

基于磁轨制动摩擦特性的有轨电车 紧急制动控制优化方法

吴明赵 吴佳楠 吴慧鹏 薛彬 张路

(南京中车浦镇海泰制动设备有限公司, 210084, 南京)

摘要 [目的] 有轨电车在紧急制动过程中易受磁轨制动特性的影响。随着列车载荷和列车运行速度的变化, 有轨电车的瞬时减速度有较大波动。在列车低速运行阶段, 其减速度突增尤为明显, 容易产生较大的制动冲击, 因此, 需要研究有轨电车紧急制动控制的优化方法。[方法] 通过对我国某有轨电车线开展磁轨制动试验, 研究了不同列车载荷工况、不同制动初速度工况对有轨电车磁轨制动摩擦特性的影响。对试验数据进行拟合计算, 得到了磁轨制动摩擦因数随速度变化的特征函数。基于该特征函数, 提出了有轨电车紧急制动控制的优化方法。[结果及结论] 在制动过程中, 电制动力和液压制动力之和可以根据列车载荷工况和速度工况进行实时调节。该优化方法实现了电制动、液压制动和磁轨制动 3 个制动力之和在制动过程中保持相对不变的目标, 且紧急制动瞬时减速度处于基本恒定的状态。该优化方法还有效解决了紧急制动瞬时减速度波动较大、列车低速制动时纵向制动冲击率偏高等问题。

关键词 有轨电车; 紧急制动控制; 磁轨制动摩擦特性

中图分类号 U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.036

Tram Emergency Braking Control Optimization Method Based on Magnetic Rail Braking Friction Characteristics

WU Mingzhao, WU Jianan, WU Huipeng, XUE Bin, ZHANG Lu

(CRRC Nanjing Puzhen Haitai Brake Equipment Co., Ltd., 210084, Nanjing, China)

Abstract [Objective] The emergency braking of trams is significantly vulnerable to the characteristics of magnetic rail braking. With changes in train load and train operating speed, the instantaneous deceleration of trams can fluctuate greatly. At low operating speed stage, the instantaneous deceleration of trams is prominent, which can cause substantial braking impact. Therefore, it is necessary to investigate an optimized emergency braking control method for trams. [Method] Through magnetic rail braking tests conducted on a specific tram line in China, the impact of various train load conditions

and initial braking speeds on the magnetic rail braking friction characteristics of trams is examined. By fitting the test data, a characteristic function describing the variation of magnetic rail braking friction coefficient with speed is obtained. Based on this function, an optimized emergency braking control method for trams is proposed. [Result & Conclusion] During braking, the sum of the electric and hydraulic braking forces can be adjusted in real time according to the load and speed conditions of the train. This optimization method ensures that the combined braking force of electric, hydraulic, and magnetic rail braking remains relatively stable throughout the braking process, and the instantaneous deceleration during emergency braking remains constant. The method also effectively mitigates issues such as large fluctuations in instantaneous deceleration during emergency braking and excessive longitudinal braking impact at low train operating speed.

Key words tram; emergency braking control; magnetic rail braking friction characteristics

有轨电车具有常用制动、紧急制动及安全制动等功能。紧急制动是保护列车、乘客及行人安全的一种重要手段, 相比常用制动和安全制动, 紧急制动下有轨电车的制动距离最短。由于受磁轨制动摩擦特性变化的影响, 有轨电车往往存在着紧急制动瞬时减速度 a_m 波动较大、停车阶段纵向制动冲击较大等问题。

我国对有轨电车紧急制动控制和磁轨制动摩擦特性的研究较少。文献[1]关注了磁轨制动对轨道温升、轮轨间黏着系数的影响; 文献[2]中, 国外制动设备厂家针对波兰市郊客运列车制动闸片和制动盘间摩擦因数存在波动的问题, 提出了基于实际减速度和目标值偏差来实时调整制动压力的紧急制动优化控制策略; 文献[3]基于电制动特性, 提出了有轨电车随速度变化的减速度控制设计方案。本文基于磁轨制动摩擦特性, 对有轨电车的紧急制动控制方法进行优化。

1 有轨电车紧急制动介绍

我国有轨电车制动系统的设计主要遵循 CJ/T 417—2022《低地板有轨电车车辆通用技术条件》，并参考欧洲标准 EN 13452-1: 2003 *Railway applications-Braking-Mass transit brake systems-Part 1: Performance requirements* 的要求。这 2 个标准对有轨电车紧急制动性能的要求如表 1 所示^[4-5]。由表 1 可知: 2 个标准对有轨电车制动初始阶段的冲动限制有明确的要求, 但是对紧急制动期间有轨电车 a_{in} 变化并无明确要求。

表 1 2 个标准对有轨电车紧急制动性能的要求

Tab.1 Requirements for tram emergency braking performance in the two related standards

标准编号	减速度/ (m/s^2)	$a_{in}/$ (m/s^2)	紧急制动 最大响应 时间/s	初始阶段的 最大冲动限制/ (m/s^3)
EN 13452-1: 2003	≥ 2.80	≤ 5	≤ 0.85	≤ 8
CJ/T 417—2022	≥ 2.25		≤ 0.85	≤ 8

注: EN 13452-1: 2003 的减速度是等效值; CJ/T 417—2022 的减速度是平均值。

为满足制动距离或减速度的要求, 有轨电车紧急制动一般由 3 种制动方式(电制动、液压制动及磁轨制动)共同作用; 有轨电车紧急制动时, 按照牵引电机的最大能力施加电制动力; 液压制动则是对整车所需施加液压制动力和电制动力之和的不足部分进行实时补充; 磁轨制动作为相对独立的制动方式, 由车辆电气回路直接驱动, 磁轨制动器内线圈励磁后产生吸力, 使磁轨制动器与轨面摩擦产生制动力。

紧急制动过程中, 磁轨制动力 F_{MTB} 具有不可控的特性^[6-8]。因此, 有轨电车在紧急制动过程中存在 2 个方面问题: ① 在不同载荷或列车运行速度 v 下, 存在 a_{in} 波动较大且实际减速度 a_{act} 与设计减速度 a_e 不一致的现象。② 紧急制动时, 低速区段减速度突增现象明显, 容易产生较大的制动冲击。

以我国某有轨电车线为例, 该有轨电车在 AW0 (空载)、AW2 (额定载荷, 满座 + 6 人/ m^2)、AW3 (超常载荷, 满座 + 9 人/ m^2) 3 种载荷工况下的 a_{in} - v 曲线如图 1 所示。

2 磁轨制动摩擦特性试验研究

为解决上述问题, 仍以上文的有轨电车线路为

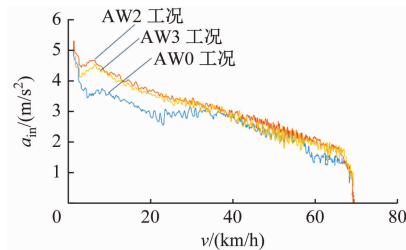


图 1 3 种载荷工况下的 a_{in} - v 曲线

Fig. 1 a_{in} - v curves under three load working conditions

研究对象, 开展了磁轨制动专项试验(即在平直干燥轨道条件下仅施加磁轨制动), 重点研究不同载荷工况和不同制动初速度 v_0 下磁轨制动摩擦特性的变化规律。

2.1 不同载荷工况下的磁轨制动试验结果分析

该线有轨电车采用两模块三转向架编组方式, AW0、AW2、AW3 工况下列车的质量分别为 41.0 t、48.9 t、51.1 t。磁轨制动器数量为 2 套/架。试验有轨电车的 v_0 取 70 km/h, 取 AW0、AW2、AW3 工况, 分别进行了磁轨制动试验。设磁轨制动减速度为 a , 3 种载荷工况下的 a - v 曲线如图 2 所示。

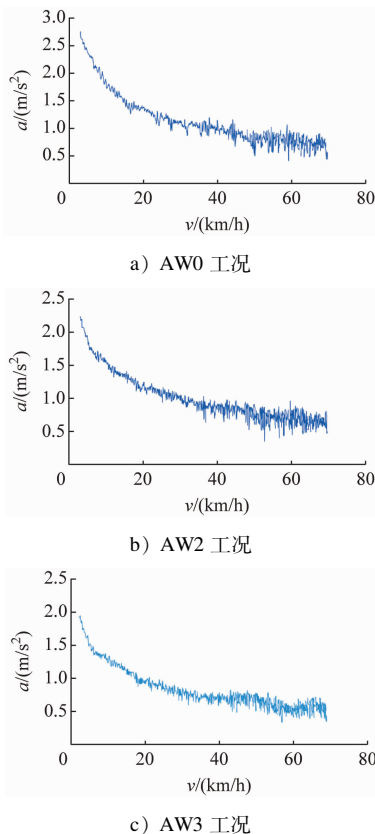


图 2 3 种载荷工况下的 a - v 曲线

Fig. 2 a - v curves under three load working conditions

根据图 2 实测的 a - v 曲线, 可推算出各载荷工

况下的 F_{MTB} 。对 F_{MTB} 进行数据拟合处理,得到 3 种载荷工况下的 $F_{MTB}-v$ 拟合曲线,如图 3 所示。由图 3 可知:3 种载荷工况下磁轨制动摩擦性能差异不大,拟合曲线的变化趋势一致,可以忽略载荷变化对磁轨制动摩擦特性的影响。

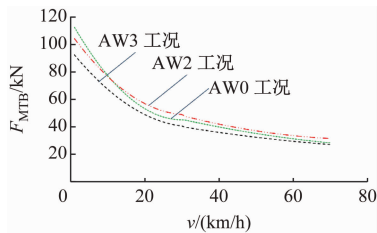


图 3 3 种载荷工况下的 $F_{MTB}-v$ 拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of $F_{MTB}-v$ under three load working conditions

2.2 不同 v_0 下磁轨制动试验结果分析

试验有轨电车在 AW0 载荷工况下, v_0 取 6 种初速度工况 (20 km/h、30 km/h、40 km/h、50 km/h、60 km/h、70 km/h) 进行磁轨制动试验。6 种初速度工况下的 $a-v$ 曲线如图 4 所示。由图 4 可知:不同 v_0 下的减速度曲线基本重合,减速度变化规律一致,这说明不同 v_0 下的磁轨制动摩擦特性差异较小,可以忽略 v_0 取值差异对磁轨制动摩擦特性的影响。

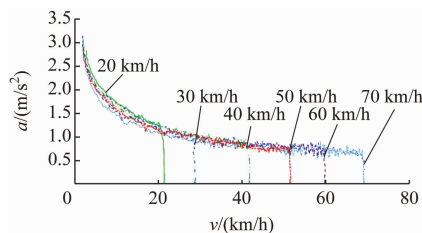


图 4 6 种初速度工况下的 $a-v$ 曲线

Fig. 4 $a-v$ curves under six initial speed working conditions

3 有轨电车紧急制动控制方法优化

3.1 既有紧急制动控制方法

紧急制动由电制动、液压制动和磁轨制动 3 种制动方式共同作用,因此,有轨电车紧急制动 3 种制动方式的制动力之和 F_{tot} 的计算式为:

$$F_{tot} = F_{ED} + F_{EH} + F_{MTB} \quad (1)$$

式中:

F_{ED} ——电制动力;

F_{EH} ——液压制动力;

F_{MTB} ——磁轨制动力。

磁轨制动由有轨电车的电气控制回路触发,

EBCU(电子制动控制单元)并不参与磁轨制动控制。我国有轨电车紧急制动普遍采用电制动与液压制动混合的控制方式,即 EBCU 仅负责电制动和液压制动之间的制动力配合控制,在电制动力不足时补充施加液压制动力。电制动力和液压制动力之和 F_1 、 F_{tot} 、 F_{MTB} 三者的关系式为:

$$F_1 = F_{tot} - F_{MTB} \quad (2)$$

为满足紧急制动减速度的要求,在计算 F_1 时,国内外普遍采用的算法有 2 种:

$$F_1 = F_{tot} - F_0 = Ma_e - nF_{吸}\mu_0 \quad (3)$$

$$F_1 = M(a_e - a_{MTB}) \quad (4)$$

式中:

F_0 ——在紧急制动时 F_{MTB} 随 v 变化按照恒定不变简化处理后的制动力;

M ——试验列车的质量(含列车载荷);

a_e ——紧急制动设计减速度;

n ——磁轨制动器配置数量;

$F_{吸}$ ——磁轨制动器与轨道间的吸附力;

μ_0 ——磁轨制动摩擦因数;

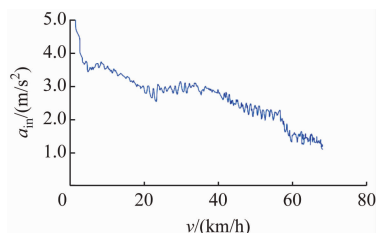
a_{MTB} —— F_{MTB} 在 AW3 工况下的等效减速度。

式(3)、式(4)中,试验车在 AW0、AW2 和 AW3 工况下的 M 值上文已有说明; $F_{吸}$ 与磁轨制动器结构有关,约为 70 kN; a_e 约为 2.8 m/s^2 ;为保证有轨电车紧急制动设计指标, μ_0 一般取速度区间的较低值(即 $v_0 = 70 \text{ km/h}$ 时等效的 μ_0), $\mu_0 = 0.095$; a_{MTB} 可由 $v_0 = 70 \text{ km/h}$ 时等效的 F_{MTB} 计算得出, $a_{MTB} = 0.76 \text{ m/s}^2$ 。

由式(3)和式(4)可看出:既有的紧急制动控制方式较为简单,对软件的控制功能要求也相对较低。这种控制方式会带来以下 2 个问题:

1) 在 $v_0 < 70 \text{ km/h}$ 下施加紧急制动时,由于 μ_0 随着 v 的减少而增大,实际的磁轨制动力 $F_{MTB,act}$ 大于 $v_0 = 70 \text{ km/h}$ 下的 F_0 。EBCU 若仍按照 F_0 进行电制动和液压制动的混合计算,则实际的 3 种制动方式制动力之和 $F_{tot,act} = (F_{MTB,act} - F_0 + F_{tot})$, $F_{tot,act}$ 大于理论的 F_{tot} ,这会导致紧急制动的实际减速度 a_{act} 比 a_e 大。列车载荷越小, a_{act} 与 a_e 的偏差越大。

2) 在紧急制动过程中, F_{MTB} 并非恒定不变, a_{in} 会随着 v 的减少而增大, AW0 工况下的 $a_{in}-v$ 曲线如图 5 所示。由图 5 可知:在列车的低速阶段,减速度的突增尤为明显。因此,低速阶段极易造成制动冲击过大问题,严重时甚至会导致乘客摔伤。

图5 AW0 工况下的 a_{in} - v 曲线Fig. 5 a_{in} - v curve under AW0 load working condition

3.2 紧急制动控制方法优化方案

针对既有紧急制动控制方法存在的问题,如果紧急制动控制过程中不把式(3)中的 μ_0 按照固定值处理,而是根据磁轨制动实际摩擦特性对 μ_0 进行修正, F_1 也随之动态调整,则列车 a_{act} 变化将相对平缓。

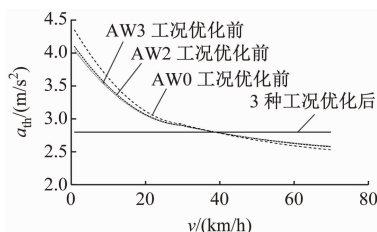
基于试验有轨电车磁轨制动摩擦特性试验情况,可以通过多段速度值拟合得到磁轨制动瞬时摩擦因数 $\mu(v)$ 与 v 的关系式。本文以 $v=30$ km/h为界,将 v 分为2个区间, $\mu(v)$ 的计算式为:

$$\mu(v) = \begin{cases} 0.0030v^2 - 0.6274v + 56.153, & v > 30 \text{ km/h} \\ 0.0504v^2 - 3.3605v + 95.943, & v \leq 30 \text{ km/h} \end{cases} \quad (5)$$

优化后 F_1 的计算式为:

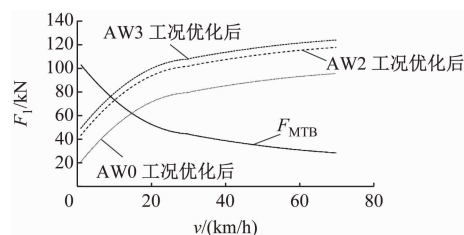
$$F_1 = Ma_e - nF_{吸} \mu(v) \quad (6)$$

由于 $\mu(v)$ 为 v 的关联函数,在整个制动过程中 F_1 随着 v 的减少逐渐减小,而非固定不变。算法优化后,实现了紧急制动理论减速度 a_{th} 基本处于恒定值状态,且数值接近 a_e 。3种载荷工况下优化前后的 a_{th} - v 曲线对比如图6所示。

图6 3种载荷工况下优化前后的 a_{th} - v 曲线对比Fig. 6 Comparison diagram of a_{th} - v curves under three load working conditions before and after optimization

3种载荷工况优化后的 F_1 - v 曲线如图7所示。由图7可知:优化后 F_1 不再是固定不变的,随着 v 的减小, F_1 逐渐减小。列车紧急制动时,在整个速度区间内 F_{tot} 保持相对一致,从而使 a_{in} 处于基本恒定状态,改善了不同载荷工况下减速度不一致及低

速区段制动冲击过大等问题。

图7 3种载荷工况下优化后的 F_1 - v 曲线Fig. 7 F_1 - v curves under three load working conditions after optimization

4 结语

在不同的载荷工况及制动初速度下,有轨电车磁轨制动器的摩擦特性差异较小且变化趋势相对一致,紧急制动控制时可以忽略二者对磁轨制动器瞬时摩擦因数的影响。本文提出的基于磁轨制动摩擦特性的紧急制动控制优化方法,可以改善有轨电车在不同载荷工况下紧急制动瞬时减速度不一致问题,同时也降低了列车低速运行时的制动冲击率。后续还需要进一步开展紧急制动控制优化方案的现车试验测试工作,通过对现车试验数据进行分析,进一步评估或优化其控制效果。

参考文献

- [1] 李培署,王明星,张笑慰. 浅谈磁轨制动对轮轨黏着的影响[J]. 铁道车辆, 2022, 60(4): 26.
LI Peishu, WANG Mingxing, ZHANG Xiaowei. Influence of magnetic rail brake on wheel rail adhesion[J]. Rolling Stock, 2022, 60(4): 26.
- [2] 苏靖棋. 列车减速度控制技术[J]. 现代城市轨道交通, 2020(7): 118.
SU Jingqi. Train deceleration control technology[J]. Modern Urban Transit, 2020(7): 118.
- [3] 王红旗,蒋红果,吴明赵. 有轨电车液压制动系统制动指令减速度模式设计[J]. 铁道车辆, 2020, 58(10): 22.
WANG Hongqi, JIANG Hongguo, WU Mingzhao. Design of deceleration mode of braking command from hydraulic brake system for trams[J]. Rolling Stock, 2020, 58(10): 22.
- [4] European Committee for Standardization. Railway applications - Braking - Mass transit brake systems - Part 1: performance requirements: BS EN 13452-1: 2003 [S]. London: British Standards Institution, 2003: 19.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 低地板有轨电车车辆通用技术条件: CJ/T 417—2022 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2022: 5.

(下转第200页)

4 结语

现代无轨电车采用多编组设计,通过铰接模块连接,显著降低了列车的转弯半径。为实现这一目标,设计了车端转角液压装置,以限制车辆不必要的自由度。在转弯过程中,该装置利用各车厢间夹角变化率的相互关联,通过液压杆的伸缩运动直接调控各车厢间的横摆加速度协调性,从而确保了车辆转弯时的稳态表现,提升了转向性能。在动力学控制层面,这一设计增强了无轨电车横摆运动控制的冗余度与精确度。

参考文献

- [1] 孙帮成,王文军,刘志明,等. 基于全轮差动转向的虚拟轨道汽车列车设计[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(6): 67.
SUN Bangcheng, WANG Wenjun, LIU Zhiming, et al. Design of the virtual-rail train-like vehicle based on all-wheel differential steering[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(6): 67.
- [2] 王益群,高殿荣. 液压工程师技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [3] 刘少君. 多轴车辆第三轴电控液压转向系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- LIU Shaojun. Research on the third axle electronic control hydraulic steering system of multi-axle vehicle[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [4] 王琦. 组合型液压阻尼元件的结构优化及特性仿真[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- WANG Qi. Structure optimization and characteristic simulation of combined hydraulic damping element[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.
- 收稿日期:2022-12-04 修回日期:2023-01-11 出版日期:2025-03-10
Received:2022-12-04 Revised:2023-01-11 Published:2025-03-10
• 第一作者:李化明,高级工程师,huaming3655@126.com
通信作者:王利,讲师,249778207@99.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- (上接第 195 页)
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. General technical specifications for low floor tramcar: CJ/T 417—2022[S]. Beijing: China Planning Press, 2022;5.
- [6] 李祥瑞,郝保磊. 电磁轨道制动器在低地板有轨电车上的应用[J]. 铁道车辆, 2017, 55(6): 16.
LI Xiangrui, HAO Baolei. Application of the electromagnetic track brake on tram car with low floor[J]. Rolling Stock, 2017, 55(6): 16.
- [7] 张晓杰. 100% 低地板有轨电车制动控制策略[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(增刊 2): 75.
ZHANG Xiaojie. Brake control strategy for 100% low-floor tram

- [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(S2): 75.
- [8] 张龙飞. 低地板有轨电车制动系统性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- ZHANG Longfei. Study on braking system performance of low-floor tram[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- 收稿日期:2024-02-02 修回日期:2024-03-25 出版日期:2025-03-10
Received:2024-02-02 Revised:2024-03-25 Published:2025-03-10
• 通信作者:吴明赵,高级工程师,mzvu1984@163.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

