

地铁列车气制动不足故障分析及优化方案

黄慧建 蒲安会 黄 行 倪展鹏 胡玉洁 付 亮

(宁波市轨道交通集团有限公司运营分公司, 315100, 宁波)

摘 要 [目的] 当前, 地铁列车在采用 ATO (列车自动驾驶) 模式正线运行并完成站点停车后, 轨道交通信号系统需确认列车所有制动已施加信号被优先采集, 以确保乘客安全, 随后方可发出车门开启指令。若无法发出开门指令, 车门系统将无法实现联动开启, 这对列车正线运营造成了显著影响。因此, 有必要寻求新的优化方案用以提升列车运营服务质量。[方法] 以宁波轨道交通 4 号线列车在正线运营过程中因制动未施加而导致车门无法联动开启的实际故障案例为研究对象, 从列车开门逻辑、制动控制原理、故障上报逻辑及数据等多个维度进行深入剖析, 旨在探索有效的优化方案。同时, 结合多次试验, 对优化方案的可行性与可靠性进行验证。[结果及结论] 在制动系统方面, 通过优化制动软件, 改进了故障上报机制, 显著降低了故障上报率; 同时, 完善了故障情况下的制动施加机制, 有效减轻了该类故障对运营造成的负面影响。在 LCU (逻辑控制单元) 方面, 优化后的 LCU 软件改进了对所有制动已施加信号的输出逻辑, 成功避免了因制动问题导致的列车车门无法联动开启的故障。多次试验结果表明, 该优化方案有效降低了故障影响, 显著提升了地铁列车运营的可靠性及服务质量, 具有较高的实际应用价值。

关键词 地铁列车; 制动未施加; 制动控制原理; 车门联动; 软件优化; 可靠性

中图分类号 U260.13⁺8; U231

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.03.042

Fault Analysis and Optimization Scheme of Insufficient Air Braking in Metro Train

HUANG Huijian, PU Anhui, HUANG Xing, NI Zhanpeng, HU Yujie, FU Liang

(Operation Branch of Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315100, Ningbo, China)

Abstract [Objective] Currently, when metro trains operate on mainline tracks under the ATO (automatic train operation) mode and stop at stations, the rail transit signaling system must confirm that all braking signals are applied previously before issuing a door-opening command, which ensures passenger safety. Failure to issue this command would prevent the door system from opening in coordination, significantly impacting mainline train operation. Therefore, it is essential to explore new

optimization solutions to enhance train operational service quality. [Method] Using a real fault case on Ningbo Rail Transit Line 4 as research object, where a train door failed to open in coordination due to unapplied braking during mainline operation, the problem is analyzed from multiple dimensions, including train door-opening logic, braking control principles, fault reporting logic, and data. The goal is to develop effective optimization solutions. The feasibility and reliability of the proposed solutions are verified through multiple trials. [Result & Conclusion] In the braking system, the optimization of braking software improves the fault reporting mechanism, significantly reducing the fault reporting rate. Additionally, enhancements to the braking application mechanism in fault scenarios effectively mitigate the negative impact of such faults on operations. For the LCU (logic control unit), the optimized software improves the output logic of the 'all braking applied' signal, successfully preventing door coordination failures caused by braking issues. Results from multiple trials demonstrate that the optimization scheme significantly reduces fault impacts, improves the reliability of metro train operations, and enhances service quality, showcasing a high practical value.

Key words metro train; unapplied braking; braking control principle; train-door linkage; software optimization; reliability

宁波轨道交通历经 10 年运营实践, 现已迈入网络化运营新阶段, 其提供的舒适乘坐环境与高正点率深受市民喜爱, 地铁出行已成为宁波市民的首选交通方式。这一转变对地铁列车运行可靠性及运营服务质量提出了更为严格的要求。

制动系统作为地铁列车的核心组成部分, 对列车的运行状态、正点率、可靠性及服务质量具有决定性影响^[1]。宁波轨道交通列车通常采用架控方式, 在 ATO (列车自动驾驶)、ATP (列车自动保护) 系统或司控器的控制下, 实现单次或阶段性制动与缓解响应, 并通过硬线和网络冗余技术确保制动力管理的可靠性^[2]。

本文针对宁波轨道交通 4 号线 (以下简称“4 号线”) 自开通以来频繁出现的气制动不足导致车门

无法联动故障进行深入剖析。通过对制动原理和故障上报逻辑的研究,提出了针对性的优化措施,并通过试验测试验证了优化效果。

1 故障现象

4 号线 04003 和 04008 列车在正线运营过程中,多次出现到站停车后车门与站台门无法联动开启的问题。两车 HMI(人机交互界面)均显示,各自第 5 节车厢第 2 架制动系统(以下简称“5 车 2 架”,余类同)的制动力不足,导致列车需进行清客处理。经检查,发现故障原因为 040035 车、040085 车 2 架智能阀内部的 A2 电磁阀存在故障,无法正常施加或缓解制动力。

2 原理分析

2.1 气制动原理分析

地铁列车制动方式包括动态制动(电制动)和摩擦制动两种。本文重点探讨摩擦制动中的气制动方式,其包括紧急制动、常用制动、保持制动和快速制动等多种形式,但最终控制的制动机构均为摩擦制动闸瓦机构。制动控制单元模块内包含 2 组功能完全相同的阀组 { A8、A2、B6、B3 (→箭头围成的组合) 和 A3、A9、B4、B7 阀 (---> 箭头围成的组合) }, 可根据不同的制动级别产生相应的制动缸压力。图 1 为 PBCU(制动控制气动单元)的原理图。

针对制动控制单元内由 A8、A2、B6、B3 构成的一组阀的功能进行详细阐述,内容如下:

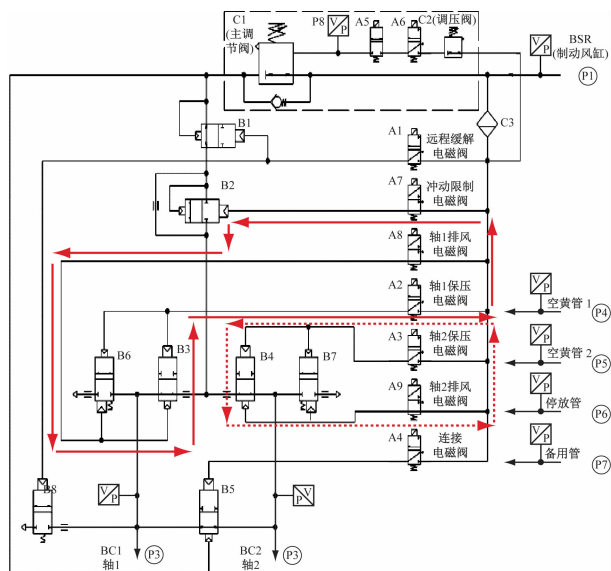
1) 在充风阶段,电磁阀 A8 与 A2 处于失电状态,阀 B6 闭合,而阀 B3 开启,从而实现向制动缸充风。

2) 排风阶段,电磁阀 A8 与 A2 通电,导致阀 B6 开启,阀 B3 则关闭,制动缸内的风通过阀 B6 排出。

3) 在保压阶段,电磁阀 A2 通电,而电磁阀 A8 失电,此时阀 B6 与阀 B3 均处于关闭状态,制动缸维持保压状态。

2.2 列车开门原理分析

4 号线列车车门的开启需同时确保门允许信号、零速信号及开门指令 3 个条件的有效性。在正线 ATO 驾驶模式下, 开门指令与门允许信号由 ATC 车载设备提供, 而零速信号则由列车制动系统提供。目前, 4 号线列车正线车门采用半自动模式运行, 即列车到站后, 在门允许信号、零速信号及开



注: A5、A6—电子称重阀; B1、B8—远程缓解气控阀; B2—冲动限制气控阀; B3、B6 与 B4、B7—制动控制气控阀; B5—连通气控阀; P1 至 P8—压力传感器。

图 1 PBCU 原理图

Fig. 1 Diagram of PBCU (pneumatic brake control unit) principle

门指令均处于正常状态下,车门将自动开启,同时,站台门也在信号系统的控制下实现联动开启。

3 故障原因分析

3.1 车门无法联动原因分析

为确保列车到站后的可靠停稳,列车需施加保持制动。若制动系统中存在单个制动控制单元故障,导致该单元被制动系统导向缓解(即强迫缓解)或施加制动速度较慢时,将无法及时或完全输出所有制动已施加信号至信号系统。信号系统在列车停稳后,需在有限的时间窗口内(1 s)接收并处理这些信号,以输出门允许及开门指令。然而,由于制动控制单元的故障,信号系统可能无法在规定时间内接收到所有必要的制动信号,进而影响其正常输出开门指令,最终导致列车车门无法自动打开。

LCU(逻辑控制单元)负责采集车辆所有制动施加信号,并将这些信号以硬线形式发送给ATC(列车自动控制)车载设备。该硬线信号的接收是信号系统执行开门操作的条件之一。当制动控制单元发生故障时,其制动施加状态的信号可能无法正常输出或存在延时输出,这将导致ATC车载设备无法及时接收到完整的制动信号,或接收到的信号存在延迟。这种情况将直接影响信号系统对车门

联动开启的控制,最终导致车门无法按时联动开启。电气原理图如图 2 所示。

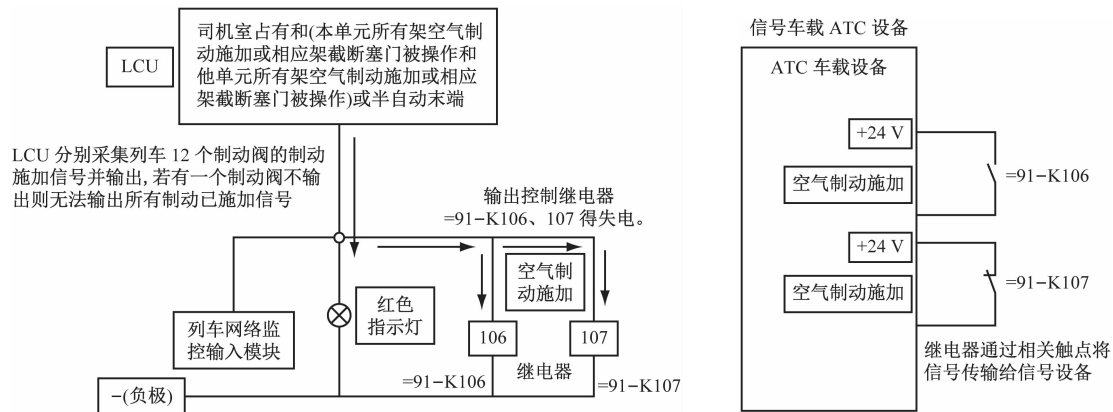


图 2 电气原理图

Fig. 2 Diagram of electrical principle

分析 04003 列车故障数据记录,结果显示在 08:56:45 时刻列车到站并稳定停车后 1 s,列车 LCU 未能向信号系统输出完整的制动施加硬线信息,因此在 ATO 模式下,列车车门未能自动开启。对于 04008 列车,故障数据分析指出,列车在停车后正常施加保持制动,并随后施加最大常用制动。此时,5 车 1 架 BCP(制动缸压力)为 202 kPa,第 2 架 BCP 值为 245 kPa,显示出异常制动行为。在后续动车过程中,5 车 2 架 BCP 无法正常缓解,随后被强制缓解并不再参与制动。此外,LCU 后续未能向信号系统输出完整的制动施加硬线信号,导致在 ATO 模式下车门无法自动打开。

3.2 制动力不足原因分析

制动力不足故障的判断逻辑具体为:

1) 当 BCP 目标值超过 160 kPa,而实际值低于 80 kPa 持续超过 3.5 s 时,系统将报告制动力不足故障;

2) 当 BCP 实际值恢复到 120 kPa 以上时,故障状态将被消除。

分析 04003 列车数据发现,在故障发生时,04003 列车 5 车 2 架的 BCP 值远低于设定值,仅为 17 kPa。经过 7 s 后,BCP 完成充风,压力值恢复正常。与此同时,同一时刻 04003 列车 4 车 1 架、2 架的 BCP 值分别为 214 kPa,均符合规定要求。由于 04003 列车 5 车 2 架的 BCP 值远低于设定值,而其他转向架的 BCP 值处于正常范围,因此 HMI 报告了 04003 列车 5 车 2 架气制动不足的故障条目,如图 3 所示。

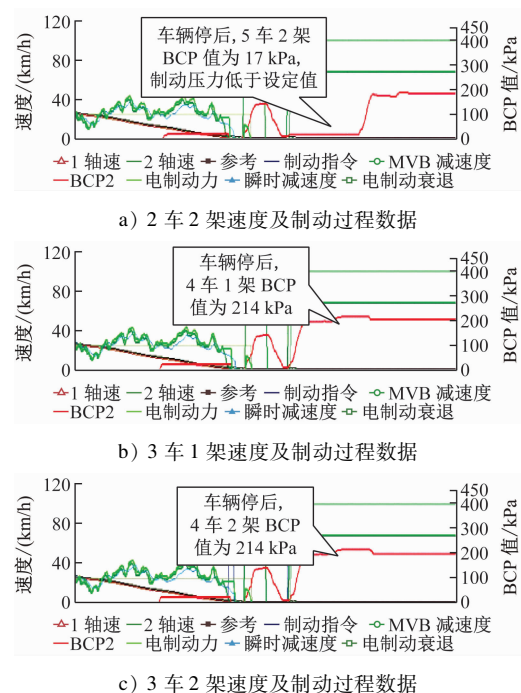
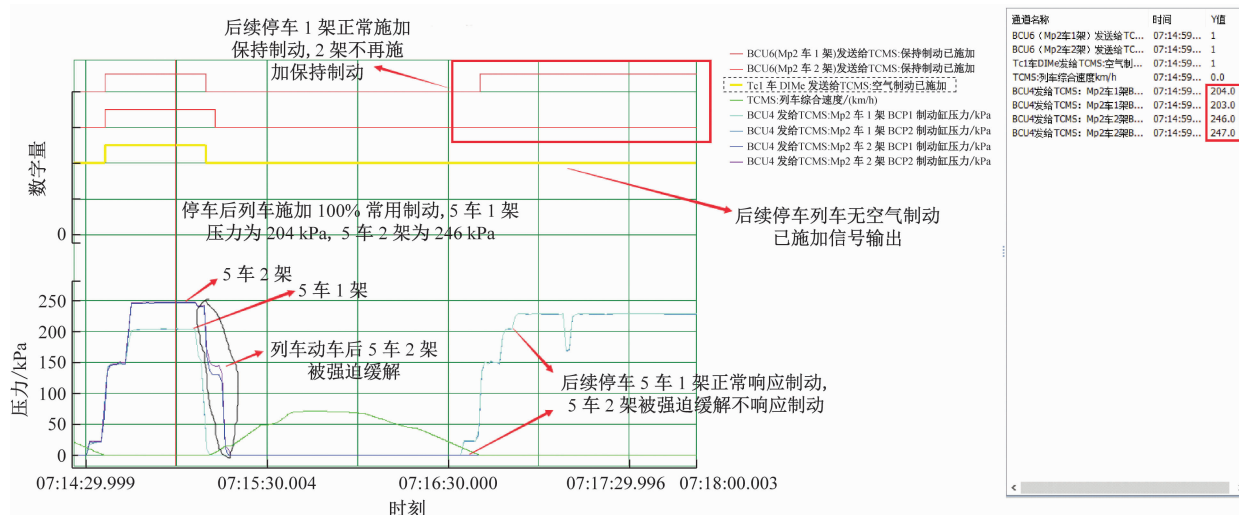


图 3 转向架 BCP 值

Fig. 3 Bogie BCP (brake cylinder pressure) value

分析 04008 车数据,发现故障时刻,04008 车 5 车 2 架的 BCP 值为 240 kPa。当车辆开始牵引后,BCP 开始缓解,但在压力下降过程中,两制动缸 (BCP1 和 BCP2) 之间出现了 15 kPa 的压力差。直至 BCP1 压力降至 130 kPa,BCP2 值降至 145 kPa 时,两制动缸的压力保持平衡。经过 3 s 后,当车速达到 12 km/h 时,BCU(制动控制单元)判断 5 车 2 架制动未缓解,随后对 5 车 2 架的 BCP 进行了强制缓解。此时,BCP 逐渐降至 0,并且后续不再参与制动。故障时刻数据如图 4 所示。



注: M_p —有受电弓的动力车; T_c —带司机室的拖车; Y值—表格里每一个量在当前时刻下的实际值。

图4 故障时刻数据

Fig. 4 Fault timing data

在车辆回库后,对04003车5车2架的智能阀进行检查,发现A2电磁阀在从得电状态变为失电状态时存在延时或不动作的情况。进一步拆解电磁阀发现,阀芯存在磨损现象。因此,确定故障原因为A2电磁阀内部阀芯动作不灵活。

同样,对04008车5车2架的智能阀进行检查时,发现A2电磁阀线圈绕组的阻值异常。该A2电磁阀线圈绕组的阻值为359.2 Ω ,而正常的线圈绕组阻值应在280.0 Ω ($\pm 5\%$)范围内。线圈阻值的增大导致电流不足,无法产生足够的磁场力,从而使得阀芯动作不到位,无法执行相应的动作。

在更换04003车5车2架和04008车5车2架的A2电磁阀后,制动系统自检成功,动车测试未发现异常,且HMI未报告任何故障。

4 优化措施

在地铁车辆的运行过程中,若在无电制动力和闸瓦热容量效应的条件下发生管路泄漏、制动控制单元检测到内部传感器数据异常、排风电磁阀异常排风等一种或多种制动控制系统故障时,为避免故障扩大对车辆运行造成重大影响,制动控制系统将采取功能修改措施,以发挥系统降级模式下的最佳性能。具体而言,系统会控制故障转向架的常用制动不再施加制动力,并由其他转向架进行制动力补偿^[3],以满足列车的正常停车需求。

目前,4号线列车在切除转向架制动力时的限速规定如下:

- 1) 切除1个转向架制动力,限速70 km/h。
- 2) 切除2个转向架制动力,限速60 km/h。
- 3) 切除3个转向架制动力,限速45 km/h。
- 4) 切除4个转向架制动力,牵引封锁。

结合上述故障案例,单个转向架气制动故障的上报逻辑存在进一步优化的空间。

4.1 制动系统软件优化

针对故障案例,列车在到站后及制动自检时分别出现了BCP值过低和BCP值过低无反馈的情况。因此,制动系统可进行以下优化:

1) 在AW0(列车空载)运行工况下,施加保持制动时,若BCP目标值低于100 kPa且实际值低于70 kPa持续时间超过3.5 s,则上报制动力不足故障。当实际BCP值高于90 kPa后,故障消失,以降低延迟施加对制动状态的影响。

2) 空气制动施加硬线输出的判断条件修正为:当本架BCP制动缸压力大于40 kPa时,判断为施加状态。

3) 空气制动缓解硬线输出的判断条件修正为:当本架BCP制动缸压力小于25 kPa时,判断为缓解状态。

当制动控制模块检测到某架出现制动力不足故障且当前压力控制阀组充风故障时,立即启用另一组阀组继续执行制动控制指令,并关闭故障阀组。直到列车进行制动自检或制动控制模块重新上电重启时,制动系统会对故障阀组进行重新检测或故障判断。

4.2 LCU 软件优化

LCU 在采集所有制动控制单元的制动施加信号后,将制动施加的硬线信号发送给 ATC 车载设备,该信号是车门打开的必要条件。鉴于 1 列车共有 12 个制动控制单元,对所有空气制动已施加的输出逻辑进行了以下优化:

1) 在列车占有时,整列车转向架空气制动施加数量应大于等于 9。

2) 在列车占有且半自动末端启动时,本单元转向架空气制动施加数量应大于等于 5。

该优化考虑了故障制动阀无制动力的情况,即列车可能缺失部分制动力。然而,经过计算,在损失部分气制动力后,列车仍能可靠运行。在 AW0 (空载)和 AW3 (满座 + 9 人/m²,超常载荷)运行工况下,最大常用制动力和保持制动力的参数如表 1 所示。

表 1 最大常用制动力和保持制动力分析

Tab. 1 Analysis of maximum common braking force and holding braking force

工况	制动力/kN								坡道最大 下滑力/kN
	最大常用				保持制动				
	无故障	1 个转向架	2 个转向架	3 个转向架	无故障	1 个转向架	2 个转向架	3 个转向架	
AW0	241.0	221.0	201.0	181.0	168.7	154.7	140.7	126.7	83.6
AW3	377.1	345.7	314.3	282.9	264.0	242.0	220.0	198.0	116.0

制动计算结果显示,在损失 3 个转向架后,可施加的保持制动力仍远大于列车在 35‰坡道上停稳所需的最大下滑力。在 AW0 和 AW3 工况下使用保持制动力停车的安全系数分别为 1.52 和 1.71,列车仍能满足正线停稳需求^[4]。

5 结语

目前,制动系统和 LCU 的优化措施已得到有效实施,跟踪效果良好。4 号线列车正线运行稳定,未因制动故障导致晚点和清客事件,正线运行可靠度得到充分保障。此外,制动力不足故障的上报及时准确,为列车检修提供了重要信息,确保了列车检修响应的及时性、隐患排查的迅速性和故障处理的准确性。本文所述的优化措施经实践证明是有效且可靠的,为列车制动故障处理提供了一种新的思路,具有重要的实际意义。

参考文献

- [1] 别必龙,田凯阳,蒲安会,等. 地铁列车备用制动施加原因分析及优化方案[J]. 轨道交通装备与技术, 2024(5): 37.
BIE Bilong, TIAN Kaiyang, PU Anhui, et al. Analysis of the causes of backup braking application of metro vehicles and its optimi-

zation scheme[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2024(5): 37.

- [2] 王鹏飞,李小亮. 城轨列车制动系统正线故障应急处理措施研究[J]. 内燃机与配件, 2019(21): 24.
WANG Pengfei, LI Xiaoliang. Study on emergency treatment measures of main line fault of urban rail train braking system[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(21): 24.
[3] 李靖,郭明月. 地铁车辆制动系统常见故障处理与分析[J]. 科技风, 2022(3): 91.
LI Jing, GUO Mingyue. Treatment and analysis of common troubles in braking system of metro vehicles[J]. Technology Wind, 2022(3): 91.
[4] 黄慧建,蒲安会,倪展鹏,等. 地铁列车制动未缓解导致牵引封锁故障分析及优化方案[J]. 铁道车辆, 2024, 62(4): 172.
HUANG Huijian, PU Anhui, NI Zhanpeng, et al. Fault analysis and optimization solution for traction locking caused by unreleased brake of subway train[J]. Rolling Stock, 2024, 62(4): 172.

· 收稿日期:2022-12-12 修回日期:2024-03-26 出版日期:2025-03-10
Received:2022-12-12 Revised:2024-03-26 Published:2025-03-10
· 第一作者:黄慧建,高级工程师,171348912@qq.com
通信作者:蒲安会,工程师,550739994@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

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com