DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.04.102　　文章编号：1000-128X(2023)04-0124-07

地铁车辆受电弓异常磨耗研究

张士宇[1]，杨　岗[2]，吕　琨[2]，秦礼目[2]，李　芾[2]

（1.中车长春轨道客车股份有限公司，吉林 长春　130062；
2.西南交通大学 机械工程学院，四川 成都　610031）

摘　要：弓网系统是城市轨道交通列车供电的中枢系统。较高的列车速度和复杂的列车运行环境会导致受电弓网系统产生剧烈的振动，从而引发高频燃弧和弓网异常磨耗现象。为了探究弓网异常磨耗的机理，文章以某地铁线路为例，研究了各运行指标与弓网异常磨耗关系及各指标间的联系。首先，通过阐述弓网运行状态指标定义及计算公式，提出弓网异常磨耗主要影响指标的选取。搭建某地铁数据采集系统，获取地铁线路运行实测数据；其次，统计分析新旧滑板在不同工况下各个指标分布的规律和变化趋势，研究了各个指标之间的相关性；最后，采用时空维度关联分析法，基于同一工况分析各个指标在空间与时间两个维度上存在的内在联系与差异。研究结果表明：滑板与接触线磨合初期，由于未形成光亮氧化层以致接触不够稳定，导致弓网接触燃弧率增加，从而使得弓网燃弧率上升，但指标间变化趋势并不明显。随着滑板运行至稳定磨耗期，受电弓离线率、燃弧和硬点异常率存在较大的相关性，当其中有一项指标发生异常时，总伴随其余指标发生异常。异常磨耗的发生常伴随有弓网运行指标的异常，可通过对运行参数的监控，完成对弓网异常磨耗的监测和预防，为研究弓网异常磨耗机理提供了一种有效方法。

关键词：城市轨道交通；列车；弓网系统；磨耗；燃弧；拉出值；地铁车辆

中图分类号：U264.3^{+}4；U231　　**文献标识码：**A

Study on abnormal abrasion of metro pantograph

ZHANG Shiyu[1], YANG Gang[2], LYU Kun[2], QIING Limu[2], LI Fu[2]

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China;
2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Pantograph-catenary system is the central system for the power supply of urban rail transit trains. Higher train speed and complex train operating environment can generate severe vibrations on the pantograph-catenary system, resulting in high-frequency arcing and abnormal abrasion of pantograph. Taking the abnormal abrasion of the pantograph-catenary system in a metro project as an example, this paper studies the relationship between operation indicators and the abnormal abrasion of pantograph-catenary system, and correlations among the operation indicators. Firstly, this paper proposed the selection of indicators influencing the abnormal abrasion of pantograph-catenary system based on the definition of status indicator of pantograph-catenary operation and calculation formula. The data collection system of the metro line was established to obtain the measured data in the operation of the metro. Secondly, this paper statistically analyzed the distribution law and change trend of the indicators of old and new sliders under different working conditions, and studied the correlation among the indicators. Finally, under the same working condition, spatiotemporal dimension association analysis was used to analyze the internal connections and differences of each indicator in terms of space and time. The research results show that: in the early stage of running-in between the slider and the catenary, the arcing rate increases due to the lack of an oxide layer, which leads to an increase in the arcing rate of the pantograph-catenary contact, but the change trend between the indicators is not obvious. As the slider runs to a stable abrasion period, there is a strong correlation between the offline rate of the pantograph, arcing rate, and abnormal rate of the

基金项目：国家重点研发计划项目（2020YFB1200300ZL）；四川省重点研发计划项目（2023YFG0063）
通信作者：张士宇（1988—），男，硕士，高级工程师，主要从事高压系统试验测试技术方面的研究；E-mail: crrc18343069011@163.com
引用格式：张士宇, 杨岗, 吕琨, 等. 地铁车辆受电弓异常磨耗研究[J]. 机车电传动, 2023(4): 124-130.
Citation: ZHANG Shiyu, YANG Gang, LYU Kun, et al. Study on abnormal abrasion of metro pantograph[J]. Electric drive for locomotives,2023(4): 124-130.

hard point. When one of the indicators is abnormal, it is always accompanied by the abnormality of the other indicators. The occurrence of abnormal abrasion is often accompanied by the abnormality of pantograph-catenary operation indicators. The monitoring and prevention of abnormal abrasion of pantograph-catenary can be completed by monitoring operation parameters, which provides an effective method for studying the mechanism of abnormal abrasion of pantograph-catenary.

Keywords: urban rail transit; train; pantograph-catenary system; abrasion; arcing; pull-out value; metro vehicle

0　引言

受电弓是城市轨道交通列车系统的关键组成部分之一，其通过与接触网动态接触向城市轨道列车输送电能，为列车牵引逆变器和高压设备提供动力来源[1]。受电弓通过碳滑板与接触网的高压线直接接触，由于受电弓网工作环境、工作模式和服役时间的影响，受电弓碳滑板易产生异常磨耗，严重的碳滑板异常磨耗会增加列车运行风险，频繁更换碳滑板则会增加运营成本。当碳滑板发生异常磨耗时，其表面往往会出现凸台、凹槽等形状变化，严重的形状突变会导致自动降弓，增加列车运行风险[2-3]。研究受电弓异常磨耗与受电弓运行状态指标异常的关系，可通过对运行状态指标进行及时检测，有效预防受电弓的异常磨耗。一般情况下，描述受电弓运行状态的指标有磨耗、接触力、拉出值、导高、硬点、燃弧、网流和气囊压力等。为了研究某地铁弓网异常磨耗产生的原因，本文在跟踪测试得到上述指标数据的基础上，系统地分析了接触力、硬点、燃弧、拉出值和磨耗指标之间存在的内在联系，得到了地铁受电弓发生异常磨耗的一般规律，为研究轨道交通列车受电弓异常磨耗提供思路与基础方法。

1　受电弓网运行状态参数指标

1.1　拉出值

受电弓与接触网是电力机车重要的组成部分，当接触网线与受电弓的碳滑板直接接触并传输电能时，碳滑板会产生一定量的磨耗，为了使碳滑板表面的磨耗分布均匀，接触网线一般以“之”字形固定分布在轨道线路上[4]。拉出值是接触网线定位点与列车受电弓滑板中心的偏移量，是影响电气化铁道列车行车安全最重要的接触网参数[5-6]。拉出值大小通常分布在−250 ~250 mm，在该范围外的点为异常点。拉出值异常率ΔP计算公式为

$$\Delta P=\frac{n_{\mathrm{P}}}{N_{\mathrm{P}}} \tag{1}$$

式中：n_{P}为拉出值绝对值大于 250 mm 的测试点个数；N_{P}为拉出值测试点总个数。

1.2　接触力指标

受电弓接触力分为动态接触力与静态接触力，影响接触力载荷大小的因素包括受电弓组成结构、工作环境和轨道列车的运行工况等[7]。受电弓接触力是基于加速度传感器测试数据理论计算得到的，接触力大小与滑板质量和个数有关，动态接触力与静态接触力有关，动态接触力F_A计算公式为

$$F_A=\sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{m_i}F_{ij}+M_i\cdot\frac{\sum_{k}^{w_i}a_{ik}}{w_i}\right)+F_0 \tag{2}$$

式中：F_0为静态接触力；F_{ij}为第i个滑板的第j个力传感器测试数据；n为滑板总数；m_i为第i个滑板的力传感器个数；M_i为第i个滑板的质量；w_i为第i个滑板上加速度传感器的个数；a_{ik}为第i个滑板上第k个加速度传感器的测试数据。

离线率是评价受电弓网之间是否存在接触的重要指标，当接触力小于零时，说明受电弓网之间不存在接触，离线率ΔF计算公式为

$$\Delta F=\frac{n_F}{N_F} \tag{3}$$

式中：n_F表示接触力小于 0 的个数；N_F表示接触力的总个数。

1.3　硬点

硬点是受电弓接触网的固有特征，指的是引起弓网之间的接触力发生突变的位置，硬点的存在导致受电弓碳滑板发生异常磨耗，同时可能引起燃弧与火花的产生[8-9]。受电弓硬点的评判基准一般分为受电弓碳滑板垂向加速度和受电弓碳滑板振幅[10]，本文采用受电弓碳滑板垂向加速度作为评价基准，以垂向加速度值大于$50g$时为硬点异常点。硬点异常率ΔH计算公式为：

$$\Delta H=\frac{n_{\mathrm{H}}}{N_{\mathrm{H}}} \tag{4}$$

式中：n_{H}表示硬点垂向加速度大于$50g$的个数；N_{H}表示硬点的总个数。

1.4　燃弧指标

受电弓碳滑板与接触网线是通过直接接触传输电能的，受电弓的振动会随着列车速度的增加愈加剧烈，从而导致受电弓与接触网线之间从接触状态变成脱离状态，这个过程会引起受电弓网之间产生电流扰动和燃弧现象[11-12]。当受电弓发生燃弧时，可以利用高清摄像机获取燃弧图片，从而利用图像处理技术判断其是否发生燃弧，并获得燃弧发生的时间与地点信息[13]。

在获得燃弧图像数据的基础上，统计了不同工况下燃弧发生的次数、对应时间与对应地点。一个行程内燃弧持续总时间T计算公式为

$$T=\sum_{i=1}^{n}t_i \tag{5}$$

式中：t_i为第i次燃弧发生持续的时间；n为一个行程内燃弧发生的次数。

1.5 磨耗指标

在城市轨道交通列车运行过程中，受电弓碳滑板与接触网构成一对特殊的摩擦副，它们之间存在摩擦引起的机械磨损和强电流作用下的电磨损。在机车车辆中有两种方式可以使受电弓上产生的磨耗均匀分布，一是以“之”字形固定分布的接触网线使得受电弓上磨耗均匀地产生[14]；二是受电弓与接触线之间同时存在横向与纵向的相对运动，使碳滑板表面在各个方向上的磨耗皆均匀分布[15]。在评价受电弓磨耗的磨损量时，一般以磨损量超过1.8 mm/(10^4 km)时为异常磨耗。

2 弓网性能测试系统

本次试验测试的数据包括接触力、拉出值、磨耗、硬点、燃弧、气囊压力、弓网电流、弓网温度等指标，本文仅分析前5个指标及其相互之间的关系，现对这5个指标的测试设备及测试过程进行介绍。

在测试过程中，测试环境的温度为−30~45 ℃，测试对象车辆载荷状态为AW0；在测试过程中，由于要计算弓网接触力，测试了动态接触与静态接触下弓网之间的接触力大小；测试和验收过程均满足国家标准要求，测试设备信息如表1所示。

表1 测试设备

Table 1 Test equipment

设备名称	型号	数量	功能
数据采集系统	IMC-C1	2	采集传感器数据
激光测距传感器	EG328B0-ABM06-A028090-HG	2	测量拉出值、导高值和磨耗
加速度传感器	LC0122D-100	1	测量车顶振动三向加速度
轻质三向加速度传感器	LC0110D-100	2	测试受电弓运行垂直方向加速度
动态接触力传感器	L6D-Cx-2.5kg-0.4B	4	测量弓网动态接触力
高速相机	AcutEyeV4.0	1	监测燃弧及弓网接触状态

在本次测试系统中，离线电弧、接触网拉出值、导高、硬点、高温、网流、弓网动态接触力、车顶加速度、气囊压力共用一套数据采集系统和检测主机；受电弓运行状态的视频监测使用一台视频监测主机，参数测试系统原理图如图1所示。

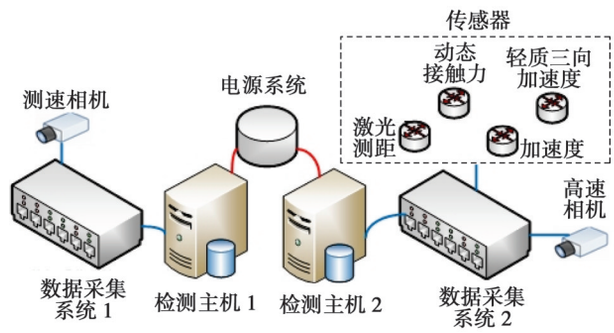


图1 参数测量系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the parametric measurement system

3 不同工况下弓网关系的对比分析

该线路共有29站，本文数据由表2所示的测试工况决定。

表2 测试工况

Table 2 Test conditions

工况	速度或说明
工况1	ATO
工况2	60 km/h
工况3	70 km/h

针对不同工况，统计并计算了新旧滑板下受电弓离线率、硬点异常个数、燃弧发生次数和燃弧持续时间，如图2~图5所示。

从图2可看出，旧滑板在工况1下（ATO）的离线率最大，旧滑板离线率均比新滑板离线率高；新旧滑板离线率均随着列车速度的增大而增大，但新滑板离线率变化趋势较小；是否上下行对于离线率的影响不大，且上下行离线率的变化趋势一致。

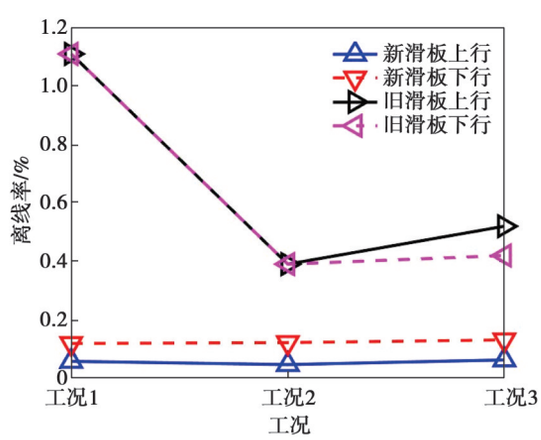


图2 受电弓离线率变化曲线

Fig. 2 Variation curve of the off-line rate of pantograph

图3显示，对硬点异常率而言，旧滑板在工况1下的硬点异常率最大，旧滑板硬点异常率均比新滑板硬点异常率高；随着速度的增加，硬点异常率也逐渐增大；总体来说，下行硬点异常率比上行硬点异常率大，说明

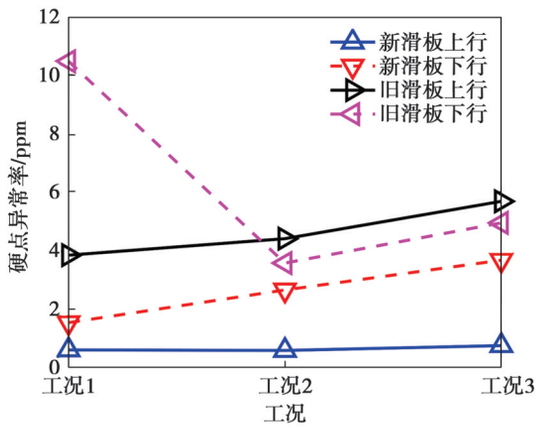


图3　硬点异常率变化曲线

Fig. 3　Variation curve of hard point abnormal rate

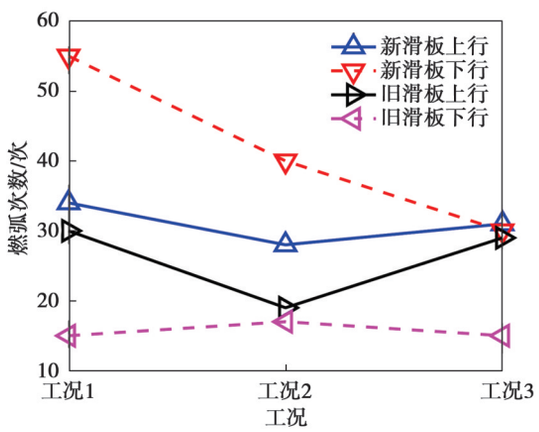


图4　受电弓燃弧次数

Fig. 4　Nomber of times of pantograph arcing

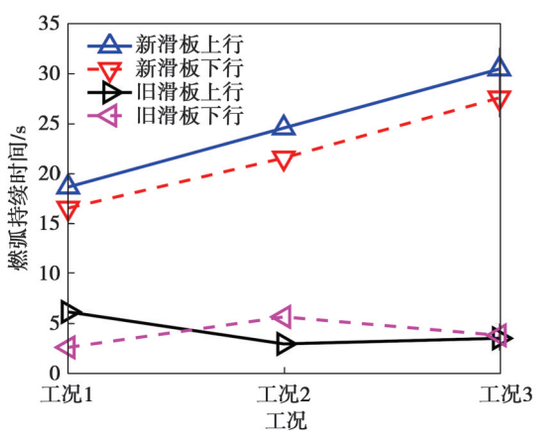


图5　燃弧持续时间

Fig. 5　Duration of arcing

上下行对硬点有一定的影响，但是这种影响不改变硬点异常率的整体变化趋势。综合分析图2和图3，不难发现离线率与硬点异常率存在很大的相关性，可以说当受电弓网发生离线时同时存在硬点异常。

在图4~图5中，旧滑板工况1下的燃弧出现次数与持续时间均大于其他两种工况；且在此时间段内，上行燃弧次数与持续时间随着速度的增大而增大，下行燃弧次数与持续时间随着速度的变化而变化不大，与离线率、硬点异常率有很大的相关性。新滑板在工况1、工况2和工况3下，所产生的燃弧次数明显大幅度提高，并且较前面的检测燃弧火花明显更强烈，其发生频率与持续时间均较之前有明显增加，并且出现连续发生的状态，可见新滑板较旧滑板更容易产生燃弧，而这与离线率、硬点异常率的变化规律出现了一定的差异。

总体来说，受电弓离线率、硬点异常率存在较大的相关性；而旧滑板的燃弧、离线率和硬点异常率仅有一定的相关性，但新滑板的燃弧与离线率、硬点异常率的变化趋势有所不同。

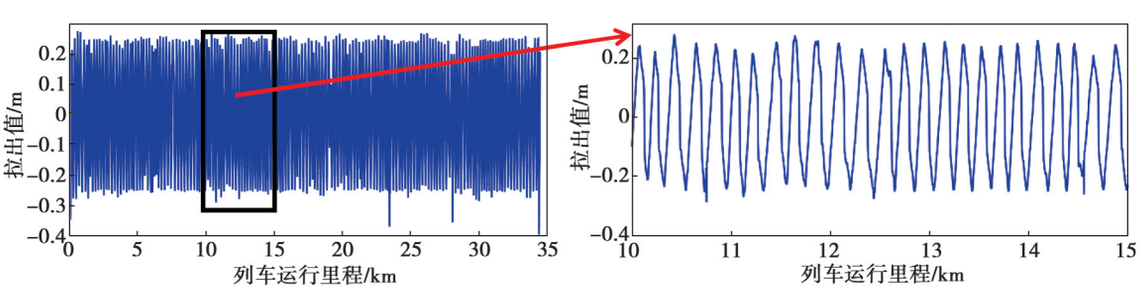
4　弓网关系时空维度关联分析

4.1　指标异常分析

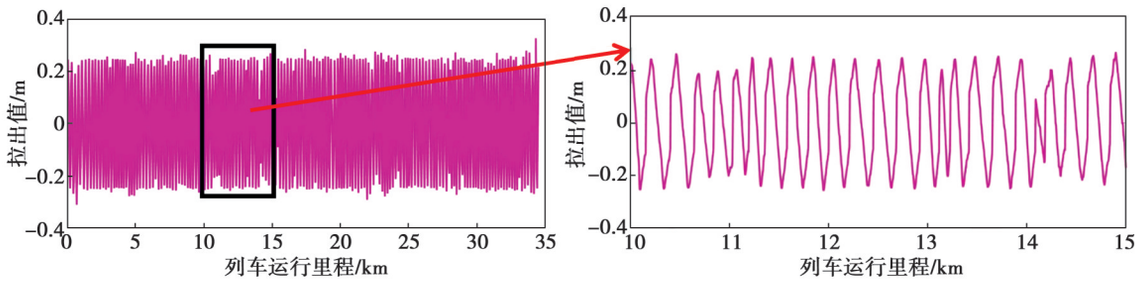
拉出值是接触线定位点与列车受电弓滑板中心的偏移量，表征接触线与受电弓的接触位置。本文通过拉出值与运行里程和时间的关系，分析燃弧、磨耗、硬点和接触力指标异常时的位置与时间的关系，同时以列车的运行路程作为定位列车运行过程中的空间位置，以时间来对应列车运行过程中的空间位置。以新滑板工况1测试得到的弓网数据为例，分析各个指标在同一时空下的对应关系。

图6和图7分别为拉出值与运行里程、运行里程与时间的关系图，这三者中只要知道其中一个值，即可知道另外两个值，它们是一一对应关系。在此基础上，将接触力、硬点、磨耗和燃弧在同一时空下与拉出值对比分析，得到新滑板工况1、上下行指标关系，如图8所示。

图8为工况1上下行过程中各指标在运行里程数下的对比，因为试验采样频率很高（10 000 Hz），设备即使有1 ms不同步，也会造成行程数据偏差0~10 m，所以实际同行程数据下的指标，可能会有行程偏差。由



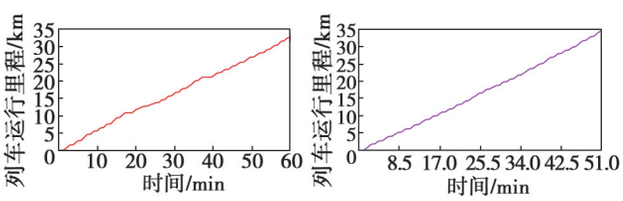
(a) 上行拉出值与里程关系



(b) 下行拉出值与里程关系

图 6　新滑板工况 1 上下行拉出值与里程关系曲线

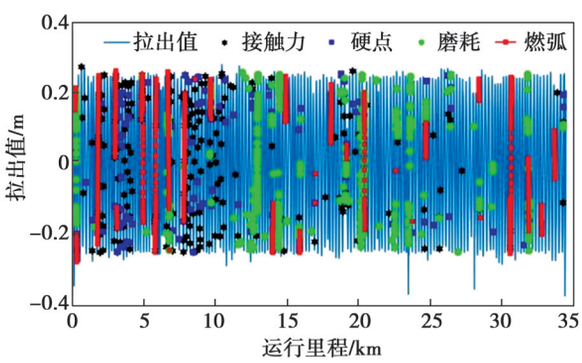
Fig. 6　Relationship curve between upward and downward pull-out value and mileage under new slide working conditions 1



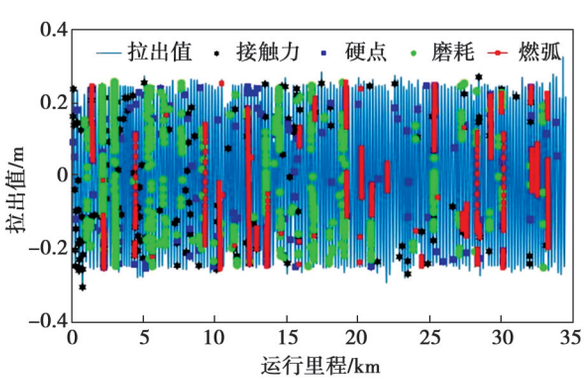
(a) 上行　　(b) 下行

图 7　工况 1 上下行列车运行里程与时间关系曲线

Fig. 7　Relationship curve between upward and downward train mileage and time under working conditions 1



(a) 上行指标关系

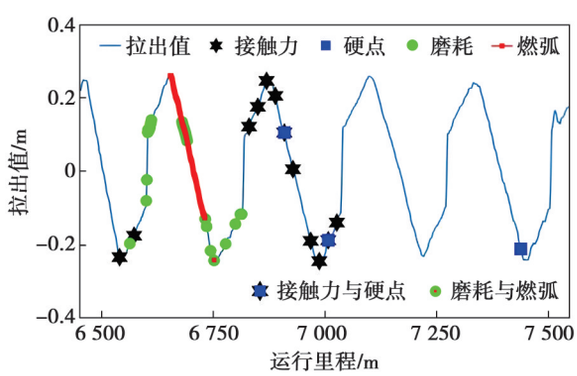


(b) 下行指标关系

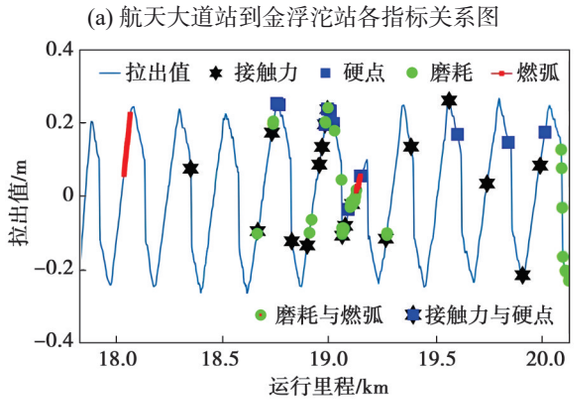
图 8　工况 1 上下行各指标关系曲线

Fig. 8　Relationship curve of various indicators on the upward and downward directions under working conditions 1

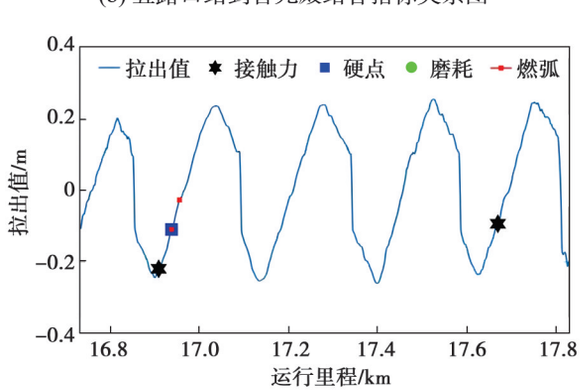
于测试误差不可规避，则分析各指标关系时，将运行里程相邻较近的数据视为同行程数据。从总体上看，各个指标的分布相对集中，具有很强的关联性。地铁列车运行经过各站台，通过截取部分站台间数据，分析指标间关联性在地铁运行部分区间上的表现。新滑板工况 1 的上行数据如图 9 所示，从图 9 曲线可看出，



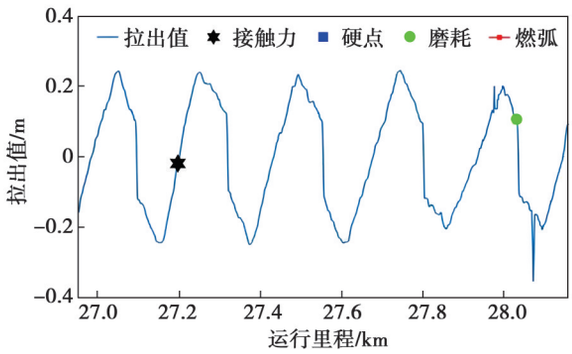
(a) 航天大道站到金浮沱站各指标关系图



(b) 五路口站到含元殿站各指标关系图



(c) 大差市站到五路口站各指标关系图



(d) 市中医院站到行政中心站各指标关系图

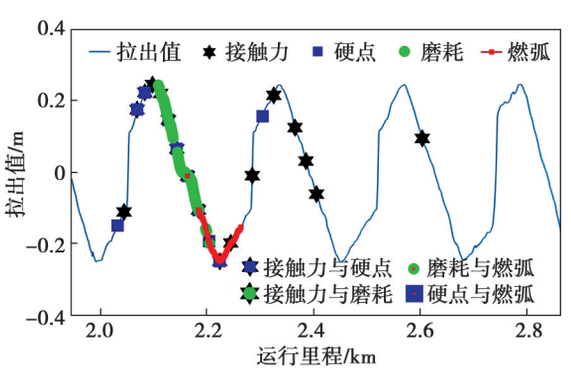
图 9　新滑板工况 1 上行站与站之间各指标关系

Fig. 9　Relationship among the indicators between the stations of upward directions under new slide working condition 1

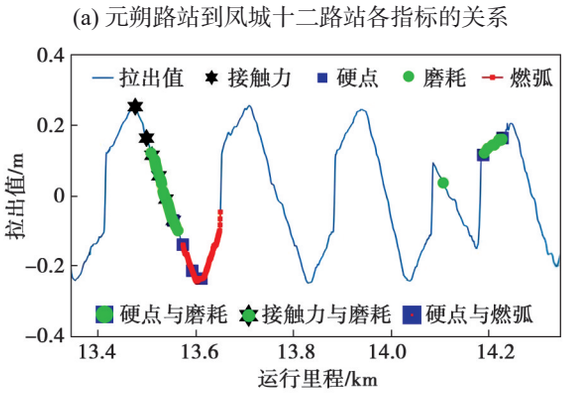
小于 0 的接触力、垂向加速度大于 50*g* 的硬点、大于 1.8 mm/（10^4km）的磨耗和燃弧现象在拉出值变化曲线中分布相对集中，符合总体上各指标的强关联性。

同理，对新滑板工况 1 的下行数据进行分析，得到各个指标的关系曲线图，如图 10 所示。

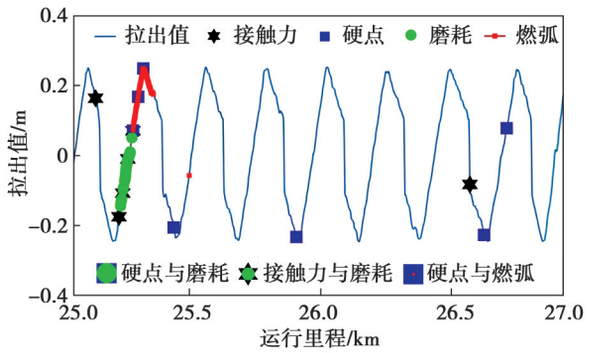
在图 10 中，小于 0 的接触力、垂向加速度大于 50*g* 的硬点、大于 1.8 mm/（10^4km）的磨耗和燃弧现象在拉出值变化曲线中总是相对集中地分布，说明当其中有一指标异常时，总是会伴随着另外几个指标发生异常，证明它们之间有很强的关联性。由于测试不可避免存在误差，时间域上 1 s 的差异就会导致空间位置上有十几米的差异，因此在图 10 中有些指标会错开一些空间位置分布，这属于正常现象。



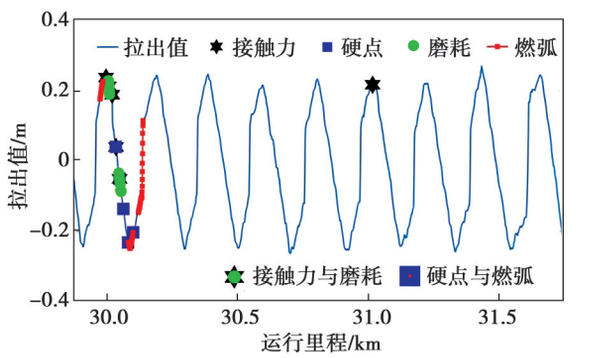
(a) 元朔路站到凤城十二路站各指标的关系



(b) 凤城九路站到文景路站各指标的关系



(c) 行政中心站到市中医医院站各指标关系图



(d) 百花村站到余家寨站各指标关系图

图 10　新滑板工况 1 下行站与站之间各指标关系

Fig. 10　Relationship among the indicators between the stations of downward directions under new slide working condition 1

4.2　小结

经分析不同工况下拉出值、接触力和硬点等指标间相关性，同时研究了不同指标在同一工况及时空维度下的相关性。由地铁列车运行总体与部分站台区间数据对比分析，发现各指标间存在强相关性，并对当前该项目的弓网状态进行评估，得出：①整体上当前弓网关系良好，接触力均匀，硬点现象极少（十万分之一量级）。②应用新滑板时硬点和离线率变少，但燃弧率却增加，其原因是新滑板与接触线需要一定磨合期，磨合初期未形成光亮氧化层，造成滑板与接触线间存在微隙，从而易产生燃弧。③接触线磨耗异常是导致硬点异常和燃弧现象的重要原因。试验表明存在接触线磨耗较为明显或接触线磨耗不平顺现象。

5　结束语

本文研究通过选择弓网运行状态参数指标，分别从拉出值、接触力、硬点和燃弧指标分析了各指标间的相关性及指标与弓网异常磨耗的相关性。结合某地铁车辆运行过程中各工况下的运行指标数据，以拉出值作为基准来标定燃弧、磨耗、硬点和接触力异常时对应的位置，同时以运行路程定位列车行进过程中的空间位置，以时间来对应地铁车辆运行过程中的空间位置，以此进行接触力异常、磨耗异常与硬点、燃弧

指标间的时空维度关联性分析。依据弓网数据，对弓网状态进行评估，发现应用新滑板时燃弧率增加是由于磨合初期未形成光亮氧化层，造成滑板与接触线间存在微隙，从而易产生燃弧。同时证实接触线磨耗异常是导致硬点异常和发生燃弧的重要原因。

由地铁车辆运行里程总体与部分站台之间的弓网运行数据，针对性地提出各指标与异常磨耗的关系，丰富了弓网异常磨耗机理。鉴于各指标间的强关联性，可通过对其余指标的异常进行监测，规避弓网异常磨耗的难实时检测特性，为弓网异常磨耗提出新的检测手段，最大程度避免异常磨耗对弓网系统造成的危害。

参考文献：

[1] 杨瀛瑜, 蒋聪健, 吕阶军. 高速受电弓弹性元件失效分析与结构优化[J]. 机车电传动, 2020(3): 115-117.
YANG Yingyu, JIANG Congjian, LYU Jiejun. Failure analysis and structural optimization for elastic element of high-speed pantograph[J]. Electric drive for locomotives, 2020 (3): 115-117.

[2] 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): 121-126.
ZHU Weipeng. Research on wear rate of pantograph carbon slide in Shenzhen Metro Line 11[J]. Railway locomotive & car, 2018, 38(4): 121-126.

[3] 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): 30-33.
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): 30-33.

[4] 吕文阁, 刘少册, 郑云龙, 等. 基于线结构激光的侧轨受电弓磨耗视觉测量系统开发[J]. 机车电传动, 2017(2): 114-117.
LYU Wenge, LIU Shaoce, ZHENG Yunlong, et al. Development of vision measurement system of side rail pantograph slide wear based on line structure laser[J]. Electric drive for locomotives, 2017(2): 114-117.

[5] 李岚, 郑东肪, 姚杰. 列车振动下接触网拉出值补偿算法[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34(4): 457-460.
LI Lan, ZHENG Dongfang, YAO Jie. A compensation algorithm for the staggers of contact network under train vibration[J]. Journal of southwest jiaotong university, 1999, 34 (4): 457-460.

[6] 陈宇, 肖国祥. 运行速度对接触网拉出值检测误差的影响[J]. 铁道机车车辆, 2007, 27(6): 62-65.
CHEN Yu, XIAO Guoxiang. Influence of running speed on measured error of stagger value of contact wire[J]. Railway locomotive & car, 2007, 27(6): 62-65.

[7] 杨家伟. 地铁受电弓强度及疲劳可靠性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
YANG Jiawei. Study on strength and fatigue reliability of metro pantograph[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[8] 张忠权. 接触网“硬点”成因和整治的思考与实践[J]. 电气化铁道, 2007(4): 36-38.
ZHANG Zhongquan. Causes of "hard point" of OCS and theory and practice for its elimination[J]. Electric railway, 2007(4): 36-38.

[9] 宋杰. 电气化铁路接触网硬点产生及防治措施[J]. 自动化与仪器仪表, 2017(3): 140-141.
SONG Jie. Electrified railway catenary hard point and control measures[J]. Automation & instrumentation, 2017(3): 140-141.

[10] 伍川辉, 卿云, 吴琛, 等. 地铁车辆接触网硬点在线检测系统设计[J]. 中国测试, 2020, 46(1): 77-82.
WU Chuanhui, QING Yun, WU Chen, et al. Design of online detection system of the hard point of catenary for metro vehicle[J]. China measurement & test, 2020, 46(1): 77-82.

[11] KUBO S, KATO K. Effect of arc discharge on wear rate of Cu-impregnated carbon strip in unlubricated sliding against Cu trolley under electric current[J]. Wear, 1998, 216(2): 172-178.

[12] 蒲文旭, 于龙, 陈唐龙, 等. 基于熵测度的地铁弓网燃弧电流扰动分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3642-3648.
PU Wenxu, YU Long, CHEN Tanglong, et al. Analysis of metro pantograph-catenary arc and current disturbance based on entropy measure[J]. High voltage engineering, 2014, 40(11): 3642-3648.

[13] 杨恒, 伍川辉, 吴琛. 基于图像处理弓网燃弧检测研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(4): 1030-1035.
YANG Heng, WU Chuanhui, WU Chen. The pantograph-catenary arc test research based on image processing technology[J]. Journal of railway science and engineering, 2018, 15(4): 1030-1035.

[14] 宋冬利, 江亚男, 张卫华. 滑板磨耗对受电弓系统服役性能的影响研究[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(3): 450-457.
SONG Dongli, JIANG Yanan, ZHANG Weihua. Effects of contact strips wear on service performance of pantograph system[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2017, 52 (3): 450-457.

[15] 赵汝彬. 受电弓滑板滑动电接触磨损特性的实验研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2009.
ZHAO Rubin. Experimental research on sliding electrical contact friction characteristics of pantograph contact strips [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2009.

收稿日期：2021-09-07
修回日期：2022-03-04