

洛阳地铁 1 号线列车受电弓碳滑板异常磨损分析与改进研究

王 亮 牛秀蓉 罗 敏

(洛阳市轨道交通集团有限责任公司运营分公司, 471023, 洛阳)

摘 要 [目的] 检查发现洛阳地铁 1 号线自试运营以来存在弓网关系恶劣、正线发生弓网拉弧现象, 检查发现受电弓碳滑板上存在灼烧点且磨损严重。为解决受电弓碳滑板异常磨损问题, 须研究弓网异常磨损原因, 并提出解决措施。[方法] 重点探讨了弓网技术性能、碳滑板材质、弓网打磨、接触压力、外部气候环境温度及湿度等因素对受电弓和接触网磨损的影响, 探讨了弓网异常磨损的影响因素和磨损规律。[结果及结论] 研究表明, 洛阳地铁 1 号线受电弓碳滑板磨损为中心偏磨型磨损, 为解决此类磨损问题, 特提出针对性的处理措施和预防建议, 包括建立接触网、受电弓的专项台账, 借鉴同行对弓网异常磨损的应对经验, 根据弓网磨损情况优化检修方式, 充分运用弓网检测棚等信息化检测设备来提升弓网技术参数的监控和调节效率等。

关键词 地铁; 列车受电弓; 碳滑板; 异常磨损; 接触压力; 磨损规律

中图分类号 TM922.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.052

Analysis and Improvement of Pantograph Carbon Strip Abnormal Wear on Luoyang Metro Line 1

WANG Liang, NIU Xiurong, LUO Min

(Luoyang Rail Transit Group Co., Ltd., Operation Branch, 471023, Luoyang, China)

Abstract [Objective] During inspection, problems like the bad pantograph and catenary relation, pantograph-catenary arcing on the main line, burning points and serious wear on the pantograph carbon strip are detected since the trial operation of Luoyang Metro Line 1. In order to solve the abnormal wear of pantograph carbon strip, it is necessary to study the causes and put forward solutions. [Method] The influence of the technical performance of the pantograph catenary, carbon strip material, the pantograph catenary grinding, contact pressure, external climate environment temperature and humidity on the pantograph catenary wear is mainly discussed. The influencing factors and the pattern of the pantograph catenary abnormal wear is examined. [Result & Conclusion] The research re-

sults show that the pantograph carbon strip wear on Luoyang Metro Line 1 is of central partial wear type. In order to solve such wear problems, targeted treatment measures and prevention suggestions are proposed, including establishing special accounts for catenary and pantograph, drawing on experiences of the peers in dealing with abnormal wear of the pantograph catenary, optimizing the maintenance mode according to the wear condition of the pantograph catenary, and making full use of information testing equipment such as the pantograph catenary inspection shed to improve the efficiency of monitoring and adjusting the technical parameters for pantograph catenary.

Key words metro; train pantograph; carbon strip; abnormal wear; contact pressure; wear pattern

洛阳地铁 1 号线初期运营于 2021 年 3 月 28 日顺利开通。1 号线牵引供电系统采用 DC 1 500 V 架空接触网受流方式, 正线采用刚性接触网, 场、段采用柔性接触网。接触网采用铜银合金接触线。车辆采用 TSG22 型受电弓, 额定电压为 1 500 V, 额定电流为 1 500 A, 标准静接触压力为 $120\text{ N} \pm 10\text{ N}$; 配备有自动降弓装置, 是一种通过空气回路控制升、降动作的铰接式机械构件。受电弓通过弓头上的浸金属碳滑板从接触网上集取电流, 并传送到车辆电气系统。

自试运行以来, 弓网关系恶劣, 正线发生弓网拉弧现象, 通过对受电弓碳滑板进行检查发现碳滑板上存在灼烧点且磨损严重。为此开展碳滑板异常磨损专项研究, 从 2021 年 1 月 18 日至 6 月 18 日共开展 5 个月、11 轮受电弓碳滑板测量普查, 共计 150 列次, 更换碳滑板 180 根。经过技术整改, 碳滑板从异常磨损 25.2 mm/万 km 恢复至正常磨损 0.8 mm/万 km 。数据表明, 碳滑板磨损量在第 3、4 轮 (1 月 29 日至 2 月 14 日) 平均万 km 磨损量达到峰值; 第 7 轮 (即 2 月 24 日至 4 月 2 日) 列车万 km 磨损量数据逐渐趋于正常量; 持续跟进第 8、9、10、11

轮碳滑板检查,碳滑板平均万 km 磨耗量均处于正常值,稳定性持续良好,如表 1 所示。

表 1 碳滑板普查记录

Tab.1 Carbon strip sensus record

普查阶段	更换碳滑板量/根	磨耗量/(mm/万 km)
第 1 轮	34	10.32
第 2 轮	18	19.70
第 3 轮	48	25.02
第 4 轮	38	25.20
第 5 轮	14	12.10
第 6 轮	12	9.97
第 7 轮	12	3.01
第 8 轮	2	1.35
第 9 轮	2	1.04
第 10 轮	0	0.96
第 11 轮	0	0.80

1 异常磨耗情况

受电弓碳滑板正常磨耗量不超过 2 mm/万 km。对 19 列车进行受电弓状态排查发现,碳滑板存在异常磨耗,部分弓角存在磨损现象。具体体现为碳滑板出现中心型异常磨耗,部分弓角出现磨损,个别碳滑板有磕碰和拉弧现象,部分车辆的贯通道顶部有铜屑、铝托架有电烧损痕迹。

受电弓采用铝托架结构,碳滑板长 1 050 mm,中心位置为距离碳滑板两边 525 mm 位置点,宽度 60 mm,碳层加铝托架总厚度为 36.8 mm,纯碳层厚度 22 mm(有 6 mm 被包在铝托架的卡槽中),如图 1 及图 2 所示。

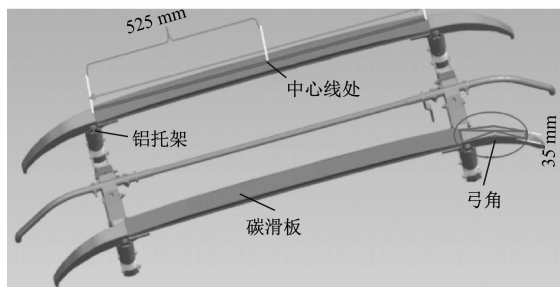
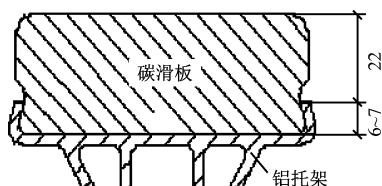


图 1 受电弓弓头组件

Fig.1 Pantograph head assembly



注:尺寸单位 mm。

图 2 碳滑板横断面图

Fig.2 Carbon strip cross-section

碳滑板达到以下标准即需更换:①碳滑板根部厚度小于 4 mm;②滑板出现槽纹或刃部有冲击;③碳滑板有裂纹且裂纹上任何点距滑板侧边距离小于 10 mm 或裂纹长度大于 100 mm;④碳滑板出现纵向贯穿裂纹;⑤ 50 mm 范围内凹槽深度大于 3 mm 的需进行打磨,50 mm 范围内凹槽深度大于 6 mm 的需进行更换。

2 异常磨耗原因分析

弓网之间的磨耗情况可分为机械磨耗和电气磨耗两种:①机械磨耗是碳滑板从接触网摩擦取电过程中引起的正常磨耗。②电气磨耗是弓网接触不良产生的电弧或电火花对受电弓造成的拉弧、电腐蚀、滑板偏磨等异常磨耗。弓网关系的优劣取决于弓网的技术和匹配性能^[1]。本研究从接触网和受电弓两个方面展开讨论,重点研究技术性能、滑板材质、弓网打磨、接触压力、外部气候环境的温度及湿度等因素对弓网磨耗的影响。

2.1 异常磨耗分类

碳滑板磨耗按照磨耗位置和样式分为 3 种:①中心偏磨型磨耗——磨耗集中于碳滑板中心位置附近,靠近弓角边缘磨耗较小,磨耗面呈残月状^[2]。②波浪型磨耗——弓网状态不平稳时,磨耗位置不规则,导致碳滑板表面呈波浪形的磨损。③裂纹型磨耗——由于接触网悬挂导高参数的变化,碳滑板受到接触线机械冲击,造成碳滑板出现裂纹或者磕碰掉块等情况。结合洛阳地铁 1 号线受电弓碳滑板磨耗位置统计数据,碳滑板磨耗多数集中在中心位置 ± 130 mm 处,属中心偏磨型磨耗。

碳滑板磨耗按照故障状态分 2 种:①碳滑板掉块——由于弓网硬度、抗冲击强度的差异,弓网压力异常时,碳滑板高速通过接触线硬点位置时会出现大面积掉块的现象,由于掉块的部位是整个滑板最薄弱的区域,会影响正常的接触受流,故应及时检查更换碳滑板。②碳滑板拉弧——由于弓网接触不良造成弓网摩擦过程中产生电火花,灼伤碳滑板。

从弓网两方面分析拉弧原因为:①受电弓原因——整弓状态不平衡,受电弓碳滑板的磨耗面不在同一水平面上,或者弓网接触压力变化导致弓网接触不良,从而产生拉弧现象。②接触网原因——在弓网磨合初期,弓网配合能力差。由于接触网悬挂导高、锚段关节、硬点等参数变化,会导致弓网接触不良,引起拉弧现象^[3]。随着弓网参数的调节,弓网磨合状态不断地改善,配合能力提高,弓网拉

弧现象会明显减少。

2.2 接触网原因分析

异常磨耗主要发生在地铁列车加速受流区、刚性接触网连接区、锚段关节区、道岔区、减震区、坡道区等,由于接触线悬挂尺寸变化较大的区域容易导致受电弓离线或者撞击接触线,从而引发拉弧或异常磨耗^[2]。若受损的碳滑板和接触线未得到及时的更换处理,磨耗异常的接触线会损坏其他的接触线,而接触线磨耗又会加剧碳滑板的磨耗,形成恶性循环,造成更大的经济损失和安全风险。

接触网的布置方式会对碳滑板磨耗有一定的影响。我国地铁接触网布置方式主要有3种:①全波布置即接触线呈“正弦波”布置;②半波布置即接触线呈半个“正弦波”布置;③借鉴柔性接触线“之”字型折线布置方式^[4]。

可从5个方面对接触网进行调整:

1) 接触网外观检查和调整。重点检查锚段关节、绝缘关节、硬点区、刚柔接触线连接区的外观及尺寸。测量现场接触网导高、拉出值(± 280 mm)、侧向风偏移量(± 325 mm)等主要参数,核对现场安装参数与设计值的偏差;采用动态监测设备,对锚段关节、道岔、变坡点、进出站加减速区段等重点位置进行监测^[5];对隧道内粉尘、颗粒物等污染物进行监测。接触网检修项目包括季检、半年检、年检。在发生异常磨耗期间,接触网专业应缩短检修周期,2周开展一次全线普查。一旦发现异常磨耗区域或者尺寸偏差点,应及时对故障点进行打磨、对接触线悬挂导高等关键结构尺寸进行调整,以减缓弓网磨耗。

2) 接触网分布检查及调整。加强对接触网分布检查,检查接触网是否满足“之”字型分布规律,检查接触网的拉出值和偏移量是否满足设计要求,发现问题,应及时解决。

3) 根据检修规程更换受损的接触网。

4) 针对弓角异常磨耗,对高架段、线岔、锚段关节、分段绝缘等有关数据进行测量,调整或改善弓网间平滑度,消除燃弧率和硬点加速度超标。

5) 对接触污秽进行清洁消除,对粗糙或毛刺进行精细化打磨。

2.3 受电弓原因分析

2.3.1 受电弓接触压力分析

弓网之间需要保持良好的接触压力,以保持碳滑板正常的磨耗。接触压力取值偏大会导致机械磨损增加,取值过小会造成碳滑板受流不稳定,产

生电气磨损。接触压力的选取不仅要满足弓网的正常接触取流,而且还需综合考虑机械和电气磨耗两方面来选取出最佳的接触力。

洛阳地铁1号线的受电弓标准静接触压力为 $120\text{ N} \pm 5\text{ N}$,其在受电弓接触力计算限值 77.168 N 与许可最大值 146.208 N 之间,满足欧洲标准EN 50367要求。

通过对受电弓接触拉力测量可得出,风压在 $750 \sim 900\text{ kPa}$ 时,升弓后用弹簧秤钩住弓头横杆中部位置,垂直向下用力使碳滑板和接触网拉开,受电弓在碳滑板表面距车顶升起 550 mm 到库内接触网高度工作范围内上、中、下三个位置,弹簧秤的读数均在 $120\text{ N} \pm 5\text{ N}$ 范围内,符合标准要求。

2.3.2 受电弓弓角异常磨耗分析

正常情况下,受电弓和接触网仅仅在网线折弯较大和网线交叉的区域内,由弓角将交叉的网线过渡到滑板上,之后高压网线左右分步的间距(即为受电弓滑板的拉出值)保证接触网线始终是与受电弓弓头滑板的嵌金属碳层接触摩擦,不会摩擦到弓角位置。如果发生弓角严重磨损,表明接触网线始终与弓角发生频繁的接触。

在受电弓整弓状态不平衡的情况下,也可能导致弓头上单侧的弓角发生弓网接触异常的偏磨现象。洛阳地铁1号线的故障现象显示,该受电弓弓头的4组铸铝弓角都在同一侧发生偏磨,表明在车辆运行时受电弓的滑板两端和4组铸铝弓角受到的弓网接触异常的位置及摩擦力等几乎是一致的。这表明受电弓在升弓状态时,弓头的状态是水平的,整弓状态是正常的,因此推断,可能是接触网的异常所导致的弓头滑板组件的磨耗。

2.3.3 滑板材质分析

受电弓滑板材料从发展历程来看,主要为纯铜、纯碳、浸金属、C/C(碳纤维强化)复合材料^[6]。纯铜材质的机械硬度高、抗冲击能力强,但是对接触网磨损较重且存在更换难的问题;纯碳材质虽然解决了对接触网磨耗大的问题,但是抗冲击能力弱,易掉块且磨耗大;浸金属碳滑板材质是目前高铁和地铁受电弓碳滑板普遍采用的,其融合了纯铜和纯碳的优缺点,虽然依然存在含碳量大、自身磨耗相对较大的缺点,但同时具备纯铜材质的抗冲击强度、导电性强和纯碳材质的摩擦因数小等特点^[7]。目前,一些研究者正在研究C/C复合材料这种新型材料,其性能优越,具备了导电性高、强度大、磨耗量小的优点,具有较好的发展前景^[1]。但

是由于制造工艺、技术等因素的限制且价格贵,目前仅在飞机和赛车领域使用,未大批量应用于高铁和地铁领域^[1]。

为更好地对比滑板质量,选取适合线路的不同供应商的碳滑板进行装车试验,要求A与B两种碳滑板均为浸金属碳滑板,各项技术参数应一致。2021年3月7日分别在0109和0118车开展不同厂家碳滑板的装车测试,按照2 000 km的运行公里数为周期进行跟踪,开展了4轮检查。通过4轮碳滑板检查数据结果可以看出,A碳滑板与B碳滑板平均万km磨损量均在技术参数允许范围内(≤ 2 mm/万km),整体磨损中A碳滑板磨损均匀度优于B碳滑板。对比分析A与B两种碳滑板磨损情况均符合维护手册标准,碳滑板表面无缺损、裂纹,铝托架、气路正常,受电弓整体状态良好。两种碳滑板性能均满足生产需要,可以互换。碳滑板检查数据如表2所示。

表2 碳滑板检查数据

Tab.2 Carbon strip inspection data

检查阶段	碳滑板磨损值/(mm/万km)			
	A 碳滑板		B 碳滑板	
	Mp1	Mp2	Mp1	Mp2
第一轮	4.45	3.51	5.33	2.85
第二轮	0.66	1.14	0.58	0.81
第三轮	1.98	1.95	2.28	0.83
第四轮	0.80	0.87	0.99	0.90

注: Mp代表带受电弓的动车。

2.3.4 碳滑板边角几何形状分析

在弓网配合初期,受电弓碳滑板保持初始状态下棱角清晰的几何边角形状,碳滑板边角在与接触线摩擦取流时,浸金属碳滑板与接触线接触过程中碳粉浸入接触线形成润滑膜,碳滑板也形成一个相对稳定圆润的外形,弓网磨合后,匹配性更强,使磨损率下降^[8]。随着运行里程的增加,碳滑板的外形逐渐变化并进一步破坏接触线上的润滑层,弓网又开始异常磨损^[9]。这时候需要对碳滑板侧边边角进行打磨。

由于受电弓无法横向移动,接触线设置有一定的拉出值,弓网接触磨损过程中,碳滑板中心位置会形成 ± 120 mm凹槽。但是,车辆在通过道岔或曲线时,为保证接触线在碳滑板凸台区域和凹槽区域的平稳过渡,以缓解偏磨现象,需要对碳滑板上表面凹槽边缘进行打磨。

因此,需使用锉刀、砂纸等工具对碳滑板纵向棱边、横向凹槽和凸台边缘进行打磨,以保障碳滑板侧面与正面过渡圆滑。通过打磨的方式可有效提升弓网的匹配性,缓解了弓网异常磨损和碳滑板磕碰掉块等问题^[9]。

2.4 气候环境分析

为研究环境因素对磨损量的影响,在对上线列车碳滑板普查数据记录时,增加了温度、湿度气候环境数据栏,以便为后续的分析提供参考依据。温度、相对湿度与碳滑板磨损量的关系如图3、图4所

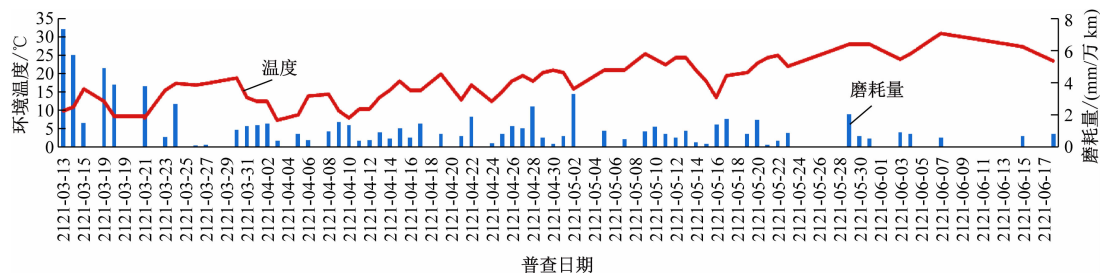


图3 温度与磨损量的关系

Fig.3 Relationship between temperature and wear loss

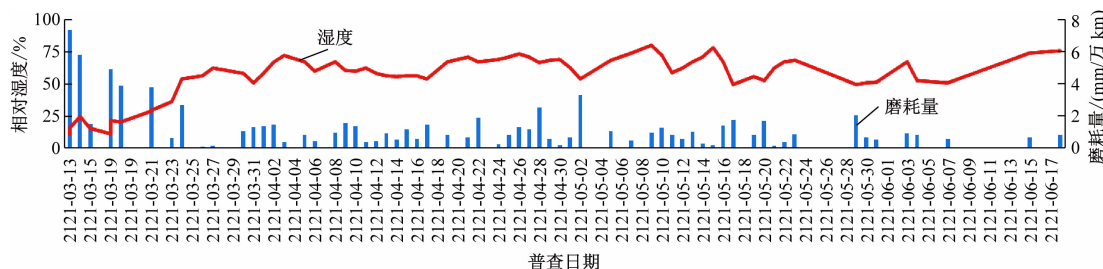


图4 相对湿度与磨损量的关系

Fig.4 Relationship between relative humidity and wear loss

示。数据显示,3月25日之前碳滑板平均磨耗量数值偏大,3月25日之后平均磨耗量数值开始趋于正常值范围内(磨耗量 ≤ 2 mm/万 km)。自4月中旬起(洛阳市夏季为多雨天气,空气湿度偏大),结合天气情况进行碳滑板磨耗量测量发现,随着春夏季节气候回暖,空气湿度的逐渐增大,碳滑板异常磨耗问题逐渐趋于良好。

3 建议措施

碳滑板异常磨耗不仅影响了车辆的安全运营,而且造成了极大的经济损失(高频次的检修作业和备品备件更换)。建议采用以下措施来应对弓网磨耗:

1) 建立接触网、受电弓专项台账。对接触线拉出值、偏移量、锚段关节、受电弓弓头角度、静态接触力、碳滑板尺寸进行重点盯控,并形成专项台账。

2) 借鉴同行业弓网异常磨耗应对经验,利用大数据、数据挖掘等技术汇总异常磨耗数据,并结合实际情况,研究弓网磨耗规律及解决措施。

3) 根据弓网磨耗情况,优化检修方式。①调整检修周期;②弓网清洁、打磨;③跟踪易磨耗部位数据,加强受电弓和接触网的检修工作;④加强秋冬状态监控。

4) 充分运用弓网检测棚等信息化检测设备,提升弓网技术参数的监控与调节效率^[10]。加强上线列车受电弓监测,建立碳滑板配件库存预警机制,以保障碳滑板库存充足。

5) 应从设计、安装、施工、维护等环节建立并形成一致性参数标准,各类参数始终都要围绕弓网平滑度主线进行调整,而非各自满足设计值或标准值等。

4 结语

本研究从接触网和受电弓两个方面展开讨论,重点探讨弓网技术性能、碳滑板材质、弓网打磨、接触压力、外部环境温度及湿度等因素对弓网磨耗的影响。通过对洛阳地铁1号线弓网异常磨耗问题研究,发现了导致异常磨耗的原因及弓网磨耗规律,并提出了建议措施和预防方案,为应对刚性接触网和浸金属碳滑板弓网异常磨耗问题提供了参考。

参考文献

[1] 刘秀美,徐崎姝,李亮,等. 大连地铁1、2号线受电弓碳滑

板异常磨耗研究[J]. 铁道机车与动车, 2020(4): 30.

LIU Xiumei, XU Qishu, LI Liang, et al. Study on abnormal wear of pantograph carbon contact strip for Dalian Metro Line 1 and 2 [J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2020(4): 30.

[2] 张宽发,何莉. 刚性接触网弓网异常磨耗预防性措施[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(11): 102.

ZHANG Kuanfa, HE Li. Preventive measures against abnormal wear on rigid catenary pantograph [J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(11): 102.

[3] 赵志红,潘硕,李宝泉. B型地铁列车受电弓碳滑板异常磨耗分析与改进[J]. 铁道机车与动车, 2017(4): 24.

ZHAO Zhihong, PAN Shuo, LI Baoquan. Analysis and improvement of the abnormal wear of the pantograph carbon slider for B type Metro [J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2017(4): 24.

[4] 张梦双,伍尚志,贺翔,等. 广州地铁3号线北延段受电弓碳滑板异常磨耗原因分析[J]. 价值工程, 2018, 37(5): 133.

ZHANG Mengshuang, WU Shangzhi, HE Xiang, et al. Analysis on abnormal abrasion of pantograph carbon skateboarding in north extension of Guangzhou metro line 3 [J]. Value Engineering, 2018, 37(5): 133.

[5] 罗益,卢勇,申天亮,等. 广州地铁1号线车辆受电弓碳滑板运用现状分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(6): 152.

LUO Yi, LU Yong, SHEN Tianliang, et al. Application of pantograph carbon slipper on Guangzhou metro line 1 vehicles [J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(6): 152.

[6] 赵慧阳. 郑州地铁2号线碳滑板磨耗分析及选型[J]. 工程技术研究, 2019, 4(10): 223.

ZHAO Huiyang. Wear analysis and selection of carbon skateboard in Zhengzhou Metro Line 2 [J]. Engineering and Technological Research, 2019, 4(10): 223.

[7] 杜广林,刘克思,张哲. 降低高速受电弓碳滑板磨耗的技术对策[J]. 中国铁路, 2015(2): 38.

DU Guanglin, LIU Kesi, ZHANG Zhe. Technical countermeasures to reduce the wear of carbon slide plate for high-speed pantograph [J]. Chinese Railways, 2015(2): 38.

[8] 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. Study on abnormal wear of pantograph sliding plate in Beijing metro line 6 [J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(S1): 51.

[9] 徐彦,王若飞,李江涛. 城市轨道交通车辆受电弓接触压力与碳滑板磨耗关系研究[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(3): 67.

XU Yan, WANG Ruofei, LI Jiangtao. Research on relationship between pantograph contact pressure and wear of carbon slide of urban rail transit vehicles [J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(3): 67.

(下转第 295 页)

干旱灾害天气影响,多地电网均面临极其严峻的限电保供形势,发展分布式光伏发电系统,对于优化城市电网结构、应对极端条件具有重要意义。

5 结语

城市轨道交通车站出入口是应用分布式光伏发电系统的理想场地,结合不同光伏组件特性分析可知,各类车站出入口结构形式均具备应用光伏发电技术的条件。通过光伏建筑一体化设计,将光伏发电系统和车站出入口融为一个整体,这种运用“光伏+”科技践行绿色、低碳发展理念,对城市轨道交通节能减排、降低运营成本具有重要意义。

无论是新建线路车站出入口,还是既有线路车站出入口,均具备建设光伏发电系统的可行性。城市轨道交通线路众多,每条线路车站出入口数量超过百余个,车站出入口分布式光伏发电应用具有广阔的前景。随着光伏发电成本进一步降低及国家“双碳”目标的推动,“光伏+轨道交通”将会产生更大的经济效益和显著的社会效益,更有助于推动分布式光伏发电技术在我国城市轨道交通中的应用。

参考文献

- [1] 郑燕,张琨.城轨扶梯出入口光伏系统方案研究[J].现代城市轨道交通,2016(2):15.
ZHENG Yan, ZHANG Kun. Study on photovoltaic system solutions at transit escalator entrance[J]. Modern Urban Transit, 2016(2):15.
- [2] 潘佩君.地铁车站出入口设计探讨[J].现代城市轨道交通,2019(5):91.
PAN Peijun. Discussion on design of entrance and exit of metro station[J]. Modern Urban Transit, 2019(5):91.
- [3] 周超.太阳能光伏发电在城市轨道交通中的应用[J].都市快轨交通,2013,26(2):77.
ZHOU Chao. Application of solar photovoltaic power generation in

urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(2):77.

- [4] 王钧,陈明媛,冯冠华,等.太阳能光伏系统建筑应用技术适宜性探研与典例分析[J].建筑节能,2021,49(8):91.
WANG Jun, CHEN Mingyuan, FENG Guanhua, et al. Technical applicability of solar photovoltaic system used in building and typical case analysis[J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(8):91.
- [5] 靳忠福.光伏发电在城市轨道交通中的应用及其关键技术[J].城市轨道交通研究,2020,23(12):186.
JIN Zhongfu. Application and key technology of photovoltaic power generation in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12):186.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用建筑太阳能光伏系统应用技术规范:JGJ 203—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for application of solar photovoltaic system of civil buildings: JGJ 203—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [7] 周超.地铁高架车站太阳能光伏发电系统设计[J].都市快轨交通,2014,27(6):104.
ZHOU Chao. Solar photovoltaic power generation system design for elevated subway station[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 27(6):104.
- [8] 中国电力企业联合会.中国电力行业年度发展报告[R].北京:中国电力企业联合会,2021.
China Electricity Council. Annual development report of China's electric power industry[R]. Beijing: China Electricity Council, 2021.

· 收稿日期:2022-09-03 修回日期:2023-04-11 出版日期:2024-06-10
Received:2022-09-03 Revised:2023-04-11 Published:2024-06-10
· 通信作者:张翼,高级工程师,543985761@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290页)

- [10] 朱伟鹏.深圳地铁11号线受电弓碳滑板磨损率研究[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.

· 收稿日期:2021-11-16 修回日期:2021-12-10 出版日期:2024-06-10
Received:2021-11-16 Revised:2021-12-10 Published:2024-06-10

· 第一作者:王亮,正高级工程师,282652189@qq.com
通信作者:牛秀蓉,工程师,1558872471@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