

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.04.016

多系统融合的城轨列车制动 减速度闭环控制方法

夏夕盛¹, 杨利军¹, 刘宏杰², 唐涛³, 李洋¹, 余浩旻¹(1. 米塔盒子科技有限公司, 北京 100071; 2. 北京交通大学自动化与智能学院, 北京 100044;
3. 北京交通大学先进轨道交通自主运行全国重点实验室, 北京 100044)

摘要: 针对列车自主运行与虚拟编组新型运行制式快速发展背景下, 传统列车车辆系统与车载信号系统独立设计、车辆侧采用分布式控制架构, 导致的列车自动驾驶(automatic train operation, ATO)控车链路冗长、响应延迟大及控制精度低等工程问题, 提出一种多系统融合的列车减速度闭环控制方法。首先, 搭建集成车辆控制与信号控制功能的一体化软硬件平台, 构建多系统融合控制架构; 其次, 基于该平台对列车自动驾驶控制全过程进行功能重分配, 深度融合 ATO 控车调控、牵引/制动力协同分配、闭环反馈控制等核心环节, 重构控制闭环; 最后, 通过实车试验对所提方法的控制性能进行验证。测试结果表明: 相较于传统分布式列车控制系统, 融合控制系统在多个工况下控车效果均得到提升, 融合控制系统 ATO 控车模式控制精度提升 35%, 响应延时缩短 25%; 纯电制动工况下控制精度提升 70%、响应延时缩短 20%; 电空混合制动工况下控制精度提升 30%, 响应延时缩短 14%。该多系统融合控制架构可有效改善列车制动平稳性, 提升停车控制精度, 为列车智能化、自主化安全高效运行提供重要的技术支撑。

关键词: 轨道交通; 融合控制系统; 车辆与信号融合; 车辆多专业融合; 精确停车; 闭环控制

中图分类号: U231.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)04-0141-06

Closed-Loop Control Method for Braking Deceleration of Urban Rail Trains Based on Multi-System Fusion

Xia Xisheng¹, Yang Lijun¹, Liu Hongjie², Tang Tao³, Li Yang¹, Yu Haoyang¹

(1. Meta Box Technology Co., Ltd., Beijing 100071; 2. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044; 3. National Key Laboratory of Advanced Rail Transit Autonomous Operation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: Against the background of the rapid development of autonomous train operation and virtual coupling, the traditional independent design of vehicle and signaling systems and the distributed control system adopted on the vehicle side have led to problems such as lengthy on-board Automatic Train Operation (ATO) control links, large response delays, and low control accuracy. This paper proposes a multi-system fusion-based closed-loop control method for train braking deceleration. Firstly, an integrated hardware and software platform integrating vehicle control and signaling control functions is established to construct a multi-system fusion control architecture. secondly, based on this platform, the functional redistribution of the entire process of train automatic operation control is carried out, and the core links such as ATO control, traction/braking force collaborative distribution, and closed-loop feedback control are deeply integrated to reconstruct the control closed-loop; Finally, on-vehicle tests are conducted to verify the control performance of the proposed method. The test results show that, compared with the traditional distributed train control system, the control accuracy under ATO mode is increased by 35% with

收稿日期: 2025-12-23 修回日期: 2026-03-12

第一作者: 夏夕盛, 男, 硕士, 正高级工程师, 从事轨道交通信号与车辆技术研发, xisheng.xia@bj-tct.com

通信作者: 刘宏杰, 男, 博士, 研究员, 研究方向为列控系统设计与集成与优化, hjiu2@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(52372310, U2569210); 北京市自然科学基金(L251056)

引用格式: 夏夕盛, 杨利军, 刘宏杰, 等. 多系统融合的城轨列车制动减速度闭环控制方法[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(4): 141-146.

a 25% reduction in response delay; the accuracy of pure electric braking is improved by 70% with a 20% delay reduction; and the accuracy of electro-pneumatic blended braking is raised by 30% with a 14% delay reduction. The integrated architecture effectively improves train braking stability and stopping accuracy, providing critical technical support for the safe and efficient intelligent and autonomous operation of trains.

Keywords: rail transit; fusion control system; vehicle–signaling system fusion; multi-disciplinary integration of vehicles; precision parking; closed-loop control

在现代化强国和交通强国建设中,城市轨道交通已由高速发展转变为高质量、可持续发展。2024年6月,中国城市轨道交通协会发布《融合城轨发展指南》^[1],指出城轨装备融合发展的核心内涵是“系统融合”,将两个及以上的业务子系统整合为一个有机整体,能够实现资源的共享与协同,提升整个城轨系统的运输效率、服务质量和安全可靠性能。

传统城市轨道交通列车车辆专业与信号专业互相独立,数据共享程度低,信号系统无法直接控制牵引和制动,控车能力受限、精度不足^[2-4]。车辆采用分布式控制系统架构,各子系统如列车网络控制系统(train control and management system, TCMS)、牵引、制动相对独立,通过列车网络与硬线交互协同。采用该架构会导致硬件冗余、通信与线缆复杂、集成度低,进而引发系统动态响应迟缓、可维护性差等问题^[5]。

目前基于融合承载的列车控制系统已经成为行业发展的趋势,国内厂商已经开展相关技术研究。跨坐式单轨采用车辆与信号设备共享、电气接口优化和通信接口优化提高停站精度、起停舒适性和节能效率^[6]。青岛地铁6号线项目中提出一种信号和车辆的融合技术,融合中央控制单元(onboard control unit, OCU)代替传统系统中ATO和中央控制单元(central control unit, CCU)控制功能^[7]。此外,业界针对融合控制技术展开探索,提出了多种车辆与信号融合设计、车辆以太网多网融合、多专业融合智能运维等方案^[8-11]。受限于整车架构,既有研究未能打破车辆与信号专业界限以及车辆各子系统界限,不能真正将ATO、TCMS、牵引、制动进行深度融合。本文聚焦控制性能优化,通过车辆与信号的数据共享和功能重分配,削减系统冗余、降低架构复杂度,实现智能列车平台和系统架构的统一设计,有效增强列车动态性能,提升精准控制水平。

1 多系统融合控制架构设计

多系统融合控制架构采用“软件定义列车”的设计理念,如图1所示,旨在构建信号与车辆深度融合、车辆各子系统深度融合的一体化整车控制系统。

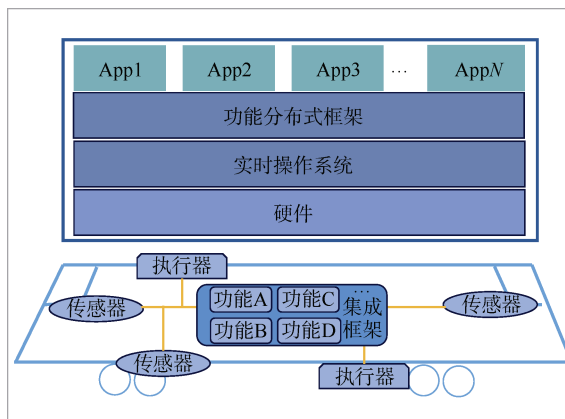


图1 融合控制系统设计框架

Figure 1 Design concept of fusion control system

融合系统可分为3层:控制层采用符合安全完整性等级(safety integrity level, SIL)为2级的主备冗余安全计算机平台,基于多业务融合承载框架,将TCMS、ATO、制动控制单元(brake control unit, BCU)、牵引控制单元(traction control unit, TCU)列车级控制功能(仅SIL2及以下功能)以软件应用(App)形式集成,实现软硬件解耦。网络层基于时间敏感网络(time-sensitive networking, TSN)协议组建双冗余环网,综合承载控车、维护等数据,并通过为控车数据设定最高传输优先级,保障其确定性与低时延。执行层包括牵引、制动等具体执行单元及车辆硬线电路。该系统简称为融合控制系统,按照车辆编组典型配置的系统架构如图2所示,包括半动半拖带驾驶室车(trailer motor with cab, TMc)、动车(motor car, M)和带受电弓动车(motor car with pantograph, Mp)。

基于多系统融合控制架构,整车从分布式控制转为中央集中控制,列车级融合控制主机是整车的大脑,牵引、制动和驱采单元成为列车的执行单元。融合控制主机和执行单元之间的关系变成直接的指令-执行关系。

2 控制功能重分配与闭环优化

2.1 传统控制流程及问题分析

传统架构下,典型的列车驾驶过程为ATO或驾驶

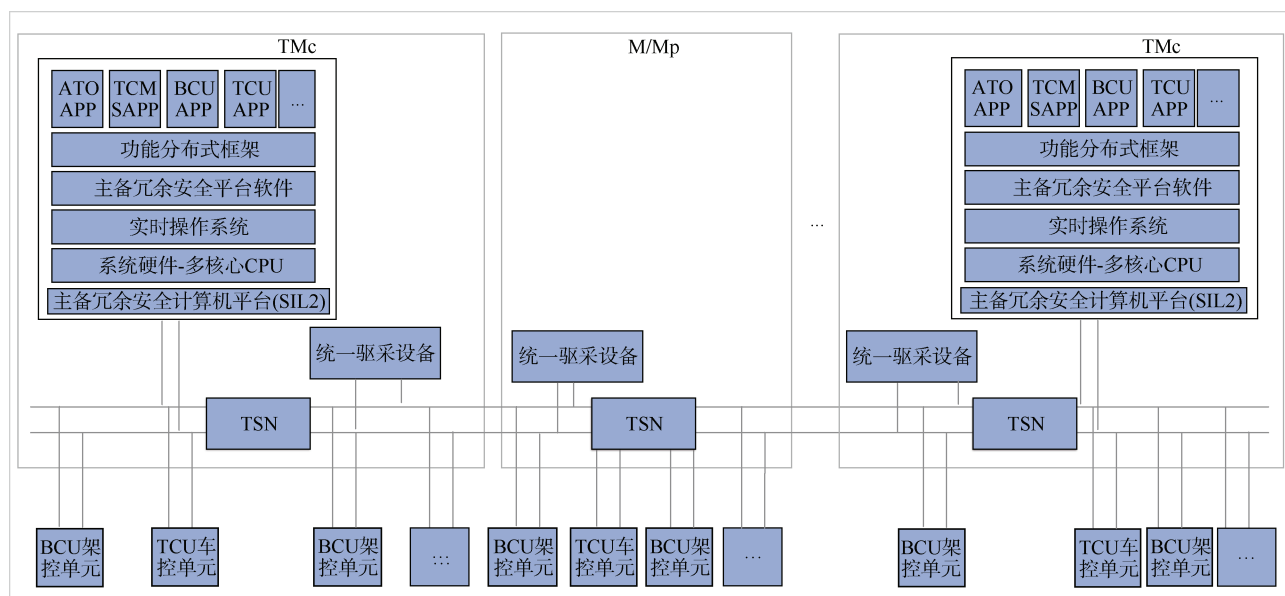


图2 多系统融合控制架构

Figure 2 Multi-system fusion control architecture

台手柄发出制动指令和级位至 TCMS, TCMS 收集各车电制动能力值并计算总制动力, 并根据电制动优先的原则分配电制动力, 同时转发总制动力和电制动实际值给制动系统, 由制动系统进行整车制动力的补偿, 制动系统根据总制动力需求和电制动实际值计算总空气制动力新需求, 并分配给制动执行单元。列车驾驶传统控制流程如图 3 所示。此控制方式存在以下两方面问题: 一方面制动力分配数据流复杂, 从 ATO 发出指令到制动指令实施并满足指令需求的传输延迟较大; 另一方面制动力的补足由 BCU 保证, 由于空气制动的精度所限, 实际整车的制动力与需求匹配精度不足。

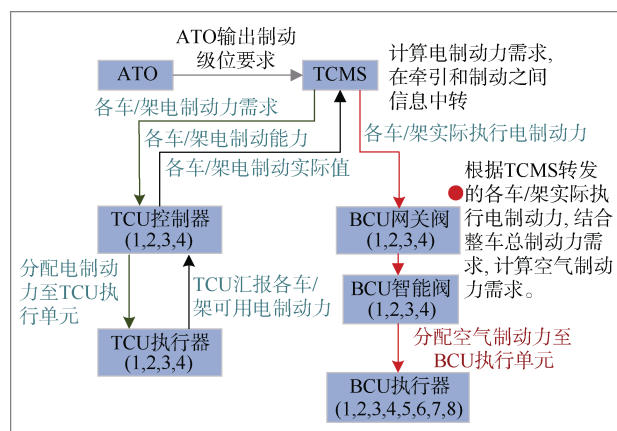


图3 基于传统架构的列车控制数据流

Figure 3 Train control data flow based on the traditional architecture

2.2 控制功能重分配方法

融合控制系统将 TCMS、ATO、列车级牵引与制动等控制功能以软件应用(App)形式集成在主机上。为了实现列车运行控制最优的精准度和实时性, 根据列车动态特性和运行任务, 重新进行功能分配, 使得 ATO 自动驾驶时, 从发出指令到架控制动单元和车控牵引单元执行指令完全在一个微周期内完成, 大大缩短了系统指令传输时间。

功能重分配方案如图 4 所示, 包括 ATO 功能(计算列车运行速度、推荐速度、目标加速度)、TCMS 功能(监督电制动力实际发挥值、监督空气制动力实际发挥值)、制动功能(计算列车载荷、总制动力、分配电空制动力给牵引和制动、分配空气制动力给制动)及牵引功能(分配电制动力给牵引)。

按此原则将牵引、制动列车级控制功能上移至融合控制主机后, 牵引本地单元和制动本地单元变为执行单元, 牵引本地单元根据牵引力和电制动力需求执行, 制动本地单元根据空气制动力需求执行, 基于融合控制的列车控制流程如图 5 所示。

2.3 减速度闭环控制算法

基于融合控制架构, 融合控制系统将列车控制功能全部集中到融合控制主机, 基于图 5 的流程设计本算法, 主要目标是根据 ATO 计算的目标减速度指令, 动态协调电制动与空气制动, 实现高精度、高舒适性的减速度跟踪, 并确保在精确停车关键场景下, 制动力分配具备充足的调节裕度和快速响应能力。

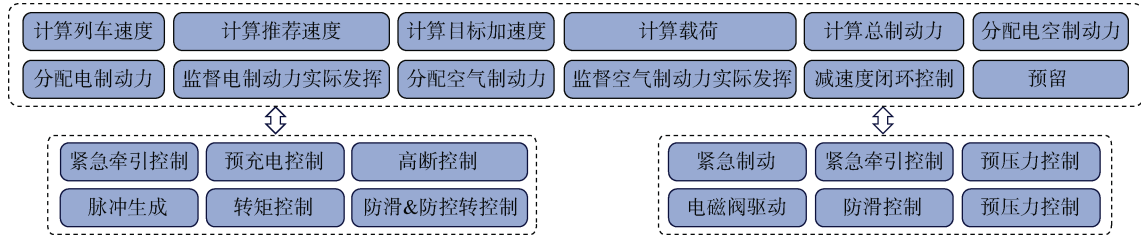


图 4 功能重分配方案

Figure 4 Function reallocation scheme

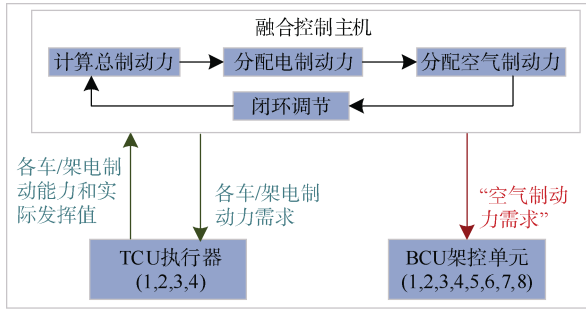


图 5 基于融合控制的列车控制数据流

Figure 5 Train control data flow based on fusion control

1) 算法输入。

目标需求：综合列车自动驾驶曲线和车辆载荷、电制动、空气制动能力的目标制动力 F_{total} 和目标减速度 a_{target} ；

车辆状态：当前速度 V ；

反馈信号：列车实际减速度 a_{actual} ；

模式标志：精确停车阶段标志 $\text{Flag}_{\text{precision}}$ ；

2) 算法输出。

执行指令：电制动力需求值 $F_{\text{brake_req}}$ ；空气制动力需求 $F_{\text{abrake_req}}$ ；

状态反馈：制动力分配状态(如“电制动主导”、“电空混合”)。

3) 算法核心步骤与数学模型。

算法以固定周期(100 ms)运行，其核心是一个包含前馈分配、反馈调节与动态能力评估的闭环决策过程，具体分为 4 个步骤。

步骤 1：目标制动力前馈计算与反馈修正。ATO 根据移动授权与驾驶曲线生成目标减速度 a_{target} 。总需求制动力 F_{total} 由牛顿第二定律计算，表达式为

$$F_{\text{total}} = M \cdot a_{\text{target}} + F_{\text{resistance}}(V) \quad (1)$$

式中， M 为列车等效质量； $F_{\text{resistance}}(V)$ 为当前速度下的基本运行阻力。同时，算法读取实际减速度 a_{actual} ，通过一个比例-积分控制器计算反馈补偿力 F_{fb} ，以消除模型误差和扰动， F_{fb} 的计算式为

$$F_{\text{fb}} = K_p \cdot e_a + K_i \cdot \int e_a dt \quad (2)$$

式中， K_p 是比例系数； K_i 是积分系数； e_a 是目标减速度与实际减速度之间的误差。

$$e_a = a_{\text{target}} - a_{\text{actual}} \quad (3)$$

用于分配的总参考制动力 F_{ref} 为

$$F_{\text{ref}} = F_{\text{total}} + F_{\text{fb}} \quad (4)$$

步骤 2：电制动力能力动态评估。电制动力矩随速度升高而增大，在低速区急剧下降。算法通过一个基于车辆特性标定的函数 $f(v)$ 来动态评估当前速度下电制动系统的最大可用能力 $A(v)$ ，表达式为

$$A(v) = f(v) \cdot T_{\text{brk_max}} \cdot \eta \quad (5)$$

式中， $T_{\text{brk_max}}$ 为电制动系统最大扭矩； η 为传动效率折算系数； $f(v)$ 是一个在区间 $[0, 1]$ 内变化的衰减函数。

步骤 3：精确停车阶段调节裕度管理。当算法判定列车进入精确停车阶段($\text{Flag}_{\text{precision}} = \text{TRUE}$)时，为应对可能出现的控制误差并保证调节的快速性，需为电制动保留一部分动态调节裕度 ΔA ， ΔA 的表达式为

$$\Delta A = \beta \cdot A(v) \quad (6)$$

式中， β 为裕度系数(如 0.15)。因此，在此阶段可用于响应 F_{ref} 的电制动力 A_{base} 为

$$A_{\text{base}} = A(v) - \Delta A \quad (7)$$

步骤 4：减速度闭环控制。通过预留电制动力进行快速调节和闭环控制，从电制动总能力 $A(v)$ 中动态预留一部分作为调节裕度 ΔA ，剩余为基础能力 A_{base} 。前馈计算的基准力 F_{total} 优先由电制动在其 A_{base} 内承担，超出部分作为空气制动的基础值。关键的反馈调节力 F_{fb} 全部优先分配给电制动，利用其毫秒级响应快速纠偏。

基于上述减速度闭环控制的分配逻辑与控制策略，为规范化实现电制动优先、动态裕度预留、反馈量快速调节的控制逻辑，进一步清晰描述该控制流程的执行逻辑，本文通过伪代码形式梳理完整执行步骤，具体如算法 1 所示。

算法 1：减速度闭环控制算法。

输入：总需求力 F_{ref} ，电制动总能力 $A(v)$ ，基础能力 A_{base} ，调节裕度 ΔA ，闭环反馈的制动力修正值 ΔF_{fb} ，精确停车标志 $\text{Flag}_{\text{precision}}$ ，当前阶段 Stage 。

输出：分配力电制动需求和空气制动力需求 $F_{\text{ebrake_req}}$ ， $F_{\text{abrake_req}}$ ，状态 Stage 。

//检查精确停车标志

1. **if** $\text{Flag}_{\text{precision}}$ **then**

2. **if** $\text{Stage} = \text{"Initial"}$ **then**

//首次分配基础电制动力和空气制动力

3. $F_{\text{ebrake_req}} \leftarrow \min(F_{\text{ref}}, A_{\text{base}})$;

4. $F_{\text{abrake_req}} \leftarrow \max(0, F_{\text{ref}} - A_{\text{base}})$;

5. $\text{Stage} \leftarrow \text{"Adjusting"}$;

6. **else**

//计算可追加的电制动力，最大为调节裕度

7. $F_{\text{add}} \leftarrow \min(\Delta F_{\text{fb}}, \Delta A)$;

//重新分配电制动力

8. $F_{\text{ebrake_req}} \leftarrow \min(F_{\text{ref}}, A_{\text{base}} + F_{\text{add}})$;

//重新分配空气制动力

9. $F_{\text{abrake_req}} \leftarrow \max(0, F_{\text{ref}} - F_{\text{ebrake_req}})$;

10. **end if**

11. **else**

//常规制动场景，优先使用全部电制动能力

12. $F_{\text{ebrake_req}} \leftarrow \min(F_{\text{ref}}, A(v))$;

13. $F_{\text{abrake_req}} \leftarrow \max(0, F_{\text{ref}} - A(v))$;

14. $\text{Stage} \leftarrow \text{"Initial"}$;

15. $\text{State} \leftarrow \text{"Normal"}$;

16. **end if**

17. **return** ($F_{\text{ebrake_req}}$, $F_{\text{air_req}}$, State , Stage);

本算法采用分阶段动态调节策略，初始分配时预留电制动能力作为高精度控制的基础，后续控制中，将目标加速度跟踪误差转化为新增的制动力需求，并优先使用预留的电制动裕度(ΔA)来满足，实现了制动响应快速调节。

3 试验验证与性能分析

融合控制系统成套装备安装到试验列车，包括安装在 TMc 车的主备冗余安全计算机、TSN 网络设备和统一驱采设备和安装在 M/Mp 车的统一驱采设备，安装在 TMc 车的设备如图 6 所示。

采用均方误差方法分析对比传统控制系统和融合控制系统的实际减速度与期望减速度偏差情况，结果

如图 7 所示。由图 7 可知：传统控制系统为 9.89 cm/s^2 ，融合控制系统为 6.39 cm/s^2 ，融合控制系统相比传统控制系统精度提升 35%；采用峰值时间差方法计算 ATO 实际减速度与期望减速度的延迟时间，融合控制系统延迟为 1 150 ms，而传统控制系统延迟为 1 550 ms，融合控制系统延迟时间缩短 25%。

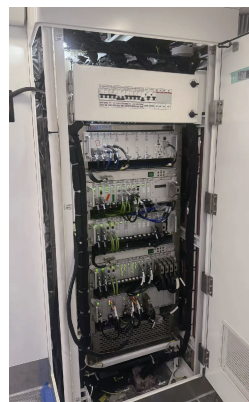


图 6 设备装车示意

Figure 6 On-vehicle equipment installation

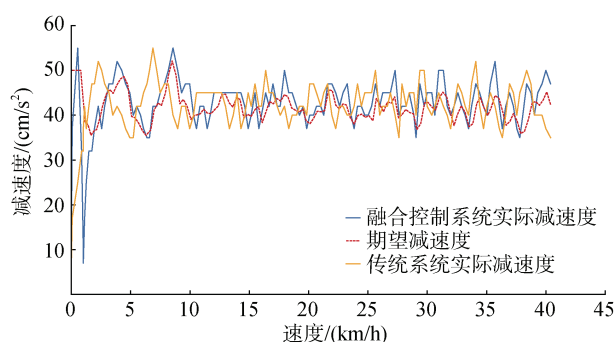


图 7 传统控制系统与融合控制系统减速度对比

Figure 7 Deceleration comparison between the traditional control system and the fusion control system

纯电制动工况下，对比传统控制系统与融合控制系统的电制动力需求与实际发挥值的偏差，结果如图 8 所示。由图 8 可知：融合控制系统平均偏差为 1.34%，平均时延为 1 150 ms；传统控制系统平均偏差为 5%，平均时延为 1 450 ms；融合控制系统精度提升 70%，延时缩短 20%。

由于线网电压不足或 AW3 载荷，列车制动会进入电空混合制动工况，在此工况下对比融合控制系统和传统控制系统的制动效果，结果如图 9 所示。由图 9 可知：采用减速度闭环控制算法的融合控制系统总制动力平均偏差为 3.46%，平均时延为 1 330 ms；传统控制系统最优平均偏差为 5%，平均时延为 1 550 ms；融合控制系统相比传统控制系统精度提升 30%，延迟

时间缩短 14%。

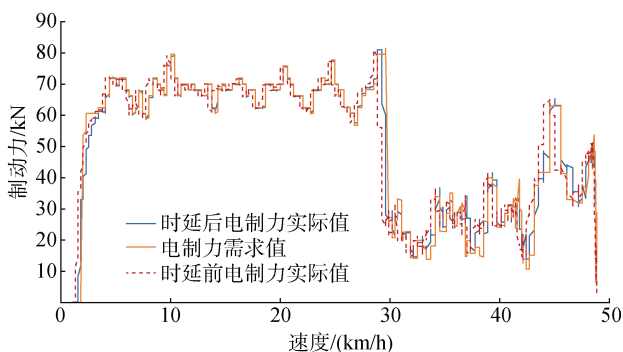


图8 电制动力精度与延时分析

Figure 8 Analysis of electric braking force accuracy and response delay

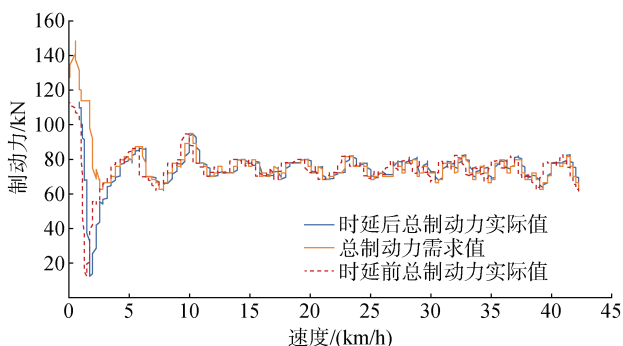


图9 电空混合制动控制精度分析

Figure 9 Analysis of control accuracy for electro-pneumatic composite braking

4 结论

本文提出一种车载信号与车辆各专业融合的系统架构,基于此架构将ATO、牵引、制动、TCMS集中承载并进行功能重分配。通过与传统控制系统控车效果对比,得出以下结论:

- 1) ATO控车时,目标减速度与时间减速度控制精度提升 35%,延时缩短 25%;
- 2) 纯电制动控车时,电制动控制精度提升 70%,延时缩短 20%;
- 3) 电空混合制动时,制动控制精度提升 30%,延时缩短 14%。

受限于测试条件,本研究的实车测试仅在特定线路开展,测试场景较为单一,未充分覆盖复杂线路及多种运营工况。因此,后续研究将重点针对各类运营线路与复杂工况展开深入探索,进一步拓展多系统融合控制系统的适用范围,提升控制方法在实际运营场景中的适配性与鲁棒性。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 2024 中国城市轨道交通融合城轨发展指南报告[R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2024.
- [2] 林业, 陈志, 卢昱昊, 等. 城市轨道交通 ATO 与 TCMS 功能融合设计[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(5): 175-178. Lin Ye, Chen Zhi, Lu Yuhao, et al. Urban rail transit ATO and TCMS function-ality integration design[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(5): 175-178.
- [3] 何玉琴, 张潜. 城市轨道交通车辆与信号主要接口问题分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(12): 119-122. He Yuqin, Zhang Qian. Analysis of key issues on interfaces between subway vehicle and signaling system[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(12): 119-122.
- [4] 任培勇. 城市轨道交通 ATO 停车精度改进分析[J]. 现代城市轨道交通, 2022(4): 36-40. Ren Peiyong. Analysis on improvement of ATO stopping accuracy of urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2022(4): 36-40.
- [5] 凌飞, 张福景, 杨天奇, 等. 基于分布式平台的 TCMS 集成设计与实现[J]. 铁道机车与动车, 2021(8): 30-33. Ling Fei, Zhang Fujing, Yang Tianqi, et al. Design and implementation of TCMS integration based on distributed platform[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2021(8): 30-33.
- [6] 张志华, 袁亮. 跨坐式单轨系统车辆与信号系统融合设计及实现方法[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 190-193. Zhang Zhihua, Yuan Liang. Fusion design and implementation of vehicle and signaling system for straddle monorail system[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 190-193.
- [7] 刘小龙, 朱今朝, 龙飞. 城市轨道交通信号与车辆融合控制技术研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(9): 71-76. Liu Xiaolong, Zhu Jinzhao, Long Fei. Research on fusion control technology of urban rail transit signal and vehicle[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(9): 71-76.
- [8] 李广斌. 城市轨道交通车辆与信号系统一体化设计研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(S2): 27-28. Li Guangbin. Integration design of urban rail transit vehicle and signaling system[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(S2): 27-28.
- [9] 阎晓晖, 陈慧琳. 城市轨道交通信号与车辆融合控制技术研究[J]. 车时代, 2024(5): 19-21.
- [10] 丛培鹏, 陈龙, 张朋. 轨道交通车辆以太网多网融合研究与应用[J]. 智慧轨道交通, 2023, 60(6): 67-74. Cong Peipeng, Chen Long, Zhang Peng. Study and application of multi-network integration in Ethernet for rail vehicles[J]. Smart Rail Transit, 2023, 60(6): 67-74.
- [11] 洪海珠. 城市轨道交通多专业融合主动维修决策关键技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(12): 262-265. Hong Haizhu. Key technologies for multi-disciplinary fused proactive maintenance decision-making in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(12): 262-265.

(编辑: 王艳菊)