



高速磁浮列车主动导向系统 建模与动态特性分析

车泓欣¹, 王志强^{1,2,3}, 李晓龙^{1,2,3}, 龙志强^{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 266111)

摘要: 针对高速磁浮列车在曲线通过过程中导向系统受力复杂、动力学耦合显著和控制稳定性要求高等问题, 文章开展主动导向系统建模与动态特性分析研究。首先, 在分析高速磁浮列车导向系统总体结构、导向电磁铁、转向架、一系和二系悬挂装置力学特性的基础上, 对车辆系统进行合理简化, 建立了能够表征横向偏移与偏航运动的二自由度导向动力学模型; 其次, 基于电磁场基本理论, 推导了单个导向磁极、单个导向电磁铁的电磁力和力矩计算公式; 结合高速磁浮列车主动导向系统“串级配合差动”的控制思想, 构建了包含电流内环与间隙外环的导向控制器模型, 并在UM仿真平台上开展不同运行工况下的数值仿真分析。研究结果表明, 文章建立的导向动力学模型能够较好反映高速磁浮列车主动导向系统在不同曲线工况下的动态响应特征, 设计的控制器具有较好的稳定性、适应性与鲁棒性。

关键词: 高速磁浮列车; 主动导向系统; 动力学; 电磁力; 导向控制; 仿真

中图分类号: U237

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)02-0025-10

0 引言

自上个世纪起, 我国便开始发展磁浮列车^[1]。时至今日, 研发时速600公里及以上的高速磁浮交通系统, 已成为我国抢占未来地面高速交通技术制高点、构建现代化国家综合立体交通网的重要选择。作为现代交通体系的关键组成部分, 磁浮列车凭借其高速、舒适、低能耗、环保等优势^[2-5], 正逐步成为城际交通快速出行的理想选择。在国家战略层面, 发展时速600公里及以上高速磁浮系统已被明确为发展地面高速交通技术制高点的重要方向。然而, 从试验样车到商业运营仍面临诸多技术挑战^[6]。其中, 导向系统的动态性能与鲁棒控制是主要瓶颈之一^[7-8], 与轮轨系统不同, 磁浮列车完全依靠电磁力实现无接触导向, 其动力学行为复杂, 而且对干扰极为敏感。因此, 建立精确的导向系

统动力学模型, 揭示其动态演化规律, 对于优化参数匹配与鲁棒控制策略、保障列车高速运行下的平稳性与安全性具有重要意义。

在磁浮列车导向动力学领域, 国内外学者围绕系统建模、动态特性分析和控制策略开展了系统研究。文献[9-11]提出了融合间隙与电磁力反馈的信息控制方法, 增强系统对外界扰动的感知能力; 同时, 将轨道不平顺等效为测量扰动, 建立相应系统模型并设计LQR最优控制器, 进而针对参数不确定性问题发展了降低电流敏感度的鲁棒控制方法, 提升了系统在复杂工况下的稳定性。文献[12-13]以单转向架为对象, 建立了弯道运行下的刚体动力学模型, 推导了侧向与偏航运动方程, 采用状态反馈与极点配置完成控制器设计, 并通过仿真与试验验证了系统在不同工况下的动态响应特性。文献[14]针对弯道中导向电磁铁与轨道的摩擦问题, 建立了考虑实际运行条件的动力学模型,

基金项目: 国家自然科学基金项目(52332011); 湖南省重点研发计划(2024JK2038)

通信作者: 龙志强, 男, 博士, 教授, 研究员, 博士生导师, 主要从事磁悬浮控制技术方面的研究; E-mail: zhqlong@nudt.edu.cn

引用格式: 车泓欣, 王志强, 李晓龙, 等. 高速磁浮列车主动导向系统建模与动态特性分析[J]. 机车电传动, 2026(2): 25-34. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.003.

Citation: CHE Hongxin, WANG Zhiqiang, LI Xiaolong, et al. Modeling and dynamic characteristics analysis of the active guidance system for high-speed maglev trains[J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 25-34. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.003.

仿真与试验结果表明模型具有良好的有效性。翟明达等^[15]设计鲁棒导向控制器,确保系统在多变工况下具备稳定的导向性能。文献^[16]结合线性二次型最优控制与粒子群算法对控制参数进行优化,进一步提升了磁浮列车弯道运行与横向扰动下的导向控制能力。

综上所述,现有研究在高速磁浮列车导向系统动力学建模与控制方法方面已取得一定成果,为高速磁浮列车导向系统的建模优化与高性能控制奠定了理论基础。然而,随着列车运行速度的不断提高、运行环境复杂性的增加,导向电磁力、结构动力学特性和外部扰动之间呈现出更加显著的非线性耦合关系,对系统稳定性和控制性能提出了更高要求。因此,本文将对高速磁浮列车主动导向系统开展更加系统和精细的动力学建模与分析,以深入揭示其动力学特性与关键影响因素,为导向控制策略优化和系统稳定运行提供更加可靠的理论依据。

1 高速磁浮列车导向系统的基本结构

常导高速磁浮列车采用电磁悬浮原理,通过电磁力实现列车与轨道之间的无接触支撑与导向。其中,悬浮系统承担垂向支撑,导向系统则主要负责列车的横向定位与稳定控制,通过导向电磁铁产生的横向电磁力约束列车的侧向运动,保证列车在轨道中心位置平稳运行^[17-19]。导向系统性能与导向系统的结构密切相关,本章将围绕导向系统的基本结构展开研究。

1.1 导向系统总体结构

高速磁浮列车采用典型的上、中、下分层式设计,自上而下依次为车体、转向架和电磁铁模块^[20]。其中,车体主要承载乘客与车载设备;转向架集成悬浮、导向和涡流制动等关键功能系统。车体与转向架之间通过二系悬挂装置连接,以实现振动隔离,并提升乘坐舒适性;电磁铁模块则通过一系悬挂装置与转向架相连,形成柔性连接。依据功能差异,电磁铁可分为悬浮、导向和涡流制动3类,分别布置于转向架不同位置,并通过机械解耦结构实现内侧与外侧模块的相对独立运行,以确保系统在复杂工况下的稳定性与可靠性,其整体结构示意图如图1所示。

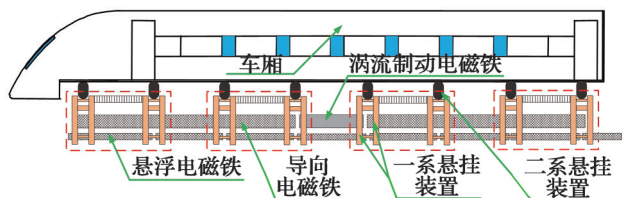


图1 高速磁浮列车结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of high-speed maglev train

高速磁浮列车导向系统由左右导向电磁铁、横向间隙传感器、导向控制器、悬挂机构构成,如图2所

示。在磁浮列车运行时,控制器根据间隙传感器检测到的电磁铁与轨道侧面间隙,动态调节两侧电磁铁励磁电流,产生可控的横向电磁力,该力依次经一系、二系悬挂传递至车厢,实现对列车横向位移的主动控制。系统采用差动工作模式——受扰时,控制器增大一侧电流,同时减小另一侧电流,形成与扰动方向相反的恢复力,以维持列车对中运行。本文在研究导向动力学时,忽略悬浮方向运动的影响。

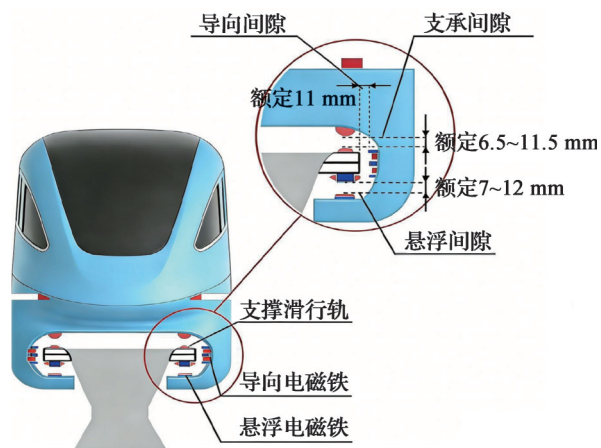


图2 高速磁浮列车导向系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the guidance system for high-speed maglev train

1.2 部件结构

在导向系统动力学建模中,为凸显主要动力学特征与兼顾模型的可解析性,通常对结构进行合理简化。导向电磁铁被等效为均质刚体,包含6个上下两排呈E形布置的导向磁极,如图3所示。转向架实体如图4所示^[3],主要由4个C形悬浮框、2个横梁框和1个纵梁框

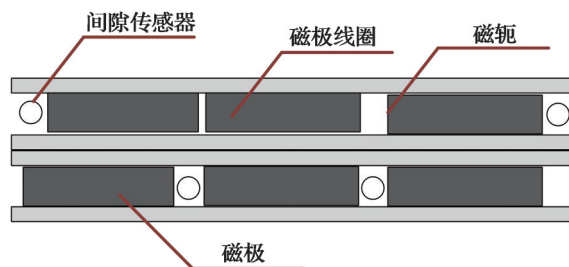


图3 导向磁极实际排布图

Fig. 3 Actual arrangement of the guidance poles

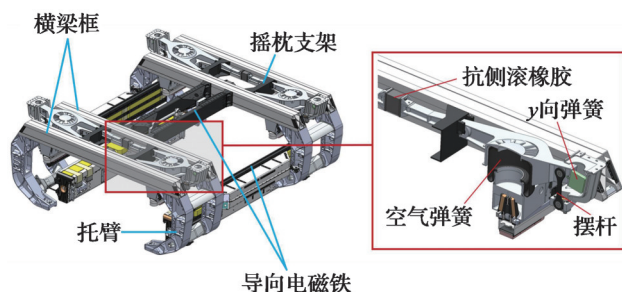


图4 转向架结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of the bogie

组成, 材料多为铝合金, 具有一定的弹性特征。为降低模型复杂度并增强其解析性, 将横梁框、悬挂托臂和纵梁框统一等效为刚体, 各部件间连接亦视为刚性, 最终将弹性转向架简化为由刚性主体与附属的悬浮托臂弹簧、导向托臂弹簧构成的动力学系统。导向一系悬挂系统通过由三角形铰链机构和防滚拉杆组成的多点铰接结构实现导向电磁铁与转向架的连接。其中, 金属橡胶球铰在保证导向稳定性的同时, 赋予了系统5个相对运动自由度, 依靠球铰节点的弹性变形进行位移与姿态补偿。二系悬挂装置主要由防滚金属橡胶件、摇枕和空气弹簧等部件组成。在该系统动力学研究中, 由于橡胶球关节径向刚度较大, 可视为导向力的刚性传递路径, 而摇枕、摆杆等构件亦作为刚性连接部件处理。

2 高速磁浮列车导向系统的动力学模型

基于前文对导向系统结构特性的分析, 建立其动力学模型。为简化研究, 忽略悬浮系统影响, 将导向一系、二系悬挂装置视为仅传递力与力矩的无质量连接件, 从而将导向系统等效为单个刚体。在此基础上, 系统动力学可将其简化为刚体在轨道平面内的二自由度运动, 即横向平移与绕垂直轴的偏航转动, 由此建立相应的运动方程以表征导向系统动力学特性。为描述列车空间运动, 建立如图5所示的坐标系。

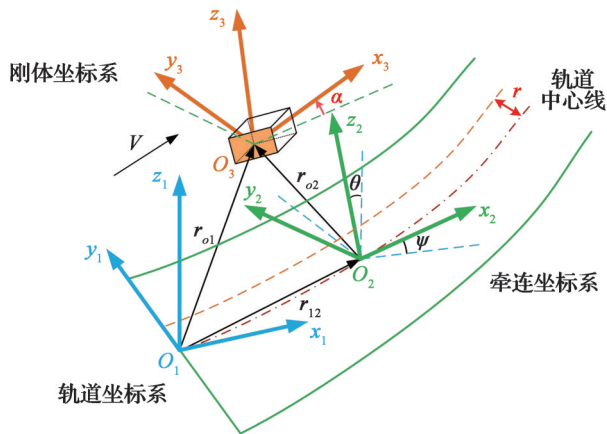


图5 坐标系示意图

Fig. 5 Coordinate system diagram

2.1 导向系统横向偏移方程

结合上述坐标系选取情况, 根据动力学理论, 建立起导向系统横向偏移方程。根据牛顿第二定律, 可以得到在轨道坐标系下的空间运动方程, 具体为

$$\sum \mathbf{F} = m(\mathbf{a}_e + \mathbf{a}_r + \mathbf{a}_k) \quad (1)$$

式中: $\sum \mathbf{F}$ 为导向系统受到的合外力; m 为刚体质量; $\mathbf{a}_e$ 为牵连坐标系下的牵连加速度矢量; $\mathbf{a}_r$ 为刚体相对牵连坐标系的相对加速度矢量; $\mathbf{a}_k$ 为牵连坐标系转动产生的科氏加速度矢量。

向牵连坐标系投影后可得 $\ddot{\mathbf{r}}_{o2}$, 具体为

$$m\ddot{\mathbf{r}}_{o2} = \sum \mathbf{F} - m[\dot{\bar{\omega}}_e \times \bar{\mathbf{r}}_{o2} + \bar{\omega}_e \times (\bar{\omega}_e \times \bar{\mathbf{r}}_{o2}) + \bar{\omega}_e \times \mathbf{v}_2 + 2\bar{\omega}_e \times \dot{\bar{\mathbf{r}}}_{o2}] \quad (2)$$

式中: $\bar{\mathbf{r}}_{o2}$ 为点 O_2 到点 O_3 的相对位移; $\bar{\omega}_e$ 为牵连坐标系的转动角速度; $\mathbf{v}_2$ 为点 O_3 的相对速度。

由于只考虑磁浮列车沿 y 方向的运动, 可以假定悬浮间隙为固定值, 即 $\bar{r}_{o2} = h$, 并且实际轨道的横坡角 θ 、横坡角变化率 $\dot{\theta}$ 、轨道中心线的曲率 $|\kappa|$ 这些物理量远远小于列车的行驶速度 V , 由此可以推导出导向系统的横向偏移方程为

$$m\ddot{r}_{o2y} = \sum F_y + m\kappa V^2 \cos \theta \quad (3)$$

式中: $\sum F_y$ 为导向系统受到的合外力在 y 方向上的分力; r_{o2y} 为导向系统的横向偏移量。

2.2 导向系统偏航方程

根据动量矩定理可知, 刚体对质心的动量 L_c 对时间的绝对导数等于其受到的外力矩之和, 具体为

$$\frac{d\mathbf{L}_c}{dt} = \sum \mathbf{M} = \frac{d(\mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega}_b)}{dt} + \boldsymbol{\omega}_b \times (\mathbf{I} \times \boldsymbol{\omega}_b) = \mathbf{I} \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_b + \boldsymbol{\omega}_b \times (\mathbf{I} \times \boldsymbol{\omega}_b) \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\omega}_b$ 为导向搭接系统的绝对角速度; $\mathbf{I}$ 为导向搭接系统的转动惯量矩阵。

根据式(4), 可得导向系统的偏航方程为

$$I_z \ddot{\alpha} = \sum M_z - I_z \dot{\kappa} V^2 \cos \theta \quad (5)$$

式中: I_z 为导向搭接系统在 z 方向转动惯量; $\sum M_z$ 为系统受到的合外力矩在 z 方向的分量。

3 高速磁浮列车导向系统的电磁力方程

高速磁浮列车的运行性能在很大程度上取决于电磁力^[21], 其中导向电磁铁与轨道之间的导向电磁力是构建车辆系统导向动力学模型的关键要素之一。基于前文建立的车辆导向系统动力学模型, 首先推导单个导向磁极电磁力, 并进一步建立单个导向电磁铁相对曲线轨道存在侧向偏移与偏航时的导向电磁合力和合力矩。

3.1 单个导向磁极电磁力

在实际磁场中, 由于导向电磁场存在漏磁、边缘效应和饱和状态等物理现象, 若是将这些因素充分考虑, 将导致实际磁场的电磁力计算十分复杂。为此, 在进行理论推导之前, 做出以下简化: ①不考虑实际磁场的漏磁、边缘区域的磁场效应, 认为磁场处于非饱和状态; ②忽略铁芯、磁轭和导向轨中的磁阻。

根据上述简化方法, 获得导向电磁力沿气隙 δ 变化的计算公式为

$$F_g = \frac{\partial E_m}{\partial \delta} = -\frac{1}{2} N^2 i^2 \frac{\partial G}{\partial \delta} \quad (6)$$

式中: N 为单个导向电磁铁线圈匝数; G 为气隙的总磁导; E_m 为气隙磁场能量; i 为电流。

无论是直线轨道, 还是曲线轨道, 单个导向磁极面与导轨面之间的磁场计算都可归结为存在夹角的 2 个平面之间磁场的计算, 如图 6 所示。

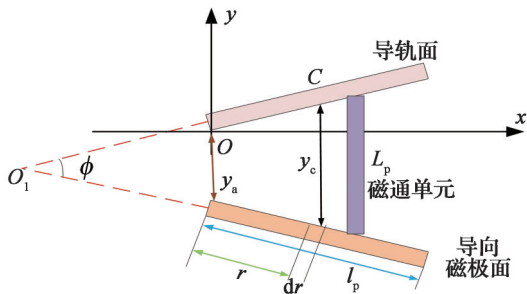


图 6 单个导向磁极与导轨面间磁通管分布侧视图
Fig. 6 Side view of magnetic flux tube distribution between a single guidance pole and the guideway surface

根据文献[22], 可获得单个导向磁极面与导轨面之间的磁导 G_p , 具体为

$$G_p = \mu_0 \int_0^{l_p} [(y_a + r)\phi]^{-1} w_p dr = \frac{\mu_0 w_p}{\phi} \ln \left(1 + \frac{l_p \phi}{y_a} \right) \quad (7)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; w_p 为导向磁极面的宽度。

由于两磁极面与导轨面之间的磁导为串联关系, 因此有 $G = G_p/2$, 所以可得单个导向磁极的电磁力为

$$F_p = \frac{\mu_0 N^2 A_p}{4} \cdot \frac{i^2}{y_c^2 - l_p^2 \phi^2 / 4} \quad (8)$$

式中: A_p 为导向磁极的铁芯面积, $A_p = w_p l_p$; y_c 为导向磁极面几何中心点对应的等效间隙, $y_c = y_a + l_p \phi / 2$ 。

3.2 单个导向电磁铁电磁力作用模型

单个导向电磁铁通常由 6 个磁极组成, 上下两层排布, 同一列排布的磁极具有相同的间隙分布, 因此同一列磁极可以等效为极面积为 $2A_p$ 的单个磁极。以轨道左侧导向第 n 个等效磁极为例, 磁极面中心的导向间隙为 y_{cn} , 磁极面相对导轨面的逆时针旋转角度为 ϕ_{cn} , 磁极线圈等效电流为 i_{pn} , 作用在磁极几何中心的电磁力与力矩分别为 F_{pn} 、 M_{pn} , 如图 7 所示。

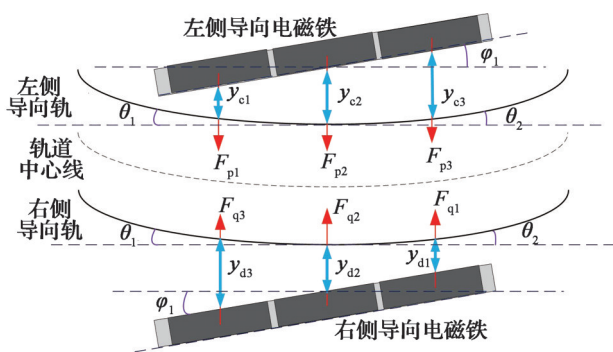


图 7 导向电磁铁各磁极受力图
Fig. 7 Force diagram of guidance electromagnet poles

根据图 7 可知, 导向电磁铁的合力和合外力矩为:

$$F_{tf} = \sum_{n=1}^3 F_{pn} = \sum_{n=1}^3 \frac{i_{pn}^2 \mu_0 N^2 A_p}{2(y_{cn}^2 - l_p^2 \phi_{cn}^2 / 4)} \quad (9)$$

$$M_{tf} = \sum_{n=1}^3 M_{pn} = \sum_{n=1}^3 (F_{pn} L_{pn}) = \sum_{n=1}^3 \frac{i_{pn}^2 \mu_0 N^2 A_p L_{pn}}{2(y_{cn}^2 - l_p^2 \phi_{cn}^2 / 4)} \quad (10)$$

式中: $\phi_{c1} = \phi_1 + \theta_1$, $\phi_{c2} = \phi_1$, $\phi_{c3} = \phi_1 + \theta_2$; $L_{p1} = -l_e$, $L_{p2} = 0$, $L_{p3} = l_e$ (l_e 为磁轭长度)。

4 高速磁浮列车导向系统控制器设计与仿真分析

在高速磁浮列车运行过程中, 当列车经过曲线线路或受到较强横向扰动时, 为维持系统运行的稳定性与安全性, 导向系统需要具备足够的横向调节能力。因此, 在高速磁浮列车中通常设置独立的主动导向装置, 并通过有源控制方式实现对导向电磁铁的实时调节。

4.1 导向系统控制策略

导向控制系统以维持列车在轨道中心位置运行为核心目标, 通过动态抑制导向间隙变化防止机械干涉。在机械结构上, 每个导向电磁铁通过 2 套一系悬挂装置与转向架连接, 利用二者间的相对运动自由度, 系统采用分散式控制架构——轨道两侧电磁铁实施差动协同控制, 转向架前后两端的电磁铁则相互配合调节。具体而言, 同一转向架上的导向电磁铁被划分为 4 个独立控制单元, 其拓扑关系如图 8 所示。

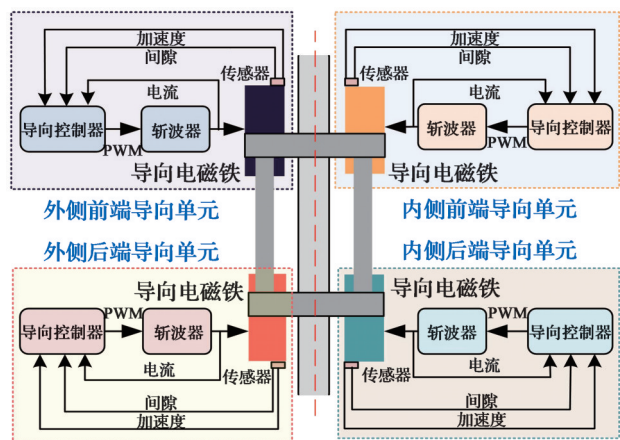


图 8 导向控制策略示意图

Fig. 8 Schematic diagram of guidance control philosophy

每个控制单元内部集成了间隙传感器、电流传感器、控制器、斩波器, 通过 RS485 通信接口构建冗余传感器网络。当车辆工作时, 间隙传感器采集导向间隙和加速度信息, 电流传感器监测线圈电流, 控制器基于融合算法生成 PWM 信号, 由斩波器转换为驱动电压动态调整磁力。RS485 网络实现单元间数据共享与多源信息校验, 确保单一传感器失效时系统仍能稳定运行。在控制策略方面, 内外两侧电磁铁采用差动模

式使间隙差值趋近于零, 并维持总和恒定; 前后端单元则通过通信链路实现协同调节——前端单元将处理后的间隙信号转发至后端, 后端结合自身与内侧数据进行差值计算, 最终生成控制电压, 完成对导向系统的精确协调。

4.2 导向控制器设计

针对主动导向系统的控制策略, 本文采用“串级配合差动”的综合控制架构, 通过内环电流调节与外环间隙跟踪实现闭环控制, 其结构如图9所示。内环以电流传感器反馈为依据, 动态调节电磁铁端电压, 确保电流快速跟踪指令; 外环则基于间隙传感器获取的间隙值与加速度信息, 计算生成参考电压作为内环输入。在差动控制实现中, 对侧间隙数据通过RS485通信实时传输至控制器, 以支撑双侧协同调节。

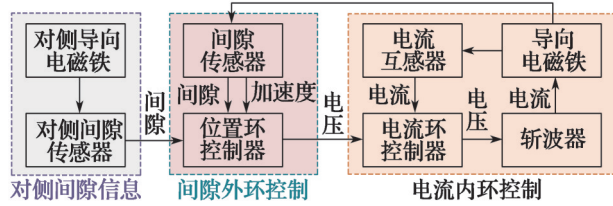


图9 导向控制内外环控制结构图

Fig. 9 Guidance control architecture: inner loop and outer loop

由于系统两侧电磁铁在结构与控制逻辑上具有高度对称性, 本文以单侧电磁铁为对象进行控制器设计, 并采用工程中广泛应用的线性控制结构。需要说明的是, 本文并未针对控制算法本身进行新的设计或优化, 而是基于磁浮导向系统中已有的成熟控制策略, 在经典线性控制框架下完成控制器的建模与实现。该类控制结构工程可实现性强, 在实际工程系统中已得到较为广泛的应用。本文引入该控制结构的主要目的是为主动导向动力学模型提供稳定可靠的控制输入, 从而在典型工况下对系统动力学特性进行分析与验证。因此, 该控制器更多作为仿真分析中的功能性组成部分, 用于保证系统闭环运行的稳定性与响应性能, 而非作为本文的创新研究对象。基于上述考虑, 控制器参数的选取主要依据工程经验及相关文献^[23-25], 并结合系统特性进行适当调整, 以满足仿真分析需求。

控制器以电压 u 为直接输出量, 构建包含间隙 δ 、间隙变化速度 $\dot{\delta}$ 和电流 i 的多状态反馈机制, 以实现对电磁力的精确调节。其中, 间隙变化速度 $\dot{\delta}$ 可通过加速度信号积分或间隙信号微分两种方式获取。为进一步消除稳态误差, 控制律中引入间隙偏差 δ 积分项, 其算法表达式为

$$u = u_0 + \frac{k_p \delta}{2} + k_i \int_0^1 \delta dt + k_v \dot{\delta} + k_c (i - i_0) \quad (11)$$

式中: i_0 为控制器的静态偏置电流; u_0 为静态偏置电

压, $u_0 = i_0 R$; R 为磁极组线圈的等效电阻, $R = 3R_p$; k_p 、 k_i 、 k_v 分别为间隙的比例、积分和速度反馈系数; k_c 为电流反馈系数。

4.3 仿真分析

基于上述导向动力学模型和所设计的导向控制器, 本文采用UM仿真软件开展仿真分析, 动力学模型如图10所示。UM仿真模型的建立以前文推导的动力学方程为理论基础, 在结构参数选取、受力关系构建和运动约束设置等方面均与理论模型保持一致, 从而实现动力学模型在数值仿真环境中的等效表达。同时, 在仿真过程中, 所采用的关键参数(如质量、刚度、阻尼、电磁力特性等)均与理论推导一致, 保证了模型在物理意义上的一致性与可比性。在此基础上, 选取不同速度通过不同半径弯道的典型工况开展仿真试验, 以验证所建导向动力学模型和导向控制器的有效性与鲁棒性。

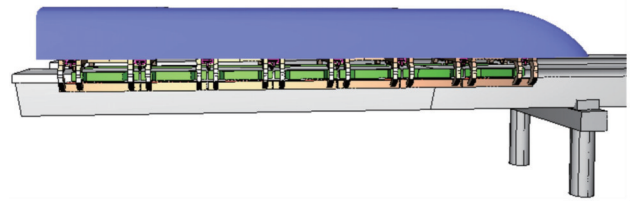


图10 UM仿真模型图

Fig. 10 Illustration of the UM simulation model

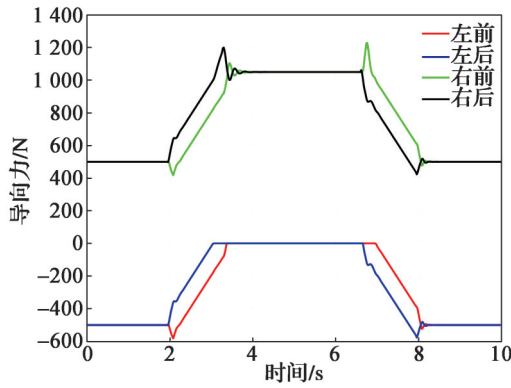
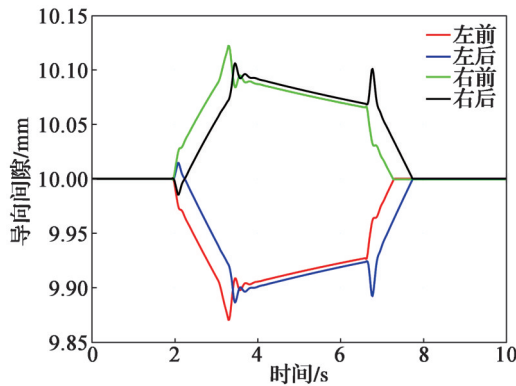
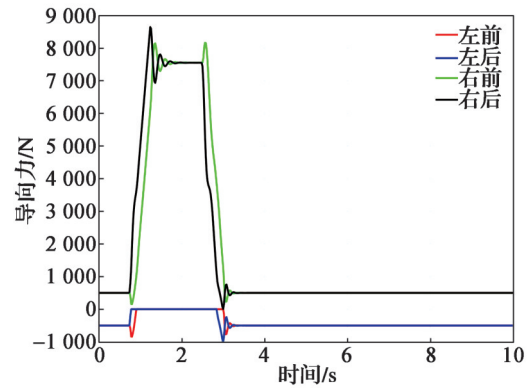
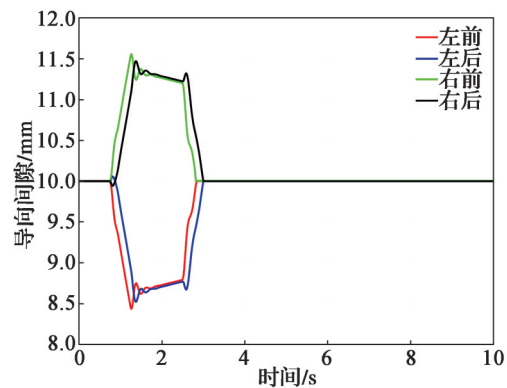
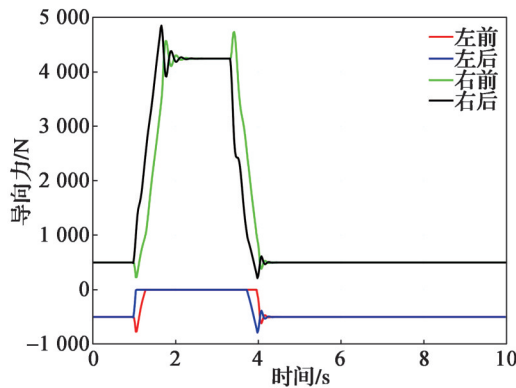
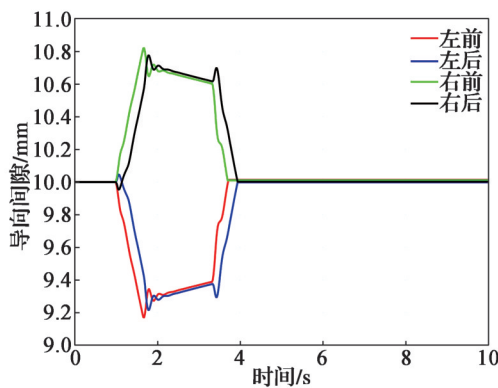
在列车运行过程中, 曲线通过能力对主动导向系统的需求随运行速度的变化而呈现出显著差异。一般而言, 行车速度越高, 系统所需提供的导向力及其动态响应要求也越为严苛, 主动导向的控制权重随之提升。对于高速磁浮列车而言, 其在弯道区段的最高允许速度, 受限于两方面因素的共同约束: 一方面是为保证乘客乘坐舒适性所需的向心力平衡条件, 另一方面是系统自身的动力学约束。基于上述约束, 理论上曲线限速可表达为^[26]

$$V_{\max} = 3.6 \sqrt{R(g \cdot \tan \theta + a_{\text{lat}})} \quad (12)$$

式中: $V_{\max}$ 为最大曲线限速; R 为弯道半径; g 为重力加速度, 取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; θ 为轨道横坡角; a_{lat} 为加速度设计阈值。

计算时取轨道弯道半径 $R = 400 \text{ m}$, 轨道横坡角 $\theta = 5^\circ$, 基于ISO 2631-1舒适性标准的侧向加速度设计阈值 $a_{\text{lat}} = 0.15g$, 可得 $V_{\max} = 110 \text{ km/h}$ 。基于该弯道限速选取36、72、108 km/h共3种速度工况进行仿真, 其导向间隙变化以及导向力变化如图11~图13所示。其中, 每一种速度工况分别包括左前、左后、右前、右后4组导向单元的间隙变化与导向力变化, 并且弯道为向左的弯道。

仿真结果表明, 在车辆进入弯道阶段时, 各导向

(a) 导向力 ($R=400\text{ m}$, $V=36\text{ km/h}$)(b) 导向间隙 ($R=400\text{ m}$, $V=36\text{ km/h}$)图 11 导向力与间隙变化曲线图 ($R=400\text{ m}$, $V=36\text{ km/h}$)Fig. 11 Variations in guidance force and gap
($R=400\text{ m}$, $V=36\text{ km/h}$)(a) 导向力 ($R=400\text{ m}$, $V=108\text{ km/h}$)(b) 导向间隙 ($R=400\text{ m}$, $V=108\text{ km/h}$)图 13 导向力与间隙变化曲线图 ($R=400\text{ m}$, $V=108\text{ km/h}$)Fig. 13 Variations in guidance force and gap
($R=400\text{ m}$, $V=108\text{ km/h}$)(a) 导向力 ($R=400\text{ m}$, $V=72\text{ km/h}$)(b) 导向间隙 ($R=400\text{ m}$, $V=72\text{ km/h}$)图 12 导向力与间隙变化曲线图 ($R=400\text{ m}$, $V=72\text{ km/h}$)Fig. 12 Variations in guidance force and gap
($R=400\text{ m}$, $V=72\text{ km/h}$)

单元的导向力迅速增大, 伴随短暂振荡, 随后逐渐趋于稳定; 当车辆驶出弯道时, 导向力快速下降, 出现衰减振荡后恢复至初始状态。整体来看, 导向力在弯道稳定阶段保持基本恒定, 并且外侧导向单元的导向力明显大于内侧导向单元, 这是由于车辆在曲线运行过程中受到离心力作用, 车体向外侧轨道偏移, 使外侧导向单元承担主要的导向作用。值得注意的是, 在车辆实际运行过程中, 一侧电磁铁只能提供单一方向的力, 因此在曲线运行过程中, 一侧的电磁铁力减小直至为零, 另一侧力增大以稳定间隙。随着运行速度的提高, 导向力峰值显著增大, 其中 36 km/h 工况的导向力稳定值约为 $1\,200\text{ N}$, 72 km/h 工况下的导向力增加至约 $5\,000\text{ N}$, 而在 108 km/h 工况下导向力可达到约 $9\,000\text{ N}$, 这表明导向力随速度增加呈明显增长趋势, 与离心力与速度平方成正比的理论规律相一致。与此同时, 导向间隙变化也表现出明显的速度相关性。其中, 在 36 km/h 工况下, 导向间隙变化幅度较小, 左右侧间隙差异不明显, 约为 0.1 mm ; 当速度提高至 72 km/h 时, 外侧导向间隙明显增大, 而内侧间隙减小, 间隙变化范围逐渐扩大, 约为 0.8 mm ; 而当速度达到 108 km/h 时, 间隙变化范围达到了 1.5 mm , 说明车辆在曲线运行过程中横向位移随速度增加而加剧。此外, 在进入弯道和驶出弯道阶段, 导向力和导向间隙均出

现短时振荡, 但振荡幅值随时间迅速衰减并趋于稳定, 这表明系统具有良好的动态响应特性和稳定性。综上所述, 在选定弯道半径条件下, 随着运行速度的提高, 导向系统承受的导向力和横向位移均明显增大, 但整体响应过程平稳且振荡衰减较快, 说明该导向结构与控制器能够满足不同速度工况下曲线运行的稳定性要求。

此外, 为了评估导向系统的性能并对导向控制器的

优化性能进行验证, 分别仿真绘制了300、500、800 m共3种轨道半径下的导向间隙和导向力变化曲线, 如图14~图16所示。其中, 每一种轨道半径下包括左前、左后、右前、右后4组导向单元的间隙变化以及导向力变化。

仿真结果分别给出了3种曲线半径条件下4个导向单元的导向力和导向间隙随时间变化的响应特性。当

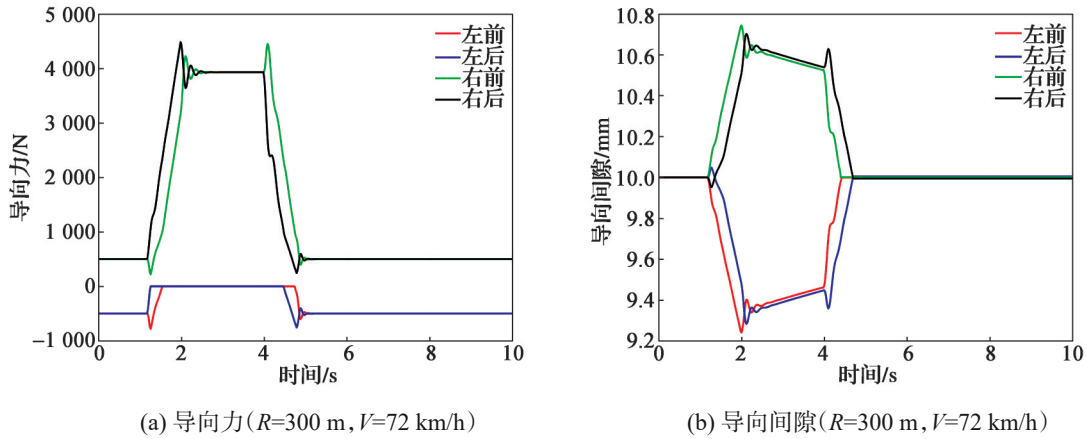


图14 导向力与间隙变化曲线图($R=300\text{ m}$, $V=72\text{ km/h}$)

Fig. 14 Variations in guidance force and gap($R=300\text{ m}$, $V=72\text{ km/h}$)

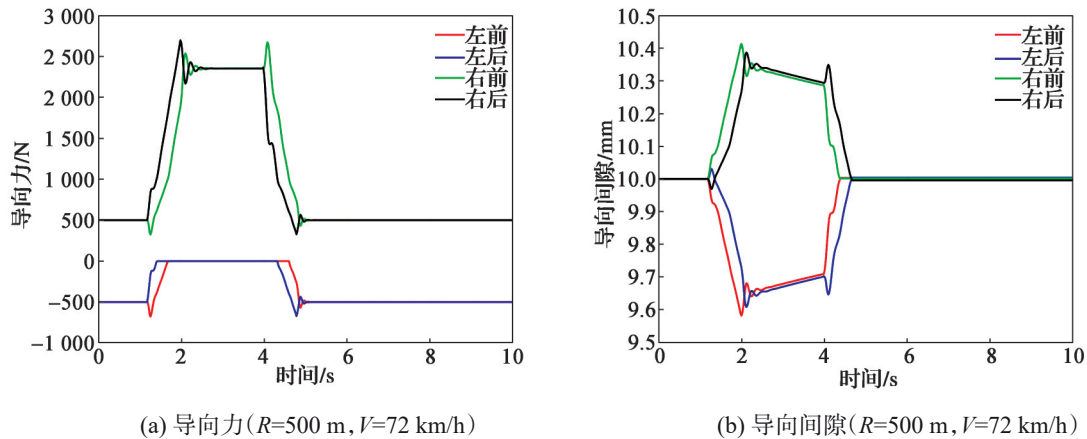


图15 导向力与间隙变化曲线图($R=500\text{ m}$, $V=72\text{ km/h}$)

Fig. 15 Variations in guidance force and gap($R=500\text{ m}$, $V=72\text{ km/h}$)

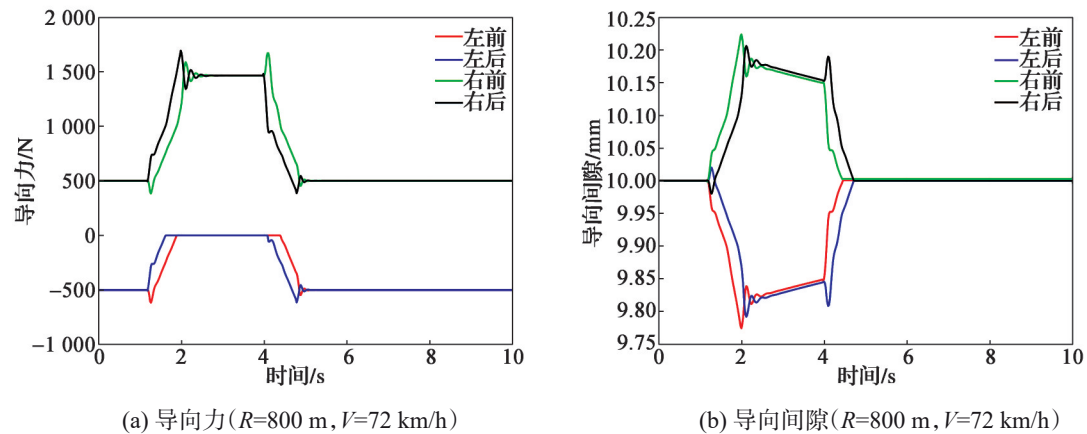


图16 导向力与间隙变化曲线图($R=800\text{ m}$, $V=72\text{ km/h}$)

Fig. 16 Variations in guidance force and gap($R=800\text{ m}$, $V=72\text{ km/h}$)

车辆进入曲线区段时,右侧导向单元的导向力迅速增大,伴随着一定幅值的振荡,随后逐渐趋于稳定,左侧减小到零;当车辆驶出曲线区段时,导向力迅速下降,伴随衰减振荡最终恢复至初始状态。随着轨道曲线半径的逐渐增大,导向力整体呈现逐渐减小的变化趋势。其中,在半径为300 m时,导向力峰值最大,约为4 500 N;当曲线半径增大至500 m时,导向力峰值下降至约2 700 N;而在半径为800 m时,导向力进一步减小至约1 600 N。上述现象表明曲线半径越大,车辆在曲线运行时产生的离心作用越小,从而导致导向系统所承受的导向力也随之减小。与此同时,导向间隙变化规律与导向力变化趋势保持一致,在车辆进入曲线阶段时,外侧导向间隙明显增大,而内侧导向间隙相应减小,表明车辆在曲线运行过程中产生一定程度的横向位移。当曲线半径为300 m时,导向间隙变化幅度最大,约为0.80 mm,左右导向单元间隙差异较为明显;随着曲线半径增大至500 m、800 m时,导向间隙变化幅度逐渐减小,左右间隙差异明显降低,分别变为0.40 mm与0.22 mm左右,说明车辆横向偏移程度随曲线半径增大而减弱。此外,在车辆进入和退出曲线过程中,导向力和导向间隙均出现短暂振荡,但振荡幅值较小且能够快速衰减,系统响应过程平稳,未出现持续振荡或不稳定现象。综合而言,在相同速度条件下,曲线半径越小,导向系统所承受的导向力和导向间隙变化越显著,而随着曲线半径的增大,导向系统的受力状态逐渐减缓、运行过程更加平稳,这表明建立的导向系统模型和控制策略在不同曲线半径工况下均具有良好的稳定性和适应性。

综上所述,结合不同速度工况和不同曲线半径条件下的仿真结果可以看出,在曲线运行过程中导向系统能够根据车辆动力学状态产生相应的导向力和导向间隙变化,从而保证车辆在轨道上的稳定运行。当车辆运行速度增大时,导向系统承受的导向力及其导向间隙变化幅度均显著增大;而当曲线半径增大时,车辆曲线运行过程中产生的离心力减小,导向系统的导向力和横向位移相应降低,系统运行状态更加平稳。此外,在车辆进入和驶出弯道过程中,虽然存在短暂的动态振荡,但振荡能够迅速衰减,并恢复至稳定状态,表明导向系统具有良好的动态响应特性和稳定性。总体而言,在选取不同速度和不同曲线半径工况下,导向系统均能够保持较为合理的导向力分布和导向间隙变化,从而验证了本文所建立模型的有效性,以及导向控制策略在不同运行条件下的适应性与可靠性。

5 结论

本文围绕高速磁浮列车主动导向系统开展了结构分析、动力学建模、电磁力建模、控制器构建、仿真

研究,主要结论如下:

①在忽略悬浮方向运动影响,并对转向架和悬挂装置进行合理等效简化的基础上,建立了以横向偏移和偏航运动为核心的导向系统二自由度动力学模型。结合导向磁极气隙磁导关系,推导了单个导向磁极和导向电磁铁的电磁力与力矩表达式,构建了较为完整的高速磁浮列车主动导向系统动力学分析框架。

②基于串级差动控制思想,本文构建了主动导向控制器模型,并通过UM仿真软件对不同速度、不同曲线半径工况下的系统响应进行了分析。结果表明,在车辆进入和驶出弯道过程中,各导向单元导向力均出现短时波动,但振荡能够在较短时间内衰减至稳定状态,系统未出现持续振荡或失稳现象,表明本文所建模型与控制策略具有良好的动态稳定性。

③从定量分析结果来看,在曲线半径为300 m工况下,导向间隙最大变化量约为0.80 mm;当曲线半径增大至500 m、800 m时,导向间隙变化幅值分别降低至约0.40 mm和0.22 mm。同时,在相同曲线半径条件下,随着运行速度由36 km/h提高至108 km/h,导向力峰值由约1 200 N增大至约9 000 N,导向间隙波动幅值亦明显增加。

上述结果表明,运行速度与曲线半径对导向系统受力和横向偏移具有显著影响,其中速度升高会加剧导向负载,而曲线半径增大则有助于改善导向受力状态,并减小间隙波动。

总体而言,本文建立的高速磁浮列车主动导向系统模型能够较好反映列车在曲线运行过程中的动力学行为,采用的控制策略在不同工况下均表现出较好的适应性与稳定性。相关研究结果可为高速磁浮列车导向系统结构设计、控制参数选取和运行工况分析提供一定参考。需要指出的是,本文研究仍存在一定局限性:①模型在建立过程中对系统进行了适当简化(如忽略悬浮方向耦合效应和部分结构非线性因素),虽有助于突出导向系统主要动力学特性,但在复杂工况或强耦合条件下的适用性仍有待进一步分析。②本文所选取的仿真工况主要集中于典型曲线半径与运行速度,对于更极端工况(如更小的曲线半径或更高的运行速度)下系统响应特性的研究仍不充分。后续工作将进一步考虑多自由度耦合效应和更广泛运行工况,以提升模型的适用范围与分析精度。

参考文献:

- [1] 常文森. 磁浮列车: 最新研究趋势[J]. 科学, 1993(6): 42-45.
CHANG Wensen. Maglev trains: latest research trends[J]. Science, 1993(6): 42-45.
- [2] 吴祥明. 磁浮列车[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
WU Xiangming. Maglev trains[M]. Shanghai: Shanghai Sci-

- ence and Technology Press, 2003.
- [3] 丁叁叁. 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.
DING Sansan. 600 km/h high-speed maglev transportation system[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2022.
- [4] 张昆仑. 高速磁浮铁路技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2021.
ZHANG Kunlun. High-speed maglev railway technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2021.
- [5] LONG Zhiqiang, WANG Zhiqiang, ZHAI Mingda, et al. High-speed maglev train's levitation and guidance control [M]. Singapore: Springer, 2024.
- [6] LIU Zhigang, LONG Zhiqiang, LI Xiaolong. Maglev trains: key underlying technologies[M]. Berlin: Springer, 2015.
- [7] 林国斌, 刘万明, 徐俊起, 等. 中国高速磁浮交通的发展机遇与挑战[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 7-18.
LIN Guobin, LIU Wanming, XU Junqi, et al. Opportunities and challenges in the development of high-speed maglev transportation in China[J]. Science and technology foresight, 2023, 2(4): 7-18.
- [8] 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.
LONG Zhiqiang, DOU Fengshan, WANG Zhiqiang, et al. Current status and prospects of high-speed maglev suspension and guidance control technology[J]. Science and technology foresight, 2023, 2(4): 78-88.
- [9] HAO Aming, SHE Longhua, LIU Hengkun, et al. Research of force feedback controlling on high-speed maglev train guidance system[C]//2007 IEEE International Conference on Control and Automation, Guangzhou. 2007: 1381-1384. DOI: 10.1109/ICCA.2007.4376586.
- [10] 郝阿明, 龙志强, 常文森. 考虑轨道不平顺的高速磁浮列车导向系统控制器设计[J]. 系统仿真学报, 2008 (22): 6234-6237.
HAO Aming, LONG Zhiqiang, CHANG Wensen. Guidance controller design of high speed maglev train considering random irregularity of guideway[J]. Journal of system simulation, 2008(22): 6234-6237.
- [11] 郝阿明, 龙志强, 常文森. 高速磁浮列车导向系统的鲁棒控制器设计[J]. 铁道学报, 2008, 30(6): 40-45.
HAO Aming, LONG Zhiqiang, CHANG Wensen. Design of the robust controller of the guidance system in high-speed maglev train[J]. Journal of the China railway society, 2008, 30(6): 40-45.
- [12] 赵春霞, 余龙华, 常文森. 高速磁浮列车单转向架弯道运行导向系统研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(7): 32-37.
ZHAO Chunxia, SHE Longhua, CHANG Wensen. Research on guidance system for single bogie of high-speed maglev train in the curve negotiation[J]. Journal of the China railway society, 2011, 33(7): 32-37.
- [13] ZHAO Chunxia, SHE Longhua, CHANG Wensen. Analysis of join-structure influencing on guidance system for high-speed maglev train[C]//2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Hohhot. 2011, 7: 3855-3859. DOI: 10.1109/MACE. 2011. 5987841.
- [14] LI Bowen, ZHAO Chunxia, LI Xiaolong, et al. Dynamics modeling analysis and experiment of the guidance control system of high-speed maglev train[J]. IEEE Access, 2020, 8: 206207-206221. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3038252.
- [15] ZHAI Mingda, HAO Aming, LI Xiaolong, et al. Research on the active guidance control system in high speed maglev train[J]. IEEE Access, 2018, 7: 741-752. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2885784.
- [16] 王志强, 郭伟鹏, 桑孜良, 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, 60(4): 833-841.
WANG Zhiqiang, GUO Weipeng, SANG Zhiliang, et al. Optimized control method for guidance system of high-speed maglev train[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2025, 60(4): 833-841.
- [17] CHE Hongxin, YANG Biao, LONG Zhiqiang, et al. Anomaly detection method of maglev train suspension system based on SSA-MLP-attention hybrid model[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2025, 11(6): 13886-13897. DOI: 10.1109/TTE.2025.3608347.
- [18] SUN Yougang, HE Zhenyu, XU Junqi, et al. Cooperative model predictive levitation control for two-points electromagnetic levitation system of high-speed maglev vehicle[J]. IEEE transactions on intelligent vehicles(early access), 2023: 1-12. DOI: 10.1109/TIV.2023.3329073.
- [19] CHEN Chen, XU Junqi, YANG Jiachen, et al. Dynamic analysis of high-speed maglev magnetic coupling and experimental study on vehicle-bridge characteristics[J]. Journal of vibration and control, 2025. DOI: 10.1177/10775463251377125.
- [20] 卢琴芬, 方攸同. 高速磁浮交通系统驱动技术的发展[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 96-104.
LU Qinfen, FANG Youtong. Development of driving technology for high-speed maglev transportation system[J]. Science and technology foresight, 2023, 2(4): 96-104.
- [21] 张佳欣, 韩羽菲, 刘帅. 磁浮列车单点电磁悬浮系统悬浮力优化计算[J]. 机车电传动, 2025(4): 23-30.
ZHANG Jiaxin, HAN Yufei, LIU Shuai. Optimization calculations for the lifting force of a single-point electromagnetic suspension system in maglev trains[J]. Electric drive for locomotives, 2025(4): 23-30.
- [22] ZHAO Chunxia, SHE Longhua, CHANG Wensen. Computation of guidance electromagnet force for high-speed maglev train negotiating the curve[J]. Applied mechanics and materials, 2011, 105/106/107: 595-601. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.105-107.595.

- [23] 陈双喜. 中低速磁浮列车系统振动响应的非线性度分析[J]. 铁道机车车辆, 2022, 42(1): 26-31.
CHEN Shuangxi. Degree of non-linearity analysis for system vibration response of middle and low-speed maglev vehicle[J]. Railway locomotive & car, 2022, 42(1): 26-31.
- [24] 郭维, 侯招文, 徐绍龙, 等. 基于电磁力反馈的磁浮列车悬浮控制方法[J]. 控制与信息技术, 2020(6): 24-29.
GUO Wei, HOU Zhaowen, XU Shaolong, et al. A levitation control method for maglev train by electromagnetic force feedback[J]. Control and information technology, 2020(6): 24-29.
- [25] 卜秀孟, 王力东, 邵壮, 等. 基于PID控制时滞的高速磁浮车-桥系统动力稳定性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(10): 4307-4319.
BU Xiumeng, WANG Lidong, SHAO Zhuang, et al. Dynamic stability analysis of high speed maglev vehicle-bridge system based on PID control time delay[J]. Journal of railway science and engineering, 2025, 22(10): 4307-4319.
- [26] 李博文. 高速磁浮列车主动导向系统优化控制算法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
LI Bowen. Research on optimal control algorithm for active guidance system for high speed maglev train[D]. Changsha: National university of defense technology, 2021.

Modeling and dynamic characteristics analysis of the active guidance system for high-speed maglev trains

CHE Hongxin¹, WANG Zhiqiang^{1,2,3}, LI Xiaolong^{1,2,3}, LONG Zhiqiang^{1,2,3}

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Electromagnetic Levitation and Propulsion Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

3. Engineering Research Center of Railway Industry on High-speed Maglev Technology and Equipment, Qingdao, Shandong 266111, China)

Abstract: To address challenges encountered by high-speed maglev trains during curve negotiation, particularly those affecting the guidance system, such as complex force interactions, significant dynamic coupling, and stringent control stability requirements, this study investigates active guidance systems through modeling and dynamic characteristic analysis. First, after analyzing the overall structure of the guidance system, as well as the mechanical characteristics of the guidance electromagnets, bogies, and primary and secondary suspension systems, the vehicle system was appropriately simplified to establish a two-degree-of-freedom guidance dynamical model capable of characterizing lateral displacement and yaw motions. Second, formulas for calculating electromagnetic force and torque of individual guidance poles and electromagnets were derived from fundamental electromagnetic field. Finally, by integrating the control philosophy of "cascaded coordination and differential control" in the active guidance system of high-speed maglev trains, a guidance controller model was developed, comprising an inner current loop and an outer gap loop. This model was then used to perform numerical simulations under various operating conditions on the UM simulation platform. Research results indicate that the established guidance dynamical model effectively captures dynamic response characteristics of the active guidance system of high-speed maglev trains under various curve conditions, and the designed controller exhibits good stability, adaptability, and robustness.

Keywords: high-speed maglev train; active guidance system; dynamics; electromagnetic force; guidance control; simulation

收稿日期: 2026-02-20

责任编辑: 许 浩