

# 城市轨道交通杂散电流在线监测与分析

杨国庆 马学慧

(天津城建大学控制与机械工程学院, 300384, 天津)

**摘要** [目的]为保障城市轨道交通附近埋地燃气管网的安全运行,减少城市轨道交通杂散电流对燃气管网的电化学腐蚀,需对城市轨道交通杂散电流进行在线监测与分析。[方法]获取天津某城市轨道交通区段附近埋地燃气钢质管道上设置的4个监测点的实时连续管地电位数据,并对其进行了时频域联合分析。建立了连续小波变换模型,并进行了小波功率谱分析。利用小波相干性分析,对管地电位信号间的相干程度及相位关系进行了研究。[结果及结论]城市轨道交通杂散电流干扰下管地电位信号是一种典型的非平稳信号,且存在一定的周期性波动规律;管地电位信号周期性波动强度随干扰源距离减小呈非线性增强,且周期性变化的管地电位波形整体呈类山峰状抛物线形,其中管地电位在64~128 min时段内变化最为明显;城市轨道交通运行时信号间的相干性强度表现出明显的差异,且强相关性仅在某些时段出现,同时信号间相位的超前或滞后角度与城市轨道交通列车运行间隔相对应。

**关键词** 城市轨道交通;杂散电流;在线监测

**中图分类号** U231.8

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.08.014

## On-line Monitoring and Analysis of Urban Rail Transit Stray Current

YANG Guoqing, MA Xuehui

(School of Control and Mechanical Engineering, Tianjin Chengjian University, 300384, Tianjin, China)

**Abstract** [Objective] To ensure the safe operation of underground gas pipeline network near URT (urban rail transit) and to mitigate the electrochemical corrosion on the gas pipeline network caused by URT stray current, it is necessary to conduct online monitoring and analysis of URT stray current.

[Method] Real-time continuous pipe-ground potential data from four monitoring points set up on underground gas steel pipelines near a section of Tianjin URT are obtained. A combined time-frequency domain analysis is conducted on this data. A continuous wavelet transform model is established, and a wavelet power spectrum analysis is performed. Wavelet coherence analysis is utilized to study the coherence degree and phase relationship between pipe-ground potential signals. [Result & Conclusion] The pipe-ground potential signals under

the interference of URT stray current are a typical non-stationary signal, with certain pattern of periodic fluctuations. The intensity of these periodic fluctuations increases non-linearly as the distance to the interference source decreases. The periodically changing pipe-ground potential presents an overall waveform of a mountain-shape parabolic curve, peaking most noticeably within the 64-128 minute range. During URT operation, the coherence intensity between signals shows significant variability, with strong coherence only appearing at some intervals. Additionally, the leading or lagging angles of the inter-signal phase correspond to the operation intervals of URT trains.

**Key words** urban rail transit; stray current; on-line monitoring

我国城市轨道交通通常采用750 V和1 500 V两种直流电压等级供电。城市轨道交通列车运行过程中产生的杂散电流会引起管道与土壤之间的电位升高<sup>[1-3]</sup>,同时因列车往返运行使得杂散电流的大小和方向不断变换,导致现有的杂散电流模型与列车实际运行数据匹配度低,给杂散电流变化规律的分析带来了诸多困难<sup>[4]</sup>。为此,实现杂散电流数据的实时在线采集,并对此数据进行深入分析,进而依据分析结果建立与列车实际运行数据匹配度较高的杂散电流模型具有重要的现实意义。

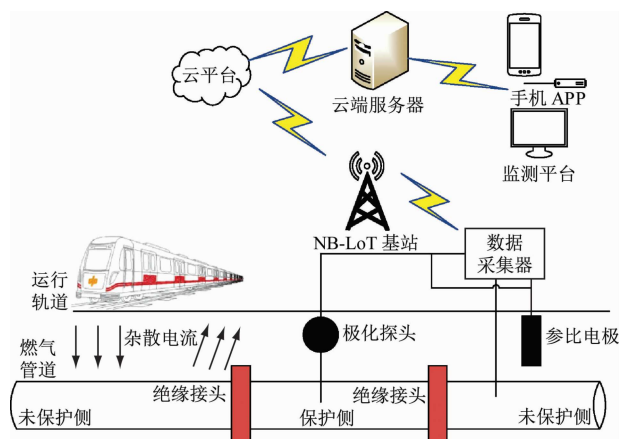
目前,对城市轨道交通杂散电流的检测大多采用传统的检测方式,而在对数据的分析上仅仅涉及到波动幅值分析以及管地电位数理统计分析等内容<sup>[5-8]</sup>,并未涉及对杂散电流时间序列的周期波动特征及其强度的分析,同时缺乏对不同监测点管地电位的相干性和相位关系的研究。为实现杂散电流的实时在线监测,本文设计了以STM32F103型嵌入式单片机为核心,基于窄带物联网的广覆盖低功耗的城市轨道交通杂散电流监测系统,对天津某城市轨道交通区段附近埋地燃气钢质管道的杂散电流进行了检测。采用CWT(连续小波变换)对数据进行小波功率谱分析,得到杂散电流时间序列的周

期波动特征及其强度大小;采用小波相干性分析得到不同位置管地电位信号的相干程度及相位关系。

## 1 杂散电流监测设计与结果分析

### 1.1 杂散电流监测设计

杂散电流测试按照 DG/TJ 08-2302—2019《埋地钢质燃气管道杂散电流干扰评定与防护标准》规定的相关准则进行。城市轨道交通杂散电流监测系统设置每间隔 1 s 采集 1 组数据。杂散电流的动态监测系统整体架构及数据采集器连线示意如图 1 所示。



注:NB-LoT 为窄带物联网。

图 1 杂散电流监测系统整体架构及数据采集器连线示意图  
Fig. 1 Diagram of stray current monitoring system overall architecture and data acquisition device wiring

在该城市轨道交通区段埋地燃气钢质管道上设置 4 个监测点,具体位置布局如图 2 所示。其中:3<sup>#</sup>监测点所在管道段与运行轨道平行,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>监

测点所在管道段与运行轨道垂直。

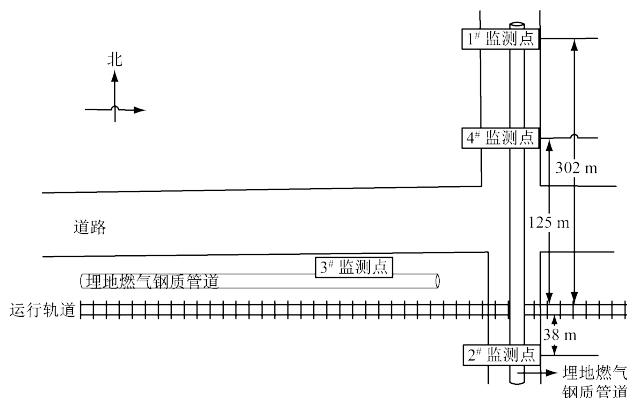


图 2 监测点位置布局图

Fig. 2 Layout diagram of monitoring point position

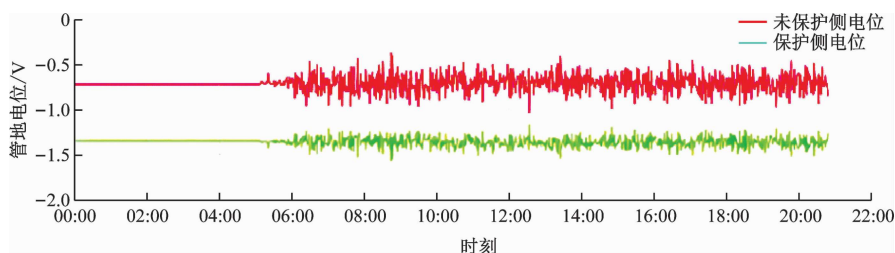
### 1.2 杂散电流监测结果分析

对埋地燃气钢质管道的 4 个监测点同时进行连续 24 h 的管地电位时间序列数据监测,结果如图 3 所示。

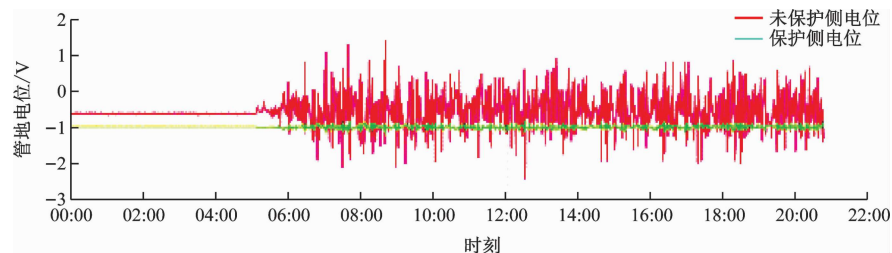
从图 3 可以看出:

1) 埋地燃气钢质管道不同位置的管地电位均存在周期性波动规律且变化趋势上存在相似性,监测点管地电位曲线在不同时段会出现峰值不同的波峰。埋地燃气钢质管道管地电位波峰产生时刻为城市轨道交通通过监测位置时刻。埋地燃气钢制管道监测点连续 24 h 管地电位统计如表 1 所示。

2) 管地电位波动幅度的大小与城市轨道交通的运行时间(06:00—23:30)呈现出一致性,当城市轨道交通停运时(23:30—06:00),管地电位呈现平稳的特征。从城市轨道交通运行情况和管地电位



a) 1<sup>#</sup>监测点



b) 2<sup>#</sup>监测点

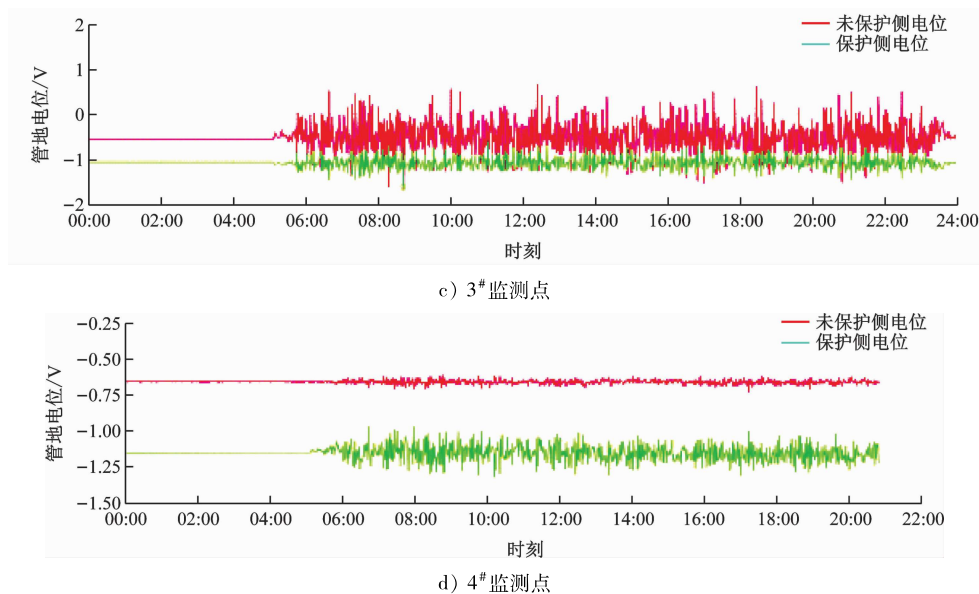


图 3 埋地燃气钢质管道监测点-时间关系曲线

Fig. 3 Relation curve of monitoring points and time of buried gas steel pipelines

表 1 埋地燃气钢制管道监测点连续 24 h 管地电位统计

Tab. 1 Statistics of continuous 24-hour pipe-ground potential of buried gas steel pipelines measuring points

监测点	未保护侧管地电位/V			
	最小值	最大值	平均值	波动幅度
1# 监测点	-1.037 0	-0.370 6	-0.709 9	-0.666 4
2# 监测点	-2.427 3	1.377 3	-0.563 0	3.804 6
3# 监测点	-1.836 5	1.093 0	-0.536 0	-2.929 5
4# 监测点	-0.723 3	-0.611 5	-0.650 5	0.111 8

波动曲线分析可知,城市轨道交通杂散电流干扰下管地电位信号中有一些规则和 irregular 的动态波动,且管地电位存在一定的周期性波动规律,是一种典型的非平稳信号。

## 2 管地电位分析原理

对于非平稳信号,傅里叶变换理论存在明显不足,本文选择采用 CWT 以克服傅里叶变换理论的局限性。

### 2.1 CWT 基本原理

CWT 的基本思想是将任意函数  $f(t)$  在 1 组小波基下展开,具体表达式为<sup>[9]</sup>:

$$W_f(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (1)$$

式中:

$W_f(\tau, s)$ ——函数序列  $f(t)$  的 CWT,  $s$  为尺度参数,  $\tau$  为平移参数;

$\psi^*(\cdot)$ ——小波变换的基函数的共轭复数;

$t$ ——时间。

小波功率谱  $P_f(\tau, s)$  的表达式定义为小波变换模的平方:

$$P_f(\tau, s) = |W_f(\tau, s)|^2 \quad (2)$$

根据管地电位波形实际监测结果,选用 Morlet 基函数  $\psi(t)$  用作管地电位波形信号 CWT 的基函数<sup>[10]</sup>,其表达式如下:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \exp(-i\omega_0 t) \quad (3)$$

式中

$\pi^{-1/4}$ ——量纲一化因子;

$\omega_0$ ——量纲为一的频率参数;

$i$ ——虚数单位。

在实践中,当  $\omega_0 \gg 0$  时,误差最小。

### 2.2 小波相干分析

小波相干分析,通常反映任意两个时变序列  $x(t)$  和  $y(t)$  之间周期性变化趋势的一致性,表示两个时变序列的局部相关密切程度<sup>[11]</sup>。公共频谱功率为:

$$P_{xy}(\tau, s) = W_x(\tau, s) W_y^*(\tau, s) \quad (4)$$

式中:

$P_{xy}(\tau, s)$ ——信号  $x(t)$  和  $y(t)$  的公共频谱功率;

$W_x(\tau, s)$ ——信号  $x(t)$  的 CWT;

$W_y^*(\tau, s)$ —— $W_y(\tau, s)$  的共轭复数。

两个时变序列  $x(t)$  和  $y(t)$  之间相干性的计算结果,即  $|W_{xy}(\tau, s)|$  的大小在公共频谱功率图中表示,其取值范围从 0 到 1,取值越大,一致性越高。公共频谱功率图中:白色表示高公共频谱功率,即信号之间有着高相干性;黑色表示低公共频谱功率,即信号之间的相干性较低。

### 2.3 相位分析

相位谱反映了两个时变序列之间的超前和滞后,相位角揭示了两个序列的相关方向。对于给定的标度和时间,两个序列的相位角  $\phi_{xy}$  表示如下:

$$\phi_{xy} = \arctan \left( \frac{\text{Im}(P_{xy}(\tau, s))}{\text{Re}(P_{xy}(\tau, s))} \right) \quad (5)$$

式中:

$\text{Re}(P_{xy}(\tau, s))$ ——复变函数  $P_{xy}(\tau, s)$  的实部;

$\text{Im}(P_{xy}(\tau, s))$ ——复变函数  $P_{xy}(\tau, s)$  的虚部。

其中:相位角  $0^\circ$  表示两个序列同相,在小波相

干谱图上箭头水平向右,意味着两者具有高相干性;相位角  $180^\circ$  表示两个序列反相,在小波相干谱图上箭头水平向左;而相位角  $90^\circ$  和  $270^\circ$  在小波相干谱图上箭头分别垂直向下和垂直向上。

## 3 管地电位分析

### 3.1 连续小波功率谱分析

采用式(1)对管地电位信号进行 CWT 分析,明确了城市轨道交通杂散电流动态干扰下管地电位的变化,揭示了管地电位周期性波动规律。连续小波功率谱云图如图 4 所示。图 4 中:粗黑色轮廓线包围的黑色区域代表 5% 的统计显著性区域;圆锥形区域表示 95% 的置信区间,即 95% 置信水平;该界线以外的区域因受到边缘效应的影响通常忽略不计。

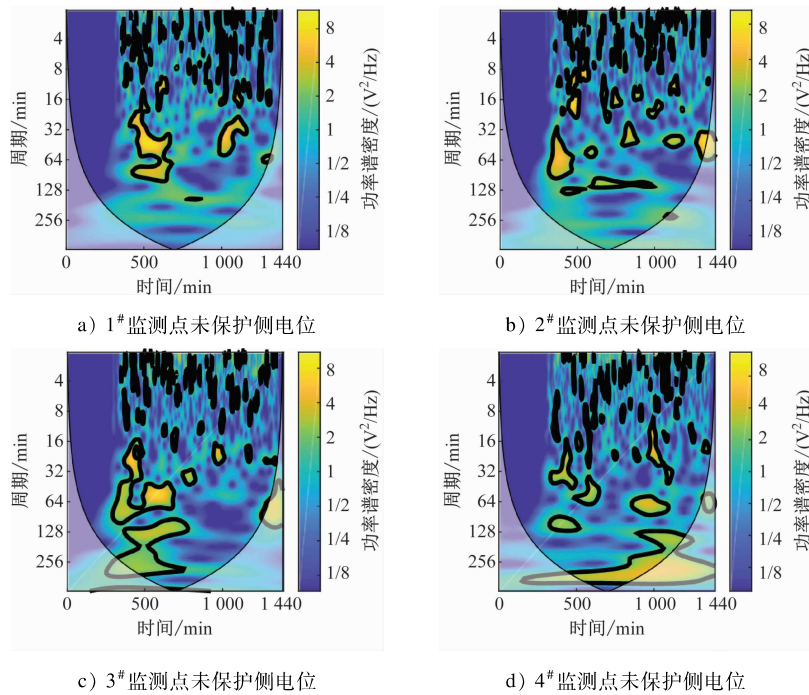


图 4 连续小波功率谱云图

Fig.4 Nephogram of continuous wavelet power spectrum

由图 4 可见:随着动态干扰源距离的减小,动态干扰周期也越来越明显,管地电位数据在 64 ~ 128 min 时段内变化较为明显,说明管地电位周期性变化幅度和干扰源的距离具有很大相关性。

### 3.2 小波相干谱分析

采用式(4)一式(5)对不同位置处管地电位信号间的局部相关密切程度,以及相位间的超前滞后

关系进行分析,得到两个序列间的公共频谱功率,显示在小波相干谱上。管地电位小波相干谱云图如图 5 所示。

图 5 中:粗黑色轮廓线包围的黑色区域表示 5% 显著性水平,圆锥形区域为影响锥(影响锥以外的小波系数受到边缘效应的影响通常忽略不计);箭头表示两个序列的相干类型,箭头水平向右(相



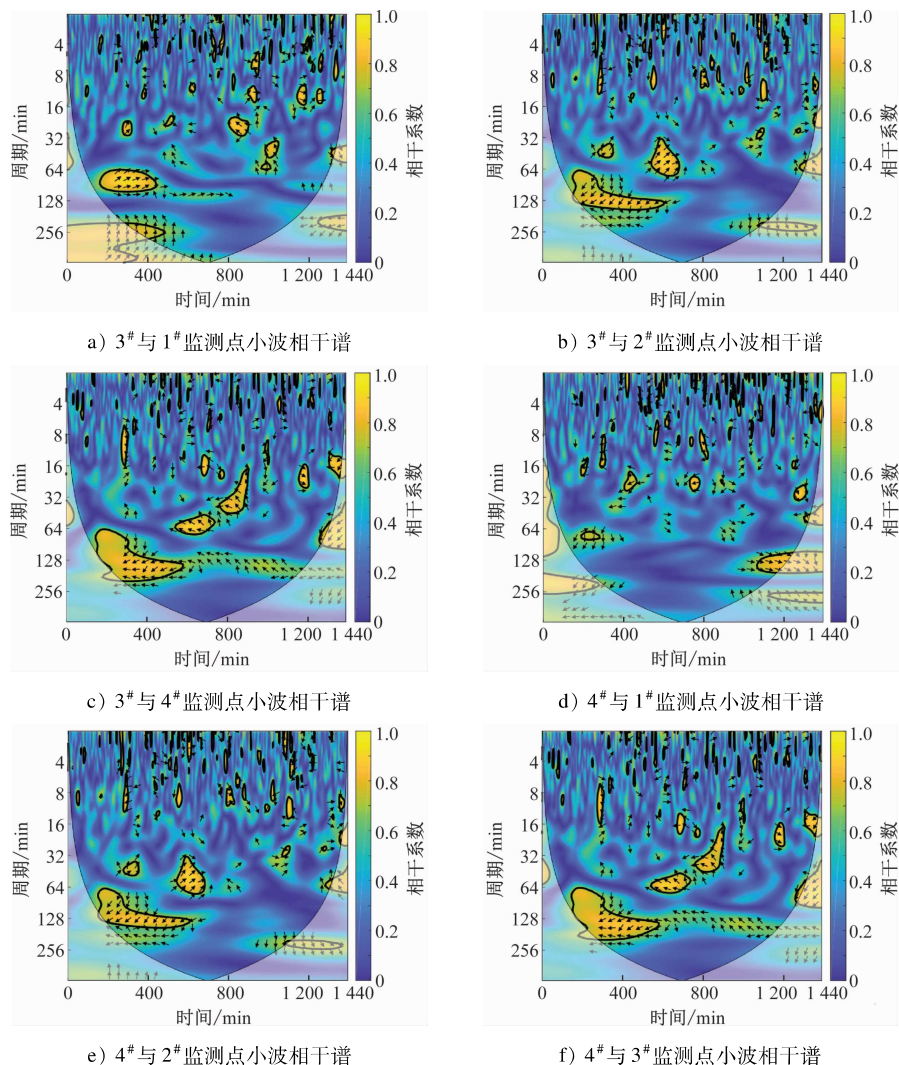


图 5 管地电位小波相干谱云图

Fig. 5 Nephogram of pipe-ground potential wavelet coherence spectrum

位角为 $0^\circ$ )表示两者同向,箭头水平向左(相位角为 $180^\circ$ )表示两者反向,当前者超前 $90^\circ$ 时,箭头垂直向上,当前者滞后 $90^\circ$ 时,箭头垂直向下。

图 5 a)显示了在周期区间的 $64 \sim 128$  min内,3<sup>#</sup>和1<sup>#</sup>监测点的管地电位信号表现出较强的相干性,且3<sup>#</sup>监测点信号超前1<sup>#</sup>监测点信号 $315^\circ$ ,即周期的 $7/8$ 。由图 5 b)可以看出:几乎在整个时间范围内,3<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>监测点的信号呈现出强相干性,两者相位在周期区间的 $64 \sim 128$  min内同相,表明3<sup>#</sup>与2<sup>#</sup>监测点的杂散电流信号在该时段内变化是一致的。图 5 c)中,3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>监测点的信号相干性较弱,且相位角呈 $180^\circ$ ,意味着这两个监测点位置所受干扰源的性质不同。由图 5 d)可以看出:4<sup>#</sup>和1<sup>#</sup>监测点管地电位信号不具有显著相干性,且4<sup>#</sup>监测点信号滞后于1<sup>#</sup>监测点信号 $90^\circ$ 。图 5 e)表明:在周期区间

的 $64 \sim 128$  min内4<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>监测点呈现出较强的相干性,相位角为 $135^\circ$ ,即4<sup>#</sup>监测点信号滞后2<sup>#</sup>监测点信号 $3/8$ 个周期。图 5 f)表明:4<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>监测点信号在 $64 \sim 128$  min时段内存在显著的相干区域,箭头方向指向了第三象限,近似于反相,表明4<sup>#</sup>监测点位置处信号与3<sup>#</sup>监测点位置处信号变化相反。

#### 4 结语

本文通过对杂散电流数据的实时在线连续监测采集,利用CWT理论和小波相干性对管地电位数据进行了深入分析,明确了城市轨道交通杂散电流动态干扰下管地电位的变化,揭示了管地电位周期波动规律,同时得到了不同位置处管地电位信号的相干程度及相位关系。研究结果表明,随着干扰源距离的减小,管地电位信号周期性变化越来越明

显,且周期性变化的波形整体呈现类山峰状抛物线形,其中管地电位数据在 64 ~ 128 min 时段内变化最为明显。城市轨道交通运行时信号间的相干性强度不同,且表现出的强相干性仅在某些时段出现,同时信号间相位的超前或滞后角度与城市轨道交通列车运行间隔相对应。研究成果可为城市轨道交通杂散电流基于时间序列的动态变化规律研究提供理论基础,并为钢制燃气管道的科学防护和杂散电流的治理提供理论依据。

## 参考文献

- [1] 殷爽. 城市轨道交通车辆段杂散电流分布及监测系统设计[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(7): 62.  
YIN Shuang. Distribution of stray current in urban rail transit depot and the monitoring system design[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(7): 62.
- [2] 朱振, 向敏, 陈啟斌, 等. 天然气管道受强烈地铁杂散电流干扰案例分析[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(8): 69.  
ZHU Zhen, XIANG Min, CHEN Qibin, et al. Case analysis of natural gas pipeline interfered by strong subway stray current[J]. Corrosion & Protection, 2021, 42(8): 69.
- [3] 郭勇, 丁继峰, 王港, 等. 埋地管道地铁直流杂散电流检测与防护的研究现状[J]. 材料保护, 2021, 54(7): 133.  
GUO Yong, DING Jifeng, WANG Gang, et al. Research status of detection and protection of subway DC stray current of buried steel pipelines[J]. Materials Protection, 2021, 54(7): 133.
- [4] AATIF S, HU H, RAFIQ F, et al. Analysis of rail potential and stray current in MVDC railway electrification system[J]. Railway Engineering Science, 2021, 29(4): 394.
- [5] 张恒, 彭瑞宁. 直流杂散电流干扰对管道直流电位的影响[J]. 电子技术, 2021, 50(4): 22.  
ZHANG Heng, PENG Ruining. Influence of DC stray current interference on DC potential of pipeline[J]. Electronic Technology, 2021, 50(4): 22.
- [6] 朱祥剑, 杜艳霞, 覃慧敏, 等. 地铁杂散电流干扰下埋地管道管地电位动态波动规律[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(12): 878.  
ZHU Xiangjian, DU Yanxia, QIN Huimin, et al. Dynamic fluctuation characteristics of pipe-to-soil potential on buried pipelines under interference of stray current from subway[J]. Corrosion & Protection, 2019, 40(12): 878.
- [7] 董亮, 姚知林, 葛彩刚, 等. 地铁杂散电流干扰下管地电位波动特征的傅里叶分析[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 294.  
DONG Liang, YAO Zhilin, GE Caigang, et al. Fourier analysis of the fluctuation characteristics of pipe-to-soil potential under metro stray current interference[J]. Surface Technology, 2021, 50(2): 294.
- [8] ORMELLESE M, BERETTA S, BRUGNETTI F, et al. Effects of non-stationary stray current on carbon steel buried pipelines under cathodic protection[J]. Construction and Building Materials, 2021, 281: 122645.
- [9] MUJEZINOVIC A, MARTINEZ S, KEKEZ K. Estimating harmful effect of dynamic stray currents on pipeline by simultaneous multiparametric field measurements, continuous wavelet cross-correlation analysis, and frequency plots[J]. Materials and Corrosion, 2019, 70(2): 357.
- [10] PATEL V K, SINGH S, SINGH V K. Numerical wavelets scheme to complex partial differential equation arising from Morlet continuous wavelet transform[J]. Numerical Methods for Partial Differential Equations, 2021, 37(2): 1163.
- [11] MUJEZINOVIC A, MARTINEZ S. Application of the continuous wavelet cross-correlation between pipe-to-soil potential and pipe-to-rail voltage influenced by dynamic stray current from DC train traction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 1015.
- 收稿日期:2022-03-01 修回日期:2022-05-16 出版日期:2024-08-10  
Received:2022-03-01 Revised:2022-05-16 Published:2024-08-10  
· 通信作者:杨国庆,副教授,tjcj2008@163.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

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com