；2.江西理工大学 电气工程与自动化学院，江西 赣州 341000；)

1 引　言

悬浮斩波器是磁悬浮系统的核心功率单元，其开关电路老化源于 MOSFET 芯片/封装退化与栅极驱动电阻变化的多因素耦合[1]，二者共同影响动态性能。现有老化预测研究多针对单一器件或因素，忽略耦合效应，且常规回归模型未考虑老化过程的单调不可逆物理约束，易导致非物理波动。本文提出的基于主成分分析（Principal Component Analysis, PCA）与保序回归（Isotonic Regression, IR）的老化预测方法，利用 PCA 降维获得综合指标，再经保序回归建立与老化程度的单调映射。实验表明该算法有效且优越。

2 PCA-IR 回归单调老化预测算法

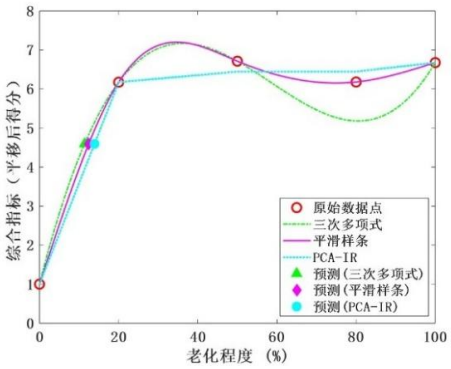
为全面表征悬浮斩波器开关电路老化状态[2]，从负载电流中提取时域特征（平均值、峰峰值、均方根、裕度因数）和频域特征（频谱能量、频谱峭度、频谱标准差），分别反映电流输出能力、脉动幅度、热效应、尖峰敏感度以及谐波能量、窄带谐振、频谱分散程度。采用 PCA 对多维特征降维，保留主要变异信息；再通过保序回归拟合单调不减序列，消除实验误差或异常点导致的非物理波动，确保老化预测符合不可逆规律[3]。PCA-IR 算法实现的具体流程如图 1 所示。



1 PCA-IR 算法流程图

3 实验验证

本文以实验数据训练 PCA-IR 模型，并与三次多项式、平滑样条对比，结果如图 2 所示。



2 不同拟合算法老化预测对比

对于老化样本，PCA-IR、三次多项式和平滑样条的预测值分别为 13.9%、11.4%、12.4%。原始数据在 80%老化点存在非单调波动，后两者无法保证全局单调性，而 PCA-IR 强制单调递增，消除异常扰动，预测轨迹更平滑且符合老化物理规律。

4 结　论

本文提出的PCA-IR 算法能够有效评估悬浮斩波器开关电路的老化程度。该算法通过融合负载电流的时、频域特征，在降维后构建符合老化不可逆规律的综合指标，预测结果较传统回归方法具有更高的单调性与准确性。

参考文献（References）：

[1] 孟鹤立,邓二平,应晓亮,等.基于体效应的 SiC MOSFET 器件栅极老化监测方法研究[J].中国电机工程学报,2021,41: 1084-1093.

[2] 蒋启龙,胡基士. 磁浮列车斩波器研究[J]. 电力电子技术,1997,(2): 62-64,77.

[3] 桂雷,庞士宝,王勇. 基于 SiC MOSFET 的固态断路器栅极失效及老化特性研究[J].电源学报,2025,23(4): 316-321

收稿日期： 2026 年 05 月 23 日.

基金项目： 国家自然科学基金项目（52262050）；江西省教育厅科学技术研究项目（GJJ2400715）.

作者简介： 胡海林(1984－)，男，广东深圳，副教授，博士，主要从事磁悬浮控制、变流器可靠性、直线电机及其优化控制的研究；通信方式：E-mail:huhailin@jxust.edu.cn、联系电话:18579055931.

文章编号：486-038

立式磁悬浮系统保护轴承失效机理研究

蒋崇锋[1]，庞晓旭[1,2]，朱定康[3,4]，王奥莎[5]

（1.河南科技大学 机电工程学院，河南 洛阳 471003；2. 高端轴承河南省协同创新中心，河南 洛阳 471003；

3.清华大学 高端装备界面科学与技术全国重点实验室，北京 100084；4.清华大学 机械工程系，北京 100084；

5.河南科技大学 物理工程学院，河南 洛阳 471003；）

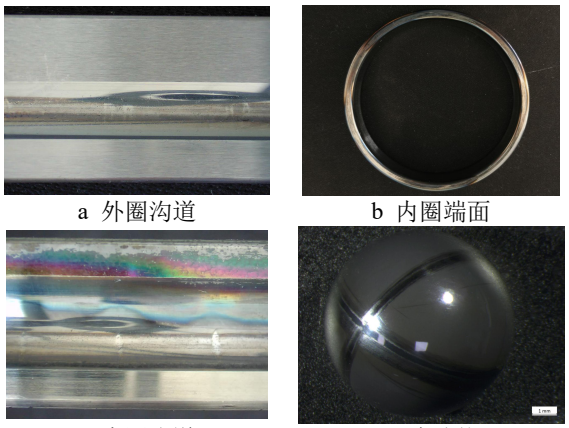
1 引言

在磁悬浮系统运行过程中，当发生断电、控制失稳、执行器故障等异常情况时，高速旋转的转子将直接跌落到保护轴承上。保护轴承需要承受巨大的径向和轴向冲击载荷，其内圈与转子之间还会产生瞬间的极高转速差，易引发剧烈的滑动摩擦和局部温升[1]。立式磁悬浮系统的特殊结构，其上层和下层保护轴承承受的载荷分布存在差异，容易导致局部过载和热损伤等问题[2]。本文以立式磁悬浮系统服役后失效的保护轴承为研究对象，对其宏微观形貌、材质理化性能及烧伤变质层进行深入分析，探讨其失效机理，为后续优化保护轴承结构设计及服役可靠性提供依据。

2 失效保护轴承检测

为明确保护轴承失效的损伤特征、失效位置及失效机理，采用扫描电子显微镜、金相显微镜、三维显微共聚焦显微镜等检测设备，对失效轴承的宏观形貌、微观损伤特征、组织状态及表面形貌参数进行系统分析。

如图 1 所示，失效保护轴承外圈沟道存在偏向一侧的运转磨损带，并伴有密集压坑。相比于外圈，内圈损伤更为复杂且程度更加严重，主要表现为沟道偏载磨损带、密集压坑、烧伤变色及端面磨损等。陶瓷球整体表现为不同程度的运转磨损和局部剥落。



a 外圈沟道　b 内圈端面

c 内圈沟道　d 滚动体

图 1 失效保护轴承宏观形貌

3 结　论

失效保护轴承的损伤主要集中于内、外圈沟道及滚动体接触区域，表现为偏载磨损、压坑、擦伤、局部剥落及烧伤变色等复合损伤特征。结合保护轴承服役工况分析，保护轴承失效主要与转子跌落引起的瞬时冲击、滚动接触区局部接触应力过高及高速摩擦热积累等因素有关。

参考文献（References）：

[1] Li Z, Yao J, Ma L, et al. Analysis of the dry whirl and dry whip response in a vertical active magnetic bearing drop test rig[J]. Journal of Sound and Vibration, 2023, 549: 117579.

[2] 李迎春, 聂傲男, 杨明宣, 等. 主动磁悬浮轴承系统保护轴承热特性研究及减摩设计[J]. 中国机械工程, 2024, 35(04):646-655.

收稿日期： 2026 年 05 月 24 日.

基金项目： 河南省重点研发计划项目（241111220800）

作者简介： 蒋崇锋(2000－)，男，福建省福州市，硕士研究生，主要从事磁悬浮系统保护轴承的研究；

通信方式：jiangchongfeng@stu.haust.edu.cn

文章编号：486-039

保护间隙对磁悬浮系统保护轴承热—力响应特性研究

庞晓旭[1,2]，蒋崇锋[1]，朱定康[3,4]，王奥莎[5]

（1.河南科技大学 机电工程学院，河南 洛阳 471003；2. 高端轴承河南省协同创新中心，河南 洛阳 471003；

3.清华大学 高端装备界面科学与技术全国重点实验室，北京 100084；4.清华大学 机械工程系，北京 100084；

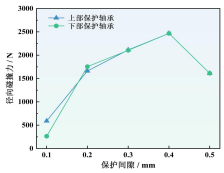
5.河南科技大学 物理工程学院，河南 洛阳 471003；）

1 引言

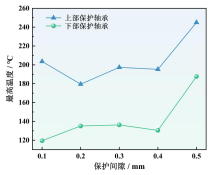
保护间隙是指转子正常悬浮状态下与保护轴承之间的气隙，是影响转子跌落响应及保护轴承热—力行为的重要结构参数[1,2]。保护间隙设置不合理会改变转子跌落后的运动轨迹和碰撞行为，影响保护轴承的受载情况和摩擦发热特征。本文以立式磁悬浮系统保护轴承为研究对象，分析不同保护间隙下保护轴承热—力响应规律，探讨保护间隙对摩擦发热以及碰撞载荷的影响机制，为保护轴承结构设计、间隙参数选取及系统安全运行提供参考。

2 保护间隙对保护轴承温度及受力特性的影响

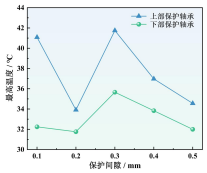
由图 1 可知，当保护间隙由 0.1 mm 增大至 0.5 mm 时，保护轴承所受径向碰撞力整体呈现先增大后减小的变化趋势，并在 0.4 mm 时达到最大值；保护轴承平均温度随保护间隙变化呈波动趋势，其中上部保护轴承平均温度整体高于下部保护轴承，表明上、下部保护轴承在转子跌落过程中的受力状态和摩擦发热程度存在差异。与平均温度相比，保护轴承最高温度对保护间隙变化更加敏感。随着保护间隙增大，最高温度总体呈上升趋势，并在 0.5 mm 时温升最为明显，说明较大间隙下局部接触区域容易产生较强的瞬时摩擦发热。



a 径向碰撞力变化



b 平均温度变化



c 最高温度变化

图 1 不同保护间隙下保护轴承径向碰撞力及温度变化规律

3 结 论

保护间隙过小容易引起转子与保护轴承频繁接触，增加轴承磨损风险；保护间隙过大则会增大跌落冲击和局部温升，降低系统运行安全性。因此，在磁悬浮系统设计中，应综合考虑碰撞力、温升变化和运行稳定性，合理选取保护间隙，以降低保护轴承损伤风险，提高系统的安全性与可靠性。

参考文献（References）：

[1] Zhu D, Pang X, Wang D, et al. Dynamic Analysis of Vertical Magnetic Suspension System Rotor Dropping to Protective Bearing with Different Structural Parameters[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2025, 26(1): 133-155.

[2]朱定康, 庞晓旭, 黄昆, 等. 基于模糊理论的立式磁轴承系统保护轴承抗冲击影响因素分析[J]. 轴承, 2024, (10):55-64.

收稿日期：2026 年 05 月 24 日.

基金项目：河南省重点研发计划项目（241111220800）

作者简介：庞晓旭(1983－)，男，副教授，主要从事事高性能轴承性能分析及试验研究；

通信方式：pxx8308@haust.edu.cn

文章编号：486–040

混合式准零刚度隔振器被动隔振特性研究

宋园园[1]，杨闯[1]，周天琪[1]，孙凤[1]，周冉[1]，徐方超[1]，张晓友[1,2]
（1.沈阳工业大学 机械工程学院，辽宁省 沈阳市 110870；2.日本工业大学 机械工程系，东京 345-8501）

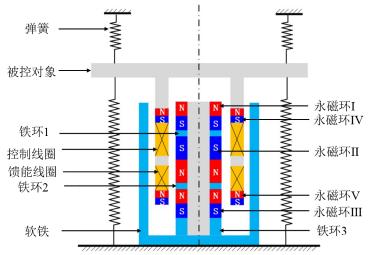
1 引言

振动隔离是解决工程振动的重要手段，在实际应用中，通常采用线性隔振方法抑制振动，但存在刚度-承载力矛盾的局限性，因此，准零刚度（QZS）隔振器成为研究热点[1-2]。本文提出了一种电磁-永磁混合式准零刚度隔振器结构，建立了单自由度动力学方程，研究其动力学特性及隔振性能。

2 被动隔振特性研究

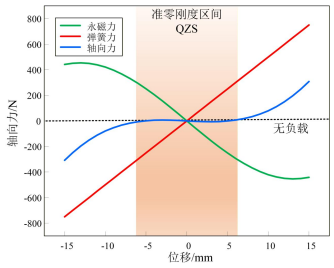
2.1 准零刚度隔振器

隔振器结构如图 1 所示。五个永磁环与三个铁环同轴排列，其中永磁环 4、5 为外磁环。隔振器处于工作位置时磁力趋近于零，此时由弹簧力支撑负载。隔振器下端向上运动时被控对象所受永磁力向下，弹簧力向上，二者抵消可实现隔振器的准零刚度特性，反之同理。



1 准零刚度隔振器结构

2.2 准零刚度特性

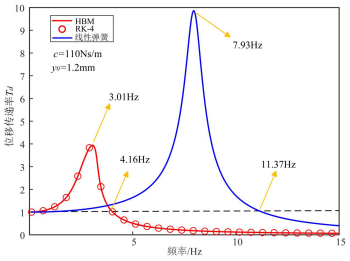


2 准零刚度特性图

对永磁力随位移变化的数据进行拟合，得出分配到每根弹簧刚度约为 17.6N/mm 时，系统呈现较好的准零刚度特性，如图 2 所示。

2.3 准零刚度与线性弹簧隔振对比

由图可以看出，正刚度弹簧的隔振系统共振峰值未向右弯曲，准零刚度隔振系统共振峰有明显的向右弯曲特征，说明本文隔振器具有非线性特性，且准零刚度隔振系统与线性弹簧隔振系统相比，固有频率从 7.93Hz 降低为 3.0Hz，起始隔振频率由 11.37Hz 降低为 4.16Hz。



3 位移传递率

3 结 论

对所设计准零刚度隔振结构建立了动力学方程并进行了分析，结果表明在外界位移激励情况下，本文设计隔振结构具有较好的低频隔振效果，与线性弹簧相比隔振系统的固有频率降低，从而达到了降低起始隔振频率的目的。

参考文献（References）：

[1] 李东海, 赵寿根, 何玉金, 等. 含有时滞控制的准零刚度隔振器动力学分析[J]. 振动与冲击, 2018,37(13):49-55.

[2] 马召召, 周瑞平, 杨庆超, 等. 含电磁分流阻尼双层准零刚度隔振系统的动力学特性分析[J]. 机械工程学报, 2024,60(05):157-168.

收稿日期： 2026 年 05 月 24 日.

基金项目： 辽宁省教育厅项目（JYTMS20231191，LJ222410142008，LJ212410142015）.

作者简介： 宋园园(1993－)，女，辽宁省沈阳市，主要从事电磁隔振的研究；通信方式：E-mail: yysong@sut.edu.cn

文章编号：486-042

磁悬浮隔振系统：机理与建模综述

胡永启[1]，宋春生[1、2]，江友亮[1]，胡业发[1]
（1.武汉理工大学 机电工程学院，湖北省 武汉 430070；2.湖北省磁悬浮工程技术研究中心，湖北省 武汉 430070）

1 引言

随着航空航天、精密制造、船舶工程等领域的快速发展，设备运行对振动控制的精度要求不断提升，低频微振动的抑制成为保障设备性能与测量精度的关键[1、2]。磁悬浮隔振系统凭借无接触、低摩擦、可主动调控等优势，成为解决低频隔振难题的核心技术之一，在空间站敏感载荷保护、激光干涉仪精度维持、舰船动力机械减振等场景中发挥着不可替代的作用[3]。

2 正文

2.1 磁悬浮被动隔振系统

磁悬浮被动隔振系统通过永磁体的磁场相互作用来构建高静态刚度-低动态刚度的力学特性，静刚度高以保证承载能力，动刚度极低以降低系统固有频率，从而拓展低频隔振频带。Yu 等人[2]设计出菱形磁悬浮隔振结构，依托永磁体运动特性结合几何非线性效应实现高静低动刚度特性，以此达成优良的低频隔振效果。

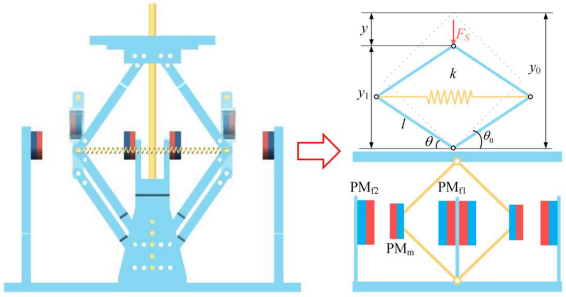


图 1 菱形型磁悬浮结构[2]

2.2 磁悬浮主动隔振系统

磁悬浮主动隔振系统依托电磁作用力完成非接触支撑，搭配传感检测、信号运算与驱动控制单元协同工作，依靠外部电能输入实时抵消外界振动扰动。江友亮等人[3]针对空间站精密仪器、敏感载荷与微重力实验极易受到太空微振动扰动的问题，将磁悬浮微重力隔振系统作为研究载体，重点围绕主动控制策略开展系统性研究。

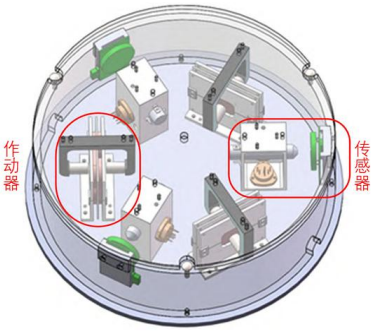


图 2 磁悬浮微重力隔振系统[3]

3 结论

本文综合现阶段磁悬浮隔振系统的相关研究成果，系统综述了主流的磁悬浮隔振体系在隔振机理、建模方法与动态特性方面呈现出差异化的技术特征与应用优势，梳理了覆盖不同振动场景与精度需求的磁悬浮隔振技术体系。

参考文献（References）：

[1] Anpeng Xu,Zhenbang Xu,Hui Zhang,et al. Novel coarse and fine stage parallel vibration isolation pointing platform for space optics payload[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2024,Vol.213: 111359.

[2] Ning Yu,Xiangyi Fei,Hao Sun,et al. Rhombus-type magnetic-levitation structure for low-frequency vibration isolation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2025,Vol.225: 112289.

[3] 江友亮,马欣,江洋,等.磁悬浮微重力隔振系统自抗扰主动控制研究[J].电子机械工程,2024,40(05)

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：基于磁悬浮执行器的浮筏隔振系统多源密频线谱混沌化与同步控制研究（52501397）.

作者简介：宋春生(1981－)，男，河北唐山，教授，博士，主要从事机械主动控制与磁悬浮主动隔振技术的研究；
通信方式：E-mail:song_chsh@163.com、联系电话:13437161368

文章编号：486-043

磁悬浮转子宽频段振动在线自适应控制方法

宋春生[1,2]，李小白[1]，郭云[1]，胡业发[1]
(1.武汉理工大学 机电工程学院，湖北省 武汉 430070；2.湖北省磁悬浮工程技术研究中心，湖北省 武汉 430070)

1 引言

磁悬浮转子在高速运行过程中，同时受不平衡振动、基础激励与基座运动等不同振动耦合叠加导致转子振动响应复杂、控制难度较大。现有磁悬浮转子振动控制技术频段覆盖不足，转速与激励频率变化时抑振性能下降。为解决上述宽频段抑振难题，本文提出一种磁悬浮转子宽频段振动在线自适应控制方法，将转子已知动力学动态作为前馈以降低观测负担，通过自适应律在线调节观测器带宽实现全频段扰动估计，采用非奇异终端滑模保证误差有限时间收敛并消除控制抖振，在无需频率辨识的前提下，实现不平衡振动与宽频强迫振动的统一高效抑制。

2 正　文

2.1 核心控制逻辑

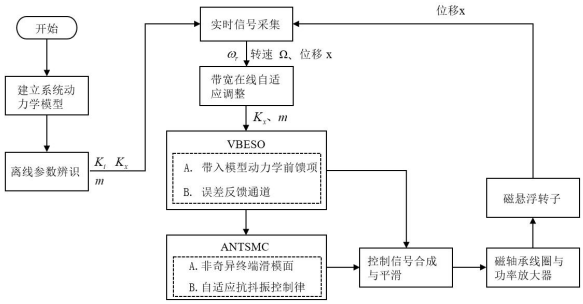


图 1 基于模型引导变带宽 ESO 的磁悬浮转子宽频振动控制流程图

首先建立磁悬浮转子单自由度线性化模型，将位移刚度、陀螺耦合等已知动力学动态作为前馈项引入 VBESO，仅对残余未知扰动进行估计，降低观测器负担。VBESO 采用自适应带宽调节律，依据实时转速、振动幅值在线调整带宽参数。设计 ANTSMC 控制器采用非奇异终端滑模面实现位移跟踪误差的有限时间收敛，引入自适应切换增益与饱和函数，减轻传统滑模的抖振问题。控制量经余弦加权无扰切换模块平滑输出，避免参数更新时的系统冲击，保证控制电流连续无突变。

2.2 仿真验证分析

基于 MATLAB/Simulink 搭建单自由度闭环仿真模型，施加 50Hz 基础振动、100Hz 不平衡力及多频复合扰动，验证宽频抑振性能。结果表明：转子 0.05s 内快速稳定悬浮，稳态位移波动小于±5μm；VBESO 可精准跟踪总扰动；控制电流无高频抖振，观测器带宽实现自适应动态调节。仿真验证了所提方法的宽频振动抑制、无抖振控制与自适应观测能力，满足工程悬浮要求。

3 结　论

本文提出的磁悬浮转子宽频段振动控制方法，通过 VBESO 与 ANTSMC 协同设计，解决了传统方法频段覆盖不足、观测器预测精度低、带宽固定、滑模抖振的问题，具备良好工程应用价值，为磁悬浮转子宽频振动主动控制提供有效方案。

参考文献（References）：

[1]Zheng Y ,Zhang H ,Yu Z , et al.Adaptive Sliding Mode Control With Linear Extended State Observer for Active Magnetic Bearing-Rotor Systems[J].IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica,2025,12(08):1736-1738.

[2] Peng C, Zhu M T, Wang K, 等. A Two-Stage Synchronous Vibration Control for Magnetically Suspended Rotor System in the Full Speed Range [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67 (1): 480-489.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：磁轴承变偏置电流分配策略与低功率鲁棒控制研究（2024YFB3410002）.

作者简介：宋春生(1981－)，男，河北唐山，教授，博士，主要从事机械主动控制与磁悬浮主动隔振技术的研究；通信方式：E-mail:song_chsh@163.com、联系电话:13437161368

文章编号：486-044

高温超导磁浮 V 型永磁轨道拓扑优化研究

郑杰[1]，龙威[1]，郑珺[1]，Gino D'Ovidio[2]，邓自刚[1*]

（1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省 成都市 610031；2. 拉奎拉大学，土木-建筑-环境工程系，意大利 拉奎拉 67100）

摘要

高温超导磁悬浮系统具有无接触、自稳定和低能耗等优势，但永磁轨道的磁场构型直接决定悬浮承载能力、横向稳定性和稀土永磁材料利用效率。现有 V 型永磁轨道优化多集中于几何参数或单一磁化方向调整，通常假设设计域全部由 NdFeB 永磁体组成，且导向力多作为验证指标而非主动优化目标。针对上述问题，本文提出一种面向 V 型永磁轨道的人工智能辅助多材料拓扑优化框架，在相同截面积约束下协同提升悬浮力与导向力。首先，基于 ***H***-formulation 有限元模型构建轨道几何与运行工况数据集，引入运动方向和滞回阶段编码，训练 LSTM 集成代理模型，并结合主动学习采样与 NSGA-II 获得全局几何 Pareto 优化结果。随后，在固定最优几何基础上，将局部设计域离散为单元阵列，采用双密度变量和磁化角变量描述空气、永磁体和导磁材料三相分布；通过可变滤波半径、PM 碎化惩罚、增广拉格朗日约束处理和 MMA 优化，实现材料布局与离散磁化方向的同步优化。最后，设置基准方案、仅几何优化、仅拓扑优化和完整框架四类方案，利用 ***H***-formulation 动态有限元对悬浮、导向力滞回曲线进行对比验证，并搭建样机实验评估工程可制造性。该研究将人工智能代理建模与多材料拓扑优化引入高温超导磁悬浮 V 型轨道设计，可为大载重、高稳定性磁悬浮交通系统提供高效、可制造的轨道优化方法。

参考文献 (References)：

[1] LI Y, Ma B, Zheng J, Zhu J, et al. Electromagnetic and mechanical topology optimization for SynRM rotors considering high dimensional constraints[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(12): 12048-12059.

[2] ZHENG J, Gao L, Long W, Zheng J, et al. Discretization optimization strategy on magnetization directions of permanent magnetic guideway for high temperature superconducting magnetic levitation: modeling and experiments[J]. Superconductor Science and Technology, 2026, 39(3): 035011.

[3] JUNG T, Kim J, Lee C, et al. Design framework incorporating topology optimization for Halbach array in-wheel motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2026, 41(1): 601-610.

收稿日期：2026 年 05 月 23 日.

基金项目：“现代高速轨道交通”学科突破先导项目（JYB2025XDXM211.

作者简介：郑杰(1998 年－)，男，四川省德阳市，博士研究生，主要从事高温超导磁悬浮磁轨优化研究；通信方式：1300699158@qq.com

文章编号：486–045

基于 PINN-PDEM 的磁浮车桥随机振动响应分析

李铮[1,2]，毛建锋[1,2]，余志武[1,2]
(1. 中南大学 土木工程学院，湖南 长沙 410075；2. 高速铁路建造技术国家工程研究中心，湖南 长沙 410075)

1 引言

本文面向高速磁浮车桥耦合系统随机振动响应分析问题，建立考虑车辆悬浮系统、桥梁结构和随机激励的车桥耦合动力模型，引入 PINN 模型对系统随机响应进行求解与概率演化分析。通过构建物理约束神经网络近似车桥系统动力响应，并结合概率密度演化方程获得系统响应及车辆运行平稳性指标的概率分布特征，为高速磁浮车桥系统的动力性能评估和可靠性分析提供一种新的计算思路。

2 磁浮车桥系统随机振动响应分析

2.1 PINN

PINN 作为一种融合数据驱动与物理约束的深度学习框架，其核心思想是将描述物理系统的偏微分方程作为正则化项嵌入神经网络的损失函数中。PINN 的典型架构如图 1 所示。

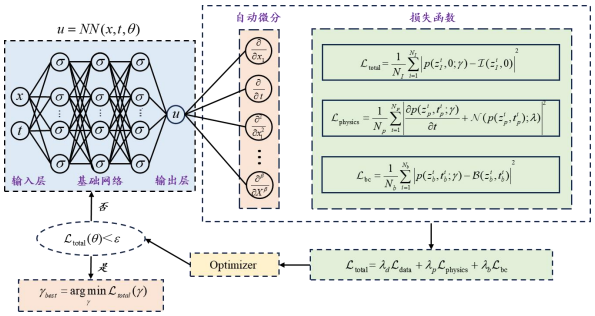


图 1 PINN 框架

2.2 PINN-PDEM

为提高高速磁浮车桥随机振动响应分析效率，本文构建了一种 PINN-PDEM 计算框架。PINN 用于建立随机参数与车桥动力响应之间的映射关系，PDEM 用于描述响应概率密度随时间的演化过程[1]。在 PINN 中，以时间、空间位置及随机参数为输入，以车辆和桥梁动力响应为输出。通过自动微分获得响应的一阶、二阶导数，并将车桥耦合动力方程残差、初始条件和边界条件共同构造为损失函数：

$$\mathcal{L} = \lambda_d\mathcal{L}_d + \lambda_i\mathcal{L}_i + \lambda_b\mathcal{L}_b \tag{1}$$

式中，$\mathcal{L}_d$、$\mathcal{L}_i$、$\mathcal{L}_b$ 分别表示动力方程残差损失、初始条件损失和边界条件损失，λ_d、λ_i、λ_b 为权重系数。通过最小化损失函数，使神经网络输出满足车桥耦合系统动力学规律。在 PDEM 中，设随机变量为 Θ，系统响应为 $Y(t)$，则响应概率密度函数随时间演化。利用训练后的 PINN 快速获得不同随机参数下的响应及其变化率，并代入概率密度演化方程，得到目标响应的概率密度函数：

$$p_Y(y,t) = \int_{\Omega_\Theta} p_{Y\Theta}(y,\theta,t)\,d\theta \tag{2}$$

进一步可计算磁浮系统响应的均值、标准差和超越概率。该方法减少了传统随机模拟中的重复动力计算，提高了随机振动响应分析效率[2]。

3 结论

PINN 通过引入动力学方程约束，可在较少样本条件下实现车桥耦合响应预测，提高了模型的物理一致性和计算效率。另一方面，PINN-PDEM 方法兼具高效性和物理可解释性，可为高速磁浮车桥系统动力性能评估、安全控制和可靠性分析提供有效工具。

参考文献 (References)：

[1] Jianfeng Mao, Zheng Li, Zhiwu Yu, et al. A Novel Hybrid approach combining PDEM and bayesian optimization deep learning for stochastic vibration analysis in train-track-bridge coupled system[J]. Reliability engineering & system safety, 2025, 257:110827.

[2] Raissi M, Perdikaris P, Karniadakis GE. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. J COMPUT PHYS. 2019;378686-707

收稿日期： 2026 年 05 月 23 日.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(52478321, 52078485)；湖南省科技创新计划(2025RC3028)
作者简介： 李铮(2000.10－)，男，籍贯(湖南岳阳)，硕士，主要从事高速铁路/磁浮车桥耦合随机振动分析及智能预测的研究；
通信方式：E-mail:zhengli_csu@163.com

文章编号：486-046

基于磁悬浮平面电机的六自由度空间磁场测量方法研究

陈锦霖[1] 于连栋[1] 王远泽[1] 金浩[1]

（1. 中国石油大学（华东），控制科学与工程学院， 山东省青岛市 266580）

1 引言

磁悬浮平面电机在运动控制中，对六自由度位姿的高精度实时检测有着严格要求。为满足该需求，本文提出一种基于三维霍尔阵列的高性能空间磁场测量方法，该方法采用矩阵式通讯拓扑结构与硬件同步触发机制，在降低硬件布线复杂度的同时，保障了多传感器节点的高效同步采样，系统采样率可达 500Hz。最后，通过本文提出的方法测量 Halbach 永磁阵列，并将采样结果与有限元仿真分析对比，验证了该传感系统在空间磁场特征提取方面的有效性。

2 基于磁悬浮平面电机的六自由度空间磁场测量方法研究

2.1 三维霍尔阵列结构设计

为解决大规模传感器阵列通讯引脚过多导致的连接复杂问题与信号完整性问题，设计了如图 1 所示的矩阵式 SPI 通讯拓扑，该矩阵由 8×8 个 TMAG5170 三维线性霍尔传感器构成。

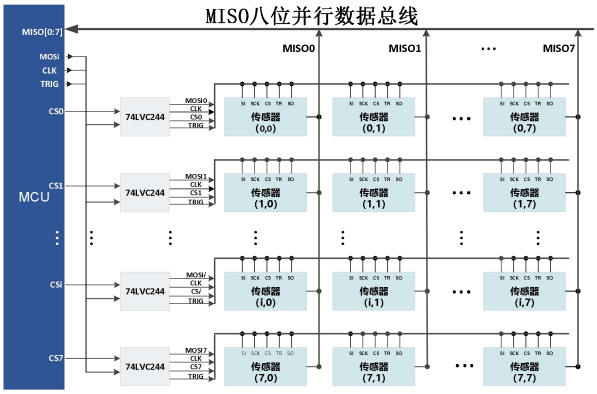


图 1 传感器阵列电路结构图

首先，对于每列传感器，将其 MISO 信号组成一个 8 位并口，并与 MCU 的 GPIO 相连；然后，将每行传感器的 CS 并联，形成 8 个行选信号，同时并联每行传感器的 MOSI、CLK 与硬件触发信号。为了增强 MOSI、CLK 与硬件触发信号的驱动力，为每行传感器的上述信号增加了 74LVC244 缓冲器[1]。MCU 在读取数据时，首先通过硬件触发信号，同时触发所有传感器转换，然后通过 8 个 CS 信号，分别依次读取每行的 8 个传感器的数据，读取 8 次后即可获得所有传感器的读数。该拓扑在只需要少量 GPIO 的前提下，大幅提升了吞吐量。

2.2 实验平台搭建与测试

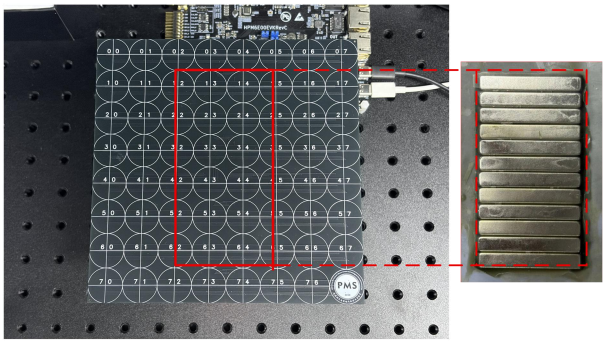


图 2 实验测试装置及核心组件实物图

Halbach 阵列的磁场存在 x 轴与 z 轴的分量，并存在相位差，是验证三维霍尔阵列性能的理想目标[2]。为验证三维霍尔传感阵列的性能，搭建了如图 2 所示的实验测试平台，对自制的一维 Halbach 永磁阵列的空间磁场分布进行采样。Halbach 永磁阵列的尺寸为 58mm×106mm，共由 12 颗 8mm×8mm×58mm 的 NdFeB35 永磁体构成。

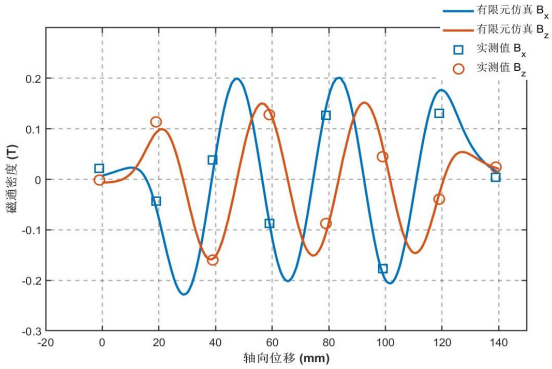


图 3 实测磁场分布与有限元仿真结果对比

收稿日期：2025 年 05 月 24 日

基金项目：高速磁浮运载技术全国重点实验室开放基金项目资助（ SKLM-SFCF-2024-001），家自然科学基（62303490）

作者简介：金浩(1991－)， 男， 山东省日照市， 副教授，博士，主要从事磁悬浮控制技术、电机控制技术的研究；通信方式： jinhao@upc.edu.cn， 15066390369

实验中，将永磁阵列置于霍尔阵列中央正上方，并保持永磁阵列下边缘与传感器中央的垂直高度为 9mm。将采集到的数据与有限元仿真结果进行比对，结果如图 3 所示。实验结果表明，霍尔阵列采样得到的采样点的 x 与 z 方向的磁通密度，与理论仿真结果基本一致，验证了该硬件架构在复杂磁场信号提取方面的准确性与有效性。

表 1 第三列传感器实测磁场误差

C3(列)	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Bx(T)	+0.013	+0.015	-0.002	-0.015	+0.010	-0.045
Bz(T)	+0.023	-0.006	-0.008	+0.019	-0.016	-0.010

实验结果中，阵列边缘部分的采样点存在较大的误差，这主要是由于自制 Halbach 阵列粘贴过程中磁铁存在微小偏转以及有限元与实际磁场存在偏差。

3 结　论

本文针对磁悬浮平面电机的高精度位姿检测需求，提出了一种基于三维霍尔阵列的高性能空间磁场测量方法。通过构建矩阵式 SPI 通讯拓扑与硬件同步触发机制，有效降低了硬件布线复杂度，实现了大规模传感器阵列的高效同步采样。实验结果显示，实测磁通密度与有限元仿真结果基本一致，为六自由度位姿的高精度实时检测提供了硬件基础与参考方法。

参考文献（References）：

[1]王春凯,孙旭光,李彤,等.抗基准电压波动干扰的阻性传感器阵列扫描电路设计[J].传感器与微系统,2019,38(08):1-4.

[2]薛睿,曹广忠,黄苏丹,等.考虑端部效应的动磁式磁悬浮平面电机电磁力解析模型[J].微电机,2023,56(06):1-6.

文章编号：486-047

磁悬浮隔振系统电磁俘能器设计及特性分析

郭云[1]，宋春生[1,2]，吴华春[1,2]，李小白[1]，江友亮[1]
(1.武汉理工大学 机电工程学院，湖北省 武汉 430070；2.湖北省磁悬浮工程技术研究中心，湖北省 武汉 430070)

1 引言

磁悬浮隔振系统凭借无接触、低刚度、超低频隔振优势，在精密装备领域应用广泛，但悬浮间隙波动引发的微幅振动易造成能量损耗，且低功耗监测节点存在供电难题。为实现磁悬浮隔振与振动能量回收一体化，本文设计一种集成式电磁俘能器，依托磁悬浮磁场环境实现振动机械能向电能转换，为磁悬浮系统自供能监测提供新方案。

2 正文

2.1 电磁俘能器结构设计

基于磁悬浮环形永磁体磁场分布特性，设计双线圈环形电磁俘能器，如图 1 所示，由内外环形永磁体、磁轭与感应线圈组成，嵌入磁悬浮隔振单元间隙处。利用磁悬浮悬浮体微幅振动，驱动线圈切割永磁体交变磁场，实现磁-机-电能量转换，兼顾磁悬浮悬浮稳定性与俘能效率。

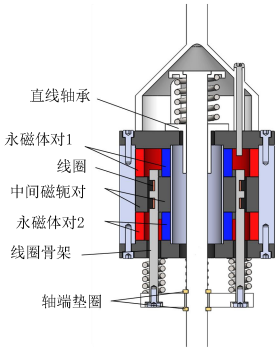


图 1 电磁换能器模型

2.2 磁-力-电耦合建模与仿真

基于等效磁路法构建电磁俘能器磁路模型，完成气隙磁通密度的理论计算与磁路设计；在此基础上建立磁-力-电耦合动力学模型，推导俘能系统与磁悬浮隔振单元的机电耦合关系，明确振动参数与能量俘获特性的关联机制，为后续系统特性分析与参数优化提供理论支撑。

2.3 俘能特性与隔振兼容性分析

基于磁-力-电耦合模型开展电磁俘能器输出特性分析，完成振动参数与俘能性能的关联规律探究；在此基础上建立集成俘能器的磁悬浮隔振系统动力学模型，推导俘能支路等效参数与隔振性能的耦合关系，明确俘能器嵌入对系统固有特性与隔振效果的影响机制，为磁悬浮隔振与俘能一体化系统的参数匹配及性能优化提供理论依据。

3 结论

本文面向磁悬浮隔振系统，设计并分析了一款集成式电磁俘能器，实现了磁悬浮间隙微幅振动的高效回收与隔振性能兼容。通过磁路设计、耦合建模与仿真分析，验证了俘能器适配磁悬浮 3.5-7Hz 低频振动工况，可稳定输出毫瓦级电能，且对磁悬浮悬浮刚度影响小于 5%。结合负电阻调控可协同优化隔振效果，位移传递率峰值降低 24.9%。研究表明，该电磁俘能器结构紧凑、兼容性好，为磁悬浮隔振系统的自供能监测与绿色化设计提供了可行技术路径。

参考文献 (References)：

[1] 赵贺,闫兵和王瀚轩.准零刚度电磁隔振器设计及参数优化[J],大连交通大学学报,41(6):70-74.

[2] Yuan J J,Jin G Y,Ye T G,et al.Incorporating electromagnetic transducers in quasi-zero stiffness isolators for nonlinearity mitigation and energy harvesting[J].NonlinearDynamics,2025,113:16031-16082.

收稿日期：2026 年 5 月 25 日.

基金项目：基于磁悬浮执行器的浮筏隔振系统多源密频线谱混沌化与同步控制研究 202501jc0176.

作者简介：宋春生(1981－)，男，河北唐山，教授，博士，主要从事机械主动控制与磁悬浮主动隔振技术的研究；通信方式：E-mail:song_chsh@163.com、联系电话:13437161368

文章编号：486–048

一种共励磁无轴承开关磁阻电机的控制与实现

漆光晖，刘泽远

（南京邮电大学 自动化学院，江苏省 南京市 210023）

1 引　言

三自由度无轴承开关磁阻电机（BSRM）具有径向和轴向悬浮功能，结构紧凑、集成度高，可提升磁悬浮电机的临界转速与功率密度[1-2]。本文提出一种电磁偏置型三自由度 BSRM，采用电磁偏置，无永磁体，成本低、环境适应性强；设计了共励磁结构与悬浮电流控制算法，实现旋转、径向和轴向三个通道的独立控制。

2 三自由度 BSRM 及控制方案

本文提出的一种 18/16 极电磁偏置型三自由度 BSRM，集成了一个三自由度磁轴承和一个三相 12/16 极 SRM，如图 1 所示。其中，磁轴承包括三相径向悬浮绕组、1 个轴向悬浮绕组和 1 个偏置绕组，且 SRM 三相转矩绕组配置与其传统 12 极结构相同。

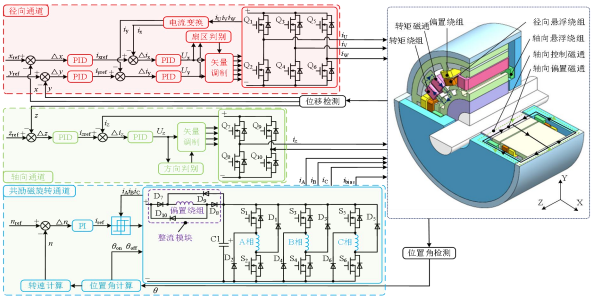


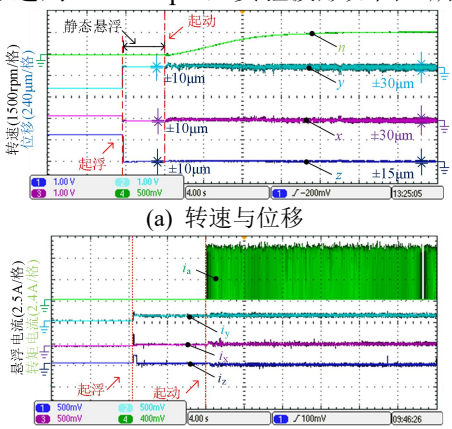
图 1 三自由度 BSRM 的结构、功率变换器及控制框图

共励磁旋转通道：采用一套功率变换器同时励磁三相转矩绕组和偏置绕组，该变换器在三相不对称半桥电路母线上集成了一个整流模块，转矩电流控制算法与经典 SRM 控制相同，而偏置电流不控制。

径向悬浮通道：三相径向悬浮绕组由三相逆变器驱动，接入变换器方式与传统交流电机相同；基于 2D-SVPWM，设计了径向电流的控制算法；三相径向电流可产生三个位置相差 120°的径向力，可解耦为 X 与 Y 轴方向的两个径向力。

轴向悬浮通道：悬浮绕组由 H 桥变换器供电，调节轴向电流，即可产生所需 Z 轴悬浮力；基于 1D-SVPWM，设计了轴向电流的控制算法。

研制了一台电磁偏置型三自由度 BSRM 样机及其控制实验平台，样机转子在 X、Y 和 Z 轴三个方向允许位移最大偏差为 300μm。实验中，样机水平放置，偏置电流由直流电源提供，其幅值为 4.5A；先实施静态悬浮，然后起动电机，由静止加速到 n=1500rpm，实验波形如图 2 所示。



(a) 转速与位移

(b) 转矩和悬浮电流波形

图 2 悬浮实验波形

图 2 显示，仅悬浮励磁时，转子在三个方向最大位移偏差均可控制在±10μm 内，说明提出的控制算法精度高；起浮稳定后 SRM 开始励磁，此阶段转子的 X、Y 轴方向位移偏差为±30μm，而 Y 轴方向则控制在±15μm 内，仍具有较高悬浮精度，有效证明了本文提出的电磁偏置型三自由度 BSRM 控制方案的正确性。

3 结　论

本文提出一种电磁偏置型三自由度 BSRM 拓扑及转矩绕组与偏置绕组共同励磁方式，设计了径向、轴向悬浮电流控制算法，进一步给出共励磁旋转、径向悬浮与轴向悬浮等三个通道的独立控制方案。研制了三自由度 BSRM 样机及控制实验平台，实验结果表明，提出的控制算法再静态悬浮和动态悬浮中均具有较高控制精度。

参考文献（References）：

[1] LIU Zeyuan, WU Xingcheng, CAI Jun, et al. Decoupled Topologies and Radial Levitation Control of a Novel Permanent Magnet Biased Bearingless Switched Reluctance Motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics: 2025, 72(4): 3370-3380.

[2] LIU Zeyuan, LI Ang, CAI Jun, et al. A Three-Degree-of-Freedom Bearingless Switched Reluctance Motor With Biased Permanent Magnets[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics: 2026, 73(1): 265-274.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（52377061）.

作者简介：通信作者 刘泽远(1981)，男，河南省鄢陵县，副教授，博士研究生，主要从事无轴承电机设计与控制研究；通信方式：E-mail:liuzy@njupt.edu.cn，联系电话 13390786936

文章编号：486–049

磁悬浮轨道电机绝缘树脂材料的制备与性能研究

张婷[1]，叶锦春[2]，王慧慧[3]
(厦门市宜帆达新材料有限公司，福建省 厦门市 361021)

1 引 言

真空管道高温超导磁悬浮正朝着 600km/h 及以上超高速化发展，目前相关试验多停留在准静态或 300km/h 以下低速阶段。列车在真空管道内运行时，气动阻力受车速、阻塞比、真空度及结构外形等多重因素耦合作用，低压高速气流特性难以通过常规仿真精确模拟。同时低真空密闭空间存在列车运行、电气散热与管道环境的多场耦合效应，气流流动、传热及流固耦合机理复杂。提升轨道结构稳定性是突破上述瓶颈的关键，亟需轨道封装材料兼具优异抗开裂、导热、耐热及户外耐候综合性能。

本研究开发了一种适用于户外高速磁悬浮轨道的双组分环氧封装树脂，A、B 组分按 1:1 配比固化成型。通过引入环氧型核壳橡胶增韧剂提升体系玻璃化转变温度与韧性，复配双粒径针状硅灰石和玻璃纤维实现协同增强，弥补了传统树脂玻璃化温度低、导热性能差、冷热循环易开裂的不足。制备的树脂材料玻璃化转变温度可达 70-150℃，在 -40℃-130 ℃冷热循环 30 次无开裂，能够满足高速磁悬浮轨道户外长效稳定封装需求。

2 实验部分

实验原料选用脂环族环氧树脂、改性甲基六氢苯酐、八甲基环四硅氧烷、甲基三乙氧基硅烷、乙烯基三甲氧基硅烷、苯乙烯、甲基丙烯酸甲酯、1,2 -环氧-4-乙烯基环己烷、针状硅灰石、玻璃纤维及十二烷基磺酸钠、过硫酸铵、苯磺酸等助剂。

含环氧基团核壳橡胶增韧剂采用三步法制备，先将三种有机硅单体与乳化剂混合乳化，经酸性催化剂水解缩合制备硅橡胶核乳液；再将苯乙烯、甲基丙烯酸甲酯和 1,2 -环氧-4-乙烯基环己烷乳化制得壳层预乳液；最后将核壳乳液共混，以过硫酸铵为引发剂通过双键共聚实现化学键合包覆，经喷雾干燥制得成品增韧剂。封装树脂由 A、B 组分按 1:1 质量比复配，A 组分包含脂环族环氧树脂 20-40 份、核壳橡胶增韧剂 3-9 份、3-6μm 小尺寸针状硅灰石 40-60 份、玻璃纤维 5-20 份；B 组分包含改性甲基六氢苯酐 30-50 份、15-21μm 大尺寸针状硅灰石 40-60 份、玻璃纤维 5-20 份。

将 A、B 组分分别混匀后等比例复合，采用阶梯固化工艺，90-110℃恒温 2-4h，再升至 130-150℃保温 9-11h，自然冷却获得材料测试试样。依据国标测试拉伸、弯曲、冲击等力学性能，利用差示扫描量热法测定玻璃化转变温度，在-40℃-130℃区间进行冷热循环试验，表征树脂抗开裂性能。

3 结 论

自制含环氧基团核壳橡胶增韧剂与脂环族环氧树脂相容性良好，可显著提升封装树脂力学韧性与 Tg，解决传统树脂耐热性差、韧性不足的问题。不同粒径针状硅灰石与玻璃纤维复配填充，形成协同增强体系，有效改善树脂结构致密性与尺寸稳定性，显著提升耐冷热循环抗开裂性能。优化配方制备的户外高速磁悬浮轨道封装树脂，力学性能、热性能及抗开裂性能均优于现有商用材料，30 次高低温循环无开裂，可满足高速磁悬浮轨道户外长期封装服役需求。

本研究开发的双组分环氧树脂配方及制备工艺简单可控，工业化适配性强，可广泛应用于磁悬浮轨道、轨道交通电气封装等领域。

参考文献（References）：

[1] 鞠森森，苏佩，钱若霖.高分子复合材料在轨道交通中的应用研究[J].合成材料老化与应用,2025,54(3):63-64,71.
[2] 金晓洁,孟宇澄,蔡智渊.磁悬浮灌封胶新配方的研制[J].中国惯性技术学报,2011,19(5):4.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

作者简介：张婷(出生年 1986)，女，福建省厦门市，中级工程师，硕士，主要从事高性能环氧树脂复合材料的研究；通信方式：E-mail:zhangt@epofinder.com、联系电话:18565448378

文章编号：486–050

基于阵列传感器的漏磁检测技术研究

孙礼冬[1]，关旭东[1]，朱海峰[2]，俞思涵[1]，陈伟[1]

（1. 常州大学 机械与轨道交通学院，江苏 常州 213164；2. 常州迈格雷电气科技有限公司，江苏 常州 213002）

1 引　言

随着航空航天、轨道交通等领域对结构安全性要求的不断提高，材料缺陷的快速检测与精准识别成为无损检测研究的重要方向。漏磁检测方法具有非接触、检测速度快及灵敏度高等优点，在金属材料表面裂纹检测中得到了广泛应用[1]。阵列传感器具有检测效率高、覆盖范围大以及缺陷成像能力强等优势。本文针对材料表面缺陷检测，设计了一种基于阵列传感器的漏磁检测系统，对不同缺陷试件开展实验研究。通过分析缺陷区域的信号变化特征，实现对缺陷位置与尺寸的识别，为阵列传感器漏磁检测技术在工业在线检测中的应用提供参考。

2 漏磁检测系统设计及有限元仿真

2.1 阵列漏磁检测原理

阵列漏磁检测是将多个磁敏传感器按一定间距阵列排布，对被检测构件表面的漏磁场进行同步采集，从而实现缺陷位置、形状和尺寸的综合识别。其基本原理为，当材料存在缺陷时，缺陷处磁导率发生突变，磁力线在缺陷附近发生畸变，部分磁通从材料表面逸出，形成漏磁场[2]。通过对各通道信号进行放大、滤波、采集和处理，可得到漏磁场的分布特征。图 1 所示为漏磁检测原理示意图。

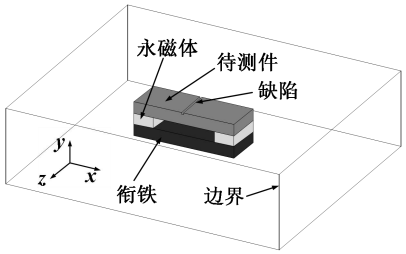


图 1 漏磁检测原理示意图

2.2 缺陷检测有限元仿真

在缺陷检测有限元仿真中，基于麦克斯韦方程组和电磁场理论，建立仿真模型[3]。通过改变缺陷参数，分析试件内部磁通密度分布和缺陷区域漏磁场变化规律，获得缺陷几何参数与漏磁信号特征之间的对应关系。由仿真结果可知，当缺陷宽度不变，随着缺陷深度增大，缺陷对磁场分布的影响增强，待测件表面上方的漏磁场幅值逐渐增大，检测曲线峰值也随之增大。这表明缺陷越大，局部磁场变化越明显，漏磁响应也越强。

3 结　论

综上所述，本文设计的阵列式漏磁检测系统能够实现对金属材料表面缺陷漏磁信号的多点同步采集，有效弥补了传统单探头检测范围小、扫描效率低和空间信息不足等问题。通过阵列传感器的合理排布，可获得缺陷区域更加完整的磁场分布特征，为缺陷位置判断、轮廓表征和尺寸识别提供了可靠依据。该研究为阵列漏磁检测技术在金属材料表面缺陷快速检测、成像分析及在线监测中的应用提供了一种可行方案。

参考文献 (Reference)：

[1] WU J, WU W, LI E, et al. Magnetic flux leakage course of inner defects and its detectable depth[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(4): 121-131.

[2] 杨宁祥, 刘秀成, 陈英红, 等. 斜拉索表层断丝缺陷漏磁检测圆环阵列传感器[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(04): 123-128.

[3] 许鹏, 方舟, 王平, 等. 基于脉冲漏磁暂态特征的缺陷量化评估方法[J]. 中国机械工程, 2021, 32(7): 860-866, 881.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：国家自然科学基金资助项目（52205050）；智能制造龙城实验室资助项目（CJ20242057）；中国石油-常州大学创新联合体科技创新人才项目（CCIA2023-03）。

作者简介：关旭东(1989 年－)，男，河南省许昌市，副教授，博士，主要从事磁悬浮轴承技术，检测与控制方法，漏磁检测，智能装备控制等的研究；通信方式：E-mail: guanxd@cczu.edu.cn 联系电话 18761686736

文章编号：486-051

磁束缚悬浮平台非线性补偿运动控制算法研究

王文[1]，李朝峰[1,2]，王瑞[1]

（1.东北大学 机械工程与自动化学院，辽宁省 沈阳市 110819；2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室，辽宁省 沈阳市 110819）

1 引 言

磁悬浮系统本质上具有不稳定性、非线性等特性[1]。前馈补偿是克服磁悬浮系统非线性和不确定性的重要手段，Tang 等[2]利用前馈补偿使平台稳定，本文提出一种前馈非线性补偿与 PID 控制相结合的复合控制策略。

2 正 文

2.1 磁力模型

悬浮物在平衡点 (i_0,h_0) 处小范围内的移动时，悬浮力可看作近似线性变化，采用泰勒级数展开将悬浮力进行线性化，在平衡点 (x_0,i_0) 对 HEM 系统线性化有：

$$\begin{cases}\Delta\dot{x}=\boldsymbol{A}\Delta x+\boldsymbol{B}\Delta u+w\\ \Delta y=\boldsymbol{C}\Delta x\end{cases}\tag{1}$$

2.2 控制器设计

在系统中引入了非线性补偿环节，构成了前馈非线性补偿控制系统。得到补偿控制量：

$$u_j=\frac{1}{K_A}\left(\frac{2h+L_p}{N}\sqrt{\frac{F_c}{k}}-\frac{F_m}{N}\right),\tag{2}$$

$$j=1,2,3,4$$

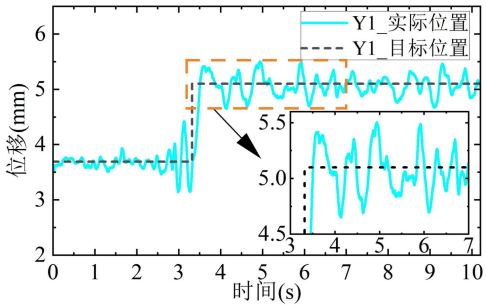
反馈线性控制规律结合非线性补偿，总的控制律则为：

$$u=u_b+u_d\tag{3}$$

式中，u_b 为线性反馈控制；u_d 为基于大范围位移时的非线性运动补偿。

2.3 平台运动控制实验

磁束缚悬浮平台包含悬浮盘、三圆环永磁体、电磁-永磁混合致动器以及支撑架。电气部分由控制器、传感器以及放大器组成。以 Y 方向为例，进行运动实验。首先对磁悬浮平台进行阶跃响应实验，位移变化响应曲线如图 1 所示。



1 悬浮平台阶跃运动实验结果图

3 结 论

本文提出的非线性补偿+PID 复合控制策略能够有效克服磁悬浮平台的非线性特性，实现平台在大范围内的快速运动控制，验证了该方案在单自由度大范围轨迹跟踪中的有效性与可靠性。

参考文献（References）：

[1] 曹广忠,潘剑飞,邱洪著. 磁悬浮系统控制算法及实现[M]. 北京：清华大学出版社,2013.

[2] Tang J, Li C, Zhou J, et al. Vibration suppression control and anti-eccentric load correction mechanism of magnetic levitation decoupling platform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 225: 112314.

收稿日期：2026 年 05 月 25 日.

基金项目：机电耦合系统非线性振动机理及抑制方法研究（12372005）

作者简介：王文(1998 年－)，男，内蒙古乌兰察布，学生，硕士，主要从事磁悬浮平台、运动控制的研究；通信方式：wen.wangneu@foxmail.com，联系电话：15848842998

文章编号： 486-052

磁悬浮无油涡旋压缩机喘振分析与抑制

郭辉[1],李昕[1]，史策[1],孙凤[1,*],于佳乐[1],金俊杰[1],徐方超[1],柯丽[2]

（1.沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870;2.沈阳工业大学电气工程学院 沈阳 110870)

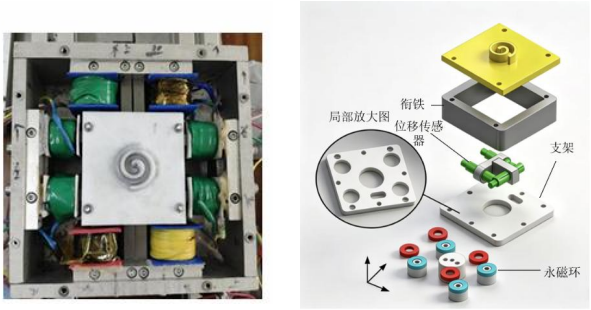
1 引言

传统的涡旋压缩机通常依赖于润滑油来减少摩擦和磨损，这限制了其在对油污染敏感领域的应用[1]。现有无油技术存在局限，而磁悬浮驱动技术为“真无油”提供了新路径[2]。此外，磁悬浮轴承的应用消除了机械摩擦，延长了设备寿命，并降低了振动和噪声水平[3]。然而，由于涡旋盘之间无机械接触，且气体力与电磁力存在强耦合，在低流量或变背压工况下极易发生动涡盘径向喘振，严重破坏运行稳定性。因此，揭示喘振机理并发展有效的主动抑制方法具有重要的工程价值。

2. 喘振分析与抑制研究

2.1 结构及工作原理

磁悬浮无油涡旋压缩机的驱动装置结构如图 1 所示，三组电磁铁和衔铁组成径向平面电磁驱动单元，通过差动控制驱动单元保证动静涡盘按照预定的轨迹进行移动，径向电磁驱动装置可以完成两个直线运动和一个转动的非接触驱动方式，实现动涡盘的防自转功能，四组上下对称分布的永磁环安装在支架的四个凹槽内形成永磁随变机构，利用斥力实现动涡盘的轴向非接触支撑。

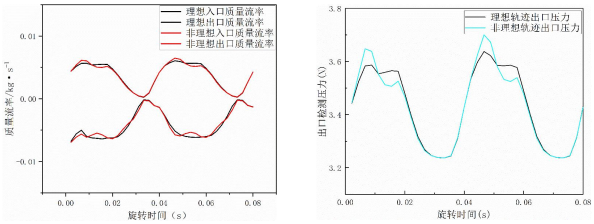


a 驱动装置结构　　b 压缩机结构

图 1 磁驱动装置及压缩机结构

2.2 流体仿真

如图 2 所示在非理想轨迹工况下，出口压力曲线峰值显著升高、波动幅度增大，同时入口与出口质量流率出现明显的振荡偏差，偏离了理想工况下的平滑规律。这说明偏心误差导致气流流动失稳，已出现喘振前兆，流动稳定性明显劣于理想工况。



a 质量流率　　b 压力脉动

图 2 流体仿真

2.3 喘振分析与抑制

磁悬浮轴承提供的轴向电磁力 F_{mag} 与位移偏差呈线性关系：

$$F_{mag}=k_i i(t)+k_s z(t) \tag{1}$$

式中k_i为电流刚度，k_s为位移刚度。将电磁力引入轴向动力学方程，得到扩展喘振模型：

$$m\ddot{z}+c\dot{z}+k_s z=F_{mag}+\Delta p A_{eff} \tag{2}$$

其中Δp 为压缩腔压力脉动，A_{eff}为有效受力面积。基于电磁力-位移关系与轴向动力学，提出自适应前馈-反馈复合控制：PID 反馈维持悬浮刚度，前馈辨识压力脉动并产生反向电磁力抵消激振，从而抑制喘振、提升稳定裕度。

3 结　论

流体仿真表明过压缩引发压力骤降与倒流是喘振诱因；基于电磁力-压力脉动耦合模型，采用 PID 反馈维持刚度、前馈抵消脉动的复合控制可有效抑制喘振。

参考文献（References）：

[1] Jun W ,Yi H ,Shiyang P , et al.Design and development of an oil-free double-scroll air compressor used in a PEM fuel cell system[J].Renewable Energy,2022,199840-851.

[2] 史策.无油涡旋压缩机的磁力驱动机理及轨迹控制特性研究[D].沈阳工业大学,2024.

[3] Xue H, Gang L,Baodong C et al. Surge Disturbance Suppression of AMB-Rotor Systems in Magnetically Suspension Centrifugal Compressors [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(4): 1550-1560.

收稿日期： 2026 年 05 月 25 日.

基金项目： 国家自然科学基金面上项目（No.52375258）资助.

作者简介： 孙凤(1978－)，男，三级教授，博士，主要从事磁悬浮、机电一体化的研究；通信方式：E-mail:sunfeng@sut.edu.cn、联系电话 18904040100

文章编号：486–053

基于 MGI-ESO 的磁悬浮电机无感控制研究

王皓，张海峰，郑世强，陈宝栋
（北京航空航天大学 大科学装置研究院，北京 100191）

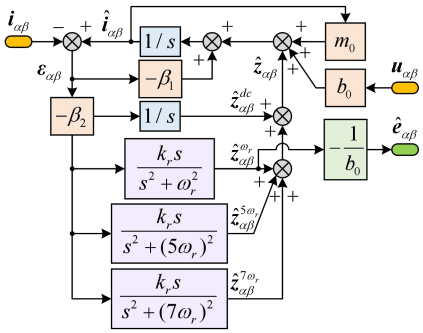
1 引言

凭借参数整定简单、易于实现以及鲁棒性强等优点，线性扩展状态观测器（LESO）已成为永磁同步电机（PMSM）无位置传感器控制领域的研究热点[1]。然而，传统 LESO 的传递函数具有二阶低通特性，这会导致估计的反电动势（BEMF）出现相位滞后。尽管可以通过增加 LESO 的带宽来减小估计误差，但较高的带宽会使观测器对噪声更加敏感。因此，本文提出了一种多重广义积分扩展状态观测器（MGI-ESO）来估计 PMSM 的反电动势。所提出的观测器能够消除稳态位置估计误差，并抑制反电动势中的直流偏置和高次谐波干扰。

2 MGI-ESO 的设计与分析

所采用的 MGI 的传递函数可表示为：

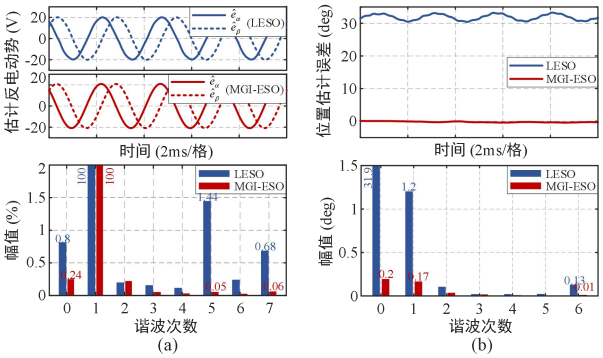
$$G_{MGI}(s)=\frac{k_r s}{s^2+\omega_r^2}+\frac{k_r s}{s^2+(5\omega_r)^2}+\frac{k_r s}{s^2+(7\omega_r)^2} \quad (1)$$



1 MGI-ESO 的结构框图

其中，k_r 为比例增益，ω_r 为谐振角频率，对应于电机的基波电气频率。$5\omega_r$ 和 $7\omega_r$ 项分别代表第 5 次和第 7 次谐波频率。采用该结构旨在抑制 BEMF 中的第 5 次和第 7 次谐波，这些谐波通常是由逆变器的非线性和磁链的空间谐波引起的。将 MGI 嵌入到 LESO 中，即可得到所提出的 MGI-ESO 的控制框图，如图 1 所示。其中，$\varepsilon_{\alpha\beta}$ 表示在 $\alpha\beta$ 坐标系下的电流估计误差；$m_0=-R_s/L_s$ 且 $b_0=1/L_s$。由于引入了 MGI 项，特征多项式的阶数增加，因此需要对极点配置进行调整。观测器增益可以设计为 $\beta_1=\xi\omega_0$ 和 $\beta_2=\omega_0^2$，其中 ω_0 是 MGI-ESO 的带宽，ξ 是阻尼比。

3 仿真结果与结论



2 估计反电动势与位置估计误差的对比仿真结果。

图 2 展示了对比仿真结果。传统 LESO 受到第 5 次和第 7 次反电动势谐波的干扰，并存在 32°的稳态位置误差。相比之下，所提出的 MGI-ESO 能够准确提取基波反电动势，并有效抑制这些高次谐波，并将稳态位置误差消除至接近 0°，展现出更好的跟踪精度和抗干扰能力，对磁悬浮电机的高速稳定运行具有重要意义。

参考文献（References）：

[1] 马雨新，赵朝会. 基于相位超前校正 LESO 的 PMSM 无位置传感器控制研究[J]. 电机与控制应用，2025，52(07)：778-787.

收稿日期： 2026 年 05 月 25 日.
基金项目： 国家自然科学基金（62225301、62303032）.
作者简介： 王皓(2000—)，男，山东省日照市，博士研究生，学士学位，主要从事高速永磁电机控制的研究；通信方式：E-mail: wanghao2022@buaa.edu.cn

文章编号：486-054

磁悬浮电机互感作用建模及抑制方法

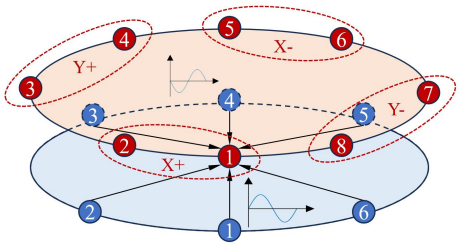
葛语丞，王坤，周金祥，郑世强
（北京航空航天大学 大科学装置研究院，北京 100191）

1 引言

以磁悬浮分子泵等为代表的高速磁悬浮电机正朝着体积更紧凑，负载更高的方向发展。大电机电流下，不可避免的漏磁会使磁轴承与电机间产生强烈的互感现象，在磁轴承中产生额外的感生电动势，进而影响磁悬浮电机的正常稳定工作。为了进一步分析互感作用的成因及其影响，本文建立了互感作用的数学模型，提出了一种超扭曲滑膜观测器（STSMO）用于观测磁轴承中产生的感生电动势，STSMO 相较于传统滑膜观测器（SMO），能在保证高鲁棒性的同时抑制高频抖振[1]。最后基于观测值进行前馈补偿，进而实现互感作用的抑制。

2 互感作用建模及抑制方法

2.1 数学建模



1 互感作用示意图

图 1 所示为电机线圈与磁轴承线圈相对关系简易示意图，以 x+侧的两个线圈为例，在材料均匀的条件下，各电机定子线圈的漏磁系数 η 相等，磁轴承线圈 1，2 中的感生电动势 E_1，E_2 可表示为

$$E_1=-M_{11}\eta\frac{dI_1}{dt}-M_{21}\eta\frac{dI_2}{dt}-M_{31}\eta\frac{dI_3}{dt}-M_{41}\eta\frac{dI_4}{dt}-M_{51}\eta\frac{dI_5}{dt}-M_{61}\eta\frac{dI_6}{dt}=\eta\omega I_m A_1\cos(\omega t+\theta_1) \quad (1)$$

$$E_2=-M_{12}\eta\frac{dI_1}{dt}-M_{22}\eta\frac{dI_2}{dt}-M_{32}\eta\frac{dI_3}{dt}-M_{42}\eta\frac{dI_4}{dt}-M_{52}\eta\frac{dI_5}{dt}-M_{62}\eta\frac{dI_6}{dt}=\eta\omega I_m A_2\cos(\omega t+\theta_2) \quad (2)$$

其中 M_{ab} 为第 a 个电机定子线圈对第 b 个磁轴承线圈的互感系数，I_m 为电机电流幅值，ω 为转速，A 为幅值系数，θ 为相角。因此 x+侧的总感生电动势 E_{x+} 为

$$E_{x+}=E_1-E_2=\eta\omega I_m A_{x+}\cos(\omega t+\theta_{x+}) \quad (3)$$

2.1 抑制方法

带有感生电动势的磁轴承数学模型可表示为

$$Ri(t)+L\frac{di(t)}{dt}=u(t)+E(t) \quad (4)$$

由此构建使用 STSMO 的离散化动态电流方程

$$\hat{i}(n)=\left(1-\frac{R}{L}T_s\right)\hat{i}(n-1)+\frac{T_s}{L}\hat{E}_m(n-1)+\frac{T_s}{L}v_{smo}(n-1) \quad (5)$$

定义电流观测误差为 $s(n)=i(n)-\hat{i}(n)$，STSMO 的控制率设计为：

$$\begin{cases} v_{smo}(n)=k_1|s(n)|^{0.5}\operatorname{sgn}[s(n)]+z(n) \\ z(n)=z(n-1)+T_s k_2\operatorname{sgn}[s(n)] \end{cases} \quad (6)$$

其中 k_1，k_2 是 STSMO 观测器增益，z 是 STSMO 控制率，sgn 是符号函数。

3 结论

式 3 表明感生电动势与电机电流，转子转速有关，即电机电流越大，转速越高，所产生的感生电动势越强烈。使用 2.1 所示离散 STSMO 能够有效观测磁轴承中产生的感生电动势，基于观测值进行前馈控制，即可实现互感作用的抑制。

参考文献（References）：

[1] 王雷，王育安，吴建昆，等. 永磁同步电机改进型超螺旋滑模观测器的控制研究[J]. 电工电气，2024，(08)：15-20+25.

收稿日期： 2026 年 05 月 25 日.

基金项目： 国家自然科学基金（62225301、62474014、82027802）.

作者简介： 葛语丞(2001－)，男，江西省吉安市，博士研究生，学士学位，主要从事磁悬浮轴承控制相关的研究；通信方式：E-mail: geyucheng@buaa.edu.cn

文章编号： 486-055

考虑空间参数波动的 PMLSM 自适应控制方法

陈俩[1]，徐帅[2]，马光同[1]

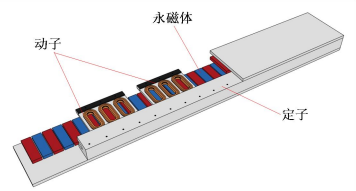
(1.西南交通大学 电气工程学院，四川省成都市 邮编 611756；2.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川省成都市 邮编 610031)

1 引言

永磁直线同步电机（Permanent magnet linear synchronous motor, PMLSM）在长行程运行中，受端部效应、气隙变化等因素影响，电感参数与磁链分布随动子位置持续波动，导致推力波动与速度振荡[1],[2]。现有控制方法多基于固定参数模型设计，难以适应此类空间参数时变工况。为此，本文提出一种考虑空间参数波动的模型参考自适应控制(Model Reference Adaptive Control, MRAC)方法，以提升系统运行稳定性与鲁棒性。

2 正文

2.1 PMLSM 空间参数波动模型



1 PMLSM 示意图

图 1 为 PMLSM 结构示意图，其主要由长定子、短动子以及双边永磁体组成。其中永磁体沿运动方向周期性排列，动子位于双边永磁结构中间，通过电磁耦合作用产生直线推力。PMLSM 在 dq 轴下的电压方程可以表示为：

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d(x)\dfrac{di_d}{dt} - \dfrac{\pi v}{\tau} L_q(x) i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q(x)\dfrac{di_q}{dt} - \dfrac{\pi v}{\tau} L_d(x) i_d + \dfrac{\pi v}{\tau}\varphi_f(x) \end{cases} \tag{1}$$

其中，u_{dq}, i_{dq}, L_{dq} 分别表示 dq 轴电压、电流以及电感,R_s 为定子电阻。v 表示动子速度，τ表示极距，φ_f 表示永磁体磁链。(x)表示与距离位置有关的项。

2.2 自适应控制方法

针对 PMLSM 空间参数波动问题，本文 MRAC 框架，设计位置调度自适应控制器。以标称参数下的 q 轴电流动态作为参考模型：

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q^0} i_q^* + \frac{1}{L_q^0} u_q \tag{2}$$

其中，i_q^* 为参考电流，上标 0 表示标称值。定义跟踪误差 $e = i_q - i_q^*$，构造 Lyapunov 函数：

$$V = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{\theta}^{\mathrm{T}}\tilde{\theta} \tag{3}$$

其中γ为自适应增益，$\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta^*$ 为参数估计误差，$\hat{\theta}$ 为待估计参数向量，θ^* 为真实值，对 V 求导并令 $dv/dt \le 0$,推导可以得到自适应更新律：

$$\frac{d\hat{\theta}(x)}{dt} = -\gamma e \phi(x) \tag{4}$$

考虑到空间参数波动具有以极距τ为周期的周期性特性，将待估参数向量 $\hat{\theta}$ 与回归向量 $\phi(x)$ 分别定义为：

$$\hat{\theta} = [\hat{\theta}_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \ldots, a_N, b_N]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

$$\phi(x) = [1, \cos\frac{2\pi x}{\tau}, \sin\frac{2\pi x}{\tau}, \ldots, \cos\frac{2\pi N x}{\tau}, \sin\frac{2\pi N x}{\tau}]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

其中，N 为傅里叶展开阶数，$\hat{\theta}_0$ 为直流分量估计值，a_k、b_k(k=1,…,N)分别为第 k 阶余弦与正弦分量的系数。参数估计值由 $\hat{\theta}(x) = \hat{\theta}^{\mathrm{T}}\phi(x)$ 计算得到，自适应律对 $\hat{\theta}$ 中每个系数独立更新，使控制器参数随动子位置自动调整，实现对空间参数波动的动态补偿。

3 结论

针对 PMLSM 长行程运行中电感参数与磁链随位置波动的问题，提出了一种基于 MRAC 的位置调度自适应控制方法。通过引入傅里叶级数参数化描述空间波动规律，设计自适应律在线更新各阶系数，并基于 Lyapunov 理论证明了跟踪误差的渐近收敛性。理论分析表明，所提方法能够有效抑制推力波动，提升速度跟踪精度。

参考文献(References):

[1] 张晓虎,赵吉文,王立俊,等.基于自适应互联扩展卡尔曼观测器的永磁同步直线电机高精度抗干扰在线多参数辨识[J].中国电机工程学报,2022,42(12):4571-4581

[2] 程远雄.永磁同步直线电机推力波动的优化设计研究[D].华中科技大学,2011.

收稿日期： 2026 年 05 月 26 日.

作者简介： 陈俩，博士在读，主要从事直线电机控制研究；通信方式：chenliang0113x@163.com

文章编号： 486-056

紧凑型大承载准零刚度隔振器特性研究

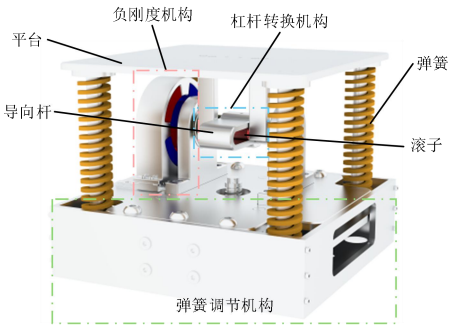
张明[1]，李洪涛[1]，王福晖[1]，薛诗哲[1]，徐方超[1]，孙凤[1]，
1.沈阳工业大学 机械工程学院，辽宁省 沈阳市 110870

1 引言

精密设备对外部低频振动高度敏感，严重影响设备作业精度[1]。传统线性隔振技术存在承载力与低频隔振性能难以兼顾的固有弊端，隔振效果存在明显局限。现阶段准零刚度（QZS）隔振技术虽有效弥补了线性隔振的不足，但在承载适配性与体积紧凑性等方面仍存有短板。基于此，本研究基于扭转磁负刚度(TMNS)和杠杆原理，提出一种紧凑型大承载 QZS 隔振器。

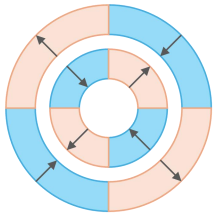
2 QZS 隔振器结构以及结果分析

图 1 为本文所提出隔振器的结构三维模型，该隔振器核心由 TMNS 机构与杠杆转换（LC）机构构成。其中，TMNS 机构由内外两层径向充磁的瓦型永磁体组成，具体磁极配置如图 2 所示。当内外圈磁体发生相对旋转运动时，磁体间形成排斥力，进而产生稳定的扭转负刚度。



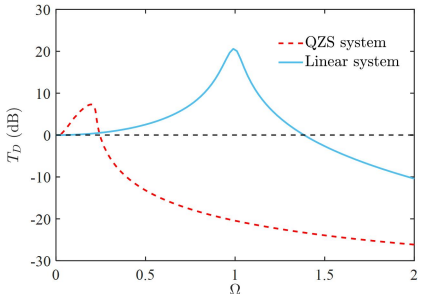
1 隔振器三维模型

LC 机构依靠滚子沿导向杆上的滑槽滑动完成运动传递，可将 TMNS 机构生成的扭转负刚度等效转换为垂向负刚度。该负刚度与线性弹簧的正刚度并联耦合，使系统具备 QZS 特性。在平衡位置时转换机构初始力臂小于磁体耦合作用半径时，机构能够实现力的放大，从而在有限体积下提高负载。



2 磁铁数量与磁极配置

图 3 展示了所提出的 QZS 系统与线性系统位移传递率的对比。在负载相同时 QZS 系统相较于线性系统具有更低的起始隔振频率和位移传递率峰值。



3 QZS 系统与线性系统的传递率对比

3 结 论

本文提出的 QZS 隔振器结构紧凑、承载能力强，外形尺寸为 210mm×210mm×165mm，额定承载质量为 30kg，约为同类型隔振器[2]（4.1kg）的 7.32 倍，大幅提升了重载低频隔振的工程适用性。

参考文献（References）：

[1] Zhang M, Li H, Zhang L, et al. A dual-mode hybrid magnetic high-static-low-dynamic stiffness vibration isolator[J]. Journal of Sound and Vibration, 2025, 599: 118906.

[2] Yu C, Jiang Q, Fu Q, et al. Modeling and analysis of a torsional magnetic negative stiffness structure for flexible vertical low-frequency vibration isolation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 212: 111285.

收稿日期： 2026 年 05 月 28 日.

基金项目： 辽宁省科技厅联合基金项目，低频磁力隔振技术的机理与实现（2024-MSLH-372）.

作者简介： 张明(1988－)，男，辽宁省盘锦市，副教授，博士，主要从事低频磁力隔振、柔性机器人的相关研究；
E-mail:mingzhang@sut.edu.cn

文章编号：486–057

两级电磁阻尼器的电磁力优化方法

杜永康[1]，李标[1]，陈艺宣[1]，曹宇帆[1]，焦小磊[1]✉
（1. 中山大学 先进制造学院，广东深圳 518107）

1 引言

高精度航天器在遥感、通信、观测等领域具有重要应用，微振动是制约其观测分辨率与指向稳定性的关键因素[1]。电磁阻尼作为一种非接触式减振器件，具有良好的减振性能。Stabile 等[2]提出一种带有嵌入式电磁阻尼的二自由度隔振系统。然而，该类阻尼器目前仍存在电磁力输出过小、阻尼耗能不足的问题。为此，本文提出一种电磁力优化方法，通过磁路参数优化，系统研究影响电磁力幅值的关键因素，旨在实现高效阻尼耗散。

2 电磁力优化方法

2.1 电磁阻尼器的结构与工作原理

图 1 展示了阻尼器的物理模型及磁体、线圈和弹簧片的三维结构。激励源使弹簧片受振来驱动磁体运动；根据法拉第电磁感应定律和安培力定律，线圈切割磁感线产生感应电流，其所受电磁力与相对运动方向相反，从而以电磁阻尼形式耗散能量。

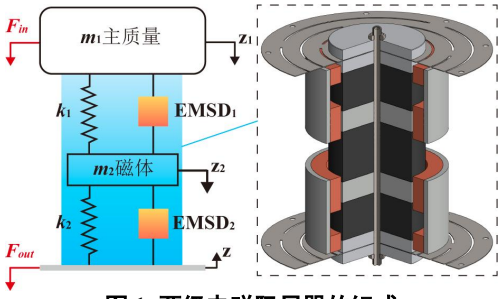


图 1 两级电磁阻尼器的组成

2.2 电磁力优化效果

为增大电磁力输出，使用有限元软件 COMSOL 对磁路关键参数进行仿真优化。采用单参数顺序优化策略，每次仅改变一个参数，并将当前使线圈电磁力幅值最大的参数值固定，用于后续分析。图 2 给出了振幅为 0.2 mm 时，优化前后模型在 1～300 Hz 频率范围内的总电磁力幅值 F_{total}（F_{total} 为两个线圈组共同产生）。在前 30 Hz，F_{total} 随频率近似线性增大，优化模型的 F_{total} 约为原模型的 17 倍；在 200 Hz 后趋于平缓，200～300 Hz 频段内优化模型的 F_{total} 约为原模型的 8.5 倍。

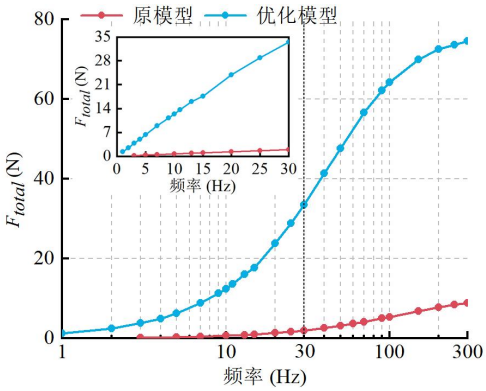


图 2 优化前后模型在不同频率下 F_{total} 对比

3 结 论

通过磁路参数优化，确定了电磁阻尼器的最优尺寸组合。结果表明，优化后模型在全频段的电磁力输出显著提升，验证了磁路参数优化的有效性。

参考文献（References）：

[1] 于登云，练敏隆，周峰，等. 微振动对高轨(GEO)遥感卫星图像质量的影响[J]. 中国科学:信息科学, 2019, 49(1):79-86.

[2] Stabile A ,Aglietti S G ,Richardson G , et al.A 2-collinear-DoF strut with embedded negative-resistance electromagnetic shunt dampers for spacecraft micro-vibration[J]. Smart Materials and Structures,2017, 26(4):1-11.

收稿日期： 2026 年 05 月 27 日.

基金项目： 国家重点研发计划资助 2023YFC2205901.

作者简介： 第 1 作者：杜永康(2002－)，男，硕士研究生，主要从事电磁阻尼隔振的研究；通信方式：E-mail: duyk@mail2.sysu.edu.cn
通讯作者：焦小磊(1987－)，男，博士，副教授，主要从事智能结构机构设计与力学性能调控、精密仪器振动测量与抑制；通信方式：E-mail: jiaoxlei@mail.sysu.edu.cn

文章编号：486–058

基于改进麻雀算法的直线感应电机多参数估计

丰富[1,2]，刘森标[2]，胡海林[2]，陈雨晖[2]

(1. 赣南实验室，江西省赣州城市 邮编 341000；2. 江西理工大学电气工程与自动化学院，江西省赣州城市 邮编 341000)

1 引言

直线感应电机（Linear Induction Motor，LIM）因结构简单、可直接产生推力，在轨道交通等领域应用广泛。然而，受端部效应、大气隙等因素影响，其等效电路参数的准确估计对高性能控制至关重要，传统参数估计方法对模型线性化假设依赖较强、易受初值和工况变化影响。随着智能优化算法的发展，粒子群算法、遗传算法、差分进化算法和麻雀搜索算法（Sparrow Search Algorithm, SSA）等被引入电机参数辨识领域[1]。

本文提出一种改进麻雀搜索算法（ISSA），融合自适应发现者比例、警戒者局部扰动与精英保留机制三项策略，用于 LIM 关键参数的在线辨识。并过与标准 SSA 的对比实验，验证了 ISSA 在辨识精度、收敛速度及鲁棒性方面的优越性。

2 改进麻雀算法参数估计

考虑 LIM 参数辨识目标函数的强耦合特性及速度相关端部效应，在目标函数中引入速度相关修正因子，对候选参数对应的等效电磁模型进行动态修正[2]，并以电流预测误差作为主要适应度指标。为缓解 SSA 后期易早熟、局部开发能力不足的问题，提出发现者数量随迭代次数递减的改进策略：前期强化全局探索，后期提升局部开发精度。

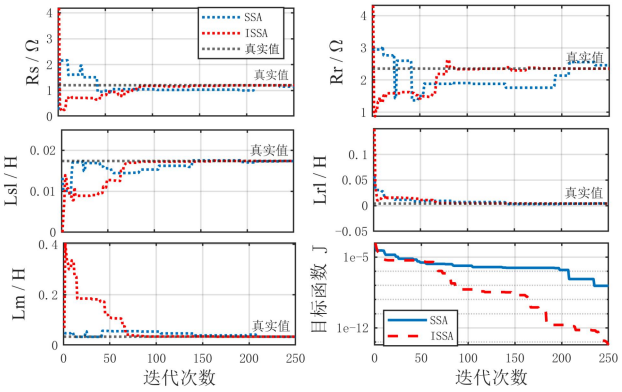
$$N_P^t = \max\left(1, \left\lfloor PD_{base} \cdot \left(1 - \frac{t-1}{T_{\max}}\right) \cdot N \right\rfloor\right) \quad (1.1)$$

其次，根据个体适应度与种群适应度中位数的关系，对警戒者施加差异化局部扰动：

$$x_{ij}^{t+1} = \begin{cases} x_{ij}^t + 0.1 \cdot \left(U_j - L_j\right) \cdot \xi, f_i > f_{median} \\ x_{best}^t + 0.05 \cdot \xi, f_i \le f_{median} \end{cases} \quad (1.2)$$

引入精英保留机制，用历史最优个体替换当前最差个体，以避免优良解在随机更新中丢失：

$$\begin{cases} x_{worst}^t = x_{best}^{global} \\ f_{worst}^t = f_{best}^{global} \end{cases} \quad (1.3)$$



1 多算法参数估计收敛性能对比：SSA vs ISSA

3 结论

本文提出 ISSA 估计直线感应电机参数，仿真结果如图 1 所示，ISSA 在精度、收敛速度与鲁棒性上均优于 SSA 预测性能与实测高度吻合，估计参数相对误差小于 0.5%，平均适应度值降低 93.5%，可为 LIM 高性能控制参数整定提供依据。

参考文献 (References)：

[1] Advanced linear machines and drive systems[M]. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2019.

[2] Hailin Hu,Shiyan Yu,Liangjie Ren,et al. Improved Interconnected MRAS Parameter Identification for Speed Sensorless Control of Linear Induction Motor[J]. Actuators,2025,Vol.14(1): 2.

收稿日期：2026 年 05 月 29 日.

基金项目：高层次人才科研专项经费（205200100844）.

作者简介：丰富(1995－)，男，湖南湘阴，讲师，博士，主要从事直线电机模型预测控制、无速度传感器控制的研究；通信方式：fengfu@jxust.edu.cn

文章编号：486-059

磁悬浮驱动泵用电涡流位移传感器研究

王文夏[1]，吴华春[1,2]，胡业发[1,2]，宋春生[1,2]，江友亮[1,2]
(1.武汉理工大学 机电工程学院，湖北省 武汉市 430070；2.湖北省磁悬浮工程技术研究中心，湖北省 武汉市 430070)

1 引　言

磁悬浮驱动泵以无轴承薄片电机为核心，具有结构紧凑、无机械磨损等优点，在半导体和生物制药领域具有应用价值[1,2]。如图 1 所示，本文面向该类泵中受限空间下的电涡流位移传感器，研究不锈钢包覆永磁体双层材料转子对等效电感与位移关系的影响，以及旋转永磁体、驱动线圈和悬浮线圈在探头线圈中引入的低频感应电压。针对上述问题，本文对磁悬浮驱动泵受限空间下的电涡流位移传感器进行结构与电路优化，实现了双层材料转子响应补偿和低频感应电压抑制，从而提高转子径向位移检测的稳定性和精度。

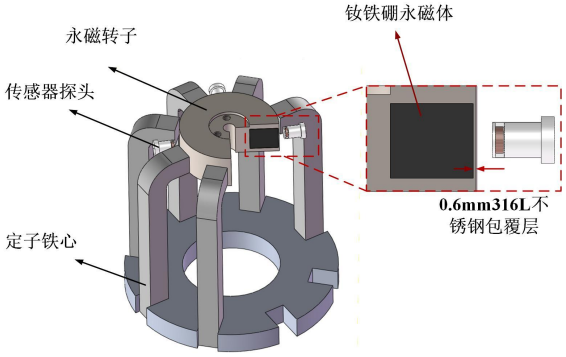


图 1 磁悬浮驱动泵结构

2 传感器性能优化与干扰抑制

为实现双层材料转子响应补偿，本文建立探头线圈与转子的电磁响应模型，通过电磁仿真优化线圈结构和激励频率，以提高传感器在工作距离范围内的灵敏度；同时基于实际转子建立标定补偿关系，修正双层材料结构引起的位移偏移。

如图 2 所示，旋转永磁体及驱动、悬浮线圈的低频交变磁场会耦合至探头线圈并产生感应电压。为了抑制低频感应电压，本文在谐振信号进入检波电路前加入带通滤波环节，以衰减低频感应电压；同时采用开关式同步检波方法，仅提取与激励信号同频同步的幅值信息。

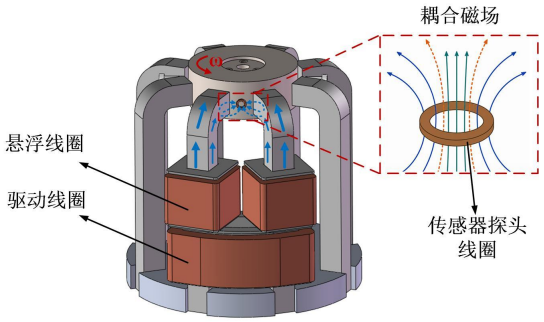


图 2 探头线圈的磁场耦合

通过上述结构优化、标定补偿、滤波和同步检波设计，可提高传感器在受限安装空间内的输出灵敏度和线性度，并减小双层材料转子响应偏移及低频感应电压引起的位移检测误差。

3 结　论

本文针对磁悬浮驱动泵用电涡流位移传感器在受限空间、双层材料转子和低频电磁干扰下的检测需求，进行了传感器结构与检测电路优化。结果表明，该设计可补偿双层材料转子响应偏移，抑制低频感应电压干扰，提高转子径向位移检测的稳定性和精度。

参考文献（References）：

[1] 金超武, 熊峰, 周瑾, 等. 定子永磁型无轴承薄片电机的机理研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(12):17-26.

[2] Zhang Y, Hu L, Su R, et al. Design method of bearingless permanent magnet slice motor for maglev centrifugal pump based on performance metric cluster[C]//Actuators. MDPI, 2021, 10(7): 153.

收稿日期：2026 年 05 月 31 日.

基金项目：节能型多极独立高冗余磁轴承结构设计与磁滞损耗机理研究（2024YFB3410001）.

作者简介：王文夏(2001－)，男，湖北省汉川市，硕士，主要从事磁悬浮轴承、电涡流位移传感器的研究；通信方式：E-mail:361064@whut.edu.cn、联系电话:15271173581

文章编号：486-060

改进分数阶自抗扰控制的磁束缚悬浮平台研究

王文[1]，李朝峰[1,2]，王振坤[1]，唐敬虎[1]，王瑞[1]
(1.东北大学 机械工程与自动化学院，辽宁省 沈阳市 110819；2.东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室，辽宁省 沈阳市 110819)

1 引言

磁悬浮系统具有明显的不稳定性，易受外部干扰和内部不确定性的影响[1]。随着现代控制理论的快速发展，越来越多的控制算法被用于磁悬浮系统的高精度控制[2]。本文提出一种改进自抗扰控制算法，能够实时自动估计和补偿磁悬浮平台的总扰动，增强系统的抗干扰能力.

2 平台研究

2.1 动力学模型

根据磁束缚平台建立X、Y方向动力学模型有:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_{e_x} - F_{m_x} + w_1 \\ m\ddot{y} = F_{e_y} - F_{m_y} + w_2 \end{cases} \tag{1}$$

在悬浮平衡点处进行混合磁力和永磁体磁力的线性化，得到的动力学模型如下:

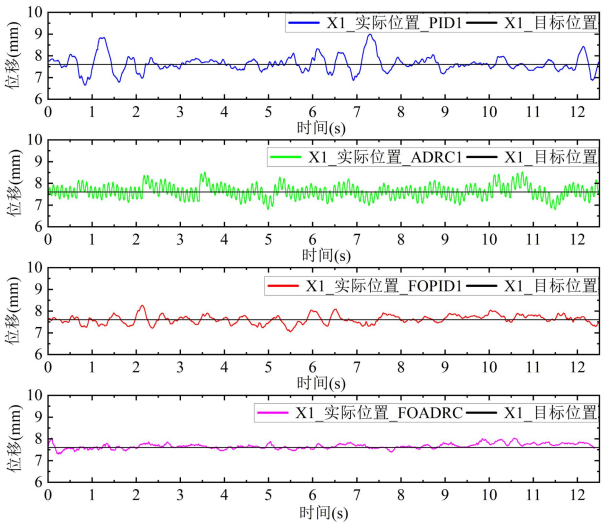
$$\begin{cases} m\ddot{x} = 1.352x + 2.0414i_x + w_1 \\ m\ddot{y} = 1.363y + 2.0414i_y + w_2 \end{cases} \tag{2}$$

2.2 控制器设计

扩张状态观测器(ESO)能够将系统中的未建模动态与不确定性扰动视为一个整体状态进行估计，将分数阶理论引入扩张状态观测器，可提升其对复杂扰动的估计能力。FOESO实时得到总扰动的估计值，在控制律中予以补偿，可以实现主动抗扰的功能。跟踪微分器(TD)用于为输入信号安排过渡过程，引入的微分信号可以抑制控制信号中的高频噪声。采用粒子群优化算法(PSO)对控制器参数进行全局自动整定，以提高参数配置效率与控制器综合性能。

2.3 实验分析

对PID、ADRC、FOPID及FOADRC四种控制算法在磁束缚悬浮平台稳定悬浮控制实验中，X方向的不同算法控制性能表现及对比分析如图1所示。



1 不同算法控制下的平台在X方向稳定悬浮位移变化图

3 结论

本文提出了一种改进分数阶自抗扰控制策略，该策略提升了悬浮平台在X、Y双自由度方向上的控制精度和鲁棒性。通过搭建实验平台完成实验，验证了其有效性与优越性。

参考文献（References）：

[1] 张维煜，张林东，于焰均. 磁悬浮支承-飞轮系统稳定运行关键技术综述[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3):627-639.

[2] Li F-X, Sun Y-G, Xu J-Q, et al. Control Methods for Levitation System of EMS-Type Maglev Vehicles: An Overview[J]. Energies, 2023, 16(7): 2995.

收稿日期：2026年06月02日.

基金项目：机电耦合系统非线性振动机理及抑制方法研究（12372005）.

作者简介：王文(1998－)，男，内蒙古乌兰察布，学生，硕士，主要从事磁悬浮平台、运动控制的研究；通信方式：wen.wangneu@foxmail.com，联系电话：15848842998

文章编号：486-061

大量程位移传感器检测方法研究

胡叨福[1,2]，赵聪[1,2]，李雪[1,2]

(1. 广东省高速节能电机系统企业重点实验室　珠海　519070；

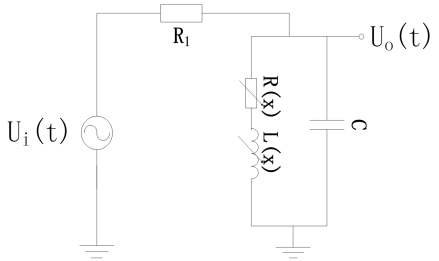
2. 珠海格力电器股份有限公司　珠海　519070)

1 引言

磁悬浮转子的轴向位移检测一般采用两个布局在被检测面同一侧的传感器探头进行差分，其中1个探头作为补偿探头。但这样会导致转子轴向位移检测的灵敏度及线性度显著降低，影响磁悬浮轴承系统转子轴向悬浮的稳定性。本文通过推导分析传感器谐振电压曲线，提出一种在现有安装结构不变的情况下，选取不同电感值的传感器替代补偿探头进行差分测量的方法，实现灵敏度及线性度的提高，同时解决温漂问题。

2 正　文

2.1 电涡流传感器等效电路



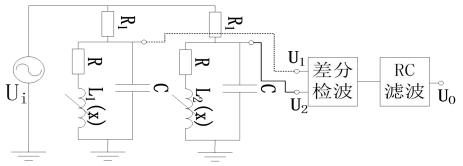
1 电涡流位移传感器等效电路

电涡流传感器输出信号幅频响应：

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{R_1^2\left(\omega^2C^2 - \frac{2C}{L} + \frac{1}{\omega^2L^2}\right) + 1}}$$

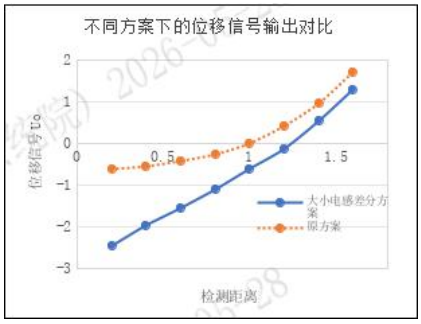
2.2 电涡流传感器谐振电压仿真与实验

采用整个传感器差分检测电路进行仿真验证。



2 差分检测仿真电路

将仿真结果绘制曲线如下图所示，从图中可以看出本文提出的大小电感差分方案可以有效提升传感器输出信号的线性度及灵敏度。通过拟合计算得到大小电感差分方案的灵敏度较原方案灵敏度提升1.64倍，非线性误差[7]由28.3%减小到8.6%。



3 不同电感值方案的位移信号整体输出

设计搭建了电涡流传感器检测校准工装平台，分别按照原补偿探头方案及大小电感差分方案进行传感器输出信号实测。实际测试传感器输出灵敏度提高1.58倍，非线性误差显著降低，由29.5%降低为7.7%。实测结果与仿真结果一致。

3 结　论

本文提出了一种同侧布置的2个电涡流位移传感器检测转子轴向位移变化的方案，通过大、小电感分别仿真及差分仿真验证了方案的可行性，通过实际搭建检测电路板及工装，实测了大小电感差分方案检测轴向位移的传感器输出信号灵敏度提高1.58倍，非线性误差显著降低。

参考文献（References）：

[1] 李红伟，刘淑琴，于文涛，等. 电涡流位移传感器检测磁悬浮转子轴向位移方法[J]. 仪器仪表学报，2011,32(7)：1441-1448.

[2] 王洪波，亚纳米精度电涡流传感器的理论和设计研究[D]. 北京：中国科学技术大学，2015.

收稿日期：2026年06月02日.

基金项目：项目名称（编号）；项目名称（编号）.

作者简介：胡叨福(1985－)，男，高级工程师，硕士，主要从事磁性轴承及其控制的研究；联系电话：0756-8576994

文章编号：486–062

Pressure Shielding and Vortex Amplification of a 600 km/h Maglev Train Passing Tunnel Portals

Almaliki Mustafa Hayder， Yang Ming-Zhi
(School of Transportation Engineering, Central South University, Changsha, Hunan Province 410083)

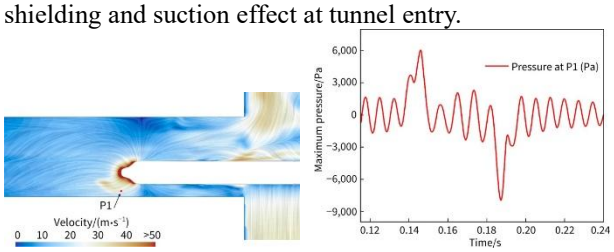
1 引言 Introduction

High-speed maglev trains passing through tunnel portals under strong crosswinds experience rapid changes in the surrounding aerodynamic environment. In our previous full-process analysis, we noticed two obvious local phenomena: a sharp pressure variation near the tunnel wall during tunnel entry, and a sudden increase in vortex intensity and turbulent kinetic energy near the tunnel exit. Therefore, this paper focuses on these two phenomena by analyzing monitoring points P1 and P2, aiming to clarify the pressure shielding effect at tunnel entry and the vortex amplification mechanism at tunnel exit for a 600 km/h maglev train under crosswind conditions.

2 方法与结果 Methodology& results

2.1 Pressure shielding effect at tunnel entry

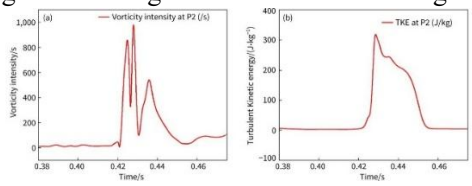
Using 3D CFD with the RANS **k–ω SST** model, a monitoring point **P1** was placed near the tunnel-entry wall to capture the local pressure response of a **600 km/h** maglev train under a **33.7 m/s** crosswind. As the train nose entered the tunnel, the pressure at P1 first increased to about **+6000 Pa** due to air compression, then rapidly dropped to about **−8000 Pa** as the flow accelerated through the narrow train–wall gap. This nearly **14 kPa** pressure swing indicates a clear pressure shielding and suction effect at tunnel entry.



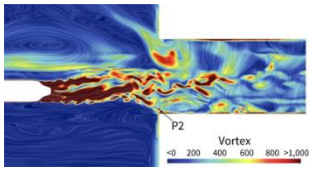
a Measurement point at tunnel entry　　b Pressure history at P1 during tunnel entry.

2.2 Vortex/TKE amplification at tunnel exit

A second monitoring point **P2** was arranged near the tunnel-exit shear layer to evaluate vorticity and turbulent kinetic energy. When the tail nose exited the tunnel, the tunnel outflow interacted with the external crosswind and train wake, causing the vorticity to rise sharply to nearly **1000 s⁻¹**, while the turbulent kinetic energy increased to about **320 J/kg**. This shows that tunnel exit is dominated by vortex amplification and strong turbulence generation near the tail region.



Vorticity and TKE histories at P2.



P2 at the tunnel exit

3 结论 Conclusion

Tunnel portals showed two critical transient effects under crosswind. At entry, P1 captured a strong pressure shielding and suction effect. At exit, P2 showed rapid vortex and TKE amplification. These results indicate that portal regions are key zones for aerodynamic instability in 600 km/h maglev tunnel operation.

参考文献 (References)

[1] Zhang L, Gao Y, Lin TT, et al. Comparative analysis of crosswind influence on aerodynamic characteristics of superconducting and normal-conducting high-speed maglev trains. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2025; **265:106182.**

[2] Lin TT, Yang MZ, Zhang L, et al. Effect of typical arch structure on slipstream and wake flow of 600 km/h maglev train. *Int J Numer Meth Heat Fluid Flow* 2024; **34:2748**–65.

收稿日期：2026 年 06 月 01 日.

基金项目：National Key R&D Program Subtask, 2022YFB4301201-02;National Natural Science Foundation of China, General Program, 52372369.

作者简介：第 1 作者(08-09-1999)，性别(Male)，籍贯(Iraq/ Baghdad)，职称，学位(PhD)，主要从事 Aerodynamics、Maglev train 的研究；通信方式：mustafa891999@gmail.com、联系电话 17872390376

文章编号： 486-063

基于离散时间模型的分段开绕组直线电机参数辨识方法研究

顾世杰，屈鸣鹤，李齐财，余佩倡，李杰

(国防科技大学智能科学学院，湖南省长沙市 410000)

1 引　言

大功率电机驱动系统通常采用便于扩展和模块化设计的多电平逆变器，并采用分布式控制结构。然而，分布式结构和多电平驱动器间不可避免的信号传输会导致控制环路延时，降低控制性能，在高频输出时尤为明显[1]。此外，高功率输出时开关频率通常限制在 1~2 kHz，且需设置较大死区时间以防止桥臂直通，死区效应进一步加剧逆变器输出电压的非线性误差[2]。为此，本文以分段开绕组直线同步电机（SOW-LSM）为研究对象，提出了一种考虑延时与死区非线性的参数辨识方法。

2 正　文

2.1 SOW-LSM 离散时间模型

SOW-LSM 存在零序回路，其原理框图以及在 dq 轴复矢量离散模型分别如下所示。

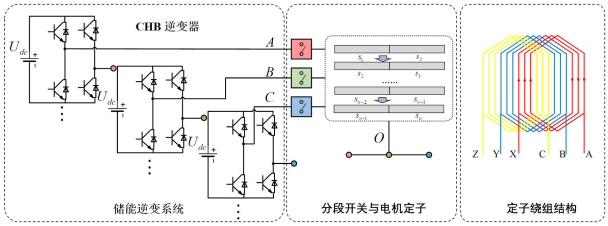


图 1 SOW-LSM 逆变器、分段开关与电机示意图

$$\begin{cases} \boldsymbol{i}_{dq}(k)=e^{-j\omega_e T_s}e^{-\frac{R_s}{L_s}T_s}\boldsymbol{i}_{dq}(k-1)+e^{-j\omega_e T_s}\dfrac{1-e^{-\frac{R_s}{L_s}T_s}}{R_s}\boldsymbol{u}_{dq}^{inv}(k-1) \\ \boldsymbol{i}_0(k)=e^{-\frac{R_s}{L_0}T_s}\boldsymbol{i}_0(k-1)+\dfrac{1-e^{-\frac{R_s}{L_0}T_s}}{R_s}\boldsymbol{u}_0^{inv}(k-1) \end{cases} \tag{1}$$

2.2 基于离散时间模型的参数辨识方法

本文基于考虑延迟与死区的离散时间 SOW-LSM 模型，通过 RLS 方法处理方波注入后的电流电压信号，完成 n，R_s，L_s，L_0，V_{dead} 参数的辨识的方式，参数辨识方法的原理框图如下图所示。

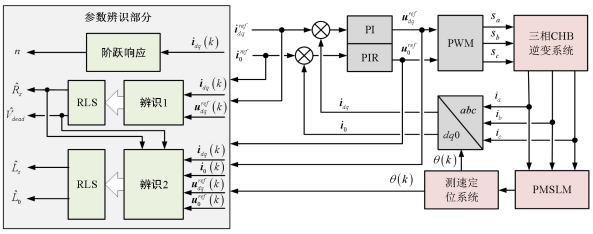


图 2 基于离散时间模型的参数辨识原理框图

2.3 仿真验证

针对 2.1 节所提的 SOW-LSM 搭建仿真模型，下图 3-5 展示了本文所提方法的仿真结果。

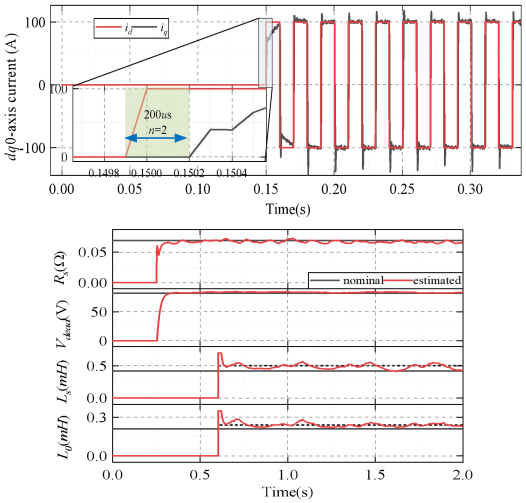


图 3 所提参数辨识方法的仿真结果

3 结　论

仿真结果表明本文所提方法具备较高辨识精度，为 SOW-LSM 高性能控制提供可靠支撑。

参考文献（References）：

[1] Li B, et al. A New Model-Based Dead-Time Compensation Strategy for Cascaded H-Bridge Converters[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2023, 70(4): 3793-3802.

[2] Zhang W, Zhang Z, Liu Y, et al. Discrete-time current regulator for permanent magnet synchronous motor based on a unified complex vector model[J]. IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., 2024.

收稿日期： 2026 年 06 月 15 日.

基金项目： 湖南省研究生科研创新项目（XJJS2025012）.

作者简介： 顾世杰(2001－)，男，江苏昆山人，博士研究生，主要从事电磁推进、直线电机控制的研究；通信方式：gusj2001@nudt.edu.cn、18913284616

文章编号： 486-064

涡流联轴器传动系统动态响应特性研究

徐远[1,2]，王念先[1,2]，陈浩东[1,2]

(1.武汉科技大学 机械工程学院，湖北省武汉市 430081；2.冶金装备及其控制教育部重点实验室，武汉 430081)

1 引言

涡流联轴器（ECC）依靠主、从动端之间的转速差产生涡流感应转矩，具有无机械接触、缓冲减振和软启动等特点。涡流联轴器的传递转矩主要取决于滑差转速，且其滑差—转矩曲线通常呈现先增大后减小的非单调特性。因此，在电机快速启动过程中，主动端转速上升过快，主从动端转速差可能迅速越过最大转矩对应的临界区域，使联轴器进入下降转矩区，进而导致负载端加速迟滞、持续大滑差甚至启动失败等不同动态响应。基于此，本文针对电机—涡流联轴器—负载传动系统，研究电机不同启动过程对滑差演化、传递转矩及负载端转速响应的影响规律。

2 系统模型与动力学方程

2.1 电机-涡流联轴器-负载模型

为分析电机快速启动过程中涡流联轴器传动系统的动态响应特性，将实际传动系统简化为二自由度扭转动力学模型。基于上述分析，建立如图 1 所示的电机—涡流联轴器—负载转子动力学模型。

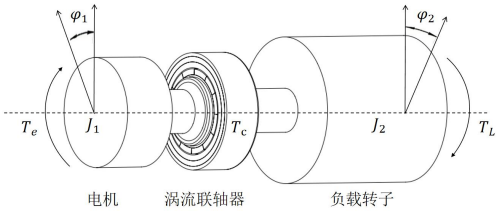


图 1 电机-永磁联轴器—负载转子模型示意图

双惯量系统的扭转动力学方程可写为：

$$\begin{cases} \Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 \\ T_c = f(\Delta\omega) \\ J_1\dot{\omega}_1 = T_e - T_c \\ J_2\dot{\omega}_2 = T_c - T_L \end{cases}$$

2.2 涡流联轴器扭矩特性

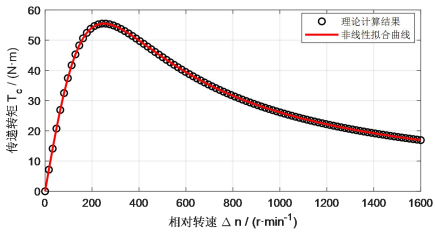


图 2 涡流联轴器转差-扭矩曲线图

由图 2 可知，涡流联轴器传递转矩随相对转速增加呈现先增大后减小的变化规律。当电机启动过快时，主、从动端转速差增大可能使联轴器进入下降转矩区，导致负载端获得的驱动转矩减小。

3 结　论

如图 3 所示启动时间过短时，滑差迅速增大，联轴器易进入传递转矩下降区，导致负载端加速不足，甚至出现无法启动或大滑差运行现象。适当延长启动时间后，滑差变化更加平缓，联轴器能够提供稳定传递转矩，负载端可顺利达到稳态运行。因此，合理设置电机启动时间是降低滑差风险、改善系统启动性能的关键。

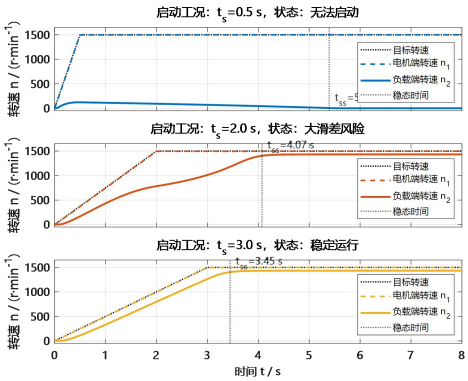


图 3 不同启动状态下 ECC 系统动态特性

参考文献（References）：

[1] Yang, C., Zheng, S., Peng, Z., Zhu, J., & Ding, Y. (2024). A steady-state and dynamic response model for working characteristics prediction of the electromechanical transmission system including eddy-current magnetic coupler. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, *76*(4), 415-436.

[2] 永磁涡流联轴器性能分析. Diss. 长春：吉林大学，2013

收稿日期： 2026 年 06 月 22 日.

基金项目： 项目名称（编号）；项目名称（编号）.

作者简介： 徐远(2001－)，男，江西省九江市，博士研究生，主要从事磁力联轴器，磁悬浮轴承的研究；

通信方式：1339479990@qq.com.

文章编号： 486-065

基于扰动观测器的 MSCMG 磁力卸载方法

于是，刘昆*，魏静波

（中山大学 航空航天学院，广东省 深圳市 518107）

1 引言

磁悬浮控制力矩陀螺（Magnetically Suspend Control Moment Gyroscope,MSCMG）是高机动性敏捷卫星姿态控制系统的理想执行机构。当 MSCMG 的框架转动时磁轴承的径向偏转通道将受到与框架转动相关的干扰力矩，影响磁轴承控制系统的稳定性和精度，将这个力矩称为动框架效应干扰力矩[1]。

针对动框架效应干扰力矩的卸载，多数文献均是基于框架角速度计算干扰力矩的前馈补偿方法[2]。本文提出基于扰动观测器观测磁轴承系统中的干扰力矩并通过磁力卸载器进行补偿，实现了动框架效应干扰力矩的卸载。

2 扰动观测器

MSCMG 中的磁轴承架构如图 1 所示，4 个径向永磁偏置混合磁轴承作用于磁悬浮转子维持径向悬浮，2 个轴向电磁轴承用于轴向悬浮，可复用为磁力卸载器，动框架效应干扰力矩被设计为大部分作用于绕 y 轴偏转通道（β通道）。

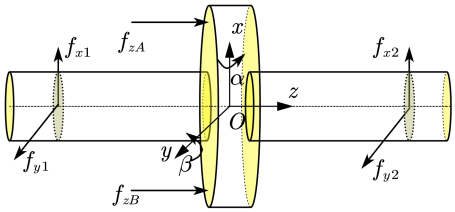


图 1 磁悬浮转子系统结构简图

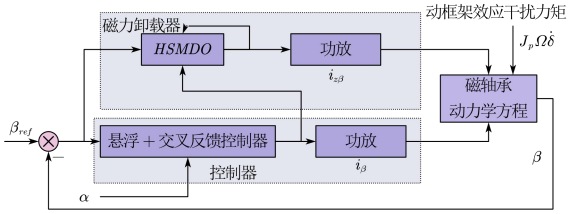
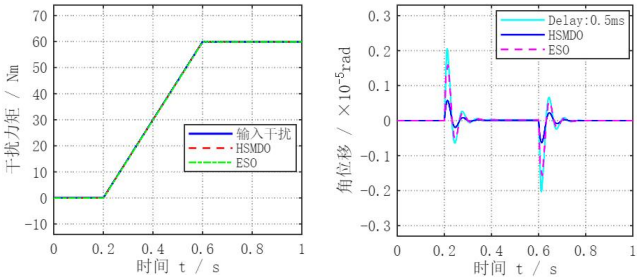


图 2 β 通道控制系统框图

图 2 展示了基于扰动观测器的磁力卸载器的β通道控制系统框图，在悬浮控制器基础上，加入扰动观测器观测干扰力矩并通过磁力卸载器卸载。

3 仿真结果与分析

使框架系统在 0.2s 时框架以角速度 0.5rad/s² 加速至 0.2rad/s，扰动观测器采用的高阶滑模扰动观测器（High-Order Slide Mode Disturbance Observer，HSMDO）以及扩张状态观测器（Extended State Observer，ESO），观察系统响应如图 3。图 3a 表明扰动观测器可以及时跟踪动框架效应干扰力矩，图 3b 表示将观测的干扰力矩经磁力卸载后的角位移响应，基于 HSMDO 的磁力卸载方法具有优秀的卸载效果，验证了该方法的有效性。



a 观测干扰力矩　　b 角位移响应

图 3 仿真结果

4 结论

本文提出了一种基于扰动观测器的 MSCMG 动框架效应干扰力矩的磁力卸载方法，并进行了仿真验证。仿真结果表明该方法能成功观测并卸载系统中的干扰力矩，且具有良好的动态性能与鲁棒性。

参考文献：

[1]侯二永. 磁悬浮控制力矩陀螺结构设计与动力学分析[D]. 国防科学技术大学, 2013.

[2]吕奇超, 吕东元, 李延宝, 等. 小型磁悬浮 CMG 高速转子动框架效应前馈补偿与实验[J]. 飞控与探测, 2019, 2(1):49-55.

收稿日期： 2026 年 06 月 26 日.

基金项目： 无

作者简介： 于是(2002－)，男，重庆市云阳县，硕士研究生，主要从事磁悬浮控制力矩陀螺的研究；通信方式：E-mail:yush33@mail2.sysu.edu.cn

文章编号：486–066

摆线磁齿轮磁力设计与测试分析

程文杰[1]，王晟[1]，李丘力[1]，肖玲[1]，冯圣[2]，王永利[3]

(1.西安科技大学 理学院，陕西省 西安市 710600；2.西安交通大学 机械学院，陕西省 西安市 710054；3.苏州阿威垦智能科技有限公司，江苏省 苏州市 215000)

1 引言

磁性齿轮凭借非接触传动特性，在高可靠性应用场景中相较于机械齿轮具备免润滑、无磨损及固有过载保护等显著优势。在单级大传动比工况下，摆线磁齿轮（Cycloidal Magnetic Gear, CyMG）能够实现比同轴磁场调制式齿轮更高的扭矩密度，在航空航天伺服作动、电动垂直起降飞行器及新能源发电等领域展现出广阔的应用前景[1]。

目前摆线磁齿轮仍存在若干关键问题亟待解决。其一，装配过程中定转子间的径向与轴向磁力缺乏定量计算依据，导致工装设计依赖经验，增加了装配风险。其二，不同永磁体拓扑结构（如表面贴磁式与磁极聚焦式）对输出转矩的影响规律尚不清楚。其三，销轴作为扭矩传递的关键部件，其受力机制与载荷分布规律尚不明确[2]。

针对上述问题，本文建立了摆线磁齿轮径向、轴向磁力的解析模型，为装配提供了参考。对比分析了表面贴磁式与磁极聚焦式永磁体对转矩的影响规律。揭示了销轴的传动机理，并完成了强度与刚度校核。最后研制了样机并进行了实验测试。

2 正　文

在摆线磁齿轮的运行过程中，会产生较大的径向磁力，所以预测运行过程中，径向磁力及其变化可以为确定销轴，轴承等元件提供理论指导。在分析中规定磁吸力为正，磁斥力为负。解析解和有限元法的计算结果如图 1 所示。研制了摆线磁齿轮样机，设计中永磁体选用的是 N35 牌号的烧结钕铁硼，加工的样机如图 2 所示。

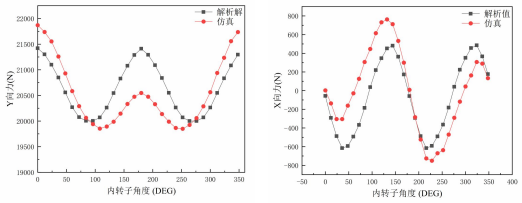


图 1 竖直和水平方向的磁力

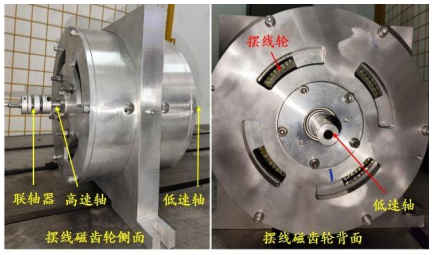


图 2 磁齿轮实验样机

3 结　论

搭建了永磁电机-摆线磁齿轮实验平台，分别开展了空载性能和负载性能测试。实验获得传动比为 45.992，与设计值 46 吻合，证明了样机设计的正确性。测试的负载峰值力矩为 131.3N.m，达到设计值的 65.6%。

参考文献（References）：

[1] Gardner M C, Johnson M, Toliyat H A. Comparison of surface permanent magnet coaxial and cycloidal radial flux magnetic gears[C]2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2018: 5005-5012.

[2] Praslicka B, Johnson M, Plugge E, et al. Design and analysis of a novel, low-cost, high-speed cycloidal magnetic gear for aerospace servo actuator applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(4): 3352-3362.

收稿日期：2026 年 06 月 27 日.

基金项目：国家自然科学基金项目（52275271）；陕西省自然科学基础研究计划（2025JC-YBMS-521）.

作者简介：程文杰(1982－)，男，湖北省、天门市，副教授，博士，主要从事电磁设计与驱动研究；通信方式：E-mail:cwj20070807@163.com、联系电话 18209288175

文章编号：486–067

损耗特征下铁磁材料动态分数阶建模与磁滞回线解析

姚亚鑫[1]，肖玲[1]，程文杰[1]，孙岩桦[2]，杨柏松[2]
（1.西安科技大学 理学院，陕西 西安 710054；2.西安交通大学 机械工程学院，陕西 西安 710049）

1 摘要

本研究以 Bertotti 损耗分离理论为基础，提出了一种基于损耗分离特征的分数阶阶数解析确定方法，建立了静态 Jiles–Atherton 磁滞模型与分数阶磁扩散方程耦合的动态磁化模型。通过分析各损耗分量的频率依赖特性，推导不同损耗分量对应的有效分数阶阶数；进一步将全局分数阶阶数表示为各有效损耗分量阶数的加权组合，实现分数阶阶数的解析确定；将该分数阶阶数嵌入基于 Grünwald–Letnikov 定义的分数阶磁扩散偏微分方程，与静态 J-A 磁滞模型耦合，采用有限差分法进行数值求解。以常用铁芯材料 DT4 为研究对象，利用 20 Hz 准静态磁滞回线数据，通过粒子群优化算法辨识静态 J-A 模型的 5 个本征参数；将该参数与解析确定的分数阶阶数共同引入耦合模型，实现动态磁滞回线解析。结果表明，在 1.0T、1.2T 和 1.5T 三个磁密水平下，由模型解析的磁滞回线在回线面积、矫顽力及剩磁等关键磁化特征上均与实验结果吻合良好。

2 动态分数阶解析模型

为获得描述材料动态磁化行为的分数阶阶数，需建立物理场推导的幂律指数与宏观 Bertotti 损耗分离模型之间的等效映射关系，定义总损耗对频率的对数导数为综合有效指数：

$$\Gamma = \frac{d(\ln W_{total})}{d(\ln f)} \tag{1}$$

经链式法则展开并通分整理，可得到 $\beta_e(f)$ 的解析表达式：

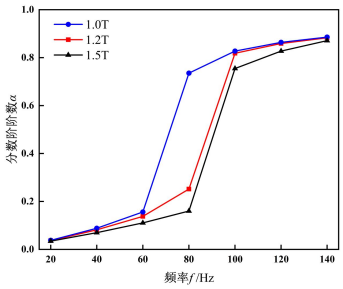
$$\beta_e(f) = \frac{1+\beta}{2}\cdot\Delta\cdot\frac{1-\cosh\Delta\cos\Delta}{(\sinh\Delta-\sin\Delta)(\cosh\Delta-\cos\Delta)} \tag{2}$$

系统的全局有效阶数为各分量阶数的加权叠加：

$$\beta = \beta_e(f)\cdot w_e(f) + 0.5\cdot w_{ex}(f) \tag{3}$$

根据坡印廷矢量，单位面积的动态耗散功率 P_{dyn} 与 $\mathrm{Re}(Z_s)$ 成正比，因此内部电磁场产生的总损耗直接满足：

$$W_{total} \propto f^{\beta} \tag{4}$$

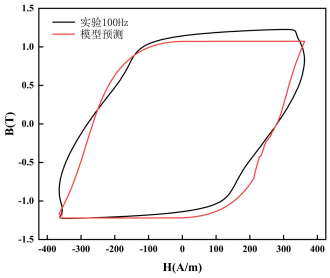


1 不同饱和磁密下分数阶随频率变化特性分析

3 静态 J-A 模型与分数阶磁扩散方程耦合动态磁化模型

鉴于实际工况中磁滞回线的动态高频特性已由上述动态分数阶进行刻画。为避免与分数阶项的功能重叠和参数冗余，将静态 J-A 模型 *B-H* 本构关系代入分数阶磁扩散方程可得耦合解析模型：

$$\nabla^2 H = \sigma\mu_0\cdot\lim_{h\to 0}\frac{1}{h^{\beta}}\sum_{k=0}^{\infty}(-1)^k\binom{\beta}{k}\left(H(t-kh)+M\left(H(t-kh)\right)\right) \tag{5}$$



2 1.2T 下 100Hz 磁滞回线实验及模型解析对比

参考文献（References）：

[1] Ducharne B, Deffo Y A T, Zhang B, et al. Anomalous fractional diffusion equation for magnetic losses in a ferromagnetic lamination[J]. The European Physical Journal Plus, 2020, 135(3): 325.

[2] Zhang C, et al. A novel fractional order magnetic equivalent circuit model of laminated core under high frequency excitations. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 7380-7390

收稿日期： 2026 年 07 月 03 日.

基金项目： 国家自然科学基金（No. 52275271）；陕西省自然科学基础研究项目（2025JC YBMS-521）.

作者简介： 肖玲(1983)，女，江苏省泰州市，教授，博士，主要从事磁悬浮技术、磁材料设计及表征的研究；通信方式：E-mail:xiaoling@xust.edu.cn

文章编号：486-068

考虑热-力-磁耦合的 AlNiCo8 半硬磁材料性能研究

谭紫璇[1]，肖玲[1]，程文杰[1]

(1.西安科技大学 理学院，陕西 西安 710054)

1 摘要

本文以 AlNiCo8 半硬磁材料为研究对象，建立考虑应力等效磁场的温度相关性屈服强度模型；引入温度磁化强度与应力耦合项，建立考虑温度及压力的 Jiles-Atherton 磁滞模型，构建基于融合温度插值与神经网络的物理约束模型，从而实现对热-力-磁多物理场耦合作用下磁性能演化规律的有效表征与预测。研究结果表明：屈服强度及磁性能与温度呈负相关，二者之间则呈正相关，验证了所提屈服强度模型与 Jiles-Atherton 磁滞模型的有效性。基于此，在居里温度及真实服役环境下，进一步实现了少数据驱动下不同温度的磁滞回线预测，该研究为 AlNiCo8 半硬磁材料在复杂环境下的磁性能预测与应用提供了理论依据。

2 AlNiCo 基半硬磁材料温度相关性屈服强度理论模型

为准确描述 AlNiCo8 半硬磁材料在复杂环境下的磁滞特性与力学性能，根据形状改变能密度理论，得到考虑应力等效磁场的温度相关性屈服强度表征模型：

$$\sigma_c(T)=\frac{3}{\pi}\left(\frac{\pi}{2}-\frac{4}{\pi}\right)\left(\frac{4\gamma(T)E_m(T)K_t}{3(1-\upsilon_m(T))r_p}\right)^{0.5}V_P+\left(1-\frac{V_P}{4}\right)\sigma_m(T) \quad (1)$$

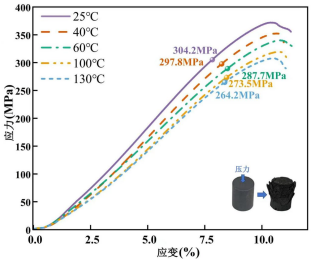


图 1 AlNiCo8 半硬磁材料应力-应变曲线

3 考虑温度及压力影响下的 Jiles-Atherton 磁滞模型

结合 Weiss 平均场理论，引入温度相关磁化强度系数与应力耦合项，建立改进 Jiles-Atherton 磁滞模型：

$$\frac{dM}{dB}=\frac{\delta_M(M-\varepsilon M_{an})-k\delta_B c\varepsilon dM_{an}/dH_e}{\mu_0(1-\alpha)\left[\delta_M(M-\varepsilon M_{an})-k\delta_B c\varepsilon dM_{an}/dH_e\right]-\mu_0 k\delta_B} \quad (2)$$

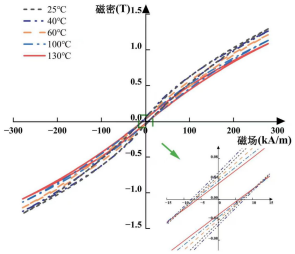


图 2 不同温度下的磁滞回线与退磁曲线

3 宽温域磁滞回线预测方法

建立融合温度插值与神经网络的磁滞回线预测模型，实现有限实验数据条件下不同温度磁滞回线的预测：

$$B(H,T)=w_1B_{\text{interp}}(H,T)+w_2B_{nn}(H,T) \quad (3)$$

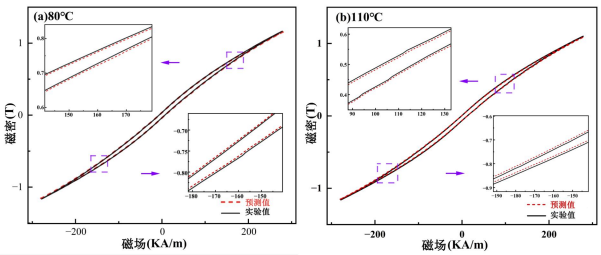


图 3 不同温度下的磁滞回线预测值与实验值

参考文献（References）：

[1] Xiao Ling, et al. Analysis of the optimal heat treatment temperature for AlNiCo-based semi-hard magnetic materials based on temperature-dependent yield strength prediction model. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications 239.11(2025): 2123-2132.

[2] Duan N, Xu W, Wang S, et al. Hysteresis modeling of high-temperature superconductor using simplified preisach model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3): 1-4.

收稿日期：2026 年 07 月 02 日.

基金项目：国家自然科学基金（No. 52275271）；陕西省自然科学基础研究项目（2025JC YBMS-521）.

作者简介：肖玲(1983)，女，江苏省泰州市，教授，博士，主要从事磁悬浮技术、磁材料设计及表征的研究；通信方式：E-mail: xiaoling@xust.edu.cn.