

地铁车辆制动防滑控制故障分析

王水龙

徐州地铁运营有限公司 江苏 徐州 221018

摘要: 地铁车辆制动防滑控制系统是保障行车安全的核心组成部分,其运行稳定性直接影响地铁运营安全与效率。本文阐述了制动防滑控制核心原理、系统组成及核心组件特性;分析了防滑控制常见故障类型及特征,剖析故障产生的环境、机械、电气等多方面原因;介绍了现场实操性强的故障诊断技术;最后从设计、日常维护、应急处置、人员培训四个维度提出针对性防控措施。研究可为地铁车辆制动防滑控制故障的精准诊断、有效防控提供实践参考,助力提升地铁运营安全性与可靠性。

关键词: 地铁车辆制动; 防滑控制故障; 类型及成因; 防控措施

引言: 随着地铁运营里程的不断增加,行车安全成为轨道交通领域的核心关注点,制动防滑控制系统作为地铁车辆制动系统的关键子系统,承担着防止车轮抱死滑行、保障制动效能的重要作用。受环境工况、组件老化、维护不当等多种因素影响,防滑控制系统故障频发,易导致制动距离延长、车轮磨损加剧,甚至威胁行车安全。开展地铁车辆制动防滑控制故障分析研究,明确故障类型、剖析故障成因、提出防控措施,具有重要的现实意义,可为地铁安全运营提供技术支撑。

1 地铁车辆制动防滑控制系统相关理论基础

1.1 制动防滑控制的核心原理

制动防滑控制的核心是维持轮轨间最佳黏着系数,防止车轮因制动力过大抱死或滑行。地铁车辆制动时,车轮转速随制动力增加而下降,当制动力超过轮轨黏着力极限,车轮转速会急剧降低甚至抱死,引发滑行,加剧车轮磨损、延长制动距离且影响行车安全。防滑控制通过实时检测车轮转速、角加速度等参数,判断车轮是否濒临滑行,通过调节制动缸压力(减压、保压、增压循环),使车轮转速与车辆速度保持匹配,始终处于最佳黏着工作状态,既保证制动效能,又避免滑行故障发生。

1.2 地铁车辆制动系统的组成及功能

地铁车辆制动系统主要由制动控制单元、制动执行机构、基础制动装置及辅助系统组成。制动控制单元是系统核心,负责接收制动指令、采集车辆运行参数,输出制动控制信号;制动执行机构含制动缸、中继阀等,执行压力调节指令;基础制动装置(如盘形制动、闸瓦制动)将制动力传递至车轮。其核心功能包括正常行车制动、紧急制动、驻车制动,同时配合防滑控制系统实现自适应压力调节,确保不同工况下(如空载、满载、弯道、坡道)制动稳定,兼顾制动效率与行车安全。

1.3 防滑控制系统的核心组件及工作特性

防滑控制系统核心组件包括转速传感器、防滑控制单元(ECU)及压力调节装置。转速传感器实时采集车轮转速信号,精度直接影响防滑判断准确性;ECU作为控制中枢,接收传感器信号并快速分析,判断车轮滑行趋势,输出压力调节指令;压力调节装置(如防滑阀)响应指令,快速调节制动缸压力。该系统具有响应速度快(毫秒级)、自适应能力强、可靠性高的特性,可实时适配轮轨黏着变化,在雨雪、弯道等复杂工况下,快速调整制动力,避免滑行,保障制动系统稳定运行,为后续故障分析提供理论支撑^[1]。

2 地铁制动防滑控制故障类型及成因

2.1 地铁车辆制动防滑控制故障类型及特征

地铁车辆制动防滑控制故障主要分为四大类,各类故障特征明确,直接影响防滑系统运行效能。(1) 轮轨黏着异常类故障,核心特征是轮轨间黏着力骤降或波动过大,表现为制动时车轮频繁出现轻微滑行、制动距离异常延长,多发生在雨雪、潮湿等恶劣天气,或轨道有油污、杂物附着的工况下。(2) 防滑传感器类故障,分为转速传感器失灵和信号传输异常,特征为传感器无信号输出、信号失真,导致防滑控制单元(ECU)无法准确获取车轮转速数据,系统误判或失去防滑控制功能,仪表盘显示传感器故障报警。(3) 制动执行机构类防滑故障,主要体现在制动缸、防滑阀工作异常,特征为制动缸压力调节滞后、防滑阀卡滞,无法根据ECU指令完成减压、保压、增压循环,易引发车轮抱死滑行。(4) ECU控制单元故障,属于核心控制故障,特征为ECU无法接收、分析信号或输出控制指令,系统全面失效,制动时无防滑保护作用,伴随控制单元报警灯常亮。

2.2 地铁车辆制动防滑控制故障产生的原因

结合各类故障特征,其产生原因主要分为五大类,相互关联且影响系统运行。(1)环境因素,雨雪、低温天气会降低轮轨黏着系数,轨道积水、油污会进一步加剧黏着异常,同时低温易导致传感器、防滑阀等部件结露、结冰,引发工作异常。(2)机械磨损与老化,长期运营中,转速传感器探头磨损、线路老化,制动缸密封件损坏、防滑阀阀芯磨损,会导致部件性能下降,引发故障。(3)电气系统故障,线路接触不良、短路,电源电压不稳定,会影响传感器信号传输和ECU正常工作,导致控制指令异常。(4)维护与操作疏漏,日常维护中未及时清理传感器探头、检查线路,维护流程不规范,或操作人员制动操作不当,会诱发防滑故障。(5)设计缺陷,部分防滑组件设计不合理、适配性不足,长期运行后易出现疲劳损坏,埋下故障隐患^[2]。

3 地铁车辆制动防滑控制故障诊断技术

地铁车辆制动防滑控制故障诊断需立足运营实际,结合防滑系统工作特性,采用实操性强的技术手段,快速定位故障、排查隐患,为后续处置提供精准依据,以下是现场常用的核心诊断技术。(1)外观与直观检查技术,这是最基础、最常用的现场诊断方法,主要针对防滑系统核心组件开展目视检查,重点查看转速传感器探头是否磨损、线路是否老化破损,防滑阀、制动缸有无泄漏、卡滞痕迹,ECU控制单元接口是否松动、有无烧蚀现象,同时结合仪表报警信息,初步判断故障大致范围,适用于快速排查简单机械、电气故障。(2)信号检测技术,借助万用表、示波器等常用检测设备,对传感器输出信号、ECU输入输出信号进行精准测量,检测转速传感器信号频率、幅值是否正常,判断信号传输是否失真,排查线路接触不良、短路等问题,同时检测ECU供电电压、控制指令输出是否达标,可有效诊断传感器、电气线路及ECU轻度故障。(3)工况模拟与对比诊断技术,结合地铁运营实际工况,模拟空载、满载、低速、制动等不同场景,对比正常车辆与故障车辆的防滑系统工作参数,观察制动缸压力调节规律、车轮转速变化曲线,精准定位制动执行机构滞后、黏着异常等隐性故障,同时通过替换疑似故障部件(如传感器、防滑阀),验证故障判断的准确性,确保诊断结果贴合现场实际,为故障处置提供可靠支撑^[3]。

4 地铁车辆制动防滑控制故障防控措施

4.1 前期设计阶段的故障防控措施

前期设计核心是通过科学设计提升系统可靠性、适配性,从源头减少故障隐患,防控措施如下。(1)优化系统整体设计方案,结合不同线路的坡道、弯道、客流

量特点,针对性设计防滑控制系统参数,合理匹配轮轨黏着系数适配范围,避免因设计与实际工况脱节,导致长期运行后出现黏着异常、压力调节滞后等故障;同时采用模块化设计,将传感器、ECU控制单元、防滑阀等核心组件进行标准化集成,便于后续维护、更换,降低因组件适配不当引发的故障风险。(2)严格筛选核心组件与材料,优先选用符合地铁运营标准、抗磨损、抗低温、防潮性能优良的组件,如选用高精度、抗干扰的转速传感器,密封性能良好的制动缸,耐腐蚀的线路材料,避免因组件质量不达标、材料性能不足,导致早期磨损、老化、失灵等故障;同时对组件进行严格的出厂检测与试运行测试,模拟雨雪、低温、高频制动等复杂工况,排查组件潜在缺陷,确保组件性能稳定。(3)完善设计验证与优化机制,设计完成后,通过仿真测试、样机试运行等方式,验证防滑控制系统的制动性能、故障响应能力,重点测试不同工况下的压力调节精度、车轮转速控制效果,针对测试中发现的设计缺陷,及时优化调整,确保系统在各类运营工况下都能稳定发挥防滑作用,从源头遏制故障发生^[4]。

4.2 日常运营中的预防性维护措施

日常运营中的预防性维护核心是通过定期检查、精准维护,及时排查潜在隐患,延长组件使用寿命,确保系统持续稳定运行,措施如下。(1)建立常态化检查机制,制定详细的日常检查、定期检查流程,日常检查重点查看转速传感器探头是否清洁、有无磨损,线路有无松动、破损,制动缸有无泄漏,ECU控制单元报警灯是否正常;定期检查(每周、每月、每季度)重点检测组件性能,如用检测设备测量传感器信号精度,检查防滑阀动作灵活性,测试制动缸压力调节范围,排查轮轨接触面上的油污、杂物,及时清理,避免影响轮轨黏着力。(2)实施分级维护与精准保养,根据组件运行寿命、使用频率,对核心组件实施分级维护,如转速传感器每6个月进行一次校准,制动缸每12个月进行一次密封检查与更换,ECU控制单元每季度进行一次系统调试,及时更换老化、磨损的组件,避免因组件过度使用引发故障;同时定期对系统进行清洁、除尘、防锈处理,重点清洁传感器探头、防滑阀阀芯,对线路接口进行防锈保护,防止因灰尘、锈蚀导致组件失灵、线路接触不良。(3)加强运营工况监测与预警,借助地铁运营监控系统,实时监测防滑控制系统的运行参数,如车轮转速、制动缸压力、ECU输出指令等,设置参数预警阈值,当参数超出正常范围时,及时发出预警信号,提醒工作人员排查隐患。

4.3 故障发生后的应急处置措施

故障发生后的应急处置核心是快速响应、科学处置,最大限度降低故障对运营的影响,避免故障扩大化,具体措施如下。(1)建立快速故障响应机制,明确故障处置流程、责任分工,当防滑控制系统出现故障(如仪表报警、车轮滑行、制动异常)时,驾驶员立即采取应急制动措施,确保车辆安全停靠,同时第一时间上报故障情况,说明故障现象、发生位置、运营工况,便于维护人员快速赶赴现场处置;维护人员携带常用检测设备、备用组件,快速抵达现场,优先排查简单易处置的故障,如线路松动、传感器探头污染等,争取短时间内恢复运营。(2)实施分类故障处置策略,针对不同类型的防滑控制故障,采用针对性的处置方法,如传感器故障,立即更换备用传感器,校准信号精度,确保信号传输正常;制动缸、防滑阀故障,快速拆卸检查,清理卡滞杂物,更换损坏的密封件、阀芯,测试压力调节功能;ECU控制单元故障,及时切换备用控制单元,调试系统参数,恢复控制功能;对于轮轨黏着异常故障,立即清理轮轨接触面,必要时采取撒沙等措施,提升轮轨黏着力,避免滑行故障扩大。(3)完善故障后续处置与复盘,故障处置完成后,对故障车辆进行全面检测,测试防滑控制系统各项性能,确保系统无残留隐患,方可重新投入运营;同时组织工作人员对故障进行复盘,分析故障发生的具体原因,排查维护、操作、设计等环节的不足,更新维护台账,优化预防性维护措施,避免同类故障再次发生。

4.4 人员操作与维护培训措施

人员操作与维护水平直接影响防滑控制故障的发生率与处置效率,提升措施如下。(1)开展操作人员专项培训,针对驾驶员、调度人员,重点培训防滑控制系统的工作原理、操作规范,教会操作人员识别故障报警信号、判断故障大致类型,掌握应急制动、故障上报的正确方法,避免因操作不当(如制动过猛、应急处置不及时)引发防滑故障或扩大故障影响;同时定期组织实操演

练,模拟不同类型的防滑故障场景,提升操作人员的应急处置能力,确保故障发生时能够快速、准确响应。(2)加强维护人员专业培训,针对维护人员,开展系统化的专业培训,重点培训防滑控制系统核心组件的结构、工作特性,故障诊断技术、维护方法,组件校准与更换流程,邀请行业专家、组件厂家技术人员进行授课,结合典型故障案例,讲解故障排查技巧、维护重点,提升维护人员的专业能力。(3)建立培训更新与交流机制,结合防滑控制技术的发展、运营工况的变化,及时更新培训内容,新增智能化诊断技术、新型组件维护方法等相关知识,确保工作人员掌握最新的维护、操作技能^[5]。

结束语:本文围绕地铁车辆制动防滑控制故障展开全面分析,系统梳理了防滑控制系统的理论基础,明确了四类常见故障类型及五大成因,总结了现场实用的故障诊断技术,并提出了全流程的故障防控措施。研究表明,制动防滑控制故障的防控需贯穿设计、运营、维护全环节,结合科学的诊断技术与规范的管理流程,可有效降低故障发生率。后续可结合智能化技术,进一步优化故障诊断精度与防控效率,为地铁车辆制动防滑系统安全稳定运行提供更全面的保障。

参考文献:

- [1]褚洪菲,张星,王义明,甄文通.地铁列车滑行控制电制动与空气制动耦合现象分析及优化[J].城市轨道交通研究,2025,28(12):47-51.
- [2]刘恩鹏.重庆地铁6号线车辆法维莱制动系统电空混合故障分析及优化措施[J].工程与试验,2022,62(1):87-89.
- [3]邱瑞雪,李泽汉.地铁车辆制动系统故障诊断与处理方法研究[J].人民公交,2025(8):185-187.
- [4]李飞,柯资坤.地铁车辆液压制动防滑控制方案设计及其效果分析[J].液压气动与密封,2023,43(12):26-32.
- [5]段旭良,张杨,陈建林.地铁车辆空气制动频繁施加故障分析与优化[J].电力机车与城轨车辆,2022,45(3):82-86.