

地铁杂散电流影响下的地表电位计算及 敏感性因素分析

李怀慎¹, 夏能弘¹, 张俊²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网浙江省电力有限公司嵊泗县供电公司, 浙江 舟山 202450)

摘要: 为研究地铁杂散电流对交流电网的侵入范围和程度, 根据实际运行下走行轨绝缘扣件的绝缘能力退化情况, 建立杂散电流数学模型, 推导得到每个轨枕泄漏的杂散电流。将地铁杂散电流离散为轨枕个数的有限点电流源, 利用复镜像法求解格林函数的理论方法, 建立地铁杂散电流引起地电位分布计算模型, 并通过基于边界元法的商用接地软件 CDEGS 验证所提方法的准确性。讨论杂散电流泄漏量和土壤结构此类传统敏感性因素对城轨沿线地电位分布的影响, 以及多线路交汇的交通枢纽地段多列车运行下的周围地电位波动情况。

关键词: 杂散电流; 地表电位; 敏感性因素

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.012 中图分类号: TM77 文章编号: 1673-9140(2023)02-0105-09

Calculation of surface potential and analysis of sensitivity factors under the influence of stray current in metro systems

LI Huaishen¹, XIA Nenghong¹, ZHANG Jun²

(1. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shengsi Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Zhoushan 202450, China)

Abstract: In order to study the intrusion range and degree of subway stray current into the AC power grid, a mathematical model of stray current which is based on the degradation of insulation performance of rail insulation fasteners under actual operation is established, and the stray current leakage of each sleeper is derived. The subway stray current is discretized into a finite point current source according to the number of sleepers, and the Green's function is solved based on the complex image method. The ground potential distribution calculation model caused by the subway stray current is also established, and the commercial grounding software CDEGS based on the boundary element is deployed to verify the method accuracy. The influence of traditional sensitive factors, such as stray current leakage and soil structure, on the ground potential distribution along the urban rail line and the surrounding ground potential fluctuations under the operation of multiple trains in a multi-line transportation hub area are discussed.

Key words: stray current; earth surface potential; sensitivity factors

城轨供电系统中走行轨兼作回流轨, 其本身具
有一定的电阻, 机车的电流在走行轨上形成电压

降。走行轨通过绝缘扣件与道床连接, 因实现不了
完全绝缘导致一部分电流流入大地, 这部分电流称

收稿日期: 2021-12-30; 修回日期: 2022-03-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51607110)

通信作者: 夏能弘(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事大规模复杂导体建模、地电流建模分析等研究; E-mail: xia_nh@shiep.edu.cn

为杂散电流^[1-3]。杂散电流除了会对土建结构钢筋、设备金属外壳及其他地下金属管线产生电化学腐蚀^[4-5],还可能造成周围变压器中性点偏移而出现直流偏磁现象^[6]。

目前地铁杂散电流在分布规律以及对于地下金属腐蚀的影响研究方面相对成熟,地铁杂散电流分布规律研究方法集中为电阻网络模型和CDEGS接地软件建模。文献[7-9]建立钢轨—埋地导体—大地三级电阻网络模型,推导得到各金属结构电流和电压;文献[10-11]在CDEGS软件建立地铁杂散电流模型,分析了轨地过渡电阻的变化对泄漏电流和金属电位的影响;文献[12-13]建立模型分析了杂散电流对周围埋地金属腐蚀的影响并提出相应防护意见;文献[14]建立地铁杂散电流动态干扰范围评估模型与比国标规定电位梯度阈值对比,为埋地管线选址和防护提供参考。

文献[15-18]通过监测变压器中性点电流,在长沙、深圳、福州等地分别出现了地铁杂散电流引起变压器直流偏磁现象;针对此现象,文献[19]提出采用电容隔直装置可抑制主变直流偏磁现象。上述研究均是从变压器直流偏磁监测和治理方面出发,缺乏地铁杂散电流侵入交流电网造成直流偏磁理论研究。由地表电位分布不均导致变压器直流偏磁问题的研究主要集中在高压直流输电领域^[20-22],缺乏地铁杂散电流引起的地电位分布不均从而侵入交流电网理论研究,因此,有必要建立地铁沿线的地电位分布的准确计算模型。

地电位分布的计算方法主要包含格林函数法和CDEGS软件仿真建模2种。CDEGS软件基于地铁单边供电模型进行仿真,软件仿真结果可以肯定地铁杂散电流对沿线地表电位存在影响这一现象,但无法具体的体现产生这一现象的原因。为了详细体现地铁杂散电流的泄漏方式、在土壤中的传播过程和造成地表电位分布不均原因及影响程度,本文根据地铁独特的回流方式,将每个轨枕等效为一个点电流源,基于复镜像法求解格林函数的基础理论方法建立地铁杂散电流引起地表电位分布的计算模型,并与商用接地软件CDEGS仿真结果对比验证其可靠性,推导得到不同线路分布及土壤结构下的地表电位分布,为交流电网和地铁设计、交流电网侵入直流防护提供理论依据。

1 地铁杂散电流解析计算

在城市轨道交通直流牵引供电系统中,实际轨道的铺设如图1所示,走行轨通过离散分布的绝缘扣件和轨枕与道床连接,与道床无直接接触,其中1个轨枕上有2个绝缘扣件,扣件充当固定和绝缘的作用,因此,地铁杂散电流主要通过走行轨和道床之间的绝缘扣件和轨枕从走行轨泄露至大地或从大地回流至走行轨。实际地铁在长期运行后除绝缘扣件的绝缘部件老化外,其表面还会形成水、灰尘和金属屑等污秽层,各组绝缘扣件对地电阻为 $10^3\sim 10^4\ \Omega$ 数量级^[23-24]。

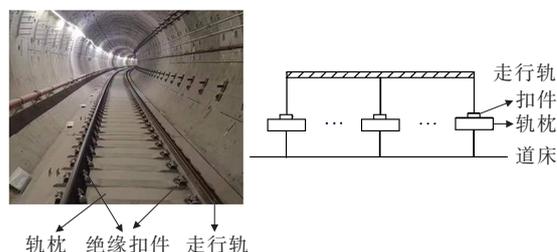


图1 钢轨设计铺设

Figure 1 Design and laying of rails

轨道交通模型参数如表1所示,单边供电系统如图2所示。本文采用基于绝缘扣件电阻的传统电阻网络模型计算杂散电流,由此得到每个轨枕的杂散电流泄漏量。

轨一地过渡电阻 $R_g(\Omega \cdot \text{km})$ 由绝缘扣件电阻和每千米内绝缘扣件数量确定:

$$R_g = \frac{R_c}{N} \quad (1)$$

式中, R_c 为绝缘扣件电阻, Ω ; N 为绝缘扣件数量。

表1 模型参数

Table 1 Model parameters

符号	物理意义	单位
S	机车距牵引变电所的距离	km
x	任意点与牵引变电所的距离	km
I	机车负荷电流	A
R_z	走行轨纵向电阻	Ω/km
R_c	单组绝缘扣件对地电阻	Ω
R_g	绝缘扣件对地电阻	$\Omega \cdot \text{km}$

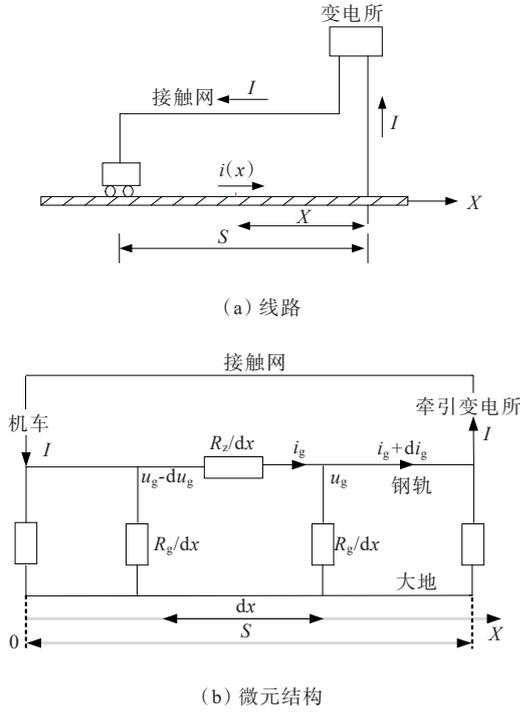


图 2 轨道交通单边供电系统

Figure 2 Rail transit power supply system

取微元 dx 部分,根据基尔霍夫电压、电流定律建立微分方程组:

$$\begin{cases} \frac{di_g(x)}{dx} = \frac{u_g(x)}{R_g} \\ \frac{du_g(x)}{dx} = i_g(x) \cdot R_z \end{cases} \quad (2)$$

解得

$$\begin{cases} i_g(x) = \frac{1}{\sqrt{R_z R_g}} (A_1 \text{sh } \alpha x + A_2 \text{ch } \alpha x) \\ u_g(x) = A_1 \text{ch } \alpha x + A_2 \text{sh } \alpha x \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\alpha = \sqrt{R_z/R_g}$

由理想边界条件 $i_g(0) = I, i_g(S) = I$ 求得系数:

$$\begin{cases} A_1 = -\sqrt{R_z R_g} \cdot I \cdot \text{th } \alpha S/2 \\ A_2 = \sqrt{R_z R_g} \cdot I \end{cases} \quad (4)$$

从而可得走行轨电压和电流、杂散电流为

$$\begin{cases} i_g(x) = I \frac{\text{ch } \alpha(x - S/2)}{\text{ch } \alpha S/2} \\ u_g(x) = \sqrt{R_z R_g} I \frac{\text{sh } \alpha(x - S/2)}{\text{ch } \alpha S/2} \end{cases} \quad (5)$$

$$i_s(x) = I - i(x) = I \left(1 - \frac{\text{ch } \alpha(x - S/2)}{\text{ch } \alpha S/2} \right) \quad (6)$$

2 地铁沿线地电位分布计算模型

基于复镜像法求解土壤中格林函数,得到地表电位时镜像电流可以近似为点电流源。如图 3 所示,假定 A、B 位置存在 2 个点电流源,2 个点电流源幅值相等(同为 I)、方向相反,从 A 点流入、B 点流出。2 个点电流源埋深 h (m),相距 $2L_n$ 。

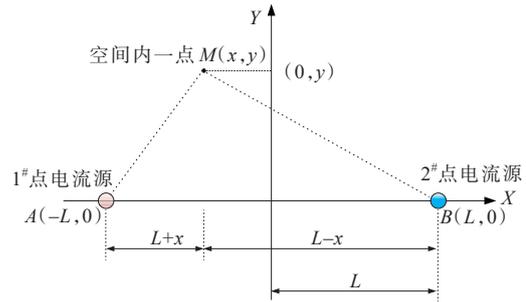


图 3 点电流源引起地表电位解析示意

Figure 3 Schematic diagram of point current source location

当点电流源按图 3 所示布置时,基于复镜像法求解土壤中格林函数的方法,可以分别得到均匀土壤、水平分层土壤下地表平面上任意一点 $M(x, y)$ 的电位。

在土壤电阻率为 ρ 的均匀土壤下,地表平面上任意一点 $M(x, y)$ 的电位为

$$\begin{cases} U = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} \right) \\ a_1 = \sqrt{(x + L_n)^2 + y^2 + h^2} \\ a_2 = \sqrt{(L_n - x)^2 + y^2 + h^2} \end{cases} \quad (7)$$

水平双层土壤下地表平面上任意一点 $M(x, y)$ 的电位为

$$\begin{cases} U = \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} k^m \cdot \left(\frac{1}{a_3} - \frac{1}{a_4} + \frac{1}{a_5} - \frac{1}{a_6} \right) \right] \\ a_3 = \sqrt{(x + L_n)^2 + y^2 + (2mH + h)^2} \\ a_4 = \sqrt{(L_n - x)^2 + y^2 + (2mH + h)^2} \\ a_5 = \sqrt{(x + L_n)^2 + y^2 + (2mH - h)^2} \\ a_6 = \sqrt{(L_n - x)^2 + y^2 + (2mH - h)^2} \end{cases} \quad (8)$$

根据式(7)、(8),在已知均匀土壤、水平分层土壤结构以及2个点电流源间距的情况下,即可求出地表任意点的电位。

本文取地铁每公里绝缘扣件相距0.5 m,根据上述杂散电流数学模型所得到的单个绝缘扣件泄漏电流结果,可以将绝缘扣件泄漏电流源等效为2000L组幅值相等、方向相反的点电流源(中点位置电流为0),如图4所示;根据式(7)、(8)推导可得2000L组点电流源共同作用下的地表电位分布。

$$\begin{cases} L_n = L/2 - S \cdot (n-1), n \geq 1 \\ I_n = \begin{cases} i_s(-L_n), n=1 \\ i_s(-L_n) - i_s(-L_n-1), n \geq 2 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

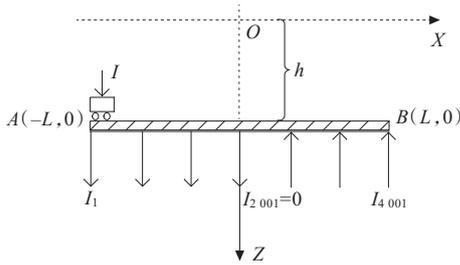


图4 地铁杂散电流引起地表电位解析示意

Figure 4 Schematic diagram of subway stray current leak

地铁杂散电流等效为点电流源(图4),基于复镜像法求解土壤中格林函数的方法,可以分别得到均匀土壤、水平分层土壤下地表平面上任意一点 $M(x, y)$ 的电位。

在土壤电阻率为 ρ 均匀土壤下,地表平面上任意一点 $M(x, y)$ 的电位为

$$U = \sum_{n=1}^{2000L} \frac{I_n \cdot \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} \right) \quad (10)$$

采用水平双层土壤,则地表平面上任意一点 $M(x, y)$ 的电位为

$$U = \sum_{n=1}^{2000L} \frac{I_n \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} k^m \cdot \left(\frac{1}{a_3} - \frac{1}{a_4} + \frac{1}{a_5} - \frac{1}{a_6} \right) \right] \quad (11)$$

3 CDEGS仿真

3.1 CDEGS仿真模型

用CDEGS软件的HIFREQ模块建立走行轨—

绝缘扣件—大地模型^[16-18],模型中分别采用均匀和水平分层的土壤结构,如图5所示,模型中导体及土壤具体参数设置如表2所示。采用水平双层土壤结构,混凝土层电阻率为 $180 \Omega \cdot \text{m}$,混凝土层厚度为1 m,底层电阻率为 $2000 \Omega \cdot \text{m}$,土壤层厚度近似于无穷。

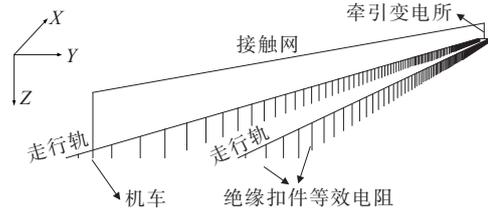


图5 CDEGS导体仿真模型

Figure 5 CDEGS conductor simulation model

表2 导体参数

Table 2 Conductor and soil parameters

供电电 流/A	区间长 度/km	地铁埋 深/m	走行轨纵 向电阻/ (mΩ/km)	单个绝缘扣 件电阻/kΩ	绝缘扣件 间距/m
2000	2	5	40	6	0.5

目前在工程实际中,常用的60 kg/m的“工”型走行轨在CDEGS中采用等效半径为0.048 m、纵向电阻为40 mΩ/km的圆导体进行模拟;采用长度、半径分别为0.25、0.01 m,电阻为6 kΩ/个的圆导体模拟绝缘扣件;由牵引变电所提供机车用电电流,经接触网传输;回流电流通过钢轨返回牵引变电所;模型中牵引变电所在 $x=L$ 处,机车在 $x=-L$ 处。

3.2 解析法与CDEGS仿真结果分析

CDEGS仿真中机车在 $x=-1$ km处注入2 kA电流到走行轨,则每根走行轨电流为1 kA。当基于数学模型解析计算时,机车在A点参数的取值与CDEGS仿真参数一致。解析计算结果与仿真结果如图6所示,走行轨电流、电压及总的杂散电流分布与仿真结果基本一致。杂散电流泄漏点最大相差0.27 A,相对偏差为2.1%,这是由于在数学解析模型中采用了理想大地条件,即大地的电阻为0,而CDEGS模型中考虑了土壤电阻。

基于杂散电流数学模型得到如图6(b)所示的每个轨枕泄漏电流,利用基于复镜像法求得分布在

多层水平土壤下的地铁沿线地表电位,2种方法的计算结果最大幅值相差 0.43 V,相对偏差 3.18%,CDEGS 模型仿真结果验证了本文基于复镜像法求解地表电位分布模型的准确性。本文理论模型为 CDEGS 建模、边界条件优化提供理论参考,解析模型可为地表电位分布进行较为精确的量值计算;讨论不同参数影响效果时更为直观,在数据处理方面更为方便。双层水平土壤下的地铁沿线地表电位分布如图 7 所示。

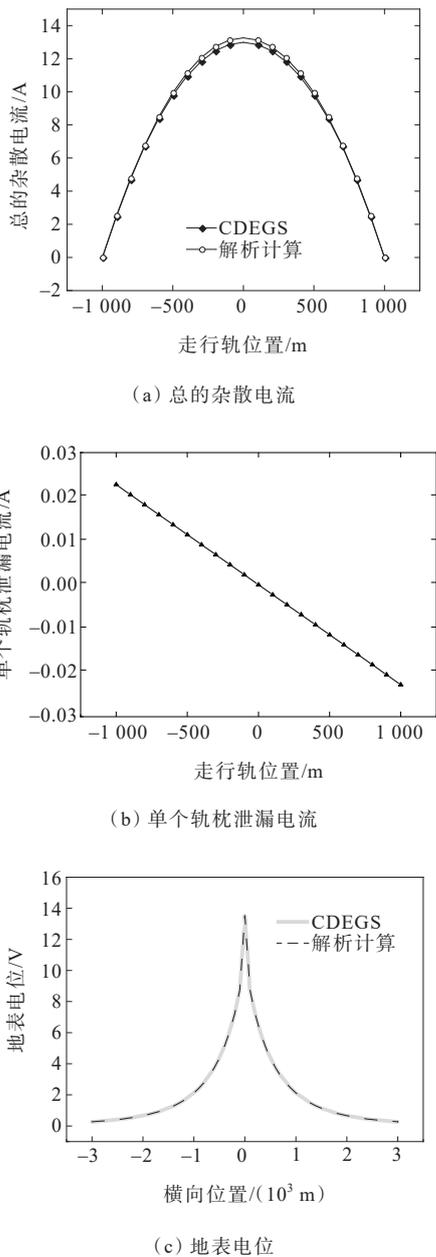


图 6 解析计算与 CDEGS 仿真结果
Figure 6 Analytical calculation and CDEGS simulation results

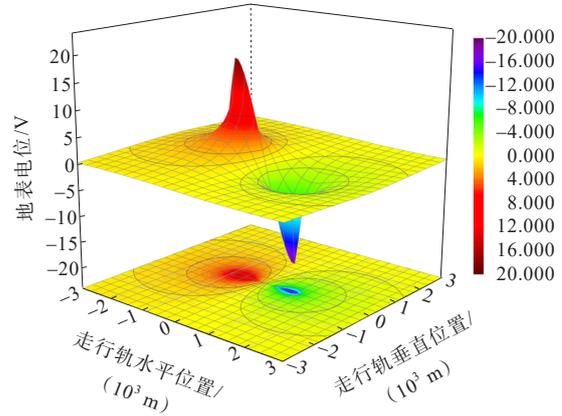


图 7 双层水平土壤下的地铁沿线地表电位分布
Figure 7 The distribution of surface potential along the subway under two-layer horizontal soil

4 地表电位的敏感性因素分析

地铁杂散电流引起的沿线地表电位的分布主要受到地铁杂散电流泄漏程度、土壤结构和地铁线路设计及地铁运行工况的影响。

4.1 杂散电流泄漏程度对地表电位分布的影响

地铁杂散电流泄漏程度与机车距离牵引所的供电距离、机车负荷电流、走行轨纵向电阻以及绝缘扣件电阻有关,其中,绝缘扣件电阻在运行过程中的绝缘功能退化是导致杂散电流泄露和周围地表电位抬升的主要因素。本文采用单一变量的原则,讨论绝缘扣件电阻对于地电位分布的影响,如图 8 所示,保持绝缘扣件高电阻是降低地铁杂散电流负面影响的關鍵。

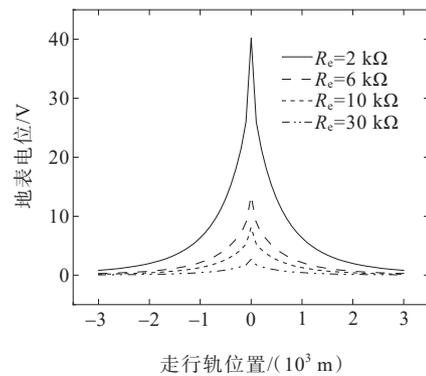


图 8 绝缘扣件电阻对地表电位分布影响
Figure 8 The influence of insulation deduction resistance on the surface potential distribution

4.2 土壤结构对地铁沿线地表电位分布的影响

除杂散电流泄露程度外,土壤结构也是影响地表电位分布的重要因素。因此,本文建立3组不同的土壤模型,其余参数不变,分析不同土壤模型下地表电位的变化情况。土壤模型参数如表3所示,第1组设置大地位均匀土壤,考虑不同土壤电阻率对地表电位的影响;第2、3组采用水平双层的土壤模型,分别考虑第2层土壤电阻率及表层土壤厚度对地表电位的影响。

不同土壤结构下的地表电位如表4所示。当采用均匀土壤模型时,随着土壤电阻率的升高,地表电位有略小增高,分布规律不随土壤电阻率的变化而变化;当采用双层土壤时,第2层电阻率增大或者

表层厚度的减小都能引起相同点处的地表电位升高,衰减速度也会相应的减缓,略微改变整体地表电位分布规律。

表3 土壤模型参数
Table 3 Soil model parameters

土壤类型	层数	土壤电阻率/(Ω·m)	厚度/m
均匀土壤(第1组)	1	100(方案1)、 180(方案2)	∞
	1	180(方案1、2)	1
第2层土壤电阻率 变化(第2组)	2	1000(方案1)、 2000(方案2)	∞
	1	180	0.5(方案1)、 1.0(方案2)
表层土壤厚度变化 (第3组)	2	2000	∞(方案1、2)

表4 不同土壤结构下的地表电位

Table 4 Surface potential under different soil structures

土壤结构	土壤模型	最大地表电位/V		3 km处地表电位/V		衰减速度/%	
		方案1	方案2	方案1	方案2	方案1	方案2
均匀土壤	土壤电阻率变化	4.0	20.0	0.017	0.083	0.43	0.43
水平双层土壤	第2层土壤电阻率变化	11.6	15.2	0.150	0.430	1.30	2.83
	表层土壤厚度变化	18.9	7.9	0.310	0.130	1.64	1.65

4.3 交通枢纽地段多列车运行下的周围地电位

城市轨道交通具有高密度、高运量的特点,为实现城市轨道交通的便捷性和资源节省,存在多条线路并列、交叉的复杂设计。多列车在不同线路同时运行,线路、车辆的密集程度直接影响了周围地电位分布,而多线路交汇的交通枢纽地段更易导致周围区域杂散电流和地电位波动超过正常范围。

1) 多条线路并列运行下的地表电位分布。

轨道1、2具体参数同表2,2条轨道埋深相同,相距 l (m),由于2条轨道相距不远,因此共用相同的土壤模型,其空间分布如图9所示。

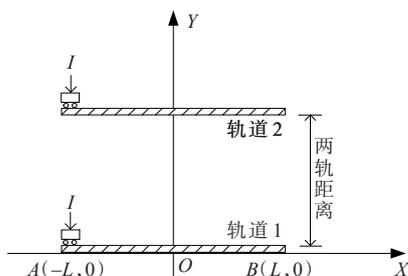


图9 并行线路空间分布

Figure 9 Spatial distribution diagram of parallel lines

周围地电位由2条线路共同作用,产生叠加效应,即

$$U = U_1 + U_2 \tag{12}$$

式中, U_1 同式(11); U_2 由式(11)推导可得。

$$\left\{ \begin{aligned}
 U_2 &= \sum_{n=1}^{2000L} \left[\frac{I_n \cdot \rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_2} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} k^m \cdot \left(\frac{1}{b_3} - \frac{1}{b_4} + \frac{1}{b_5} - \frac{1}{b_6} \right) \right] \\
 b_1 &= \sqrt{(x + L_n)^2 + (y - l)^2 + h^2} \\
 b_2 &= \sqrt{(L_n - x)^2 + (y - l)^2 + h^2} \\
 b_3 &= \sqrt{(x + L_n)^2 + (y - l)^2 + (2mH + h)^2} \\
 b_4 &= \sqrt{(L_n - x)^2 + (y - l)^2 + (2mH + h)^2} \\
 b_5 &= \sqrt{(x + L_n)^2 + (y - l)^2 + (2mH - h)^2} \\
 b_6 &= \sqrt{(L_n - x)^2 + (y - l)^2 + (2mH - h)^2}
 \end{aligned} \right. \tag{13}$$

2) 多条线路立体交叉下的地表电位分布。

轨道1、3具体参数同表2,共用相同土壤模型,2条轨道埋深分别为 h, h_1 ,2条轨道夹角为 α 。假设2条线路立体相交点位于各自线路中点,其空间分布如图10所示。

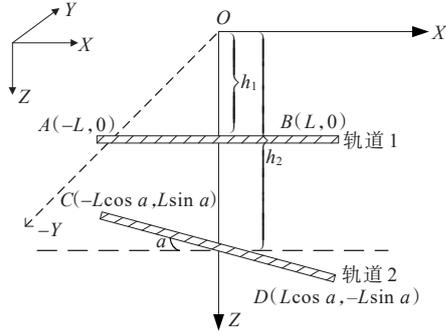


图 10 交叉线路空间分布

Figure 10 Spatial distribution map of crossing lines

周围地电位同样由 2 条线路共同作用,产生叠加效应,即

$$U = U_1 + U_3 \quad (14)$$

式中, U_1 同式(11); U_3 由式(11)推导可得。

$$U_3 = \sum_{n=1}^{2000L} \frac{I_n \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_2} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} k^m \cdot \left(\frac{1}{c_3} - \frac{1}{c_4} + \frac{1}{c_5} - \frac{1}{c_6} \right) \right]$$

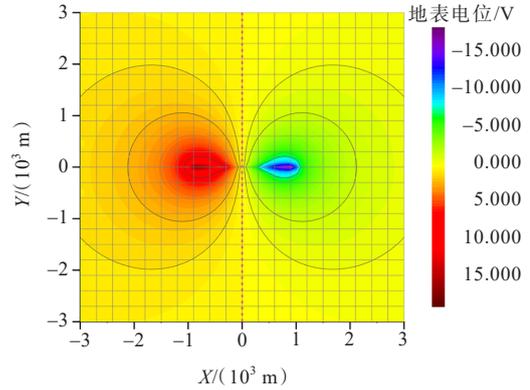
$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \sqrt{(x + L_n \cos \alpha)^2 + (y - L_n \sin \alpha)^2 + h_1^2} \\ c_2 &= \sqrt{(L_n \cos \alpha - x)^2 + (y + L_n \sin \alpha)^2 + h_1^2} \\ c_3 &= \sqrt{(x + L_n \cos \alpha)^2 + (y - L_n \sin \alpha)^2 + (2mH + h_1)^2} \\ c_4 &= \sqrt{(L_n \cos \alpha - x)^2 + (y + L_n \sin \alpha)^2 + (2mH + h_1)^2} \\ c_5 &= \sqrt{(x + L_n \cos \alpha)^2 + (y - L_n \sin \alpha)^2 + (2mH - h_1)^2} \\ c_6 &= \sqrt{(L_n \cos \alpha - x)^2 + (y + L_n \sin \alpha)^2 + (2mH - h_1)^2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

3) 复杂线路设计引起的地电位分布。

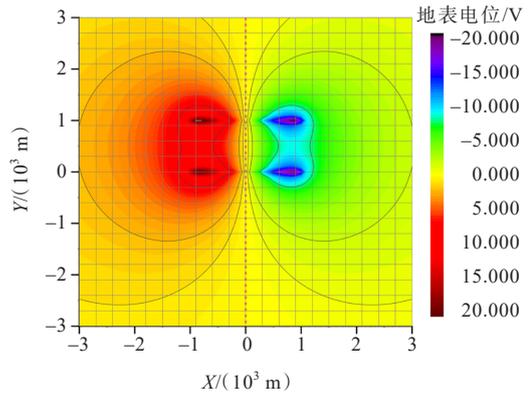
并列、交叉线路引起的地表电位分布如图 11 所示(等高线由内到外分别为 8.0、2.0、0.8 V)。并列线路所引起的正、负地表电位同样沿 $x = 0$ 处对称,在 2 条轨道所在位置,即 $y = 0, y = 1000$ 这 2 条线路上呈现完全相同的电位分布,由图 11(b)等高线可以看出,2 条并列线路中间区域地表电位较单轨(图 11(a))大幅增高,且并列线路扩大了地表电位分布的影响区域。

与单条线路和并列线路相比,交叉线路所引起的地电位场更为复杂,其线路 1 所影响的正、负极性地表电位沿 $x = 0$ 对称,在 x 负半轴区域为正电位,

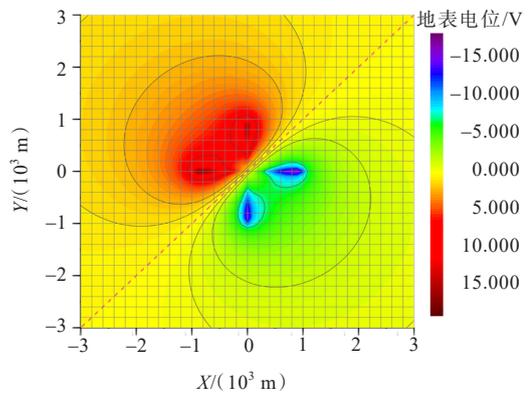
在 x 正半轴区域为负电位;线路 3 所影响的正、负极性地表电位沿 $y = \sec \alpha x$ 对称,其共同作用下的正、负地表电位沿 $y = \sec(\alpha/2)x$ 对称,左上区域为正,右下区域为负。由图 11(c)所示的不同角度下地表电位分布及等高线可以看出,2 条线路角度越小、同性电位重合区域越大,最大幅值越大,地表电位影响区域也会越大。



(a) 单条线路地表电位



(b) 并列线路地表电位



(c) 交叉 90°地表电位

图 11 并列、交叉线路引起的地表电位分布

Figure 11 Distribution of ground potential caused by different track designs

5 结语

1) 本文基于复镜像法求解格林函数的方法建立了地铁杂散电流引起地表电位分布计算模型,与CDEGS仿真结果进行对比,杂散电流误差范围在2.1%以内,地表电位误差在3.18%以内,证明该文本所建模型是有效的。

2) 绝缘扣件电阻越小,走行轨泄漏的总电流越大,地铁沿线地表电位幅值越高。当绝缘扣件绝缘性能下降到2000Ω/个时,地表电位的峰值高达40.17V,地铁杂散电流引起的地表电位分布严重不均匀,成为直流电流侵入交流电网潜在危险源。因此,使绝缘扣件保持高电阻是抑制地铁杂散电流泄漏程度和周围地表电位波动的重要措施。

3) 在多线路交汇的交通枢纽地段,多列车运行下的地表电位相比于单条线路的峰值更高、影响区域更广。多线路共同作用下的地表电位分布受轨道间的夹角影响,轨道之间夹角越小,同性电位重合区域越大,电位峰值及影响区域越大;轨道并行分布时电位峰值最大、影响区域最广,应尽量避免变电站处于多线路汇集的交通核心地段。

4) 在变电站、地铁线路设计问题上,应考虑地铁杂散电流引起的非均匀地电场导致直流电流侵入交流电网问题。

本文研究结果为今后变电站合理选址以及交流电网防护提供了一定参考。

参考文献:

- [1] DOLARA A, FOIADELLI F, LEVA S. Stray current effects mitigation in subway tunnels[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2304-2311.
- [2] 彭平, 曾祥君, 倪砚茹, 等. 考虑地铁杂散电流影响的变压器直流偏磁电流建模方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 192-198.
PENG Ping, ZENG Xiangjun, NI Yanru, et al. Modeling for the DC bias current of transformer caused by the metro stray current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 192-198.
- [3] TZENG Y S, LEE C H. Analysis of rail potential and stray currents in a direct-current transit system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1516-1525.
- [4] 马晓华. 上海虹桥机场航油输送管道受地铁杂散电流干扰的检测与防护[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(5): 364-367+406.
MA Xiaohua. Interference detection and protection of subway stray current interference on Shanghai Hongqiao aeri-oil pipeline[J]. Corrosion & Protection, 2016, 37(5): 364-367+406.
- [5] MEMON S, FROMME P. Stray current corrosion and mitigation: a synopsis of the technical methods used in DC transit systems[J]. IEEE Electrification Magazine, 2014, 2(3): 22-31.
- [6] 倪砚茹, 喻锬, 曾祥君, 等. 地铁杂散电流引起变压器直流偏磁电流的相关性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6): 136-143.
NI Yanru, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. A correlation analysis on transformer DC bias current caused by metro stray current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(6): 136-143.
- [7] LEE C H, LU C J. Assessment of grounding schemes on rail potential and stray currents in a DC transit system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1941-1947.
- [8] 陈志光, 秦朝葵, 唐继旭. 城市轨道交通动态杂散电流理论分析及计算[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(3): 24-29.
CHEN Zhiguang, QIN Chaokui, TANG Jixu. Analysis and calculation of rail transit dynamic stray current[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(3): 24-29.
- [9] XU S Y, LI W, WANG Y Q. Effects of vehicle running mode on rail potential and stray current in DC mass transit systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(8): 3569-3580.
- [10] 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+46.
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+46.
- [11] 夏能弘, 唐文涛, 李怀慎, 等. 地铁轨道局部绝缘损坏下动态杂散电流及地电位梯度建模与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 53-61.
XIA Nenghong, TANG Wentao, LI Huaishen, et al. Modeling and analysis of dynamic stray current and

- ground potential gradient under partial insulation damage of a metro track[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 53-61.
- [12] CHARALAMBOUS C, COTTON I. Influence of soil structures on corrosion performance of floating-DC transit systems[J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(1): 9-16.
- [13] COTTON I, CHARALAMBOUS C, AYLOTT P, et al. Stray current control in DC mass transit systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(2): 722-730.
- [14] 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.
- [15] 别一凡,李波,江军,等. 基于改进SSD的变压器套管红外图像油位智能识别方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 158-163.
- BIE Yifan, LI Bo, JIANG Jun, et al. Intelligent oil level recognition of transformer bushing infrared image based on improved SSD algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 158-163.
- [16] 吴晓文,周年光,胡胜,等. 城市轨道交通引起的变压器直流偏磁噪声与振动特性[J]. 电测与仪表, 2017, 54(17): 117-122.
- WU Xiaowen, ZHOU Nianguang, HU Sheng, et al. Noise and vibration characteristics of transformer DC biasing induced by urban rail transit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(17): 117-122.
- [17] 章彬,黄炜昭,陈潇. 直流偏磁对深圳电网主变压器的影响及抑制措施的研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(12): 69-72+85.
- ZHANG Bin, HUANG Weizhao, CHEN Xiao. Research on the influence of DC bias on the main transformer of Shenzhen Power Grid and its suppression measures[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(12): 69-72+85.
- [18] 尹航,郑财晖,王良勇. 全自动运行地铁列车蓄电池在线监测系统设计[J]. 电测与仪表, 2021, 58(3): 174-179.
- YIN Hang, ZHENG Caihui, WANG Liangyong. Design of on-line monitoring system for storage battery of fully automatic metro train[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 174-179.
- [19] 贺彦强,王英,陈小强,等. 计及特征次谐波治理的铁路网侧储能系统控制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(7): 33-41.
- HE Yanqiang, WANG Ying, CHEN Xiaoqiang, et al. Energy storage control strategy of railway network side considering characteristic harmonic control[J]. Electric Power, 2022, 55(7): 33-41.
- [20] 周宁馨,刘青,查虹丽,等. 地磁场极值预测及磁暴感应地电场有限元计算[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 88-94.
- ZHOU Ningxin, LIU Qing, ZHA Hongli, et al. Prediction of geomagnetic field with extreme value and calculation of geomagnetic storm-induced geoelectric field based on finite element method[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 88-94.
- [21] 潘卓洪,张露,刘虎,等. 多层水平土壤地表电位分布的仿真分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 116-123.
- PAN Zhuohong, ZHANG Lu, LIU Hu, et al. Simulation and analysis of earth surface potential distribution in horizontal multi-layer soil[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 116-123.
- [22] 林湘宁,相艳会,全江涛,等. HVDC单极—大地运行情况下换流变压器直流偏磁建模仿真[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(1): 31-35.
- LIN Xiangning, XIANG Yanhui, QUAN Jiangtao, et al. Simulation analysis of convert transformer DC-biasing under HVDC system in ground return operation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(1): 31-35.
- [23] 李瑞芳,胡豪,曹晓斌,等. 单芯电缆耦合电路等效模型及无功损耗影响因素研究[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 119-126.
- LI Ruifang, HU Hao, CAO Xiaobin, et al. Study on equivalent model of coupled circuit of single-core cable and influencing factors of reactive power loss[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 119-126.
- [24] 李鲲鹏,曹晓斌,沈豪,等. 环境因素对地铁钢轨扣件绝缘性能影响的试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(3): 48-52.
- LI Kunpeng, CAO Xiaobin, SHEN Hao, et al. Experimental study of environmental influence on metro rail fastener insulation performance[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(3): 48-52.