

城市轨道交通多系统协同的列车防滑控制策略优化

乔志远

(上海地铁维护保障有限公司, 200233, 上海)

摘要 [目的]在极端线路条件及天气情况下,城市轨道交通列车在正线运营中易出现低黏着造成轮轨空转或打滑现象,有必要对列车防滑控制策略进行优化。[方法]以打滑的黏着模型及判定为基础,分析了目前城市轨道交通车辆、信号系统典型的防滑控制逻辑,以及车辆与信号系统防滑交互原理,研究可行的多系统防滑控制策略。该防滑控制策略在三个方面进行了优化:在信号防滑策略中增大列车位置安全包络,在车辆与信号系统交互中进行测速系统联动及容限阈值的匹配,工务系统中进行轮缘润滑策略优化。[结果及结论]信号系统防滑控制策略优化后,在打滑发生时,仍允许列车以最大安全包络继续运行,可降低打滑事件对后车及运营的影响;车辆与信号系统交互优化策略增加了测速的准确性并优化了容限阈值范围;在雨雪天气下关闭钢轨轮缘润滑装置可进一步减小打滑概率。该多系统防滑控制策略在正线运用后的同期运营数据结果显示,车辆因打滑引起的紧急制动情况减小了 34%,影响运营列车数减少了 64%。**关键词** 城市轨道交通;防滑控制策略;安全包络;多专业协同控制

中图分类号 U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.11.014

Optimization of Train Anti-slip Control Strategies for Urban Rail Transit Multi-system Coordination

QIAO Zhiyuan

(Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200233, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Under extreme line and weather conditions, urban rail transit trains often experience low adhesion leading to wheel-rail slip or slide phenomena in mainline operation, making it necessary to optimize the train anti-slip control strategy. [Method] Based on the adhesion model and slip determination, the typical anti-slip control logics of current urban rail transit vehicle and signaling system, and the interaction principles between vehicle and signaling system anti-slip controls are analyzed. A feasible multi-system anti-slip control strategy is developed. This strategy makes optimization in three aspects: increasing the safety envelope of the train position in the signal anti-slip strategy; matching speed measurement sys-

tem linkage and tolerance thresholds in vehicle and signaling system interactions; and optimizing the wheel flange lubrication strategy in track work system. [Result & Conclusion] After optimizing the signaling system anti-slip control strategy, trains are still allowed to continue operating within the maximum safety envelope when the train slips, thus reducing the impact of slip incidents on the following trains and overall operations. The optimized interaction strategy between vehicle and signaling system improves speed measurement accuracy and tolerance threshold ranges. Disabling the rail-wheel flange lubrication device during rain and snow weather further reduces the probabilities of slipping. The results of same period operational data after the implementation of multi-system anti-slip control strategy in mainline operation shows a 34% reduction in emergency braking events due to train slipping and a 64% decrease in the number of affected operational trains.

Key words urban rail transit; anti-slip control strategy; safe envelope; multi-discipline coordinated control

城市轨道交通列车在正线运行过程中,受线路状况、天气情况的影响,会出现打滑现象^[1]。列车打滑严重会造成信号系统的列车定位信息丢失,进而触发紧急制动,造成后续大量列车积压及晚点,严重影响服务质量^[2]。列车打滑严重还会造成紧急制动率降低,增大紧急制动距离,严重时会导致脱轨、撞车等安全事故。列车打滑严重时过度滑行会导致车轮踏面擦伤和钢轨磨损,严重时损坏传动装置和走行部件。可见,列车防滑控制对保障列车的安全运行与正常运营具有重要的意义。

城市轨道交通车辆防滑控制的核心在于轮轨黏着。可通过调节制动力,在制动控制需要的时候,最大化轮轨之间的黏着力,如协调控制电制动与摩擦空气制动防滑^[3]、最优阈值 PID(比例-积分-微分)防滑控制^[4]、模糊控制算法进行制动力控制^[5]。信号系统则通过使用不同测速定位方案,实现测速及定位精度提升^[6]、采用低级位制动减速控制^[7]、优化列车制动曲线^[1]等防滑控车策略。

上述研究从车辆专业的制动防滑策略及信号专业的防滑控车策略方向展开,而城市轨道交通列车打滑除了受车辆专业及信号专业的防滑策略影响,工务专业的钢轨润滑装置也会对列车打滑产生一定的影响。目前,鲜有文献从车辆、信号及工务等多专业协同的角度对列车防滑控制策略进行研究。本文鉴于以上问题,研究列车打滑时各专业系统的阈值参数及相互关系,对车辆、信号及工务等多专业协同的列车防滑控制策略(以下简称“协同防滑策略”)进行优化,以期实现在极端情况下的列车防滑控制效果理想化。

1 列车打滑的力学模型与判定

在重力的作用下,轮轨接触产生弹性变形,形成椭圆形的轮轨接触面。此时,列车车轮处于滚动中有微滑的状态。由于轮对角速度与列车运行速度不一致,轮轨间存在蠕滑。当传递到轮对的力矩增大到一定值,轮轨间滑行严重,轮轨间黏着力迅速减小,甚至导致车轮空转或打滑。一般采用滑动率 σ 来表示车轮与钢轨间滑动的程度:

$$\sigma = \left(\frac{\omega R - v}{v} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:

v ——列车运行速度;

R ——轮对半径;

ω ——轮对角速度。

黏着力模型主要采用 Polach 非线性模型。将黏着系数表示为轨面状态、 σ 和 v 的黏着力模型函数相关公式见参考文献[8]。黏着控制即根据轨面条件,通过控制黏着力来抑制滑行的恶化。在实际应用中,可以精确地测量轮对角速度,却无法精确地获取列车运行速度。在城市轨道交通应用中通常使用减速度及减速度微分法等,来判断防滑控制的进入及退出。

2 协同防滑策略

2.1 车辆系统防滑控制逻辑

车辆系统防滑控制逻辑如图 1 所示。在列车制动过程中,制动控制系统根据列车控制系统发出的制动指令,在不同车速下分配制动力,并将实际制动力反馈给列车控制系统:一部分由牵引控制系统进行电制动,一部分由空气制动控制系统进行空气制动。牵引控制系统及空气制动控制系统分别有

相应的防滑监控。

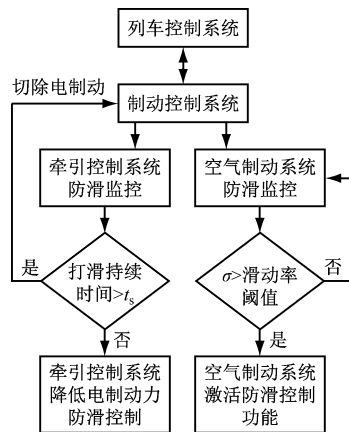


图 1 车辆系统防滑控制逻辑

Fig. 1 Vehicle system anti-slip control logic

在列车制动过程中,牵引控制系统通常以牵引电机端的减速度作为判据,来判断车辆是否发生打滑。当监测到列车打滑持续时间 t_h 未超过打滑持续时间阈值 t_s 时,将由牵引控制系统降低电制动力,以消除列车打滑。当监测到 t_h 超过 t_s 时,制动控制系统将切除电制动,使制动力完全由空气制动提供。

空气制动控制系统同步对列车打滑情况进行监测,通常以 σ 作为判据。当监测到列车打滑,且 σ 大于滑动率阈值 σ_s 时,空气制动控制系统激活防滑控制功能,包括进行防滑排气等动作,降低空气制动力,控制车辆退出打滑。

2.2 信号系统防滑控制逻辑

信号系统判断列车打滑的方法较多,应用最为广泛的是速度、加速度检测法。信号系统防滑逻辑如图 2 所示。在列车一端司机室所在车辆不同转向架的车轴上,分别安装 2 个速度传感器,且 2 个速度传感器位于转向架的两侧,用来获取列车的速度。同时,在车内安装 2 个加速度传感器。2 个速度传感器获取的速度分别为 v_1 、 v_2 ,通过速度计算可得 2 个加速度,通过 2 个加速度传感器进行补偿计算后可得两轴加速度 a_1 及 a_2 ;由此,可得到 2 组数据 (a_1, v_1) 、 (a_2, v_2) 。

相应打滑判据也有 2 组:第一组判据为加速度,当 a_1 或 a_2 超过加速度阈值 a_0 时判定为打滑;第二组判据为加速度变化率,当 a_1 及 a_2 的变化率 a'_1 、 a'_2 超过给定阈值 a'_s 时,判断为打滑。只有加速度与加速度变化率都不满足打滑判定条件时,信号系统才会判定为正常。信号系统检测到打滑后,只有 t_h

大于其阈值 t_0 时,信号系统才会判断为列车丢失定位,并触发紧急制动。

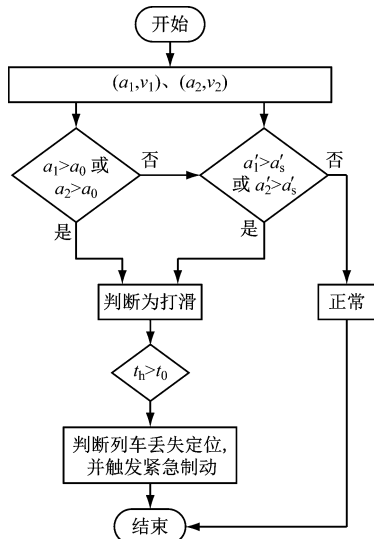


图2 信号系统防滑逻辑

Fig. 2 Signaling system anti-slip logic

2.3 车辆系统及信号系统的交互

信号系统与车辆系统有各自的测速系统,分别对车辆进行是否发生打滑进行监控。车辆系统及信号系统的防滑交互策略如图3所示。

当信号测速系统监测列车正常行驶,并未发生打滑时:信号系统根据列车的位置、速度及加速度信息输出信号控车指令;车辆系统根据信号控车指令进行列车牵引、制动控制,并在响应信号控车指令的同时,触发防滑机制。当信号测速系统监测列车发生打滑时:信号系统进行打滑判断,超出设计阈值时触发紧急制动;车辆系统在响应信号控车指令的同时,触发防滑机制,优先执行紧急制动指令。

当车辆测速系统监测列车正常行驶,并未发生打滑时,车辆系统根据信号控车指令进行列车牵引、制动控制。当车辆测速系统监测列车发生打滑时,车辆系统在响应信号控车指令的同时,触发防滑机制。

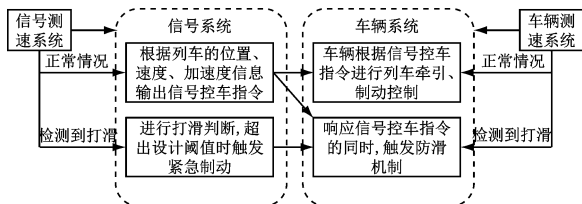


图3 车辆系统及信号系统的防滑交互策略

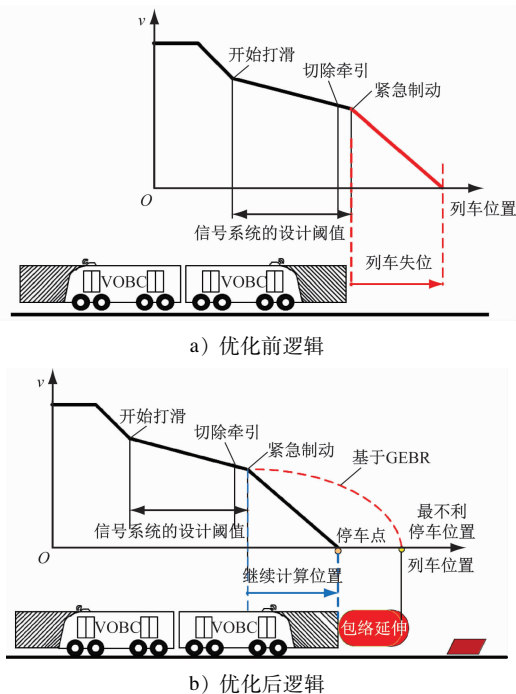
Fig. 3 Anti-slip interaction strategy for vehicle and signaling systems

3 多系统协同的防滑控制策略优化

3.1 信号系统防滑控制逻辑优化

列车打滑触发紧急制动,会对后续列车的运营造成影响。为减少对运营的影响,对信号系统的防滑控制逻辑做了优化。

如图4所示,优化防滑控制逻辑前,当信号系统判断列车持续打滑后,触发紧急制动并停车。紧急制动停车对后续列车的运营带来了不可避免的影响,降低了运营效率。优化防滑控制逻辑后,当列车判断为打滑情况触发紧急制动:停车后,信号系统基于列车在最不利条件下的 GEBR(紧急制动保障率)最低值,计算并延伸列车位置安全包络,并允许列车在大的安全包络保护下,以限制人工手动模式继续向前移动,并寻找下一个信标重新精确定位;列车行驶至下一信标并读取位置信息,包络恢复正常。防滑控制逻辑经过优化后,实现了列车打滑紧急制动后可在确保安全的前提下继续向前运行,对运营影响降低到可接受程度。



注:VOBC为车载控制器。

图4 信号系统优化前后防滑控制逻辑示意图

Fig. 4 Diagram of signaling system anti-slip control logic before and after optimization

3.2 车辆及信号协同优化策略

车辆与信号协同优化策略如图5所示。

首先,该策略实现了信号及车辆系统的接口联

动,即交互信号系统及车辆测速系统提供的速度、加速度、滑移率等关键参数,从而综合判定最接近实际的车辆状态数据,进行相应的信号及车辆防滑策略调整。

其次,车辆系统在获得交互后的车辆状态数据后,制动控制系统调整其防滑功能的阈值设置,进行相应的防滑控制后,使车辆能够迅速响应,退出滑动。信号系统则通过交互车辆状态数据,获得车辆制动控制系统及防滑功能的阈值设置。信号系统基于此进行相匹配的控车策略调整、容限设计优化,在确保安全的前提下减少打滑后紧急制动的概率,从而在最大程度内减小对运营的影响。

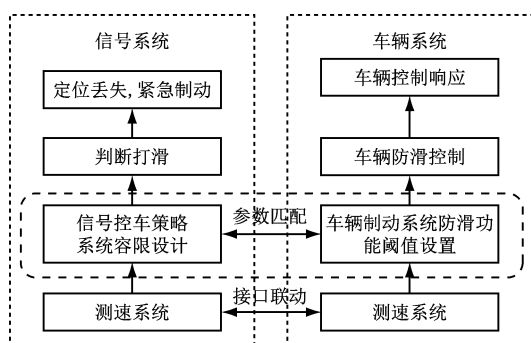


图 5 车辆及信号协同优化策略

Fig. 5 Coordinated optimization strategy for vehicles and signals

3.3 工务系统轮缘润滑策略优化

为减少车辆在行驶过程中的轮缘与钢轨摩擦和磨损,特别是列车在通过曲线线路过程中发生的轮缘与钢轨的摩擦,通常在车辆首尾两端安装有轮缘润滑装置,并在曲线直缓点进入曲线段一定距离位置处设有钢轨润滑装置。当列车经过时,这些润滑装置以一定频率针对列车轮缘涂抹或喷洒润滑剂,粘在车轮的轮缘上,通过车轮的传动再均匀地涂抹到列车将要经过的曲线钢轨外轨内侧面,使车轮和钢轨内侧面形成一层油膜,从而使车轮轮缘与钢轨内侧面由干摩擦变为有油润滑摩擦,降低其轮缘与轨道内侧的摩擦因数。

目前轮缘润滑技术已能精准地控制润滑频率及润滑位置,但在极端天气(如小雨、小雪叠加低温)情况下,以及长大下坡道及曲线等恶劣线路情况下,轮轨间黏着系数却会急剧下降,极易发生打滑现象。因此,在极端天气情况下,应关闭轮缘润滑装置,防止黏着进一步恶化。

3.4 协同策略优化结果分析

包含车辆、信号及工务的多系统协同防滑控制策略已在上海轨道交通 9 号线应用。应用结果显示,该防滑控制策略可有效减少打滑情况的发生,进而减小紧急制动及列车打滑对正常运营的影响。对比应用该优化策略前后(2022 年第四季度及 2023 年第四季度)同期运营数据可知,因打滑引起的紧急制动次数减少了 34%,受影响的运营列车数减少了 64%。

4 结语

本文以目前城市轨道交通主流的打滑黏着模型及判定依据为基础,分析了目前轨道交通系统中车辆系统及信号系统本身的防滑逻辑及交互防滑策略,研究了信号、车辆及工务等多系统协同防滑控制策略,研究结果表明:

1) 在优化安全包络范围后,在打滑发生时,信号系统防滑控制策略仍允许列车按最大安全包络继续运行,减小对后车运营的影响甚至不影响。

2) 车辆与信号系统采取协同防滑控制策略后,通过参数匹配,调整控车策略,增加了测速的准确性,优化了容限设计。

3) 在工务系统中,雨雪天气时应关闭钢轨轮缘润滑装置,以进一步减小打滑概率。

该多专业协同防滑控制策略在上海轨道交通 9 号线的应用结果显示,应用后一年内车辆因打滑引起的紧急制动次数减少了 34%,受影响的运营列车数减小了 64%。

参考文献

- [1] 马铮,刘健,李文彬.恶劣天气下的信号控车策略研究:以青岛地铁 11 号线为例[J].工程技术研究,2021,6(21):249.
MA Zheng, LIU Jian, LI Wenbin. Study on signal control strategy in bad weather—taking Qingdao Metro Line 11 as an example[J]. Engineering and Technological Research, 2021, 6(21): 249.
- [2] 梁宇,张成国,汤梨园,等.地铁列车空转打滑对信号系统控车性能的影响及处理措施[J].城市轨道交通研究,2022,25(6):191.
LIANG Yu, ZHANG Chengguo, TANG Liyuan, et al. Influence of metro train idling and sliding on signaling system and treatment measures[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(6): 191.
- [3] 祝汉燕,亢磊,李松,等.电制动与空气摩擦制动防滑控制协同作用策略研究[J].铁道机车车辆,2020,40(2):39.
ZHU Hanyan, KANG Lei, LI Song, et al. Research on the cooperative control strategy of the WSP between the ED braking and the EP braking[J]. Railway Locomotive & Car, 2020, 40(2): 39.

(下转第 70 页)

盘推演、培训模拟机故障实操、“技术比武”、跨部门模拟故障联合演练等。而故障模拟演练无疑是检验应急处置效率提升途径最有效性的方法,而应急处置效率的提升也是备战的关键环节。实战化演练,可以模拟真实故障情境,评估和优化应急响应流程,确保每一个环节都能达到高效、精确的执行标准。这样的准备工作不仅提高了团队的应变能力,也确保了在真正的紧急情况下能够有效地缩短地铁故障的影响时间,提高应急抢修的效率。因此,演练不仅是测试和提升应急处置能力的手段,更是为可能出现的任何突发事件做好充分准备的重要一环。通过这些训练,可以将应急处置理论知识转化为实践经验,将备战提升到一个新的水平,确保团队在实际面对挑战时能以最佳状态应对,从而在故障中保持秩序,最小化损害,快速恢复城市轨道交通的正常运行。

参考文献

- [1] 裴加富,包亮强,林立,等.城市轨道交通全自动运行车辆移动值乘辅助系统研究与应用[J].铁道通信信号,2024,60(2):19.
PEI Jiafu, BAO Liangqiang, LIN Li, et al. Research and application of mobile duty assistance system for FAO vehicles of urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2024, 60(2):19.
- [2] 李焕海.提升城市轨道交通运营应急处置能力的研究与思考[J].城市轨道交通,2024(1):36.
LI huanhai. Research and reflection on improving the emergency response and handling capacity of urban rail transit operation[J]. China Metros, 2024(1):36.
- [3] 宁滨,郝春海,李开成,等.中国城市轨道交通全自动运行系统技术及应用[J].北京交通大学学报,2019,43(1):1.
NING Bin, GAO Chunhai, LI Kaicheng, et al. Technology and application of fully automatic operation system for urban rail transit in China[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1):1.
- [4] 刘洁,吕楠,顾御坤,等.城轨交通行车调度应急演练虚拟联动技术研究及应用[J].铁路技术创新,2023(3):195.
LIU Jie, LYU Nan, GU Yukun, et al. Research and application of virtual linkage technology for urban rail transit train dispatching emergency drill[J]. Railway Technical Innovation, 2023(3):195.
- [5] 葛淼,褚红健,党聪.城市轨道交通应急指挥系统研究[J].江苏科技信息,2021,38(28):40.
GE Miao, CHU Hongjian, DANG Cong. Research on the emergency command system of urban rail transit[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2021, 38(28):40.
- [6] 张陆.深圳地铁运营与地面交通应急处理机制及模式[J].公路与汽运,2008(1):32.
ZHANG Lu. Mechanism and mode of emergency handling of Shenzhen subway operation and ground transportation[J]. Highways & Automotive Applications, 2008(1):32.
- [7] 王英龙,王佳南.地铁运营应急演练管理工作实践与思考[J].城市轨道交通研究,2018,21(1):120.
WANG Yinglong, WANG Jianan. Practice and reflection of emergency exercise management in subway operation[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(1):120.
- 收稿日期:2024-03-18 修回日期:2024-04-12 出版日期:2024-11-10
Received:2024-03-18 Revised:2024-04-12 Published:2024-11-10
· 通信作者:谢锦杰,助理工程师,747832115@qq.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 65 页)
- [4] 郭欣茹,杨云帆,凌亮,等.防滑控制策略对机车车轮的损伤影响研究[J].机械工程学报,2023,59(22):369.
GUO Xinru, YANG Yunfan, LING Liang, et al. Effect of anti-slip control strategy on locomotive wheel tread damage[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(22):369.
- [5] 苏超,周志茹,段晴龙,等.基于模糊控制策略的高速列车防滑控制研究[J].现代城市轨道交通,2022(11):24.
SU Chao, ZHOU Zhiru, DUAN Qinglong, et al. Research on anti-skid control of high-speed trains based on fuzzy control strategy[J]. Modern Urban Transit, 2022(11):24.
- [6] 宋剑伟.城市轨道交通信号系统的典型测速定位方案比较[J].城市轨道交通研究,2021,24(4):26.
SONG Jianwei. Comparison of urban rail transit signaling system train velocity measurement and positioning schemes[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(4):26.
- [7] 王一阁,易海旺,周博渊,等.高速铁路 ATO 系统功能优化研究[EB/OL].(2023-11-02)[2024-06-27].https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202307030008.
WANG Yige, YI Haiwang, ZHOU Boyuan, et al. Research on functional optimization of high-speed railway ATO system[EB/OL].(2023-11-02)[2024-06-27].https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202307030008.
- [8] 朱文良,周嘉俊,孔靖森,等.动车组制动防滑控制建模仿真与试验研究[J].城市轨道交通研究,2020,23(12):50.
ZHU Wenliang, ZHOU Jiajun, KONG Jingsen, et al. Modeling simulation and testing research of anti-skid control of EMU braking[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12):50.
- 收稿日期:2024-04-24 修回日期:2024-05-09 出版日期:2024-11-10
Received:2024-04-24 Revised:2024-05-09 Published:2024-11-10
· 通信作者:乔志远,高级工程师,qiao_zy@foxmail.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