

北京地铁 6 号线西延线受电弓碳滑板 异常磨损原因及其解决方法

王红艳

(北京市地铁运营有限公司运营四分公司, 100102, 北京//高级工程师)

摘 要 受电弓碳滑板是影响列车安全运行的关键设备。针对北京地铁 6 号线(以下简称“6 号线”)西延线开通后出现的受电弓碳滑板异常磨损问题,从碳滑板材质特性、接触网拉出值斜率、弓网接触压力等方面分析了可能造成 6 号线碳滑板出现异常磨损问题的原因,并针对性地给出了解决碳滑板异常磨损的有效方法,包括定期打磨和更换碳滑板、选择导电率较低的碳滑板、调整交错式锚段关节处地接触线间距、安装弓网压力检测装置等,使弓网关系的匹配值达到最优,从而达到减少碳滑板异常磨损的目的。

关键词 城市轨道交通;受电弓碳滑板;异常磨损

中图分类号 TM922.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.008

Causes and Solutions of Pantograph Carbon Strip Abnormal Wear on Beijing Metro Line 6 West Extension

WANG Hongyan

Abstract Pantograph carbon strip is the key component affecting train operation safety. Aiming at the pantograph carbon strip abnormal wear problem appeared after the launch of Beijing Metro Line 6 west extension (hereinafter refer to as 'Line 6'), the possible causes of Line 6 carbon strip abnormal wear are analyzed from aspects such as carbon strip material properties, slope of catenary stagger value, and pantograph-catenary contact pressure. To solve these problems accordingly, effective solutions are given such as regular grinding and carbon strip replacement, choosing carbon strip with low conductivity, adjusting the contact line spacing at the staggered anchor joint, and installing pantograph-catenary pressure detection device, so that pantograph-catenary matching degree is optimized, achieving the goal of carbon strip abnormal wear reduction.

Key words urban rail transit; pantograph carbon strip; abnormal wear

Author's address The 4th Operation Branch of Beijing Subway Co., Ltd., 100102, Beijing, China

北京地铁 6 号线(以下简称“6 号线”)全长 53 km。其中,6 号线一期于 2012 年 12 月 30 日开通运营,列车编号为 001—041;二期于 2014 年 12 月 28 日开通运营,列车编号为 042—064。一期和二期均配置天海牌受电弓。西延线于 2018 年 12 月 30 日开通运营,配置东洋牌受电弓。6 号线全线共有 84 列动车组,采用接触网供电方式,每列列车第 2、4、7 节车辆的车顶布置受电弓设备。

受电弓碳滑板是列车从接触网上获取电能的设备,通过碳滑板与接触网滑动摩擦取电。车辆运行过程中,碳滑板承受着接触网压力、车辆振动等载荷,是影响车辆安全运行的关键设备。碳滑板在车辆运行过程中会出现拉弧、振动、裂纹及网压异常等现象,若碳滑板出现的轻微损伤未被及时发现,将会使损伤范围不断扩大,最终导致弓网关系劣化,影响行车安全^[1]。

6 号线西延线自开通运营以来,碳滑板异常磨损问题严重,造成车辆在修程以外频繁更换碳滑板,增加了车辆维修成本和检修工作量。根据西延线开通后碳滑板的异常磨损情况以及日常检修过程中碳滑板磨损跟踪统计情况,本文分析了可能造成 6 号线碳滑板异常磨损的原因。结合 6 号线运营实际情况,提出了减少碳滑板异常磨损的有效解决方法,为今后出现的受电弓碳滑板异常磨损问题提供参考。

1 6 号线受电弓碳滑板异常磨损情况介绍

1.1 碳滑板更换

2018 年 11 月 6 号线全线试运营,12 月中旬开始受电弓接触网关系恶化,碳滑板出现了异常磨损问题,主要表现在以下两个方面:①碳滑板偏磨严重;②碳滑板磨损速率急剧加快,一般 5~7 d 就需更换。西延线开通后碳滑板异常磨损的最终形态

呈中间凸起、两侧凹陷形状,且碳滑板表面粗糙,如图1所示。

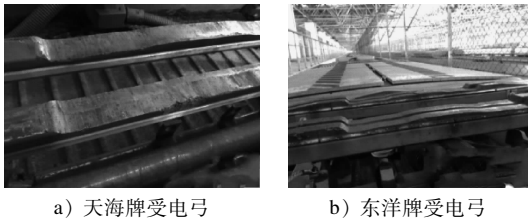


图1 碳滑板异常磨耗情况

Fig.1 Abnormal wear of carbon strip

碳滑板作为耗材部件,需要不断更新替换。根据各年度6号线碳滑板更换情况(见表1)可以看出:西延线开通运营之前,碳滑板每年更换数量在1 000~1 200根。而自西延线开通以来,仅2018年12月碳滑板更换数量就达1 150根,其中2019年1月1日—2019年1月8日就更换了366根。碳滑板更换数量较多的原因,除了列车数量增加引起的碳滑板正常磨耗外,主要是因为碳滑板出现了异常磨耗问题:西延线开通前碳滑板磨耗率约为2 mm/万km,开通后碳滑板磨耗率约为23 mm/万km,可见磨耗率增加了近10倍。

表1 6号线更换碳滑板统计表

Tab.1 Statistics of carbon strip replacement on Line 6

日期	车组数/列	线路走行车公里/(车·km)	碳滑板更换数量/根	磨耗率/(mm/(万km))
2015年	64	6 768 960	1 208	2.68
2016年	64	7 111 165	1 074	2.27
2017年	64	7 353 718	1 086	1.90
2018年1月—2018年11月	64	7 207 787	1 031	1.90
2018年12月11日—2018年12月31日	63 21	670 666	924(天海牌) 226(东洋牌)	23.71 7.90
2019年1月1日—2019年1月8日	63 21	223 837	238(天海牌) 128(东洋牌)	22.54 16.10

1.2 碳滑板磨耗跟踪

6号线一、二期的线路长度分别为28.3 km、14.5 km,西延线的线路长度为10.6 km。为了对比西延线和一、二期正线对碳滑板磨耗异常的影响,制定了6d的测试方案,即总共设置4列车,其中,2列车(编号为025和071)每天只跑1次西延线,2列车(编号为072和009)尽量多跑西延线。统计每列

车12根碳滑板的日磨耗量,对4列车碳滑板H₁、H₂、H₃位置(见图2)的平均磨耗率进行对比分析,如表2所示。

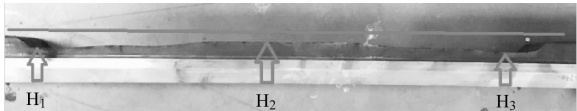


图2 碳滑板磨耗量跟踪位置

Fig.2 Tracking position of carbon strip wear amount

表2 每组车H₁、H₂、H₃位置的平均磨耗率

Tab.2 Average wear rate at positions H₁, H₂ and H₃ of each vehicle set

位置	不同列车碳滑板的平均磨耗率/(mm/万km)			
	025车(天海牌碳滑板)	071车(东洋牌碳滑板)	072车(东洋牌碳滑板)	009车(天海牌碳滑板)
H ₁	1.93	1.81	1.23	1.48
H ₂	0.39	0.43	0.39	0.20
H ₃	1.82	1.81	1.62	1.63

从表2可以看出:

1) 天海牌和东洋牌受电弓碳滑板H₁、H₃位置的磨耗率依旧保持很高,因此减少西延线运行并未改善磨耗。

2) 通过对比025车和009车以及071车和072车发现,西延线运行较少车辆的碳滑板磨耗率高于西延线运行较多车辆的碳滑板磨耗率。

3) 通过对比025车和071车以及009车和072车发现,相近运行区间列车,天海牌碳滑板磨耗率略高于东洋牌碳滑板磨耗率。

由于本测试方案涉及的车次较少、测量时间较短,仅从目前碳滑板磨耗跟踪结果来看,6号线西延线的开通对碳滑板异常磨耗影响较大。

2 碳滑板异常磨耗原因分析

2.1 碳滑板材质特性

碳滑板的磨耗率与其材质特性和电气参数匹配存在直接关系^[2]。弓网接触使碳滑板承受较大电流时,其产生的高温会导致碳滑板与金属托架出现剥离甚至掉块。当掉块尺寸较大且超过碳滑板截面宽度时,如果碳滑板的强度和硬度较低,在其薄弱处经常会发生碰撞,造成碳滑板出现凹槽、裂纹及断裂等异常磨耗现象。表3给出了6号线配置的两种不同品牌受电弓碳滑板的特性。

6号线配置的是天海牌和东洋牌碳滑板。为了

表 3 6 号线不同品牌受电弓碳滑板特性对比

Tab. 3 Comparison of Line 6 pantograph carbon strip properties of different brands

品牌	密度/ (mg/m ³)	硬度/ HR	电绝缘率/ (μΩm)	弯曲强 度/MPa	铜的质量 分数/%	电导率/ (S/μm)
东洋牌	2.9	95	1.8	110	42~54	18~20
天海牌	2.3	108	16.1	74	<30	12~16

比较这两种材质磨耗情况,每旬检修时对碳滑板磨耗进行采集测量。图 3 是 2019 年 1 月—2019 年 6 月两种品牌受电弓碳滑板磨耗率的统计数据对比。从图 3 可以看出:更换后前期,东洋牌碳滑板磨耗率明显比天海牌磨耗率低;随着磨耗时间增加,东洋牌碳滑板磨耗率较天海牌碳滑板磨耗率也稍低;6 月 4 日东洋牌碳滑板磨耗率约为 0.99 mm/万 km,天海牌碳滑板磨耗率约为 1.38 mm/万 km。

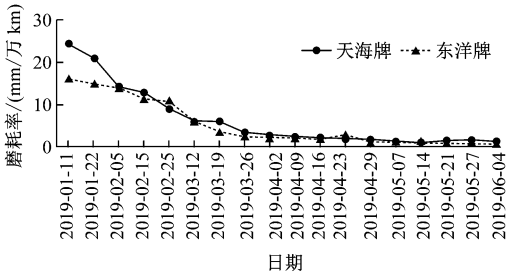


图 3 两种品牌受电弓碳滑板磨耗率统计

Fig. 3 Statistics of carbon strip wear rate of two brands

图 4 是碳滑板磨耗区域统计表。其中, W_1 是接触网拉出值约 ± 200 mm 的位置, W_2 是接触网中间位置;磨耗比例为 W_2 处碳滑板磨耗率与 W_1 处碳滑板磨耗率的比值,该值越高,说明碳滑板磨耗

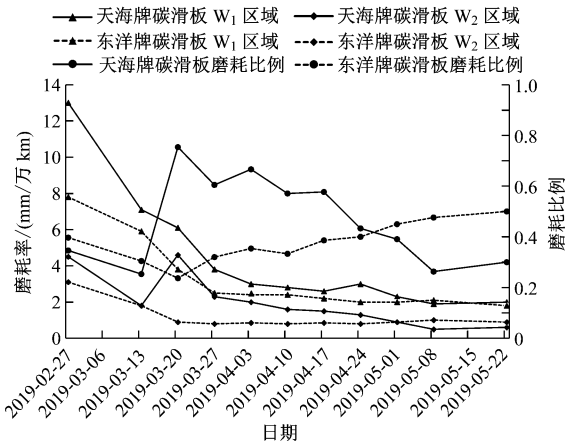


图 4 两种品牌受电弓碳滑板不同区域磨耗率统计

Fig. 4 Wear rate statistics of pantograph carbon strip at different positions of two brands

越均匀。从图 4 中可以看出:磨耗最严重的区域出现在 W_1 位置;东洋牌碳滑板比天海牌碳滑板的磨耗更加均匀。

由此可见,碳滑板材质特性对于其磨耗率和磨耗均匀程度都有很大影响。

2.2 接触网拉出值斜率

6 号线一期接触网设计为正弦波布置,二期与西延线接触网采用“之”字形布置。其中,接触网正弦波概率分布呈两端高、中间低的趋势,接触网“之”字形布置呈均匀分布趋势。因此,从全线接触网拉出值布置角度分析,“之”字形布置优于正弦波布置。接触网正弦波布置在其最大拉出值处缓慢过渡,而“之”字形布置在其最大拉出值处过渡急剧,因此接触网最大拉出值位置会对碳滑板出现异常磨耗产生重要影响。

选取西延线苹果园站—苹果园南路站 XZ16 锚段进行分析。西延线接触网平面布置的规律是:沿线路方向每 8 m 接触网拉出值变化 33 mm。将 XZ16 锚段分为 25 段,计算每段接触网拉出值斜率,并依据列车运行速度 80 km/h 与接触网拉出值斜率,推算出 XZ16 锚段接触线布置引起的滑板横向移动速度对应的列车运行速度,推算结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出:在 1 个锚段内,碳滑板实际受到的横向移动速度的变化范围很大;当列车以 80 km/h 经过此锚段时,接触点在快速移动区域的最大横向移动速度(分段序号 6 对应的列车运行速度)相当列车以 170 km/h 在慢速移动区域的横向移动速度;快速移动区域的横向移动速度(分段序号 6 对应的列车运行速度)是慢速移动区域速度(分段序号 7 对应的列车运行速度)的两倍多;接触网拉出值斜率突变位置出现在接触网拉出值最大处,且在 1 个周期内,会重复出现这样的异常横向摩擦受流的情况,此为导致碳滑板磨耗率增大的重要原因。

2.3 弓网接触压力

碳滑板与接触网之间通过一定的接触压力保持接触,二者的动态接触力直接影响受流质量。如果接触压力过大,会造成碳滑板机械磨耗过快。弓网接触压力减小到一定值,当高达几百安培的电流通过时,由于有效取流面积较小,弓网之间的空气间隙瞬间被击穿,引起弓网燃弧,此时产生的大电流和高温会使碳滑板发生电气灼伤,造成碳滑板表

表 4 XZ16 锚段接触网拉出值斜率及其相应推算的列车速度
Tab.4 Slope of catenary stagger values at XZ16 anchor segment and the deduced train speeds

分段序号	接触网拉出值斜率	推算的列车运行速度/(km/h)	接触网拉出值位置
1	0.004 500	87. 272 727	快速横向移动区域
2	0.006 951	134. 811 530	快速横向移动区域
3	0.008 857	171. 774 892	快速横向移动区域
4	0.008 750	169. 696 970	快速横向移动区域
5	0.008 875	172. 121 212	快速横向移动区域
6	0.008 875	172. 121 212	快速横向移动区域
7	-0.004 125	-80. 000 000	慢速横向移动区域
8	-0.004 125	-80. 000 000	慢速横向移动区域
9	-0.004 125	-80. 000 000	慢速横向移动区域
10	-0.004 125	-82. 424 242	慢速横向移动区域
11	-0.004 125	-80. 000 000	慢速横向移动区域
12	-0.004 125	-80. 000 000	慢速横向移动区域
13	-0.004 125	-80. 000 000	慢速横向移动区域
14	-0.004 125	-80. 000 000	慢速横向移动区域
15	-0.004 125	-82. 424 242	慢速横向移动区域
16	-0.004 125	-80. 000 000	慢速横向移动区域
17	-0.004 125	-80. 000 000	慢速横向移动区域
18	-0.004 250	-82. 424 242	慢速横向移动区域
19	0.009 143	177. 316 017	快速横向移动区域
20	0.008 000	155. 151 515	快速横向移动区域
21	0.007 857	152. 380 952	快速横向移动区域
22	0.007 857	152. 380 952	快速横向移动区域
23	0.008 000	155. 151 515	快速横向移动区域
24	0.004 898	94. 990 724	快速横向移动区域
25	0.004 211	81. 658 692	快速横向移动区域

面磨耗不均匀。因此,弓网接触压力也直接影响碳滑板的异常磨耗。

西延线车辆配置的是东洋牌受电弓,为了对比分析弓网接触压力是否对碳滑板异常磨耗有影响,将 1 列车的抬升力由 70 N 调整为 80 N,以减少电磨耗、增加机械磨耗,从而找到两者之间的平衡点。东洋牌受电弓弓网接触压力调整前后碳滑板磨耗量对比如图 5 所示。从图 5 可以看出:弓网接触压力调整后碳滑板磨耗量略有增大,但整体变化不明显,因此提高接触压力对磨耗量影响不大。另外,经过对比一、二期和西延线受电弓安装接口,未找到由安装因素引起的碳滑板磨耗量的变化。由于

安装东洋牌受电弓的 044 车已在一、二期运行了 30 万 km,未出现异常磨耗现象,因此可认为弓网接触压力并不是引起异常磨耗问题的主要原因。

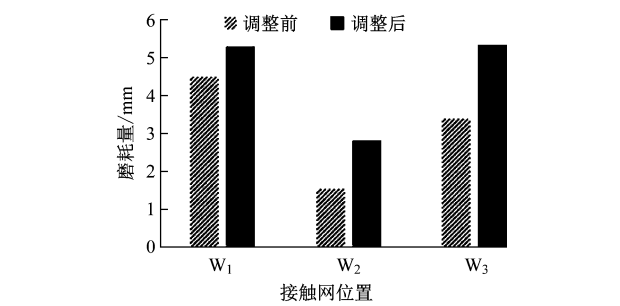


图 5 弓网接触压力调整前后碳滑板磨耗量对比(东洋牌受电弓)

Fig.5 Comparison of carbon strip wear amount before and after pantograph-catenary contact pressure adjustment (Toyo pantograph)

除了上述提到的原因,其他如弓头位置倾斜、接触网的材质和拉出值、接触网悬吊结构的刚度及列车加减速等原因,也会对碳滑板异常磨耗造成一定影响。

3 碳滑板磨耗的解决方法

结合 6 号线的实际运营情况,经过分析和预测,认为可以采取下述方法来减少该线路碳滑板的异常磨耗。

3.1 定期打磨和更换碳滑板

在碳滑板与接触网间的反复滑动冲击下,为防止出现坑槽和凸台区域的碳滑板异常磨耗越来越严重,可以对出现异常磨耗的碳滑板进行表面打磨,以有效消除碳滑板两侧和中部的高差,以保证碳滑板均匀磨耗。以天海牌碳滑板为例,如果 2 根碳滑板高差超过 5 mm,就需要将其表面进行打磨;当碳滑板厚度磨损到小于 24 mm(东洋牌碳滑板为 8 mm)时,就需将所有碳滑板及时更换,以保证其表面磨耗均匀。更换新的碳滑板时,将 1 把水平尺放在 4 根碳滑板的磨耗面上,确保每根碳滑板的磨耗面均能和水平尺完全接触。根据 2019 年 3 月 5 日—2019 年 6 月 4 日两种品牌受电弓碳滑板的更换数量记录统计(见图 6),5 月份天海牌碳滑板共更换了 152 根,东洋牌碳滑板共更换了 52 根,其更换数量比 2019 年 1 月份明显减少。通过定期打磨和更换碳滑板,6 号线碳滑板异常磨耗数量明显降低,使用寿命明显延长。

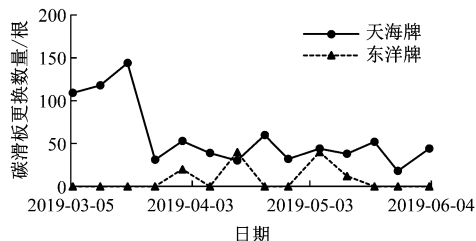


图6 两种品牌受电弓碳滑板更换数量记录

Fig. 6 Replacement amount record of pantograph carbon strip of two brands

3.2 碳滑板材质的选择

避免碳滑板出现异常磨耗问题的有效处理途径,是做好碳滑板的选型工作。技术人员要对碳滑板的整体使用性能要求进行把控,对其材质特性、制作工艺等指标进行确定。根据车辆的运行情况以及运行线路的受流工况,尽量选择电阻率低的碳滑板材质。碳滑板的电阻率越低,与接触网的接触温升越低,产生的电磨耗越小。目前,地铁上应用的碳滑板按照电阻率从小到大排序,分别是钢滑板、粉末冶金滑板、浸金属碳滑板、纯碳滑板。碳滑板与接触线保持良好接触,将电流引入车内。如果选用的碳滑板与接触线材质不匹配,两者经常性发生碰撞,会使接触线表面变粗糙,增大黏结磨耗。因此,选用导电率较低的碳滑板有利于降低受电弓与接触网的磨耗率,保证碳滑板和接触网的寿命足够长,满足长期超负荷的工作要求。

3.3 接触网拉出值的调整

受电弓滑板最理想的接触网拉出值布置方式,类似于柔性接触网,即当列车匀速通过时,接触线在滑板表面依次匀速向碳滑板左、右表面移动。刚性接触网的“之”字形布置为假性“之”字布置,在1个周期内会出现“一慢(向左)两快(连续向右)”的滑动情况。当锚段关节间距减小时,尽量缩减“两次快速向右”的作用区间长度,这更加接近柔性接触网的布置情况。

西延线接触网拉出值总体采用“之”字形布置,其交错式锚段关节处接触网之间的距离约300 mm。因此,针对西延线锚段关节设计,在保证更换接触线时架线小车通过的情况下,缩短交错式锚段关节处接触线间距,其中绝缘锚段关节处接触线间距为 (260 ± 20) mm,非绝缘锚段关节处接触线间距为 (150 ± 20) mm。这样,一方面使得碳滑板中心可以多被接触,另一方面可减少碳滑板两端的磨损。另外,接触网拉出值最大位置两侧的变化斜率应设计

为一致,以解决其最大拉出值两侧斜率突变的问题。

3.4 安装弓网接触压力检测装置

针对弓网接触压力不符合标准静态压力(天海受电弓为 $100\text{ N}^{[3]}$,东洋受电弓为 $70\text{ N}^{[4]}$)导致的碳滑板异常磨耗问题,需要对碳滑板标准静态接触压力进行调整。对碳滑板进行月修及更换时都需进行人工测量,若出现标准静态压力范围之外的数值,就需对其进行调整。目前的调整方法是:先调节受电弓调压阀,使用弹簧秤拉着受电弓横梁,从其最大工作高度匀速向下拉到落弓位置,测量弹簧秤读数是否处于标准范围内。通过采用加强对检修人员碳滑板状态检查方法的培训以及日常检查力度等措施,6号线碳滑板异常磨耗数量明显降低。

为了能够实时检测车辆运行过程中弓网接触压力的变化,并使其保持在一个合理的范围内,目前最有效的方法是安装弓网接触压力检测装置。该装置包括压力传感器、加速度传感器及弹簧盒等,其中压力传感器和加速度传感器均安装在受电弓天平上。考虑到接触网在受电弓滑板上方位置的不确定性以及受电弓的结构,在天平与弹簧盒间共安装4个相同的压力传感器来测量静态抬升力。列车运行时,由于车体振动、轨道不平顺及接触网高度变化等的影响,受电弓会产生振动,进而产生垂向加速度,弓网接触压力也会随时发生变化。为了提高接触压力测量的准确度,在支撑弹簧盒处增加2个加速度传感器来测量受电弓的垂向加速度。弓网接触压力检测装置安装示意图如图7所示。弹簧盒处传感器安装示意图如图8所示。



图7 弓网接触压力检测装置安装示意图

Fig. 7 Installation diagram of pantograph-catenary contact pressure detection device

该装置安装时弹簧盒与天平分离,将压力传感器安装在弹簧盒和天平之间。全尺寸仿制弹簧盒并将其向外侧延伸至加速度传感器安装底座,实现加速度传感器与弹簧盒固定;全尺寸仿制天平与弹簧盒连接件。弹簧盒采用钛合金材质,保证了整体

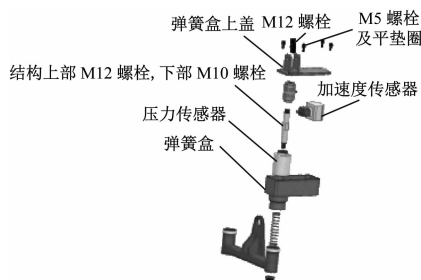


图8 弹簧盒处传感器安装示意图

Fig.8 Diagram of sensor installation at spring box

结构牢固、稳定、轻便。

弓网接触压力检测装置可以实时监测地铁列车运行过程中弓网接触压力的变化情况,根据其变化趋势及时调整接触压力到最佳状态,以保持碳滑板的机械和电气磨耗最小,减少碳滑板出现偏磨、掉块、断裂等异常问题,最终提高碳滑板的正常使用寿命。

另外,该装置可以准确找出接触网的硬点,提高了接触网的检修、维修效率。通过分析弓网加速度曲线的变化趋势,可以查找最大波峰和波谷处的加速度值。如果该处的加速度值过大,则说明此处弓网冲击较大,是接触网维修的隐患点。

4 结语

针对碳滑板磨耗问题,检修人员要加强碳滑板状态的日常检查,做好其磨耗程度的跟踪和记录。对磨损超限或接近超限的碳滑板要及时打磨或更换,并实

(上接第43页)

UTO(无人值守的列车自动运行),在FAO停站过程中均需保证乘客的体感舒适度。通过提升停车制动阶段车辆的跟随性,以及改善ATO停站算法等有效措施,提高FAO列车停站舒适度,提升乘客满意度,使轨道交通更好地服务于市民。

参考文献

- [1] 何之煜,杨志杰,吕旌阳.基于自适应模糊滑模的列车精确停车制动控制算法[J].中国铁道科学,2019,40(2):122.
HE Zhiyu, YANG Zhijie, LYU Jingyang. Braking control algorithm for accurate train stopping based on adaptive fuzzy sliding mode[J]. China Railway Science, 2019, 40(2): 122.
- [2] 罗松. CTCS2 + ATO 城际铁路列控系统总体技术研究[J]. 铁路通信信号工程, 2015, 12(3): 1.
LUO Song. General technique research on CTCS2 + ATO intercity railway train control system[J]. Railway Signalling & Communica-

时监测弓网接触压力的变化情况,及时调整锚段关节处接触线间距,同时加强司机驾驶技能培训,提高列车运行平稳性,最大限度减少碳滑板异常磨耗。总之,需在多方面加强技术运用和管理,提高6号线列车的运行品质,为乘客安全出行做出贡献。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 严石,梅炳初,周卫兵. 新型受电弓滑板材料的研究[J]. 机车电传动, 2009(6): 21.
YAN Shi, MEI Bingchu, ZHOU Weibing. Research on new material for pantograph slide plates[J]. Electric Drive for Locomotives, 2009(6): 21.
- [3] 上海天海受电弓制造有限公司. 北京地铁6号线地铁车辆受电弓使用维护说明书[Z]. 上海:上海天海受电弓制造有限公司,2017.
China Shanghai Sky & Sea Pantograph Manufacturing Ltd. Operation and maintenance instructions for pantograph of metro vehicles on Beijing Metro Line 6[Z]. Shanghai: China Shanghai Sky & Sea Pantograph Manufacturing Ltd., 2017.
- [4] 东洋电机制造株式会社. 集电装置 PT7203 单臂受电弓操作保养手册[Z]. 东京:东洋电机制造株式会社,2018.
Toyo Denki Seizo K. K. Operation and maintenance manual of PT7203 single-arm pantograph for current collector[M]. Tokyo: Toyo Denki Seizo K. K., 2018.

(收稿日期:2020-12-04)

tion Engineering, 2015, 12(3): 1.

- [3] 陈德旺. 城轨列车智能驾驶的优化模型及算法[M]. 北京:北京交通大学出版社,2014.
CHEN Dewang. Optimization models and algorithms for intelligent train operation of urban rail transit[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [4] 张友兵,陈志强,王建敏,等. 高速铁路ATO系统控车舒适度技术研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(3): 67.
ZHANG Youbing, CHEN Zhiqiang, WANG Jianmin, et al. Research on the comfort control technology of the ATO system in high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(3): 67.
- [5] 李德仓,孟建军,郝帅,等. 基于模糊自适应PID的列车智能驾驶算法[J]. 兰州交通大学学报, 2018, 37(4): 27.
LI Decang, MENG Jianjun, HAO Shuai, et al. An intelligent train operation based on fuzzy adaptive PID[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2018, 37(4): 27.

(收稿日期:2020-12-29)