DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2022.06.017

铁道电气化

轨道交通动态杂散电流干扰源定位方法及技术研究

顾承昱[1]，熊祥鸿[1]，苏　磊[1]，童贤亮[1]，李　峰[2]，洪子杰[2]

（1.国网上海市电力公司电力科学研究院，上海　200080；
2.上海电力大学 电气工程学院，上海　200090）

摘　要：随着我国电力建设的发展，地下杂散电流对电气设施和地埋管道等设备的危害已愈发不可忽视，对杂散电流的深入研究已经迫在眉睫。本文依据轨道交通直流牵引系统的牵引特性建立杂散电流源动态模型，并基于电磁波在大地的传播原理提出了一种地下杂散电流源的定位算法。通过搭建地铁杂散电流动态扩散仿真模型验证定位方法的正确性，并结合上海某地铁站实际案例，现场实测选取确定的轨道交通地理位置和地电位测量信息，考虑测量误差与周围环境影响等因素，采用杂散电流定位算法计算得到的坐标值与实际干扰源位置较为吻合，证明了该定位法可应用于工程实践的杂散电流干扰源定位研究上。

关键词：杂散电流；轨道交通；定位；仿真模型；牵引供电；城市轨道交通

中图分类号：U221　　**文献标识码：**A

文章编号：1000-128X(2022)06-0116-06

Research on the method and technology of locating dynamic stray current interference sources in rail transit

GU Chengyu[1], XIONG Xianghong[1], SU Lei[1], TONG Xianliang[1], LI Feng[2], HONG Zijie[2]

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200080, China;
2. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: With the development of the power facilities across China, the underground stray current becomes more and more non-negligible as a source of hazard to electrical facilities, buried pipelines and other equipment, so it is extremely urgent to carry out an in-depth study of stray current. In the current study, a dynamic model of stray current sources was established according to the traction characteristics of the DC traction system for rail transit, and an algorithm to position underground stray current sources was proposed based on the propagation law of electromagnetic wave on the ground. The positioning method was verified by building a simulation model of dynamic diffusion of stray current along metros, in combination with the case analysis at a metro station in Shanghai, in which some geographical locations were selected and ground potentials were measured on site. The calculated coordinates using the stray current positioning algorithm are almost coincident with the actual interference source positions, including the measurement errors and the influence of the surrounding environment, etc., which demonstrates the feasibility of this method in the research on positioning of stray current interference sources in engineering practice.

Keywords: stray current; rail transit; positioning; simulation model; traction power supply; urban rail transit

收稿日期：2022-09-14
基金项目：国家电网有限公司科技项目资助（B3094021000B）
通信作者：李　峰(1978—)，男，博士，讲师，硕士生导师，主要从事电力系统及建筑物防雷方面的研究；
E-mail: lifeng@shiep.edu.cn

0　引言

杂散电流主要由轨道交通电气化铁路、交直流高压输电线路、大容量电力电子设备接地泄漏造成。随着轨道交通网络的建设愈发复杂，频繁产生的各类动态杂散电流会严重影响电气设备的状态监测，对各类埋地金属结构产生电化学腐蚀，甚至干扰电网的正常运行，造成严重的经济损失[1-6]。

对轨道交通杂散电流的研究，目前大部分停留在静态条件下的定性分析和实测，文献[7]采用有限元分析地铁直流牵引供电系统的离散模型，提出降低杂散电流干扰的建设措施；文献[8]建立地铁单边供电模型，研究了不同土壤条件下杂散电流的静态分布规律；文献[9]讨论了轨道交通轨地过渡电阻不均匀分布对流入大地杂散电流分布特性的影响。实际上轨道交通系统产生的杂散电流会随着取流大小、牵引特性、机车位置等因素的变化而动态波动，因此考虑直流牵引系统的动态变化来建立相应的模型对评估杂散电流影响更具现实意义。文献[10]基于节点导纳网络方程提出了一种地铁直流牵引系统的实时动态数学建模方法；文献[11]根据地铁车辆位置与牵引负荷电流的变化建立CDEGS动态模拟分析，得到了地铁运行状态下排流网的杂散电流分布和泄漏电荷动态变化；文献[12]对直流牵引回流等效电路进行潮流计算，确定了多层土壤中地铁全线杂散电流随时间变化的波动特性；文献[13-14]在地铁动态运行的模型基础上，分别分析了杂散电流对电网变压器直流偏磁的影响和杂散电流在埋地金属管道中的动态分布，并通过现场试验测量验证了仿真模型的有效性。

目前国内对杂散电流源定位的研究形式为在受到杂散电流影响较大的区域大范围铺设测试桩，并对电位进行长时间的同步监测，确认干扰电流分布规律，比较各测试桩电位变化趋势，初步判断杂散电流泄漏严重的位置并增设排流装置[15-16]。同步检测法的经济成本和人力投资巨大，且受地理环境限制较大，很难应用于日常高频的维护和检测，对于愈发频繁和场景多样化的杂散电流干扰问题，需要更加经济便捷的解决方案。

本文基于杂散电流在大地的传播原理和轨道交通直流牵引系统的牵引特性，使用CDEGS软件建立地铁杂散电流动态扩散模型，提出一种针对瞬时地下杂散电流源的快速定位方法，并根据该定位方法开发相关技术装备，初步实现了对地下动态杂散电流源的快速定位。

1　定位原理及算法

1.1　杂散电流源动态模型

城市轨道交通运行中因对地绝缘件老化，易产生杂散电流，引起大地电位波动。地铁运行时的供电电流由牵引变电所提供，经钢轨回流，部分牵引电流因绝缘件老化经钢轨泄漏至地下产生瞬时性的杂散电流。以地铁直流牵引系统为例，地铁列车从启动到停止依次经过3种运动状态：牵引加速状态、匀速运行状态和制动减速状态。受到工作环境的影响，城区地铁的站间距离设置较短，地铁的最高时速和加速减速过程均有所限制。结合地铁运行时间、距离、速度数据和受流功率情况，以某地铁某两站间运行参数为例，可以计算出该段线路地铁运行从启动到停止的牵引电流波动特性如图1所示[17]。

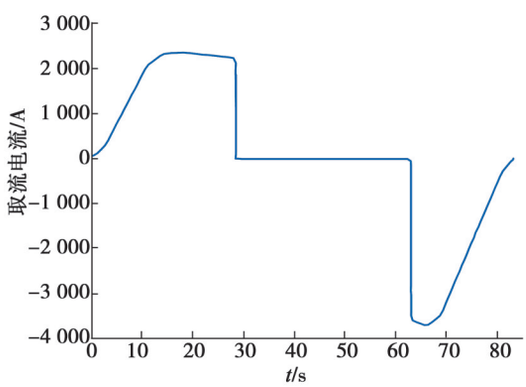


图1　地铁从启动到停止的牵引电流特性图

Fig. 1　Characteristic diagram of current from starting to stopping of a metro train

由图1可知，地铁在牵引加速和制动减速时，接触网或第三轨上流过的牵引电流会产生极大的波动；在地铁匀速运行时牵引电流几乎没有波动，仅维持较低的电流以克服列车总体阻力。在地铁运行过程中，杂散电流的泄漏主要发生在牵引和制动阶段，在地铁牵引和制动的过程中，随着牵引电流的迅速增大，杂散电流的泄漏量也急剧增加，与牵引电流呈现正相关。分析地铁牵引加速和制动减速阶段的牵引电流梯度变化，其牵引电流都是在快速上升后缓慢下降，与冲击电流波形相似。因此，选择冲击波形作为杂散电流源的动态模型进行仿真模拟，根据该路段地铁运行时取流变化特性确定所需要设置的杂散电流参数，设定的电流参数如表1所示，并模拟地下瞬时产生的杂散电流源，冲击波形如图2所示。

表1　杂散电流参数设置

Table 1　Stray current parameter setting

参数项目	参数值	
	牵引加速阶段	制动减速阶段
持续时间/s	25	20
上升时间/s	8.0	1.5
电流最大幅值/A	2 000	3 500
波尾时间/s	20	8
最大幅值的波尾/p.u.	0.8	0.5

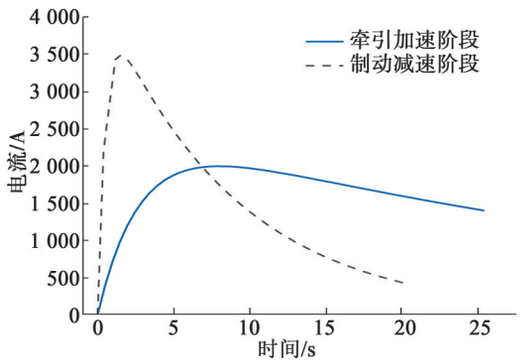


图2 冲击波形图

Fig. 2 Surge waveform

1.2 杂散电流干扰源定位方法

根据电磁波在大地中的传播原理，确定杂散电流在不同土壤条件下的传播速度，设置多个观测点记录地电位波形，通过各波形延迟便可以列写方程组求解杂散电流源位置。在进行地下干扰源定位的原理研究时，采用杂散电流定位法，在地表设置多个探测点记录地电位，假设冲击源S的坐标为（x，y，z），观测点序号分别为A_1~A_4，图3为最终确定的几何定位观测模型。

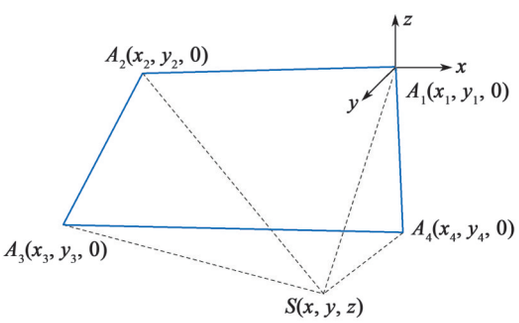


图3 地下杂散电流定位冲击点与观测点

Fig. 3 Locating impact point and observation point for underground stray current

设v为地下杂散电流产生的地电位信号在地下的传播速度，定义时间t_i为杂散电流从冲击源S到达地表电位观测点A_1~A_4的时间，则可以得出

$$t_i = t + \frac{\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}}{v} \tag{1}$$

取n个观测点就可以通过式(1)获得n个观测点杂散电流与注入点的数学逻辑表达式组，具体如下：

$$\left.\begin{aligned} t_1 &= t + \frac{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}}{v} \\ t_2 &= t + \frac{\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}}{v} \\ t_3 &= t + \frac{\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}}{v} \\ t_n &= t + \frac{\sqrt{(x-x_n)^2+(y-y_n)^2}}{v} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

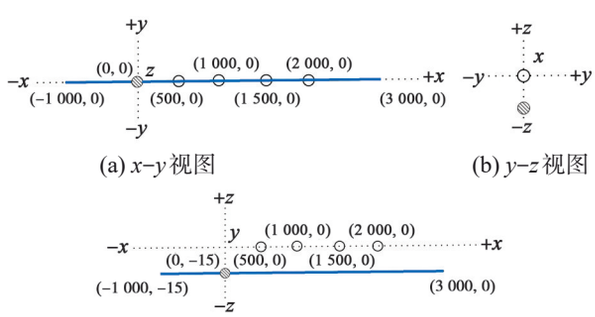
对式(2)进行消元处理，消除注入电流时间t，即可得到新的方程组如下：

$$\left.\begin{aligned} \sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2} - \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2} &= (t_1-t_2)\times v \\ \sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2} - \sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2} &= (t_1-t_3)\times v \\ \sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2} - \sqrt{(x-x_n)^2+(y-y_n)^2} &= (t_1-t_n)\times v \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

根据式(3)可知，在理论计算层面上，杂散电流干扰源定位法在确定地下杂散电流源位置时，需要至少4个不在同一直线上的观测点阵元。在试验条件允许的情况下，设置多个探测点能够减小试验误差，定位观测点的定位更精确。在定位地铁杂散电流源时，由于干扰源深度已知，布置的观测点间距离远大于干扰源深度，也可以将其视为地表干扰源，只设置3个观测点来确定干扰源的地表二维坐标，结合已知的干扰源深度确定干扰源位置，简化计算的同时并不会对定位结果的偏差造成严重影响。采用该方法研究地下杂散电流定位的优势在于试验阵列中观测点搭建设置简单、试验过程中系统比较稳定以及试验计算方便。

2 定位原理及算法

为验证杂散电流源定位方法的正确性，采用CDEGS搭建地铁杂散电流动态扩散模型，将机车等效为电流源，将钢轨等效为一根导体并增加涂层，选择钢轨某一位置去除涂层视为杂散电流泄漏源，钢轨长度为4 km，杂散电流泄漏点坐标为(0, 0, −15)。在现场定位所采集的数据主要是地表电位波动，因此在地表建立观测点，间隔500 m共设置观测点4个，仿真示意图如图4所示。



(a) x−y 视图　(b) y−z 视图

(c) x−z 视图

图4 仿真示意图

Fig. 4 Simulation diagram

机车电流源选择1.1节中地铁牵引加速阶段的冲击电流源作为仿真模型，结合上海某地铁相关资料并考察周边现场环境，建立地铁杂散电流动态扩散模型，其仿真参数如表2所示[18]。

在CDEGS软件中对杂散电流源冲击波形进行正向傅里叶变化计算，使得时域变为频域，分解为28个频率，再导入建立的杂散电流动态扩散模型激励多频率设置，并模拟计算每段频率下4个观测点的标量电势，

使用反向傅里叶变换功能将频域中标量电势等数值转化成时域计算结果，整理导出时域计算数据，绘出如图5所示的观测点波形图。

表2　地铁杂散电流动态扩散模型参数

Table 2　Parameters of dynamic diffusion model of stray current along metro

名称	参数	数值
钢轨	纵向电阻	0.04 Ω/km
	等效半径	0.049 65 m
绝缘涂层	电阻率	5.13×10^{13} Ω·m
	厚度	0.001 m
土壤	电阻率	130 Ω·m
	相对磁导率	1.0 p.u.
	相对介电常数	15 p.u.
空气	电阻率	1×10^{18} Ω·m
	相对磁导率	1.0 p.u.
	相对介电常数	1.0 p.u.

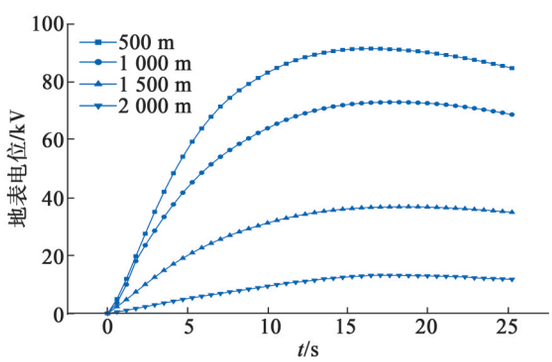


图5　观测点标量电势时域波形图

Fig. 5　Time-domain waveform of scalar potential at observation point

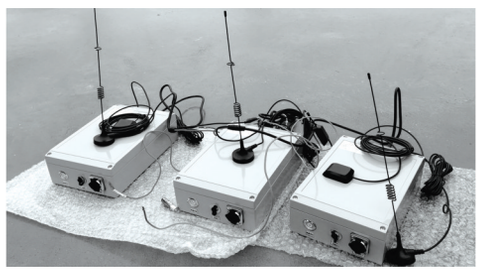
根据标量电势时域波形得到冲击源传播到达3个测点的时间t_i，参照波形特征选择冲击启动时间和波峰时间分别作为t_i代入式(3)求解，计算得到定位结果坐标，与仿真所设置的激励位置相吻合。

3　实测案例

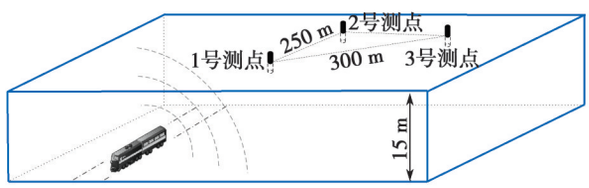
3.1　现场实测

在仿真结果成立的基础上，进行现场实测进一步验证杂散电流干扰源定位法的可行性。在上海市某地铁站周围选取合适的地理位置布置地电位探测点并提取土壤样本，对3处探测点的土壤样本进行电阻率试验测试，得到当地环境的土壤平均电阻率为130 Ω·m，通过查阅相关资料确定地铁深度为15 m，本节仿真中均采用实测数据确保其尽可能贴近实际环境。

参考国家标准GB/T 21246—2020，地表电位的探测工作采用硫酸铜电极作为地电位基准电极，接地棒作为测地电位观测点，使用地电波动态信号采集器连续采集地电位信号[19]。地电波探测设备和设置的测点位置如图6所示，自行研制的测量设备拥有很高的采样频率，可以对地电位的微小扰动进行快速响应。因地铁深度为15 m，远小于测点间布置距离，可以采用3测点定位干扰源。



(a) 地电波探测装置



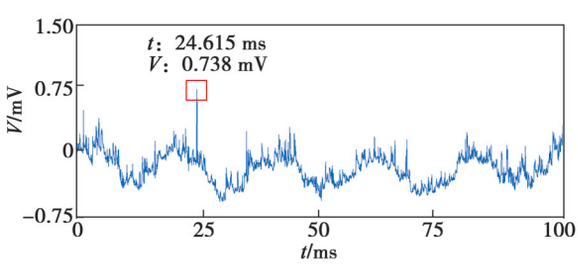
(b) 测点布置图

图6　地电位探测示意图

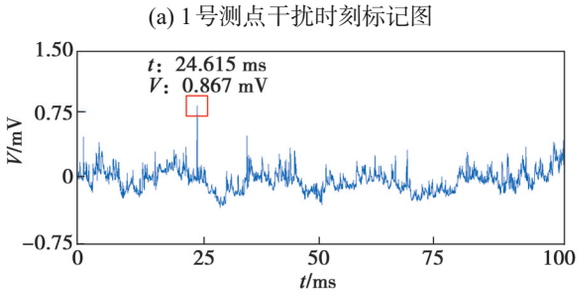
Fig. 6　Schematic diagram of ground potential measuring points

3.2　分析计算

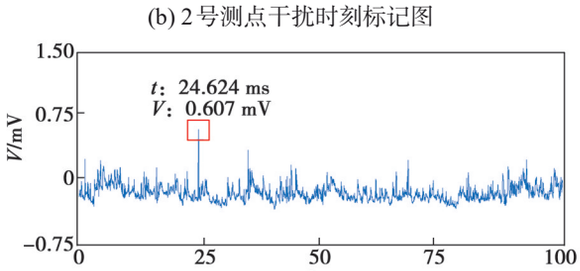
对某地铁站周围3个地电位观测点的数据进行实时采集，获得同一时间段内3个测点的地电位波形。初步分析该波形并取一个地电位波动最大的时刻，在该时刻各测点地电位波形如图7所示。



(a) 1号测点干扰时刻标记图



(b) 2号测点干扰时刻标记图



(c) 3号测点干扰时刻标记图

图7　3个测点干扰时刻标记图

Fig. 7　Interference time marked graph of three measuring point

根据图7可知受干扰时3个观测点的地电位波形存在明显时差。考虑到信号采集器到各测点的接线长度不同，排除电流在线路传播中的时间误差，得到干扰信号到达3个观测点的时间分别为T_1、T_2和T_3，3个观测点坐标分别为（X_1，Y_1）、（X_2，Y_2）和（X_3，Y_3），电磁波传播速度v_0为常量。以2号测点为坐标原点（0，0），1号测点指向2号测点方向为x轴正方向，偏东北方向为y轴正方向，建立平面直角坐标系。设干扰源位置为（$X_{地铁}$，$X_{地铁}$）为未知量，根据式(2)得出以下方程组：

$$\begin{cases}\sqrt{\left(X_{地铁}-X_1\right)^2+\left(Y_{地铁}-Y_1\right)^2}-\sqrt{\left(X_{地铁}-X_2\right)^2+\left(Y_{地铁}-Y_2\right)^2}=\\(T_1-T_2)\times v_0\\\sqrt{\left(X_{地铁}-X_1\right)^2+\left(Y_{地铁}-Y_1\right)^2}-\sqrt{\left(X_{地铁}-X_3\right)^2+\left(Y_{地铁}-Y_3\right)^2}=\\(T_1-T_3)\times v_0\\\sqrt{\left(X_{地铁}-X_2\right)^2+\left(Y_{地铁}-Y_2\right)^2}-\sqrt{\left(X_{地铁}-X_3\right)^2+\left(Y_{地铁}-Y_3\right)^2}=\\(T_2-T_3)\times v_0\end{cases} \tag{4}$$

其中只有干扰源位置（$X_{地铁}$，$Y_{地铁}$）为未知量，将式(4)中的3条双曲线利用MATLAB软件进行绘制，得出交点可视化位置以及准确的交点坐标，同时通过多点重复测量地电位幅值波动进行比较，得到较为准确的实际杂散电流泄漏源位置，将其与算法定位的干扰源位置相比较，结果如图8所示。

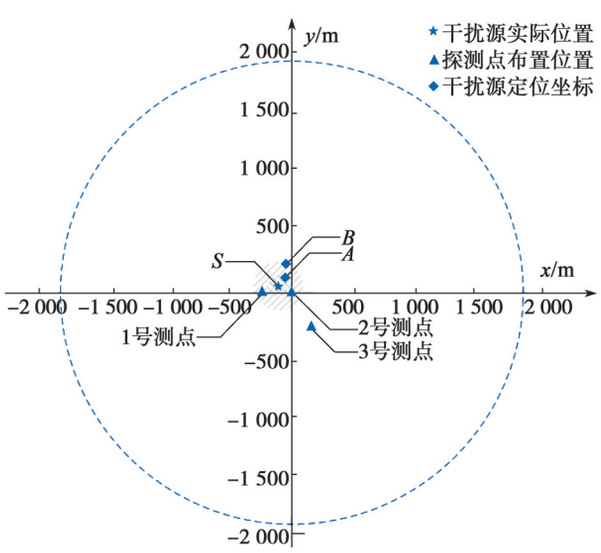


图8 地铁周围实测干扰源定位图

Fig. 8 Positioning of measured interference sources along metro

探测装置的定位半径为2 000 m，由式(4)所绘制的3个双曲线相交于两点，在图8中体现为点A（−64.72，95.73），点B（−36.61，187.6），实际干扰源点S的二维坐标为（−100，40）。干扰源S距离A点直线距离65 m，定位的误差范围为3.25%；距离B点直线距离160 m，定位的误差范围为8%，考虑测量误差与周围环境的影响，干扰源与定位结果基本吻合。测试结果表明该方法能够对地铁杂散电流干扰源进行较为准确的定位。

4 结论

本文首先介绍了杂散电流的产生机理，分析轨道交通直流牵引系统的取流特性，建立杂散电流源的动态模型。根据电磁波在大地中的传播规律，提出一种对杂散电流源的定位算法，最后通过仿真与实测对其进行验证得到以下结论：

①杂散电流在地铁牵引加速和制动减速过程中会出现与牵引电流正相关的显著波动，波形特征表现为冲击电流。

②以土壤中电流的传播特性为基础，可以通过比较观测点间地电位波动的时间差计算得到动态杂散电流源的发生位置。

③结合实际的地理位置，通过实测地铁轨道交通周围的大地电位，计算得出杂散电流干扰源位置，定位最大误差为8%，可应用于实际现场对杂散电流来源的判断。

参考文献：

[1] 朱士友, 阮白水, 全恒立, 等. 基于能馈式牵引供电装置的城市轨道交通无功补偿策略[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(2): 16-19.
ZHU Shiyou, RUAN Baishui, QUAN Hengli, et al. Study of urban rail reactive power compensation strategy based on energy-fed traction power supply equipment[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(2): 16-19.

[2] 李威. 地铁杂散电流的监测与防治[J]. 城市轨道交通研究, 2003, 6(4): 48-52.
LI Wei. The monitor and control system of stray current corrosion in metro[J]. Urban Mass Transit, 2003, 6(4): 48-52.

[3] 宋吟蔚, 王新华, 何仁洋, 等. 埋地钢质管道杂散电流腐蚀研究现状[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(8): 515-518.
SONG Yinwei, WANG Xinhua, HE Renyang, et al. Status in research on stray-current corrosion of buried steel pipelines[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(8): 515-518.

[4] 李琦, 黄华, 桂俊平, 等. 杂散电流干扰下变电站接地网保护研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(9): 182-186.
LI Qi, HUANG Hua, GUI Junping, et al. Study of substation ground grid protection under stray current interference [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(9): 182-186.

[5] 曹方圆, 白锋. 直流接地极电流干扰下埋地金属管道防护距离影响因素研究[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 136-143.
CAO Fangyuan, BAI Feng. Study on influencing factors on buried metal pipeline protective distance under DC grounding electrode interference[J]. High Voltage Apparatus, 2019,

55(5): 136-143.

[6] 罗远国, 刘君, 毛钧毅, 等. 轨地过渡电阻对电网地铁杂散电流分布影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(4): 32-40.
LUO Yuanguo, LIU Jun, MAO Junyi, et al. Analysis of the influence of rail-to-ground resistance on the stray current distribution in a power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(4): 32-40.

[7] 王崇林, 马草原, 王智, 等. 地铁直流牵引供电系统杂散电流分析[J]. 城市轨道交通研究, 2007(3): 51-53.
WANG Chonglin, MA Caoyuan, WANG Zhi, et al. Analysis of stray current in metro DC traction power system[J]. Urban Mass Transit, 2007(3): 51-53.

[8] 李亚宁, 李猛, 高晓红, 等. 基于CDEGS建模的城市轨道交通杂散电流仿真与实验验证[J]. 铁道学报, 2021, 43(12): 49-54.
LI Yaning, LI Meng, GAO Xiaohong, et al. Simulation and experimental verification of stray current in urban rail transit based on CDEGS modeling[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(12): 49-54.

[9] 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): 2738-2745.
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): 2738-2745.

[10] 陶艳. 地铁牵引供电系统自适应实时动态建模方法研究[J/OL]. 机车电传动: 1-8. (2022-08-26) [2022-08-28]. https://kns. cnki. net/kcms/detail/43.1125. U. 20220825.1735.001. html. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2022.04.104.
TAO Yan. Study on self-adaption real time dynamic modeling methods of metro tractive power supply system[J/OL]. Electric Drive for Locomotives: 1-8. (2022-08-26) [2022-08-28].https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1125.U.20220825.1735.001.html. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2022.04.104.

[11] 于凯. 基于CDEGS的地铁杂散电流仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
YU Kai. The simulation of metro stray current based on CDEGS[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[12] 刘炜, 尹乙臣, 潘卫国, 等. 直流动态杂散电流在分层介质中的扩散模型[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 4864-4873.
LIU Wei, YIN Yichen, PAN Weiguo, et al. Diffusion model of DC dynamic stray current in layered soil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(23): 4864-4873.

[13] 黄华, 陈璐, 吴天逸, 等. 城市轨道交通动态运行对交流电网变压器偏磁直流的影响[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4524-4533.
HUANG Hua, CHEN Lu, WU Tianyi, et al. Influence of dynamic operation of urban rail transit on DC magnetic bias of AC power grid transformer[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4524-4533.

[14] 黄晓鹏, 马庆安, 刘炜, 等. 城轨供电系统杂散电流对埋地金属管道的动态干扰研究[J/OL]. 铁道科学与工程学报: 1-11. (2022-06-16) [2022-07-29]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1423.U.20220616.1020.004.html. DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20220535.
HUANG Xiaopeng, MA Qingan, LIU Wei, et al. Study on the dynamic interference of stray current in urban traction power supply system on buried metal pipelines[J/OL]. Journal of Railway Science and Engineering: 1-11. (2022-06-16) [2022-07-29]. https://kns. cnki. net/kcms/detail/43.1423.U.20220616.1020.004.html. DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20220535.

[15] PENG Ping, ZENG Xiangjun, LENG Yang, et al. A new online monitoring method for stray current of DC metro system[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2020, 15(10): 1482-1492.

[16] 孟晓波, 张波, 廖永力, 等. 直流接地极入地电流对附近埋地管道电位的影响[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 6113-6121.
MENG Xiaobo, ZHANG Bo, LIAO Yongli, et al. Potential influence of ground return current from HVDC grounding electrode on buried pipeline[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 6113-6121.

[17] 蔡智超, 程浩, 林知明. 考虑地铁车辆牵引因素下杂散电流的规律研究[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(8): 82-88.
CAI Zhichao, CHENG Hao, LIN Zhiming. Study of stray current considering traction factors of rail vehicles[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(8): 82-88.

[18] 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. Research on dynamic stray current distribution and suppression schemes in typical section of Tianjin rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[19] 全国石油天然气标准化技术委员会(SAC/TC 355). 埋地钢质管道阴极保护参数测量方法: GB/T 21246—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
National Technical Committee for Oil and Gas Standardization (SAC/TC 355). Measurement method for cathodic protection parameters of buried steel pipelines: GB/T 21246—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.