

# 苏州轨道交通 1 号线列车空调系统高压故障分析及对策

黄 升

(苏州轨道交通运营有限公司运营一分公司,215101,苏州//工程师)

**摘 要** 目的:2019 年苏州地铁 1 号线列车空调系统高压故障频发,导致可上线列车数的减少及乘客投诉的增加,需找出故障的原因,并制定相应的改进措施。**方法**:基于列车空调发生高压故障常见故障原因开展初步排查,排除了部分故障因素;结合 2019 年 1 号线发生的 19 次列车空调高压故障发生的时段、日期及地点,对空调机组故障时的热负荷、外部温度及列车运行环境等因素开展进一步分析。找到故障原因后,提出了列车空调系统的优化及改进措施。**结果及结论**:故障的直接原因是隧道内局部区域的空气对流不佳。隧道整体环境温度越高,空调系统压力升高至超过高压开关动作阈值所需的时间越短,发生高压故障的概率就越高。在综合考虑了可行性和经济性后,采用了优化空调控制逻辑、控制列车在存车线停留时空调的开启时长这 2 项对策。经过运营验证,这 2 项对策有效杜绝了 1 号线因局部位置失去列车运行气流造成的空调高压故障。

**关键词** 城市轨道交通;列车空调系统;高压故障;隧道环境;空调控制逻辑

**中图分类号** U270.383

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.11.031

## Analysis and Countermeasures for High-voltage Faults in the Air Conditioning System of Suzhou Rail Transit Line 1

HUANG Sheng

**Abstract** Objective: In 2019, high voltage faults occurred frequently in the air conditioning system of Suzhou Metro Line 1 trains, resulting in a decrease of operational train number and an increase of passenger complaints. It is necessary to identify the cause of the faults and develop appropriate improvement measures. Method: Focusing on the common causes of high-voltage faults in train air conditioning, preliminary investigations are carried out and some causes are ruled out. Combining the time, date, and location of 19 train air conditioning faults on Line 1 in 2019, the heat load, external temperature, and train operating environmental factors of the air conditioning unit faults are analyzed in-depth. To identify the causes of the faults, optimization improvement measures are proposed. Result & Conclusion: The direct cause of the malfunction is

poor air convection in local areas of the tunnel. The increase of the overall ambient temperature within the tunnel and decrease of the time required to exceed the threshold for high-pressure switch action due to higher system pressure, results in a higher probability of high-pressure failures. After considering feasibility and cost-effectiveness comprehensively, two strategies are adopted: optimizing air conditioning control logic and controlling the duration of air conditioning activation when the train is parked at the storage line. After operational verification, these two strategies effectively prevented air conditioning high-pressure failures caused by the loss of train airflow in certain locations along Line 1.

**Key words** urban rail transit; train air conditioning system; high voltage fault; tunnel environmental; air conditioning control logic

**Author's address** No. 1 Operation Branch of Suzhou Rail Transit Operation Co., Ltd., 215101, Suzhou, China

苏州轨道交通 1 号线(以下简称“1 号线”)是苏州市第一条建成运营的城市轨道交通线路,于 2012 年 4 月 28 日开通试运营。该线全长 25.7 km,共设置 24 座车站,全线均为地下线路。1 号线呈东西走向,起于吴中区的木渎站,止于苏州工业园区的钟南街站。该线未设停车场,在钟南街站西部终端设有一段存车线。

## 1 1 号线列车空调系统高压故障概述

1 号线采用 4 节编组 B2 型列车,开通时配置 25 列列车(车号为 0101—0125)采用定频空调,后续增购的 22 列列车(2016 年起上线运营,车号为 0126—0147)改用变频空调。这 2 种空调的结构一致,输出参数相同,每节车厢均安装了 2 台顶置式空调机组。空调机组的制冷量均为 37 kW,分别布置在车顶的两端。空调机组的外部结构如图 1 所示,冷凝进风口设在车顶的中部,出风口设在车顶的两侧。

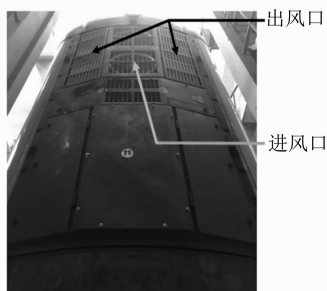


图 1 1 号线列车顶置式空调机组实物图

Fig. 1 Photo of the overhead air conditioning unit for Line 1 trains

图 2 为 2012—2019 年 1 号线列车空调系统发生高压故障及低压故障的统计数据。

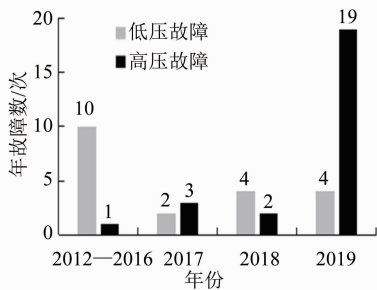


图 2 1 号线列车空调发生高压故障及低压故障的统计数据 (2012—2019 年)

Fig. 2 Statistical data of high voltage and low voltage faults in the air conditioning system of Line 1 trains (2012—2019)

由图 2 可知:

1) 2012—2016 年,列车低压故障的次数较多,其原因主要为制冷剂不足、制冷剂泄露及蒸发器清洁不到位等;高压故障仅发生 1 次(经确认为压力开关故障所致)。

2) 2017 年起,列车空调高压故障数开始增多,并于 2019 年出现了爆发式增长;2019 年累计发生了 19 次列车空调高压故障,累计涉及故障的空调机组近 30 台。此故障在初期呈现的现象为车辆屏空调图标显黄,故障对应位置的空调系统制冷能力下降或不制冷。

列车若带着故障持续运营,可能会进一步发展为整个车厢两侧不制冷甚至多节车厢不制冷。按照列车故障的处置要求,同一列车内如有 2 台空调同时发生故障,列车须下线退出运营,这将导致可上线列车数的减少。此外,空调故障导致列车客室温度升高,影响了乘客的乘坐舒适性,进而导致乘

客投诉的增加。为此,需找出列车空调高压故障的具体原因,并制定对应的解决措施。

## 2 1 号线列车空调高压故障原因

### 2.1 列车空调高压故障原因初步排查

列车空调发生高压故障,其常见的故障原因主要有:①冷凝器积灰,影响热交换;②制冷剂充注过量或混有杂质;③冷凝风机故障或风量不足;④制冷剂管道堵塞;⑤高压开关故障。

1 号线在 2019 年夏季的较短时间内连续发生了多起列车空调系统的高压故障。从故障现象看,列车回库后重启空调控制器,再次开机测试,该故障未快速复现;该型列车的空调机组已运营多年,基本不存在制冷剂充注过量的问题。因此,故障原因首先考虑冷凝器积灰,但对冷凝器进行强化清洁后,仍发生了多起列车空调高压故障。进一步对故障空调机组的冷凝风机、高压开关及制冷剂管路进行检查,这些设备均无异常。

列车空调系统高压侧过压故障属于制冷剂循环系统问题,该故障的影响因素较多。在排除了常规的设备故障原因后,将故障排查的焦点放在压缩机及空调机组的整体性能上。对制冷工况下故障机组压缩机的电流进行检测,测试得到的工作电流为 10.5~13.2 A(该空调机组额定工作电流为 11.6 A、最大工作电流阈值为 15.6 A),属正常范围数值。再对故障机组进行制冷性能抽检,测得结果为:制冷量为 36.3 kW,极限工况试验最大进风温度为 46.8℃(该空调机组标准制冷量为 37.0 kW,最大进风温度为 48.0℃),由此可判定空调机组的整體制冷性能良好,并无明显衰减。因此,排除了空调机组设备原因造成高压故障多发的可能性。

### 2.2 空调高压故障原因具体分析

结合 1 号线 2019 年发生的 19 次列车空调高压故障发生的时段、日期及地点,对空调机组故障时的热负荷、外部温度及列车运行环境因素开展进一步分析。

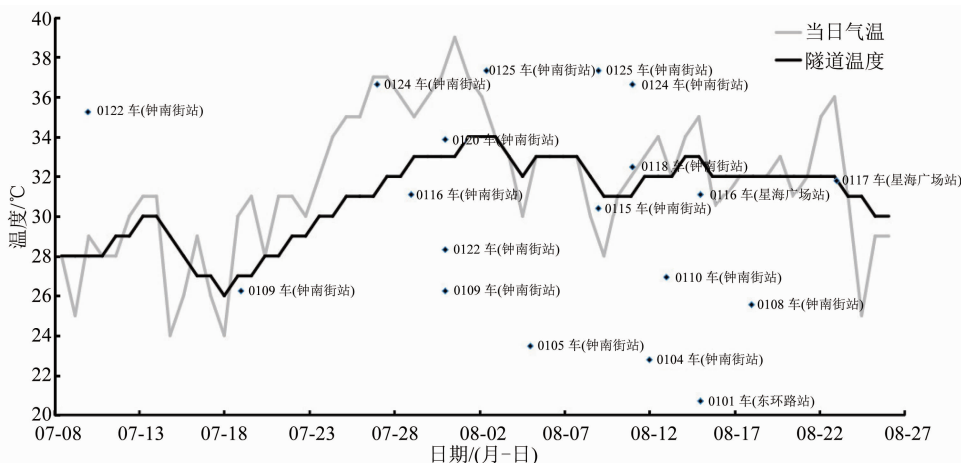
#### 2.2.1 故障时段分析

经分析,2019 年 1 号线的 19 次列车空调高压故障中,10 次发生在乘客数量较多的早晚高峰时期,9 次发生在乘客数量较少的临近收发车时段,因此,1 号线列车空调高压故障与热负荷(即乘客数量)无直接关联。

### 2.2.2 故障日期分析

根据历年来苏州市的气温情况,每年的 7 月份和 8 月份苏州市平均气温达到年度最高值。图 3 为 2019 年 1 号线空调高压故障发生的日期、地点及对应的隧道环境温度截图。由图 3 可知:1 号线列车空调高压故障均发生在 7 月份和 8 月份,且隧道温

度越高,故障发生频次越多。虽然 1 号线均为地下线路,但由于夏季并未全面开启隧道排热风机,列车空调机组外部的隧道环境温度会随着外界气温逐渐积累上升。隧道外部环境温度升高,导致空调机组散热效率降低。因此,推断 1 号线列车空调高压故障与隧道整体环境温度有关。



注:以 0122 车为例,该车在 7 月 10 日在钟南街站发生列车空调高压故障,当日钟南街站前后区间对应的隧道环境温度最高值约为 28℃,当日苏州市平均气温最大值约为 29℃。余类同。

图 3 1 号线空调高压故障发生的日期、地点及对应的隧道环境温度截图(2019 年)

Fig. 3 Screenshot of the date, location, and corresponding tunnel ambient temperature of the high-voltage fault in the air conditioning system of Line 1 (2019)

### 2.2.3 故障地点分析

由图 3 还可看出:列车空调高压故障发生地点中,有 16 次故障发生在 1 号线东侧的终点站——钟南街站(该站线型包括了折返线及存车线),另外 3 次故障所在车站与钟南街站的间隔车站数均小于 10 个站,由此可认为故障发生地点均集中在钟南街站附近。因此,推断钟南街站的列车运行环境对空调高压故障影响较大。

经研究发现,城市轨道交通线路地下隧道空间相对较狭小,列车车顶距隧道顶部的距离仅为 600~700 mm。由于空间受限,列车空调机组两侧冷凝器出风口的热风易回流至顶部进风口,使得列车空调机组外部散热气流“短路”,进而导致空调机组顶部进风温度过高。

经排查,为应对客流增加,1 号线于 2016 年底开始缩短了发车间隔,采用早晚高峰前从钟南街站存车线发车的方式。因此,列车需在该站停放较长时间或低速折返,而列车静止或低速折返时车顶没有了较大的运行气流,易导致列车空调机组散热气流形成“短路”。

据悉,广州地铁和深圳地铁部分线路上也曾发

生过类似的故障。1 号线运营方调研、学习了广州地铁和深圳地铁相关的故障案例。图 4 为广州某地下地铁线 2018 年夏季部分运营时段列车空调实时进风温度统计数据截图。由图 4 可知:列车空调机组未开启时,空调机组外部温度等于隧道环境温度,约为 31.0℃;列车空调机组开启后,空调机组外部温度变化呈锯齿状,空调机组运行期间其外部温度的平均值为 34.2℃;列车停站期间,空调机组外部温度立即升高,其最大值达 53.9℃。

参照广州地铁的故障案例,苏州地铁运营方在 1 号线列车空调机组进风口处粘贴了温度贴,测得部分故障机组进风口处温度的最大值达 56.0℃。此温度值已超出定频空调极限工况(外部环境最高温度为 48.0℃),极易触发高压开关动作。

### 2.2.4 确定具体故障原因

综上所述,2019 年 1 号线列车空调高压故障频发的原因:列车在同一个位置保持静止或低速运行状态时,列车空调机组外部没有较大的运行气流,冷凝器热量无法有效排至隧道空间内;热量在列车空调机组外部较小的空间范围内堆积,导致冷凝器表面温度升高,内部制冷剂压力增大,进而触

发高压开关动作。此外,隧道整体环境温度越高,热量积累速度越快,制冷剂压力升高至超过高压开关动作阈值所需的时间越短,列车空调发生高压故障的概率就越高。

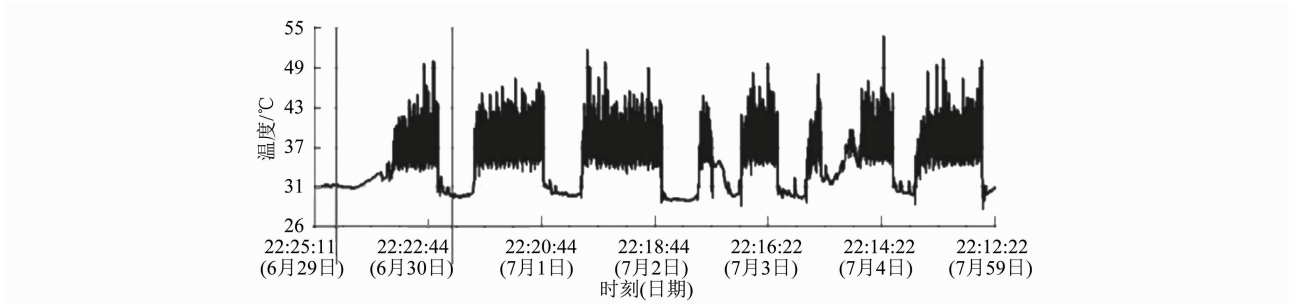


图 4 广州某地下地铁线 2018 年夏季部分运营日期列车空调实时进风温度统计数据截图

Fig. 4 Screenshot of real-time inlet temperature statistics for the air conditioning system on trains during selected operating dates in the summer of 2018 on the underground subway line in Guangzhou

### 3 1 号线列车空调高压故障的对策

#### 3.1 开启隧道排热风机

1 号线每个车站配置了 2 台 30 kW 的排热风机,风机开启后可在一定程度上降低隧道整体环境温度。但在钟南街站开启排热风机后,该站存车线内仍会发生列车空调高压故障。经过现场查看,设于该站的 2 台排热风机的安装位置与存车线间距离较远,且因风机的功率相对较小,进入到存车线的风量较小,不足以改善该存车线的通风情况。若调整风机的功率,又会导致风量过大,可能会对车站站台门的正常使用造成影响,因此不建议采用加大风机功率的措施。此外,全线各站均开启排热风机的电耗较大,易引起风机故障。因此,仅开启排热风机,不能全面解决 1 号线列车空调高压故障问题,该措施的收效不理想。

#### 3.2 优化列车空调的控制逻辑

1 号线列车空调控制器的故障控制逻辑为“高压开关 3 次保护”,即:若空调压缩机前端的高压开关在 1 h 内被触发 3 次(触发压力值为  $(2.4 \pm 0.1)$  MPa),则判断该空调机组的制冷系统运作异常。为保护压缩机,此时空调控制器将关停对应制冷系统的压缩机。空调高压开关在 1 h 内被触发 3 次后,压缩机就会被锁死,需要重启对应机组控制器方可复位故障,而在正线运营时段基本不具备复位的操作条件。

通过对故障特征及隧道环境进行分析,并参考其他城市地铁运营方的处置方法,苏州地铁运营方对空调控制器的软件进行了修改,重设压缩机压力故障停机及重启的逻辑。1 号线列车空调压缩机改

进后的控制逻辑如图 5 所示。

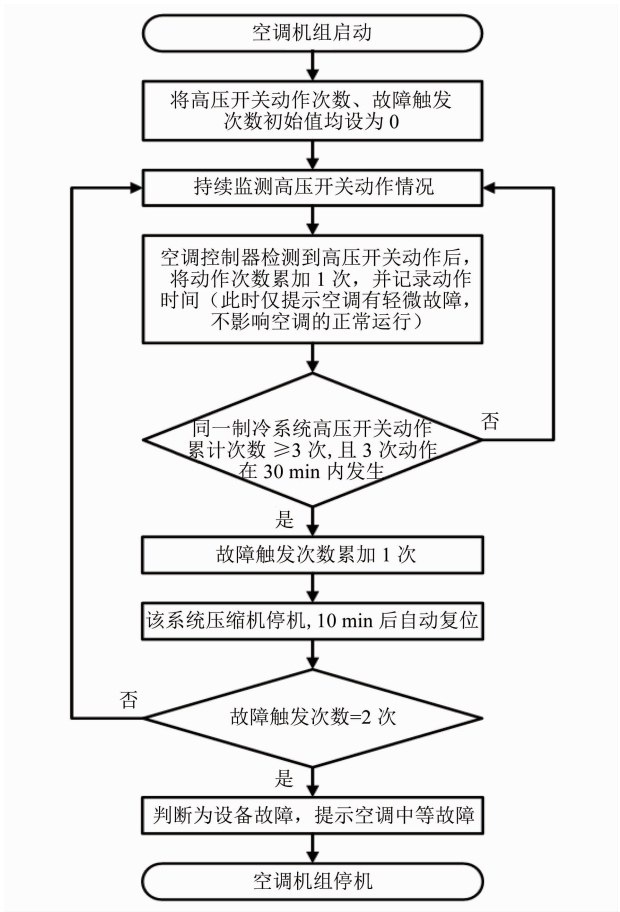


图 5 1 号线列车空调压缩机改进后的控制逻辑

Fig. 5 Control logic of the improved air conditioning compressor for Line 1 trains

1 号线列车空调压缩机改进后的控制逻辑如下:

1) 修改故障触发条件。将高压开关在 1 h 内被触发 3 次改为 30 min 内被触发 3 次。修改该触

发条件的原因为:目前 1 号线列车空调触发高压开关最频繁的地点为终南街站的存车线及折返线,正线停站时相对触发高压开关情况较少;修改后在钟南街站触发的高压开关次数不会长时间积累,可避免车站偶然高压开关动作触发故障。

2) 修改空调中等故障的判断条件。单个空调制冷系统首次触发高压故障时,压缩机不锁死,停机 10 min 后将自动复位;同一个空调制冷系统的故障触发次数达到 2 次后,再将压缩机锁死,并发出列车空调中等故障提示。修改该判断条件的原因为:较短时段内隧道通风环境不良造成列车空调进风温度过高的情况,在列车速度提高、运行气流增大后即可缓解,此时直接锁死压缩机是不合理的。增加一次压缩机自复位的操作可以避免此类情况导致的误锁死。若存在设备原因造成的高压故障,短时复位后仍会再次触发故障,此时须锁死压缩机,防止故障进一步恶化。

### 3.3 控制列车在存车线停留时空调的开启时长

经测试,在 1 号线列车 AW0(空载)工况下,列车空调机组可在 10 min 内将车厢温度调整至制冷目标温度范围内的任意值。考虑列车在存车线处进行收发车作业时车厢内并无乘客,可要求司机发车载客前 10 min 再全面开启列车空调制冷,并在退出正线运营时及时关闭列车空调。

### 3.4 改用变频空调

从图 3 还可发现,发生空调高压故障的列车均为搭载定频空调的列车,而变频空调列车并无此类故障。经查阅资料,定频空调机组外部温度在 48 ℃ 时达到制冷极限,当机组外部温度高于 45 ℃ 时可能会触发高压开关动作,而变频空调可在机组外部温度不高于 55 ℃ 的工况下运行,其温度阈值更高。

经分析,定频空调采用固定开度的毛细管实现制冷剂膨胀,在制冷剂回路高压侧压力过高的情况下,必须立即令压缩机停止工作,以实现空调机组的保护功能。而变频空调采用了可调节的电子

膨胀阀,在检测到高压侧压力偏高的情况下,变频空调可及时调大电子膨胀阀的开度,以降低变频压缩机的运转频率,进而降低回路高压侧的压力。这样虽然会导致空调机组制冷能力略微下降,但扩大了空调可制冷的进风温度范围,使变频空调机组具备应对短时恶劣外温环境的能力。

2020 年,苏州地铁运营方优化了列车空调控制逻辑,并对列车在存车线收发车时空调制冷开启时间进行了有效控制,实施后再没有发生过此类列车空调高压故障。实践证明,通过修改空调软件解决此类故障非常有效,且经济性较好。

## 4 结语

随着城市轨道交通线路运营方案的持续优化,为满足列车快速投运及节省停车库改扩建成本等要求,在正线隧道内进行停车检修及收发车作业等措施备受关注。这些措施须考虑列车停车位置的隧道环境,避免列车空调系统出现高压故障导致停机,并在夏季开启空调系统前做好控制措施。此外,运营方还可积极掌握各类应用设备软件的编制及修改方法,结合设备使用实际优化设备软件,在设备全寿命周期内不断提升列车的服务可靠度。

## 参考文献

- [1] 王硕禾,薛平星,张亮. 地铁车辆空调系统地下段故障分析及对策[J]. 国防交通工程与技术, 2015, 13(4): 53.  
WANG Shuohu, XUE Pingxing, ZHANG Liang. Analysis of and countermeasures to the malfunctions of the air conditioning system for metro vehicles[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2015, 13(4): 53.
- [2] 范彪,马撰,朱嘉琪. 广州地铁二号线空调系统高压故障原因探讨[J]. 机电工程技术, 2019, 48(3): 171.  
FAN Biao, MA Zhuan, ZHU Jiaqi. Discussion on the high pressure fault of air conditioning system of Guangzhou metro line 2[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2019, 48(3): 171.

(收稿日期:2021-04-25)

(上接第 166 页)

- [10] 黄赢海. 基于建筑信息模型(BIM)的可视化编程与二次开发在桥梁工程上的应用[D]. 广州:华南理工大学,2020.  
HUANG Yinghai. Application of visual programming and secondary development based on building information model (BIM) in bridge engineering[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [11] 张鹏飞,桂昊,雷晓燕. 桥上Ⅲ型板式无砟轨道纵向力计算

模型简化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 24.

ZHANG Pengfei, GUI Hao, LEI Xiaoyan. Simplification for calculation model of longitudinal force of type III slab track on bridge[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2019, 47(7): 24.

(收稿日期:2021-11-11)