

基于 TCMS(列车控制与管理系统)的 有轨电车整车制动力管理策略

许杰¹ 杨川² 马玄³

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司电气研发部, 130062, 长春; 2. 中车长春轨道客车股份有限公司转向架研究部, 130062, 长春; 3. 中车长春轨道客车股份有限公司科技管理部, 130062, 长春)

摘要 [目的] 有轨电车对制动性能和可靠性的要求较高,但其无法实现整车制动力的统一分配和管理,因此有必要研究基于 TCMS(列车控制与管理系统)的有轨电车整车制动力管理策略。[方法] 介绍了有轨电车制动控制系统的设计,包括制动系统配置、制动模式、交互数据信息;基于 TCMS 的整车制动控制策略,提出了包括采集列车运行速度及载荷方法、制动控制策略及优化方法。[结果及结论] 优化后的制动控制策略能够实现制动能力最大化,有效提高了有轨电车的制动效率与列车制动过程中的平稳性,能够提升乘客的乘坐舒适度,实现整车电制动力的最优化管理。

关键词 有轨电车; 制动控制策略; 列车控制与管理系统
中图分类号 U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.052

Tram Whole-Train Braking Force Management Strategy Based on TCMS

XU Jie¹, YANG Chuan², MA Xuan³

(1. Electrical R&D Department, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. Bogie Research Department, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 3. Science and Technology Management Department, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

Abstract [Objective] Trams require high braking performance and reliability, but they cannot achieve unified distribution and management of the whole train's braking force. Therefore, it is necessary to study the train braking force management strategy for trams based on TCMS (train control and management system). [Method] The design of tram braking control system is introduced, including braking system configuration, braking mode, and interactive data information. A whole-train braking force control strategy based on TCMS is put forward, including methods for collecting train running speed and load, and methods for braking control strategy and optimization. [Result & Conclusion] The optimized braking control strategy can maximize braking capacity, effectively im-

prove the braking efficiency of trams, the stability during train braking and passengers' ride comfort, achieving optimal management of the vehicle's electric braking force.

Key words tram; braking control strategy; train control and management system

目前,有轨电车没有独立的路权,其制动系统频繁操作、制动距离短、制动力需求大,因此有轨电车对制动性能和可靠性的要求较高^[1]。然而,有轨电车各节车之间的制动力采用牵引及制动配合控制或独立控制的方式,无法实现整车制动力的统一分配和管理,亦无法实现制动力的最优分配^[2]。同时,若有轨电车的单车制动能力失效,会导致整车制动力分配不均衡、列车限速等问题,影响整车运行效率。

本文提出一种基于 TCMS(列车控制与管理系统)的整列列车制动管理控制策略优化方案,可有效改善制动减速度对列车整体的影响,防止列车在停车瞬间的侧滚晃动现象。同时,所提优化方案能够在不延长制动距离的基础上,提高整列车制动系统的运行效率与乘客的乘坐舒适性。本文研究可为轻型城市轨道交通列车的制动力管理策略提供借鉴与参考。

1 有轨电车制动控制系统设计

1.1 制动系统配置

有轨电车由 5 节车辆编组而成(2 动 1 拖 2 悬吊),整列列车的制动设备包括所有转向架上的电控液压摩擦式盘式制动设备、所有转向架上的磁轨制动设备和动力转向架上的电制动设备。

整列列车作为一个制动编组单元,TCMS 以驾驶模式和车辆载荷为基础信息,统筹全列列车的制动力,并进行全局制动力的分配和管理^[2],保证每

表 2 不同制动控制模式下的制动组合形式

Tab. 2 Braking combination forms under different braking control modes

制动模式	核心控制设备	制动形式		
		电制动	液压制动	磁轨制动
停放制动	VCU、硬件电路	×	√(DO1)	×
保持制动	VCU、硬件电路	×	√(DO1)	×
安全制动	VCU、磁轨制动控制单元	×	√(DO1)	√(施加范围为 100%)
紧急制动	VCU、磁轨制动控制单元	√(施加范围为 100%)	√(DO2—DO4)	√(施加范围为 100%)
常用制动	VCU	√(施加范围为 0~100%)	●(DO2—DO4)	×

注:√表示启用;●表示必要时启用;×表示不施加。

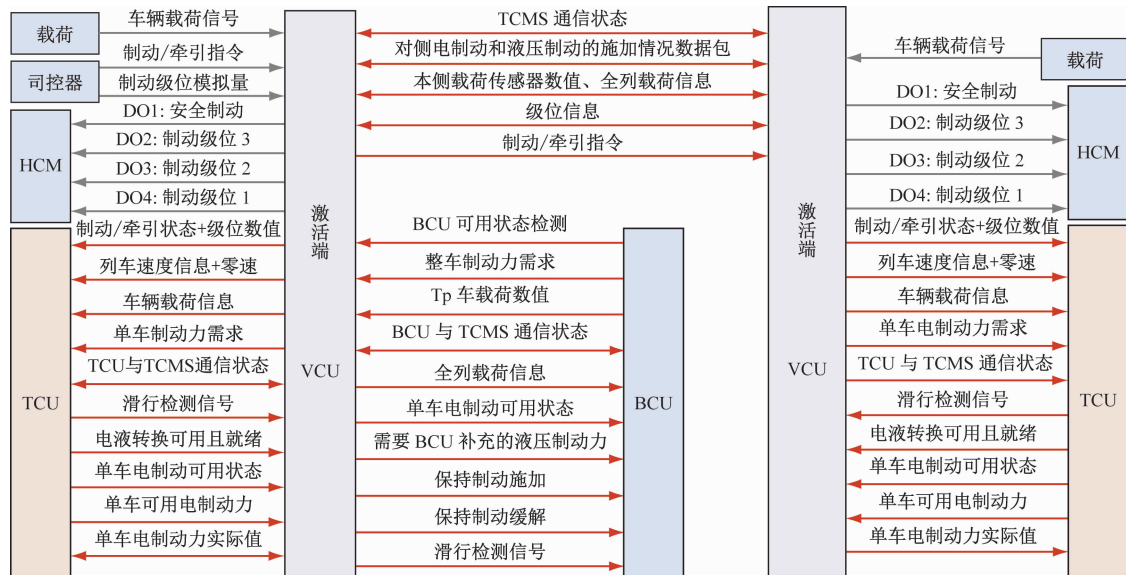


图 2 列车控制与管理、牵引及制动系统信号流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the signal flow of TCMS, traction system and braking system

2 基于 TCMS 的整车制动控制策略

制动过程中,所实施的制动力大小和动力源取决于牵引制动手柄的制动力需求、车辆载荷、列车实时运行速度、制动黏着限制等因素。

为减少制动过程对基础制动装置(如轧片等)造成的磨损损失,常用制动过程优先采用动力转向架上的牵引电制动力实现。当动力转向架上的电制动力总和不能满足制动力需求时,结合轮轨黏着限制,由 TCMS 统筹整车制动能力和制动需求,由拖车或动车上的液压制动单元进行补充。在高速制动阶段,由非动力转向架的液压制动单元实施配有载荷补偿的液压制动。当进入停车制动阶段后,所有转向架的液压制动单元开始进入电液转换过程,由液压制动力逐渐代替电制动力^[5]。

列车制动施加效果与其本身状态、制动初速度(列车运行速度)和列车载荷均相关,因此需精确采集列车运行速度和列车载荷信息^[5]。通过对应的

制动级位信息、载荷信息等,TCMS 和 BCU、TCU 均能综合计算整车制动力需求,为了保障整车制动力命令的源头统一,当网络 TCMS 正常时,优先采用 TCMS 进行制动力统筹控制。

2.1 采集列车运行速度及载荷

2.1.1 列车载荷

VCU 通过通信线缆(如 MVB 或以太网)读取动车载荷传感器信息,BCU 读取拖车载荷传感器信息,并将其以电流形式发送给 VCU。VCU 收集整车各转向架的载荷信息后,计算整车载荷有效数值,并将计算结果发送给 BCU 和 TCU。VCU 与 BCU 在静止时更新列车载荷信息,非静止时需锁定列车载荷信息。网络中断(非紧急牵引)时,BCU 与 VCU 均按当前锁定列车载荷信息执行。

2.1.2 列车运行速度

VCU 通过通信线缆(如 MVB 或以太网)接收两端 TCU 采集的 4 路速度信号,以及 BCU 采集的拖车运行速度,超出最大限制的速度值将会被舍

弃。正常情况下,VCU 将 BCU 采集的拖车运行速度作为整车运行速度;当 BCU 采集的拖车运行速度无效时,VCU 取两个 TCU 采集的 4 路速度信号中的第二小值。当 TCU 和 BCU 采集到的运行速度均无效时,以 VCU 采集的拖车运行速度作为整车运行速度。其中:停车制动阶段的电液转换速度定义为 6 km/h;列车零速定义为 0.5 km/h。根据不同停车速度等级,将列车运行速度为 70 km/h 减至 0 的全制动过程分为 3 个阶段:高速制动阶段(列车运行速度为 70 km/h 减至 6 km/h);停车制动阶段(列车运行速度为 6 km/h 减至 0.5 km/h);当列车运行速度为零速(≤ 0.5 km/h)时,可施加保持制动,列车进入保持制动阶段^[6]。

2.2 基于 TCMS 的制动控制策略及优化

2.2.1 正常工况

正常工况指的是网络系统 TCMS 运行正常,全车数据能够正常发送和接收,全列电制动力可正常施加,无损失。

TCMS 的中央控制单元将综合判断采集到的整车载荷信息、当前制动初速度信息、当前电制动力信息和液压制动力信息,结合司机手柄的制动指令和级位信息,计算整车制动力需求目标数值。然后,将整车制动力需求目标数值发送给动车的牵引控制单元,以及拖车的制动控制单元。优先采用牵引系统 TCU 施加电制动,结合 TCU 电制动可用性和实际施加值,通过 VCU 计算出需进行补充的液压制动力数值,并将液压制动力按预设数值“均匀”分配给动车的 HCM 和拖车的 EHU,补充对应的液压制动力。基于 TCMS 的整车制动控制策略流程图如图 3 所示。

根据不同的制动指令和制动模式,施加不同类型的制动力。当执行安全制动时,不施加电制动,而是施加预设安全制动 DO1 液压制动力。当执行常用制动和紧急制动时,根据不同的列车运行速度等级,可分为 3 种控制模式。

1) 高速制动阶段。常用制动模式下,优先施加电制动力。若电制动力施加正常,动车的 HCM 液压制动力不会补充液压制动,VCU 根据实际施加的电制动力能力,用整车制动目标数值减去两个动车施加的电制动力数值,剩余的制动力则由拖车液压制动系统进行补充,直至轮轨黏着和热容量达到上限。紧急制动模式下,VCU 请求动车 HCM 施加预

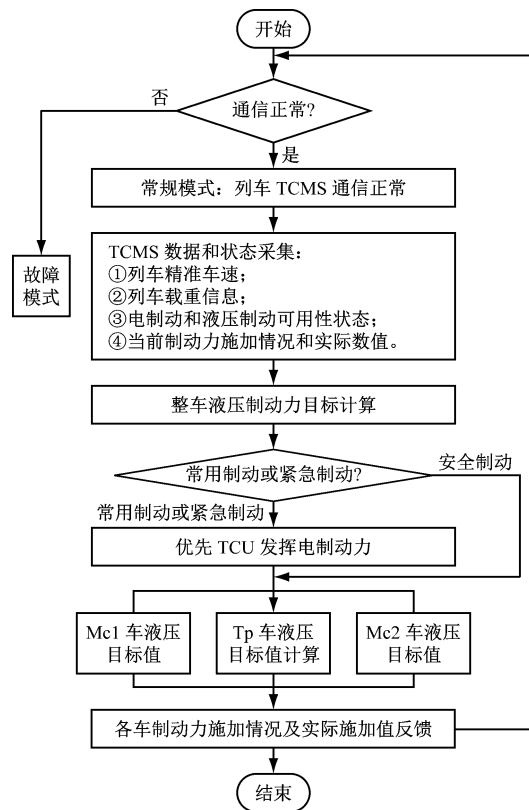


图 3 基于 TCMS 的整车制动控制策略流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the whole-vehicle braking control strategy process based on TCMS

设低等级制动 DO2 液压制动力,VCU 根据动车实际电制动力、实际液压制动力和磁轨制动力计算当前施加制动力的实际情况,并与整车制动力需求进行比较,将剩余的制动力需求信息发送给 BCU,BCU 控制拖车 EHU 补充液压制动力。

2) 停车制动阶段。常用制动模式下,牵引控制单元发出电液转换请求信号,结合制动控制指令,列车进入电压转换模式(电液转换信号激活并有效),由 VCU 请求动车 HCM 施加预设的中等级制动 DO3 液压制动力,电制动力以固定速度逐渐退出;VCU 根据此时的电制动力数值和动车施加的液压制动力数值进行减法运算,剩余的制动力需求由拖车的液压制动系统进行补充,直至轮轨黏着限制。紧急制动模式下,牵引系统 TCU 发出电液转换信号,此时 VCU 请求动车 HCM 施加预设的中等级制动 DO3 液压制动力,延迟 300 ms 后,电制动力以固定速度逐渐退出;VCU 根据动车实际施加的电制动力、实际液压制动力和磁轨制动力计算当前施加制动力的实际情况,并与整车制动力需求进行比较,将剩余的制动力需求信息发送给 BCU,BCU 控

制拖车 EHU 补充液压制动力。

3) 保持制动阶段。无论是常用制动模式还是紧急制动模式下,均由 VCU 请求动车液压控制模块施加预设的高等级制动 DO4 液压制动力,VCU 根据此时动车施加的液压制动力数值进行减法运算,剩余的制动力需求由拖车的 EHU 液压制动系统进行补充,直至黏着和热容量达到上限。

2.2.2 故障工况

故障工况指的是网络系统 TCMS 运行正常,全车数据能够正常发送和接收,但电制动力不能充分发挥时的工况。此时,根据两个动车电制动力的丢失情况,TCMS 将采用不同的控制策略,以达到更好的制动效果^[7]。

1) 动车电制动力部分损失情况。若 75% 电制动力(1 个 Mc 车 1 个轴电制动故障)或 25% + 25% (2 个 Mc 车均有 1 个轴电制动故障)电制动力可用时,列车采用紧急制动模式,TCMS 优先施加电制动力,由于此时的电制动力总和已无法满足整车制动力需求,需要 VCU 命令动车的 HCM 施加预设的低等级制动 DO2 液压制动力。此时,若还有剩余的制动力需求,VCU 会将相关计算结果转发给拖车的 EHU,并施加对应的液压制动力,直至轮轨黏着和热容量达到上限。列车采用常用制动模式时,TCMS 优先施加电制动力,动车的 HCM 不补偿对

应的液压制动力,VCU 将更多的制动力需求发送给拖车的 BCU,由 EHU 对应施加液压制动力进行补偿,直至轮轨黏着和热容量达到上限。

若完全损失一个动车的电制动力,即 50% 电制动力损失(1 个 Mc 车电制动全部故障)时,通过 VCU 命令电制动力完全丢失的动车 HCM 施加预设的低等级制动 DO2 液压制动力,VCU 会将剩余的制动力需求转发拖车 EHU,并施加对应的液压制动力,直至轮轨黏着和热容量达到上限。在这种情况下,若由两个动车的液压制动单元平均补偿缺失的电制动力,非故障端的动车将在充分施加电制动力的同时施加液压制动,以补偿整车丢失的电制动力,此时容易超出该动车的最大制动黏着上限,无法满足当前情况下的制动力需求。此外,动车的液压制动不具备防滑功能,易造成车轮擦伤和停车瞬间的车身滚动现象。

2) 动车电制动力几乎不可用情况(2 个 Mc 车上 25% 或 0% 电制动可用)。若当前可用电制动力低于 50% 或全部丢失时,无论是紧急制动工况还是常用制动,VCU 将命令动车 HCM 施加预设的中等等级制动 DO3 液压制动力,剩余的制动力需求将由拖车 EHU 施加对应的液压制动力补充,直至轮轨黏着和热容量达到上限。电制动力不充分工况下不同制动模式的液压制动力施加策略如表 3 所示。

表 3 电制动力不充分工况下不同制动模式的液压制动力施加策略

Tab. 3 Hydraulic braking force application strategies for different braking modes under the working condition of insufficient electric braking force

制动模式	整车制动力 拆解位置	电制动力不充分工况			
		75% 电制动可用	25% + 25% 电制动可用	50% 电制动可用	25% 或 0% 电制动可用
紧急制动	Mc	两个 Mc 车分别施加 DO2 的液压制动力	两个 Mc 车分别施加 DO2 的液压制动力	故障 Mc 车施加 DO2 的液压制动力;非故障 Mc 车不补偿	两个 Mc 车分别施加 DO3 的液压制动力
	Tp	Tp 车液压制动力补偿(不超轮轨黏着极限)	Tp 车液压制动力补偿(不超轮轨黏着极限)	Tp 车液压制动力补偿(不超轮轨黏着极限)	Tp 车液压制动力补偿(不超轮轨黏着极限)
常用制动	Mc	不补偿	不补偿	故障 Mc 车施加 DO2 的液压制动力;非故障 Mc 车不补偿	故障 Mc 车施加 DO2 的液压制动力;非故障 Mc 车不补偿
	Tp	Tp 车液压制动力补偿(不超轮轨黏着极限)	Tp 车液压制动力补偿(不超轮轨黏着极限)	Tp 车液压制动力补偿(不超轮轨黏着极限)	Tp 车液压制动力补偿(不超轮轨黏着极限)

3 结语

本文提出一种基于 TCMS 的制动整体控制策略优化方案,能够实现整车制动力的统筹分配,有

效提升制动效率、列车运行效率和安全性能,满足有轨电车对制动系统的各项技术指标要求。所提控制策略优化方案具有应用简单、硬件改造难度低、设计符合故障导向安全原则等优点。所提优化

方案中,在电制动力有损失工况下的制动策略充分考虑了轮轨黏着要求及晃动擦轮风险,能够在不延长制动距离的基础上,提高乘客的乘坐舒适性,减少制动盘片磨损。

参考文献

- [1] 韩龙, 虞大联, 刘韶庆. 低地板轻轨电车制动系统概念设计[J]. 机车电传动, 2014(5): 63.
HAN Long, YU Dalian, LIU Shaoqing. Conceptual proposal for low-floor light rail vehicle brake system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2014(5): 63.
- [2] 刘泉, 唐亮, 武小平. 中低速磁浮列车制动力管理控制策略研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2018, 41(3): 35.
LIU Quan, TANG Liang, WU Xiaoping. Control strategy of braking force management for medium and low speed maglev train[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2018, 41(3): 35.
- [3] 李洁, 黄文静. 城市轨道交通领域列车制动力管理应用技术[J]. 装备制造技术, 2016(9): 115.
LI Jie, HUANG Wenjing. Application technology of train braking force management in the field of urban rail transit[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(9): 115.
- [4] 常振臣, 沙森. 高速列车网络控制系统原理与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.

CHANG Zhenchen, SHA Miao. Principles and applications of high-speed train network control system[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.

- [5] 王华伟, 刘国梁. 基于列车控制与管理系统的车辆制动力管理方案设计[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(2): 89.
WANG Huawei, LIU Guoliang. Design of braking force management scheme for urban rail transit vehicle based on TCMS[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(2): 89.
- [6] 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.
- [7] 牛玉国, 张彦伟, 董振威. 低地板有轨电车液压制动系统及制动力管理策略研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 42.
NIU Yuguo, ZHANG Yanwei, DONG Zhenwei. Management strategy for hydraulic braking system and braking force of low-floor tram[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 42.

• 收稿日期:2023-06-08 修回日期:2023-08-17 出版日期:2025-05-10
Received:2023-06-08 Revised:2023-08-17 Published:2025-05-10
• 通信作者:许杰,高级工程师,15943022786@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

Commentary

AI Empowering Urban Rail Transit: From Automatic Sensing to Autonomous Decision-Making

YANG Di

(Vice General Manager of Nanjing Kingyoung Intelligent Technology Co., Ltd. and General Manager of its Shanghai Branch)

In recent years, urban rail transit construction in China has achieved remarkable success. Meanwhile, urban rail transit operation and maintenance enterprises are also facing challenges in ensuring safe and efficient operations. In terms of asset management, by the end of 2023, the average asset-liability ratio of China's urban rail transit industry was 57%, and most enterprises generally faced the problems of operating losses and personnel optimization. In terms of operation management, after the COVID-19 pandemic, with the continuous increase in passenger flow, the pressure on operation organization has been continuously rising, and the scientific maintenance of facilities and equipment has been elevated to an unprecedented level. In terms of technical management, intelligent operation and maintenance is the general trend, but the lack of scientific and technological innovation capabilities on the operation and maintenance makes it difficult to effectively support and implement the goal of high-quality development of urban rail transit.

Therefore, in the next 5 to 10 years, the most challenging task for the urban rail transit industry will be to handle the contradiction between the continuous aging of facilities and equipment and the safe and efficient operation management, while ensuring the financial health of enterprises, by leveraging new forms of productive forces. Against this backdrop, the rapid development of AI technology will bring new solutions to the industry.

AI can assist in the whole life cycle management of urban rail transit assets. The operation and maintenance management of