

城市轨道交通轨排过渡电阻新型测量方法*

李诗晨¹ 禹贤虎² 李景龙²

(1. 上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海; 2. 上海电力大学电气工程学院, 200090, 上海)

摘要 [目的] 为了分析在地铁运行过程中, 杂散电流对埋地管道和电气设备的影响, 有必要研究城市轨道交通轨排过渡电阻新型测量方法。[方法] 介绍了轨排过渡电阻测量原理。针对轨排过渡电阻测量问题, 提出一种利用冲击电流源的新型测量方法。基于地铁隧道建设特点及冲击电流在轨排结构上的传播特性, 对轨排过渡电阻进行仿真建模。结合仿真模型计算轨排过渡电阻值, 并以上海轨道交通某线路为例, 通过现场测量试验, 分析对比传统直流法与冲击电流法的测量结果。[结果及结论] 随着轨排过渡电阻的增大, 采用冲击电流法的测量误差逐渐减小, 并保持在 5% 以内。冲击电流法对现场环境和测量对象要求较低、外部接线较简单、可操作性高、抗干扰能力强。经过多次现场测量计算, 基于冲击电流法测量的轨排过渡电阻误差约为 1.3%。

关键词 城市轨道交通; 过渡电阻; 杂散电流; 测量方法

中图分类号 U239.5; U223

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.039

New Measurement Methods for Transition Resistance of Rail Tracks in Urban Rail Transit

LI Shichen¹, YU Xianhu², LI Jinglong²

(1. Shanghai Shentong Metro Co., Ltd., 201103, Shanghai, China; 2. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, 200090, Shanghai, China)

Abstract [Objective] To analyze the impact of stray currents on buried pipelines and electrical equipment during metro operation, it is necessary to study new measurement methods for the transition resistance of rail tracks in urban rail transit.

[Method] The principle of measuring rail track transition resistance is introduced. To address the challenges in measuring rail track transition resistance, a novel measurement method utilizing an impulse current source is proposed. Based on the characteristics of metro tunnel construction and the propagation behavior of impulse current in rail track structures, a simulation model for rail track transition resistance is developed. The transition resistance values are calculated using the simulation model, and on-site measurement tests are conducted as a case study on a Shanghai urban rail transit line. The measurement results

by the traditional DC method and the impulse current method are analyzed and compared. [Result & Conclusion] As the rail track transition resistance increases, the measurement error of the impulse current method gradually decreases and remains within 5%. The impulse current method features lower requirements for on-site conditions and measurement objects, simpler external wiring, higher operability, and stronger anti-interference capabilities. Through multiple on-site measurements, the error of the rail track transition resistance measured by the impulse current method is approximately 1.3%.

Key words urban rail transit; transition resistance; stray current; measurement method

我国的城市轨道交通线路多采用直流供电方式, 在地铁运行时, 列车从接触网取流, 大量电流通过钢轨传回牵引变电所负极。为了保障人员和设备安全, 通常采用绝缘垫隔离钢轨与大地。长期运行后, 绝缘垫绝缘性能变差, 部分电流经排流网泄漏至大地, 形成杂散电流。杂散电流可能引起周边埋地管道和金属件的腐蚀, 严重影响这些装置的正常使用寿命。因此, 对杂散电流的监测和防范必不可少。由于杂散电流分布不均难以测量, 通常采用测量过渡电阻来判断轨道的对地绝缘情况^[1]。

目前, 已有较多学者对地铁过渡电阻进行了广泛且深入的研究。文献[2]在杂散电流分布路径的理论基础上, 采用 CDEGS 软件搭建了地铁杂散电流分布模型, 并提出一种利用电缆外覆绝缘层等效钢轨绝缘垫过渡电阻的计算方法。文献[3]采用 CDEGS 软件对轨地杂散电流进行建模仿真, 讨论在不同区间过渡电阻值下的杂散电流分布和轨电位变化情况, 研究结果表明, 过渡电阻与钢轨导体绝缘层电阻率呈线性关系。文献[4]着重分析了影响轨排过渡电阻的主要因素, 建立了地铁杂散电流仿真模型, 并详细分析了钢轨扣件对地铁杂散电流的影响。文献[5]针对 3 种典型的地铁过渡电阻状

* 上海申通地铁集团有限公司科技项目 (JS-KY21R007-10)

态,对列车运行时沿线的轨电位和杂散电流分布进行数值模拟计算,研究表明,钢轨对地过渡电阻值越小,钢轨泄漏的杂散电流越大。文献[6]研究了基于粒子群优化算法的神经网络过渡电阻预测方法,综合考虑了轨电位、轨电流、钢轨纵向电阻、轨地过渡电阻、土壤混凝土温度及湿度等因素,获得了最佳的过渡电阻预测模型。文献[7]研究了现有的过渡电阻测量方法及其误差,并进一步分析了过渡电阻与杂散电流之间的关系,并提出一系列减少杂散电流、增大过渡电阻的建议措施。

已有文献对杂散电流与过渡电阻间关系的研究较多,而对改进过渡电阻的现场测量方法研究较少。现阶段的过渡电阻测量方案主要参照 GB/T 28026.2—2018《轨道交通地面装置电气安全、接地和回流 第2部分:直流牵引供电系统杂散电流的防护措施》标准中的要求,在钢轨上注入直流电源,测量注入点的电压和钢轨两端的电压、电流,通过欧姆定律计算得到过渡电阻值(以下简称“直流法”)。然而,直流法对测量现场环境要求较高,测量时易受干扰,为了准确测量过渡电阻,需断开钢轨,测量完成后再恢复钢轨连接,现场操作难度较大^[8]。因此,有必要研究地铁过渡电阻的新型测量方法。

本文提出一种以冲击电流代替传统直流测量地铁过渡电阻的测量方法(以下简称“冲击电流法”)。首先,对地铁隧道进行等效建模,分析对比直流法和冲击电流法的仿真结果;然后,以上海轨道交通某线路为例,采用2种测量方法进行对比试验。本文研究可为利用冲击电流测量地铁过渡电阻提供重要的实践依据。

1 轨排过渡电阻测量原理

1.1 直流法测量原理

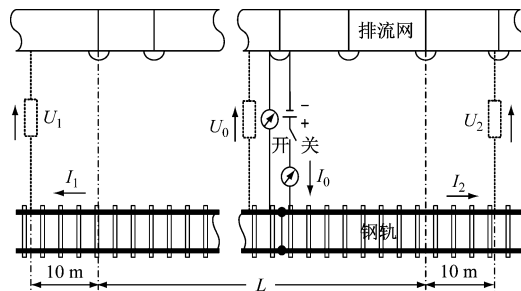
地铁过渡电阻指钢轨与排流网之间的单位长度电阻。直流法测量是指在钢轨与排流网之间注入直流电流,其测量原理如图1所示。

根据 CJJ/T 49—2020《地铁杂散电流腐蚀防护技术标准》,该被测范围内的轨排过渡电阻可以表示为:

$$R_g = \frac{L(U_1 + U_0 + U_2)}{3(I_0 - I_1 - I_2)} \quad (1)$$

式中:

R_g ——1 km 长轨排过渡电阻值,单位 Ω 。



注: U_1 、 U_2 为测量段两侧钢轨对排流网电压; U_0 为直流注入点钢轨对排流网电压; I_0 为注入直流源电流; I_1 、 I_2 为测量段两端电流; L 为被测区间段长度。

图1 直流法测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the DC method measurement principle

由于现场测量所用便携式直流源容量较小,测量过程中常会发生无法准确计算出测量段两端电流 I_1 和 I_2 的情况,进而直接影响过渡电阻的测量结果。此外,测量前现场布线工作量大,需多名工作人员进行同步读数,整个测量过程步骤繁杂,测量结果也会因人工读数而产生误差^[9]。基于此,为简化过渡电阻的测量过程,提高测量精度,本文提出一种冲击电流法。

1.2 冲击电流法测量原理

可采用双指数函数表示冲击电流波形函数 $I(t)$, 则有:

$$I(t) = \frac{I_0}{\eta} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2)$$

式中:

I_0 ——冲击电流峰值;

t ——冲击电流释放后的时间变量;

α ——雷电流波头衰减系数, $\alpha = 1/\tau_2$, τ_2 为波尾时间常数;

β ——雷电流波尾衰减系数, $\beta = 1/\tau_1$, τ_1 为波头时间常数;

η ——波形修正系数。

冲击电流波形经 FFT(傅里叶变换), 可得到对应的频谱函数 $I(j\omega)$, 可以表示为:

$$I(j\omega) = \int_0^\infty \frac{I_0}{\eta} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) e^{-j\omega t} dt = \frac{I_0}{\eta} \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\alpha^2 + \omega^2} \right) + j \left(\frac{-\omega}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\omega}{\alpha^2 + \omega^2} \right) \right] \quad (3)$$

式中:

ω ——角频率。

冲击电流波形时域及频域图如图 2 所示。根据不同频段,FFT 变换后的波形可分为直流分量、低频分量和高频分量,基于不同频段内的波形在轨排结构上的传播特性,本文提出利用冲击电流测量轨排过渡电阻。由于冲击电流持续时间短、幅值大、等效频率高,对于地铁钢轨这样的长线型导体,通常将其等效为分布参数模型。冲击电流法测量原理示意图如图 3 所示。

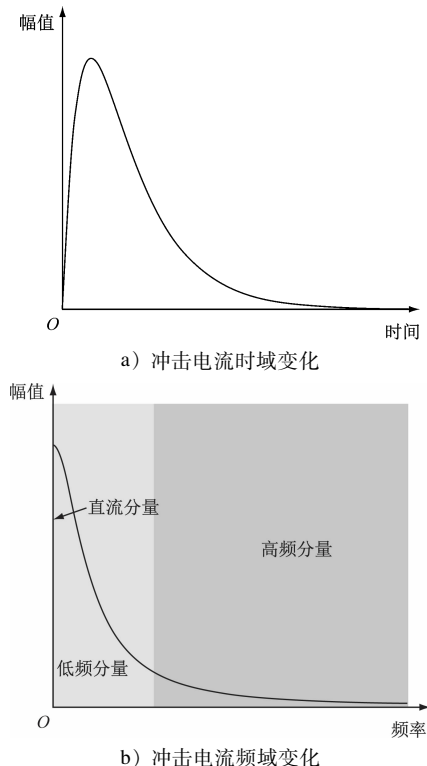


图 2 冲击电流波形时域及频域图

Fig. 2 Time-domain and frequency-domain diagrams of the impulse current waveform

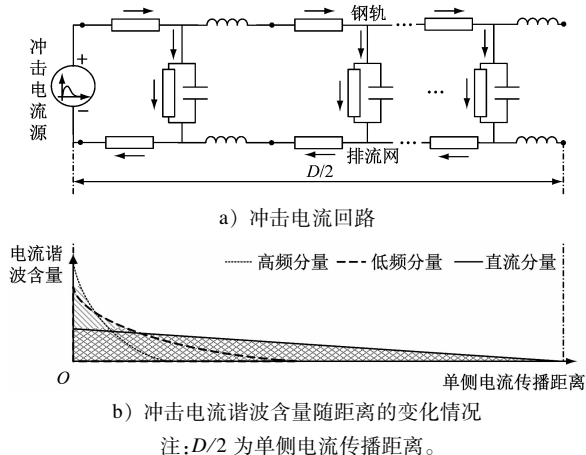


图 3 冲击电流法测量原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the impulse current method measurement principle

钢轨和排流网几何尺寸有所不同,等效后的纵向分布电阻和分布电感也各不相同。在注入冲击电流进行频域等效变换后,其高频分量经过钢轨对排流网电容快速泄漏,钢轨的电感效应也会大大缩短高频分量在钢轨上的传播距离;低频分量因其频率较低,所受钢轨电感效应较弱,传播距离比高频分量稍长;直流分量仅受钢轨纵向电阻和轨排电阻作用,传播距离最长,且呈线性下降。可利用上述冲击电流的传播特性,对冲击注入点的钢轨电压、电流响应波形进行 FFT,求取其中的直流分量,并进一步计算直流条件下的轨排过渡电阻。

将冲击电流发生器输出端的正极与钢轨相连,负极与排流网相连,多次注入冲击电流,通过高压探头和罗氏线圈测量冲击电流注入点的电压、电流响应,用示波器记录响应波形,同时沿隧道测量轨排电压 U_g 。考虑到钢轨电流的对称分散特性,当 U_g 下降到接近 0 时,记该处与电源距离为 $D/2$ 。冲击电流法测量流程图如图 4 所示。

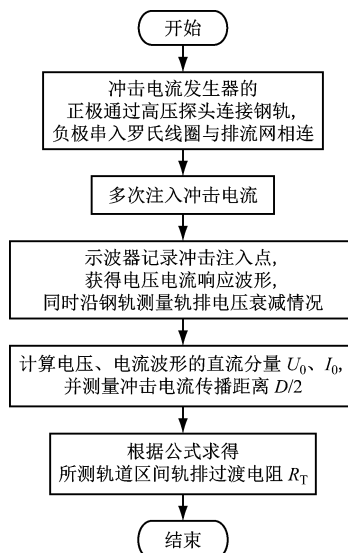


图 4 冲击电流法测量流程图

Fig. 4 Flow chart of impulse current measurement method

则该测量区间轨排过渡电阻 R_T 可以表示为^[9]:

$$R_T = \frac{DU_0}{1000I_0} \quad (4)$$

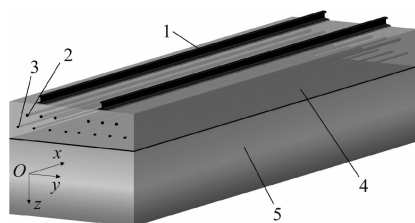
为了提高计算准确度,可多次测量计算 U_0 、 I_0 后取平均值。

2 轨排过渡电阻仿真建模

2.1 基于 CDEGS 软件的 3 层导体结构仿真模型

仿真模型采用传统轨道交通三层导体结构,轨

排过渡电阻仿真模型如图5所示。模型采用双层土壤结构,上层为0.6 m厚的混凝土,下层为无限厚度土壤。3层导体结构依次为钢轨、排流网和结构钢筋,由于CDEGS软件中无法设置不规则截面导体,所有导体均使用圆形金属长导体等效。钢轨与道床间均匀布置的绝缘垫片决定了过渡电阻的大小,模型中通过设置钢轨等效导体涂层代替绝缘垫片(见图6),可通过改变涂层电阻率来确定过渡电阻值。



注:1—钢轨;2—排流网;3—结构钢筋;4—混凝土层;5—土壤层。

图5 轨排过渡电阻仿真模型

Fig. 5 Simulation model of rail track transition resistance



注: r_1 为等效圆形导体半径; r_2 为添加涂层后的总半径。

图6 钢轨等效模型

Fig. 6 Equivalent model of steel rail

2.2 模型等效参数计算与设置

钢轨等效导体涂层电阻率是计算过渡电阻的关键参数,因此需要推导二者之间的关系^[10]。由文献[10]可知:

$$R_T = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (5)$$

式中:

ρ ——涂层电阻率;

l ——钢轨长度。

模型参数设置如表1所示。

3 仿真结果分析

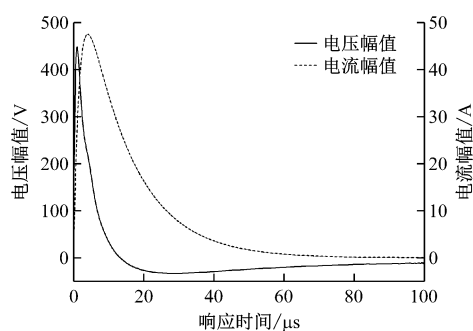
3.1 冲击电流法

模型中,钢轨长为10 km,1 km长的钢轨过渡电阻为20 Ω ,在中间点注入8/20 μs 冲击电流,幅值为50 A,持续时间为100 μs 。不同冲击电流传播距离下,钢轨电压及电流响应如图7所示。

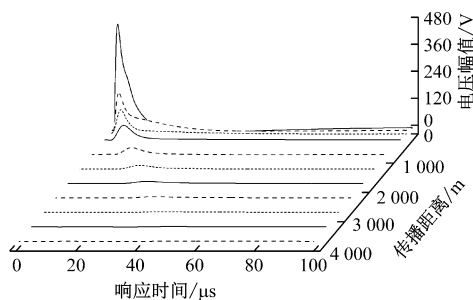
表1 模型参数设置

Tab. 1 Model parameter settings

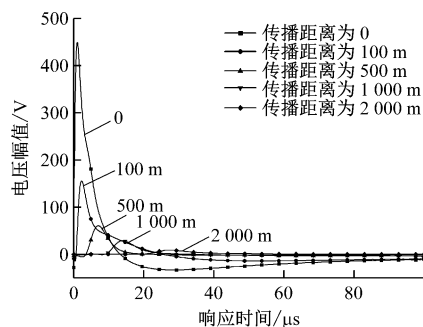
名称	参数	取值
钢轨	等效半径/cm	4.96
	相对电阻率	13
排流网	半径/mm	8
	相对电阻率	4
结构钢筋	半径/mm	5
	相对电阻率	6
绝缘层	电阻率	随过渡电阻设定值变化
	厚度/m	0.01
土壤	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	100
混凝土	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	2 000



a) 冲击注入点钢轨电压、电流仿真响应波形



b) 单侧钢轨电压响应三维视图



c) 钢轨电压响应

图7 不同冲击电流传播距离下的钢轨电压及电流响应
Fig. 7 Rail voltages and current responses under different propagation distances of impulse current

由图 7 a) 可知: 冲击注入点电压在 $2.5 \mu\text{s}$ 时达到最大值 450 V , 电流在 $8 \mu\text{s}$ 时达到最大值 48 A , 电压峰值响应时间超前于电流, 钢轨回路呈感性。由图 7 b) 可知: 随着冲击电流传播距离的增加, 钢轨电压响应幅值逐渐减小, 最终降为 0。由图 7 c) 可知: 距离冲击中心越远, 钢轨电压达到峰值所需时间越长, 具有明显的传播时差特性; 随着冲击电流传播距离的增加, 冲击电流的高频和低频分量快速泄漏, 电压波形陡度逐渐减小, 整个冲击波形变得平缓, 逐渐趋向于一条直线。

钢轨电压衰减趋势图如图 8 所示。冲击电流在单侧钢轨上的传播距离为 $2\,500 \text{ m}$, 电压响应幅值约为 0, 根据传播对称性可知, 此时的冲击电流波传播距离为 $5\,000 \text{ m}$ 。

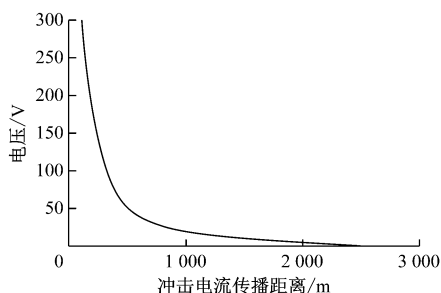


图 8 钢轨电压衰减趋势图

Fig. 8 Graph of the rail voltage decay trend

对图 7 a) 的冲击电流注入点钢轨电压、电流响应波形分别进行 FFT, 计算出的直流电压分量为 34.63 V , 直流电流分量为 8.54 A , 代入式 (4) 可以得到冲击电流作用下的等效直流 1 km 长的轨排过渡电阻为 20.265Ω , 与所设置的 20.000Ω 过渡电阻计算误差约为 1.33% 。

3.2 直流法与冲击电流法对比验证

在 CDEGS 软件的 HIFREQ 模块中, 建立结构模型, 将电源改为直流源, 根据直流法测量原理进行仿真试验。在不同钢轨等效导体涂层电阻率下, 分别施加直流和冲击电流进行仿真试验。冲击电流法与直流法仿真误差对比如图 9 所示。

由图 9 可知: 随着过渡电阻的增大, 采用直流法和冲击电流法分别计算得到的轨排过渡电阻误差均逐渐缩小, 且相互逼近。根据 CJJ/T 49—2020《地铁杂散电流腐蚀防护技术标准》中的规定, 新建线路 1 km 长的过渡电阻值需大于 15Ω , 已运行线路 1 km 长的过渡电阻值不小于 3Ω 。当 1 km 长的

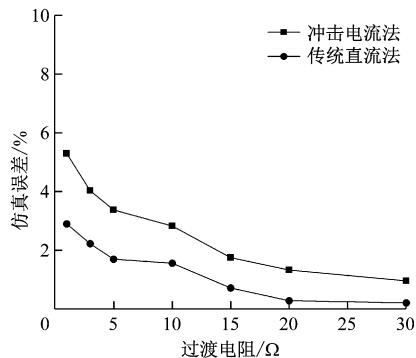


图 9 冲击电流法与直流法仿真误差对比

Fig. 9 Comparison of simulation errors between impulse current method and DC method

过渡电阻大于 3Ω 时, 冲击电流法测量误差在 5% 以内, 其测量结果与直流法测量结果相近, 证明了所提冲击电流法的可行性。

4 冲击电流法测量轨排过渡电阻试验验证

以上海轨道交通某线路为例, 验证所提冲击电流法测量轨排过渡电阻的可行性。冲击注入点的钢轨电压及电流实测响应波形如图 10 所示。

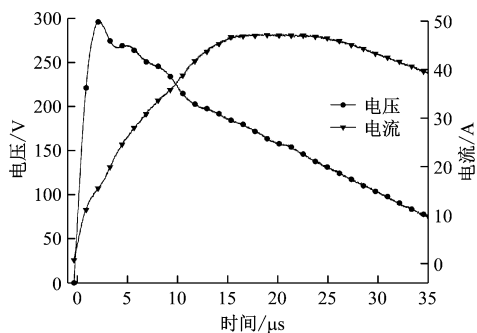


图 10 冲击注入点钢轨电压及电流实测响应波形

Fig. 10 Measured voltage and current response waveforms at the impulse injection point on the steel rail

对图 10 所示的电压、电流实测响应波形进行频域分解, 可以获得直流电压分量为 34.63 V , 直流电流分量为 16.52 A 。沿钢轨多次测量相同冲击下的电压响应幅值, 并记录测量点与电源之间的距离, 并将得到的单侧轨电位数据进行拟合, 结果如图 11 所示。由图 11 可知: 冲击电流在钢轨上的传播距离为 $4\,600 \text{ m}$ 。

经式 (4) 计算可知, 该区间 1 km 长的轨排过渡电阻为 19.29Ω , 其与地铁方提供的直流法测量值 19.54Ω 相差 0.25Ω , 误差约为 1.3% 。经过多次测量计算, 误差均在 1.3% 左右。

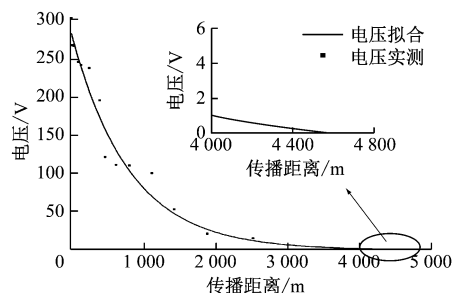


图 11 钢轨电压与冲击电流传播距离的拟合关系曲线

Fig. 11 Fitting relationship curve between rail voltage and the impulse current propagation distance

5 结语

本文介绍了地铁杂散电流的产生机理及危害,分析了杂散电流与轨排过渡电阻之间的关系,阐述了传统直流法测量轨排过渡电阻的过程。为了解决直流法测量中遇到的现场布线复杂、人员要求较多、纵向电流难以测量、结果误差较大等问题,本文基于冲击电流在轨排结构中的传播规律与特性,提出一种新型轨排过渡电阻测量方法。本文初步分析了冲击电流不同频域段波形在轨排结构上的传播扩散规律,提出了考虑排流网纵向电感、电阻的分布参数模型。施加冲击电流后,基于 FFT 求取钢轨冲击响应的直流分量,进而计算直流分量下的轨排过渡电阻。最后以上海轨道交通某线路为例,验证了所提方法的可行性。主要获得以下结论:

1) 在杂散电流防护标准规定的 1 km 长的轨排过渡电阻值 3 ~ 30 Ω 内,随着轨排过渡电阻的增大,采用冲击电流法的测量误差逐渐减小,并保持在 5% 以内。

2) 冲击电流法对现场环境和测量对象要求较低、外部接线较简单、可操作性高、抗干扰能力强,经过多次现场测量计算,基于冲击电流法测量轨排过渡电阻误差约为 1.3%。

参考文献

- [1] 曹晓斌, 沈豪, 陈友, 等. 轨地过渡电阻对钢轨互阻抗频谱特性的影响研究[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 135.
CAO Xiaobin, SHEN Hao, CHEN You, et al. Research on the influence of rail to ground transition resistance on rail mutual impedance frequency characteristics[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 135.
- [2] 林炎华. 地铁牵引供电回路动态杂散电流研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
LIN Yanhua. Study on dynamic stray current of subway traction

power supply circuit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

- [3] 朱峰, 李嘉成, 曾海波, 等. 城市轨道交通轨地过渡电阻对杂散电流分布特性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2738.
ZHU Feng, LI Jiacheng, ZENG Haibo, et al. Influence of rail-to-ground resistance of urban transit systems on distribution characteristics of stray current[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2738.
- [4] CHARALAMBOUS C A. Comprehensive modeling to allow informed calculation of DC traction systems' stray current levels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(11): 9667.
- [5] 蔡力, 王建国, 樊亚东, 等. 地铁走行轨对地过渡电阻杂散电流分布的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3604.
CAI Li, WANG Jianguo, FAN Yadong, et al. Influence of the track-to-earth resistance of subway on stray current distribution[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3604.
- [6] 卢昱瑾. 地铁轨地过渡电阻测试技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
LU Yujin. Research on testing technology of ground transition resistance of ground rail[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [7] 胡传, 毕林. 地铁轨道系统电阻对杂散电流的影响分析[J]. 现代城市轨道交通, 2018(10): 47.
HU Chuan, BI Lin. Analysis of impact of metro track system resistance on stray current[J]. Modern Urban Transit, 2018(10): 47.
- [8] 关卓然. 天津地铁典型线路区段动态杂散电流分布与抑制方案研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
GUAN Zhuoran. Study on dynamic stray current distribution and suppression scheme in typical line sections of Tianjin subway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [9] 孟昭亮, 董志伟, 杨媛, 等. 基于分布式传感器的地铁过渡电阻测量方法[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(2): 128.
MENG Zhaoliang, DONG Zhiwei, YANG Yuan, et al. Distributed sensor-based transition resistance measurement method for subway[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(2): 128.
- [10] 沈豪. 地铁钢轨互阻抗频谱特性及其在过渡电阻检测中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
SHEN Hao. Study on spectral characteristics of mutual impedance of subway rail and its application in transition resistance detection[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

• 收稿日期:2023-04-03 修回日期:2023-05-03 出版日期:2025-05-10
Received:2023-04-03 Revised:2023-05-03 Published:2025-05-10
• 通信作者:李诗晨,工程师,994402637@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