

## 城市轨道交通车辆基地弓网异常烧灼对策\*

李泽宇

(上海地铁维护保障有限公司, 200070, 上海)

**摘要** [目的]城市轨道交通车辆基地内接触线烧灼现象普遍存在,主要集中在分布于列车停车位受电弓对应区域。该现象轻则降低弓网运行平顺性,引发跳闸等接触网运行故障,重则导致接触线断裂等重大弓网事故。为了确保接触网设备的可靠性、弓网系统的运行安全及列车运营的稳定性,亟须采取有效措施解决车辆基地弓网异常烧灼问题。[方法]以上海轨道交通 18 号线航头基地开通后停车库内发生的接触网烧灼事件为例,从受电弓滑块与接触线接触情况、升弓高度及升弓压力、受电弓载流量、受电弓和接触网接触点温度、受电弓输入电流等方面对弓网异常烧灼故障原因进行排查,提出弓网异常烧灼对策。对 18 号线 18A01 型列车的牵引系统软件进行了优化,在停车库内对软件优化前后的列车进行重复升落弓试验与效果验证。[结果及结论]18 号线航头基地接触线烧灼现象的根本原因是:升弓过程中弓网系统进入稳定接触状态的过渡时间与高速断路器闭合延时存在时序失配。现场验证及 6 个月跟踪监测表明:优化后的软件可有效预防停车库内接触线烧灼现象,航头基地停车库内未再出现接触线烧灼痕迹。

**关键词** 城市轨道交通;车辆基地;弓网异常烧灼

**中图分类号** U279.1

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.20241139

## Countermeasures for Abnormal Arcing and Burning of Pantograph-Catenary System in Urban Rail Transit Vehicle Base

LI Zeyu

(Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200070, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] Abnormal arcing and burning of contact wire are commonly observed in urban rail transit vehicle bases, primarily concentrated in pantograph-corresponding areas at train parking lots. Minor cases can reduce the smoothness of PC (pantograph-catenary) operation, causing tripping and other contact network operational malfunctions, while severe cases may lead to serious PC accidents such as contact wire breakage. To ensure the reliability of catenary equipment, the PC system operational safety and train operational stability, it

is crucial to adopt effective measures to address abnormal arcing and burning in PC system in vehicle bases. [Method] Taking the catenary arcing and burning incidents in the parking garage of Hangtou Depot on Shanghai Rail Transit Line 18 after putting into use as an example, the causes of abnormal arcing and burning in PC system are investigated from multiple aspects: the contact condition between pantograph slider and contact wire, pantograph lifting height and pressure, pantograph current-carrying capacity, temperature at the contact points between pantograph and catenary, and pantograph input current. Countermeasures are proposed based on these investigations. The traction system software of the 18A01 train model on Line 18 is optimized, and repeated pantograph lifting and lowering tests are conducted in the parking garage to validate the effectiveness before and after the software optimization. [Result & Conclusion] The root cause of the arcing and burning phenomenon in Line 18 Hangtou Depot is identified as a timing mismatch between the transition period of PC system entering a stable contact state and the closing delay of the high-speed circuit breaker during the pantograph lifting process. On-site verification and six months of follow-up monitoring demonstrate that the optimized software effectively prevented the occurrence of arcing and burning in the parking garage. No further signs of contact wire burning have appeared in the Hangtou Depot again.

**Key words** urban rail transit; vehicle base; pantograph-catenary abnormal burning

航头基地位于上海轨道交通 18 号线(以下简称“18 号线”)一期工程南段,于 2020 年 12 月 26 日开通。18 号线是上海首批全功能一次性开通 GOA4(无人干预列车运行)等级的轨道交通线路,采用 18A01 型列车。18 号线正线接触网采用刚性接触网,而航头基地内则采用柔性接触网。

自 2021 年 3 月起,在航头基地接触网的日常检修中,发现部分停车库内接触线存在烧灼痕迹(见

\* 上海申通地铁集团有限公司科研项目(JS-KY22R018-1)

图1),痕迹主要集中于车辆停车位置的受电弓正上方。截至2022年12月,已累计发现61处烧灼痕迹,分布于停车线、静调线、定修线及吹扫线等,涉及28个锚段。



图1 接触线灼烧痕迹

Fig. 1 Contact wire burn marks

接触线烧伤对设备安全运营构成较大隐患,且受损接触线已达到更换标准,增加了运营维护成本。因此,在修复或更换前,需彻底分析故障原因并提出应对措施。

## 1 弓网异常烧灼故障原因排查

### 1.1 受电弓滑块与接触线接触不良排查

为确认接触线烧灼痕迹是否由受电弓滑块与接触线接触不良导致,对18A01型列车的弓网匹配设计和实际接触状态进行了检查。通过统计停车库内接触网高度,分析受电弓升弓高度,并检查每台受电弓的实际升弓状态,确认车辆受电弓及架空接触网的设计均符合要求,且两者贴合紧密,接触状态良好。

### 1.2 升弓高度及升弓压力排查

为探究接触线烧灼痕迹的成因,对18A01型列车的升弓高度(接触网高度)和升弓压力进行了检测。结果显示:接触网导高( $\geq 3\ 980\text{ mm}$ 且 $\leq 5\ 800\text{ mm}$ )及升弓压力( $120^{+10}_{-10}\text{ N}$ )均符合设计标准,排除了升弓压力不足的可能性。

### 1.3 受电弓负载电流测量

为确认接触线烧灼痕迹是否由受电弓电流过大导致,车辆分公司对18A01型列车在以下工况下的列车负载电流情况进行了测量:无载升弓、无载降弓、有载降弓、升弓停车及低速运行。测量结果如下:

1) 在负载全切的情况下,单弓升弓时存在20~21 A的短时电流,时长约为240 ms。

2) 在负载全切的情况下,单弓降弓时的瞬间电

流约为7 A。

3) 在带空气压缩机负载的情况下,带载分断电流约为9 A。

4) 列车在停车升弓的情况下,整车负载电流的最大值约为60 A,折合单弓电流约为30 A。

上述检测结果表明:18A01型列车的升弓、降弓及静态时的单弓电流均小于停车库内接触线允许的最大承受电流570 A。

### 1.4 受电弓和接触网接触点温度分析

针对接触线烧灼问题,在航头基地测量了两种典型工况(列车静态大负载升弓和反复低速动车)下受电弓和接触网接触点的温度,以验证是否超出接触线允许最高工作温度(环境温度25℃,风速0 m/s)。测量结果如下:

1) 在列车静态大负载升弓工况下测量受电弓和接触网接触点的温度,结果显示:平均温度40.83℃,最高温度41.60℃,最低温度40.00℃。静态大负载升弓工况下受电弓和接触网接触点温度曲线见图2。

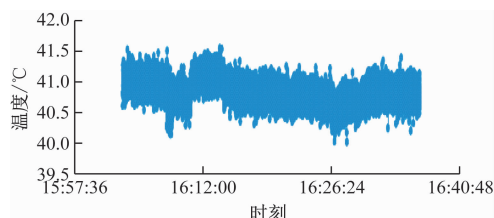


图2 静态大负载工况下受电弓和接触网接触点温度曲线  
Fig. 2 Pantograph-catenary contact point temperature curve under static high load condition

2) 采用停车库内反复短距离往返运行方式进行动态测试,测得受电弓和接触网接触点的温度数据如下:平均温度40.41℃,最高温度42.10℃,最低温度39.70℃。反复低速动车工况下受电弓和接触网接触点温度曲线如图3所示。

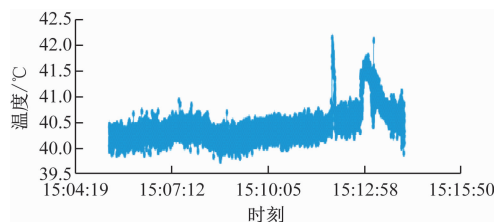


图3 反复低速动车工况下受电弓和接触网接触点温度曲线  
Fig. 3 Pantograph-catenary contact point temperature curve under repetitive low-speed working condition of high-speed train

由图 3 可见:温度数据均小于  $45^{\circ}\text{C}$ ,远小于接触线的最大允许温度  $95^{\circ}\text{C}$ ,不会对接触线造成灼伤。

### 1.5 受电弓输入电流分析

为确认接触线烧灼痕迹是否由受电弓升弓时弓头抖动拉弧所致,采用高采样频率对受电弓输入电流进行测量分析。分析发现,存在偶发异常电流脉冲信号(见图 4)。经研判:异常电流脉冲可能源于升弓时弓头振动;弓头振动可能导致拉弧现象,进而造成接触线烧灼。

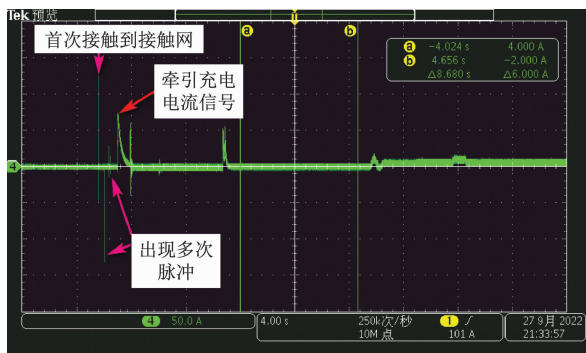


图 4 升弓过程中存在的偶发异常电流脉冲信号截图

Fig. 4 Screenshot of intermittent abnormal current pulse signals occurring during pantograph lifting process

## 2 弓网异常烧灼原因分析

在受电弓升弓过程中,弓头与接触线的接触受接触冲击、弓头调平动作及接触线抖动等多种因素的影响,导致滑块与接触线出现瞬时脱离(离线现象)。若此时  $1\,500\text{ V}$  回路中存在输入电流,即可能引发弓网拉弧。研究表明,此类拉弧现象是造成受电弓和接触网接触面烧灼痕迹的主要原因。

为深入分析受电弓升弓过程中产生瞬时拉弧的可能性,对 18A01 型列车牵引回路  $1\,500\text{ V}$  电压输入后的工作时序进行了调研。研究发现,该车型为缩短列车唤醒准备时间,在牵引系统中设置了特殊控制逻辑:当检测到高压有效并持续  $1\text{ s}$  后,系统将自动闭合高速断路器并进入预充电过程。在此过程中,受电弓将流过最大约  $68\text{ A}$ 、持续  $600\text{ ms}$  的预充电电流。若此时发生弓网瞬时离线,极易引发拉弧现象。拉弧瞬间产生的高温会导致接触线硬度降低甚至局部熔融,从而形成烧灼痕迹。

## 3 弓网异常烧灼对策及效果验证

### 3.1 对策

鉴于受电弓升弓过程中弓网系统必然存在瞬

时离线现象,18A01 型列车通过优化牵引系统高速断路器吸合逻辑来规避拉弧风险。具体改进措施为:将牵引系统检测到有  $1\,500\text{ V}$  电压输入后吸合高速断路器的延时由  $1\text{ s}$  延长至  $6\text{ s}$ 。

经牵引系统软件优化,当牵引系统检测到有  $1\,500\text{ V}$  电压输入,并保持  $6\text{ s}$  后,自动合上高速断路器,并进入预充电过程。此时由于受电弓滑块和接触线之间的接触已处于稳定状态,预充电电流流经受电弓滑块和接触线时不会因为滑块和接触线发生脱离而引发拉弧,从而避免与受电弓升弓作业相关的接触线区域因长期瞬时拉弧而出现烧灼痕迹。另一方面,虽然牵引系统软件优化后会造成列车唤醒后牵引系统的准备时间延长  $5\text{ s}$ ,但考虑到列车唤醒的总体准备时间一般为  $720\text{ s}$ ,牵引系统软件优化增加的延时仅占列车整体准备时间的  $7\text{‰}$ ,基本可以忽略不计。

### 3.2 效果验证

为了验证 18A01 型列车牵引系统逻辑优化对预防停车库内接触线烧灼的效果,组织开展了对比试验:在停车库内对牵引系统软件未优化和优化后的列车进行重复升落弓试验(试验列车受电弓升弓状态所对应的接触线区域均在试验前经确认不存在烧灼痕迹)。试验结果如下:

1) 5 列未经牵引系统软件优化的列车经过 239 次升落弓试验,在 10 个受电弓升弓状态所对应的接触线区域中的 6 处出现烧灼痕迹(见图 5)。



图 5 牵引系统软件优化前接触线烧灼  
Fig. 5 Contact wire arcing and burning before traction system software optimization

2) 12 列经牵引系统软件优化的列车经过 579 次升落弓试验,在 24 个受电弓升弓状态所对应的接触线区域中均未出现烧灼痕迹(见图 6)。



图 6 牵引系统软件优化后接触线未烧灼  
Fig. 6 Contact wire not arcing or burning after traction system software optimization

根据前述分析和试验结果,可以认为对 18A01 型列车牵引系统逻辑进行优化能够有效避免停车库内接触线发生烧灼,同时由于牵引系统软件优化增加的延时对列车整体准备时间的影响可以忽略不计,因此该项优化工作可以应用于 18A01 型列车的牵引系统中。

#### 4 结语

通过一系列测试与分析,确认 18 号线航头基地接触线烧灼现象的根本原因是:升弓过程中弓网系统进入稳定接触状态的过渡时间与高速断路器闭合延时存在时序失配。当预充电电流(最大 68 A,持续 600 ms)流经受电弓和接触网接触区时,若发生瞬时离线,将引发拉弧放电。长期累积的拉弧效应最终导致受电弓升弓作业区域接触线出现烧灼痕迹。

在前述分析的基础上,对 18A01 型列车的牵引系统软件进行了优化。经现场验证及 6 个月跟踪监测表明:优化后的软件可有效预防停车库内接触线烧灼现象,航头基地停车库内再未出现接触线烧灼痕迹。

#### 参考文献

- [1] 于万聚. 高速电气化铁路接触网[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.  
YU Wanju. Overhead catenary system of high-speed electrified railway[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003.
- [2] 丁涛. 电气化铁路受电弓/接触线摩擦磨损性能及电特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.  
DING Tao. Research on friction and abrasion performance and electrical characteristics of pantograph/contact line of electrified railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [3] 赵晨, 周宁, 邹栋, 等. 基于非线性多刚体受电弓模型的弓网仿真分析[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(3): 1.  
ZHAO Chen, ZHOU Ning, ZOU Dong, et al. Dynamic simulation of pantograph and catenary system based on nonlinear multi-body pantograph model[J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(3): 1.
- [4] 蒲有东. 电气化高速铁路接触网微风振动特性分析[J]. 信息化建设, 2016(2): 384.  
PU Youdong. Analysis of breeze vibration characteristics of overhead contact system of electrified high-speed railway[J]. Informatization Construction, 2016(2): 384.
- [5] 阎祖顺. 简单链形接触网的静态仿真[J]. 铁道运输与经济, 2013, 35(2): 57.  
YAN Zushun. Static simulation of stitched simple trolley-type catenary[J]. Railway Transport and Economy, 2013, 35(2): 57.
- [6] 谢建, 刘志刚, 韩志伟, 等. 弓网耦合动力学模型仿真及接触网不平顺分析[J]. 电气化铁道, 2009, 20(6): 23.  
XIE Jian, LIU Zhigang, HAN Zhiwei, et al. Pantograph and overhead contact line coupling dynamic model simulation and analysis of imbalance of overhead contact line[J]. Electric Railway, 2009, 20(6): 23.
- [7] 吴积钦, 钱清泉. 受电弓与接触网系统电接触特性[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(3): 106.  
WU Jiqin, QIAN Qingquan. Characteristics of the electrical contact between pantograph and overhead contact line[J]. China Railway Science, 2008, 29(3): 106.
- [8] 刘怡, 张卫华, 梅桂明. 受电弓/接触网垂向耦合运动中接触网动应力研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(4): 23.  
LIU Yi, ZHANG Weihua, MEI Guiming. Study of dynamic stress of the catenary in the pantograph/catenary vertical coupling movement[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(4): 23.
- [9] 梅桂明, 张卫华, 刘红娇. 不同结构类型接触网动态特性[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(2): 27.  
MEI Guiming, ZHANG Weihua, LIU Hongjiao. Dynamic performances of different structural catenary[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(2): 27.
- [10] 于涤. 高速接触网受流的理论分析[J]. 铁道学报, 1998, 20(5): 58.  
YU Di. Analyses on catenary current carrying theory of high speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 1998, 20(5): 58.
- [11] 于正平, 张弘, 吴鸿标, 等. 高速电气化铁路接触网-受电弓系统的研究[J]. 中国铁道科学, 1999, 20(1): 59.  
YU Zhengping, ZHANG Hong, WU Hongbiao, et al. A study on highspeed catenary pantograph system[J]. China Railway Science, 1999, 20(1): 59.
- [12] 蔡成标, 翟婉明. 高速铁路接触网振动特性分析[J]. 西南交通大学学报, 1997, 32(5): 497.  
CAI Chengbiao, ZHAI Wanming. Analysis on dynamic performances of catenary of high speed railways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1997, 32(5): 497.
- [13] 张卫华, 沈志云. 接触网动态研究[J]. 铁道学报, 1991, 13(4): 26.  
ZHANG Weihua, SHEN Zhiyun. Dynamic studies on catenary[J]. Journal of the China Railway Society, 1991, 13(4): 26.
- [14] 汪媛. 弓网系统动态仿真研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2014.  
WANG Yuan. The simulation research of pantograph-catenary's dynamic characteristic[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2014.
- [15] 阮杰. 电气化高速铁路接触网与受电弓动态性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.

(下转第 176 页)

- characteristics of AC relay arc[J]. Low Voltage Apparatus, 2023 (4): 28.
- [6] 唐培伟,李海峰,于森. 电子电气设备中的电路隔离技术分析[J]. 集成电路应用,2022,39(11):58.  
TANG Peiwei, LI Haifeng, YU Miao. Analysis of circuit isolation technology in electronic and electrical equipment[J]. Applications of IC, 2022, 39(11): 58.
- [7] 祁鸿芳. 一种高可靠性光电耦合强弱电隔离电路[J]. 仪器仪表用户, 2006, 13(5): 101.  
QI Hongfang. A kind of high dependable photoelectric coupled strong and weak optoelectronic isolating circuit [J]. Instrumentation Customer, 2006, 13(5): 101.
- [8] 张轩毅. 电子电气电路的隔离技术分析[J]. 数字化用户, 2019, 25(22): 219.  
ZHANG Xuanyi. Analysis on isolation technology of electronic and electrical circuit[J]. Digitization user, 2019, 25(22): 219.
- [9] 杨梅. 继电器与电气工程自动化技术的应用[J]. 科技创新导报, 2022, 19(24): 68.  
YANG Mei. Application of relays and electrical engineering automation technology[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2022, 19(24): 68.
- [10] 张雄星,王超,陈超,等. 线性光电隔离电路的设计[J]. 现代电子技术, 2010, 33(24): 189.  
ZHANG Xiongxing, WANG Chao, CHEN Chao. Design of linear photoelectric isolated circuit[J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(24): 189.
- [11] 薛宏全, 常江龙, 李嘉诚, 等. 基于国产嵌入式芯片的全数字控制轨道交通高压直流 LLC 电源研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(5): 1.  
XUE Hongquan, CHANG Jianglong, LI Jiacheng, et al. Research on full digital control high-voltage direct current LLC power supply for rail transit based on domestic embedded chips[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(5): 1.
- [12] 胡姬, 凌晨, 苏靖棋, 等. 基于国外经验的城市轨道交通牵引供电系统发展路径研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1): 134.  
HU Ji, LING Chen, SU Jingqi, et al. Research on the development path of urban rail transit traction power supply system based on foreign experience [J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(1): 134.
- [13] 叶东,郑杰,代一平,等. 计及指标重要度的地铁供电设备健康状态分级评估方法[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(2): 116.  
YE Dong, ZHENG Jie, DAI Yiping, et al. Health status grading evaluation method of subway power supply equipment considering index importance[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2024, 37(2): 116.
- 收稿日期:2025-02-06 修回日期:2025-03-10 出版日期:2025-06-10  
Received:2025-02-06 Revised:2025-03-10 Published:2025-06-10  
· 通信作者:郭志,高级工程师, slemen@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
- RUAN Jie. Study on the dynamic performance of overhead contact system and pantograph for high speed rail way[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [16] 赵志, 刘洋. 弓网监测系统中测量接触力硬点的研究[J]. 科学技术创新, 2021(18): 180.  
ZHAO Zhi, LIU Yang. Study on hard points for measuring contact force in pantograph-catenary monitoring system[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(18): 180.
- [17] 朱正凯. 弓网监测技术分析[J]. 甘肃科技, 2018, 34(8): 45.  
ZHU Zhengkai. Analysis of pantograph-catenary monitoring technology[J]. Gansu Science and Technology, 2018, 34(8): 45.
- [18] 谭德强, 莫继良, 彭金方, 等. 高速接触网零部件失效问题研究现状及展望[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(3): 610.  
TAN Deqiang, MO Jiliang, PENG Jinfang, et al. Research and prospect on high-speed catenary component failure[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(3): 610.
- [19] 关金发, 吴积钦. 受电弓与接触网动态仿真模型建立及其确认[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(11): 2444.  
GUAN Jinfa, WU Jiqin. Building and confirmation for dynamic simulation model of pantograph and catenary[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(11): 2444.
- [20] 鲁文伟, 周宁, 陈鸿明, 等. 不同型号双弓混合编组时的弓网动力学特性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(4): 165.  
LU Wenwei, ZHOU Ning, CHEN Hongming, et al. Research on pantograph-catenary dynamics characteristics in mixed double pantographs formation of different types[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(4): 165.
- 收稿日期:2024-09-20 修回日期:2024-11-11 出版日期:2025-06-10  
Received:2024-09-20 Revised:2024-11-11 Published:2025-06-10  
· 通信作者:李泽宇,工程师, 542519743@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