

基于钢轨电位时空关联的钢轨对地绝缘缺陷诊断方法^{*}

潘卫国¹ 李 田² 吴鹤翔¹ 黄晓鹏³ 刘 炜³

(1. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 100071, 北京; 2. 国网湖南省电力有限公司益阳供电分公司, 413099, 益阳;
3. 西南交通大学电气工程学院, 611756, 成都)

摘 要 [目的]以钢轨电位为监测对象的各监测点数据间在时空上存在关联,钢轨对钢筋结构电阻变化后的直接表现形式为钢轨电位的变化。应基于钢轨电位时空关联的特点,对钢轨对地绝缘状态监测及缺陷诊断的方法进行深入研究。[方法]阐述了以钢轨电位为监测对象的杂散电流监测系统。对绝缘缺陷下的钢轨电位数据特征进行了分析,建立了数据的特征矩阵。基于闵可夫斯基距离的异常检测原理,阐述了钢轨对地绝缘异常区段的检测步骤,以及绝缘缺陷定位的检测步骤,提出了基于钢轨电位时空关联的钢轨绝缘缺陷诊断方法。以青岛某城市轨道交通工程为案例进行建模仿真,用以评估所提方法的有效性及其准确性。[结果及结论]该方法能对钢轨绝缘状态进行有效监测,可准确定位绝缘缺陷位置。

关键词 城市轨道交通; 供电; 杂散电流; 钢轨电位; 钢轨绝缘监测; 绝缘缺陷诊断

中图分类号 U231.8; U226

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.04.023

Rail-to-ground Insulation Defect Diagnosis Method Based on Spatiotemporal Correlation of Rail Potential

PAN Weiguo¹, LI Tian², WU Hexiang¹, HUANG Xiaopeng³, LIU Wei³

(1. Beijing National Railway Communication Signal Research and Design Institute Group Co., Ltd., 100071, Beijing, China; 2. Yiyang Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., 413099, Yiyang, China; 3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 611756, Chengdu, China)

Abstract [Objective] The data of various monitoring points regarding rail potential as monitoring object is correlated in time and space, and the direct manifestation of changes in rail-to-rebar structural resistance is reflected in rail potential variation. It is aimed to explore a method for monitoring the rail-to-ground insulation state and diagnosing defects based on rail potential spatiotemporal correlation. [Method] The stray current

monitoring system with rail potential as the monitoring object is elaborated. The characteristics of rail potential data under insulation defects are analyzed and a feature matrix for the data is established. Based on the anomaly detection principle of Minkowski distance, the detection steps for abnormal sections of rail-to-ground insulation and for insulation defect locationing are explained. A project in Qingdao Rail Transit is taken as study case for modeling and simulation to evaluate the effectiveness and accuracy of the proposed method. [Result & Conclusion] The proposed method can effectively monitor the rail insulation state and accurately locate insulation defects.

Key words urban rail transit; power supply; stray current; rail potential; rail insulation monitoring; insulation defect diagnosis

城市轨道交通线路中,钢轨绝缘缺陷导致电流泄漏,是形成杂散电流的主要原因^[1]。文献[2]介绍了我国采用的杂散电流集中监测和分散监测方案。我国对城市轨道交通线路杂散电流的监测普遍采用测量排流网钢筋极化电压的方式来判断结构钢筋是否受到杂散电流的腐蚀作用,但是极化电位监测数据受现场安装施工的影响较大,不能作为判断杂散电流问题严重并进行治理的依据。国际电工委员会发布的 IEC 62128—2:2013《轨道交通 固定装置 电气安全、接地和回路 第2部分:对于由直流牵引系统引起的杂散电流影响所采取的保护措施》及欧洲标准化委员会发布的 EN 50122—2:2010《轨道交通 固定装置 接地和回路电气安全 第2部分:由直流牵引系统产生的杂散电流影响的防护规定》中,均推荐采用连续钢轨电位监测方案,即:通过分析某一区段钢轨对地绝缘破坏对全线钢轨电位分布的影响来监测杂散电流。

文献[3]通过对单向导通装置不同工况下燃气管道的电位进行分析对比,找出城市轨道交通车辆

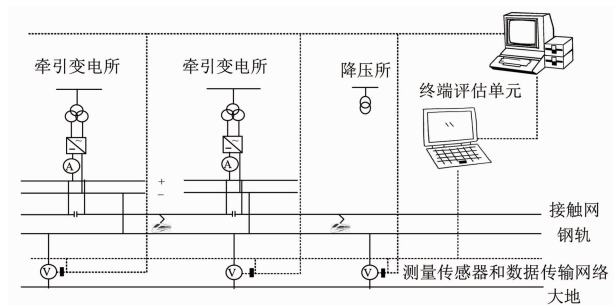
^{*} 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0463)

基地出入段线路单向导通装置的缺陷。当线路绝缘出现缺陷时,钢轨电位会发生变化,为此,西门子公司研究了一种以连续钢轨电位为监测对象的杂散电流监测系统。

以钢轨电位为监测对象的各监测点数据间存在关联,钢轨对钢筋结构电阻变化后,钢轨的直接表现形式为钢轨电位的变化。若能对钢轨电位数据进行关联性分析,则可监测和诊断钢轨对地绝缘情况。为此,本文通过分析钢轨电位数据,监测和诊断钢轨对地绝缘情况。

1 以钢轨电位为监测对象的监测系统

杂散电流泄漏程度最直接的表征因素是全线钢轨电位的分布,因此利用各个监测点的连续钢轨电位数据进行线路的绝缘缺陷诊断,是一种基于全线钢轨电位分布的新的杂散电流监测技术。以钢轨电位为监测对象的杂散电流监测系统如图 1 所示。



注:实线表示系统实际的等效线路;虚线表示数据流的传输。

图 1 以钢轨电位为监测对象的杂散电流监测系统

Fig. 1 Stray current monitoring system based on rail potential as monitoring objective

2 钢轨电位特征分析

2.1 数据特征

钢轨电位数据是带有时间戳及空间位置信息的数值型数据,具有流数据的典型特征。流数据是一组有顺序的大量、快速、连续到达的数据序列^[4]。

2.2 钢轨绝缘缺陷特征

钢轨绝缘缺陷会改变线路上的钢轨电压分布,导致绝缘缺陷区段的钢轨电位最大值及最小值幅值减小。本文采用直流牵引供电仿真系统对青岛某城市轨道交通工程进行了钢轨绝缘缺陷情况对比分析^[5]。该线的运营线路长度为 58.351 km,以上行起点站为里程统计的起点,牵引所 TS3 位于 5.745 km 处,TS7 位于 19.744 km 处,TS8 位于 24.324 km 处,TS18 位于 57.970 km 处。分别对绝缘正常(工

况 A)、0~5.831 km 线路区段内存在绝缘缺陷(工况 B)的钢轨电位最大值和最小值进行统计,其结果如图 2、图 3 所示。

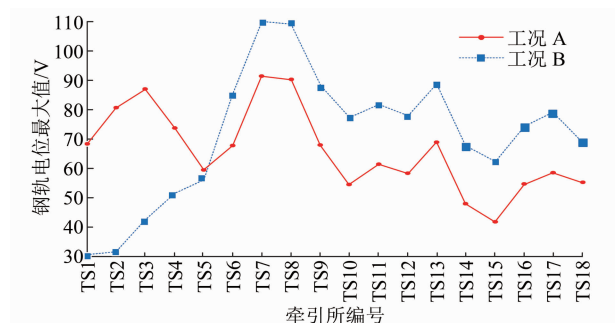


图 2 两种工况下各牵引所的钢轨电位最大值

Fig. 2 Maximum rail potential values at each traction substation under two working conditions

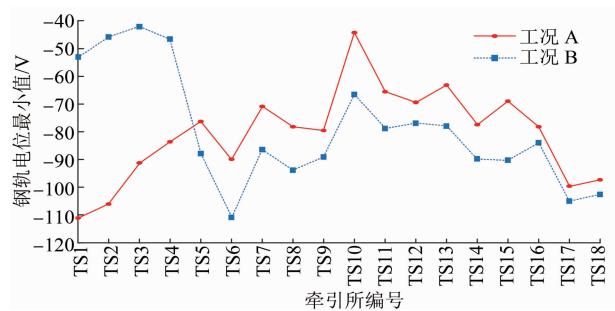


图 3 两种工况下各牵引所的钢轨电位最小值

Fig. 3 Minimum rail potential values at each traction substation under two working conditions

由图 2 可知:工况 A 中,钢轨电位最大值为 91.385 V;工况 B 中,钢轨电位最大值为 109.926 V。与工况 A 相比,工况 B 下 TS1—TS5 的钢轨电位最大值均减小,TS6—TS18 的钢轨电位最大值均增大。由此可知,当局部区段存在绝缘缺陷时,线路各牵引所处钢轨电位分布出现波动增大的现象,缺陷区段附近牵引所处钢轨电位最大值将减小。

由图 3 可知:工况 A 中,TS1 与 TS10 钢轨电位最小值绝对值的差值最大;工况 B 中,TS3 与 TS6 钢轨电位最小值绝对值的差值最大。与工况 A 相比,工况 B 下 TS1—TS4 的钢轨电位最小值均增大,TS5—TS18 的钢轨电位最小值均减小,TS10 的钢轨电位降幅最大。由此可知,当局部区段存在绝缘缺陷时,线路各牵引所处钢轨电位分布出现波动增大的现象,缺陷区段附近牵引所处钢轨电位最小值将增大。

2.3 建立特征矩阵

设线路上有 f 个钢轨电压监测点,监测时间被划分为 q 个时间子序列,每个监测点 i 均对应 3 个特征向量 x_i, y_i, z_i 。其中: x_i 为监测点 i 在电路上对

应位置的合集; y_i 为监测点 i 在每个时间子序列对应钢轨电位最大值的合集; z_i 为监测点 i 在每个时间子序列对应钢轨电位最小值的合集,令向量集合 $s_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ 。再设 S 为数据样本的特征矩阵,综合上文对钢轨电位数据的特征分析可得:

$$S = [s_1 \ s_2 \ \cdots \ s_f]^T \quad (1)$$

$$y_i = [y_{i1} \ \cdots \ y_{ij} \ \cdots \ y_{iq}] \quad (2)$$

$$z_i = [z_{i1} \ \cdots \ z_{ij} \ \cdots \ z_{iq}] \quad (3)$$

式中:

y_{ij} ——监测点 i 在第 j 个时间子序列的钢轨电位最大值;

z_{ij} ——监测点 i 在第 j 个时间子序列的钢轨电位最小值绝对值。

3 钢轨电位时空关联的绝缘缺陷诊断

聚类方法包括多种^[6-8]。考虑到聚类的运行时间及精度,本文选取 K -means 聚类算法进行分析。 K -means 算法是硬聚类算法,优化目标为最小化样本与质点之间的距离。

3.1 钢轨对地绝缘异常检测的步骤

根据聚类结果,从不同类中选出典型监测点,并进行参考数据与待测数据的异常检测。基于闵可夫斯基距离的异常检测,步骤如下:

步骤1 选取待测数据,从持久存储数据库中调取历史数据作为参考数据,将待测数据与参考数据相匹配,形成特征矩阵 S 。

步骤2 对 S 进行聚类分析,随机挑选各类中1个监测点作为典型监测点。在 S 中选取典型监测点的特征向量,形成绝缘异常检测的参考度量矩阵 S_w 。对典型监测点的待测数据进行处理,形成绝缘异常检测的待测度量矩阵 S'_w 。

步骤3 设 K 为自然数列, $x_{w,k}$ 为参考度量矩阵 S_w 中监测点位置, $s'_{w,k}$ 为待测度量矩阵 S'_w 中监测点位置。遍历 $s'_{w,k}$, 若 $\exists x_{w,k}, \text{st. } x'_{w,k} = x_{w,k}$, 则转至步骤4,进行相似性度量,直至所有典型监测点度量结束。

步骤4 设 $y'_{w,ij}$ 为待测度量矩阵 S'_w 中监测点 i 在第 j 个时间子序列中对应的钢轨电位最大值, $y_{w,ij}$ 为参考度量矩阵 S_w 中监测点 i 在第 j 个时间子序列中对应的钢轨电位最大值, $z'_{w,ij}$ 为待测度量矩阵 S'_w 中监测点 i 在第 j 个时间子序列中对应的钢轨电位最小值绝对值, $z_{w,ij}$ 为参考度量矩阵 S_w 中监测点 i 在第

个时间子序列对应的钢轨电位最小值绝对值。设 $d_{y,ij}$ 为度量矩阵 D_y 中监测点 i 在第 j 个时间子序列中的钢轨电位最大值, $d_{z,ij}$ 为度量矩阵 D_z 中监测点 i 在第 j 个时间子序列中的钢轨电位最小值绝对值。设 D_y 为监测点钢轨电位最大值的度量矩阵, D_z 为监测点钢轨电位最小值绝对值的度量矩阵, a 为恒定系数。采用闵可夫斯基距离进行各时间子序列的相似性度量,求得度量矩阵:

$$d_{y,ij} = [(y'_{w,ij} - y_{w,ij})^a]^{\frac{1}{a}} \quad (4)$$

$$d_{z,ij} = [(z'_{w,ij} - z_{w,ij})^a]^{\frac{1}{a}} \quad (5)$$

步骤5 设 $D_{y,i}$ 为度量矩阵 D_y 在监测点 i 的均值, $D_{z,i}$ 为度量矩阵 D_z 在监测点 i 的均值。各监测点相似量均值的计算为:

$$D_{y,i} = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q d_{y,ij} \quad (6)$$

$$D_{z,i} = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q d_{z,ij} \quad (7)$$

步骤6 异常检测。以 ε_1 为指标判定各典型监测点数据是否异常, ε_1 为用户综合工程情况自定义的用于判断监测点异常数据的阈值(一般为负数)。若 $\exists i$, 其 $D_{y,i} < \varepsilon_1$ 且 $D_{z,i} < \varepsilon_1$, 则认为第 i 个监测点的数据样本存在异常。

步骤7 根据异常检测结果对异常类进行标记,并对异常类别的总数进行标记。

3.2 绝缘缺陷定位

在识别出钢轨电位数据存在异常后,应对绝缘缺陷位置进行定位。基于闵可夫斯基距离公式确定绝缘缺陷的确切位置,步骤如下:

1) 对每个异常类,选取类中对象进行数据处理,形成待测定位矩阵 S'_N 。

2) 在特征矩阵中选取对应监测点特征向量 $S_{q,i}$, 形成绝缘缺陷定位的参考定位矩阵 S_N :

$$S_N = [s_{q,1} \ s_{q,2} \ \cdots \ s_{q,n}]^T \quad (8)$$

3) 遍历监测点,其中向量 x'_n 为待测矩阵 S'_N 中所有监测点位置的集合,向量 x_n 为参考矩阵 S_N 中所有监测点位置的集合,若 $\exists x_n, \text{st. } x'_n = x_n$, 则进行相似性度量,并进行相似量均值计算,直至所有异常类中监测点度量结束。

4) 以 ε_2 为指标判定各监测点是否为绝缘缺陷位置点, ε_2 为根据用户需求自定义的用于判定监测点存在绝缘缺陷的阈值(一般为负数)。若监测点 i 满足待测矩阵 S'_N 中最大值在时间上的序列均值

$D'_{y,i} < \varepsilon_2$, 待测矩阵 S'_N 中最小值在时间上的序列均值 $D'_{z,i} < \varepsilon_2$, 则认为该点附近的钢轨绝缘存在缺陷。

4 钢轨绝缘缺陷诊断算例

4.1 仿真条件

为验证该方法的有效性, 仍以上文的青岛某城市轨道交通工程为案例进行建模仿真。

仿真设置了 8 个不同的工况, 其仿真条件如表 1 所示。表 1 中: 工况 1、工况 3 分别为运行图 1、运行图 2 下线路绝缘正常; 工况 2、工况 4 分别为运行图 1、运行图 2 下线路地下段存在绝缘缺陷, 缺陷范围覆盖 TS1—TS3; 工况 5、工况 7 分别为运行图 2、运行图 3 下在线路里程 21~23 km 内存在绝缘缺陷, 缺陷范围覆盖 TS7—TS8; 工况 6 为运行图 2 下线路的地下段和地上段均存在绝缘缺陷, 缺陷范围覆盖了 TS1—TS3 及 TS7—TS8; 工况 8 为运行图 3 下在线路里程 31~34 km 内存在绝缘缺陷, 缺陷靠近 TS10、TS11。运行图 1、运行图 2 和运行图 3 均有 2 个交路, 其中: 运行图 1 中交路 1 和交路 2 的发车间隔均为 890 s; 运行图 2 中交路 1 的发车间隔为 445 s, 交路 2 的发车间隔为 890 s; 运行图 3 中交路 1 和交路 2 的发车间隔均为 445 s。

表 1 8 个模拟工况的仿真条件

Tab. 1 Simulation conditions for 8 simulated working conditions

工况序号	单位阻抗区段	
	区段的起止里程/km	钢轨对地电阻/($\Omega \cdot \text{km}$)
工况 1	0~58.351	19.119
工况 2	0~5.831	1.816
	5.831~57.970	19.119
工况 3	0~58.351	19.119
工况 4	0~5.831	1.816
	5.831~58.351	19.119
工况 5	21.000~23.000	1.816
	0~21.000、23.000~58.351	19.119
工况 6	5.831~21.000、23.000~58.351	19.119
	0~5.831、21.000~23.000	1.816
工况 7	21.000~23.000	1.816
	0~21.000、23.000~58.351	19.119
工况 8	31.000~34.000	1.816
	0~31.000、34.000~58.351	19.119

4.2 聚类结果

工况 1 下钢轨电位的最大值和最小值如图 4 所示。

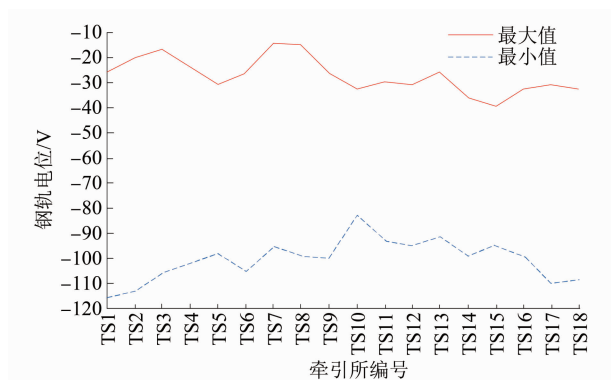


图 4 工况 1 下钢轨电位的最大值和最小值

Fig. 4 Maximum and minimum values of rail potential under working condition 1

以工况 1 的仿真数据为参考数据, 形成参考特征矩阵。当聚类数 K 从 1 至 8 变化 (即从工况 1 向工况 8 变化) 时, 监测点和质点之间距离方差 σ_{SSE} 的变化情况如图 5 所示, 由图 5 可知, 当 $K=3$ 时, 聚类已经具有很好的质量。

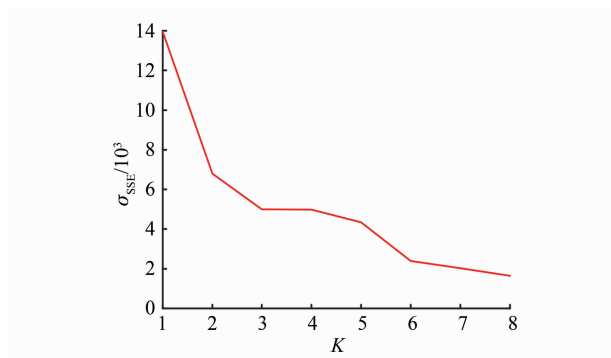


图 5 不同 K 值下的 σ_{SSE}

Fig. 5 σ_{SSE} under different K values

钢轨电位的聚类结果如图 6 所示。图 6 中: TS14—TS18 被分为第一类; TS1—TS4、TS6 被分为第二类; TS5、TS7—TS13 被分为第三类。每一类都有正常和异常两种情况。第一类监测点为对应实际车站的特征值, 包括位置、钢轨电位最大值、钢轨电位最小值绝对值; 用一个虚拟的点位表示第一类监测点到该点位的距离最小, 该虚拟点位即为第一类质点。第二类质点、第三类质点的含义类同。通过判断第几类监测点到它对应质点之间的距离是否小于 ε_1 来判断数据是否异常且处于第几类异常。

4.3 绝缘缺陷诊断结果

根据聚类结果, 在工况 2 下取 3 个典型监测点。对特征矩阵提取典型监测点向量, 形成参考度量矩阵。对待测样本提取典型监测点数据, 形成待测度

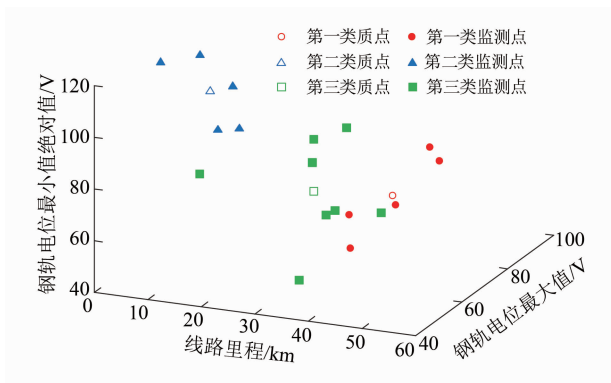


图 6 钢轨电位的聚类结果

Fig. 6 Clustering results of rail potential

量矩阵。取 $a=1, \varepsilon_1=-10$, 计算得到异常检测结果为第二类异常。此外, 工况 1、工况 3—工况 8 的模拟监测结果依次为无异常、无异常、第二类异常、第二类异常、第二及第三类异常、第三类异常、第三类异常。

针对异常检测结果, 以工况 2 为例, 对特征矩阵提取第二类异常中的监测点向量, 形成参考定位矩阵。对待测样本提取异常类内的监测点数据, 形成待测定位矩阵, 进行相似性度量。取 $\varepsilon_2=-10$, 得到工况 2 下绝缘缺陷的诊断结果为集合 $\{TS1, TS2, TS3, TS4\}$ 。8 个模拟工况的绝缘缺陷定位结果如表 2 所示。由此可认为, 在相同发车间隔下, 线路上如存在钢轨绝缘缺陷的情况, 大部分绝缘缺陷均能按本文所述方法进行准确定位。

表 2 8 个模拟工况的绝缘缺陷定位结果

Tab. 2 Insulation defect locating results for 8 simulated working conditions

工况序号	绝缘缺陷区段
工况 1	无缺陷区段
工况 2	TS1、TS2、TS3、TS4
工况 3	无缺陷区段
工况 4	TS1、TS2、TS3
工况 5	TS1、TS2、TS3
工况 6	TS1、TS2、TS3、TS8
工况 7	TS8
工况 8	TS11

5 结语

1) 本文对钢轨电位分布的特点及特征进行了分析, 定义了钢轨电位时空关联数据的特征矩阵。分析表明, 钢轨电位在空间上具有相关性, 局部区段

发生绝缘缺陷, 缺陷处钢轨电位的最大值和最小值均会有所减小。

2) 基于空间相关性特征, 利用 K-means 聚类方法将待测数据样本进行分类, 并选取典型监测点。无论待测数据是否存在异常, 本文所提的基于聚类的预处理方法均能减小待测数据的处理复杂度, 减少相似性度量矩阵的输入。

3) 仿真案例分析表明, 基于钢轨电位时空关联的绝缘缺陷诊断方法能对钢轨绝缘状态进行有效监测, 可准确定位钢轨绝缘缺陷位置。

参考文献

- [1] 杜贵府, 张栋梁, 吴培林. 城市轨道交通多层排流网投入运行研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(11): 80.
DU Guifu, ZHANG Dongliang, WU Peilin. On the operation of multi-layer current drainage net in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(11): 80.
- [2] 汪园园. 杂散电流监测方案的探讨[J]. 电气化铁道, 2001, 12(1): 48.
WANG Yuanyuan. Discussion on stray current monitoring scheme[J]. Electric Railway, 2001, 12(1): 48.
- [3] 宋大治. 地铁场段基地杂散电流泄漏监测与治理[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(7): 74.
SONG Dazhi. Monitoring and control of stray current leakage in metro depot[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(7): 74.
- [4] 周东滨. 流数据聚类挖掘算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
ZHOU Dongbin. Research on data stream clustering algorithms[D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [5] 刘炜, 杨龙, 李国玉, 等. 计及回流系统设备行为过程的钢轨电位动态仿真[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 1000.
LIU Wei, YANG Long, LI Guoyu, et al. Dynamic simulation of rail potential considering the equipment behavior process of recirculation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4): 1000.
- [6] 金建国. 聚类方法综述[J]. 计算机科学, 2014, 41(增刊 2): 288.
JIN Jianguo. Review of clustering method[J]. Computer Science, 2014, 41(S2): 288.
- [7] 管涛. 统计聚类模型研究综述[J]. 计算机科学, 2012, 39(7): 18.
GUAN Tao. Overview of statistical clustering models[J]. Computer Science, 2012, 39(7): 18.
- [8] 吴浩, 李群湛, 易东. 基于广域状态信息和模糊 C 均值聚类的电网故障区域判别[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 39.
WU Hao, LI Qunzhan, YI Dong. Faulty region identification based on wide-area state information and fuzzy C-means clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 39.

(下转第 128 页)

按照上文的分析方法对表 3 的数据进行分析,选取拉出值范围为 $-200 \sim -180$ mm 的占比 (7.04%),以及拉出值范围为 $0 \sim 20$ mm 的占比 (4.80%)。二者相除后得到受电弓磨耗最大倍数为 1.47 倍,较优化前的 6.23 倍明显下降。选取 $-100 \sim 100$ mm 范围内滑动摩擦距离占比的平均值为 4.80%, $-200 \sim -100$ 、 $100 \sim 200$ mm 范围内滑动摩擦距离占比的平均值为 5.20%,二者相除后得到受电弓磨耗平均值倍数为 1.08 倍,较优化前的 3.52 倍也有明显下降。与优化前的磨耗异常部位相比,优化后除最大拉出值处外,其他各计算段滑动摩擦距离占比均为 4.80%,无异常磨耗点。运行轨道交通弓网检测车,观测得到优化后的接触网动态数据无异常,由此可认为在列车运行中,弓网受流质量能够得到保证。

4 结语

在已运营线路的刚性接触网中,通过调整定位点的拉出值数据,解决了正弦波拉出值布置方式存在的弓网异常磨耗问题,使受电弓磨耗最大倍数由 6.23 倍下降至 1.47 倍,受电弓磨耗平均值倍数由 3.52 倍下降至 1.08 倍。在西安地铁 2 号线部分区段实施该优化措施后,2 年内弓网无明显异常磨耗,受流质量良好。

本文提出的优化措施调整难度适中,对受电弓磨耗平顺度有较大提高,适合对既有线路在运营期间进行改造。但该优化措施未能完全解决因刚性接触网自身刚度引起的弯曲半径滑动摩擦距离占比较大问题,优化后最大拉出值处的滑动摩擦距离占比

仍然较其他区段高,该优化措施仅供各运营管理部门参考。

参考文献

- [1] 黄冬亮. 城市轨道交通架空刚性接触网平面布置优化方案浅谈[J]. 铁道勘测与设计, 2010(4): 27.
HUANG Dongliang. Discussion on plane layout optimization scheme of overhead rigid catenary of urban rail transit[J]. Railway Survey and Design, 2010(4): 27.
- [2] 艾东兵. 城市轨道交通刚性接触网拉出值优化[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(7): 50.
AI Dongbing. Optimization of the rigid overhead contact system stagger in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(7): 50.
- [3] 白凯元. 刚性接触网拉出值布置与磨耗分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(6): 149.
BAI Kaiyuan. Analysis of rigid catenary stagger layout and wear[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(6): 149.
- [4] 尹魁元. 接触网刚性悬挂拉出值布置方式比较[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(2): 81.
YIN Kuiyuan. On the stagger layout arrangement of overhead rigid suspension[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(2): 81.
- [5] 张权. 刚性悬挂接触网拉出值布置与受电弓磨耗分析[J]. 科学技术创新, 2020(8): 11.
ZHANG Quan. Layout of pull-out value of rigid suspension catenary and analysis of pantograph wear[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(8): 11.

· 收稿日期:2021-09-22 修回日期:2021-11-19 出版日期:2024-04-10
Received:2021-09-22 Revised:2021-11-19 Published:2024-04-10
· 通信作者:李杰,工程师,406609756@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 123 页)

- [9] 刘炜,李富强,唐靖坤,等. 城市轨道走行轨过渡电阻测量方法与计算误差[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2856.
LIU Wei, LI Fuqiang, TANG Jingkun, et al. Measurement method and calculation error of rail-to-earth resistance in urban rail[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2856.

· 收稿日期:2021-10-18 修回日期:2021-11-17 出版日期:2024-04-10
Received:2021-10-18 Revised:2021-11-17 Published:2024-04-10
· 通信作者:潘卫国,高级工程师,panweiguo@crscd.com.cn
· ©《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