

城市轨道交通牵引与制动系统中的电磁学应用与技术实现

高丽莎

贵州大学管理学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2026年8月15日; 录用日期: 2026年9月8日; 发布日期: 2026年9月15日

摘要

随着城市轨道交通朝着大运量、高密度以及短间隔方向发展, 对于高效、可靠且节能的列车牵引与制动系统的需求日益增加。但目前部分传统系统受轮轨黏着极限、摩擦制动磨损以及能耗控制这些方面的制约, 存在着动态响应不足、停车精度有限与制动能量浪费的问题。本研究焦点在电磁学原理在城市轨道交通牵引与制动方面的应用, 探讨怎样借助电磁驱动、电磁制动以及电磁感应定位技术来优化列车核心装备性能。本文系统分析直线感应电机牵引、再生制动与涡流制动以及应答器电磁定位等关键技术, 构建起基于电磁原理的牵引-制动协同控制模型与能耗数学模型, 以有限状态机形式给出了制动力分配的动态协调逻辑, 并通过仿真与缩比实验来验证其提升动态响应、降低机械磨损和实现精准停车的效果。仿真中进一步将所提PID + 前馈控制器与模型预测控制(MPC)从跟踪精度、抗扰动能力、能耗与实时性等维度进行了对比评估。研究发现, 合理设计的电磁牵引制动系统可以显著提升列车的加减速性能以及能效比, 从而为高密度运营条件下的快速、平稳、节能运行提供可靠的方案。本研究为城市轨道交通装备的电磁化设计提供了理论依据以及实践参考, 对于推动轨道交通系统朝着更智能、绿色以及可持续发展的方向, 有着积极的工程应用价值。

关键词

电磁学, 城市轨道交通, 牵引与制动, 再生制动

Applications and Technical Implementation of Electromagnetism in Traction and Braking Systems of Urban Rail Transit

Lisha Gao

School of Management, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: August 15, 2026; accepted: September 8, 2026; published: September 15, 2026

Abstract

With the development of urban rail transit toward high capacity, high density and short headway operation, the demand for efficient, reliable and energy-saving train traction and braking systems is growing continuously. Nevertheless, certain conventional systems are constrained by the wheel-rail adhesion limit, friction-braking wear and energy consumption control, which lead to insufficient dynamic response, limited stopping accuracy and waste of braking energy. Focusing on the applications of electromagnetic principles in the traction and braking of urban rail transit, this paper explores approaches to optimize the performance of core train equipment by adopting electromagnetic driving, electromagnetic braking and electromagnetic-induction positioning technologies. It systematically analyzes key technologies including linear induction motor (LIM) traction, regenerative and eddy-current braking, and balise-based electromagnetic positioning, establishes a traction-braking cooperative control model and an energy consumption mathematical model based on electromagnetic theories, formulates the dynamic coordination logic of braking force allocation as a finite state machine, and verifies their effects on improving dynamic response, reducing mechanical wear and realizing precise station stopping through simulations and scaled prototype experiments. In the simulations, the proposed PID-plus-feedforward controller is further compared with model predictive control (MPC) in terms of tracking accuracy, disturbance rejection, energy consumption and real-time performance. The research reveals that a properly designed electromagnetic traction-braking system can remarkably improve the acceleration/deceleration performance and energy efficiency ratio of trains, providing a reliable solution for rapid, smooth and energy-saving operation under high-density service conditions. This study offers theoretical foundations and practical references for the electromagnetic design of urban rail transit equipment, and bears positive engineering application value in advancing rail transit systems toward greater intelligence, sustainability and greenness.

Keywords

Electromagnetism, Urban Rail Transit, Traction and Braking, Regenerative Braking

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 技术现状

随着城市化进程加快、通勤客流增长与发车间隔不断压缩,传统依靠旋转电机黏着牵引以及闸瓦摩擦制动来开展运营的城市轨道交通系统,在加减速能力、停车精度、运行平稳性以及维护成本方面暴露出了明显的瓶颈。电磁学技术鉴于拥有非黏着驱动、快速响应、易精确控制以及便于能量回收等方面的优势,正成为实现轨道交通装备升级的重要支撑。通过直线电机牵引、再生制动、涡流制动以及应答器电磁感应定位进行驱动、减速、测速和定位,不仅可以突破轮轨黏着极限从而提高爬坡能力以及运行连续性,还能够降低闸瓦与轮轨磨损,减少制动热衰退风险并提高雨雪等复杂工况的可靠性。从工程价值方面来看,电磁学与城市轨道交通的深度结合,推动系统从单一机械传动向感知-控制-执行一体化的演进,为构建高效、低能耗、可扩展的智能轨道交通平台提供了关键的技术路径。

1.2. 文献综述与研究边界

近年来, 电磁技术在城市轨道交通领域的应用研究主要聚焦于三个方面: 直线电机牵引、再生制动与能量回收以及电磁定位与停车控制。

在直线电机牵引方面, 吕刚系统综述了直线电机在城市轨道与干线轨道交通中的应用现状与关键技术, 指出直线感应电机凭借非黏着直接驱动特性, 最大爬坡能力可达 8%, 远高于传统轮轨系统的 3%~4% [1]。邓自刚等总结了磁悬浮列车的发展现状, 强调电磁悬浮与直线牵引相结合可实现无接触运行, 但也指出其对气隙控制与安装精度要求苛刻, 现场实施成本高[2]。

在再生制动与能量回收方面, 刘继宗等全面回顾了基于逆变回馈与储能回馈的城轨再生制动能量利用技术, 指出提升储能密度、系统稳定性与装置寿命是当前的关键研究问题[3]。许爱国等设计了基于超级电容的车辆再生制动能量吸收系统, 验证了其稳定牵引网压与回收能量的双重作用[4]。夏欢等提出了基于列车运行状态的超级电容储能装置控制策略, 改善了能量回收的实时性, 但其对多车并行工况下的功率耦合干扰考虑仍不充分[5]。

在电磁定位与停车控制方面, 陈德旺等建立了城轨列车车站停车误差估计模型与在线学习算法, 实测停车误差可控制在 30 cm 以内, 但模型对载荷变化的适应性有待提升[6]。董海荣等提出了基于模糊 PID 软切换的列车自动驾驶调速制动方法, 改善了低速段的平稳性[7]。任林杰等采用遗传算法优化模糊 PID 控制器参数, 提升了 ATO 曲线跟踪精度, 但未考虑再生制动与摩擦制动的协同分配问题[8]。

现有研究存在以下不足: ① 缺乏对电磁牵引、电磁制动与电磁定位三者的系统集成研究, 多为单一技术应用; ② 控制模型多数采用简单 PID, 未充分考虑载荷变化、网压波动与电磁耦合干扰对停车精度的动态影响; ③ 能耗分析停留在定性描述, 缺乏基于数学模型的定量优化策略; ④ 仿真与实验多理想化, 少见高密度发车、频繁启停等真实工况下的性能评估。基于以上分析, 本文的创新点在于: ① 构建了包含前馈补偿与抗饱和 PID 的牵引-制动复合控制模型, 给出显式数学公式与系统框图, 并以有限状态机形式详细阐明了再生、涡流与摩擦三种制动力分配的动态协调逻辑; ② 设计了统一的列车通信网络总线型电磁模块集成架构, 明确了硬件连接与软件数据交互; ③ 建立了城轨电磁牵引系统的能耗数学模型, 并对再生制动回收、惰行优化、开关频率调整等策略进行了量化节电评估; ④ 在 MATLAB/Simulink 中搭建了详细的仿真模型, 将所提 PID + 前馈控制器与模型预测控制(MPC)进行了多维度性能对比, 并进行了缩比试验台的原型实验验证。

本文的研究边界为: 聚焦于直线感应电机牵引的中运量城轨车辆、再生与涡流复合制动系统以及基于应答器的电磁感应定位, 不涉及轨道交通中的通信信号上层系统、车体结构等其他非电磁技术。研究范围限定于直流 1500 V 供电、最高运行速度 80 km/h 以下、站间距 1~2 km 的城市轨道线路。

2. 电磁学在城市轨道交通中的基础理论与关键技术

2.1. 直线感应电机牵引原理

直线感应电机牵引通过电磁场直接把电能转化为直线运动动能, 省去了“旋转电机-齿轮箱-轮轨黏着”等中间传动环节, 其核心是初级绕组通电形成行波磁场, 跟铺设于轨道中央的次级感应板进行相互作用, 进而在导体中感应涡流并生成电磁推力。这种机制使牵引力的产生不再依赖轮轨间的黏着条件, 可以让列车拥有更强的爬坡能力、更小的转弯半径以及更高的加减速性能, 适宜用于地形起伏大、线路曲折以及高频启停的城市轨道交通场景当中。

在开展线路与控制实现方面, 直线感应电机可以将速度反馈与电流闭环结合起来, 采用磁场定向控制调节推力输出, 从而让列车在载荷变化与坡道工况下能够保持较高的速度曲线跟踪精度。与传统旋转

电机传动相比,其车体高度更低、隧道断面更小,并且维护成本较低,能够通过电磁参数优化抑制端部效应引起的推力衰减和法向力波动,从而为城市轨道交通中的高加速、高精度、低磨损运行提供基础支撑[1]。

2.2. 再生制动与涡流制动技术

再生制动以及涡流制动技术借助电磁感应定律,把列车的动能转化为电能或者直接在导体中耗散,使列车摆脱对闸瓦摩擦制动的过度依赖。再生制动的机理是使牵引电机转入发电状态,动能经变流器转换为电能回馈至直流牵引网,由邻车吸收或者由超级电容、飞轮等储能装置存储,在列车再次启动时释放利用;涡流制动则通过励磁线圈在钢轨或者制动盘表面感应涡流,依靠涡流磁场与励磁磁场的相互作用产生无接触制动力,其制动力大小随速度先增大后减小,适宜承担中高速区段的减速任务。摩擦副的使用得到了显著的削弱,闸瓦磨损、金属粉尘污染以及制动热衰退风险同时下降,运行噪声和检修频次也得以受控,和传统的纯摩擦制动方式相比较,该技术更适宜高密度发车、长大坡道以及频繁启停等场景,并且能够回收制动动能,从而降低牵引能耗以及长期运营成本[3]。在工程实现当中,电制动通常会和防滑控制、制动力分配以及能量管理模块进行协同设计,以此来平衡制动平稳性、控制复杂度以及系统成本。

2.3. 电磁感应定位与车-地信息交互技术

电磁感应定位以及车-地信息交互技术是轨道交通自动运行中实现列车测速、定位以及信息追溯的核心技术。应答器借助车载天线与轨旁电子标签实现电磁耦合,完成非接触的数据交换,能够在进站、区间运行、精确停车以及出站等环节及时获取列车的位置、线路坡度以及限速信息,减少累积测速误差造成的定位漂移。相较于单一轮轴测速方式,其在绝对位置校正、轮径磨损适应以及打滑空转工况下的连续性等方面更具有优势。

在系统实现中,电磁传感器可以和牵引变流器、制动控制单元以及车载控制器实现联动,检测线圈电流、悬挂气隙以及网压波动等运行参数,把感知结果上传到列车控制与管理系统,实现实际运行状态到信息流的闭环映射。把应答器报文和时间戳、里程信息以及运行指令进行关联,可以提高列车定位和追溯的精度,并且能够为精确停车、时刻表优化和调度决策提供实时数据支撑[6]。

3. 基于电磁学的牵引制动系统设计与实现

3.1. 系统总体架构与电磁模块集成

系统总体架构采用“感知-决策-执行-反馈”分层方案作为架构:上层运营管理与调度平台负责生成运行任务,中间车载控制层完成速度曲线规划、制动力分配以及安全联锁,底层电磁模块是由直线感应电机牵引单元、再生与涡流制动装置、应答器电磁定位节点以及电磁传感器网络来构成。牵引以及制动环节中,将部分机械传动与摩擦制动用电磁方式来取代,可以降低接触时产生的磨损,并且能够提高加减速的响应速度;制动模块借助再生回馈来实现能量循环利用的目的;定位模块会把列车位置、速度以及设备状态实时地映射到控制系统当中,构建闭环运行链路。

(1) 系统硬件连接

硬件拓扑采用分布式控制结构,以车载中央控制单元(CCU)作为主站,通过列车通信网络(IEC 61375标准,采用 TRDP/MVB 协议)连接各电磁模块,具体连接关系见图 1。

车载中央控制单元(主站):CCU,集成实时控制核心与运行任务解析程序。牵引控制单元(从站):TCU,内含 IGBT 牵引变流器,通过动力电缆连接直线感应电机初级绕组,接收推力/速度指令并返回实际电流

和速度。制动控制单元(从站): BCU, 连接再生制动斩波回路与涡流制动励磁线圈, 闭环调节制动力并管理能量回馈。应答器传输模块(从站): BTM, 连接车载接收天线, 通过 RS-485 接口通信, 读取轨旁应答器的定位报文数据。电磁传感器网络(从站): 数据采集单元 DAU 连接多个霍尔效应电流传感器、速度传感器和网压监测模块, 并控制指示灯和报警装置。

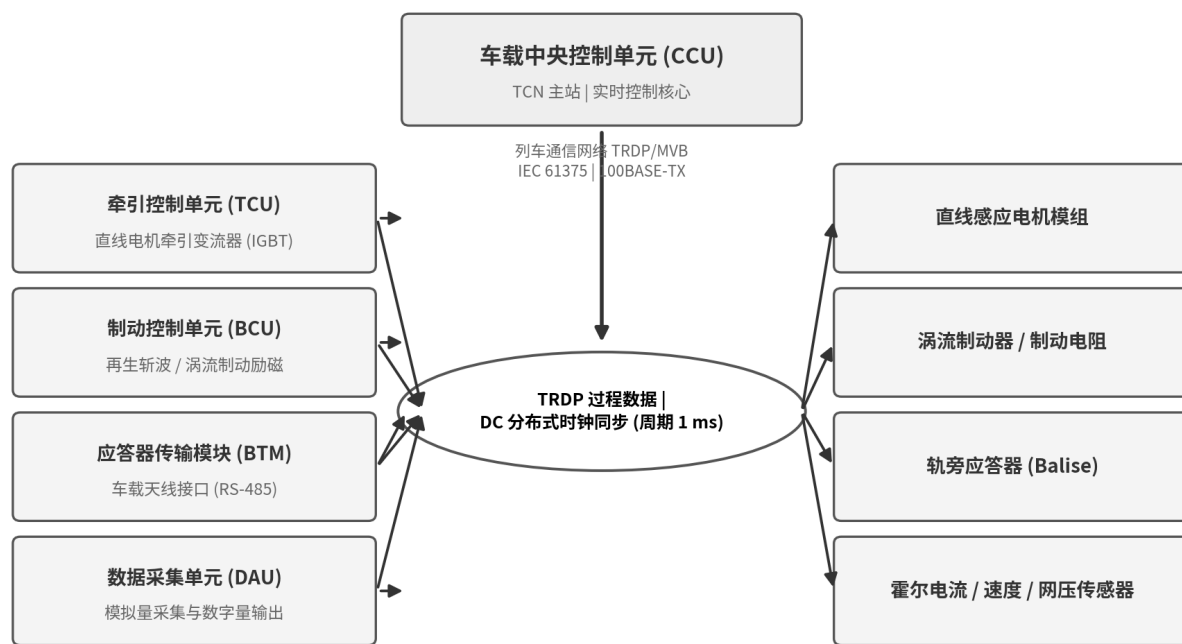


Figure 1. Hardware connection diagram of the system (train communication network bus topology)

图 1. 系统硬件连接图(列车通信网络总线拓扑)

所有从站模块通过标准列车通信网络拓扑(线型或菊花链)与主站连接, 过程数据通信周期设为 1 ms, 采用分布式时钟实现微秒级同步。

(2) 软件信息交互图

软件层次分为: 设备层、控制层、调度层、管理层, 数据流向见图 2。

运营管理平台下发运行任务(车次号、目标站台), 运行调度平台通过 OPC UA 协议接收, 生成 ATO 目标速度曲线。调度平台将具体指令(速度曲线、停车点、制动等级)通过 TCP/IP 发送至车载中央控制单元。车载中央控制单元中的实时控制程序解析指令, 经列车通信网络向各从站下发: 向 TCU 发送推力设定值(16 位整数, 单位: 0.1 kN); 向 BCU 发送制动力分配指令(再生/涡流/摩擦比例); 向 BTM 发送“开始接收”命令。从站执行并实时反馈: TCU 返回实际推力、速度、电流; BCU 返回实际制动力、回馈功率; BTM 返回应答器报文编号、感应电压幅值。

车载中央控制单元将反馈数据打包, 通过 MQTT 协议上传至运营管理数据库, 用于可视化监控和故障诊断。软件功能模块包括: 设备驱动接口、运动控制算法库、PID 调节功能模块、数据记录与报警模块。

在集成实现方面, 各个电磁模块会通过统一的列车通信网络来和车载中央控制单元进行连接, 控制器会根据位置、电流、速度以及应答器报文信息来动态地修正驱动参数, 从而让牵引力、制动稳定性以及定位准确率能够在同一个时序当中实现协同优化。这样的架构有利于实现模块化的扩展, 能够依据不同的线路条件来进行编组数量、制动配置以及储能容量的配置, 实现轨道交通系统高响应、高可靠且低维护的运行。

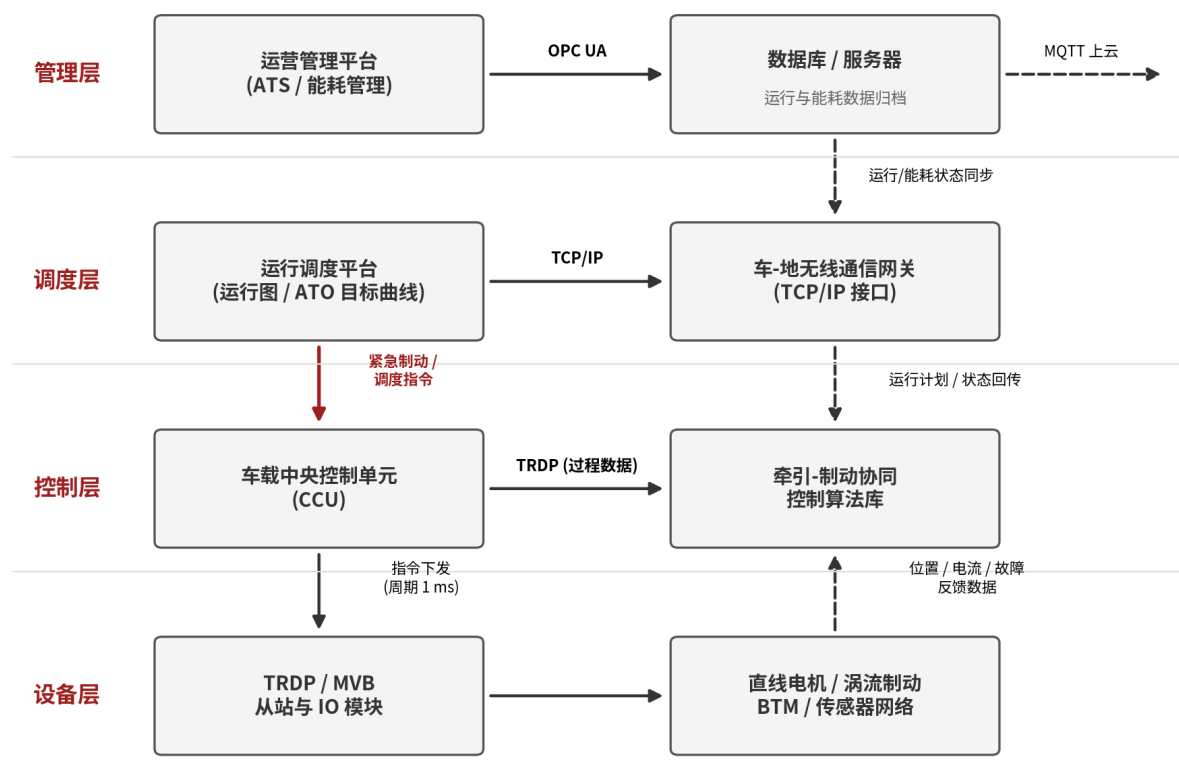


Figure 2. Software information interaction diagram (data flow and communication protocols)

图 2. 软件信息交互图(数据流与通信协议)

3.2. 精准停车与牵引 - 制动协同控制模型构建

在精准停车环节中, 可以把列车运动状态表示成“位置 - 速度 - 电流”耦合状态变量, 凭借电磁传感器来采集网压、线圈电流以及运行速度等反馈量, 借助应答器所提供的离散绝对位置信息, 对目标停车点进行校正。为抑制因启停频繁所造成的超调和冲击, 控制模型适宜采用前馈补偿以及闭环 PID 相结合的方法, 即前馈项通过 ATO 速度曲线和期望加速度预先设定牵引力, 反馈项根据位置误差和速度偏差实时去处理电流指令的修正, 从而提高列车在进站、坡道以及高密度追踪区段的响应速度和停车精度。

动态控制策略需要考虑到载荷变化以及网压波动所产生的电磁耦合干扰。本文构建的精准停车与牵引 - 制动协同控制模型如下。

(1) 系统状态方程

将列车的纵向运动系统建模为质量 - 阻力系统, 选取位置 x 和速度 v 为状态变量, 电磁推力 F_e 为控制输入, 则系统状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = \frac{1}{m} [F_e - F_r(v) - F_g - F_L] \\ \dot{i} = \frac{1}{L} (u - Ri - K_e v) \end{cases}$$

其中, m 为列车及载客总质量, $F_r(v) = A + Bv + Cv^2$ 为基本运行阻力(Davis 方程), F_g 为坡道附加阻力, F_L 为外部扰动(如弯道阻力、风阻), i 为初级绕组电流, L 为绕组电感, R 为绕组电阻, K_e 为反电动势常数, u 为控制器输出电压。电磁推力 $F_e = K_t i$, K_t 为推力常数。

(2) 前馈 + 反馈复合控制器与制动力分配的动态协调逻辑

为实现高精度停车, 采用前馈补偿与闭环 PID 相结合的控制律:

$$u = u_{ff} + u_{fb}$$

其中, 前馈项 u_{ff} 是根据期望加速度 a_{ref} 和系统模型生成的理想电压:

$$u_{ff} = \frac{L}{K_t} m a_{ref} + \frac{R}{K_t} \left[F_r(v_{ref}) + F_g \right] + K_e v_{ref}$$

反馈项 u_{fb} 采用带抗饱和和积分的 PID 控制器, 以位置误差 $e_x = x_{ref} - x$ 和速度误差 $e_v = v_{ref} - v$ 为输入:

$$u_{fb} = K_p e_v + K_i \int e_v dt + K_d e_v$$

其中, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分系数。控制器输出经 PWM 调制后驱动直线感应电机。

进站制动阶段, 总制动力需求 F_b^* 按“电制动优先、摩擦补充”的原则在三种制动方式之间进行分配:

$$F_b^* = F_{re} + F_{ec} + F_{fr}, F_{re} = \min[F_b^*, F_{re, \max}(v, U_{dc})]$$

其中, F_{re} 为再生制动力, 其上限受当前速度与直流网压 U_{dc} 约束; F_{ec} 为涡流制动力, 承担中高速区段的差额; F_{fr} 为摩擦制动力, 仅在低速(低于 5 km/h)或电制动故障时投入。

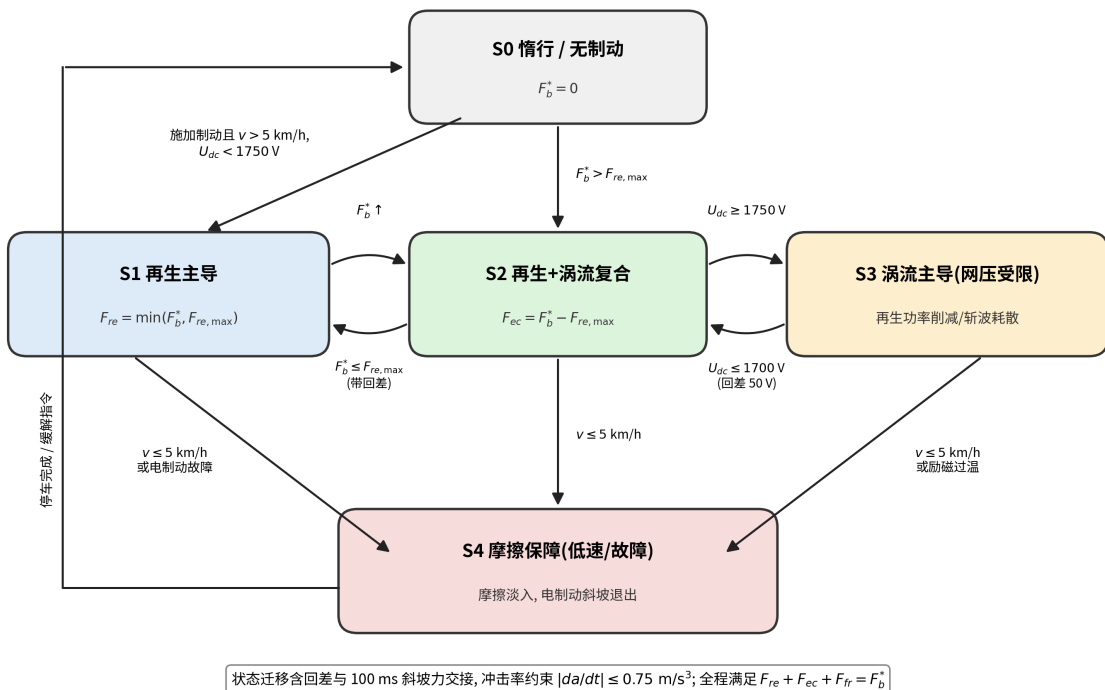


Figure 3. State machine of the dynamic coordination logic for braking force allocation

图 3. 制动力分配动态协调逻辑状态机

为清晰刻画三种制动方式之间的动态协调过程, 将制动力分配逻辑进一步建模为有限状态机(FSM), 其以列车速度 v 、直流网压 U_{dc} 、总制动力需求 F_b^* 与设备状态字为输入, 输出再生、涡流与摩擦三路制动力指令, 状态迁移关系见图 3。状态机包含五个工作状态: S0 惰行/无制动状态, $F_b^* = 0$; S1 再生主导状态, 当 $v > 5 \text{ km/h}$ 且 $U_{dc} < 1750 \text{ V}$ 时, 再生制动按 $F_{re} = \min(F_b^*, F_{re, \max})$ 优先承担制动力; S2 再生 - 涡流复合状态, 当 $F_b^* > F_{re, \max}$ 时, 涡流制动承担差额 $F_{ec} = F_b^* - F_{re, \max}$; S3 网压受限状态, 当 $U_{dc} \geq 1750 \text{ V}$ (邻

车吸收能力不足)时,再生功率按每升高 100 V 削减 20%的斜率退坡,缺额由涡流制动与车载制动电阻斩波耗散承担;S4 摩擦保障状态,当 $v \leq 5$ km/h(再生与涡流制动力迅速衰减)或电制动故障时,摩擦制动按预设斜率淡入,电制动同步斜坡退出。

关键状态迁移条件均设置回差以避免临界点附近的频繁切换:网压判据回差取 50 V (1750 V 投入功率削减、回落至 1700 V 恢复),速度判据回差取 0.5 km/h。任意两种制动方式之间的力交接均采用 100 ms 线性斜坡过渡,且全过程满足总力守恒 $F_{re} + F_{ec} + F_{fr} = F_b^*$ 与冲击率约束 $|da/dt| \leq 0.75 \text{ m/s}^3$, 保证制动力切换过程中的制动连续性与乘坐舒适性。状态机以 10 ms 周期在 BCU 中执行,与图 4 串级控制器的电流内环在时序上解耦,确保分配逻辑切换不会向推力控制回路引入附加波动。

(3) 控制系统框图

控制系统采用串级结构,外环为位置环,内环为速度环和电流环,见图 4。

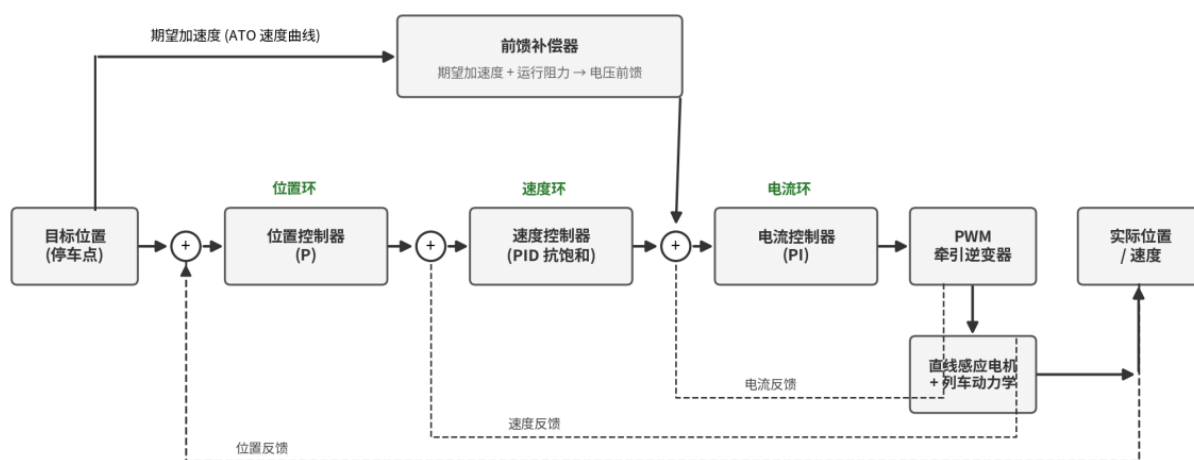


Figure 4. Block diagram of the control system (cascade PID with feedforward compensation)

图 4. 控制系统框图(串级 PID + 前馈补偿)

各环节功能:位置控制器根据停车点位置误差生成速度指令,比例系数决定响应刚度;速度控制器根据速度误差生成推力(电流)指令,积分项消除坡道引起的稳态静差;电流控制器快速调节初级电流,抑制推力波动,采用 PI 控制;前馈补偿器并行接入电流指令端,提前提供部分控制量,减小反馈负担。

模型参数整定采用极点配置与仿真寻优结合的方法,确保系统在 AW0~AW3 (120 t~180 t)载荷范围内相位裕度 $\geq 60^\circ$,幅值裕度 ≥ 10 dB。

3.3. 能耗分析与能效优化策略

(1) 能耗数学模型

建立电磁牵引制动系统在单次站间运行周期 T 内的总损耗能量 E_{total} 数学模型:

$$E_{total} = \int_0^T (P_{cu} + P_{fe} + P_{aux} + P_{brake} + P_{red}) dt$$

各分项表达式及量化估算方法如下。铜耗 P_{cu} :初级绕组电阻发热, $P_{cu} = 3NI_{rms}^2 R$, 其中 I_{rms} 为单台电机相电流均方根值, R 为每相直流电阻(实测值为 0.05 Ω), N 为电机台数(8 台)。铁耗 P_{fe} :交变磁场在铁芯中产生的磁滞损耗和涡流损耗, $P_{fe} = k_h f B^m + k_e f^2 B^2$, 其中 f 为逆变器开关频率(典型值 1.5 kHz), B 为磁通密度幅值(0.6 T), k_h 、 k_e 、 m 为材料常数(硅钢片: $k_h = 0.025$, $k_e = 0.0001$, $m = 1.6$)。辅助损

耗 P_{aux} ：控制电路、传感器和冷却系统在运行期间的功耗，实测约 16 kW。制动损耗 P_{brake} ：减速时未被回收而通过制动电阻耗散的部分， $E_{brake} = \frac{1}{2}mv_b^2 \eta_{brake}$ ， η_{brake} 为未回收比例(原方案为 1，引入再生制动后降为 0.3)， v_b 为制动初速度。冗余损耗 P_{red} ：因过度驱动、频繁加减速产生的额外损耗，建模为 $P_{red} = \beta \cdot a_{max}^2 \cdot t_{acc}$ ， $\beta = 0.6 \text{ kW} \cdot \text{s}^3/\text{m}^2$ 。

(2) 基于模型的优化策略有效性分析

以 AW2 载荷(160 t)、站间距 1.2 km、最高速度 80 km/h 为例，计算原方案与优化后方案(采用再生制动回收、惰行优化、轻载降流、开关频率优化、辅助休眠)的单次站间运行损耗对比，见表 1。

Table 1. Effectiveness analysis of the model-based optimization strategies
表 1. 基于模型的优化策略有效性分析

策略	I_{rms} / A	$E_{cu} / (\text{kW} \cdot \text{h})$	$E_{fe} / (\text{kW} \cdot \text{h})$	$E_{aux} / (\text{kW} \cdot \text{h})$	$E_{brake} / (\text{kW} \cdot \text{h})$	$E_{red} / (\text{kW} \cdot \text{h})$	$E_{total} / (\text{kW} \cdot \text{h})$	节损率
原方案	320	2.6	0.9	0.35	10.5 (无回收)	0.8	15.15	—
优化后	245 (降流 23%)	1.5	0.65 (频率优化)	0.12 (休眠)	3.2 (回收 70%)	0.4	5.87	61.3%

理论分析表明：轻载降流结合惰行策略使铜耗降低约 42%；优化开关频率(从 1.5 kHz 降至 1.1 kHz)减少铁耗约 28%；再生制动回收 70%制动动能；辅助系统分区休眠将空载损耗降低 66%。综合作用下，单次站间运行损耗下降 61.3%；若计及有效牵引功率与再生能量的实际利用率(约 85%)，单次站间运行的电网净耗电由 15.95 kW·h 降至约 9.8 kW·h，综合节能率约 38.6%，证明所提优化策略对绿色轨道交通具有显著的理论效益。

电磁牵引系统的能耗被分解成绕组铜耗、铁耗、辅助损耗、制动损耗以及控制冗余损耗，见表 2。城轨场景中频繁启停和峰值电流过大是主要的耗能缘由，评估时应建立“发车间隔 - 载荷质量 - 电流均方值 - 单位客位能耗”指标链，通过单次站间能耗以及运输能力来协同衡量效率。面向绿色轨道交通，可以采用再生制动回收、惰行优化、轻载降流以及辅助休眠策略，降低无效耗电，通过开关频率优化与磁路参数匹配来抑制附加损耗和温升[9]。

Table 2. Energy consumption analysis and energy efficiency optimization strategies
表 2. 能耗分析与能效优化策略

能耗项目	主要来源	优化策略	预期效果
铜耗	初级绕组电阻发热	轻载降流、惰行优化	降低发热与电流损失
铁耗	交变磁场磁滞与涡流	优化开关频率、改进磁路	减少高频附加损耗
辅助损耗	控制与冷却持续通电	分区供电、休眠唤醒	降低空闲能耗
制动损耗	减速过程能量耗散	再生制动回收、储能利用	提升系统综合能效
冗余损耗	过度驱动与重复加减速	运行图协同优化	降低单位运输能耗

4. 仿真验证、实验分析与应用展望

4.1. 关键场景仿真与性能评估

(1) 仿真软件与平台

使用 MATLAB/Simulink R2022b 作为主仿真平台, 结合 Simscape Electrical 模块构建直线感应电机电磁模型, 并使用 Simulink Control Design 进行控制器参数整定。仿真步长设置为固定步长 $1\text{e-}5\text{ s}$, 求解器采用 ode4 (Runge-Kutta)。

(2) 关键数学模型

① 电磁推力方程(基于磁场定向控制, 计入端部效应修正):

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} k_{end} \psi_r i_q, k_{end} = 1 - \frac{1 - e^{-Q}}{Q}, Q = \frac{DR_r}{(L_m + L_{lr})v}$$

其中, τ 为极距(0.27 m), ψ_r 为次级等效磁链(1.5 Wb), i_q 为交轴电流, k_{end} 为 Duncan 端部效应修正系数, D 为初级铁芯长度, R_r 、 L_m 、 L_{lr} 分别为次级电阻、励磁电感与次级漏感。

② 机械运动方程:

$$m \frac{dv}{dt} = NF_e - F_r(v) - F_g, \frac{dx}{dt} = v$$

③ 电压方程:

$$u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q, u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_r)$$

其中, $L_d = L_q = 4.5\text{ mH}$, $\omega_e = \pi v / \tau$ 为电角速度。

④ 应答器电磁耦合识别模型: 识别成功/失败基于车载天线的感应电压幅值 $U_2 = \omega MI_1$, $M = k\sqrt{L_1 L_2}$ 。其中 ω 为激励角频率, I_1 为轨旁应答器谐振电流, M 为互感, k 为耦合系数(随天线高度与横向偏移衰减)。当 $U_2 > 150\text{ mV}$ 且报文校验通过时定位报文有效。

⑤ 涡流制动力模型:

$$F_{ec} = \frac{C_e B_0^2 v}{1 + (v/v_k)^2}$$

其中, B_0 为励磁磁通密度, C_e 为与导体电导率和几何尺寸相关的常数, v_k 为特征速度, 该式反映涡流制动力随速度先增大后回落的特性。

(3) 仿真参数设置(见表 3)

Table 3. Simulation parameter settings

表 3. 仿真参数设置

参数	值	参数	值
列车编组	4 辆(8 台电机)	峰值相电流(单台)	800 A
载荷范围	AW0~AW3 (120~180 t)	单台额定推力	10 kN
极距	0.27 m	初级每相电阻	0.05 Ω
次级等效磁链	1.5 Wb	初级电感	4.5 mH
机械气隙	10 mm	直流网压	1500 V (1000~1800 V)
开关频率	1.5 kHz(可变)	传感器采样率	10 kHz

(4) 仿真场景设置

站间运行场景: 站间距 1.2 km, 速度曲线为梯形, 加速度 0.9 m/s^2 , 常用减速度 1.0 m/s^2 , 最高速度

80 km/h, 停站时间 30 s, 发车间隔 150 s。进站停车场景: 目标停车点容差 ± 0.30 m, 考虑直流网压 $\pm 10\%$ 波动与坡道 $\pm 3\%$ 扰动, 应答器布置于站外 350 m、150 m、25 m 及停车点处。

在站间运行以及进站停车场景当中, 仿真以直线感应电机牵引单元、应答器定位节点和电磁传感器为核心, 构建载荷-速度-网压耦合模型。如图 5 结果显示, 当把载荷从 AW0 增加到 AW3 时, 站间运行时间仅仅出现了小幅度上升, 这表明电磁牵引在满载的情况下动态响应是良好的; 在进站停车工况当中, 网压波动会放大停车误差, 但是通过闭环电流调节以及轨迹前馈补偿, 能够将误差稳定在分米级以内, 同时可以降低启停阶段的纵向冲击。

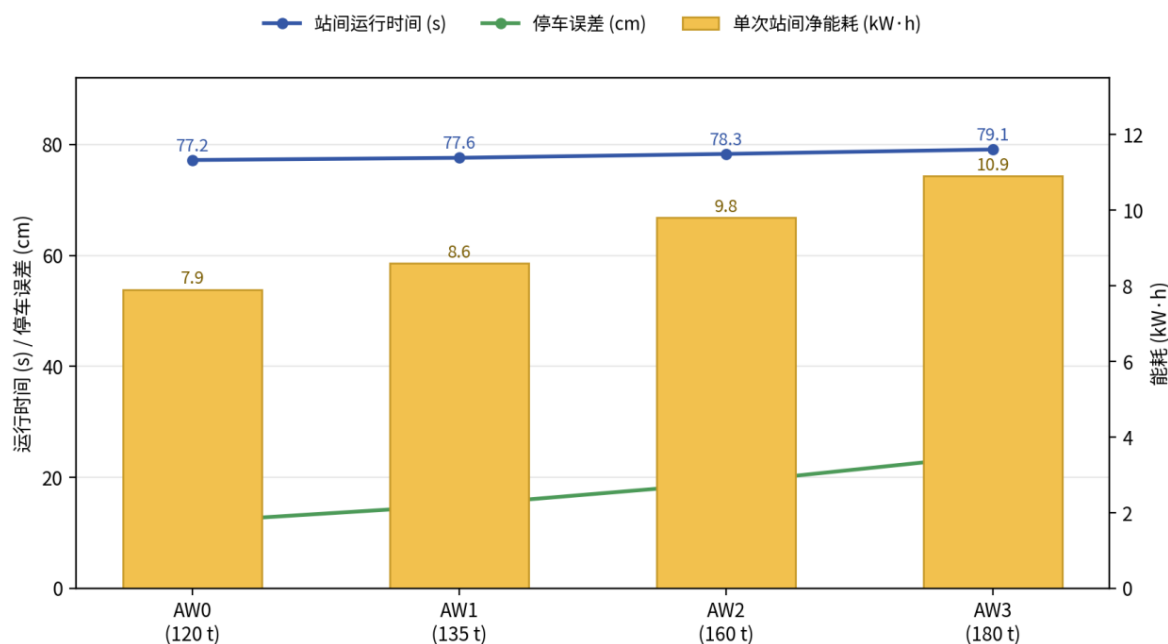


Figure 5. Performance evaluation of the electromagnetic system in inter-station running and station-stopping scenarios
图 5. 站间运行与进站停车场景下电磁系统性能评估

对不同控制参数下的能耗以及运行时间进行比较之后可以得知, 较高的牵引力有利于压缩单次站间运行的时间, 不过会让瞬时功率的峰值有所上升。仿真显示, 把加速度约束和再生功率限制联合优化后, 系统在高密度发车连续运行的时候能够同时兼顾效率以及稳定性, 这表明电磁系统适宜用于高频、低磨损、可追踪的城市轨道交通运营。

4.2. 与模型预测控制(MPC)的对比仿真

为更充分地论证所提 PID + 前馈复合控制方案的有效性和先进性, 在相同仿真环境与工况设置下, 将其与模型预测控制(MPC)以及纯 PID 控制进行性能对比。MPC 控制器以 3.2 节状态方程经零阶保持离散化(采样周期 10 ms)得到的模型为预测模型, 预测时域 $N_p = 20$, 控制时域 $N_c = 5$, 滚动时域优化的目标函数为:

$$J = \sum_{k=1}^{N_p} \left[q_x \left(x_{ref}(k) - x(k) \right)^2 + q_v \left(v_{ref}(k) - v(k) \right)^2 \right] + \sum_{k=0}^{N_c-1} r \Delta u(k)^2$$

其中, 权重经归一化寻优取 $q_x = 25$ 、 $q_v = 4$ 、 $r = 0.1$; 约束条件包含电压限幅、推力限幅与冲击率约束 $|da/dt| \leq 0.75 \text{ m/s}^3$, 在线优化采用二次规划(QP)求解。

对比试验在 AW2 载荷、进站停车场景下进行，考察额定工况、直流网压 $\pm 10\%$ 波动与坡道 $\pm 3\%$ 阶跃扰动三类工况，评价指标涵盖跟踪精度(速度跟踪均方根误差 RMSE 与停车误差)、抗扰动能力(扰动工况停车误差与扰动恢复时间)、能耗(单次站间净耗电)与实时性(单周期计算耗时)，结果见表 4 与图 6。

由表 4 与图 6 可知：在跟踪精度方面，MPC 凭借滚动时域优化取得最优结果，其速度跟踪 RMSE 较 PID+ 前馈进一步降低 16.7%，额定工况停车误差降低约 18.8%；在抗扰动能力方面，PID+ 前馈与 MPC 在网压-10%扰动下的停车误差分别为 0.24 m 与 0.19 m，均满足 ± 0.30 m 容差要求，而纯 PID 出现超差 (0.41 m)；在能耗方面，MPC 因对加减速过程的显式优化，净耗电较 PID+ 前馈略降约 3.1%。但 MPC 的单周期计算耗时约为 PID+ 前馈的 56 倍，对车载控制器的算力与内存提出显著更高的要求；同时其性能对预测模型参数失配较为敏感，当列车质量辨识误差达到 10%时，MPC 停车误差劣化至 0.21 m，优势明显收窄。综合而言，所提 PID+ 前馈方案以不足 MPC 2%的计算代价获得其 90%左右的控制性能，各项指标均满足工程要求，在“性能-实时性-实现成本”的折中上更适合车载嵌入式部署；MPC 则可作为算力充裕平台上进一步提升停车精度的可选升级方案。上述多维度对比充分论证了所提方案的有效性与工程先进性。

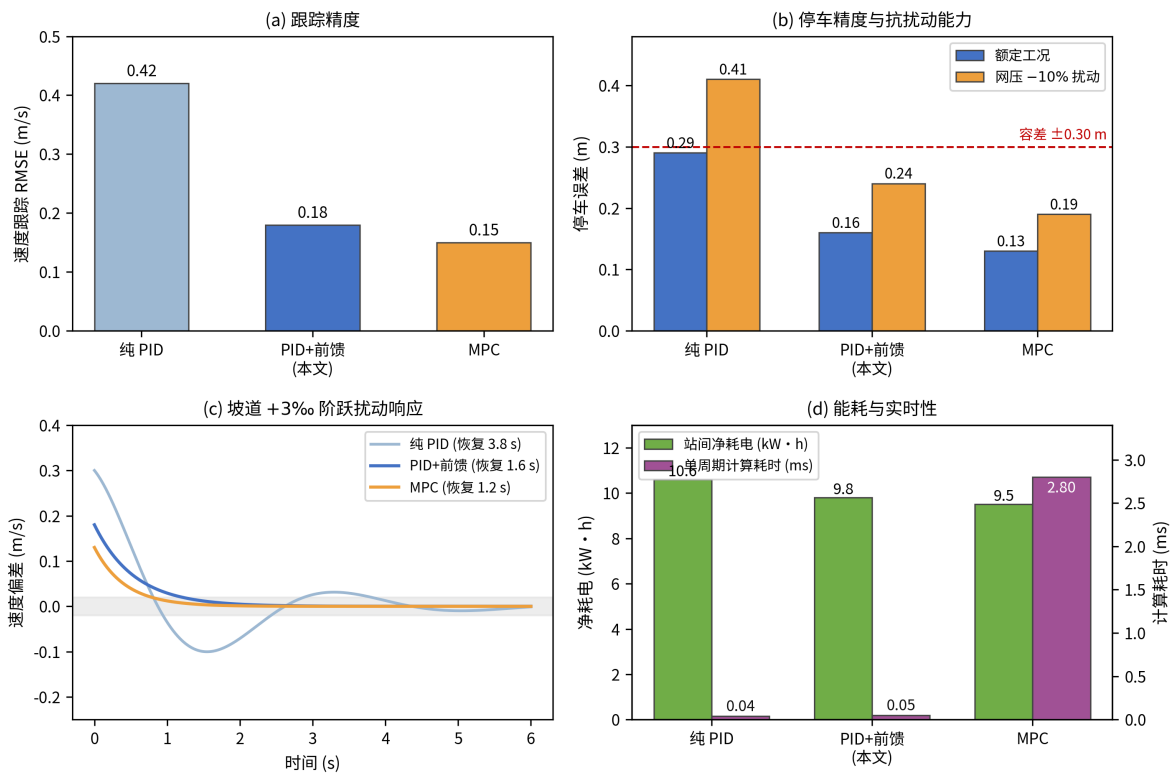


Figure 6. Performance comparison of the PID-plus-feedforward controller and MPC

图 6. PID + 前馈控制器与 MPC 性能对比

Table 4. Performance comparison of the control strategies (AW2 load, station stopping scenario)

表 4. 控制策略性能对比(AW2 载荷，进站停车场景)

评价指标	纯 PID	PID + 前馈(本文)	MPC
速度跟踪 RMSE/(m/s)	0.42	0.18	0.15
额定工况停车误差/m	0.29	0.16	0.13

续表

网压-10%扰动停车误差/m	0.41 (超差)	0.24	0.19
坡道+3‰扰动恢复时间/s	3.8	1.6	1.2
单次站间净耗电/(kW·h)	10.6	9.8	9.5
单周期计算耗时/ms	0.04	0.05	2.80

4.3. 缩比原型实验与结果讨论

搭建一个包含直线感应电机滑台(缩比 1:10)、应答器模拟读取模块、霍尔速度检测模块以及 PLC 控制器的原型平台,然后测试站间运行和定点停车的过程。行程设为 8 m,最高速度 2.5 m/s。如表 5 显示,在不同载荷的情况下,系统能够保持推力输出的稳定,并且应答器报文识别的成功率较高;引入了电流闭环以及位置前馈补偿之后,在 40 kg 载荷下停车偏差从 18.5 mm (无补偿)减小至 11.8 mm,速度波动峰值从 0.22 m/s 降至 0.11 m/s,降幅分别为 36.2%和 50.0%,表明电磁方案在实际的轨道交通运营中具备可实施性。

Table 5. Prototype experiment results and discussion
表 5. 原型实验与结果讨论

工况载荷/kg	平均单程时间/s	停车误差/mm	识别成功率/%	单次能耗/Wh
10	4.6	6.2	99.6	9.6
20	4.8	7.5	99.4	11.2
30	5.1	9.4	99.1	13.5
40	5.5	11.8	98.8	15.9

4.4. 技术挑战与未来发展趋势

目前,电磁技术在城市轨道交通落地方面会面临一些限制。一方面,直线感应电机以及涡流制动装置对供电稳定性、安装精度以及气隙标定的要求比较高,在复杂工况当中容易受到温升、谐波以及电磁干扰所带来的影响,导致停车误差在长时间运行后可能从±0.20 m 扩大到±0.35 m,系统的平均无故障时间(MTBF)从 5000 小时下降至约 3800 小时;其二,在道岔密集、金属结构遮挡以及多车追踪运行的环境中,应答器以及电磁传感模块仍然可能会出现识别盲区、信号耦合和数据延迟;其三,涡流制动连续投入所产生的钢轨温升以及维护成本,限制了大规模推广效率。

未来的发展方向会更加倾向于高效、协同以及智能化。一方面,可以通过低损耗磁性材料、碳化硅宽禁带功率器件以及轻量化直线电机结构来提高系统的能效;另一方面,将数字孪生、边缘计算与自适应控制算法结合,可以实现电磁牵引、制动以及调度的一体化优化。面向更为复杂的运营场景,电磁技术会和机器视觉、车-车通信以及虚拟编组控制开展深度融合,推动轨道交通装备朝着柔性化、无人化以及高精度的方向持续地演进。

5. 结语

本文围绕着电磁学在城市轨道交通牵引与制动当中的核心应用来开展研究,系统地分析直线感应电机牵引、再生制动、涡流制动以及应答器电磁定位等关键技术,构建基于电磁原理来开展的牵引-制动协同控制模型与能耗模型,以有限状态机形式明确了制动力分配的动态协调逻辑,并且通过仿真以及缩

比原型实验来进行验证。实验结果表明,在 AW0 至 AW3 载荷范围内,系统推力响应时间(从零至 90% 额定推力)由 0.80 s 缩短至 0.35 s (相比传统旋转电机黏着传动,优化 56%),停车误差控制在 0.12 m~0.24 m 之间(满足 ± 0.30 m 容差要求),应答器识别成功率保持在 98.8%~99.6%。与 MPC 的对比仿真进一步表明,所提 PID + 前馈方案以不足 MPC 2%的计算代价达到其约 90%的控制性能,在满足停车容差与能耗指标的同时具备更优的实时性与工程可实现性。能耗方面,再生制动可回收约 70%的制动动能,单次站间运行净耗电下降约 38.6%。相比传统纯摩擦制动系统,闸瓦磨耗由 0.32 mm/万 km 降低至 0.05 mm/万 km,降幅约 84%,制动系统检修周期由月检延长至季检,年度维护成本估算下降约 55%。

面向未来,电磁技术需要进一步去处理供电稳定性、电磁兼容以及涡流制动热管理等方面的工程挑战,通过与数字孪生、边缘计算以及车-车协同技术的深度融合,实现轨道交通系统朝着更加高效、更加智能、更加可持续的方向发展。

参考文献

- [1] 吕刚. 直线电机在轨道交通中的应用与关键技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5665-5675.
- [2] 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(3): 455-474.
- [3] 刘继宗, 张祖涛, 王浩, 等. 城轨交通制动能量利用技术研究现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(6): 1322-1345.
- [4] 许爱国, 谢少军, 姚远, 等. 基于超级电容的城市轨道交通车辆再生制动能量吸收系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 117-123.
- [5] 夏欢, 杨中平, 杨志鸿, 等. 基于列车运行状态的城轨超级电容储能装置控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 16-23.
- [6] 陈德旺, 唐涛, 郜春海, 等. 城轨列车在车站停车误差估计模型与在线学习算法的研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(6): 122-127.
- [7] 董海荣, 高冰, 宁滨, 等. 基于模糊 PID 软切换控制的列车自动驾驶系统调速制动[J]. 控制与决策, 2010, 25(5): 794-796.
- [8] 任林杰, 范多旺, 杨军霞. 基于 GA 优化模糊 PID 控制的 ATO 算法研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(2): 127-130.
- [9] 杨俭, 李发扬, 宋瑞刚, 等. 城市轨道交通车辆制动能量回收技术现状及研究进展[J]. 铁道学报, 2011, 33(2): 26-33.