

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.04.017

制动系统故障系统分析方法 与优化策略研究

杨海军¹, 李威², 邬春晖², 张海峰², 光志瑞²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东青岛 266111; 2. 北京市地铁运营有限公司, 北京 100044)

摘要: 针对高密度运营条件下地铁车辆制动系统单点故障易由设备级问题演化为运营级风险的现象, 以北京地铁某进口制动系统为对象, 提出一种面向工程实施的系统分析与优化方法。以典型运营延误事件为牵引, 通过系统分解与功能-结构映射, 结合实车故障模拟试验, 揭示制动控制阀排风电磁阀卡滞、总风路与停放制动强耦合以及制动系统与列车控制和管理系统(train control and management system, TCMS)信号接口失配等关键风险的传播路径与放大机理。在此基础上, 采用失效模式与影响分析(failure mode and effects analysis, FMEA)与故障树分析(fault tree analysis, FTA)相结合的方式对风险进行量化评估, 并将评估结果作为系统重构的直接约束条件, 从软件逻辑、气路结构与人机交互 3 个层面提出协同优化方案, 包括人机界面(human-machine interface, HMI)可触发的制动系统自检与自复位机制、制动风缸低压前馈诊断逻辑、基于单向阀的停放制动供风路径重构, 以及面向运营处置的 TCMS 故障分级与预警提示优化。多线路实车验证结果表明, 与优化前方案相比, 实施本文所提方法后, 3 类典型单点故障识别准确率平均提高 34.3%, 应急处置时间平均减少 3.1 min, 清客救援、限速运行、晚点等运营影响显著降低。研究形成的“故障模拟-风险量化-系统重构”方法框架, 可为城市轨道交通车辆制动系统及其他关键系统的韧性设计与主动风险管理提供工程化参考。

关键词: 地铁车辆; 制动系统; 单点故障; 系统分析; 风险评估; 系统优化

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)04-0147-06

Research on System Analysis Methods and Optimization Strategies for Braking System Faults

Yang Haijun¹, Li Wei², Wu Chunhui², Zhang Haifeng², Guang Zhirui²

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong 266111; 2. Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing 100044)

Abstract: Under high-density operating conditions, single-point failures in metro vehicle braking systems may escalate from equipment-level faults to operation-level risks. Taking an imported braking system applied in the Beijing Metro as a case study, this paper proposes a system analysis and optimization method for engineering implementation. Driven by a typical operational delay event and based on system decomposition, function-structure mapping, and on-vehicle fault simulation, the propagation paths and amplification mechanisms of key risks, such as exhaust solenoid valve sticking in the brake control valve, strong coupling between the main air line and the parking brake, and braking system-TCMS signal interface mismatches, are systematically identified. A combined Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA) approach is then adopted to quantitatively evaluate these risks, with the results serving as direct constraints for system reconfiguration. Coordinated optimization measures are proposed at the software, pneumatic, and human-machine interaction levels, including an HMI-triggered braking system self-test and self-reset mechanism, feedforward diagnosis of low brake cylinder pressure, reconstruction of the

收稿日期: 2025-10-28 修回日期: 2026-01-24

第一作者: 杨海军, 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事轨道交通车辆电气调试和智能化产线设计工作, navy410075@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(62433005)

引用格式: 杨海军, 李威, 邬春晖, 等. 制动系统故障系统分析方法与优化策略研究[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(4): 147-152.

parking brake air supply path using check valves, and an operation-disposal-oriented TCMS fault classification and early warning strategy. Multi-line on-vehicle validation demonstrates that, compared with the pre-optimization scheme, the proposed method increases the identification accuracy of three typical single-point faults by an average of 34.3 percentage points and reduces emergency handling time by an average of 3.1 min, significantly mitigating operational impacts such as passenger evacuation, speed-restricted operation, and delays. The established “fault simulation–risk quantification–system reconfiguration” framework provides an engineering reference for resilience-oriented design and proactive risk management of metro braking systems and other critical systems.

Keywords: metro vehicle; braking system; single-point failure; system analysis; risk assessment; system optimization

在超大规模城市轨道交通网络中, 车辆制动系统不仅承担行车安全的终极保障功能, 也是制约高密度、准点化运营能力的关键系统。与传统以安全裕度为核心的设计范式不同, 当前地铁运营环境更强调在复杂工况与部件退化条件下的系统韧性与故障可控性。既有制动系统故障分析、可靠性研究和城市轨道交通车辆制动技术研究表明, 制动系统的单点失效往往并非直接导致制动能力丧失, 而是通过气路耦合、信号误判或人机交互缺陷被放大为运营级事件^[1-4]。

2025年4月10日, 北京地铁2号线T436车发生总风泄漏并造成运营延误。现场排查确认, 故障原因为1号车制动控制单元内部排风电磁阀异常, 阀体持续漏风。该事件暴露出制动系统在故障预警、应急处置和系统设计等方面的突出问题: ①故障点识别困难。漏风点位于阀体内部, 持续漏风导致地面维修人员难以快速定位故障点, 且人机界面(human-machine interface, HMI)无相关故障提示, 增加了应急处置难度; ②应急处置效率低下。现有应急处置措施针对整车设计, 缺乏针对单节车的快速隔离方案, 停放缓解拉环布置在车下需两侧操作, 小限界和三轨供电环境进一步增加正线处置难度; ③维护策略缺少明确依据。阀体内部故障难以通过现有例行检查手段提前识别, 维修周期和检测标准需进一步细化。

针对上述真实运营事件反映出的风险识别和工程降险问题, 现有研究多从可靠性计算、制动系统原理、单一部件故障机理或预测诊断方法展开^[1-9], 但是结合真实运营场景, 对“故障如何被放大”以及“如何在更不更换核心部件的前提下实现系统性降险”缺乏系统论证。如文献[1]对城轨车辆制动系统常见故障进行了分析, 但未深入到具体型号系统; 文献[2]探讨了制动系统可靠性提升方法, 但对人机交互与应急处置的协同优化关注不足; 文献[3]对HMI在应急场景下的关键作用以及从系统设计源头进行风险预防等方面关注不足。

本文将真实故障事件、系统分解、FMEA/FTA风

险量化和工程优化验证相贯通, 形成面向在役车辆改造的闭环分析方法。具体来说, 以北京地铁某进口制动系统故障事件为牵引, 首先解析单点故障在制动系统内部的传播路径与放大机制; 其次识别软件逻辑、气路结构和HMI交互之间的耦合风险; 最后以最小结构改动和软件逻辑重构为约束, 提出并验证可工程实施的系统降险措施。

1 风险识别方法与分析方法

为确保风险识别的全面性与科学性, 本文采用一套定性分析与定量验证相结合的综合系统性分析流程。该流程是一个以系统思维为指导, 层层递进、循环迭代的有机整体, 其核心在于打通从“系统分解”到“实验验证”再到“风险闭环”的全链条。风险分析的流程图如图1所示。

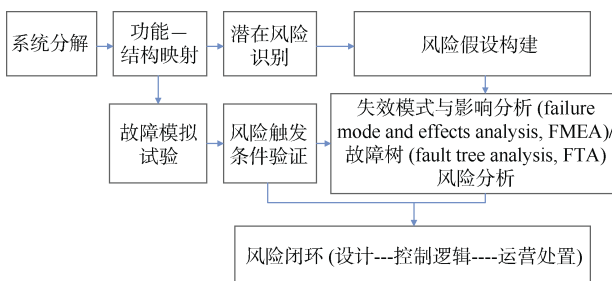


图1 风险分析的流程

Figure 1 Flowchart of Risk Analysis

1.1 系统分解与功能-结构映射

采用自顶向下的系统分解方法, 将制动系统划分为车辆总风路系统、单车总风路系统、空压机风路系统、常用制动风路系统、空簧风路系统等子系统, 并建立功能-结构映射关系, 以识别潜在的跨子系统耦合风险。

通过对每个子系统的功能分析和故障模式推导, 系统识别潜在风险点。以停放制动系统为例, 其原设计中将停放制动缸直接连接至总风管路, 当总风管路发生意外泄漏且压力降至停放制动施加压力时, 整车

停放制动会自动施加，极大影响了运营效率。相比之下，优化后的设计将停放制动管路连接至制动风缸，通过单向阀隔离，可显著降低总风泄漏对停放制动的影

1.2 实车故障模拟与风险触发验证

通过静态与动态故障注入方式，模拟关键阀件断电、泄漏及信号异常工况，验证风险触发条件及其对牵引、制动和车门系统的连锁影响。测试内容包括：

- 1) 静态测试：车辆静止状态下，分别断开网关阀(Gate Valve)、智能阀(Smart Valve)和 RIO 阀(Remote I/O Valve)电源，观察系统响应；
- 2) 动态测试：列车运行过程中，模拟单阀断电故障，记录对牵引、制动、开关门等功能的影响。

故障模拟测试法按照标准流程进行，如图 2 所示。

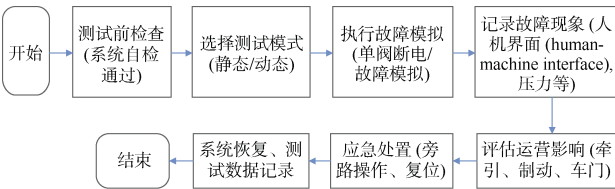


图 2 制动系统故障模拟测试流程

Figure 2 Test Process of Braking System Fault Simulation

通过系统化的故障模拟，不仅能够验证已知风险，还能发现制动系统与整车其他系统接口间的潜在问题，为后续优化提供了数据支持。

1.3 风险量化与闭环定义

结合失效模式与影响分析(failure mode and effects analysis, FMEA)、故障树分析(fault tree analysis, FTA)方法，对识别风险进行严重度、发生度与可探测度量化评估，并将结果直接映射至设计或逻辑优化措施，形成可实施的风险闭环。

2 关键风险机理分析

2.1 制动控制阀内部失效的系统放大效应

结合制动系统原理、FTA 分析和本次实车模拟结果可知，排风电磁阀卡滞虽属于部件级故障，但在现有气路拓扑下可迅速演化为整列总风压力下降，进而触发停放制动施加，构成典型的结构性放大路径^[5-6, 10-13]。

2.1.1 排风电磁阀卡滞风险

排风电磁阀机械卡滞是导致列车总风泄漏的主要风险。当电磁阀发生卡滞，会导致阀体持续漏风，进而引起总风压力下降。基于 2025 年 4 月 10 日事件处置记录、TCMS 故障日志、地面检修记录和故障阀

体拆解结果，对总风泄漏类故障进行归类统计与原因复核后发现，此类故障具有以下特点：①隐蔽性强。阀体自身无法识别故障，无法自动切除处置，造成整车故障影响；②影响广泛。单个阀体故障可导致整车总风压力下降，引发多车制动故障；③诊断困难。制动系统无明确故障提示，不利于应急故障处置。

通过对故障阀体的拆解分析，发现电磁阀卡滞主要有如下原因：①杂质侵入。制动空气中含有的微小颗粒物进入阀体内部，导致电磁阀运动部件卡滞；②磨损老化。长期使用后电磁阀部件磨损，增加了卡滞概率；③环境因素。高湿度、温度变化等环境因素加速阀体部件老化。

2.1.2 阀体功能失效模式

除排风电磁阀卡滞外，制动控制阀还存在其他功能失效风险，主要包括：电磁阀常关闭导致制动无法正常施加；电磁阀长排风导致总风持续泄漏；电磁阀保压失效导致制动压力无法保持，影响制动效果。

每种失效模式对制动系统的影响不同，其风险等级和检测方法也各异。表 1 总结了制动控制阀主要失效模式及影响。

表 1 制动控制阀主要失效模式及影响
Table 1 Main failure modes and effects of the brake control valve

失效模式	故障表现	对制动系统的影响	风险等级
排风电磁阀卡滞	总风持续泄漏	总风压力下降，停放制动意外施加	高
电磁阀常关闭	制动无法施加	制动力不足，影响停车精度	高
电磁阀长排风	制动无法保持	制动力衰减，存在安全风险	中
电磁阀保压失效	制动压力下降	制动力不足，影响运营安全	中
压力传感器故障	压力读数错误	错误的状态判断和故障诊断	中

2.2 总风-停放制动耦合风险

制动系统风路是传递制动动力的关键途径，风路设计的合理性直接影响到制动系统的可靠性和故障容错能力。通过对北京地铁各线路制动系统风路的分析，识别出原设计中停放制动直接取风于总风管路，缺乏物理隔离，是导致故障跨车辆扩散的关键结构缺陷。

2.2.1 总风路泄漏风险

总风路作为制动系统的动力源，其泄漏会导致全列车制动性能下降甚至失效。通过对北京地铁 2 号线、10 号线、3 号线和 15 号线车辆制动风路原理图、辅助

控制模块布置图及停放制动供风路径进行逐项比对,并结合城市轨道交通车辆制动技术和车控/架控制动系统研究^[4,10],发现早期设计的线路(如2号线、10号线)在总风路隔离方面存在不足,而新设计线路(如3号线、15号线)则考虑了更好的隔离措施。

2.2.2 停放制动风路设计缺陷

原停放制动风路设计将停放制动缸直接连接至总风管路,存在如下缺陷:①无故障隔离。总风压力下降时,全列车停放制动同时施加;②缺乏冗余。无备用风源,一旦总风泄漏即导致停放制动无法缓解;③影响运营。正线处置需逐车操作停放缓解拉环,处置时间较长。

相比之下,优化后的设计将停放制动风路经单向阀连接至制动风缸,并利用单向阀将制动风缸与总风路隔离。当总风泄漏时,制动风缸能够在短时间内保持可用压力,停放制动施加范围被限制在故障车或故障转向架,避免故障扩散至整列车;同时,司机和调度人员可获得更充裕的定位与隔离处置时间,从而降低对运营的影响。

2.3 制动-TCMS 接口与 HMI 认知偏差

制动系统与整车其他系统通过硬线信号接口交互,这些接口的可靠性直接影响整车性能。通过实车断开相应控制信号进行故障模拟测试,发现零速信号与停放制动状态信号在不同线路配置不一致,易导致 HMI 显示与真实状态不符,增加司机认知负荷与误操作风险。

2.3.1 零速信号接口

零速信号是制动系统判断车辆状态的重要依据,用于控制停放制动施加/缓解逻辑。零速信号异常可导致错误的状态判断、影响开关门、牵引封锁等问题。经进一步将实车故障进行模拟测试发现,不同线路的零速信号接口设计存在差异,3号线、6号线、15号线等线路在网关阀断电后会影响到零速信号,导致无法正常开门,需使用零速旁路。

2.3.2 停放制动状态信号

停放制动状态信号用于向 TCMS 传递停放制动施加/缓解状态。该信号异常可能导致状态显示错误、错误故障诊断、影响运营决策等问题。经实车故障模拟测试数据显示,6号线在 MP 车 1 架 RIO 阀断电后,HMI 显示停放施加但实际无停放制动施加;亦庄线在 TC 车 2 架 RIO 阀断电后,HMI 显示停放制动不缓解。这些误报信息将严重干扰司机的正常判断和应急处置。

3 系统优化策略

3.1 软件与控制逻辑优化

针对识别出的软件风险点,对制动系统相应软件进行优化,优化方案涵盖自检功能、故障诊断逻辑和系统交互等方面。

3.1.1 构建 HMI 可触发制动系统自检与预动作机制

针对 10 号线 I 期、II&III 期及亦庄线车辆缺乏 HMI 触发制动系统自检功能的问题,增加了通过 TCMS 触发制动系统自检的功能。自检内容包括防滑功能、紧急制动及常用制动功能测试。为提高自检通过率,增加了自检预动作功能:当车辆发送自检开始指令后,制动系统软件会驱动制动阀提前执行充排气动作,使制动阀内部的相关部件处于预备完毕状态,提高后续系统自检的通过率。

3.1.2 引入制动风缸低压的前馈诊断与制动可用性重构逻辑

当制动阀发生“制动风缸压力低故障”时,将对转向架的常用制动设为不可用状态。软件优化后,阻止制动阀或下游设备发生故障时对总风压力的影响。

制动风缸压力低诊断是识别总风泄漏的关键手段。通过进行参数调整,将 2 号线的“制动风缸压力低”诊断设定值由 5.5 bar 调整为 6.5 bar,提高诊断灵敏度;通过逻辑优化,将检测到“制动风缸压力低”车辆转向架的常用制动设为不可用状态。

3.1.3 设计制动不缓解自复位功能

制动不缓解故障主要由内部电磁阀的偶然性卡滞引起。通过增加制动不缓解后的复位动作,可消除因电磁阀偶然卡滞导致的制动不缓解故障。

3.2 气路结构重构

基于 2 号线故障案例,本文提出了制动系统风管路优化设计方案,核心是避免或降低因总风意外泄漏对运营的影响。

3.2.1 优化原理

2 号线车辆原设计方案如图 3(a)所示,停放制动缸的压缩空气直接取自列车总风管路。一旦总风管路发生意外泄漏,风压降至停放制动施加阈值时,整列车的停放制动将自动施加。优化后的方案如图 3(b)所示,将停放制动缸的管路改接至制动风缸,由于制动风缸与总风之间设有单向阀,当总风压力意外降低时,列车停放制动不会立刻施加,且故障影响被局限在故障车范围内,避免了影响扩大。

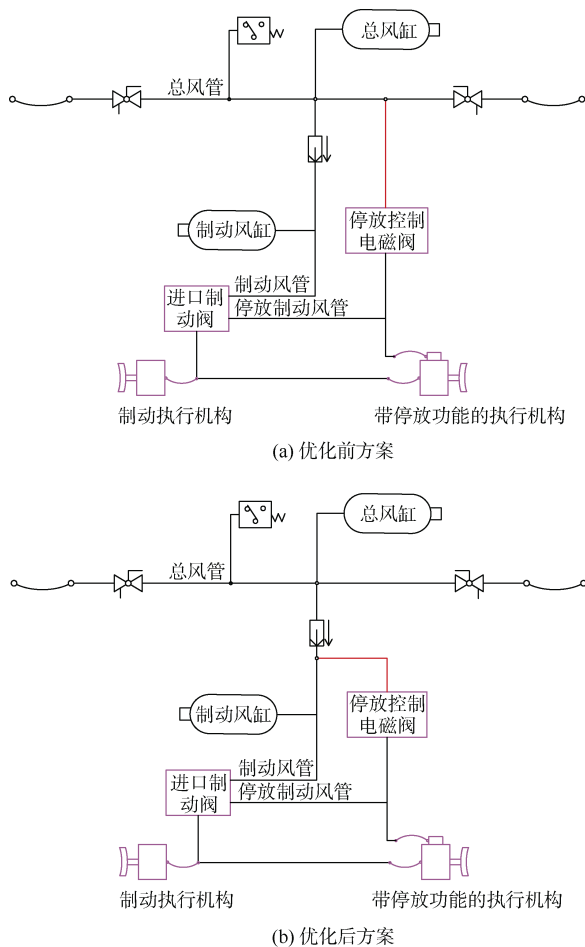


图3 优化前后方案对比

Figure 3 Comparison of the original and optimized solutions

3.2.2 实施方案

针对不同线路的辅助控制单元配置，制定了不同的实施方案。

1) 地铁2号线实施方案。地铁2号线项目通过调整辅助控制模块中设备的布置，将隔离塞门与单向阀互换位置，实现停放制动缓解压缩空气取自制动风缸。该方案仅需改动辅助控制模块内两个阀的位置，无需改动车辆管路，改动量小且可实施性强。

2) 地铁6号线增购、亦庄线增购实施方案。增购车采用与2号线地铁相同的辅助控制模块，同样可以通过调整隔离塞门与单向阀的位置实现优化。

3.3 面向运营的故障分级与交互优化

本文建立TCMS三级故障分级与差异化HMI提示机制，使技术状态直接映射为运营处置策略。

3.3.1 TCMS故障代码分级优化

对北京地铁现有车型的TCMS故障代码分级情况进行梳理和统计，制定统一的TCMS故障代码分级原

则和标准，对制动系统故障提示内容和分级进行优化，提高司机处理效率。故障分级标准如下：

- 1) 一级报警。列车安全功能缺失或服务能力严重下降，影响运营安全或服务，需疏散乘客并退出服务；
- 2) 二级报警。列车服务能力部分下降，影响运营服务，维持运行至终点站后退出服务(设备复位或处置有效可继续运营)；
- 3) 三级报警。列车服务能力下降但不影响运营服务，允许完成全天运行计划后退出服务(不在主界面提示)。

优化后的制动系统故障分级标准如表2所示。

表2 制动系统故障分级标准
Table 2 Braking system failure classification standard

故障等级	判定标准	影响程度	HMI提示方式	处置建议
一级	安全功能缺失(如制动不缓解)	需疏散乘客，退出服务	红色弹窗+声光报警	立即停车，请求救援
二级	服务能力下降(如单转向架失效)	维持运行至终点站	黄色弹窗	运营后检修，制动力补偿有效
三级	轻微异常(如阀维修警告)	不影响运营	后台记录，不弹窗	完成全天运营后检修

3.3.2 总风压力低预警信息

当总风压力低于750kPa时，车辆HMI屏上红色弹窗提醒司机注意风压和空压机运行状态，辅助司机提前识别总风泄露或空压机运行异常故障，为应急处置争取宝贵时间。

3.3.3 故障点定位优化

利用制动系统“制动风缸压力低”故障代码作为总风泄露故障点的监测手段，并将该逻辑优化集成至地面专家系统中。当发生总风泄露故障时，调度中台的车辆调度员可对正线司机提供应急故障处置支持，辅助司机快速定位漏风点。

4 实施效果与验证

4.1 测试数据对比分析

通过实车故障模拟测试，对比优化前后制动系统在单点故障下的表现。测试选取2号线、10号线为样本，进行网关阀(GV阀)断电、智能阀(SV阀)断电和远程输入/输出阀(RIO阀)断电3种典型单点故障测试。表3展示了关键测试数据对比结果。

由表3可知，优化措施实施后，制动系统3类典型单点故障的识别准确率分别提高39.3%、34.2%和29.3%，平均提高34.3%；应急处置时间分别减少4.7、2.8和

表 3 优化前后单点故障测试数据对比结果

Table 3 Comparison of single-point failure test data before and after the optimization

测试指标	TC 车网关阀(GV 阀)			T 车智能阀(SV 阀)			RIO 阀		
	准确率/%	处置时间/min	影响程度	准确率/%	处置时间/min	影响程度	准确率/%	处置时间/min	影响程度
优化前	58.3	12.5	清客救援	62.1	8.7	限速运行	65.4	6.3	晚点
优化后	97.6	7.8	维持运行	96.3	5.9	正常运营	94.7	4.5	正常运营
改善量	+39.3	-4.7	显著改善	+34.2	-2.8	显著改善	+29.3	-1.8	显著改善

1.8 min, 平均减少 3.1 min, 对运营的影响程度显著降低。表中准确率改善量按百分数表示, 处置时间改善量按优化后较优化前减少的分钟数表示。

4.2 系统自检功能验证

对新增的 HMI 可触发制动系统自检功能进行验证, 采用“正常触发-条件缺失-结果校核”的测试步骤: 首先在车辆静止状态下由 HMI 发送制动系统自检指令, 记录防滑、紧急制动和常用制动测试的启动状态、执行反馈及故障代码; 其次分别模拟自检允许条件不满足、关键阀件反馈异常等场景, 检查系统是否中断自检并给出一致提示; 最后将 HMI 自检结论与 TCMS 日志、制动系统事件记录及地面检测结果进行比对。验证结果显示: 自检功能在满足所有条件时能够可靠触发; 自检过程中任一条件不满足时自检中断; 自检结果与实际系统状态一致。上述测试流程和结果表明, 系统自检功能提高了制动系统的可测试性和可维护性, 有利于早期故障发现和预防。

4.3 风管路优化效果验证

采用人工排风方式在实车上模拟总风泄漏故障, 验证风管路优化方案的有效性。试验结果显示: 优化前, 当总风泄漏至 6.5 bar 时, 全列车停放制动自动施加; 优化后, 总风泄漏至 6.5 bar 时, 仅故障车停放制动施加, 其他车辆正常。

5 结论

本文针对北京地铁制动系统故障问题, 采用系统分析和风险分析方法, 深入剖析了制动系统在部件、软件、人机交互和应急处置等方面的风险点, 提出并实施了一系列优化措施, 得出以下结论:

1) 通过实车故障模拟测试, 对比优化前后制动系统在单点故障下的表现。结果显示, GV 阀、SV 阀和 RIO 阀 3 类典型单点故障的识别准确率分别提高 39.3%、34.2%和 29.3%, 说明该方法能够有效发现制动控制阀排风电磁阀卡滞、风管路设计缺陷和关键信号接口异常等关键风险点。

2) 提出的软件优化方案, 包括 HMI 可触发的制动系统自检、常用制动可用状态逻辑优化、制动风压

低诊断优化、制动不缓解自复位功能等, 可提高制动系统的自我诊断和容错能力。自检验证表明, 在条件满足时系统能够可靠触发, 在条件不满足时可准确中断, 且自检结果与 TCMS 日志和地面检测结果一致。

3) 建立的 TCMS 故障代码分级体系和 HMI 预警提示, 结合制动切除塞门改移等人机交互优化, 可以显著提高应急处置效率。3 类典型故障的处置时间分别减少 4.7、2.8 和 1.8 min, 平均减少 3.1 min; 总风泄漏至 6.5 bar 时, 优化前为全列车停放制动自动施加, 优化后仅故障车停放制动施加, 故障影响范围明显缩小。

4) 形成的“故障模拟-风险量化-系统重构”方法框架, 不仅适用于制动系统, 也可推广至车辆其他关键系统的风险管理, 为提高城市轨道交通车辆可靠性提供了系统性的解决方案。

本文仅对城市轨道交通车辆停放制动系统的气路设计优化及故障点定位方法进行了研究, 体现了从被动应对向主动预防、从单点整改向系统优化、从技术改进向人机协同的转变, 为提高车辆可靠性和运营效率提供了理论和实践参考。后续将继续跟踪优化措施的实施效果, 不断完善与调整方案, 并将经验推广至其他关键系统, 持续提升北京地铁车辆装备的可靠性与安全性。

参考文献

[1] 许钰文. 城轨车辆制动系统常见故障分析与处理[J]. 中国机械, 2023(10): 96-99.

[2] 郭锐辛. 地铁列车制动系统可靠性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.

Guo Ruixin. Reliability research on metro train braking systems[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.

[3] 匡如华. EP2002 制动系统及其在城轨车上的应用[J]. 机车电传动, 2009(5): 33-35.

Kuang Ruhua. EP2002 break system and its application on urban rail vehicle[J]. Electric Drive for Locomotives, 2009(5): 33-35.

[4] 吴萌岭, 裴玉春, 严凯军. 我国城市轨道交通车辆制动技术的现状与思考[J]. 机车电传动, 2006(1): 1-5.

Wu Mengling, Pei Yuchun, Yan Kaijun. Current situation and thoughts of braking technology for domestic mass urban transit vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2006(1): 1-5.

(下转第 169 页)

- 轨道交通短时进站客流预测[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(5): 76-83.
- Shuai Chunyan, Xie Yawei, Shan Jun, et al. Prediction of short-term inbound passenger flow of urban rail transit based on the singular spectrum analysis and support vector regression model[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(5): 76-83.
- [7] 杨越迪, 潘保霏, 刘军, 等. 多分辨率多粒度时空特征提取的轨道交通短时 OD 客流预测方法[J]. 铁道学报, 2024, 46(11): 1-11.
- Yang Yuedi, Pan Baoifei, Liu Jun, et al. A short-term OD passenger flow prediction method for rail transit based on multi-resolution and multi-granularity spatio-temporal feature extraction[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(11): 1-11.
- [8] 杜姿晨, 郑长江, 郑树康, 等. 基于 ResNet-GCN-Transformer 的多时间粒度地铁短时客流预测[J]. 交通运输工程与信息学报, 2026, 24(1): 64-79.
- Du Zichen, Zheng Changjiang, Zheng Shukang, et al. ResNet-GCN-Transformer-based prediction of short-time passenger flow for multi-time granularity subway[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2026, 24(1): 64-79.
- [9] Lu Wenbo, Zhang Yong, Vu H L, et al. A novel integrative prediction framework for metro passenger flow[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2026, 30(3): 490-515.
- [10] 刘晓磊, 段征宇, 余庆, 等. 基于图卷积循环神经网络的城轨客流预测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 21-27.
- Liu Xiaolei, Duan Zhengyu, Yu Qing, et al. Passenger flow forecast of urban rail transit based on graph convolution and recurrent neural network[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(3): 21-27.
- [11] Liu Yang, Liu Zhiyuan, Jia Ruo. DeepPF: a deep learning based architecture for metro passenger flow prediction[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 101: 18-34.
- [12] 李卓, 李怡, 巨玉祥, 等. 结合时序直觉模糊粗糙集和 TCN-BiGRU 的城市轨道交通客流预测[J]. 兰州交通大学学报, 2025, 44(5): 107-116.
- Li Zhuo, Li Yi, Ju Yuxiang, et al. Integration of temporal intuitionistic fuzzy rough sets and TCN-BiGRU for urban rail transit passenger flow forecasting[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2025, 44(5): 107-116.

(编辑: 傅依萱)

(上接第 152 页)

- [5] 孙波. 克诺尔空气制动系统原理分析[J]. 铁道技术监督, 2014, 42(6): 46-48.
- Sun Bo. Analyzing the principles of knorr air braking system[J]. Railway Quality Control, 2014, 42(6): 46-48.
- [6] 赵文文, 魏晓东, 陈特放. 基于 FTA 和模糊 Petri 网的城轨列车制动系统可靠性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1158-1166.
- Zhao Wenwen, Wei Xiaodong, Chen Tefang. Reliability analysis of urban rail train braking system based on FTA and fuzzy Petri net[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(5): 1158-1166.
- [7] 张济民, 刘志刚, 沈霞. 基于深度学习的轨道交通制动系统故障预测与健康研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(3): 1-15.
- Zhang Jimin, Liu Zhigang, Shen Xia. Review of fault prediction and health management for rail transit braking systems based on deep learning[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(3): 1-15.
- [8] 胡辉, 王俊, 蔡煜. 基于数据驱动的城轨车辆制动系统状态评估与剩余寿命预测[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(1): 145-154.
- Hu Hui, Wang Jun, Cai Xuan. Data-driven condition assessment and remaining useful life prediction of urban rail vehicle braking systems[J]. China Railway Science, 2023, 44(1): 145-154.
- [9] 李国栋, 陈小平, 杨帆. 基于数字孪生的高速列车制动系统故障诊断方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 43-52.
- Li Guodong, Chen Xiaoping, Yang Fan. Fault diagnosis method for high-speed train braking systems based on digital twin[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 43-52.
- [10] 王寿峰, 徐广增. 城轨车辆车控制动系统与架控制动系统对比分析[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(1): 114-117.
- Wang Shoufeng, Xu Guangzeng. Contrastive analysis between vehicle control brake system and bogie control brake system of urban rail vehicle[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(1): 114-117.
- [11] 杜守忠, 吴志明. EP2002 制动系统的控制过程研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2013, 36(4): 35-38.
- Du Shouzhong, Wu Zhiming. Control process study of brake system EP2002[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2013, 36(4): 35-38.
- [12] 万宇. 广州地铁 4 号线列车 EP2002 制动系统介绍及故障分析[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(6): 65-69.
- Wan Yu. EP2002 brake control system introduction and failure analysis for Guangzhou line No.4[J]. Railway Locomotive & Car, 2010, 30(6): 65-69.
- [13] 史富强. 西安地铁 1 号线车辆 EP2002 制动系统[J]. 电子设计工程, 2013, 21(24): 187-190.
- Shi Fuqiang. Xi'an Metro Line 1 vehicle braking system of EP2002[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(24): 187-190.

(编辑: 王艳菊)