doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2019.06.022

地铁 120 km/h 刚性接触网局部磨耗分析及预防措施

舒斯龙，邓桂棠，谢小春
（广州地铁集团有限公司运营事业总部，广州 510010）

摘　要：接触网的局部磨耗包括机械磨耗和电气磨耗，而且大部分这两种磨耗同时存在。从广州地铁 3 号线及 3 北线 120km/h 运营时速接触网局部磨耗特征表现、现场隧道环境、受电弓匹配性以及接触网的弹性等方面，分析导致接触网局部磨耗产生的原因。为有效提高接触线使用寿命和改善弓网关系，从接触网换线及换型、提高轮轨匹配关系、加强轨道维护、优化弓网匹配度、改善刚性接触网弹性、研发防卡滞线夹等方面提出相应的预防措施。

关键词：地铁；刚性接触网；局部磨耗；120 km/h；预防措施
中图分类号：TM922　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2019)06-0123-06

Local Wear Analysis and Preventive Measures for Rigid Catenary When the Metro Train Runs at the Speed of 120km/h

SHU Silong, DENG Guitang, XIE Xiaochun
(Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510010)

Abstract: The local wear of a catenary includes mechanical and electrical wear, which generally exists simultaneously. In this paper, the local wear characteristics of catenary for Guangzhou Metro Line 3 and North Line 3 running at 120km/h, environment of the metro tunnel, and the matching between the pantograph and the elasticity of the catenary are examined and the reasons for the local wear of the catenary are analyzed. To prolong the service life of contact wires and improve the relationship between the pantograph and gateways, this study recommends preventive measures such as changing the type of contact wire, improving the wheel-rail matching relationship track maintenance, and the rigidity of the elastic catenary, optimizing the degree of matching between the pantograph and the catenary, and developing an anti-sticking clamp.
Keywords: metro; catenary, local wear; 120km per hour; preventive measures

刚性接触网从广州地铁 2 号线首次投入运营后，北京、上海、深圳等城市轨道交通线路相继使用，由于它具备结构简单、无断线之忧、维护方便等优点，现已成为城市轨道交通地下段接触网首选类型。虽然刚性接触网有以上诸多优点，但从已经运营的刚性接触网线路来看，很多出现了严重的接触网局部磨耗现象。接触网的局部磨耗严重影响了弓网取流质量、缩短了接触线的更换周期且提高了运营维护成本，严重时还会引起弓网事故。本文以广州地铁 3 号线、3 北线 120 km/h 接触网局部磨耗为研究对象，分析接触网磨耗严重的原因，提出降低接触网异常磨耗的相关预防措施，对提高弓网关系及安全运营有一定的指导意义。

1　局部磨耗特征表现

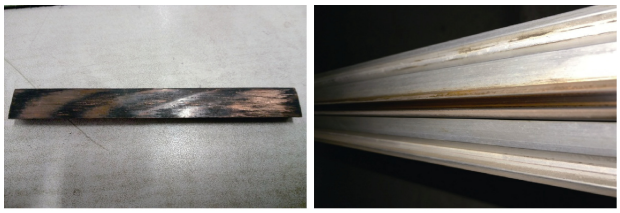
刚性接触网局部磨耗表现形式较多，典型的磨耗主要表现在接触线呈现连续周期性波浪状磨损(以下简称波磨)以及偏磨。

1.1　连续周期性波浪状磨损

连续周期性波浪状磨损是指接触线与碳滑板接触面呈现的是有规律的波浪纹形状，波峰摩擦较光滑，

收稿日期：2018-07-16　　修回日期：2018-09-18
第一作者：舒斯龙，男，本科，学士学位，工程师，主要从事城市轨道交通运营技术管理，shusilong@gzmtr.com

波谷摩擦较粗糙，而正常接触线磨耗是呈现光滑的平面，如图 1 所示。局部磨耗直接影响接触线的使用寿命，广州地铁 3 号线接触线采用的是截面积为 150 mm^2 铜银合金扁平接触线，局部磨耗达到 8 mm 时就需要进行局部更换或整锚段更换。



(a) 波磨　　(b) 正常磨耗

图 1　波磨与正常磨耗对比

Fig. 1　Comparison between wave milling and normal wear

1.2　接触线偏磨

接触线偏磨是指接触线磨损面左右不均匀，一侧磨耗较大，另一侧磨耗较小。

2　局部磨耗的危害

接触网局部磨耗严重影响弓网良好关系，降低弓网取流质量，增加运营风险。局部磨耗将导致受电弓碳滑板不能平顺地滑动摩擦，造成碳滑板不均匀磨耗，对弓网系统不利，容易引起弓网拉弧，严重时将导致中断供电，增加运营维护成本。

3　局部磨耗原因分析

广州地铁 3 号线及 3 北线分别是 2005 年和 2010 年开通运营，运营时速为 120 km/h，客运量逐年攀升，3 号线日均客运量达到 115 万人次，接触网局部磨耗呈上升趋势，仅 2017 年 3 号线局部更换接触线作业 12 次，共计 1.2 km 接触线，其中 90%更换区段都在出站加速区。

通过对接触网与受电弓碳滑板系统间的机械和电气性能分析发现，导致接触网局部磨耗的原因主要有以下几点。

3.1　机械与电气磨耗

3.1.1　机械磨耗

碳滑板与接触网接触滑动，两者之间的机械磨耗与受电弓抬升力、摩擦系数等有关。在列车运行时，受电弓的抬升力是不断变化的，且随着运行速度提高，抬升力的最大值与变化幅度也增大。运行速度为 100 km/h 时接触线磨耗检测数据见表 1[1]。接触线机械磨耗比与接触压力的关系如图 2 所示。

表 1　接触线的机械磨耗比

Tab. 1　Mechanical wear ratio of the contact wire

弓网间接触压力/N	70	100	120	140
接触线磨耗比/(mm^2/万弓架次)	0.032	0.036	0.038 8	0.042 8

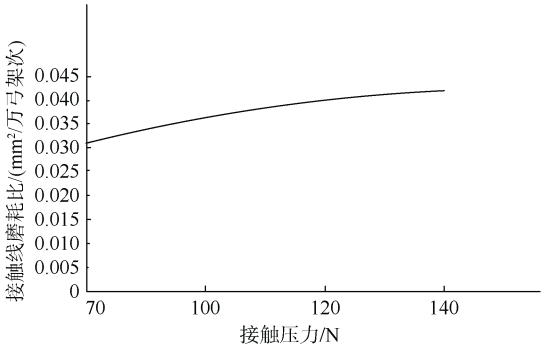


图 2　接触线机械磨耗比与接触压力的关系

Fig. 2　The relationship between mechanical wear ratio of contact wire and contact pressure

当摩擦副之间没有电流时，摩擦系数随着速度上升先减后增；通有电流时，摩擦系数呈上升趋势，如图 3 所示[1]。

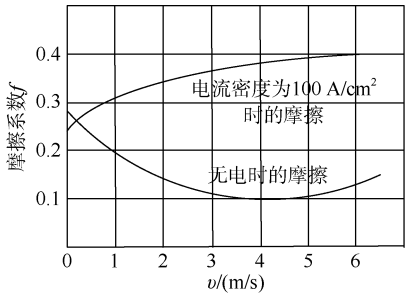


图 3　电流与摩擦系数的关系

Fig. 3　The relationship between current and friction coefficient

3.1.2　电气磨耗

受电弓通过与接触线滑动接触取得电能，这二者之间构成了一对在复杂环境条件下电气耦合的特殊载流摩擦副[1]。

碳滑板与导线相对滑动时的接触区域是由一些分散的微小接触点所组成，这些接触点不仅支撑载荷，而且承受摩擦和电流流过接触电阻所引起的热流。热流会使接触点材料遭到破坏，这样构成了滑动受流接触条件下的磨损行为。接触线与碳滑板电接触原理图如图 4 所示，电流传输通过接触点空气电离产生微观电弧，虽然其能量较低，但对摩擦副材料也能产生烧蚀，导致接触线的损伤，接触压力越大或滑动速度越

低，可降低电蚀效果。除了微观电弧，还有肉眼可见的宏观电弧，特别是在弓网离线产生的电弧现象，烧伤接触线，使其表面质量下降，表面粗糙不平，甚至不规则，同时电弧使接触点软化甚至烧融，从而导致接触线磨耗加剧。

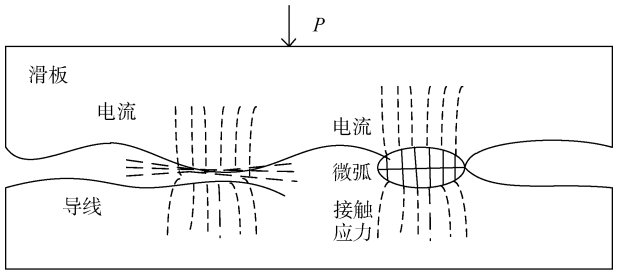


图 4　载流摩擦副间的滑动接触原理

Fig. 4　Sliding contact between current and carrying friction pairs

3.1.2.1　电客车速度的影响

电客车速度对接触线局部磨耗的影响分两部分，一是速度增加，提高了弓网离线率，弓网离线率与接触线磨耗量成正比；二是快速摩擦提高了接触线材料产生的热量，导致接触线接触面温升，降低硬度，磨耗增大。

3.1.2.2　受电弓抬升力的影响

接触线的电气磨耗随着受电弓抬升力增加而降低，这是因为随着抬升力的增加，弓网离线率降低。但提高受电弓抬升力会增加接触线的机械磨耗，因此碳滑板和接触线的接触压力要控制合适，过大或过小都对接触线的磨耗不利。

3.1.2.3　通过电流的影响

广州地铁 3 号线电客车满载启动加速电流高达 2 800 A 以上，如此高的电流增加了接触线电气磨耗，同时接触表面温升提高使接触线表面软化，导致机械磨耗加剧，这也验证出站加速区段接触线磨耗较其他区段大的现象。

3.2　电客车的蛇行运动

地铁车辆在运行过程中经常出现不同程度的车体较低频率的横向抖动现象，同时轮对又会在轨道平面内进行转动，从而构成了轮对的蛇行运动。车辆在较低速度下运行时，车体产生低频振动，称为一次蛇行运动；在较高速度下产生的轮对蛇行运动被称为二次蛇行运动。有研究表明，在一、二次蛇行运动过程中，频率约为 5 Hz 振动的振幅显著大于其他频率的振动[2]。蛇行运动导致车体连带受电弓横向抖动，增加了接触线的机械磨耗；同时受电弓磨耗不均时会产生弓网离线拉弧现象，加速了接触线的电气磨耗。

3.3　轨道因素

在地铁列车运行过程中，运行不稳定的一个关键因素就是道岔[7]。根据地铁设计规范，正线折返线、渡线以及存车线一般设置在车站进出站位置。据统计 3 号线全线接触线出现局部磨耗的地方 40%是在道岔位置。道岔本身结构复杂(见图 5)，相对于普通钢轨来说强度较低、零部件多、受冲击大，是造成列车晃车的病害，也是线路的薄弱环节。

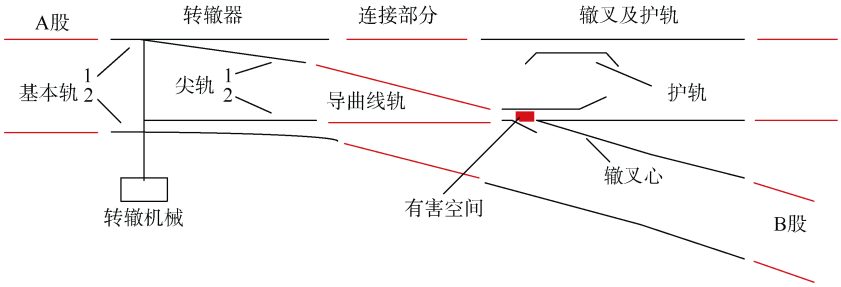


图 5　普通单开道岔结构

Fig. 5　Railroad switch structure

道岔由于保留了岔心的有害空间，在辙岔部分采用护轨，它与主轨的连接方式较弱，整体刚度相对不足，列车对这些变化比较敏感，导致晃车，进而导致受电弓横向抖动。当然道岔辙岔部位本身的三角坑构造、道岔部件磨耗、岔区相邻道岔之间过渡钢轨过短等都可能造成列车晃车。

轨道整体刚度发生变化，例如弹性扣件、整体道床、浮置板道床等也会对车辆稳定运行带来影响。

3.4　弓网匹配性不良

目前广州地铁 3 号线乃至地铁行业基本上用的是铜银合金接触线，该接触线在铜中添加 0.08%～0.12%的银微量元素，耐热性得到提高，达到纯铜接触线的

近两倍，用于较长的隧道及坡度较大或电流较高致使温度上升的路段，以防发生火灾，作为耐热性接触线被广泛使用，但耐磨性能却有待提高。

铜锡合金接触线是在铜中添加 0.3%的锡微量元素[9]，可大大改善接触线的耐磨性能，提高材料的强度，并且使耐热性能保持在与铜银合金接触线同等水平，所以作为耐磨耗、耐热型接触线被广泛使用。根据日本 JR 铁道技术研究所的磨耗试验报告，在同等试验条件下，相当于 50 万摩擦副的距离，不同材质接触线磨耗实验结果见表 2[2]。

由此可见，假设纯铜的磨耗率为 100，在同等的运行条件下，铜锡合金接触线的使用寿命为铜银合金接触线的 1.2 倍，铜锡合金接触线的使用寿命为铜镁合金接触线的 1.08 倍，因此，铜锡合金接触线具有较高的经济使用价值[4]。

表 2　不同材质、规模接触线的磨耗率比较

Tab. 2　Comparison of the scale of wear between contact wire and different materials

接触线	合金成分/%					
	0	0.15	0.18	0.3	0.33	0.36
纯铜	100					
铜银合金		85	85		84	
铜镁合金						81
铜锡合金		75		68	69	

受电弓滑板是一种滑动摩擦集电材料，常用的种类有铜滑板、碳滑板、浸金属滑板、铁基粉末冶金滑板和铜基粉末冶金滑板，它们的性能见表 3[3]，其中浸金属碳滑板是目前在铜接触线区段使用最为广泛的受电弓滑板。3 号线受电弓碳滑板使用的是浸金属碳材质滑板。

表 3　国内各种受电弓滑板的性能比较

Tab. 3　Comparison of the performance of various pantograph skateboards in China

滑板类型	密度/(g/cm^3)	硬度 HBS	电阻率/(μΩ·m)	冲击值/(J/cm^2)	对导线磨耗比/(mm^2/万次)
纯铜	1.6—1.7	62	≤38	≥0.15	0.0098
铜系粉末冶金	6.5—8.2	62—90	≤0.35	≥5	≤0.022
铁系粉末冶金	<8.0	90—130	≤0.35	≥5	≤0.042
浸金属碳	≤3.0	≥85	≤12	≥0.25	≤0.015
碳滑板	≤1.8	60-100	≤40	≥0.1	≤0.015

但是以上滑板都有各自的缺点和不足，受电弓滑板已经逐步向碳金属纤维滑板、带有自润滑功能的金属基复合材料，以及无机非金属基复合材料发展。例如，石墨烯与现有的受电弓滑板材料相结合，石墨烯的出现将能够大大减少接触线与滑板的摩擦损耗，就目前而言，石墨烯唯一的缺点就是不能量产，但随着科学技术的发展会得到很好的解决，也是未来发展的方向。无论哪种材料都需要保证接触线在滑动过程中磨耗小，且具有良好的传导电的性能。除此之外，降低受电弓弓头质量对减轻接触线的磨耗也有一定的作用。

因此受电弓滑板与接触线两者接触材料的配合，出现异常磨耗严重恶化弓网接触关系，出现弓网打火现象，进一步加大了电气磨耗，由此形成恶性循环。

3.5　刚性接触网弹性较差

刚性接触网主要通过悬吊槽钢固定在隧道顶部，再通过绝缘子和定位线夹固定汇流排，没有弹性连接件，如图 6 所示。受电弓通过时，相当于刚柔接触，两定位点之间存在驰度或负驰度，势必会造成受电弓纵向跳动影响弓网接触质量，诱发电弧，增加弓网之间的电气磨耗。

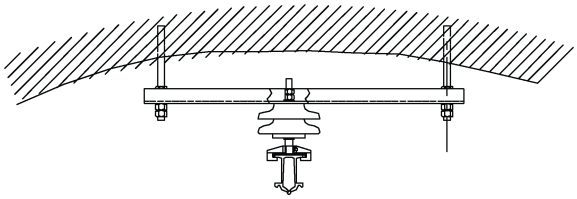


图 6　刚性接触网典型悬挂形式

Fig. 6　Typical suspension of rigid overhead contact system

3.6　汇流排线夹卡滞

目前国内绝大部分刚性接触悬挂使用的是传统的 B、C 型线夹，该类线夹底面和侧面的滑动通过一个尼龙衬垫来实现，顶部采用无滑动设计，两者间主要通过物体的滑动摩擦。而在实际运营当中，特别在弯道区段出现线夹卡滞，形成汇流排不同程度的驰度或负驰度，接触线出现局部硬点，导致弓网关系不良，增加接触线的局部磨耗。

4 局部磨耗预防措施

由于弓网磨耗是不可避免的，但对于局部的严重磨耗可以有针对性地预防，以下就从接触网局部换型、轮轨关系、弓网匹配以及改善接触网弹性方面提出几点建议。

4.1 接触网换线及换型

针对上述局部磨耗严重地方 90%发生在站台出站区域，且磨耗接近汇流排的接触线长度为 20～100 m 不等，可以采取整锚段换线或者局部换线。局部换线接触线应放至超过预定标记的接头处，不少于 2 m 切断接触线，并将接触线端头截面处理平整并且使用整直器将接触线整直，新接触线端截面应平整并整直，将新接触线与旧接触线端头对接，接头连接缝≤1 mm，在新接触线放入汇流排之后，在新旧接触导线衔接口两侧各 50 mm 处及新装接触线距衔接端头 1 000 mm 处用电钻打孔，并加装 M12 紧固螺栓，力矩为 35 N·m。

在新线建设或者每个站上下行出站 500 m 范围内考虑使用铜锡合金接触线，在保持高导电率的前提下提高接触线的耐磨性。

4.2 提高轮轨匹配关系

车辆在设计时考虑提高车辆运行稳定性，如在车体和转向架之间加装抗蛇行减振器和横向减振器并设置合理的阻尼值。同时设计合理的车轮踏面外形，因为较大的轮对踏面斜率可提高列车的曲线通过能力，但这样又可能会引起列车的蛇行运动，因此要多方面考虑提高轮轨匹配关系。

4.3 加强轨道维护

轨道专业要加强对道岔主要部件的磨耗检查，避免因磨耗对轨道几何尺寸产生较大影响，提出相应的减磨措施。对辙岔部位的三角坑构造要养护得当，尖轨跟端的轨面要平，对于不同类型道床接口位置要加强线路几何尺寸的检查，等等。

4.4 优化弓网匹配度

弓网关系一直是困扰行业的一项难题，接触网的磨耗与受电弓材质、弓头质量等有密切关系。研究表明，对于铜锡合金接触线，采用浸铜碳材质滑板，在同等条件下，能降低对接触线与碳滑板的磨耗，且弓头归算质量小，弓网跟随性好。

在现阶段地铁取流中，大部分为浸铜碳材质滑板与铜银合金接触线、铜锡合金接触线匹配，该种匹配有优化空间，例如将接触线由铜银合金改为耐磨且导电能力强的铜锡合金接触线、浸金属碳滑板调整为新型材料石墨烯材质滑板。诚然未来发展新材料滑板需与新材料接触线相匹配，既能降低接触线与碳滑板的磨耗，又能提高弓网集电性能，这就需要无数专业同行在弓网材料匹配度研究上付出不懈努力。

4.5 改善刚性接触网弹性

刚性接触网的优点是结构简单、无断线之忧、维护方便等，但显著缺点是整个系统缺乏弹性。当接触网出现硬点或车辆抖动时，高速运行的受电弓容易产生拉弧现象。为了改善刚性接触网缺乏弹性问题，可以使用弹性线夹。

刚性悬挂弹性定位线夹适用于 120 km/h 地铁线路刚性接触网[6]，汇流排及接触线的质量由线夹内金属弹簧来承担，其弹簧的压缩长度与接触网系统的跨距、汇流排自重和弓网的抬升力有关，保证汇流排有上升和下降的空间，在加强弓网跟随性的同时也能缓冲弓网冲击力的能量，如图 7 所示。广州地铁 3 号线北延段对弹性线夹进行刚性弹性悬挂交替安装[5]。现场数据分析见表 4。采用弹性线夹后，弓网动态性能有一定的提高，且降低了弓网间的非正常磨耗。

图 7 现场安装弹性线夹

Fig. 7 Installation of an elastic clip in the field

表 4 安装弹性线夹统计数据

Tab. 4 Statistics of elastic clips

线夹种类	120 km/h 燃弧率[10]/%	平均磨耗百分比/%	周期/月
普通线夹	0.0362	6.30	12
刚性、弹性线夹交替	0.0110	4.50	12

针对出站 500 m 范围内接触线磨耗大的问题，建议在这段区域安装使用弹性线夹，提高刚性接触网弹性，降低接触线非正常磨耗。

4.6 研发防卡滞线夹

针对目前运营当中刚性接触网线夹卡滞问题，专业人员研发一种新型线夹，将传统意义上汇流排与线夹的滑动摩擦改为滚动摩擦，有效防止了线夹与汇流排卡滞，优化弓网关系，降低接触线的非正常磨耗，如图 8 所示。该类线夹已于 2017 年在广州地铁 3 号线 120 km/h 时速区段进行试挂，通过现场数据测量，采用新型防卡滞线夹后，线夹卡滞问题得到解决，同时弓网关系得到改善，接触线局部磨耗得到缓解。在同一区段更换为防卡滞线夹后接触线磨耗经过 1 年周期的跟踪得出表 5 的结果。

图 8 现场安装防卡滞线夹

Fig. 8 Installation of a seizure-preventing clip in the field

表 5 同一区段不同线夹接触线磨耗

Tab. 5 Percent wear of contact lines with different clamps in the same section of a railway

线夹种类	平均磨耗百分比/%	周期/月
普通线夹	6.30	12
防卡滞线夹	4.80	12

5 结语

接触线的局部磨耗是集机械磨耗和电气磨耗的耦合整体，它的好坏依靠于各专业设备的状态，各专业人员需加强业务间的沟通和交流。就现阶段而言，接触线局部磨耗的控制措施离不开弓、网、轨之间作用关系，这有赖于各方面人员通过沟通、交流、总结、创新等渠道加以完善，达到控制局部磨耗、减缓均匀磨耗的目标，在保障地铁安全运营的同时节约运营成本。

参考文献

[1] 姜国强. 弓网滑动电接触摩擦磨损行为研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.
JIANG Guoqiang.Research on slinding electrical contact friction and wear behavior of pantograph catenary system[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2014.

[2] 刘汗青. 地铁车辆车体横向抖动研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
LIU Hanqing. Study on transverse vibration of metro vehicle body[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[3] 丁涛, 陈光雄, 李玉梅, 等. 几种受电弓滑板/接触线材料载流摩擦磨损行为的比较[J]. 润滑与密封, 2014, 39(10): 65-68.
DING Tao, CHEN Guangxiong, LI Yumei, et al. Comparison of friction and wear behaviors of several kinds of pantograph strip/contact wire materials with electric current[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(10): 65-68.

[4] 赵大军, 唐丽, 管桂生. 我国电气化铁道用接触线的现状和发展趋势[J]. 铁道机车车辆, 2008, 28(5): 74-77.
ZHAO Dajun, TANG Li, GUANG Guisheng. Current situation and development tendency of Chinese contact wires for electric railway[J]. Railway locomotive & car, 2008, 28(5): 74-77.

[5] 陈吉刚. 利用弹性线夹优化刚性接触网的动态性能[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(8): 73-77.
CHEN Jigang.Optimization of dynamic performance on rigid catenary by using flexible clamp[J]. Urban mass transit, 2014, 17(8): 73-77.

[6] 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): 102-105.
ZHANG Kuanfa, HE Li. Preventive measures against abnormal wear on ringid catenary pantograph[J]. Urban mass transit, 2015, 18(11): 102-105.

[7] 赵刚, 周勇. 刚性接触网导线磨耗原因及应对措施[J]. 科技经济导刊, 2017(15): 72-73.
ZHAO Gang, ZHOU Yong.Causes and counter measures of wire wear in rigid catenar[J]. Engineering science and technology and industrial developmen, 2017(15): 72-73.

[8] 张叶飞. 接触线磨耗问题的研究[J]. 科技资讯, 2013(16): 102.
ZHANG Yefei. Study on contact line wear[J]. Science & Technology information, 2013(16): 102.

[9] 唐丽, 武田宪司, 胡忠卫, 等. 高速电气化铁路用接触线的现状与发展趋势研究[J]. 云南冶金, 2009, 38(5): 67-71.
TANG Li, K. Takeda, HU Zhongwei, et al. The present status and development trend of trolley wire used in high speed electrified railway[J]. Yunnan metallurgy, 2009, 38(5): 67-71.

[10] 周大林, 高伟, 郑玄. 刚性接触网下 120 km/h 地铁列车弓网燃弧分析[J]. 机车电传动, 2015(3): 78-79.
ZHOU Dalin, GAO Wei, ZHENG Xuan. Pantograph and catenary arc under stiff contact wires of 120 km/h metro vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2015(3): 78-79.

（编辑：王艳菊）