

北京地铁 S1 线磁浮列车制动不缓解 原因分析及改进措施

罗铁军 刘中华 杜慧杰 谢春杰

(中车唐山机车车辆有限公司, 063035, 唐山)

摘要 [目的] 北京地铁 S1 线磁浮列车在运营期间发生了列车制动不缓解故障, 对该线的正常运营产生了一定的影响。为此, 需要找出该故障的确切原因, 并提出改进措施。[方法] 简述了北京地铁 S1 线列车的制动控制系统工作原理。利用鱼骨图分析法, 梳理出引发该线列车制动不缓解的 8 项主要原因, 并列出了各项原因的诱发因素。结合列车故障的实际情况, 进一步梳理出该线列车制动不缓解故障的原因集合。使用排查法, 确定了该线列车制动不缓解的根本原因。对电磁阀本身特性进行分析, 采取了相应的改进措施。[结果及结论] 该线列车 PBCU (气动制动控制单元) 中 EP (充排气电磁阀) 模块发生电磁阀卡滞, 是导致列车制动不缓解的根本原因。将原有的美国 MAC 电磁阀公司生产的平衡式电磁阀替换为德国 NASS Magnet 公司生产的截止式电磁阀后, 有效解决了该线列车的制动不缓解故障。**关键词** 北京地铁 S1 线; 列车制动不缓解; 鱼骨图; 电磁阀卡滞

中图分类号 U292.91⁺7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.04.041

Cause Analysis and Improvement Measures for Maglev Train Brake Release Failure in Beijing Subway Line S1

LUO Tiejun, LIU Zhonghua, DU Huijie, XIE Chunjie

(CRRC Tangshan Co., Ltd., 063035, Tangshan, China)

Abstract [Objective] The maglev train of Beijing Subway Line S1 had a brake release failure during operation, impacting line normal operation. Therefore, it is necessary to find out the exact cause of the fault and put forward improvement measures. [Method] The working principle of the train brake control system of Beijing Subway Line S1 is briefly described. By using fishbone diagram analysis method, eight main causes of train brake release failure are identified, and the triggers of each cause are listed. Considering the actual situation of train fault, the cause set of train brake release on this line is further sorted out, and the root cause of train breaking failure on this line is determined using investigation method. The characteris-

tics of solenoid valve are analyzed and corresponding improvement measures are taken. [Result & Conclusion] The solenoid valve stuck in EP (electro-pneumatic solenoid valve) module of train PBCU (pneumatic brake control unit) on this line is the root cause for train brake release failure. After replacing the balanced solenoid valve produced by MAC Valves, Inc. in the United States with the stop solenoid valve produced by German NASS Magnet GmbH, the train brake release failure on this line is effectively tackled.

Key words Beijing Subway Line S1; train brake release failure; fishbone diagram; solenoid valve stuck

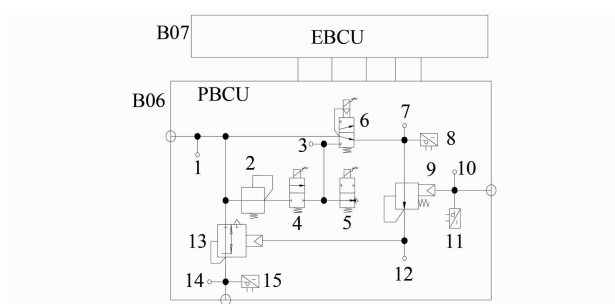
列车制动作为列车运行控制的核心技术, 是列车运行的安全保障。制动不缓解是列车常见的故障之一。制动不缓解, 是指制动指令下达后制动力在一定时间内不能达到缓解规定值, 进而造成列车不能正常运行。

北京地铁 S1 线 (以下简称“S1 线”) 是北京市首条采用磁浮制式开通运营的地铁线路。本文针对 S1 线磁浮列车在运营过程中出现的制动不缓解问题进行故障原因分析, 在此基础上结合现场故障现象识别故障点, 梳理得到部件故障的原因集合, 进而确定故障的根本原因。最后通过优化部件选型, 解决了该线路列车制动不缓解问题。

1 S1 线列车制动控制系统概述

S1 线列车制动系统在每辆车上均单独设有 1 套制动控制装置, 该装置主要包括 EBCU (电子制动控制单元) 和 PBCU (气动制动控制单元)。其中: PBCU 是由 EP (充排气电磁阀) 模块 (包括充气电磁阀、减压阀、排气电磁阀)、紧急电磁阀、中继阀、空重车阀及压力传感器等组成。一般情况下, 该型列车发生制动不缓解, 大多是由于制动控制装置故障引起。S1 线列车的制动控制工作原理如图 1 所示。

列车常用制动时, PBCU 根据 EBCU 传来的电信号, 通过 EP 模块中的充气电磁阀和排气电磁阀,



注: B06—PBCU 编号; B07—EBCU 编号; 1、3、7、10、12、14—压力测试接口; 2—减压阀; 4—充气电磁阀; 5—排气电磁阀; 6—紧急电磁阀; 8、15—压力传感器; 9—空重车阀; 13—中继阀。

图1 S1线列车的制动控制原理示意图

Fig. 1 Diagram of brake control principle of Line S1 train

将来自制动储风缸的压缩空气转换成与电信号相对应的预先控制压力(以下简称“预控压力”),然后预控压力经紧急电磁阀到达空重车阀(常用制动时这2个阀均开启状态,阀门完全打开,流体可以自由通过阀门)。从空重车阀出来的预控压力到达中继阀后,将打开中继阀中制动储风缸与制动缸的通路,最后使制动缸获得符合制动力要求的压力。

列车紧急制动时,串联入紧急环路的紧急电磁阀失电,制动储风缸内的压缩空气通过紧急电磁阀直接到达空重车阀。在空重车阀的调整下,可输出与列车载荷相匹配的紧急制动预控压力,用以控制

中继阀动作,进而打开制动储风缸与制动缸的通路,使制动缸获得符合制动力要求的压力。

列车制动缓解时,EBCU接收列车发出的缓解指令,控制PBCU中EP模块打开排气电磁阀、关闭充气电磁阀。预控压力经排气电磁阀排入大气中,以控制中继阀动作,切断制动储风缸与制动缸通路,打开制动缸与大气的通路,此时制动缸压缩空气排入大气中,从而实现列车的制动缓解。

2 磁浮列车制动不缓解原因解析

2.1 采用鱼骨图进行原因分析

针对S1线磁浮列车制动不缓解故障,本文采用鱼骨图进行原因分析。采用鱼骨图有利于分析出故障的根本原因,鱼骨图有3种类型:问题型、原因型及对策型。本文采用原因型鱼骨图对S1线磁浮列车制动不缓解故障的原因进行追踪分析,形成引发该列车制动不缓解的原因集合,再通过列车实际反馈的故障现象进一步进行分析判断,从而找出针对该列车制动不缓解的故障原因。

根据列车制动控制的工作原理,本文梳理出引发列车制动不缓解的8项主要原因。针对这8项原因进行深层次剖析,分别列出了各项原因的诱发因素,如图2所示。

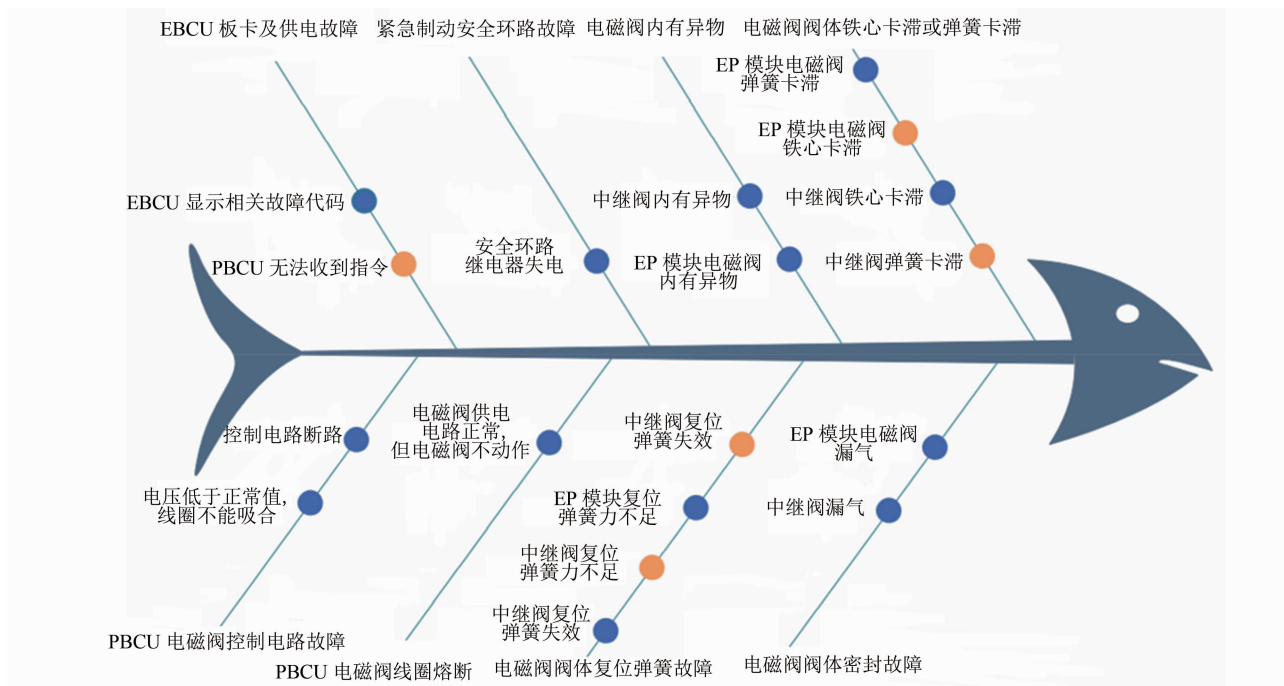


图2 S1线列车制动不缓解的原因型鱼骨图

Fig. 2 Fishbone diagram of reasons for Line S1 train brake release failure

2.2 故障现象分析

对 S1 线磁浮列车制动不缓解的故障进行数据统计,其故障现象包括:①预控压力值下降缓慢;②目标压力为 0、预控压力不为 0(其软件界面截图见图 3);③预控压力曲线成波齿状(其软件界面截图见图 4);④预控压力远大于制动缸压力;⑤制动缸压力不为 0、预控压力不为 0。



图 3 目标压力为 0、预控压力不为 0 的故障界面截图

Fig. 3 Fault interface screenshot with target pressure equal to 0 and pre-control pressure unequal to 0



图 4 预控压力曲线成波齿状的故障界面截图

Fig. 4 Fault interface screenshot of pre-control pressure curve in jagged and wavy form

由故障现象反馈可以发现:故障集中在预控压力上。EP 模块的主要功能是调节预控压力,因此结合鱼骨图的分析结果,可以初步认为该线磁浮列车制动不缓解故障是由 EP 模块故障引起。

2.3 确定故障点

由图 4 可知:EP 模块引起制动不缓解的故障集合为{电磁阀控制电路故障,电磁阀线圈熔断,电磁阀异物卡滞,电磁阀铁心卡滞,电磁阀复位弹簧卡滞,电磁阀复位弹簧力不足,电磁阀复位弹簧失效,电磁阀漏气}。结合 EP 模块故障集合,逐个排查故障原因,并确定故障点。

1) 对电磁阀控制电路和电磁阀自身阻值进行了测量,检测结果为电路及阻值均良好。

2) 对故障列车进行制动与缓解试验,发现该制动不缓解故障属偶发性故障。

3) 对发生故障的电磁阀进行了阀体检测(检测台见图 5),检测内容包括得电保压试验和失电保压试验。检测结果为:得电保压试验中,充气电磁阀 3 min 内的泄漏量为 1 kPa。失电保压试验中,充气电磁阀 3 min 内的泄漏量为 2 kPa。电磁阀试验均合格。



图 5 电磁阀阀体检测台实物图

Fig. 5 Photo of solenoid valve test bench

排查了上述故障原因后,可以判断出引起 S1 线列车制动不缓解故障的原因是电磁阀卡滞(其诱发原因可能是异物卡滞、铁心卡滞或弹簧卡滞)。

2.4 改进措施

解决电磁阀卡滞问题需要从两点出发:一是电磁阀阀体结构,即确保其可靠性;二是电磁阀运用时间,即确保其寿命。

从电磁阀的结构原理出发对电磁阀进行了阀体切割(见图 6),发现美国 MAC 公司生产的电磁阀

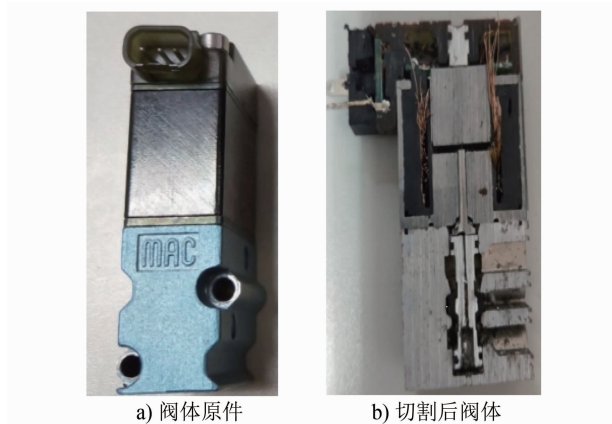


图 6 美国 MAC 公司生产的电磁阀阀体切割现场图

Fig. 6 Site picture of physical valve cutting of solenoid valves produced by MAC Valves Inc. in U.S

(以下简称“MAC 电磁阀”)属于平衡式阀芯,其结构是上下 2 个 D 型圈(动密封圈),且中间硫化橡胶的密封面比较大。这种动密封圈结构在高频使用时容易发生卡滞现象。此外,随着运营使用时间的增加,硫化橡胶密封面会出现老化现象,这也可能导致卡滞现象的发生。

对此故障,本文制定的解决方案为:用德国 NASS Magnet 公司生产的截止式电磁阀(以下简称“NASS 电磁阀”)代替 MAC 电磁阀。S1 线列车正常工作压力为 850~1 000 kPa,更换电磁阀后需去除减压阀,以优化阀体结构。MAC 电磁阀和 NASS 电磁阀主要的性能参数对比如表 1 所示。

表 1 MAC 电磁阀和 NASS 电磁阀的主要性能参数对比

Tab. 1 Comparison of main performance parameters between MAC solenoid valve and NASS solenoid valve

电磁阀类型	直流电压/V	功率/W	有效通径/mm	响应时间/ms	最大工作压力/kPa	绝缘电阻/MΩ	耐压等级/V	防护等级	最低工作温度/℃	最高工作温度/℃
MAC 电磁阀	24	9.6	2.8	<10	800	≥100	AC 750	IP65	-25	60
NASS 电磁阀	24	4.5	1.2	<10	1 000	≥100	AC 750	IP65	-40	70

从使用时间来看,随着列车运营时间增加,其故障率也逐年增加,因此可判断 MAC 电磁阀并不适用于高频使用的列车。

NASS 电磁阀的优点如下:①NASS 电磁阀为截止式电磁阀,其密封效果较好(密封面均为静密封且口径较小),不易发生老化现象,且其使用寿命长、可靠性高,适用于高频使用的列车;②NASS 电磁阀采用直接面板式连接,不需要气管和接头,其产品更整洁,性能更稳定,还可以在抗粉尘污染的环境使用。

目前 S1 线采用 ATO(列车自动运行)驾驶、人工停车的模式,因此,更换为 NASS 电磁阀后不需要更新列车的制动控制程序和制动逻辑。如该线后续推进 ATO 驾驶、自动停车模式,则可以在更换 NASS 电磁阀时,同步更新调试相关程序及逻辑。

将 MAC 电磁阀更换为 NASS 电磁阀后,对两种电磁阀压力曲线进行了检测,其软件监测界面截图如图 7 及图 8 所示。

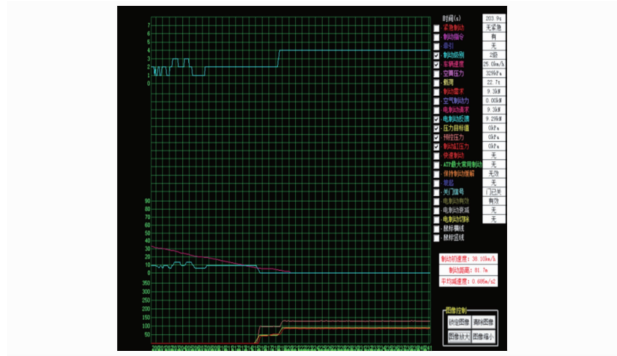


图 7 NASS 电磁阀压力曲线监测界面截图

Fig. 7 Screenshot of NASS solenoid valve pressure curve monitoring interface

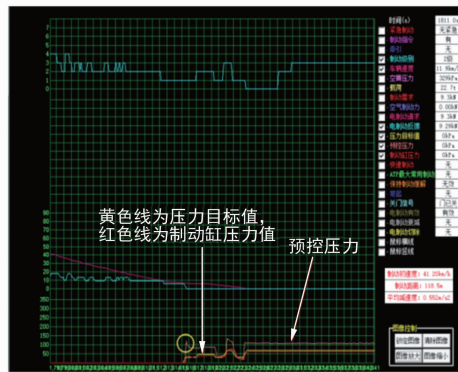


图 8 MAC 电磁阀压力曲线监测界面截图

Fig. 8 Screenshot of MAC solenoid valve pressure curve monitoring interface

由图 7、图 8 可知:①二者的制动缸压力响应无明显区别;②在预控压力上,由于 MAC 电磁阀的通路略大,压力上升时可能存在冒尖现象(图 8 的圆圈处);③与 MAC 电磁阀相比,NASS 电磁阀的预控曲线更为平滑。由此可认为,将 MAC 电磁阀替换为 NASS 电磁阀后,能够有效解决该故障。

3 结语

本文采用原因型鱼骨图分析方法,总结了引发北京地铁 S1 线磁浮列车制动不缓解故障的原因集合。结合故障实际情况采用排查法,确定了该线列车制动不缓解的根本原因。在对电磁阀本身特性进行分析后,将原有 MAC 电磁阀更换为更适用于该线列车运行的 NASS 电磁阀,从而有效解决了该线列车制动不缓解故障。本文对列车故障的分析思路及解决措施,可为此类列车的故障和后续的设计选型提供参考。

(下转第 224 页)

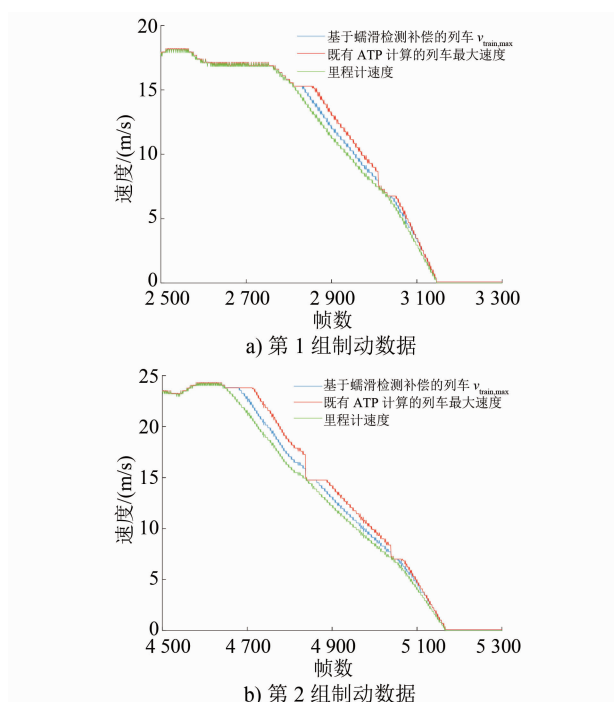


图6 两组制动数据的速度补偿结果对比

Fig. 6 Comparison of velocity compensation results of two braking data sets

用雷达最大参考速度判断轮轴蠕滑状态,对小蠕滑状态下的里程计速度采取较小的补偿策略。对现场试验数据的验证结果证明,该列车测速方法可提高ATP在制动阶段的速度测量精度。

参考文献

- [1] 张梁. 列车组合测速定位方法及其安全评估研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.

ZHANG Liang. Research on multi-sensor fusion algorithm for train positioning and safety assessment[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.

- [2] 王义惠, 罗仁士, 曹芳, 等. 铁路避撞系统 RCAS 的关键问题研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 46.

WANG Yihui, LUO Renshi, CAO Fang, et al. Research on the key issues of railway collision avoidance system[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(6): 46.

- [3] 刘江, 蔡伯根, 王剑. 基于卫星导航系统的列车定位技术现状与发展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(11): 4033.

LIU Jiang, CAI Baigen, WANG Jian. Status and development of satellite navigation system based train positioning technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(11): 4033.

- [4] 周达天. 基于多传感器信息融合的列车定位方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.

ZHOU Datian. Research on multi-sensor information fusion based train location method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.

- [5] 崔科, 董德存. 列车组合测速系统安全完整性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(7): 56.

CUI Ke, DONG Decun. Analysis of the safety integrity in integrated train speed measurement system[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(7): 56.

· 收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-12-30 出版日期:2024-04-10

Received:2022-09-29 Revised:2022-12-30 Published:2024-04-10

· 第一作者:赵旻杰,高级工程师,zminjie@metro.sh.cn

通信作者:郭子明,工程师,ilysunying@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 219 页)

参考文献

- [1] 王群伟. 城市轨道交通车辆制动系统制动不缓解故障分析[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(6): 116.

WANG Qunwei. Analysis of brake relief fault in metro vehicle controlled brake system[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(6): 116.

- [2] 吴萌岭, 陶再坤, 田春, 等. 中继阀泄漏引起常用制动不缓解故障特征分析[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1864.

WU Mengling, TAO Zaikun, TIAN Chun, et al. Fault characteristic analysis of service brake not releasing caused by relay valve leakage[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34

(8): 1864.

- [3] 魏灿刚, 安震, 郭宗斌. 城市轨道交通车辆用紧急阀故障分析及改进措施[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(4): 94.

WEI Can'gang, AN Zhen, GUO Zongbin. Fault analysis of urban rail vehicle emergency valve and improvement measures[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(4): 94.

· 收稿日期:2021-12-23 修回日期:2022-03-22 出版日期:2024-04-10

Received:2021-12-23 Revised:2022-03-22 Published:2024-04-10

· 通信作者:罗铁军,高级工程师,j18731585960@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