

# 基于灰色关联法的接触线磨损及其影响因素 关联性分析\*

郭英强<sup>1</sup> 祁文延<sup>2</sup>

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春; 2. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 610031, 成都)

**摘 要** [目的] 地铁系统存在接触线异常磨损问题, 有必要探讨弓网系统各重要数据与接触线磨损厚度之间的数据关联程度。[方法] 在实际线路进行弓网试验, 测得动态接触力、列车运行速度、滑板垂向加速度、燃弧持续时间、母线电流、接触网拉出值及接触线磨损厚度等实测数据, 采用灰色关联法分析各因素对接触线磨损厚度的影响占比。[结果及结论] 列车运行速度直接影响接触线的磨损厚度, 其影响占比最大, 动态接触力次之, 其他因素按影响占比由大到小排序为燃弧持续时间、母线电流、接触网拉出值、滑板垂向加速度。

**关键词** 地铁; 接触线; 磨损检测; 灰色关联法

**中图分类号** U226.5<sup>+</sup>4

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2025.04.018

## Correlation Analysis of Contact Wire Wear and Its Influencing Factors Based on Grey Correlation Method

GUO Yingqiang<sup>1</sup>, QI Wenyan<sup>2</sup>

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] Since the metro system suffers from abnormal wear problem of contact wires, it is necessary to explore the data correlation degree between the key data of the pantograph catenary (PC) system and the contact line wear thickness. [Method] PC tests are conducted on the actual line, and measured data such as dynamic contact force, train running speed, vertical acceleration of the contact strip, arcing duration, bus current, catenary stagger value and contact wire wear thickness are obtained. The proportion of each factor's contribution to the wear thickness of contact wire is analyzed by grey correlation method. [Result & Conclusion] The train running speed directly affects the wear thickness of the contact wire, and its influence accounts for the largest proportion, fol-

lowed by the dynamic contact force. Other factors are ranked from large to small in terms of influence proportion as follows: arcing duration, bus current, catenary stagger value, and vertical acceleration of the contact strip.

**Key words** metro; contact wire; wear detection; grey correlation method

地铁列车获取电能时, 受电弓滑板与接触线会不可避免地发生滑动摩擦<sup>[1]</sup>, 进而导致接触线磨损。近年来, 接触线磨损过大问题频发, 极大地缩短了接触线的更换周期, 增加了地铁的运营成本, 也给弓网系统的受流性能和运行安全带来了挑战<sup>[2]</sup>。

接触线磨损是多因素综合影响的结果, 文献[3-4]将接触线磨损按照发生机理分为机械磨损、电气磨损及化学磨损, 由于化学磨损影响较小且研究周期较长, 因此研究往往针对机械磨损与电气磨损进行。文献[5-6]指出速度、电流及接触力是影响接触线磨损的重要因素。但目前哪种因素对于接触线磨损的关联性更大尚缺少相关研究。

针对上述问题, 本文在某接触线磨损严重的地铁线路区间布置相关测点, 开展地铁列车的弓网试验, 选择弓网关系的几组重要数据作为接触线磨损的影响因素, 采用灰色关联法分析各影响因素与接触线磨损厚度之间的数据关联性, 对各因素影响占比进行评估, 以期为研究地铁接触线异常磨损的原因提供参考。

## 1 弓网试验

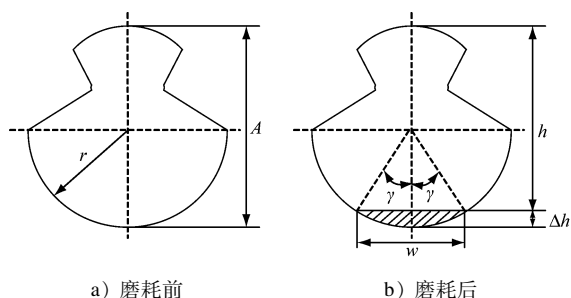
弓网试验区间全长 2 600 m, 采用 DC 1 500 V 刚性接触网供电。按照试验区间线路分为上行工况与下行工况, 将列车运行方向相应分为受电弓开口方向和受电弓闭口方向。首先, 根据接触线磨损

\* 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC1937, 2022NSFSC0468)

截面几何特征,布设接触线磨耗检测设备;然后,为保证分析结果不具有偶然性,对上行工况与下行工况进行重复性测试,测得动态接触力、列车运行速度、滑板垂向加速度、燃弧持续时间、母线电流、接触网拉出值及接触线磨耗厚度等7项弓网关系重要数据。

### 1.1 接触线磨耗检测

接触线磨耗前后的断面示意图如图1所示。其中接触线磨耗前下表面呈圆弧状。当受电弓滑板在接触线上滑动取流时,不同磨耗程度的接触线将对应接触线下方不同的磨耗厚度 $\Delta h$ ,如图1所示<sup>[7]</sup>。



注:  $r$  为接触线的半径;  $h$  为残存接触线厚度;  $A$  为完整接触线的厚度;  $w$  为接触线磨耗部分宽度;  $\gamma$  为已磨耗的圆弧对应圆心角的一半。

图1 接触线磨耗前后的断面示意图

Fig. 1 Cross-sectional diagram of the contact wire before and after wear

由图1可知,  $A$  与接触线磨耗面积  $S$  存在以下关系:

$$S = \frac{\pi r^2 \gamma}{180^\circ} - [r - (A - h)] r \sin \gamma \quad (1)$$

其中:

$$\gamma = \arccos \left( 1 - \frac{A - h}{r} \right) \quad (2)$$

根据接触线的几何特点,结合式(1)和式(2),既可确定接触线的圆心位置,也可计算出接触线的其他几何参数。

### 1.2 接触线磨耗检测设备

接触线磨耗的检测设备如图2所示,其不仅可以对接触线磨耗进行测量,也可对接触网拉出值进行测量。采用2组检测设备,每组检测设备包含1台激光发射器与1部高速照相机,这样可更好地补偿接触线磨耗厚度,使测量结果更准确。

该接触线磨耗检测设备采用激光三角测量法来检测接触线下表面的轮廓曲线。该检测设备如

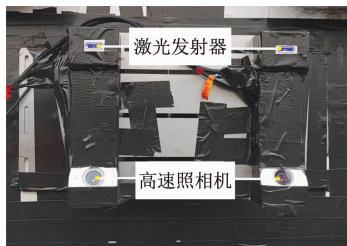
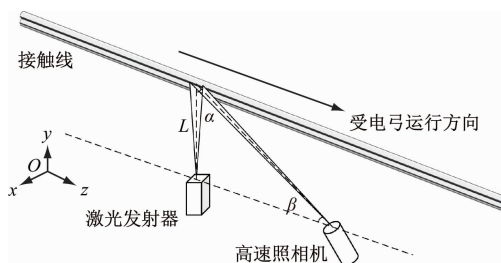


图2 接触线磨耗的检测设备

Fig. 2 Detection equipment for contact wire wear

图3所示。测量时,激光发生器发射的红色激光线垂直照射到接触线表面上,经反射在高速照相机的成像平面上产生畸变光条;使用高速照相机获取该畸变光条,再根据激光三角测量原理就可以计算出光条上各点的坐标值<sup>[8]</sup>。使用高速照相机获得接触线下表面的坐标后,经过相应的补偿和变换,即可得到点云数据的几何坐标,从而获得接触线的磨耗厚度<sup>[9]</sup>。



注:  $\alpha$  为激光束的反射角;  $\beta$  为反射激光束与扫描轴的夹角;  $L$  为激光发生器到接触线轮廓曲线的垂直距离。

图3 激光三角测量法原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laser triangulation detection method

### 1.3 弓网关系重要数据的检测设备布设

在ATO(列车自动运行)模式下,通过弓网试验检测7项重要的弓网关系数据。其中,弓网接触压力采用8个力传感器测量;弓头垂向加速度通过安装于受电弓滑板下方的加速度传感器进行测量;母线电流通过电流传感器采集;弓网燃弧采用燃弧传感器进行检测;列车运行速度通过安装于车底的速度传感器进行检测;接触线拉出值及磨耗厚度通过接触线的检测设备测量;弓网接触力及滑板加速度的数据采集盒安装于受电弓底架,利用光电转换原理,将数据传至车内高性能计算机上进行处理和储存。弓网关系数据检测设备布置如图4所示。

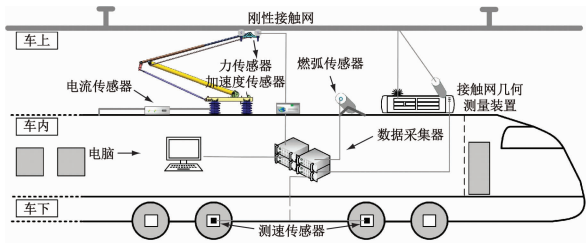


图4 弓网关系数据检测设备的布置图

Fig. 4 Layout of pantograph-catenary relationship data detection equipment

## 2 接触线磨耗影响因素的关联性分析

灰色关联法是系统性分析中的一种可靠分析方法,既不依赖于样本数量,也不需要典型分布规律,在分析众多数据之间的关联问题上具有很大的优势。

接触线磨耗厚度可以有效地反映灰色系统的行为特征。假设试验测得的各数据之间相互独立,运用灰色关联法进行关联分析。将接触线磨耗厚度  $Y_0$  作为关联分析的参考序列,记作:

$$Y_0 = \{\Delta h_{0,i} | i = 1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

式中:

$n$ ——样本数;

$\Delta h_{0,i}$ ——第  $i$  个样本的磨耗厚度。

而列车动态接触力、运行速度、滑板垂向加速度、燃弧持续时间、母线电流、接触网拉出值则作为影响灰色系统行为的 6 个因素,将第  $k$  个元素的数据序列  $X_{k0}$  作为本次关联分析的第  $k$  个比较序列,记作:

$$X_{k0} = \{x_{k0,i} | i = 1, 2, \dots, n\}, k = 1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

式中:

$x_{k0,i}$ ——第  $k$  个比较序列中的第  $i$  个样本数据。

首先,对原始数据进行标准化处理,用以消除量纲的影响,通常采用极值标准化法:

$$x_{i,s} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

式中:

$x_i$ ——第  $i$  个原始数据;

$x_{i,s}$ ——第  $i$  个标准化处理后的数据;

$x_{\min}, x_{\max}$ ——数据序列的最小值、最大值。

然后,计算灰色关联度,用以衡量不同数据序列之间的相似度:

$$\xi_{j,k} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{j,k}}{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}} \quad (6)$$

式中:

$\xi_{j,k}$ ——第  $j$  个参考序列与第  $k$  个比较序列的灰色关联度;

$\Delta_{j,k}$ ——数据标准化处理后,第  $j$  个参考序列与第  $k$  个比较序列的绝对差异度;

$\Delta_{\min}, \Delta_{\max}$ ——所有差异度中的最小值、最大值;

$\rho$ ——分辨系数,一般取值为 0.5,用于平衡最小差异和最大差异的影响。

灰色关联度越大表明参考序列与比较序列关系越密切。列车上下行的计算结果如表 1 所示。

表 1 各影响因素与接触线磨耗厚度的灰色关联度

Tab. 1 Grey correlation degree between each influencing factor and wear thickness of the contact wire

列车运行 工况	$\xi_k$					
	速度	接触力	燃弧持续 时间	电流	拉出值	滑板 加速度
上行工况	0.696 0	0.651 8	0.448 1	0.332 3	0.077 1	0.025 0
下行工况	0.319 4	0.310 2	0.116 2	0.098 6	0.012 8	0.008 0

由表 1 可以看出,列车运行速度与接触线磨耗厚度的灰色关联度最高,而滑板加速度与接触线磨耗厚度的灰色关联度最低。为进一步分析各影响因素对接触线磨耗的影响占比,根据表 1 中计算出来的灰色关联度数据,计算各因素对接触线磨耗的影响占比:

$$\alpha_k = \frac{\xi_k}{\sum_k r_k} \times 100\%, k = 1, 2, \dots, 6 \quad (7)$$

式中:

$\alpha_k$ ——因素  $k$  对接触线磨耗的影响占比;

$\xi_k$ ——因素  $k$  与接触线磨耗厚度的灰色关联度。

按上行工况和下行工况,分别计算  $\alpha_k$ ,如图 5 所示。

从图 5 中可以看出:

1) 无论上行工况还是下行工况,均是列车运行速度与接触线磨耗厚度之间的影响占比最高,分别为 31.21% 和 36.91%,表明列车运行速度可作为接触线磨耗厚度评价的一项重要参考。

2) 弓网接触力与接触线磨耗厚度之间也有较高的影响占比。上、下行工况下弓网接触力的影响占比分别为 29.22% 和 35.86%。

3) 其余因素按权重从高到低排序依次为燃弧

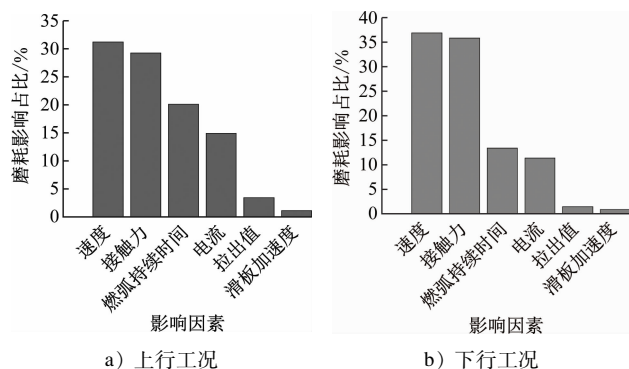


图5 不同工况下各影响因素的磨损影响占比

Fig.5 Wear impact percentage of each influencing factor under different working conditions

持续时间、电流、拉出值、滑板加速度。其中滑板加速度在上、下行工况中对接触线磨损厚度的影响占比分别为1.12%和0.92%，均是最低。

由上述分析结果可知，在接触线异常磨损问题研究中，应着重研究列车运行速度及弓网接触力对接触线异常磨损的影响，可在一定程度上忽略滑板加速度对于接触线异常磨损的影响。

### 3 结语

采用灰色关联法分析各因素对于接触线磨损厚度的影响占比，从高到低排序依次为：列车运行速度、弓网接触力、燃弧持续时间、电流、拉出值、滑板加速度。

接触线的磨损主要是机械磨损和电气磨损的耦合结果。当列车加速时，一方面，受电弓接触力增大，导致接触线机械磨损增大；另一方面，电流增大及燃弧增多，导致接触线的电气磨损增多。因此，若要控制接触线的磨损，就要选择合理的牵引方式，才能在保障地铁交通安全运行的同时节约运营成本。

### 参考文献

[1] 范杰, 刘达毅, 董丙杰, 等. 地铁刚性弓网系统接触线磨损特性试验研究[J]. 润滑与密封, 2022, 47(6): 45.  
FAN Jie, LIU Dayi, DONG Bingjie, et al. Experimental study on the wear characteristics of contact wire of metro rigid pantograph-catenary systems [J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(6):

45.  
[2] 舒斯龙, 邓桂棠, 谢小春. 地铁120 km/h刚性接触网局部磨损分析及预防措施[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(6): 123.  
SHU Silong, DENG Guitang, XIE Xiaochun. Local wear analysis and preventive measures for rigid catenary when the metro train runs at the speed of 120 km/h [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(6): 123.  
[3] ZHANG H, SUN L, ZHANG Y, et al. The study of arc rate, friction, and wear performance of C/C composites in pantograph-catenary system [J]. Tribology Transactions, 2014, 57(6): 1157.  
[4] 董霖. 载流摩擦磨损机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.  
DONG Lin. Study on friction and wear mechanism of current-carrying [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.  
[5] 李智谦. 接触网参数非接触式检测技术研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2017.  
LI Zhiqian. Research on non-contact detection technology of catenary parameters [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2017.  
[6] 赖庆峰. 基于双目视觉的跨座式单轨接触网磨损检测技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
LAI Qingfeng. Research on wear detection technology of straddle-type monorail catenary based on binocular vision [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.  
[7] 聂箫, 王锋, 王涛, 等. 霍夫变换在接触线磨损检测算法中的应用[J]. 机车电传动, 2022(4): 140.  
NIE Xiao, WANG Feng, WANG Tao, et al. Application of Hough transform in contact wire wear detection algorithm [J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(4): 140.  
[8] 张翰林. 激光三角同步扫描轮廓测量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.  
ZHANG Hanlin. Research on key technologies of laser triangular synchronous scanning contour measurement [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.  
[9] JARZEBOWICZ L, JUDEK S. 3D machine vision system for inspection of contact strips in railway vehicle current collectors [C] //IEEE. 2014 International Conference on Applied Electronics. New York: IEEE, 2014: 139.

· 收稿日期:2023-01-30 修回日期:2023-03-11 出版日期:2025-04-10  
Received:2023-01-30 Revised:2023-03-11 Published:2025-04-10  
· 第一作者:郭英强,高级工程师,35610123@qq.com  
通信作者:祁文廷,博士研究生,1149344850@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