

# 广州地铁 9 号线车辆受电弓碳滑板 异常磨损原因分析及改进措施

罗湘雄 林沛扬 陈名华

(广州地铁集团有限公司运营事业总部, 511430, 广州//第一作者, 助理工程师)

**摘 要** 目的: 针对广州地铁 9 号线开通运营初期受电弓碳滑板出现较严重拉弧、异常磨损及崩口等情况, 提出了改进措施, 以减小对列车运行的影响。方法: 从车辆状态和接触网状态两方面排除了碳滑板材质不良及列车振动引起碳滑板异常磨损的可能性。在此基础上查找出受电弓跳弓点位置, 发现受电弓经过膨胀元件时拉弧严重。通过对 MVB(多功能车辆总线)速度数据、正线信号对标点公里标及车体数据进行分析, 对正线接触网膨胀元件进行了精确定位, 发现受电弓在经过膨胀元件时会产生较大的振动, 受电弓在膨胀元件处的弓网匹配性较差。进一步与国内同行就碳滑板异常磨损问题进行交流, 以确定受电弓碳滑板异常磨损原因。结果及结论: 膨胀元件结构问题是导致受电弓碳滑板异常磨损的主要原因。改进措施为: 优化膨胀元件辅助线过渡段长度和过渡形式, 优化膨胀接头布置, 优化列车牵引软件。采取上述改进措施后, 弓网关系明显改善, 碳滑板的使用寿命大为延长, 牵引故障率明显下降, 列车的维修成本大大降低。

**关键词** 地铁车辆; 受电弓; 碳滑板; 弓网异常磨损

中图分类号 U264.3+4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.049

## Cause Analysis and Optimization Measures of Vehicle Pantograph Carbon Strip Abnormal Wear on Guangzhou Metro Line 9

LUO Xiangxiong, LIN Peiyang, CHEN Minghua

**Abstract** Objective: Causes for serious arc pulling, abnormal wear and collapse of pantograph carbon strip at Guangzhou Metro Line 9 operation early stage need to be identified, so that improvement measures can be proposed and train operation can be less affected. Method: The possibility of poor material and train vibration inducing carbon strip abnormal wear is excluded from the aspects of vehicle state and catenary state. On this basis, the location of pantograph detachment points is identified, and it is discovered that arc pulling is serious when pantograph passes expansion element. By analyzing the speed data of MVB (multi-function vehicle bus), the main line signal mileage mark and carbody data, the expansion element of the main

line catenary is accurately located, and it is found that the pantograph will produce great vibration when it passes through the expansion element and the pantograph-catenary matching is poor at this point. Furthermore, the topic of carbon strip abnormal wear is communicated with peers in China and the reason of pantograph carbon strip abnormal wear is concluded. Result & Conclusion: Expansion element structure problem is the main cause of pantograph carbon strip abnormal wear. Optimization measures include optimizing the transition segment length and transition mode of expansion element auxiliary line, optimizing expansion joint layout, and optimizing train traction software. By adopting the above measures, pantograph-catenary relation is obviously improved, manifested as a significant extension of carbon strip service life, a great decrease in traction failure rate and train maintenance costs.

**Key words** metro vehicle; pantograph; carbon strip; pantograph-catenary abnormal wear

**Author's address** Operation Business Headquarters of Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 511430, Guangzhou, China

## 1 受电弓碳滑板异常磨损情况

广州地铁 9 号线(以下简称“9 号线”)车辆采用 TSG18J 型受电弓。在该线运营初期,列车频繁出现因网压突变导致的牵引红点/白点故障。通过对列车的牵引和控制数据进行分析,发现该故障原因为受电弓检测到网压出现跳变,且网压低于 950 V(车辆牵引系统的正常工作电压)。检查故障列车受电弓发现,碳滑板有较严重的拉弧、异常磨损及崩口等情况。查阅故障受电弓的弓网视频,发现故障时刻受电弓有跳动和拉弧打火花现象,如图 1 所示。由此可以判定 9 号线存在较为严重的弓网关系不良问题。

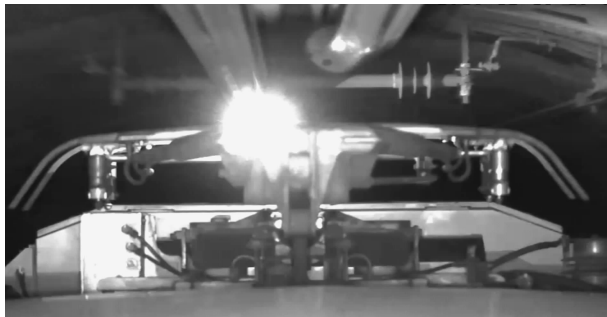


图1 受电弓拉弧和打火花现场图

Fig. 1 Site picture of pantograph arc pulling and ignition

## 2 碳滑板异常磨耗原因分析

为了分析9号线车辆碳滑板异常磨耗的原因,本文对车辆状态(主要为碳滑板)和接触网状态分别进行跟踪,并从影响碳滑板磨耗的2个直接因素(碳滑板材质及供电网状况)进行故障原因分析。

### 2.1 碳滑板异常表现情况

调看录像发现,在弓网不良时刻受电弓碳滑板有严重拉弧、异常磨耗及崩口等情况。受电弓异常磨耗主要表现在滑板中间位置形成了3个U型槽,如图2所示。



图2 碳滑板磨耗不均和烧灼实物图

Fig. 2 Picture of carbon strip uneven wear and cauterization

### 2.2 碳滑板材质分析

#### 2.2.1 异常磨耗碳滑板检测数据分析

将异常磨耗碳滑板截断后作进一步检测,对其检测结果及设备的出厂检验报告进行综合分析,各检测数据均在合格范围内:①电阻率为 $2.36 \sim 3.04 \mu\Omega\text{m}$ ;②洛氏硬度为 $97.4 \sim 103.1 \text{ HRC}$ ;③肖氏硬度为 $87 \sim 90 \text{ HS}$ ;④密度为 $2.73 \sim 28.4 \text{ g/mm}^3$ ;⑤抗弯强度为 $55.8 \sim 89.4 \text{ N/mm}^2$ ;⑥铝托的抗拉强度大于 $200 \text{ N/mm}^2$ 。

#### 2.2.2 异常磨耗碳滑板的外观检测

对异常磨耗碳滑板的外观和横截面进行检测

分析,均未发现异常:

1) 碳滑板表面及铝合金侧面有严重的烧伤痕迹,根据经验判断应为电弧引起的烧伤。大电流通过时在碳滑板受流处出现瞬时的局部高温,高温下浸金属碳滑板中的金属会液化并溢出碳体。此外,碳基复合材料的滑板在高温下也会出现碳化现象,材质整体性能随之发生巨大变化,碳条在烧伤后的耐磨性能变差,碳滑板寿命大为降低。

2) 整个碳条在与网线对磨的区域内发生了偏磨,其凸凹高度差约为 $3.4 \text{ mm}$ 。此偏磨现象一般都是由于网线布局不合理造成的。合理的网线布局应将碳滑板的高度差控制在 $2.0 \text{ mm}$ 内,以大大提高碳滑板的寿命。

综上所述,通过检验数据及外观分析,碳滑板质量合格,该型车辆受电弓碳滑板异常磨耗并非因碳滑板材质不良引起。

### 2.3 受电弓跳弓点位置跟踪

增加碳滑板的监测点,以研究碳滑板磨耗形状发展过程,搜集碳滑板磨耗形状发展规律,找出受电弓跳弓点位置规律。通过对大量检测数据进行分析发现,当碳滑板中部的凹槽深度发展至 $3.0 \text{ mm}$ 以上时,列车陆续开始出现故障,其原因主要为滑板中间位置形成的凹槽使受电弓产生瞬时跳动离线(特别是与膨胀元件接触时,跳动离线现象更为明显),进而引起列车牵引系统的红点/白点故障。

### 2.4 碳滑板凹槽与膨胀元件的关系分析

通过对弓网摄像头监控录像进行分析发现,受电弓经过膨胀元件时拉弧严重。将故障碳滑板与膨胀元件进行对比,发现碳滑板3个凹槽的间距与膨胀元件3条线(1条主接触线和2条辅助接触线)的间距相符,如图3所示。



图3 碳滑板3个凹槽的间距与膨胀元件3条线的间距相符  
Fig. 3 Spacing between the three grooves of carbon strip matching that between the 3 lines of expansion element

## 2.5 接触线燃弧和硬点位置跟踪

为了查找受电弓异常磨损的原因,明确接触线燃弧和硬点的具体位置,车辆和轨道专业的技术人员进行了深入的研究,对正线故障点进行定位分析。在对 MVB(多功能车辆总线)的速度数据进行积分的基础上,结合正线信号对标公里标数据及车体数据,对正线接触网元件进行了定位。监测过程发现,燃弧告警和硬点告警基本集中在接触网的膨胀元件上,如图 4 所示。

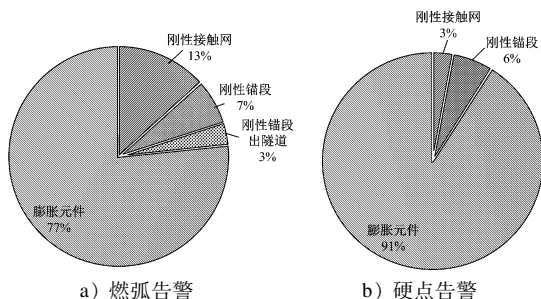


图 4 接触网燃弧告警和硬点告警的占比分布图

Fig. 4 Percentage distribution diagram of catenary burning arc warning and hardpoint alarms

由上述分析可看出,受电弓在经过膨胀元件时产生的振动较大,严重时有燃弧情况产生,可以判断受电弓在膨胀元件处的弓网匹配性较差,这也是产生网压波动的原因。这在具体数据上也进一步验证了故障分析前期车辆专业对网压波动故障原因的判断。

## 2.6 列车平稳性测试

为了查明碳滑板磨损异常的具体原因,本文对列车不同状态下的平稳性进行测试。图 5 为列车在 9 号线部分区段上列车平稳性指标的测试结果。由图 5 可知:列车平稳性等级全为优,因此可以排除因列车振动引起弓网异常的可能性。

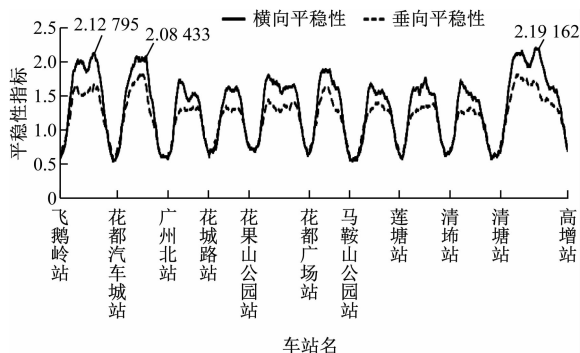


图 5 列车平稳性测试结果

Fig. 5 Test results of train stability

## 2.7 同行交流,确定故障原因

我国 A 市地铁 11 号线和 B 市地铁 6 号线也曾发生过跟 9 号线类似的受电弓故障,因此,广州地铁运营方组织同行交流探讨,学习其他单位的经验,以确定受电弓故障的原因及整改措施。

### 2.7.1 A 市地铁 11 号线弓网异常原因及整改措施

A 市地铁 11 号线自 2016 年 5 月份试运行以来,弓网关系恶劣,正线弓网拉弧、碳滑板偏磨及磨损率发生严重故障,对正线列车正常运行造成了较大影响。其故障原因为膨胀元件三线受流结构存在问题。该线的膨胀元件整改前与 9 号线的膨胀元件结构一致,两者均为厂商 C 生产的双辅助线膨胀元件。

A 市地铁 11 号线主要采取以下措施解决该弓网问题:①将膨胀元件拉出值从 0 调整至  $\pm 0 \sim 200$  mm,并呈“之”字型均匀布置;②优化膨胀元件的结构,将三线受流改为二线受流;③对全线的 40 处膨胀元件进行换型,其中:23 处改为国产膨胀元件;17 处改为非绝缘锚段关节。通过上述整改,A 市地铁 11 号线弓网运行情况良好,碳滑板无偏磨问题,碳滑板的磨损率显著下降。

### 2.7.2 B 市地铁 6 号线弓网异常原因及整改措施

B 市地铁 6 号线自一、二期工程开通后,出现了较为严重的弓网问题,其中 6 号线一期工程全线 46 处膨胀元件存在不同程度的打火花现象。为改善弓网关系,B 市地铁确定先选取 3 处烧蚀比较严重的膨胀元件进行改造试验。其改造措施为将膨胀元件拆除,更换为非绝缘锚段关节。3 处试点在整改后均未再出现弓网打火花现象,弓网关系良好。目前 B 市地铁 6 号线已按试点整改方案完成了所有线路膨胀元件的改造工作。

通过深入交流了解到:A 市地铁 11 号线和 B 市地铁 6 号线在开通初期均采用了厂商 C 生产的双辅助线型膨胀元件,这 2 条线路均出现了严重的弓网问题。A 市和 B 市的地铁运营管理方分别于 2017 年 3 月和 2015 年 5 月对该膨胀元件进行了换型,换型后弓网关系良好。

## 3 改进措施

9 号线也采用了相同类型的产品,可参考 A 市地铁 11 号线及 B 市地铁 6 号线的整改措施。

### 3.1 优化膨胀元件辅助线过渡段长度

对膨胀元件辅助线过渡段长度进行优化,延长

辅助线倒角过渡长度,过渡段由 100 mm 延长至 150 mm,并将过渡平面打磨成圆面,以减缓受电弓碳滑板经过时的撞击。膨胀元件辅助线过渡段长度优化前后的实物图对比如图 6 所示。



a) 优化前

b) 优化后

图 6 膨胀元件辅助线过渡段长度优化前后实物图对比

Fig. 6 Comparison of pictures of expansion element auxiliary line transition part length before and after optimization

### 3.2 优化膨胀元件辅助线过渡形式

采用单辅助导线过渡形式,即将膨胀元件其中 1 根辅助导线更换为绝缘胶条,且采用长辅助线(长度由 1 060 mm 增加到 1 140 mm)过渡,以加大弓网转换过渡区域。膨胀元件辅助线过渡形式优化前后实物图对比如图 7 所示。



a) 双辅助线过渡(优化前)

b) 单辅助线过渡(优化后)

图 7 膨胀元件辅助线过渡形式优化前后实物图对比

Fig. 7 Comparison of pictures of expansion element before and after auxiliary line transition mode optimization

### 3.3 优化膨胀接头布置

膨胀接头原设计值均分布在拉出值为 0 的位置,膨胀元件与滑板受流的电气磨耗导致碳滑板中部出现 3 处凹槽。通过重新布置膨胀接头的安装位置,在  $-90 \sim 90$  mm 范围内以 10 mm 拉出值作为 1

个分布区域,每个区域布置 2~3 台膨胀接头,以有效降低碳滑板中部集中磨耗的情况,使碳滑板磨耗趋于平均,同时减少弓网过渡的冲击。

### 3.4 优化列车牵引软件

对列车牵引软件进行升级,优化网压低于 950 V 时高速断路器延时断开和跳弓引起的牵引系统工作时间过短、制动工况下逆变器过流及网压波动导致逆变器停机等问题。

## 4 结语

通过采取上述整改措施,广州地铁 9 号线车辆弓网关系得到了极大改善。对设备优化后 1 年内的相关数据进行统计分析可知,碳滑板的使用寿命大为延长,碳滑板的平均寿命从优化前的 122 d 增加至优化后的 235 d;减少了由于列车牵引频繁故障对生产组织造成的冲击,牵引故障率从优化前的 5.2 次/月下降至优化后的 0.6 次/月;列车的相关维修成本大大减低,从优化前的 38.40 万元/年下降至优化后的 19.84 万元/年。

## 参考文献

- [1] 吴积钦. 受电弓与接触网系统[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010: 150.  
WU Jiqin. Pantograph and catenary system[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010: 150.
- [2] 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.
- [3] 朱伟鹏. 深圳地铁 11 号线受电弓碳滑板磨耗率研究[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(4): 121.  
ZHU Weipeng. Research on wear rate of pantograph carbon slide in Shenzhen Metro Line 11[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(4): 121.
- [4] 周成尧, 刘畅. 北京地铁 6 号线受电弓滑板异常磨耗研究[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(增刊 1): 51.  
ZHOU Chengyao, LIU Chang. Research for abnormal wear of pantograph in Beijing Subway Line 6[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(S1): 51.

(收稿日期:2021-02-25)