

# 土壤结构对城轨中杂散电流分布的影响分析

周 奇, 林 圣, 邹全德, 李昱达

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

**摘 要:** 杂散电流分布受列车运行工况、供电区间长度、钢轨过渡电阻和土壤结构等多因素影响。研究杂散电流的影响因素是防治杂散电流的基础。为了研究土壤结构对城市轨道交通中杂散电流分布的影响, 构建含多层土壤结构的杂散电流仿真模型。基于该仿真模型, 分析均匀土壤、分层土壤中电阻率、土壤厚度等参数对杂散电流分布的影响。仿真结果表明, 土壤结构会影响排流网、辅助排流和大地中的电流分布, 而对沿线钢轨电位和总的杂散电流分布几乎没有影响。此外, 在分层土壤结构中, 首层土壤厚度越小或电阻率越大, 流向大地中的杂散电流越少。

**关键词:** 城市轨道交通; 土壤结构; 杂散电流; 仿真模型

中图分类号: U239.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2022)02-0010-07

## Influence of Soil Structure on Stray Current Distribution in Urban Rail Transit

ZHOU Qi, LIN Sheng, ZOU Quande, LI Yuda

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

**Abstract:** Harmful stray current has become a prominent problem with the rapid development of urban rail transit. The distribution of stray current is affected by several factors, such as train operating conditions, length of the power supply section, rail transition resistance, and soil structure. Studying the influencing factors of the stray current is required for preventing it. In this study, a stray current simulation model with a multi-layer soil structure is constructed to study the influence of soil structure on the distribution of stray current in urban rail transit. Based on this model, the effects of resistivity and soil thickness in uniform and layered soil on the stray current distribution are analyzed. The simulation results show that the soil structure affects the current distribution in the drainage network, auxiliary drainage, and the ground, but has little effect on the rail potential and the total stray current distribution along the line. In addition, in the layered soil structure, the less the thickness of the first layer of soil or the greater the resistivity, the less stray current flows to the earth.

**Keywords:** urban rail transit; soil structure; stray current; simulation model

城市轨道交通主要采用直流供电, 由于钢轨无法与大地完全绝缘, 使得钢轨对地具有一定的钢轨电位, 导致部分电流从钢轨泄漏至大地, 形成杂散电流<sup>[1]</sup>。城市轨道交通以其运量大、绿色环保等优势得到快速

收稿日期: 2021-10-30 修回日期: 2021-11-20

第一作者: 周奇, 男, 博士研究生, 从事轨道交通杂散电流评估与抑制等研究, zqi@my.swjtu.edu.cn

导师简介: 林圣, 男, 教授, 博士生导师

基金项目: 四川省重点研发项目(2021YFG0101), 国家自然科学基金项目(U2166212)

引用格式: 周奇, 林圣, 邹全德, 等. 土壤结构对城轨中杂散电流分布的影响分析[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(2): 10-16.

ZHOU Qi, LIN Sheng, ZOU Quande, et al. Influence of soil structure on stray current distribution in urban rail transit[J].

Urban rapid rail transit, 2022, 35(2): 10-16.

发展。地铁线网的大规模、高密度运行带来了严重的杂散电流问题。杂散电流不仅会加速隧道结构钢筋、接地网、地铁线路周围的天然气管道、水管等埋地金属的腐蚀<sup>[2-4]</sup>,还会流入城市电网接地变压器导致变压器出现直流偏磁<sup>[5-7]</sup>现象,危及变压器运行安全。如上海地铁2号线沿线世纪大道下的燃气管道,由于杂散电流腐蚀,已经发生了数十次泄漏事故<sup>[4]</sup>;深圳市500 kV深圳站主变压器由于长期处于直流偏磁振动异常状态,导致出现绝缘抱箍松动、紧固件松脱、绕组过热等情况,严重威胁主变压器运行安全<sup>[7]</sup>。为此,国内外已发布了一系列标准用于防治杂散电流<sup>[1,8]</sup>。然而,城市轨道交通跨度大,且沿线土壤地质环境复杂,因此,有必要就土壤结构对杂散电流分布的影响展开研究,以指导杂散电流防治。

大地土壤随着深度的增加而呈现不同的类型,且表现出不同的电阻率。典型的土壤分层结构由上至下依次为:有机质层、表土层、淀积层、风化层、基岩层<sup>[9]</sup>。在电力系统行业已经就土壤分层结构对接地设备的性能开展了广泛研究。如文献[10]考虑土壤水平分层结构提出了一种基于复镜像法获取土壤电阻率的方法,提高了土壤电阻率计算精度。文献[11]考虑土壤结构对接地电阻的影响,建立了直流分布的完整计算模型,探讨了多层水平土壤情况下直流分布的规律。文献[12]考虑冲击电流在分层土壤中的散流过程具有明显的非线性变化特征,从电磁场理论出发,建立了分层土壤结构中接地装置冲击特性分析的有限元模型。文献[13]基于国际接地计算软件CDEGS,仿真分析了土壤各层电阻率及厚度对接地网接地电阻的影响规律。

同样地,城市轨道交通中由钢轨、排流网、辅助排流网构成的回流系统性能也受土壤结构的影响。文献[14]考虑城市轨道交通沿线土壤电阻率均匀分布仿真分析了杂散电流的动态特性。文献[15]仿真分析了沿地铁线土壤电阻率不均匀分布情况下沿线杂散电流分布,仿真结果表明随着土壤电阻率的增加,排流网收集效率增加。文献[16]考虑分层土壤结构建立了杂散电流计算的集总参数模型,仿真分析了均匀土壤结构和多层土壤结构工况下,杂散电流对埋地管道对地电位的影响。可见土壤结构是影响杂散电流大小和分布的因素之一,但各层土壤厚度及电阻率对杂散电流分布的影响尚不明确。为此,本文搭建了含分层土壤结构的杂散电流仿真模型。进一步分析了均匀土壤、

分层土壤中电阻率、土壤厚度等对杂散电流分布的影响。

## 1 含分层土壤结构的杂散电流仿真模型

城市轨道交通的直流供电系统主要由牵引所、牵引网、回流系统和列车等部分组成,如图1所示。

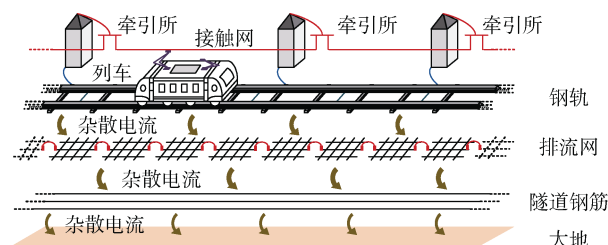


图1 直流牵引供电系统

Figure 1 DC traction power supply system

根据系统的结构,考虑杂散电流的流动路径,构建如图2所示的杂散电流仿真模型。该模型为二维平面的电阻网络结构,图中每个电流源表示牵引所或者列车。每个电流源的位置和实际牵引所或者列车的位置吻合,其具体的取值需要通过潮流计算获得<sup>[17]</sup>。基于此,牵引供电系统被 $m$ 个电流源划分为 $(m+n-1)$ 个计算区间, $m$ 表示列车数量, $n$ 表示牵引所数量。每个区间由多个微分电阻组成。模型中 $R_r$ 表示钢轨纵向电阻,其取值取决于钢轨材料、焊接工艺和钢轨腐蚀程度等多方面因素,通常可通过测试或者合理估计确定。考虑钢轨的腐蚀, $R_r$ 的取值范围为 $15\sim 40\text{ m}\Omega/\text{km}$ 。 $R_s$ 表示排流网电阻, $R_e$ 表示辅助排流网电阻,二者取值均取决于排流网材料、钢筋数量、钢轨间距、混凝土电阻等因素。 $R_d$ 表示等效大地电阻,取值取决于土壤结构。

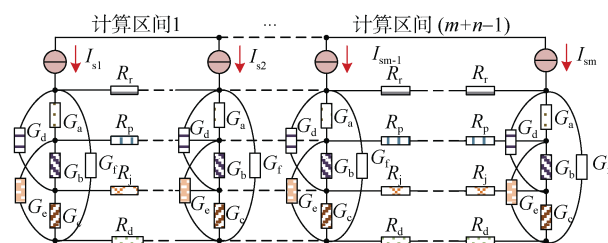


图2 杂散电流仿真模型

Figure 2 Stray current simulation model

在分层土壤结构中,不同土壤层存在不同的电阻率和深度。以深圳市为例,其大陆区区域的等效土壤分层依次为:有机质层、表土层、淀积层、基岩层<sup>[18]</sup>,深度分别为0、15、35、45 m,电阻率分别为200、600、

50、5 000  $\Omega \cdot m$ 。而不同地区由于其环境气候等因素,土壤分层结构存在差异。基于此,本文构建了含任意多层土壤结构的杂散电流仿真模型,等效多层土壤结构的建模如下。

考虑到杂散电流在一定范围内传播,大地土壤被等效为正方体结构,如图 3 所示。 $l$  表示杂散电流的传播范围,其值可以基于土壤电阻率等因素的考虑进行合理设置。 $dx$  表示  $x$  方向的单位长度,即列车运行的方向。 $h_m$  表示第  $m(m=1, \dots, u)$  层土壤的厚度, $u$  表示总的土壤层数。 $\rho_m(m=1, \dots, u)$  表示第  $m$  层土壤的电阻率。在分层土壤结构中, $\rho_m$  和  $h_m$  的取值通常可从地质部门获得,也可以采用实测反演的方法来确定<sup>[19]</sup>。式中,土壤模型中最后一层土壤层  $h_u$  的厚度可以通过公式(1)确定。

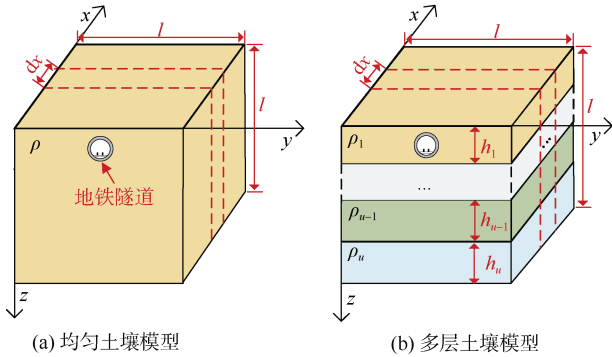


图 3 等效土壤模型

Figure 3 Equivalent soil model

$$h_u = l - \sum_{m=1}^{m=u-1} h_m \quad (1)$$

当  $u=1$  时,大地为均匀土壤结构,图 2 中的大地电阻可通过公式(2)进行估计。当  $u \neq 1$  时,大地为多层土壤结构,每一层土壤电阻由  $R_{sm}(m=1, \dots, u)$  表示,通过公式(3)估计。进一步地,考虑多层土壤在水平方向上的并联结构,则大地电阻可以被估计。

$$R_d = R_s = \rho \frac{dx}{l^2} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{R_d} = \sum_{m=1}^{m=u} \frac{1}{R_{sm}} \\ R_{sm} = \rho_m \frac{dx}{lh_m} (m=1, \dots, u) \end{cases} \quad (3)$$

$G_a$ 、 $G_b$ 、 $G_c$ 、 $G_d$ 、 $G_e$ 、 $G_f$  分别表示杂散电流仿真模型中各电阻层之间的电导。其中  $G_a$ 、 $G_d$ 、 $G_f$  主要由扣件材料、绝缘垫性能等因素决定,标准中规定钢轨

对地电阻或钢轨对排流网电阻需要大于 15  $\Omega/km$ , 即相应电导需要小于 0.06 S/km。 $G_b$  主要取决于混凝土电阻和尺寸,混凝土电阻通常为 10~250  $\Omega/km$ 。上述电导值几乎不受到土壤结构的影响。然而排流网对地电导  $G_e$  和辅助排流网对地电导  $G_c$  需要考虑土壤结构变化带来的影响。借鉴多层土壤结构对接地网接地电阻的研究, $G_e$  和  $G_c$  可以通过矩量法或者通过 CDEGS 仿真获得<sup>[20]</sup>。

杂散电流仿真模型的微分单元如图 4 所示。为了求解杂散电流分布,基于基尔霍夫定律建立任意位置的基尔霍夫电压和电流方程(4),其中  $F$  表示微分单元中的电压和电流,如公式(5)所示, $X$  表示电阻网络矩阵。

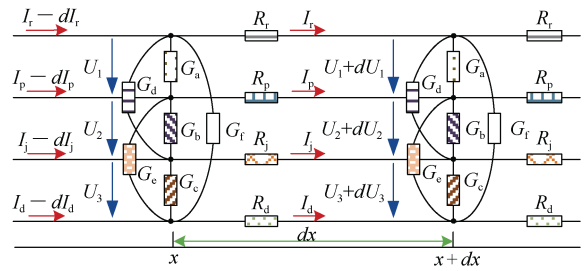


图 4 杂散电流仿真模型的微分单元

Figure 4 Differential element of the stray current simulation model

$$\frac{d}{dx} F^T = X F^T \quad (4)$$

$$F = [U_1, U_2, U_3, I_r, I_p, I_j, I_d] \quad (5)$$

对基尔霍夫方程进行整理化解,可以获得任意位置处的电压和电流的解析解,如公式(6)所示。 $F$  是关于任意位置  $x$  的函数,其中  $D$  和  $\alpha$  分别是电阻网络矩阵  $X$  特征向量和特征值, $k$  是待求的未知系数。电流源作为边界条件,可计算解析解中的未知系数  $k$ 。

$$F(x)^T = D \times (k(x))^T \times e^{\alpha(x)} \quad (6)$$

杂散电流表示不按规定路径流通的电流。因此,任意位置处的杂散电流可以通过公式(7)求解。

$$I_{sc}(x) = F_5(x) + F_6(x) + F_7(x) \quad (7)$$

## 2 分层土壤对杂散电流的仿真分析

某地铁线采用 1500 V 直流供电,站点如图 5 所示。沿线共有 10 个车站,含 5 个牵引所,总距离为 10.73 km。假设沿地铁线路参数均匀分布,杂散电流仿真模型的主要参数如表 1 所示<sup>[21-23]</sup>。

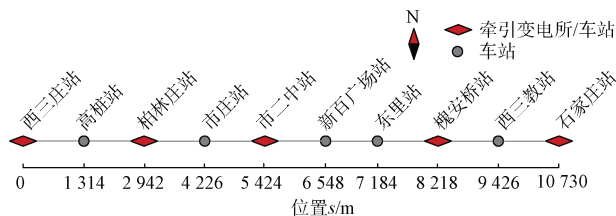


图5 地铁站点分布  
Figure 5 Distribution of metro stations

表1 杂散电流仿真模型主要参数  
Table 1 Main parameters of the stray current simulation model

参数	取值	参数	取值
$R_c/(\Omega/\text{km})$	0.008 0	$G_b/(\text{S}/\text{km})$	1.000 0
$R_r/(\Omega/\text{km})$	0.020 4	$G_c/(\text{S}/\text{km})$	37.969
$R_p/(\Omega/\text{km})$	0.062 0	$G_d/(\text{S}/\text{km})$	0.020 0
$R_f/(\Omega/\text{km})$	0.022 0	$G_e/(\text{S}/\text{km})$	3.336 9
$G_a/(\text{S}/\text{km})$	0.066 7	$G_f/(\text{S}/\text{km})$	0.010 0

假设沿线运行列车有 4 列，其位置和功率分布如表 2 所示。基于此，搭建杂散电流仿真模型。通过调整等效土壤模型，开展土壤结构对杂散电流的仿真分析。

表2 列车位置和电流  
Table 2 Train position and current

	列车 1	列车 2	列车 3	列车 4
列车位置/km	1.063	4.150	6.547	9.399
列车电流/A	3 107	-1 451	0	-1 015

列车位置和电流作为输入数据，通过潮流计算方法可获得地铁线各牵引所电流分布，如表 3 所示。由表 3 可知，列车 1 所在区间两端的牵引所电流为正值，而其他牵引所电流为负值。

表3 牵引所电流  
Table 3 Traction power substation current

牵引所 站点	西三庄站	柏林庄站	市二南站	槐安桥站	石家庄站
电流/A	1 651.5	427.2	-444.9	-509.0	-483.8

2.1 土壤结构对杂散电流的影响分析

为了分析土壤结构对杂散电流的影响，考虑均匀土壤结构和双层土壤结构建立了杂散电流计算模型。排流网和辅助排流网均简化为单根导体，可通过 CDEGS 估算不同土壤结构中的电导  $G_c$  和  $G_e$ ，如表 4 所示。假设其他参数不随土壤结构的变化而变化。在此基础上，仿真杂散电流和钢轨电位，如图 6 所示。排流网、辅助排流网和大地中的电流如图 7 所示。

表4 均匀土壤模型和双层土壤模型中的仿真参数  
Table 4 Simulation parameters in different soil models

仿真工况	A1	仿真工况	A2	A3
$u$	1	$u$	2	2
$l/\text{km}$	1	$l/\text{km}$	1	1
$h_1/\text{km}$	1	$h_1/\text{km}$	0.01	0.01
$\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	10	$\rho_1/(\Omega\cdot\text{m})$	10	1 000
		$\rho_2/(\Omega\cdot\text{m})$	1 000	10
$R_d/(\Omega/\text{km})$	0.01	$R_d/(\Omega/\text{km})$	0.502 5	0.010 1
$G_c/(\text{S}/\text{km})$	37.9694	$G_c/(\text{S}/\text{km})$	3.364 4	0.737 0
$G_e/(\text{S}/\text{km})$	35.5286	$G_e/(\text{S}/\text{km})$	3.336 9	0.651 5

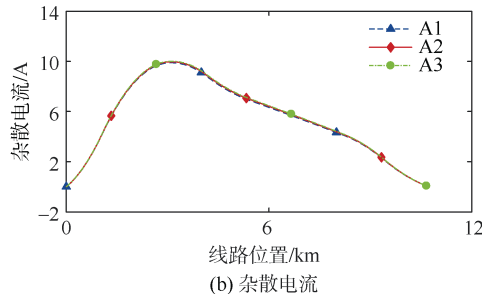
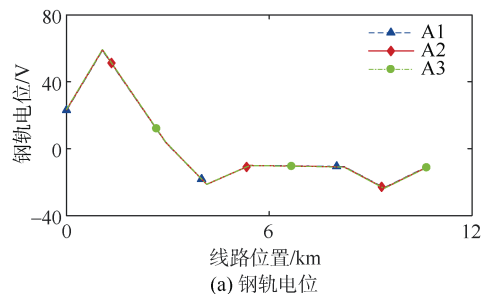


图6 仿真结果  
Figure 6 Simulation results

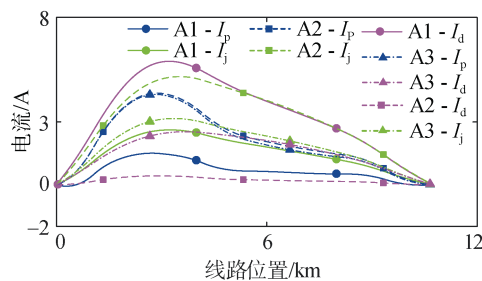


图7 不同土壤结构中排流网电流  $I_p$ 、辅助排流网电流  $I_j$  和大地电流  $I_d$

Figure 7 The current distribution in the stray current collection mat  $I_p$ , tunnel reinforcement  $I_j$  and ground  $I_d$  under different soil model conditions

仿真结果表明，沿线钢轨电位最大值出现在列车 1 的位置处，最大值为 59.13 V。杂散电流最大值出现在线路 1/4 的位置处，最大值为 9.96 A。此外，进一



步分析可见，双层土壤结构对总杂散电流分布和钢轨电位分布影响不大。由于钢轨泄漏的杂散电流主要取决于钢轨的绝缘性能，而钢轨绝缘性能主要取决于钢轨扣件、绝缘垫等结构<sup>[24-25]</sup>，不受到土壤结构的影响。因此双层土壤模型中的杂散电流分布与均匀土壤模型相同。钢轨电位主要取决于钢轨相关的电阻参数和钢轨电流。而钢轨相关的电阻参数没有变化，钢轨电流在不同工况中几乎一致。因此，钢轨电位也是相同的。

在工况 A1 中，大地电流远高于排流网和辅助排流网中的电流，大地电流的最大值为 5.89 A。在工况 A2 中，辅助排流网中的电流高于其他结构中的电流，最大值为 5.16 A。而大地电流几乎为零，这是由于在 A2 中大地电阻远远大于其他结构。在工况 A3 中，排流网中的电流高于其他结构中的电流，最大值为 4.32 A。与均匀土壤结构相比，双层土壤结构中排流网和辅助排流网中的电流增加。这是因为在双层土壤结构中，排流网和辅助排流网对地的电导较小，因此泄漏的电流较少。此外，由于排流网和辅助排流网中积累了更多电流，因此，双层土壤结构大地电流更少，而更少的大地电流意味着更少的埋地金属腐蚀。

2.2 土壤电阻率对杂散电流的影响分析

基于均匀土壤模型仿真分析了不同土壤电阻率对沿线杂散电流的影响，仿真工况如表 5 所示。由上节分析可知，土壤模型的改变几乎不影响沿线钢轨电位和总的杂散电流分布。为此，在本节及以下仿真分析中仅给出了不同工况下排流网、辅助排流网和大地电流分布。不同土壤电阻率下的仿真结果如图 8 所示。

表 5 不同土壤电阻率下的仿真参数  
Table 5 Simulation parameters under different soil resistivity

仿真工况	B1	B2	B3
$\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	10	100	1 000

由图 8 可知，在仿真工况 B1 中，大地电流远远大于其他结构中的电流，且最大值为 5.94 A。在仿真工况 B2 中，辅助排流网中的电流是最高的，最大值为 4.51 A。在仿真工况 B3 中，排流网中的电流是最高的，最大值为 5.23 A。随着土壤电阻率的增加，大地电流逐渐减小，排流网中的电流随着土壤电阻率的增加而增加。首先大地电阻随土壤电阻率的增大而增大；其次随着土壤电阻率的增加，排流网和辅助排流网的对地电导逐渐降低。因此，随着土壤电阻率的增加，排流网和辅助排流网将积累更多的电流。

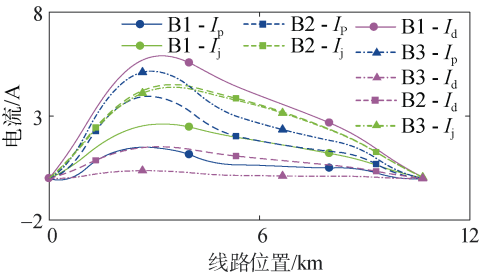


图 8 不同土壤电阻率中排流网  $I_p$ 、辅助排流网  $I_j$  和大地电流  $I_d$

Figure 8 The current distribution in the stray current collection mat  $I_p$ , tunnel reinforcement  $I_j$ , and ground  $I_d$  under different soil resistivity

2.3 分层土壤厚度对杂散电流的影响分析

构建双层土壤模型，设置首层土壤深度为 0 m，电阻率为 10  $\Omega\cdot\text{m}$ ，第 2 层土壤深度为 10 m，电阻率为 1000  $\Omega\cdot\text{m}$ 。通过调整土壤首层厚度，仿真分析了土壤层厚度对沿线杂散电流的影响，仿真工况如表 6 所示。排流网、辅助排流网和大地电流分布如图 9 所示。

表 6 不同土壤层厚度下的仿真参数  
Table 6 Simulation parameters under different soil layer thickness

仿真工况	C1	C2
$h_1/\text{m}$	10	100

由图 9 可知，在仿真工况 C1 中，辅助排流网中电流远远大于其他结构中的电流，且最大值为 5.16 A。在仿真工况 C2 中，同样是辅助排流网中的电流最高，且最大值为 5.17 A。随着土壤首层厚度的增加，大地电流逐渐增加，排流网中的电流逐渐减少。由于大地电阻随土壤首层的厚度增加而减小，因此大地中的电流逐渐增加。在 3.097 km 处，大地电流为 1.60 A，增加了 3.86 倍。

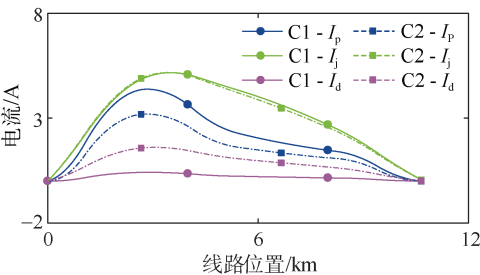


图 9 不同土壤层厚度中排流网  $I_p$ 、辅助排流网  $I_j$  和大地电流  $I_d$

Figure 9 The current distribution in the stray current collection mat  $I_p$ , tunnel reinforcement  $I_j$ , and ground  $I_d$  under different soil layer thickness

2.4 分层土壤电阻率对杂散电流的影响分析

构建双层土壤模型，设置首层土壤深度为 0 m，厚度为 10 m；第二层土壤深度为 10 m。通过调整首层和第 2 层土壤电阻率，仿真分析了分层土壤电阻率对沿线杂散电流的影响，仿真工况如表 7 所示。排流网、辅助排流网和大地电流分布如图 10 所示。

表 7 不同分层土壤结构下的仿真参数  
Table 7 Simulation parameters under different layered soil structures

仿真工况	土壤电阻率 $\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	
D1	10	1 000
D2	100	1 000
D3	1 000	10
D4	1 000	100

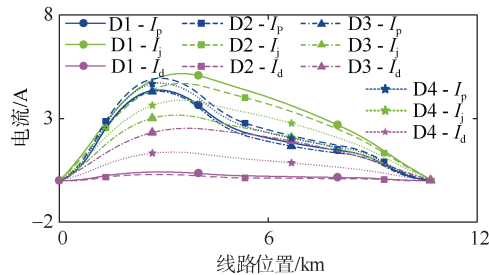


图 10 不同分层土壤结构下排流网、辅助排流网和大地电流

Figure 10 The current distribution in the stray current collection mat, tunnel reinforcement, and ground under different layered soil structures

由图 10 可知，在仿真工况 D1 中，辅助排流网中电流大于其他结构中的电流，且最大值为 5.16 A。在仿真工况 D2 中，辅助排流网中的电流同样是最高的，最大值为 4.68 A。在仿真工况 D3 中，排流网中的电流是最高，最大值为 4.32 A。在仿真工况 D4 中，排流网中的电流最高，最大值为 4.70 A。此外，大地电流在仿真工况 D1 和 D2 中最低，接近于零，D1 中大地电流最大值仅为 0.41 A。更小的大地电流意味着更少的埋地金属腐蚀。考虑更为准确的土壤结构可以更为准确地评估杂散电流对埋地金属腐蚀的影响。比较图 10 中的 D1 和 D2，可以发现当土壤首层电阻率增大时，辅助排流网和大地中的电流减少，排流网的电流增加。由于土壤首层电阻率增加，大地电阻增加且排流网和辅助排流网对地电导减弱。基于此，排流网中电流是更大的，因为流出排流网的电流更小。从排流网流入辅助排流网的电流减少，所以辅助排流网的

电流是减少的。比较图 10 中的 D3 和 D4，可以发现随着第二层土壤电阻率增加，大地电流是减少的，而排流网和辅助排流网中的电流是增加的，这也可以基于上述理论进行解释。

3 结论

本文建立了含土壤模型的杂散电流仿真模型，仿真分析了土壤结构对杂散电流的影响。仿真分析表明土壤模型会影响排流网、辅助排流和大地中的电流分布，而对沿线钢轨电位和总的杂散电流分布几乎没有影响。土壤模型对排流网、辅助排流网和大地中电流分布的影响是复杂的，这取决于土壤模型参数的综合影响。在均匀土壤模型中，土壤电阻率越大，流向大地中的电流越少。在分层土壤结构中，首层土壤厚度越小或电阻率越大，流向大地中的杂散电流越少。大地中的电流越少，意味着更少的埋地金属腐蚀。

参考文献

[1] 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: GB/T 28026.2-2018[S]. 北京: 中国质检出版社, 2018.  
Railway applications-fixed installations- electrical safety, earthing and the return circuit-part 2: provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems: GB/T 28026. 2-2018[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2018.

[2] GU J, YANG X, ZHENG T Q, et al. Negative resistance converter traction power system for reducing rail potential and stray current in the urban rail transit[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2020, 7(1): 225-239.

[3] 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.

[4] 陈志光, 秦朝葵, 计雪松. 上海轨道交通二号线杂散电流测试分析[J]. 腐蚀与防护, 2008(6): 344-347.  
CHEN Zhiguang, QIN Zhaokui, JI Xuesong. Testing and analysis of stray current of Shanghai rail traffic line 2[J]. Corrosion & protection, 2008(6): 344-347.

[5] WANG A, LIN S, WU J, et al. Relationship analysis between metro rail potential and neutral direct current of nearby transformers[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2021.

[6] 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.
- [7] 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.
- ZHANG Bin, HUANG Weizhao, CHEN Xiao. Probe into impacts of DC magnetic bias on main transformer in Shenzhen power grid and its countermeasures[J]. Smart power, 2014, 42(12): 69-72.
- [8] Railway applications-fixed installations-part 2: protective provisions against the effects of stray current caused by dc traction supply system: EN 50122-2[S]. Brussels, 2012.
- [9] TAXONOMY S. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys: soil survey staff[J]. U.S. department of agriculture, 436, 1975.
- [10] ZHANG B, CUI X, LI L, et al. Parameter estimation of horizontal multilayer earth by complex image method[J]. IEEE transactions on power delivery, 2005, 20(2): 1394-1401.
- [11] 潘卓洪, 张露, 林进弟, 等. 多层水平土壤对交流电网直流分布的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 855-862.
- PAN Zhuohong, ZHANG Lu, LIN Jindi, et al. Influence of horizontal multi-layer soil on DC current distribution in AC power grid[J]. High voltage engineering, 2012, 38(4): 855-862.
- [12] 朱时阳, 袁涛, 朱彬. 分层土壤中接地装置冲击散流特性的有限元分析模型[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2304-2309.
- ZHU Shiyang, YUAN Tao, ZHU Bin. Finite element model of impulse dispersing characteristics of grounding equipment in layered soil[J]. Power system technology, 2014, 38(8): 2304-2309.
- [13] 柴艳莉. 基于三层土壤模型的水电站接地系统优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- CHAI Yanli. The grounding system optimization of hydro-power station based on the three-layer soil model[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [14] LIN S, ZHOU Q, LIN X, et al. Infinitesimal method based calculation of metro stray current in multiple power supply sections[J]. IEEE access, 2020(8): 96581-96591.
- [15] LIN S, WANG A, LIU M, et al. A multiple section model of stray current of DC metro systems[J]. IEEE transactions on power delivery, 2020, 36(3): 1582-1593.
- [16] FICHERA F, MARISCOTTI A, Ogunsola A. Evaluating stray current from DC electrified transit systems with lumped parameter and multi-layer soil models[C]//Eurocon 2013, IEEE, 2013: 1187-1192.
- [17] LIN S, HUANGFU Y, ZHOU Q, et al. Evaluation and analysis model of stray current in the metro depot[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2020, 7(3): 1780-1794.
- [18] 伍国兴, 肖黎, 张繁, 等. 城轨杂散电流在电网系统中的分布特性仿真分析[J]. 南方电网技术, 2019, 13(10): 39-43.
- WU Guoxing, XIAO Li, ZHANG Fan, et al. Simulation analysis of distribution characteristics of urban rail transit stray current in power system[J]. Southern power system technology, 2019, 13(10): 39-43.
- [19] KOVARSKY D, PINTO J L, CAROLI C E, et al. Soil surface potentials induced by Itaipu HVDC ground return current. I. theoretical evaluation[J]. IEEE transactions on power delivery, 1988, 3(3): 1204-1210.
- [20] CHARALAMBOUS C A, COTTON I, AYLOTT P. A simulation tool to predict the impact of soil topologies on coupling between a light rail system and buried third-party infrastructure[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2008, 57(3): 1404-1416.
- [21] WANG M, YANG X, ZHENG T Q, et al. DC autotransformer-based traction power supply for urban transit rail potential and stray current mitigation[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2020, 6(2): 762-773.
- [22] 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.
- [23] ZHOU Q, LIN S, LIN X, et al. A uniform model for stray current of long-line DC metro systems[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2021.
- [24] 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. 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.
- [25] WANG A, LIN S, HU Z, et al. Evaluation model of DC current distribution in AC power systems caused by stray current of DC metro systems[J]. IEEE transactions on power delivery, 2021, 36(1): 114-123.

(编辑: 郝京红)