

引用格式:周展帆,严宇,于艺盛,等.地铁杂散电流对变压器直流偏磁的影响分析[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):134-143.

Citation: ZHOU Zhanfan, YAN Yu, YU Yisheng, et al. Analysis of the influence of metro stray current on transformer DC bias[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 134-143.

地铁杂散电流对变压器直流偏磁的影响分析

周展帆^{1,2}, 严宇^{1,2}, 于艺盛^{1,2}, 倪砚茹³, 程新翔³,
喻锬³, 曾祥君³, 唐雨杭³

(1. 国网湖南省电力有限公司超高压变电公司, 湖南长沙 410004; 2. 变电智能运检国网湖南省电力有限公司实验室, 湖南长沙 410004; 3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114)

摘要: 地铁运行过程中泄漏的杂散电流引起地电位波动变化, 易导致附近接地变压器出现直流偏磁现象。为解决此类问题, 首先, 建立了地铁运行等值电阻网络模型, 实现杂散电流实时数值计算; 然后, 进一步推导了杂散电流场位方程, 实现地铁机车运行时附近大地电位空间分布的动态模拟; 最后, 基于杂散电流引起的大地电位分布结果与交流电网的等效直流电阻模型, 实现接地变压器偏磁直流和励磁电流的数值计算, 建立中性点直流量和波形畸变率偏移度评判指标, 可有效评估变压器直流偏磁程度。仿真结果表明, 机车运行工况及机车间距对变压器直流偏磁影响明显, 制定合理的地铁运行策略可有效削弱附近变电站直流偏磁干扰。

关键词: 地铁; 杂散电流; 地表电位; 变压器直流偏磁; 变压器中性点电流

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.013 中图分类号: TM401+.1 文章编号: 1673-9140(2024)01-0134-10

Analysis of the influence of metro stray current on transformer DC bias

ZHOU Zhanfan^{1,2}, YAN Yu^{1,2}, YU Yisheng^{1,2}, NI Yanru³, CHENG Xinxiang³, YU Kun³,
ZENG Xiangjun³, TANG Yuhang³

(1. State Grid Hunan Extra High Voltage Substation Company, Changsha 410004, China; 2. Substation Intelligent Operation and Inspection Laboratory of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China; 3. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The metro stray current leaked during the train operation causes the surface potential fluctuation, resulting nearby transformer DC bias. Firstly, a equivalent resistance network model was established to realize actual time numerical calculation of stray current. Then, the stray current field equation was further derived, and the dynamic simulation of the geopotential potential distribution was realized during the train operation. Based on the potential distribution caused by stray current and the equivalent DC resistance model of AC power grid, the numerical calculation of DC bias current and excitation current of grounding transformer was realized. The index of neutral point current and waveform distortion rate is established, so the effective evaluation of the transformer DC bias could be realized. The simulation results show that the operating conditions and distance between the metro train have obvious effects on the transformer DC bias, so formulating a reasonable metro operation strategy could effectively restrain transformer DC bias interference for nearby substations.

Key words: metro; stray current; surface potential; transformer DC bias; transformer neutral point current

随着中国经济的高速增长以及城市规模的不断扩大, 如何缓解居民出行带来的城市交通压力成为热点问题。在此背景下, 地铁系统因其安全环

保、出行便捷等优点得到了大力发展。然而, 地铁在实际运行时会对沿线城市电网产生不利影响。中国地铁系统通常采用直流供电, 走行轨用作回流

收稿日期: 2022-07-14; 修回日期: 2022-11-07

基金项目: 国网湖南省电力有限公司科技项目(164100003187)

通信作者: 倪砚茹(1993—), 女, 博士研究生, 主要从事电力系统保护与控制、城市轨道交通牵引供电系统等研究; E-mail: yanruni@qq.com

的导体,由于钢轨不可能完全绝缘于道床,部分直流电泄漏注入大地形成杂散电流^[1-5]。杂散电流在大地中传播,使得地铁沿线不同位置变电站之间产生直流电位差,导致直流电注入变电站中性点接地主变,引发变压器直流偏磁^[6-9]。变压器发生直流偏磁时,其绕组电流产生直流分量,在交流磁通和直流磁通的共同作用下,铁芯将提前进入饱和状态导致其磁滞伸缩加剧,变压器振动也会因此加剧,使得变压器产生噪声、温升等问题,甚至引发恶性停电事故^[10-13]。因此,研究地铁杂散电流对变压器直流偏磁的影响,并建立相应的评估模型尤为重要。

当前杂散电流分布建模已取得了一定的研究进展。文献[14]针对轨道绝缘非均匀情况对回流系统进行分割,建立了不同类型切面下的杂散电流分布模型;文献[15]将变电站及地铁列车等效为直流源共同对地注入电流,提出了多列车运行下的地铁杂散电流模型;文献[16]结合深圳电网实际电气参数,建立了 220 kV 及以上电压等级交流电网的杂散电流分布模型,并对其进行仿真校验。同时,基于 CDEGS 软件的城市轨道交通杂散电流模型可有效模拟线路结构和机车运行工况,得到专家学者的普遍认可。文献[17-19]利用 CDEGS 建立了直流牵引供电系统及附近轨道交通耦合模型,针对均匀和双层土壤环境,不同过渡电阻及区间过渡电阻不均匀和地铁单列车、多列车动态运行情况,对杂散电流的分布特征进行仿真分析,并通过对比现场实测数据验证了仿真模型的有效性。

地铁实际运行时,会引起周边地电位动态变化,导致接地变压器的直流偏磁现象出现。一方面,针对直流地表电位数值计算,已有多位专家学者展开研究。文献[20]针对现有可测量地表电位地点数量有限且不连续问题,搭建了 CDEGS 仿真模型并根据不连续地点测量数据还原地表电位,仿真得到地铁沿线直流地表电位分布数据;文献[21]采用镜像法与行波法对特高压直流接地极周边地表电位的分布进行计算,并通过研究验证模型计算得到的电流分布与实测电流分布基本一致。另一方面,针对变压器直流偏磁影响分析,相关研究表明变压器发生直流偏磁时,铁芯工作点移动至非线性区域并处于饱和状态,励磁电流谐波含量增加,奇偶次谐波共存,其波形发生畸变不再沿正负半轴对称^[22-27]。由此,通过大地电位的仿真建模,实现接地变压器所处地电位的数值计算,可有效分析变压器励磁电流、中性点直流等特征量,实现变压器直

流偏磁的有效评估。

本文建立地铁杂散电流分布电阻网络模型,分析地铁机车动态运行下杂散电流分布特征;建立地铁杂散电流场方程,实现空间地电位的数值计算;基于大地电位分布结果,结合交流电网直流等效电阻网络模型,实现接地变压器偏磁直流和励磁电流的数值计算。

1 地铁杂散电流动态建模与分析

1.1 地铁杂散电流分布电阻网络模型

地铁在运营过程中,一般采用双端供电方式,如图 1 所示。由于杂散电流在钢轨任意位置都会发生泄漏,且运行中的列车负荷也在随时间和位置变动,地铁线路所处的地质环境不同,土壤电阻率等在不同区段也不尽相同。因此,采用理想的假定条件来简化模型推导,假设轨道、排流网和结构钢等纵向电阻均匀分布,轨道与地、排流网的过渡电阻均匀分布,以及牵引变电站的各类参数、内外特性曲线相同。

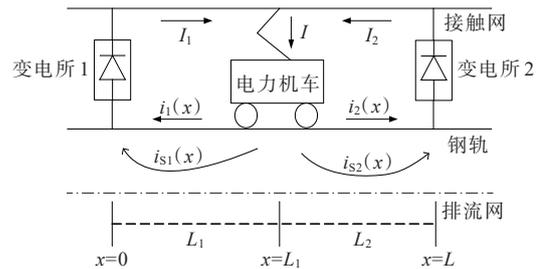


图 1 杂散电流引起变压器直流偏磁示意图

Figure 1 Schematic diagram of transformer DC bias caused by metro stray current

双端供电方式可看作由 2 个单边供电模型构成,以机车位置为分界点将区间划分为 2 个区段,如图 2 所示。采用微元法和基尔霍夫定律进行计算,推导钢轨电位、钢轨电流和杂散电流的分布解析式。

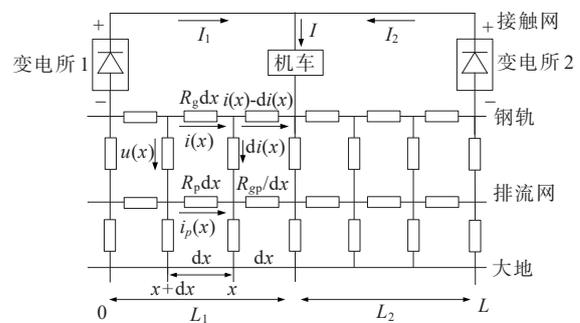


图 2 双端供电情况下电阻分布网络

Figure 2 Resistance distribution network diagram under double terminal power supply

根据图2,列写基尔霍夫电压定律回路电压方程并简化为

$$\frac{du(x)}{dx} = i(x) \cdot (R_g + R_p) - IR_p \quad (1)$$

式中, $u(x)$ 、 $i(x)$ 分别为钢轨在 x 处的电压、电流; R_g 、 R_p 分别为钢轨、排流网纵向电阻; I 为牵引电流。

令 $\alpha^2 = (R_g + R_p)/R_{gp}$, R_{gp} 为钢轨—排流网过渡电阻; L_1 为地铁机车距离牵引变电所1的距离; L_2 为地铁机车距离牵引变电所2的距离; I_1 为变电所1牵引电流; I_2 为变电所2牵引电流。得钢轨电位、钢轨电流和杂散电流的分布解析式如下。

1) 当 $x \in [0, L_1]$ 时。

轨道电压为

$$u_1(x) = -I_1 \frac{R_g \sqrt{R_{gp}(R_g + R_p)}}{R_g + R_p} \tanh \frac{\alpha L_1}{2} \quad (2)$$

$$\cosh(\alpha x) + I_1 \frac{R_g \sqrt{R_{gp}(R_g + R_p)}}{R_g + R_p} \cdot \sinh(\alpha x)$$

轨道电流为

$$i_1(x) = -I_1 \frac{R_g}{R_g + R_p} \tanh \frac{\alpha L_1}{2} \cdot \sinh(\alpha x) +$$

$$I_1 \frac{R_g}{R_g + R_p} \cdot \cosh(\alpha x) + I_1 \frac{R_p}{R_g + R_p} \quad (3)$$

杂散电流为

$$i_{s1}(x) = I_1 \frac{R_g}{R_g + R_p} \tanh \frac{\alpha L_1}{2} \cdot \sinh(\alpha x) - I_1 \frac{R_g}{R_g + R_p} \cdot \cosh(\alpha x) + I_1 \frac{R_g}{R_g + R_p} \quad (4)$$

2) 当 $x \in [L_1, L]$ 时。

轨道电压为

$$u_2(x) = -I_2 \frac{R_g \sqrt{R_{gp}(R_g + R_p)}}{R_g + R_p} \tanh \frac{\alpha L_2}{2} \cdot \cosh(\alpha(L - x)) + I_2 \frac{R_g \sqrt{R_{gp}(R_g + R_p)}}{R_g + R_p} \cdot \sinh(\alpha(L - x)) \quad (5)$$

轨道电流为

$$i_2(x) = -I_2 \frac{R_g}{R_g + R_p} \tanh \frac{\alpha L_2}{2} \cdot \sinh(\alpha(L - x)) + I_2 \frac{R_g}{R_g + R_p} \cdot \cosh(\alpha(L - x)) + I_2 \frac{R_p}{R_g + R_p} \quad (6)$$

杂散电流为

$$i_{s2}(x) = I_2 \frac{R_g}{R_g + R_p} \tanh \frac{\alpha L_2}{2} \cdot \sinh(\alpha(L - x)) - I_2 \frac{R_g}{R_g + R_p} \cdot \cosh(\alpha(L - x)) + I_2 \frac{R_g}{R_g + R_p} \quad (7)$$

1.2 地铁杂散电流动态分布特征

杂散电流分布随机车运行工况变化而变化。通过调整机车牵引电流和机车运行位置,模拟机车运行工况。假设机车供电区间为2 km,令机车运行至距牵引变电所0.5、1.0、1.5 km时,机车取流分别为2 800、3 000、2 500 A,其轨道电压和杂散电流分布如图3、4所示。

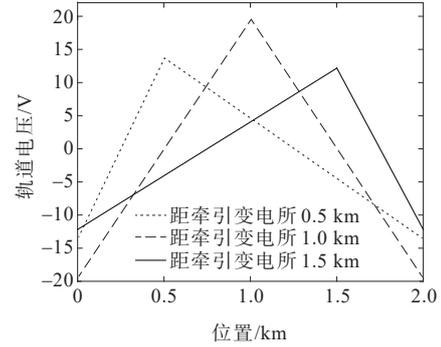


图3 双端供电情况下钢轨电位分布

Figure 3 Rail potential distribution diagram under double terminal power supply

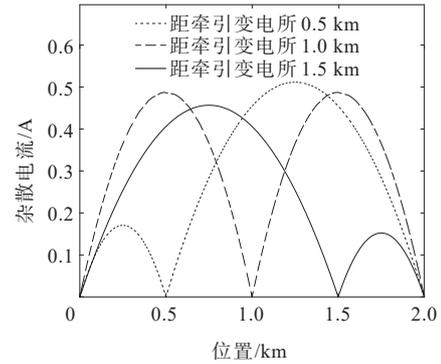


图4 双端供电情况下杂散电流分布

Figure 4 Stray current distribution diagram under double terminal power supply

如图3所示,钢轨电位分布随机车运行动态变化,且钢轨最大值出现在机车位置处;钢轨电位整体分布与牵引电流正相关,当牵引电流越大时,钢轨电位越大;机车离牵引变电所的距离不断变化,机车与变电所中点处钢轨电位总为零。

如图4所示,杂散电流分布与机车位置密切相关,且在机车距离牵引变电所中点处达到最大值;当机车运行至供电区间中点时,杂散电流对称分布;机车距离牵引变电所越远,杂散电流泄漏越严重。

2 基于地表电位分布的变压器直流偏磁评估模型

2.1 地铁杂散电流场数值计算

地铁结构主要由钢筋混凝土层组成的区间隧道结构和轨道电气系统结构构成^[28]。针对地铁杂散电流场的数值计算,主要从介质结构和导体网络结构两方面来分析,其中介质结构包括地铁隧道的混凝土层和周围的土壤层,导体网络结构包括钢轨、排流网及附近结构钢筋等。地铁隧道基本结构如图 5 所示。

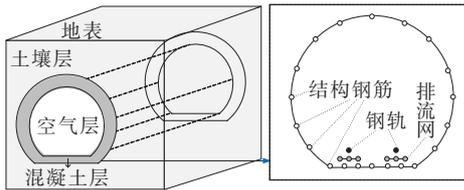


图 5 地铁隧道基本结构示意图

Figure 5 Schematic diagram of basic structure of metro tunnel

针对三维地铁隧道结构,基于欧姆定律得到三维恒定电流场的电流密度^[29]为

$$\begin{cases} j_x = -\gamma_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ j_y = -\gamma_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \\ j_z = -\gamma_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \end{cases} \quad (8)$$

式中, j_x, j_y, j_z 为三维方向上的电流密度分量, $A \cdot m^{-2}$; $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ 为各方向上的电导率, $S \cdot m^{-1}$; φ 为电位, V 。

基于电流连续性原理,在 x, y, z 3 个主方向上电流连续性方程为

$$\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)得三维地铁杂散电流场的数值计算方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0 \quad (10)$$

针对某一时刻机车运行至某一位置下的电流场,可认定为恒定电流场,利用边界条件即可求解。式(10)的边界条件包括计算域内的地表面(上边界)法向量的电流量为零和左、右及下边界电位为零,即

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \\ \varphi = 0 \end{cases} \quad (11)$$

CDEGS 软件可求解计算域边界形状和地质条件复杂多变的情况,实现各种类型的边界条件和介质结构的仿真模拟。由此,基于 CDEGS 仿真软件建立分层介质结构和导体网络结构,进行杂散电流场的仿真计算。

如图 6 所示,建立地铁杂散电流场仿真分析模型。采用完全绝缘导体模拟牵引变电所和接触网;采用外敷一定绝缘材料的导体模拟钢轨和轨枕及道床结构;采用纯金属导体模拟杂散电流收集排流网;采用电流源激励模拟地铁机车,通过调整激励数值和正负表示机车牵引、制动和惰性运行工况。

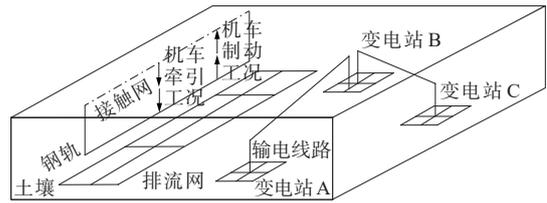


图 6 CDEGS 仿真模型搭建示意图

Figure 6 Schematic diagram of CDEGS simulation model

假设供电区间长 2 km,机车运行至 1 km,牵引电流 3 000 A,土壤模型采用双层结构,第 1 层电阻率为 $180 \Omega \cdot m$,第 2 层为 $100 \Omega \cdot m$ 。其钢轨电位和杂散电流分布分别如图 7、8 所示。

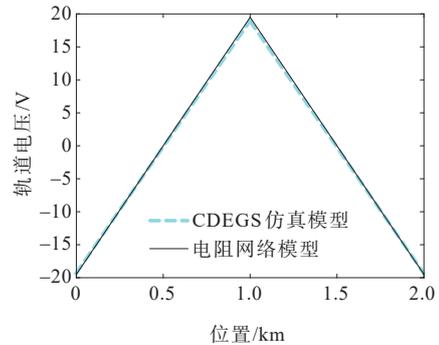


图 7 CDEGS 仿真模型和电阻网络模型的钢轨电压分布

Figure 7 Rail voltage distribution diagram of CDEGS simulation model and resistance network model

对比图 7、8,验证了 CDEGS 杂散电流仿真的有效性。利用 CDEGS 的标量电势计算功能,实现地铁沿线附近电位场的仿真计算,该时刻下杂散电流引起电位场的分布如图 9 所示。当变电站处于不同地电位时,电位差驱使变电站接地点、变压器绕组和电力线路产生直流,引发变压器直流偏磁现象。

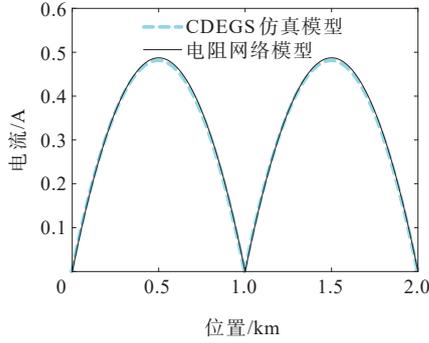


图8 CDEGS仿真模型和电阻网络模型的杂散电流分布

Figure 8 Stray current distribution diagram of CDEGS simulation model and resistance network model

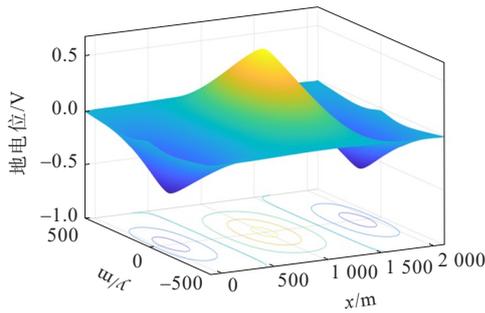


图9 杂散电流引起电位场分布

Figure 9 Potential distribution caused by metro stray current

2.2 变压器偏磁电流数值计算

地铁供电区间泄漏的直流电流流入大地,造成附近地电位的改变,利用CDEGS软件得到地表电位分布,从而得到各变电站的接地点电位。根据电力系统的地理接线和电气参数可以得到等值电阻网络模型。结合地铁杂散电流场方程可得到各接地点流过变压器中性点的偏磁电流。

交流电网的等值网络模型主要是由变电站接地电阻、变压器等效直流电阻和输电线路电阻构成。当已知各接地点感应电势时,各接地点注入直流量为

$$YU = I \quad (12)$$

式中, Y 为交流网络的等效直流电阻参数; U 为接地点地电位; I 为各节点注入电流。

由于连接变电站的普通线路节点注入电流为零,在感应电势作用下的接地节点注入电流不为零,则式(12)可表示为

$$\begin{bmatrix} Y_{jd} \\ Y_{pt1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{jd} \\ U_{pt1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{jd} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, Y_{jd} 、 Y_{pt1} 为接地节点和普通节点的等效导纳;

U_{jd} 、 U_{pt1} 为接地节点和普通节点的电压; I_{jd} 为接地节点注入电流,即流过变压器中性点的偏磁直流。

将普通节点的电压方程展开:

$$\begin{bmatrix} Y_{pt1} & Y_{pt2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{jd} \\ U_{pt1} \end{bmatrix} = 0 \quad (14)$$

即

$$U_{pt1} = -Y_{pt2}^{-1} Y_{pt1} U_{jd} \quad (15)$$

通过电流场计算可得各接地点电压 U_{jd} ,由式(15)得到普通节点电压 U_{pt1} ,则流过变压器中性点偏磁直流为

$$I_{jd} = Y_{jd} \begin{bmatrix} U_{jd} \\ U_{pt1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

为进一步实现变压器直流偏磁程度的有效评估,选取变压器中性点直流量、励磁电流波形畸变偏移度等作为特征量进行分析。对于一个频率为 $\frac{1}{T}$ 的周期信号,其直流分量为傅里叶分解的第0次谐波含量,由此可求得励磁电流直流分量为

$$I_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (17)$$

式中, $i(t)$ 为励磁电流表达式。

总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)表征励磁电流波形畸变程度,其值表示为不大于某特定阶数 N 的所有谐波分量有效值与基波分量有效值之比的方根:

$$T_{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^N \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \quad (18)$$

式中, I_n 、 I_1 分别为励磁电流谐波分量有效值和基波分量有效值。

由于变压器正常运行下励磁电流包含高次谐波,随着中性点直流量注入幅值增大,谐波含量增加,波形畸变程度进一步增大,则波形畸变率偏移度计算公式为

$$\Delta T = \frac{T - T_0}{T_0} \times 100\% \quad (19)$$

式中, T 、 T_0 分别为变压器已发生和未发生直流偏磁时的总谐波畸变率。

现有110 kV及以上电压等级变压器中性点承受最大直流如下:国家电网公司规定为3 A,南方电网公司规定为5 A^[30]。结合波形畸变率偏移度,建立变压器受杂散电流影响评估指标,如表1所示。

由此,针对地铁运行不同工况,基于所提模型计算中性点直流和励磁电流,结合相应的评估指标,实现变压器受杂散电流干扰的量化分析。

表 1 变压器直流偏磁影响评估指标

Table 1 Transformer DC bias effect evaluation index

指标类型	范围	影响强弱
中性点直流量	<3 A	弱
	3~5 A	较强
	>5 A	严重
畸变率	<10%	弱
	10%~30%	较强
	>30%	严重

3 仿真建模与结果分析

根据某市地铁线路运营参数,建立单区间双端供电模型,供电区间长 2 km。考虑机车的实际运行工况,仿真模拟机车在线数量和运行策略如表 2 所示。假设距离该供电区间中点位置 100、500、1 000 m 存在观测点 A、B、C,研究机车不同运行工况下地表电位动态变化特征和变压器直流偏磁情况。由于轨地过渡电阻和土壤电阻率分别影响杂散电流泄漏程度和地电位波动变化,考虑地铁实际运行环境^[31-32],仿真选择轨地过渡电阻为 6 Ω·km,土壤电阻率为 300 Ω·m。

表 2 地铁机车运行工况模拟

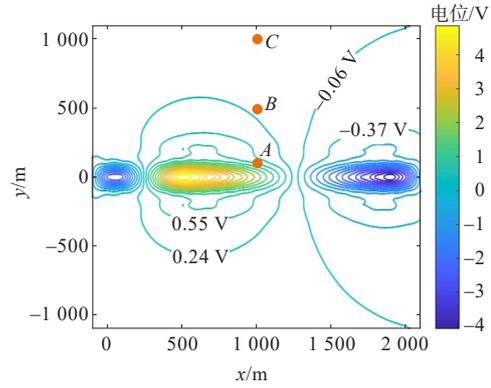
Table 2 Simulation of metro train running condition

序号	机车数量/辆	机车位置/km	工况描述	牵引电流/A
1	1	0.5	牵引	+2 000
2	2	0.5、1.5	牵引	+2 000、+2 000
3	2	0.5、1.5	牵引、制动	+2 000、-2 000
4	3	0.5、1.0、1.5	牵引、制动、牵引	+2 000、-2 000

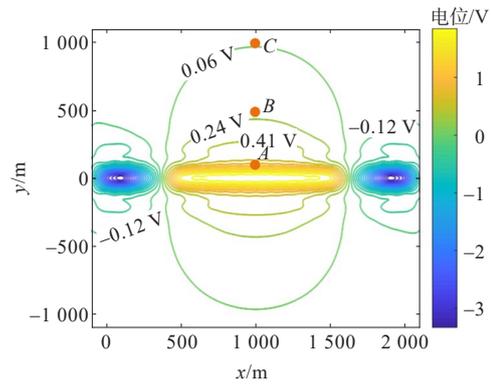
3.1 杂散电流场引起地电位分析

如图 10 所示,地铁运行工况对附近地电位影响明显,基本在机车位置处达到地电位极值最大,并向四周扩散。同时,等位线越远离线路越稀疏,表明地电位变化逐渐平缓,受杂散电流的干扰影响越小。

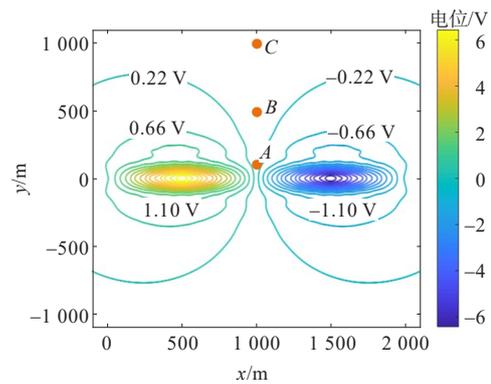
在计算域内,单机车牵引加速运行下,地电位最大值为 5.15 V,最小值为 -4.37 V,最大电位差 9.52 V;2 辆机车同时加速运行,地电位最大值为 2.02 V,最小值为 -3.50 V,最大电位差 5.52 V;1 辆机车牵引加速运行、1 辆机车制动减速运行时,地电位最大值为 6.87 V,最小值为 -6.87 V,最大电位差 13.74 V;两端机车加速运行,中间机车制动减速运行,地电位最大值为 1.69 V,最小值为 -5.03 V,最大电位差 6.72 V。同时,垂直供电区间中点处的电



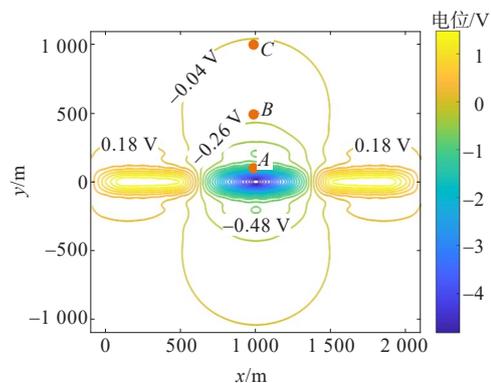
(a) 1 辆机车牵引加速下电位分布



(b) 2 辆机车牵引加速下电位分布



(c) 1 辆机车牵引加速 1 辆机车制动减速下电位分布



(d) 2 辆机车牵引加速 1 辆机车制动减速下电位分布

图 10 机车不同牵引工况下地电位分布

Figure 10 Ground potential distribution diagram of metro train under different traction conditions

位分布如表3所示,当靠近机车附近时,地电位数明显增大;相较于机车数量,机车运行工况对地电位波动变化影响更明显。

表3 地电位观测结果

Table 3 Ground potential observation results

地铁运行 工况序号	地电位/V		
	观测点A	观测点B	观测点C
1	0.800	0.190	0.050 0
2	0.800	0.190	0.050 0
3	0.006	0.002	0.000 2
4	-1.360	-0.198	-0.046 0

仿真结果表明,单机车运行时引起的地电位极值差异明显;随着机车数量增加,相同的运行工况下地电位分布整体变化不明显;但处于不同运行工况下,尤其是相邻机车处于不同工况且机车间距离越相近时,可一定程度平衡地电位分布变化,大地电位明显降低。

3.2 接地变压器直流偏磁影响分析

以文4.1的最大电位值和最小值作为变电站1、2的接地点电位,以观测点A的地电位值作为变电站3的接地点电位。变电站等效接地电阻取 $0.5\ \Omega$,220 kV输电线路型号为LGJ-300,单位长度电阻为 $0.18\ \Omega/\text{km}$,线路长度取2 km。根据接地变压器所在地电位和线路长度,计算变压器偏磁直流如表4所示。

表4 最大电位差下变压器偏磁直流计算结果

Table 4 Calculation results of transformer DC bias under maximum potential difference

地铁运行 工况序号	最大地电位差/ V	变电站1 中性点直流/A	影响 评估
1	9.52	6.47	严重
2	5.52	3.35	较强
3	13.74	9.53	严重
4	6.72	4.56	较强

如表4所示,当1辆机车加速、1辆机车制动减速时,变电站1的接地点电位达到最大时,其流经中性点的直流电流达到最大,为9.53 A,直流偏磁现象严重;当有多辆机车同时运行且存在不同的牵引策略时,即工况2、4,可有效平衡地电位使中性点电流有所减小。

根据地电位差,对变电站1进一步建立变压器直流偏磁仿真模型。利用可调直流电压源 U_s 模拟地电位差,仿真得到机车不同牵引工况下励磁电流波形,如图11所示。由图11(a)可知,外施可调直流

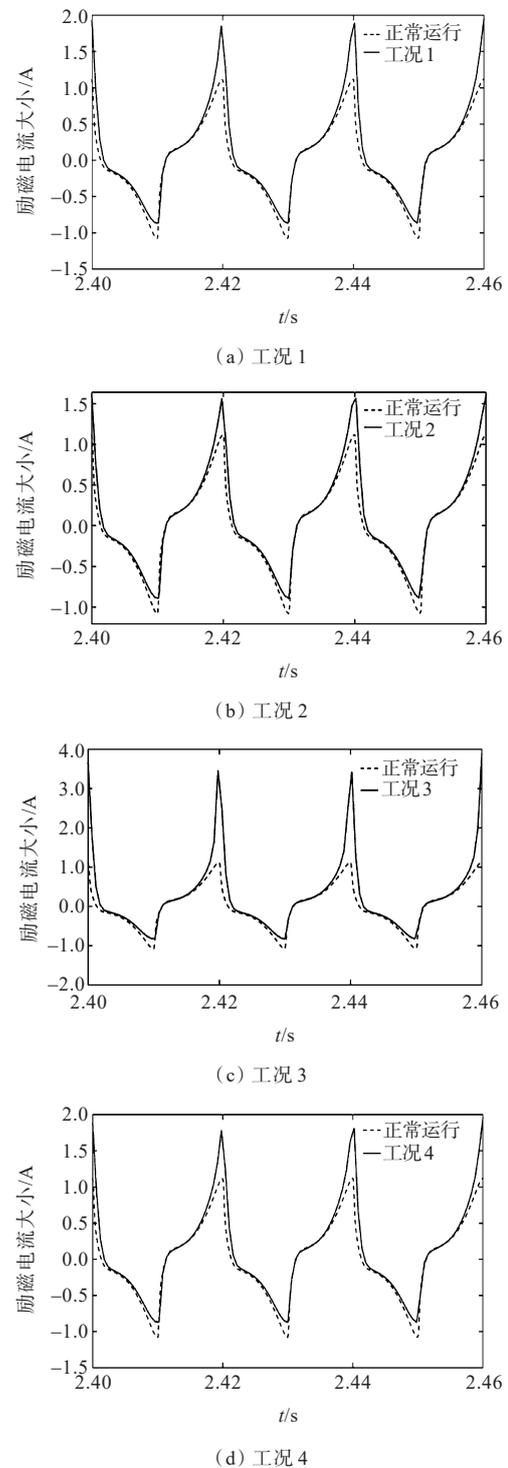


图11 机车不同牵引工况下励磁电流波形

Figure 11 Waveform diagram of excitation current under different traction conditions of metro train

电压源 U_s 为0时,励磁电流幅值为1.118 A,其波形沿正负半轴对称;当地铁处于工况1时,最大地电位差为9.52 V,直流电注入变压器中性点,铁芯饱和,在交流磁通和直流磁通的共同作用下,励磁电流谐波含量增加,其幅值为1.858 A,波形发生畸变;当机车处于工况2、4时,变压器励磁电流幅值分别为

1.565 A、1.785 A;由图 11(c)得知,机车处于运行工况 3 时,地电位差最大为 13.74 V,励磁电流波形畸变最为严重,幅值达到 3.459 A。由此可知,随着最大地电位差数值不断增大,注入变压器中性点的直流量也随之增大,励磁电流畸变程度加剧。

进一步利用快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 对励磁电流谐波含量进行分析,如图 12 所示。

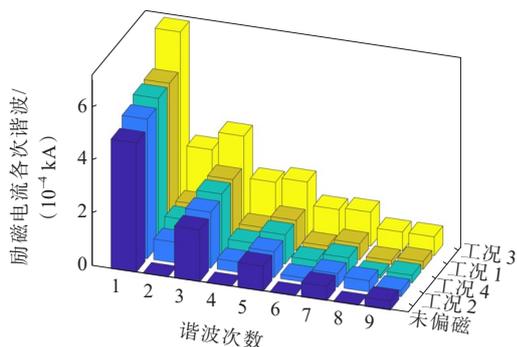


图 12 机车不同牵引工况下励磁电流谐波含量

Figure 12 Harmonic content diagram of excitation current under different traction conditions of metro train

由图 12 可知,变压器正常运行时,励磁电流仅包含奇次谐波;当机车处于运行工况时,变压器发生直流偏磁,励磁电流奇偶次谐波共存;随着机车运行工况的改变,励磁电流谐波含量大小也发生改变。

根据图 11、12 的励磁电流周波数据,令 $N=9$,由式(17)~(19)可求得励磁电流直流分量及其谐波畸变率偏移度,计算结果如表 5 所示。地铁机车未运行时,由于铁芯磁滞特性,变压器正常工作时励磁电流为包含高次谐波的非正弦尖顶波,其直流分量仅为 0.006 A,电流谐波畸变率为 46.6%,畸变率偏移度为 0;单机车运行时,即工况 1 情况下,变压器偏磁程度受地铁运行影响较强,励磁电流直流分量为 0.121 A,其畸变率达到 53.9%,畸变率偏移度为 15.67%;随着机车数量的增加,相同工况下地电位偏移降低,即机车处于工况 2 时,对比工况 1,励磁电流直流分量减小了 0.035 A,畸变率也降低为 49.2%,畸变率偏移度仅为 5.58%,变压器直流偏磁现象得到改善;机车处于工况 3 即多机车不同工况运行且间距较远时,变压器直流偏磁最严重,励磁电流直流分量为 0.249 A,畸变率高达 79.7%,畸变率偏移度为 71.03%;当机车处于工况 4,即相邻机车处于不同运行工况且间距减小时,对比工况 3,励磁电流直流分量为 0.116 A,畸变率减小了 26.8%,畸变率偏移度减小为 13.52%。综合中性点直流偏

磁电流和畸变率偏移度,可认为地铁运行在工况 3 下,变电站 1 受直流偏磁影响程度较为严重。

表 5 机车运行工况对变压器直流偏磁的影响
Table 5 Influence of train operation condition on transformer DC bias

运行工况序号	励磁电流直流分量/A	励磁电流基波分量/A	谐波畸变率/%	畸变率偏移度/%	影响评估
1	0.121	0.558	53.9	15.67	较强
2	0.086	0.526	49.2	5.58	弱
3	0.249	0.700	79.7	71.03	严重
4	0.116	0.553	52.9	13.52	较强

上述仿真结果及计算分析表明,机车运行工况对地铁沿线变压器直流偏磁影响明显。单机车运行、多机车处于不同运行工况且间距较远时,钢轨泄漏的杂散电流引起的地电位波动较大,变压器直流偏磁较为严重;多辆机车同时运行且工况不同时,间距越小,地电位波动越小,从一定程度上削弱杂散电流对附近变压器直流偏磁程度的影响。由此,基于地铁杂散电流引起的地电位分布结果和交流电网等效电阻模型以及变压器直流偏磁模型,可通过仿真计算实现地铁杂散电流对变压器直流偏磁影响的有效评估。

4 结语

针对地铁杂散电流引起沿线变压器直流偏磁问题,提出了基于地电位耦合的变压器直流偏磁评估模型。通过建立杂散电流分布电阻网络模型,分析了地铁运行下,钢轨电位和杂散电流的动态变化过程;进一步基于 CDEGS 仿真软件,实现了杂散电流的动态模拟与电场计算;根据机车动态运行下的电流场分布结果,结合交流电网等值电阻网络模型,实现了接地变压器偏磁直流的数值计算和励磁电流的仿真模拟,利用中性点直流量和波形畸变率偏移度指标,可有效评估变压器受杂散电流影响的直流偏磁程度。研究表明,机车运行工况对变压器直流偏磁影响明显,针对长线路多机车运行情况,减小机车间距,合理优化机车运行工况的牵引策略组合方式,可以有效平衡沿线地电位波动变化从而降低电位偏移,削弱地铁杂散电流对周围接地变压器直流偏磁的干扰。

参考文献:

[1] 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.
- [2] 刘炜,郑杰,李田,等.排流装置对直流牵引供电系统杂散电流分布的影响[J].电工技术学报,2022,37(18): 4565-4574.
- LIU Wei, ZHENG Jie, LI Tian, et al. The influence of drainage device on stray current distribution in DC traction power supply system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4565-4574.
- [3] 郑涛,何瑞,潘志远,等.MMC-HVDC换流变压器复杂性涌流产生机理及其影响分析[J].电力系统自动化,2022, 46(23): 102-108.
- ZHENG Tao, HE Rui, PAN Zhiyuan, et al. Analysis on generation mechanism and influence of complex inrush current in MMC-HVDC converter transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 102-108.
- [4] 李峰,孟圣坤,陆飞,等.基于监督学习的直流偏磁特征分析及评价方法研究[J].智慧电力,2023,51(8): 111-118.
- LI Feng, MENG Shengkun, LU Fei, et al. Characteristic analysis and evaluation method of DC magnetic bias based on supervised learning[J]. Smart Power, 2023, 51(8): 111-118.
- [5] 倪砚茹,喻锟,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.
- [6] 肖黎,张晶焯,陈龙,等.地铁杂散电流造成的电网变压器直流偏磁特征量分析[J].南方电网技术,2021,15(5):129-134.
- XIAO Li, ZHANG Jingzhuo, CHEN Long, et al. Analysis on the DC magnetic bias characteristic of transformer in power system caused by the subway stray current[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(5): 129-134.
- [7] 姜言金,刘栩霏,徐晓东,等.基于多场耦合的变压器直流偏磁噪声异常表征[J].电网与清洁能源,2023,39(1):11-19.
- JIANG Yanjin, LIU Xufei, XU Xiaodong, et al. Anomaly characterization of transformer DC bias noise based on multi-field coupling[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 11-19.
- [8] 王子昂,孟润泉,韩肖清.微电网与配电网间串联补偿变压器直流偏磁抑制策略研究[J].电测与仪表,2022,59(1): 127-133.
- WANG Ziang, MENG Runquan, HAN Xiaoqing. Research on DC bias suppression strategy of series compensation transformer between micro-grid and distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 127-133.
- [9] 宋奇珂,王丰华.大型变压器直流偏磁下电磁振动特征研究[J].高压电器,2023,59(10): 129-139.
- SONG Qike, WANG Fenghua. Research on electromagnetic vibration features of large-scaled transformer under DC bias[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 129-139.
- [10] 王振,张艳丽,张殿海,等.直流偏磁下单相变压器铁心实验模型局部磁致形变测量与模拟[J].中国电机工程学报,2021,41(12): 4316-4325.
- WANG Zhen, ZHANG Yanli, ZHANG Dianhai, et al. Measurement and modelling of local deformation caused by magnetism in the single-phase transformer core experimental model under DC bias[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4316-4325.
- [11] CHEN J Q, WANG D, CHENG S W, et al. Influence of DC-biased magnetic induction on magnetic property of silicon steel[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(5): 1-7.
- [12] 李长云,郝爱东,娄禹.直流偏磁条件下电力变压器振动特性研究进展[J].电力自动化设备,2018,38(6): 215-223.
- LI Changyun, HAO Aidong, LOU Yu. Status and progress of research on transformer vibration characteristics with DC bias[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 215-223.
- [13] 王泽忠,李明洋,宣梦真,等.单相四柱式变压器直流偏磁下的温升试验及仿真分析[J].电工技术学报,2021,36(5): 1006-1013.
- WANG Zezhong, LI Mingyang, XUAN Mengzhen, et al. Temperature rise test and simulation of single-phase four-column transformer under DC-bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 1006-1013.
- [14] 郑子璇,杜贵府,朱成乾.城轨多区间绝缘非均匀情况下钢轨电位与杂散电流建模及分布[J].北京交通大学学报,2020,44(3): 66-78.
- ZHENG Zixuan, DU Guifu, ZHU Chengqian. Modeling and distribution of rail potential and stray current with non-uniform insulation in multiple sections of urban rail transit[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(3): 66-78.
- [15] 澹台乐琰,韩肖清,王磊,等.多列车运行下地铁杂散电流建模仿真[J].电测与仪表,2020,57(22): 7-16.
- TANTAI Leyan, HAN Xiaoqing, WANG Lei, et al. Modeling and simulation of stray current in subway with multi-train operation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(22): 7-16.
- [16] 史云涛,赵丽平,林圣,等.城市电网中地铁杂散电流分布规律及影响因素分析[J].电网技术,2021,45(5): 1951-1957.
- SHI Yuntao, ZHAO Liping, LIN Sheng, et al. Analysis of distribution of metro stray current in urban power grid

- and its influencing factors[J]. Power System Technology, 2021,45(5): 1951-1957.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 李坤泉.直流地表电位分布计算及其对电力系统直流偏磁影响研究[D].成都:西南交通大学,2021.
LI Kunquan. Calculation of DC earth surface potential distribution and its influence on power system DC bias [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [21] 耿山,樊艳芳,巩晓玲,等.特高压直流接地极周边地表电位分布计算与敏感性参数研究[J].高压电器,2019,55(3): 163-169.
GENG Shan, FAN Yanfang, GONG Xiaoling, et al. Calculation of earth surface potential around UHVDC grounding electrode and analysis on sensitive parameters [J]. High Voltage Apparatus, 2019,55(3): 163-169.
- [22] 辛全金,李晓华,杨义,等.基于冗余卷积编解码器的变压器噪声抑制[J].中国电力,2023,56(4): 112-118.
XIN Quanjin, LI Xiaohua, YANG Yi, et al. Research on transformer noise suppression based on redundant convolutional encoder decoder[J]. Electric Power, 2023,56(4): 112-118.
- [23] 裴润生,赖绮瑄,梁活航.计量设备故障下交流微电网缺失电量智能追补[J].供用电,2023,40(5): 92-99.
PEI Runsheng, LAI Qixuan, LIANG Huohang. Smart catch-up for missing power in AC microgrid under metering equipment failure[J]. Distribution & Utilization, 2023,40(5): 92-99.
- [24] 陆云才,廖才波,李群,等.基于声纹特征和集成学习的变压器缺陷诊断方法[J].电力工程技术,2023,42(5): 46-55.
LU Yuncai, LIAO Caibo, LI Qun, et al. Transformer fault diagnosis method based on voiceprint feature and ensemble learning[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023,42(5): 46-55.
- [25] 童轶,祝全乐,贺立,等.直流偏磁对换流变压器运行影响分析[J].高电压技术,2021,47(6): 2206-2213.
TONG Yi, ZHU Quanle, HE Li, et al. Analysis on DC bias impact on converter transformers operation[J]. High Voltage Engineering, 2021,47(6): 2206-2213.
- [26] 李晓萍,文习山,蓝磊,等.单相变压器直流偏磁试验与仿真[J].中国电机工程学报,2007,27(9): 33-40.
LI Xiaoping, WEN Xishan, LAN Lei, et al. Test and simulation for single-phase transformer under DC bias [J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(9): 33-40.
- [27] 乔峰,何英发,翁汉琮,等.变压器直流偏磁对无功功率影响的仿真分析[J].电力科学与技术学报,2016,31(4): 102-108.
QIAO Feng, HE Yingfa, WENG Hanli, et al. Simulation analysis on the effect of transformers DC magnetic biasing to reactive power consumption[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016,31(4): 102-108.
- [28] 刘明杰.基于CDEGS的杂散电流动态特性分析[D].成都:西南交通大学,2018.
LIU Mingjie. Study on dynamic characteristics of metro stray current based on CDEGS[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [29] 王果,裴潇湘.地铁常用隧道杂散电流场三维有限元模拟[J].铁道科学与工程学报,2014,11(6): 85-91.
WANG Guo, PEI Xiaoxiang. Three-dimensional finite element simulation of different subway tunnels under stray current fields[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014,11(6): 85-91.
- [30] 马书民,戎子睿,林湘宁,等.计及多类装置协同的直流偏磁治理设备全局优化配置研究[J].中国电机工程学报,2020,40(14): 4387-4399+4720.
MA Shumin, RONG Zirui, LIN Xiangning, et al. Study on the global optimal configuration of DC bias equipment considering the cooperation of multiple devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(14): 4387-4399+4720.
- [31] 王爱民,林圣,李俊逸,等.城市轨道交通长线路杂散电流仿真模型[J].高电压技术,2020,46(4): 1379-1386.
WANG Aimin, LIN Sheng, LI Junyi, et al. Stray current simulation model of the long line of DC metro systems [J]. High Voltage Engineering, 2020,46(4): 1379-1386.
- [32] 刘凤姣,粟锴,刘艳清,等.长沙地区土壤电阻率与气象因素关联性研究[J].现代农业科技,2018(21): 169-171+173.
LIU Fengjiao, SU Kai, LIU Yanqing, et al. Study on the correlation between soil resistivity and meteorological factors in Changsha area[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(21): 169-171+173.