

Research on precision motion control and disturbance suppression technology for new magnetic levitation linear motor

Zhiyang Gao

Qinhuangdao Water Supply Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei, 066000, China

Abstract

Magnetic levitation linear motors, renowned for their contactless operation, minimal friction, and rapid response capabilities, are extensively utilized in semiconductor manufacturing, precision measurement systems, and high-speed positioning applications. However, their electromagnetic drive architecture renders them highly sensitive to external disturbances, time-varying parameters, load fluctuations, and electromagnetic coupling, significantly complicating high-precision control. In practical engineering scenarios, challenges such as model uncertainties, complex disturbance sources, and coupling between levitation and drive mechanisms make traditional control methods inadequate for high-performance requirements. This study establishes a system dynamics model incorporating electromagnetic force characteristics, coupling mechanisms, and load variations, while implementing state recognition through multi-sensor fusion. Simulation and experimental results demonstrate that this strategy substantially improves steady-state accuracy, dynamic response, and disturbance resistance, offering engineering value for the application of magnetic levitation linear motors in advanced equipment.

Keywords

magnetic levitation linear motor; precision motion control; disturbance suppression; electromagnetic coupling

新型磁悬浮直线电机精密运动控制与扰动抑制技术研究

高志扬

秦皇岛排水有限责任公司, 中国·河北 秦皇岛 066000

摘要

磁悬浮直线电机因无接触驱动、摩擦小和高速响应等优势,被广泛应用于半导体制造、精密测量与高速定位系统。然而电磁驱动结构使其对外界扰动、参数时变、载荷波动和电磁耦合极为敏感,高精度控制难度显著增加。工程实践中,模型不确定性、扰动来源复杂及悬浮与驱动耦合等问题使传统控制方法难以满足高性能要求。本研究围绕电磁力特性、耦合机理与载荷变化建立系统动力学模型,通过多传感器融合实现状态识别。仿真与实验表明,该策略可显著提升系统稳态精度、动态响应与抗扰动性能,对高端装备中磁悬浮直线电机的应用具有工程价值。

关键词

磁悬浮直线电机; 精密运动控制; 扰动抑制; 电磁耦合

1 引言

磁悬浮直线电机因具备无接触驱动、高响应速度与纳米级定位潜力,已广泛应用于晶圆传输、高精度定位平台、医疗影像设备和航空航天系统。电磁驱动结构虽有效避免机械磨损,但也使系统对参数变化、电磁噪声、载荷扰动及结构耦合更加敏感。在复杂工况下,微小扰动即可造成明显定位误差,影响系统稳定性。随着精密制造技术不断提升,运动控制精度与抗扰动能力成为磁悬浮直线电机研究的核心问题。传统线性控制方法难以应对系统非线性特征、电磁耦

合效应及时变不确定性,难以满足高端装备的性能需求。因此,学界提出模型预测控制、自抗扰控制、非线性鲁棒控制与智能控制等方法,以增强系统对扰动的辨识与补偿能力,提高运行稳定性。

2 磁悬浮直线电机的动力学特性分析

2.1 电磁力模型及其非线性特征

磁悬浮直线电机的电磁力来源于定子与转子间磁场分布,其输出力与电流、磁通密度及空气隙大小密切相关。空气隙变化会引起磁通不均,导致电磁力呈非线性特性,进一步影响系统稳定性。在高速运动过程中,由于电枢反应以及磁通随动变化,电磁力常表现为波动性与局部饱和,造成推力脉动。为精确描述这些现象,本研究引入多维磁场分布模

【作者简介】高志扬(1984-),男,中国河北秦皇岛人,本科,助理工程师,从事机电研究。

型,结合有限元分析与实验标定,构建推力—电流—位移三者间的耦合关系模型,用于后续控制器设计与扰动补偿。

2.2 悬浮与驱动的耦合动力学关系

磁悬浮系统的悬浮控制与直线驱动之间存在显著耦合,悬浮力变化会影响空气隙大小,进而改变驱动力特性。驱动线圈产生的电磁力也会对悬浮位置形成附加影响,使系统难以单独控制两部分行为。为解决这一问题,需要构建完整的多输入多输出动力学模型。研究基于牛顿力学与电磁耦合原理推导系统状态空间模型,考虑悬浮通道与驱动通道间的交叉耦合路径,并在模型中显式加入扰动项,提高模型对实际工况的描述能力。

2.3 载荷变化与平台动态特性

在实际应用中,磁悬浮直线电机常承担搬运、定位或加减速任务,载荷变化会直接影响平台动态特性。载荷增大时惯量上升,使系统响应速度下降;载荷偏移会引起力矩不平衡,使悬浮稳定性下降。研究对载荷变化进行参数化建模,通过分析惯量、阻尼、刚度等参数对系统性能的影响,构建适应不同工况的动态特性模型,为后续控制策略提供理论基础。

3 磁悬浮直线电机精密运动控制技术

3.1 高带宽控制策略的需求与实现

磁悬浮直线电机在高速及高精度场景中运行时,对控制系统带宽提出更高要求。电流环、速度环和位置环作为运动控制的核心结构,其协同性能决定系统对快速扰动的响应能力。为实现高带宽控制,本研究采用高速采样与低延迟驱动模块,使电流环能够在高频段保持稳定的电流跟踪性能。在速度控制层面,引入高精度编码器并结合预测滤波技术,通过对速度瞬态变化进行提前识别提升速度估计精度。位置环中加入微分补偿与误差解耦机制,可有效降低因耦合动态造成的定位误差传播。多环之间通过带宽分配与信息协调达到相互补偿的效果,使系统在高速运动、快速加减速及负载变化条件下仍具备稳定输出能力。

3.2 基于精确前馈的动态补偿技术

磁悬浮直线电机在高速运行时存在明显的非线性动态特性,包括推力常数随位置与速度变化、电磁耦合效应增强、摩擦特性难以线性化等,使传统PID难以满足轨迹跟踪与动态补偿需求。本研究在系统动力学模型基础上构建前馈控制模块,将目标加速度、推力常数、反电势以及速度相关的补偿项纳入计算框架,使控制系统能够提前输出所需驱动力,减少误差信号在闭环控制中的累积。在实际应用中,通过对不同速度段推力常数的在线辨识,实现前馈参数的自适应调整,使补偿量与系统实时状态保持一致,提高前馈模型的有效性。该策略增强了系统对快速变化工况的适应能力,使轨迹跟踪误差在高速段显著降低,动态响应速度得到提高,为复杂运动任务提供稳定支持。

3.3 自抗扰控制与鲁棒控制融合策略

磁悬浮直线电机受磁场波动、载荷扰动、反电势耦合、基座振动及温漂等多种因素影响,使系统呈现强不确定性与时变性。自抗扰控制通过扩张状态观测器对总扰动进行估计,并实时补偿,可有效应对模型偏差与未知扰动,使系统保持较高的控制精度。然而,在强非线性或大幅参数变化工况下,单纯自抗扰控制的观测误差可能放大,影响系统稳定性。为此,本研究将自抗扰控制与鲁棒控制相结合,通过构建参数不确定性边界并利用鲁棒控制框架对观测误差进行约束,使控制器在扰动强度变化时仍具备稳定输出能力。融合策略在扰动估计的基础上增加了稳定性保护层,实现了快速扰动补偿与强鲁棒性并存的控制结构。实验验证表明,该方法在复杂工况下能显著提升系统的稳态精度、抗扰动性能与控制可靠性。

4 扰动来源分析与主动抑制方法

4.1 磁场波动对系统推力的影响

磁悬浮直线电机的推力取决于线圈电磁场与永磁体磁通的耦合,因此磁场稳定性对推力线性度与动态一致性至关重要。在高速运行中,磁场波动常由线圈温升导致的磁阻变化、永磁体磁性衰减、电流纹波及生产工艺误差等因素共同引发,使推力呈现周期性或随机波动,定位误差随之放大。本研究通过布置磁通密度传感器实时监测磁场变化,并结合电流采样构建磁场—推力映射模型,实现在线识别。为提升推力平稳性,提出基于多点采样的磁场预测方法,通过动态拟合磁通分布提前识别异常。进一步构建磁场补偿控制器,将预测误差引入控制律调整电流,使推力波动得到主动抑制。实验表明,该方法能有效降低推力脉动,提高系统高速运行下的定位一致性。

4.2 基座振动与结构噪声补偿技术

磁悬浮直线电机虽避免机械接触,但对基座振动与结构噪声极为敏感。在半导体装备与精密平台中,微米级振动即可引起空气隙变化,导致悬浮力偏差并影响定位精度。本研究利用加速度计、干涉仪及光栅传感器构建多源振动辨识系统,通过数据融合获取振动频率特性与时域响应,并建立振动传递模型用于分析其对悬浮误差的影响路径。在补偿策略方面,采用反向驱动方法将振动信号叠加于驱动电流,实现对外界扰动的主动抵消。同时引入基于模型的主动减振算法,通过预测振动趋势提前生成补偿量,使空气隙变化得到预抑制。此外,对结构噪声中的共振成分进行带阻滤波和结构解耦处理。实验结果表明,所提出方法有效降低了悬浮位置动态误差,提高了系统在复杂环境下的运行稳定性。

4.3 温度漂移与反电势耦合的影响

磁悬浮直线电机长时间运行的温升会导致磁钢剩磁降低、线圈电阻增加和磁通分布改变,使推力常数与反电势参数呈时变特性,进而影响控制精度。温度变化还会引发结构