文章编号:1005-0523(2022)06-0001-09

地铁杂散电流对埋地金属的干扰仿真分析

周 航[1],张 敬[2],李 军[1],韦庭三[1]

(1. 南宁轨道交通集团有限责任公司运营分公司,广西 南宁 530029; 2. 华东交通大学电气与自动化工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:针对杂散电流对地铁沿线埋地管道腐蚀区域严重程度的不确定问题,通过建立杂散电流的三维有限元分析模型,研究地铁上下行列车运行方式下杂散电流的分布规律,埋地管道上阴极和阳极区域的动态变化过程。在仅考虑阳极杂散电流影响下,通过对比不同模型,判断列车在运行过程中埋地管道受干扰的区域和干扰程度。结果表明:当两列车同时相向运行时,埋地管道上干扰程度较强区域主要分布在两侧,且腐蚀区域关于管道的中心位置对称;当上行列车比下行列车提前启动18,37 s和55 s时,埋地管道上干扰程度较强区域主要分布在管道右侧,其中,上行列车比下行列车提前启动55 s时,埋地管道上存在较大的干扰电流密度,高达18 A/m^2。在地铁杂散电流的后期防护中,可以结合有限元模型对管道受干扰严重区域采取相应措施。

关键词:地铁运行方式;有限元法;杂散电流;管道干扰

中图分类号:U284.93;TG172.84 **文献标志码**:A

本文引用格式:周航,张敬,李军,等. 地铁杂散电流对埋地金属的干扰仿真分析[J]. 华东交通大学学报,2022,39(6):1-9.

Simulation Analysis of Interference of Subway Stray Current on Buried Metals

Zhou Hang[1], Zhang Jing[2], Li Jun[1], Wei Tingsan[1]

(1. Operation Branch of Nanning Rail Transit Group Co., Ltd., Nanning 530029, China; 2. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Given the uncertainty of the severity of stray current on the corrosion area of buried pipelines along the subway line, a three-dimensional finite element analysis model of stray current is established to study the distribution of stray current under the operation mode of subway upward and downward trains and the dynamic changing process of the cathode and anode area on the buried pipeline. Considering only the influence of anode stray current, the interference area and degree of the buried pipeline during train operation are judged by comparing different models. The results show that when the two trains are running in opposite directions at the same time, the interference area of the buried pipeline is mainly distributed on both sides, and the interference area is symmetrical concerning the central position of the pipeline. When the upward train starts 18, 37 s and 55 s earlier than the downward train, the areas with strong interference degrees on the buried pipeline are mainly distributed on the right side of the pipeline. Among them, when the upward train starts 55 s earlier than the downward train, there is a large interference current density on the buried pipeline, up to 18 A/m^2. In the later protection of subway stray current, corresponding measures can be taken for the serious interference area of pipeline in combination with finite element model.

收稿日期:2022-04-15

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51807065);江西省重点研发计划一般项目(20202BBEL53015)

Key words: subway operation mode; finite element method(FEM); stray current; pipeline interference
Citation format:ZHOU H,ZHANG J,LI J,et al. Simulation analysis of interference of subway stray current on buried metals[J]. Journal of East China Jiaotong University,2022,39(6):1-9.

地铁直流牵引供电系统中,牵引电流从牵引变电所正极经接触网、受电弓、列车、钢轨流回牵引变电所负极,其中钢轨兼作回流轨。由于钢轨对地不能达到理想绝缘,必将存在电流泄露至土壤中,泄漏到土壤内的电流称为杂散电流。由于杂散电流的影响,钢轨及地下金属结构会发生电化学腐蚀[1]。为此,主要从减小电流的泄露,保护各种运行设备和地下金属结构物两方面采取一系列防护措施以降低杂散电流的泄漏和干扰影响[2-7],如:减小钢轨的纵向电阻[2],减小相邻牵引变电所的间距[3-4],增大钢轨对地绝缘[5],地下金属结构添加保护层等以及新建地铁使用专用回流轨(第四轨)回流方式[7]。

由于杂散电流的路径未知,对杂散电流的防护带来很大的困难,上述的防护措施仅在一定情况下能够实现效果。为了能够更好的得到杂散电流在土壤中的分布情况,目前杂散电流的计算主要采用解析方法或数值模拟方法。解析方法最常见的是建立电阻网络模型[8-15],如王禹桥等[8]建立了钢轨-排流网-大地电阻网络模型,分析了过渡电阻对于电位梯度的影响规律;朱剑等[9]建立多区间多列车的电阻网络模型,研究了列车静态时回流系统中参数的影响;李威[10]分别建立钢轨-大地,钢轨-埋地金属-大地的电阻网络模型,研究列车参数、变电所距离参数等对泄漏电流的影响;澹台乐琰等[13]建立单、多注入电流源的电阻网络模型,研究对泄漏电流影响。电阻网络模型中模型构建简单、地下各种参数偏理想化,很难用于实际的地铁工程中。随着数值模拟仿真方法的发展,数值模拟仿真方法弥补了电阻网络模型的不足,仿真方法主要通过 CDEGS、COMSOL、ANSYS 等仿真软件实现[16-21]。其中CDEGS主要分析电力系统、电磁场和电磁干扰等工程问题。如朱峰等[16],Liu 等[17]使用 CDEGS 软件建立了地铁杂散电流分布模型,分析了杂散电流的分布规律。但是在实际工程中,许多物理现象和化学变化都不是单独存在的,通常是多个物理场(电场、应力场、温度场等)共同作用的结果。杂散电流对埋地金属的腐蚀同样是在环境湿度、pH 值、电化学反应等多种因素耦合作用下产生的。对于地铁杂散电流的分布和金属腐蚀研究,也应从多物理场耦合的角度进行分析。基于有限元法的仿真软件 ANSYS、COMSOL 等不仅可以从单一物理场的角度仿真分析杂散电流问题,同时还可以实现多个物理场耦合作用的杂散电流分析。如韩冰焱[18],Zaboli[19]利用有限元法建立相应的杂散电流模型,确定杂散电流的防护范围。秦永祥等[21]利用 COMSOL 软件建立了杂散电流对埋地管道干扰模型,分析涂层破损下的管道电位的分布规律。以上仿真模型相比于电阻网络解析模型,改进了电阻网络模型单调性和理想化的缺点,应用范围更广泛。

目前国内外学者在多列车双向运行下埋地金属管道腐蚀方面没有进行深入分析。本文根据以上问题,在 COMSOL 中建立三维杂散电流分布的有限元仿真模型,并对流过埋地管道的杂散电流分布以及管道干扰位置和干扰程度进行研究。与现有的方法相比,本文主要贡献如下。

1) 在直流牵引供电系统中,建立三维杂散电流分布模型,考虑单个运行区间内上下行列车运行过程中对埋地管道杂散电流密度分布的影响。

2) 验证了埋地管道的杂散电流密度与列车的运行方式有关。此外,结合上下行列车运行时刻表,分析不同列车运行时刻对管道杂散电流密度的变化规律。

3) 根据埋地管道中杂散电流密度,判断埋地管道阴极区和阳极区的位置关系,通过对阳极杂散电流密度的求解,得到列车运行过程中埋地管道整体受杂散电流的干扰程度。

1 模型建立及求解

1.1 回路系统模型的建立

在地铁直流供电系统中,列车牵引电流从牵引变电所正极经上下行接触网、受电弓流入列车,在列车内部经高速断路器、牵引逆变器、轴连接流入

齿轮轴,动轮的内轮由齿轮轴牵引,驱动列车运行。在地铁回路系统中，大部分电流经钢轨流回牵引变电所负极,泄漏的电流经钢筋混凝土、埋地管道流回牵引变电所负极。在列车减速阶段,根据再生制动原理,电流路径与加速阶段恰好相反,最终将电能回馈到牵引变电所正极,电流分布如图 1 所示。

根据杂散电流的回流路径,建立钢轨、土壤、埋地管道的三维有限元(FEM)仿真模型,如图 2 所示。在该模型中,有限元模型的尺寸设置为 1 440 m×200 m×100 m(长×宽×高),两个牵引变电所位于地铁区间的两端。在上述区间内,两条钢轨沿地面中心两侧铺设,埋地管道埋深 20 m,距离两条钢轨中心面 20 m 处。地铁上行车辆从车站 1 运行至车站 2,地铁下行车辆从车站 2 运行至车站 1,列车的牵引电流和运行工况参考某地铁线路的实际采集数据，如图 3 所示。将各个列车的牵引电流等效为直流电流源,由于牵引电流在列车中经动轮流向钢轨，模型中应将牵引电流加载到列车动轮上，并将列车动轮等效为一个圆柱形几何。对各个几何模块添加材料参数,材料参数如表 1 所示。添加物理场电流模块，利用 COMSOL 中的“AC/DC 模块”可对麦克斯韦方程进行求解。模型的控制方程为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{J}=0 \tag{1}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E}=0 \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{E}$ 为电场强度,V/m;$\boldsymbol{J}$ 为电流面密度,A/m^2。

本构关系为

$$\boldsymbol{J}=\gamma \boldsymbol{E} \tag{3}$$

式中:γ 为土壤电导率,S/m。

衔接条件为

$$E_{1t}=E_{2t} \tag{4}$$

$$J_{1n}=J_{2n} \tag{5}$$

式中:E_{1t},E_{2t} 分别为电场强度的切线分量,V/m;J_{1n},J_{2n} 分别为电流面密度的法线分量,A/m^2。

将牵引电流施加于动轮处,边界条件施加于牵引变电所负极,即模型中牵引变电所负极(钢轨两端)接地,目的是使泄漏到土壤内的电流重新流回牵引变电所负极。最后,对几何模型进行网格的划分。将钢轨、列车、埋地管道进行自由三角形网格划分,其它区域为自由四边形网格划分。其中对列车、钢轨和埋地管道附近区域采用较细化网格划分，可计算出更加精确的数据，以进行后续分析。几何模型内主要包含 46 286 个域单元,9 614 个边界元,3 025 个边单元。

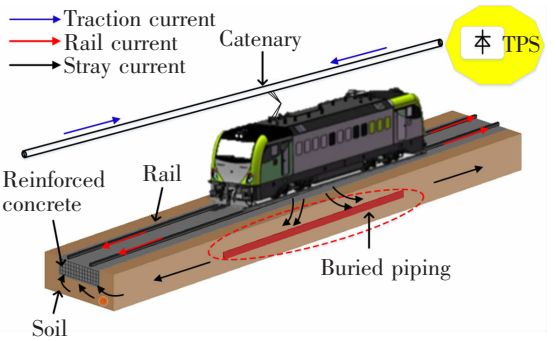
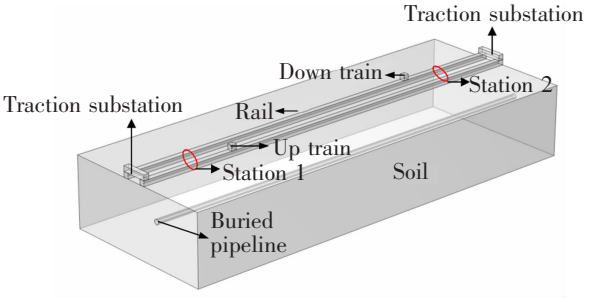
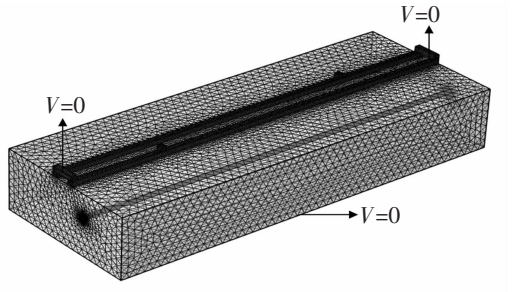


图 1　电流分布图

Fig.1　Current distribution diagram



(a) Geometric partitioning



(b) Meshing

图 2　有限元模型中几何和网格的划分

Fig.2　Division of geometry and mesh in FEM

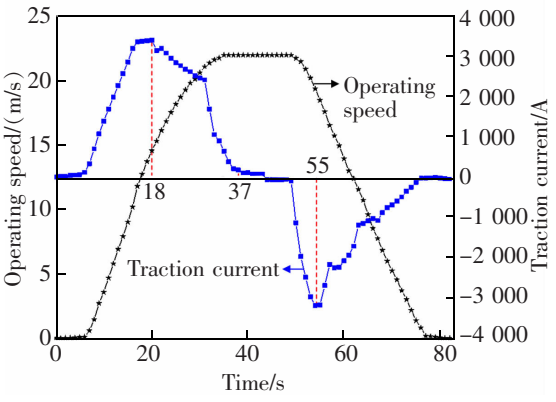


图 3　列车运行参数

Fig.3　Train operation parameter

表 1 材料参数

Tab.1 Material parameter

Materials	Conductivity/(S/m)	Relative permittivity
Soil	0.01	30
Rail	3×10^7	100
Buried pipeline	1×10^7	1
Train	1×10^7	1

1.2 杂散电流累积干扰的求解

在列车运行过程中,杂散电流会加剧埋地管道表面的电化学腐蚀。金属被放置在潮湿的环境中,表面会形成一种腐蚀微电池,其中金属发生的腐蚀一般为电化学腐蚀。在电化学腐蚀过程中,土壤作为电解质,埋地管线等金属视为电极,管线表面的反应,可视为电极反应。杂散电流从土壤流入埋地管道,在金属表面形成阴极区,而电流流出的区域为阳极区, 其中阳极区为杂散电流腐蚀的失重区域。随着列车的位置和牵引电流的不断变化,导致管道上对应的阴、阳极区发生动态变化。其氧化还原反应方程式如下

阳极:$2Fe-4e^- = 2Fe^{2+}$

阴极:$4H^++4e^- = 2H_2\uparrow$(无氧酸性环境)

$4H_2O+4e^- = 4OH^-+2H_2\uparrow$(无氧环境)

$O_2+2H_2O+4e^- = 4OH^-$(有氧碱性环境)

根据上述模型和列车运行参数,建立列车单方向运行的模型,求得整个时间段内钢轨电位的分布图,如图 4 所示。由图 4 可知,钢轨电位在 0~45 s 均为正值,45~83 s 均为负值,在 45 s 处存在一个过渡电位(即零电位)。受两列车牵引电流大小和方向的影响,钢轨电位的正负发生变化,导致埋地管道的阴极区和阳极区的区域发生变化,如图 5 所示。图 5 为列车运行至 18 s(加速阶段牵引电流最大时刻)和运行至 55 s(减速阶段牵引电流最大时刻)的管道杂散电流密度曲线及阴极、阳极区的划分。由于埋地管道的电流密度均存在两个极大值,对应的管道位置是杂散电流流入和流出的临界值[22],即阴极与阳极区域的临界点。在列车运行至 18 s,两极大值区域对应的轨道电位正向偏移量最大,此时杂散电流流入埋地管道,埋地金属结构处于阴极区,不会被杂散电流干扰; 其他区域即为电流流出区域,称为阳极区,管道失电子流被氧化腐蚀。当列车运行至 55 s,钢轨电位从正电位过渡到负电位,埋地管道阴极区和阳极区与 18 s 时相反。

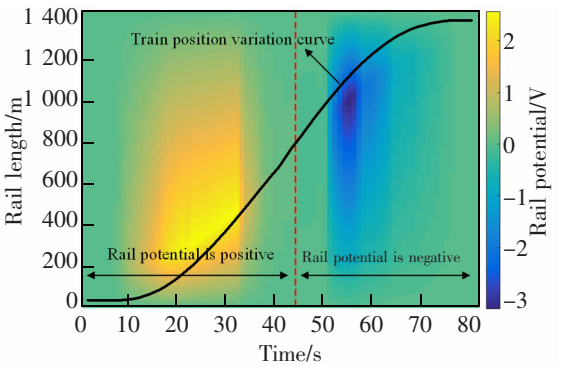


图 4 列车单个运行区段内钢轨电位图

Fig.4 Rail potential diagram in a single section of train operation

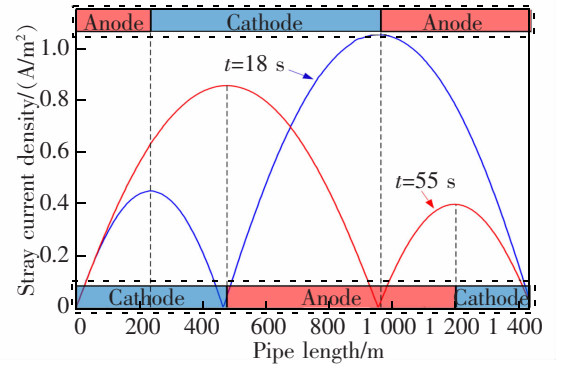


图 5 埋地管道阴极区和阳极区的划分

Fig.5 Division of cathode zone and anode zone of buried pipeline

有限元模型中可以计算得出埋地管道每时刻的杂散电流面密度 $J(t)$,$J(t)$由管道阳极区电流面密度 $J_1(t)$和阴极区电流面密度 $J_2(t)$组成。

由于阴极区的杂散电流密度不会对埋地管道产生干扰影响,则干扰电流面密度仅考虑阳极区对应的杂散电流密度的影响,干扰电流面密度 $J_f(t)$为

$$J_f(t)=J_1(t) \tag{6}$$

则整条管道的总电流面密度 $J_F(t)$为

$$J_F(t)=\sum_{t=1}^{T}J_f(t)=\sum_{t=1}^{T}J_1(t) \tag{7}$$

式中:$T=1,2,\cdots,83$ s,T 为列车在单个运行区间内运行总时间,s。管道的阳极干扰电流 $i_f(t)$是管道干扰电流面密度 $J_f(t)$在面 S 上的积分,即

$$i_f(t)=\int_S J_f(t)\mathrm{d}S \tag{8}$$

由于列车牵引电流是不断变化,杂散电流也是

动态变化的,埋地管道上的干扰电流是随时间变化的函数,我们可以定义干扰的杂散电流 $i_f(t)$ 与时间积分作为总泄露电荷 Q[23],即

$$Q=\int_{t_1}^{t_2} i_f(t)\mathrm{d}t \tag{9}$$

根据法拉第定律,管道受杂散电流干扰程度与总泄漏电荷成正比,由于比例系数取决于许多外界和材料本身因素,导致很难确定总泄漏电荷量中有多少比例腐蚀金属设施,但总泄漏电荷量比较容易获得,判断杂散电流干扰程度只需要判断泄漏电荷量大小的客观参数[24];同理也可以通过干扰的杂散电流密度作为间接评价管道被干扰的客观参数。

2　杂散电流的计算与分析

根据上述有限元模型分析地铁列车双向运行和两列车间的共同作用下,杂散电流在埋地管道上的分布情况。根据图 3 的列车运行参数,搭建 4 个不同启动时间的模型,如表 2 所示。

为研究不同模型间钢轨电位和杂散电流的变化趋势,选取 4 个模型均在上行列车运行至 55 s 的时刻,其中上行列车的起始位置和终点分别为站 1 和站 2,下行列车的起点位置为站 2,终点随着启动时间的变化而变化。根据 4 个模型的求解,分别得出列车的运行位置以及在该位置受到牵引电流的大小,如表 3 所示。其中上行列车均处于减速状态,下行列车分别处于减速、匀速、加速和未启动状态。

根据表 3 列车的运行参数,计算出 4 个模型在上行列车运行至 55 s 时管道的杂散电流密度分布图,如图 6 所示。模型 1 中,两列车同时相对运行,导致管道电流密度关于管道中心对称,且在 4 个模型中,该模型中管道电流密度相对较大,最大电流密度高达 0.81 A/m^2。模型 2 中,下行列车已经处于

表 2　不同模型的建模方式

Tab.2　Modeling methods of different models

Model	Definition
1	Relative operation of two trains at the same time
2	When the upward train accelerates the maximum traction current(18 s), the down train starts
3	When the upward train runs at a constant speed (37 s), the down train starts
4	At the maximum time(55 s) of the deceleration traction current of the upward train, the downward train starts

表 3　上行列车运行至 55 s 时不同模型中各列车运行参数

Tab.3　Train operation parameters in different models when the upward train runs to 55 s

	Model	Train position/m	Traction current/A
1	Up train	1 011.64	−3 187.4
	Down train	433.12	−3 187.4
2	Up train	1 011.64	−3 187.4
	Down train	860.74	374.6
3	Up train	1 011.64	−3 187.4
	Down train	1 144.57	3 364.4
4	Up train	1 011.64	−3 187.4
	Down train	1 245.00	0

匀速阶段,牵引电流较小,经两列车运行参数的相互影响,使得管道电流密度整体比模型 1 中管道电流密度小;模型 2 中,下行列车处于加速阶段,两列车位置距离较小,且牵引电流较大、方向相反,经两列车运行参数的相互影响,管道电流密度整体相对较小,最大的管道电流密度为 0.329 A/m^2;模型 4 中,此时下行列车还未启动,仅上行列车的运行参数与管道电流密度有关,管道电流密度整体小于模型 1 和模型 2 中的电流密度。

当上行列车运行至 55 s 时,上下行列车不同启动时间差对埋地管道杂散电流密度的影响如图 7 所示。当上行列车比下行列车先启动 0~5 s 时,流过埋地管道的杂散电流密度存在两个影响较大的幅值,均出现在线路的 200~400 m 和 1 200 m 附近。当上行列车比下行列车先启动 6~27 s 时,埋地管道的杂散电流密度同时受两列车牵引电流的影响导

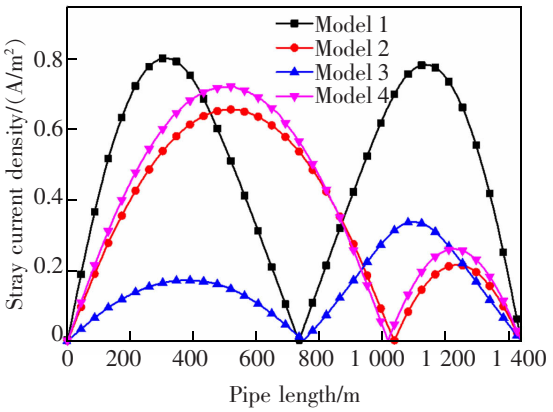


图 6　埋地管道杂散电流密度分布图

Fig.6　Stray current density distribution diagram of buried pipeline

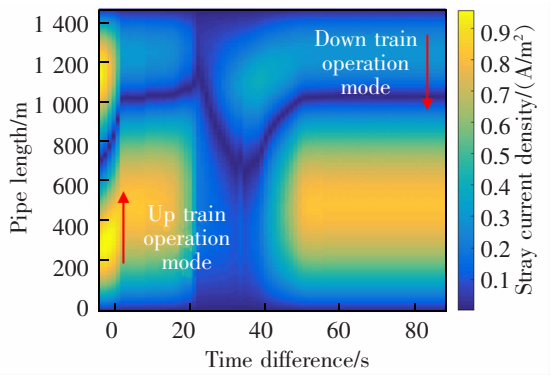


图7 列车不同启动时间下管道杂散电流密度的分布

Fig.7 Distribution of stray current density in pipeline at different starting time of train

致出现一个较大的极值，在线路的500 m附近移动。当上行列车比下行列车先启动28~41 s时，可以看出埋地管道的杂散电流密度与前部分对比相对较小，在该时间差内两列车运行泄漏的电流相对最小，导致管道的受干扰程度较轻。当上行列车比下行列车先启动42~55 s时，埋地管道上的杂散电流密度又逐渐增大，较大幅值主要出现在600 m附近。由于模型均选取上行列车运行至55 s时刻，当上行列车比下行列车先启动56~82 s时，在该时段内埋地管道上的杂散电流密度仅与上行列车的运行状态有关，此区段内埋地管道杂散电流密度完全相同。

3 杂散电流累积干扰分析

根据图5对管道阴、阳极区划分以及阳极干扰电流密度的求解，可以得出每时刻管道阳极干扰电流密度的计算流程图，如图8所示。

图9(a)为模型1中埋地管道杂散电流密度分

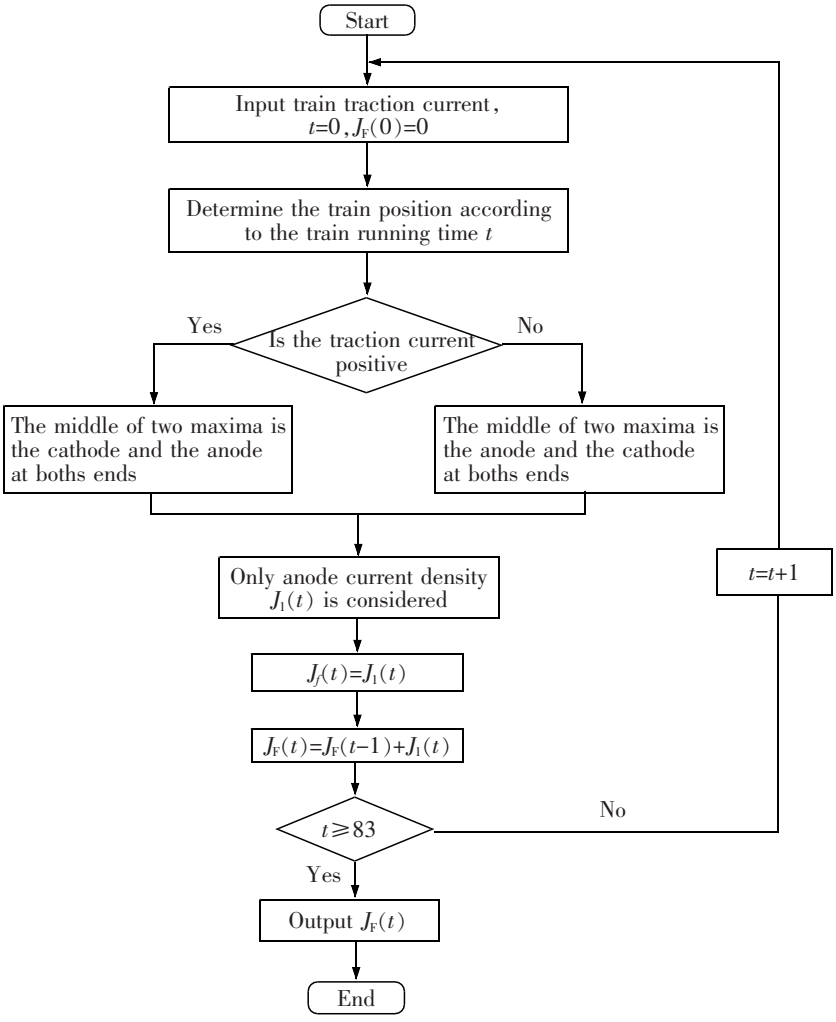
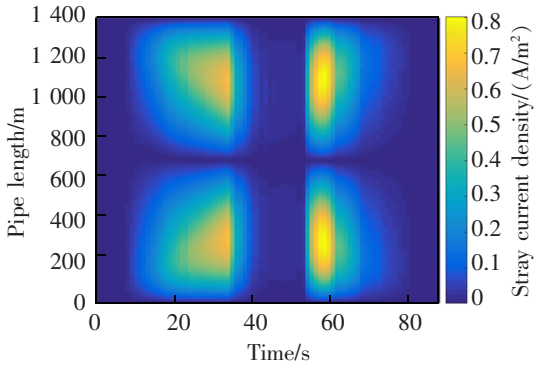
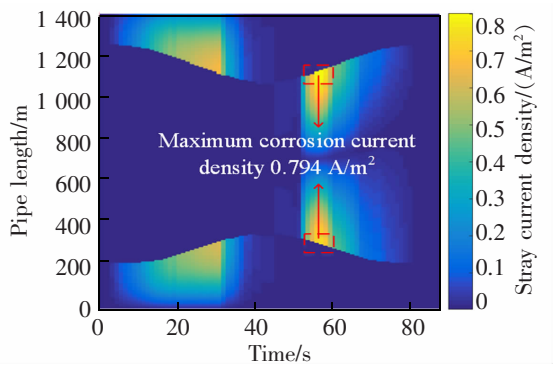


图8 管道阳极干扰电流密度计算流程图

Fig.8 Flow chart of pipeline anode interference current density calculation



(a) Density of stray current flowing through buried pipes



(b) Distribution diagram of interference current density of pipeline anode

图 9　模型 1 各时刻的电流密度图

Fig.9　Current density diagram at each moment for Model 1

布图。由于两列车同时刻相向运行,且两列车的牵引电流完全相同,埋地管道的电流密度分布呈对称结构。根据管道阳极干扰电流密度计算流程图,计算出每时刻埋地管道的阳极干扰电流密度,如图 9(b)所示。由图 9(b)可以看出,在单个列车运行区间内,管道的阳极干扰电流密度在运行至 55 s 时达到最大值为 0.794 A/m²。将管道每个位置对应的阳极干扰电流密度累加即为列车运行区间内管道的总干扰电流密度。

根据图 8 的计算流程图,得出 4 个模型中埋地管道阳极总干扰电流密度分布图,如图 10 所示。如模型 1,由于两列车同时启动,除运行方向相反外,其它运行条件完全相同,导致区间内埋地管道的干扰区域和总干扰电流密度关于管道中心对称,且在 200 m 和 1 250 m 附近管道干扰程度较重,总干扰电流密度为 10 A/m²,管道的中心位置干扰程度相对较轻。模型 2 中,两列车运行时受不同牵引电流的影响,导致埋地管道的整体的干扰程度相对较重,其中 880 m 处的总干扰电流密度高达 17.5 A/m²。

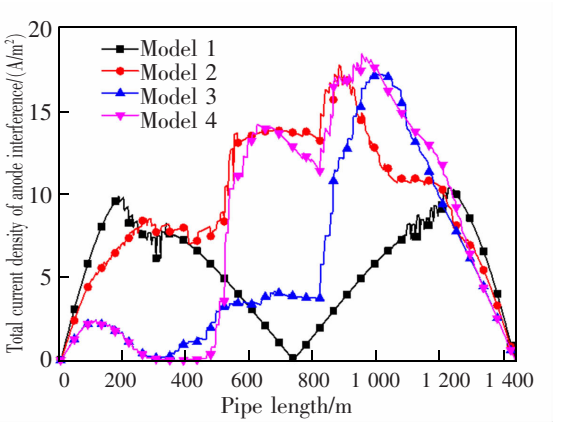


图 10　管道阳极干扰总电流密度分布图

Fig.10　Distribution diagram of total current density of pipeline anode interference

模型 3 中,埋地管道在 0~800 m 区间内干扰相对较轻,在 1 000 m 附近管道总部,总干扰电流密度最大,高达 17 A/m²。模型 4 中,由于下行列车启动较晚,导致两列车的牵引电流方向基本相反,在 600 m 和 920 m 附近管道的干扰程度较重,其中在 920 m 处管道的总干扰电流密度高达 18 A/m²。

考虑地铁实际运营时刻表、与其他线路的交汇、地理位置等特性,导致两列车双向运行存在时间差,不同运行时刻的列车累积效果是不同的。模型 1 中存在两个干扰程度较强的区域,在实际检测中,若某位置出现损伤等严重现象,可通过对称特性直接找到另一端损伤对应的位置,进行开挖检修;在模型 2,3 和 4 中,干扰较强区域主要分布在 800~1 100 m 区间内,应重点关注埋地管道该区域的腐蚀情况并加强防护措施。

综上所述,不同模型对管道的干扰影响不同,本文与传统意义的单向列车运行模型相比更贴近实际。在实际地铁工程中,应根据实际运行情况建立相对应的模型,计算结果也可用于对实际地铁系统中杂散电流的监测与防护。

4　结论

本文建立了考虑地铁车辆不同运行方式下杂散电流的计算模型。基于有限元法分析了沿地铁线路的杂散电流分布以及埋地管道上动态阴、阳极区域的划分和干扰程度。结论如下。

1) 通过建立三维有限元杂散电流分布模型,验证了列车运行方式对杂散电流研究的必要性。仿真结果表明:上下行列车的杂散电流分布与两列车的

运行时刻有关。

2）根据埋地管道的电流密度分布，可以判断管道上阴、阳极位置动态变化，进而可以计算出管道受干扰区域的动态分布过程。

3）列车运行时刻之间的时间差导致埋地管道产生不同的腐蚀情况，在地铁杂散电流后期防护中，可以结合有限元模型预测管道上某区域腐蚀严重程度。

参考文献：

[1] BERTOLINI L，CARSANA M，PEDEFERRI P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current[J]. Corrosion Science，2007(49)：1056–1068.

[2] National Association of Corrosion Engineers(NACE). Control of external corrosion on undergroud or sub–merged metallic piping systems：NACE SP0169–2013[S]. Houston：NACE，2013.

[3] 于凯，朱峰，刘光辉，等. 基于 CDEGS 的地铁杂散电流仿真研究[J]. 电气化铁道，2014(6)：44–48.
YU K，ZHU F，LIU G H，et al. Simulation study of subway stray current based on CDEGS[J]. Electrified Railway，2014(6)：44–48.

[4] 吴祥祖，张庆贺，高卫平. 地铁杂散电流产生机理及其防护措施[J]. 建筑安全，2003(5)：28–30.
WU X Z，ZHANG Q H，GAO W P. Mechanism of subway stray current generation and its protective measures[J]. Building Safety，2003(5)：28–30.

[5] 徐颢，李代莉. 轨道交通直流杂散电流给埋地钢管防腐系统带来的新风险[J]. 城市燃气，2016(3)：12–17.
XU H，LI D L. New Risks of buried steel pipe anti–corrosion system brought by rail transit DC stray current[J]. Urban Gas，2016(3)：12–17.

[6] CHARALAMBOS A，CHARALAMBOUS，AYLOTTET P，et al. Stray current calculation and monitoring in DC masstransit systems[J]. IEEE Vehicular Technology Magzine，2016，11(2)：24–31.

[7] 付永佩. 城市轨道交通四轨系统可行性研究[J]. 电气化铁道，2020，31(S1)：153–155.
FU Y P. Feasibility study of urban rail transit four–track system[J]. Electrified Railway，2020，31(S1)：153–155.

[8] 王禹桥，黄玉坚，彭成宽，等. 基于地表电位梯度的地铁杂散电流动态干扰范围评估模型[J]. 北京交通大学学报，2020，44(3)：30–36.
WANG Y Q，HUANG Y J，PENG C K，et al. Evaluation model for dynamic interference of subway stray current based on surface potential gradient[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2020，44(3)：30–36.

[9] 朱剑，朱成乾. 城市轨道交通多区间杂散电流与钢轨电位分布研究[J]. 中国科技信息，2020(11)：90–91.
ZHU J，ZHU C Q. Study on stray current and rail potential distribution in urban rail transit[J]. China Science and Technology Information，2020(11)：90–91.

[10] 李威. 地铁杂散电流腐蚀监测及防护技术[M]. 徐州：中国矿业大学，2010.
LI W. Monitoring and protection technology of stray cur rent corrosion in subway[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology，2010.

[11] GU J U，YANG X F，ZHENG T Q，et al. Rail potential and stray current mitigation for urban rail transit with multiple trains under multiple conditions[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2022，8(2)：1684–1694.

[12] 文天琦，王滢，刘学龙，等. 电感强制吸流电路对地铁杂散电流抑制作用的研究[J]. 制造业自动化，2022，44(4)：200–204.
WEN T Q，WANG Y，LIU X L，et al. A research on inductance forcedly absorbing current to reduce stray current in metro[J]. Manufacturing Automation，2022，44(4)：200–204.

[13] 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 L Y，HAN X Q，WANG L，et al. Modeling and simulation of stray current in subway with multi–train operation[J]. Electrical measurement and instrumentation，2020，57(22)：7–16.

[14] 张栋梁，刘娟，谢业华，等. 地铁杂散电流动态分布模型研究[J]. 城市轨道交通研究，2017，20(4)：67–71.
ZHANG D L，LIU J，XIE Y H，et al. Evaluation and analysis of dynamic stray current in DC metro system[J]. Urban rail Transit Research，2017，20(4)：67–71.

[15] 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.

[16] 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 F，LI J C，ZENG H B，et al. Influence of rail–to–ground resistance of urban transit systems on distribution characteristics of stray current[J]. High Voltage Technology，2012，44(8)：2738–2745.

[17] LIU M J，LIN S，ZHAO L P，et al. Study on dynamic char-

acteristics of metro stray current based on CDEGS [C]// Changsha：Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation（EITRT）2017，2017.

[18] 韩冰焱. 有限元法在埋地管道电化学保护上的应用研究[D]. 西安：西北大学，2016.
HAN B Y. Application of finite element method in electrochemical protection of buried pipelines[D]. Xi′an：Northwest University，2016.

[19] ZABOLI A. Evaluation and control of stray current in DC-electrified railway systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology，2017，66（2）：974-980.

[20] OGUNSOLA A，MARISCOTTI A. Evaluation of stray current from a DC-electrified railway with integrated electric-electromechanical modeling and traffic simulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications，2015，51（6）：5431-5441.

[21] 秦永祥，史笑雨，崔艳雨，等. 直流杂散电流对埋地管道电位干扰研究[J]. 油气田地面工程，2019，38（11）：60-65.
QIN Y X，SHI X Y，CUI Y Y，et al. Study on potential interference of DC stray current on buried pipeline[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering，2019，38（11）：60-65.

[22] 张泽萌. 地铁杂散电流防护措施的研究[D]. 成都：西南交通大学，2015.
ZHANG Z M. Study on protection measures of stray current in subway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University，2015.

[23] YU J G. The effects of earthing strategies on rail potential and stray currents in DC transit railways[C]//London：IEEE International Conference on Developments in Mass Transit Systems，1998.

[24] PAUL D. DC stray current in rail transit systems and cathodic protection[J]. IEEE Industry Applications Magazine，2016，22（1）：8-13.



第一作者：周航（1975—），男，高级工程师，南宁轨道交通集团有限责任公司运营分公司副总经理；研究方向为城市轨道交通牵引供电系统运行与检修，机电系统的智能运维。E-mail：zzac9064@163.com。



通信作者：韦庭三（1979—），男，高级工程师，南宁轨道交通集团有限责任公司运营分公司生技部部长；研究方向为城市轨道交通牵引供电系统智能运维及运行检修管理，柔性交直流输电技术。E-mail: bswts@163.com。

（责任编辑：吴海燕　刘棉玲）