

# 城市轨道交通长线路杂散电流仿真模型

王爱民, 林 圣, 李俊逸, 何正友

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

**摘 要:** 为准确高效的计算城市轨道交通长线路杂散电流, 文中基于 CDEGS 软件提出一种长线路杂散电流仿真建模方法。该方法将线路中的纵向并联金属结构等效为一根纵向导体, 有效减少模型纵向导体数量, 降低模型导体分段节点总数, 提高纵向导体对分段间距的适应能力, 在满足工程需要的精度的前提下, 提高长线路杂散电流分布仿真精度。同时, 在相同线路长度及模型导体分段间距条件下, 本文所提模型与传统四层导体结构杂散电流仿真模型相比, 仿真结果相似度大于 0.99, 纵向导体分段节点总数减少约 75%, 仿真计算时间缩短 98%, 验证了模型有效性及其在仿真效率上的优势。最后根据深圳市某轨道交通线路拓扑结构, 建立长线路杂散电流仿真模型, 并分析了列车运行工况和轨道局部绝缘性能下降对杂散电流分布的影响。

**关键词:** 城市轨道交通; 长线路; 杂散电流; 等效建模; 影响因素

## Stray Current Simulation Model of the Long Line of DC Metro Systems

WANG Aimin, LIN Sheng, LI Junyi, HE Zhengyou

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

**Abstract:** To obtain the stray current accurately, a simulation modeling method of long line stray current is proposed based on the CDEGS software. In the model, the longitudinal parallel metal structures in the DC metro line are equivalent to a longitudinal conductor, thus the number of the longitudinal conductors and the number of calculation nodes can effectively be reduced, and the adaptability of longitudinal conductors to sectional spacing and the accuracy of simulation calculation can be improved on the premise of meeting the accuracy required by the project. Under the condition of the same line length and conductor segment spacing, compared with the four-layer stray current model, it is found that the similarity of the simulation results is more than 0.99, the number of segmented nodes is reduced by about 75% and the calculation time is shortened by 98%, which verifies the effectiveness and advantages of the model. Finally, the stray current simulation model of a certain DC metro line in Shenzhen is established, and the effects of train conditions and the deterioration of local insulation performance on stray current are analyzed.

**Key words:** DC metro system; long line; stray current; equivalent modeling; influencing factors

## 0 引言

城市轨道交通具有运量大、效率高、空间占用率低等优势, 在改善城市交通环境中发挥了重大作用<sup>[1]</sup>。然而, 随着城市轨道交通线路里程的增加, 线路与变电站临近的情况已不可避免, 由杂散电流导致的城市电网电力变压器直流偏磁的问题日益突出<sup>[2-6]</sup>。目前已有成都、长沙、深圳、贵阳等多个城市出现了由于城市轨道交通杂散电流导致的电力变压器直流偏磁现象。城市轨道交通杂散电流分布是研究其线路附近电力变压器直流偏磁变化规律与抑

制策略的基础, 因此研究城市轨道交通线路杂散电流分布具有重要的工程应用价值。

近年来, 基于 CDEGS 软件的城市轨道交通杂散电流仿真分布仿真模型由于可以良好等效线路金属结构及线路运行环境<sup>[7-10]</sup>, 得到专家学者的认可及广泛应用<sup>[11-14]</sup>。该方法将列车等效为电流源, 线路金属结构等效为接地导体, 基于线路金属连接方式建立杂散电流仿真模型, 并通过仿真计算获得线路杂散电流。基于 CDEGS 软件, 专家学者建立了包含钢轨、排流网两层导体结构的杂散电流仿真模型, 并讨论了排流网及线路附近埋地金属中的杂散电流<sup>[8-12]</sup>。基于隧道结构钢筋分布规律, 文献<sup>[13]</sup>提出了钢轨—排流网—隧道结构钢筋 3 层导体结构的杂散电流仿真模型, 并分别讨论了盾构、明挖隧

基金资助项目: 国家自然科学基金(51677153); 四川省科技支撑计划(2018GZ0020)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (51677153), Sichuan Science and Technology Program (2018GZ0020).

道结构钢筋及轨道均流线对杂散电流的影响。然而，上述模型均为单供电区间线路模型，仅能计算得到局部线路的杂散电流，因此其仿真计算结果难以适用于线路杂散电流对变压器直流偏磁影响的研究。为获得整条线路的杂散电流，文献[14]提出多供电区间的线路杂散电流仿真模型，并仿真计算了4个连续供电区间的线路杂散电流。然而，当线路距离增加时，为准确获得长线路的杂散电流，需要增加模型单根纵向导体分段节点数量，造成模型导体分段节点总数增加。但是，受CDEGS软件对模型导体分段节点总数的限制<sup>[7]</sup>，导体分段节点总数不能无限增加，这将造成单根纵向导体分段间距被迫增加、仿真计算精度下降，从而影响变压器直流偏磁变化规律研究。

鉴于此，为准确获得长线路杂散电流，文中提出一种长线路杂散电流仿真建模方法。该方法将线路中的纵向并联金属等效为一根纵向导体，利用多电阻并联电路的电阻计算方法计算纵向导体电阻。通过减少纵向导体数量，提高纵向导体对较小分段间距的适应能力，提高仿真计算精度。利用所提方法建立本文模型，模型钢轨电位、杂散电流、排流网电流仿真计算结果与传统模型具有良好的一致性，且仿真计算时间较短，验证模型的有效性及其在仿真效率上的优势。最后根据深圳市某轨道交通线路拓扑建立杂散电流仿真模型，并分析了列车工况及局部绝缘性能对线路杂散电流分布的影响。

1 模型影响因素分析

1.1 传统4层导体结构模型介绍

基于CDEGS软件，城市轨道交通传统的4层导体结构的线路杂散电流仿真模型如图1所示。线路中接触网、钢轨、排流条、纵向钢筋等纵向金属分别等效为模型的4层纵向贯通导体，并通过牵引变电站、钢轨均流线和横向钢筋等效的横向导体连接构成纵向并联结构。由于钢轨、排流条和隧道纵向钢筋纵向长度与线路长度相等，因此模型中单根纵向导体长度与模型线路总长度也相等。

为准确计算线路各个位置的杂散电流，在进行仿真计算时，需要对各纵向导体进行分段处理。

1.2 导体分段节点数量影响分析

如图1所示的传统模型结构，当线路长度为3000 m时，在纵向导体分段间距分别为10、100和500 m的情况下，仿真得到的线路钢轨电位和杂

散电流见图2，各情况下的仿真计算时间见表1。从图2和表1仿真结果分析可知：纵向导体分段间距越小，模型仿真计算结果越精确；模型导体分段节点总数增多，仿真计算效率降低。因此，为提高线路杂散电流仿真精度，应减少模型纵向导体分段间距。然而，现有模型纵向导体数量较多，当线路较长时，可能导致模型导体分段节点总数超多CDEGS软件限制，无法进行仿真计

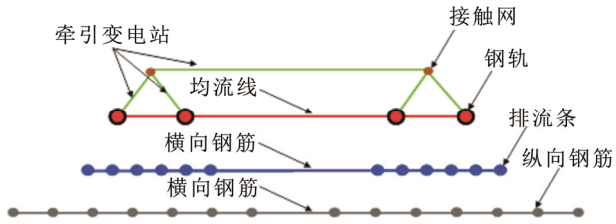


图1 传统4层导体结构杂散电流仿真模型  
Fig.1 Stray current simulation model with four-layer structure

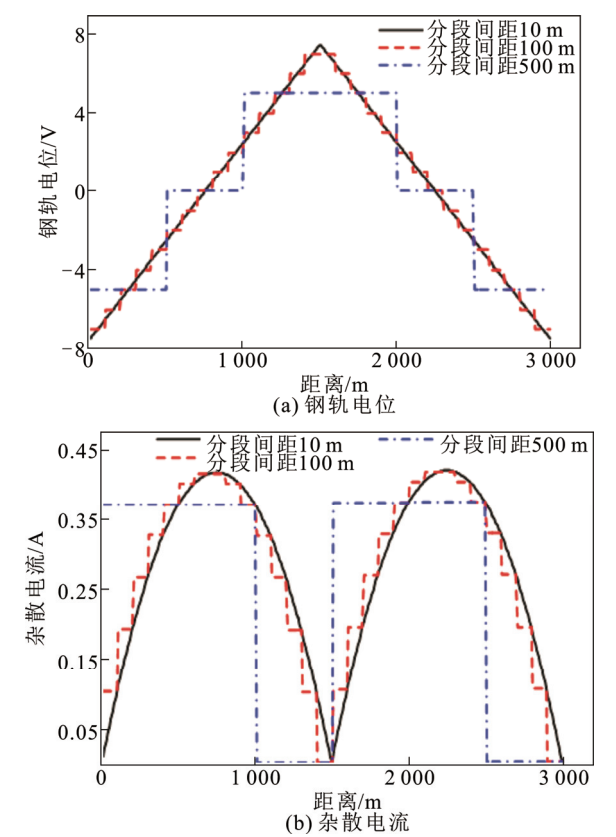


图2 不同分段间距模型仿真计算结果  
Fig.2 Simulation results of different segment space

Table 1 Segment number and simulation time		
分段间距/m	导体分段节点总数	时间/s
10	9 680	696
100	1 036	6
500	268	2

算, 进而造成导体分段间距被迫增加, 模型仿真结果精度降低。

基于此, 为准确高效获得长线路各个位置的杂散电流, 文中提出长线路杂散电流仿真建模方法, 通过将线路中的纵向并联金属结构等效为一根纵向导体, 减少模型纵向导体数量, 提高单根纵向导体分段数量, 提高模型对较小分段间距的适应能力, 提高长线路杂散电流仿真精度。

## 2 长线路杂散电流仿真建模方法

### 2.1 回流系统等效建模方法

将回流系统轨道、排流网和隧道结构钢筋中的纵向并联金属结构看作多电阻并联电路, 并将其等效为一根导体。依据多电阻并联电路的电阻计算方法, 设置纵向导体电阻参数。

#### 2.1.1 轨道等效建模方法

轨道主要包含钢轨(2根)、均流线及绝缘垫和紧扣件等结构。其中, 钢轨通过均流线构成纵向并联结构, 因此, 轨道等效建模过程中, 将轨道内的两条并联钢轨等效为一根纵向导体。基于两电阻并联电路的电阻计算方法, 纵向导体电阻为单根钢轨的1/2, 导体截面积为单根钢轨的2倍。上、下行线路均流线等效为横向导体, 连接上、下行纵向导体结构, 实现轨道均流。

轨道内绝缘垫和紧扣件是保证轨道过渡电阻满足设计要求的主要元件<sup>[14]</sup>。由于轨道沿线绝缘垫和紧扣件分布较为均匀且分布间距较小, 因此在绝缘垫和紧扣件建模时, 将其等效为轨道纵向导体的涂层<sup>[12-14]</sup>, 并通过设置涂层厚度和涂层电阻率等效轨道的过渡电阻。当轨道过渡电阻为 $R_g$ , 涂层厚度为 $h$ 时, 纵向导体涂层电阻率 $\rho_{g0}$ 过渡电阻满足关系式为

$$R_g = \frac{\rho_{g0}h}{2\pi(r+h/2)L} \quad (1)$$

式中:  $L$  为线路长度;  $r$  为轨道纵向导体半径;  $h$  为轨道纵向导体涂层厚度。通过式(1)即可推导得到涂层电阻率。

#### 2.1.2 排流网等效建模方法

排流网结构位于钢轨正下方, 由纵向排流条与横向钢筋焊接构成; 其中, 纵向排流条由横向钢筋连接构成并联结构。因此, 在排流网建模过程中, 可将上、下行线路中的排流网分别等效为一根纵向导体, 并将连接上、下行排流网的横向钢筋等效为

连接排流网纵向导体的横向导体。同理, 依据多电阻并联电路的电阻计算方法, 排流网纵向导体单位长度电阻 $R_{eq}$ 满足关系式为

$$R_{eq} = \frac{2}{n} R_{scs} \quad (2)$$

式中:  $n$  为上、下行排流网中纵向排流条总数之和;  $R_{scs}$  为单根排流条单位长度电阻。

由于排流网裸露在混凝土结构中, 杂散电流通过排流网表面进入排流条, 因此, 模型设置排流网纵向导体表面积与实际线路纵向排流条表面积之和相等。为实现这一目的, 排流网纵向导体半径 $r_{eq}$ 应满足关系为

$$r_{eq} = \frac{nr_{scs}}{2} \quad (3)$$

其中 $r_{scs}$ 为单根排流条半径。

#### 2.1.3 隧道结构钢筋等效建模

隧道结构钢筋由纵向钢筋与横向钢筋构成。其中纵向钢筋通过与横向钢筋焊接形成纵向并联结构。因此在隧道结构钢筋建模时, 将上、下行隧道内的纵向钢筋等效为一根导体。依据多电阻并联电路电阻计算方法, 隧道纵向导体单位长度电阻 $R_{eq1}$ 满足如下关系

$$R_{eq1} = \frac{2}{n_1} R_1 \quad (4)$$

式中:  $n_1$  为上、下行隧道纵向结构钢筋总数之和;  $R_1$  为单根纵向结构钢筋单位长度电阻。

由于隧道结构钢筋暴露在混凝土结构中, 杂散电流通过结构钢筋表面进入排流条。因此在设置排流网等效模型中纵向导体半径时, 使纵向导体表面积与实际线路纵向钢筋表面积之和相等。为满足上述关系, 纵向导体半径 $r_{eq1}$ 计算方法为

$$r_{eq1} = \frac{n_1 r_1}{2} \quad (5)$$

式中:  $r_1$  为单根纵向结构钢筋半径。

在参数等效过程中涉及到的钢轨纵向电阻、钢轨数量、轨道过渡电阻、排流网纵向导体数量及电阻等参数均可以在轨道设计、施工及运行过程中直接或间接测量得到<sup>[15]</sup>。

## 2.2 牵引供电系统等效建模方法

城市轨道交通牵引供电系统见图3, 主要包含上、下行接触网和牵引变电站。其中上、下行接触网在牵引变电站位置通过母线连接, 形成全线贯通结构。因此牵引供电系统等效建模过程中, 将上、下行接触网分别等效为一根纵向导体, 且导体电阻

和半径与实际接触网金属参数一致。将牵引变电站等效为连接接触网和轨道的垂直导体，并在牵引变电站位置设置横向导体，等效牵引变电站母线。

由于牵引供电系统暴露在空气中，不产生和吸收杂散电流，因此在建模过程中将接触网和牵引变电站等效导体涂层设置为完全绝缘。

基于上述长线路杂散电路仿真建模方法，模型导体结构如图 4 所示。

2.3 列车等效建模方法

城市轨道交通列车处于牵引工况时，牵引电流通过接触网进入列车，并由列车注入到钢轨。当列车处于制动工况时，制动电流通过列车注入到接触网，并通过钢轨流回列车。因此，可将列车等效为两个电流幅值相等的电流源，分别位于接触网和钢轨，作为模型激励。

由于 CDEGS 软件中流出导体的电流为负值，流入导体的电流为正值。因此，当列车牵引运行时，接触网汲取的电流为负值，钢轨注入电流为正值。同理，列车制动运行时，接触网注入电流为正值，钢轨汲取电流为负值。图 5 为线路中同时存在牵引和制动列车时，模型激励设置示意图，其中牵引电流大小为  $I_{tra1}$ ，制动电流大小为  $I_{bra}$ 。

如图 5 所示，当列车处于牵引工况，从接触网汲取的电流  $I_1$  大小等于牵引电流，方向为流出接触网，因此  $I_1 = -I_{tra1}$ ，注入钢轨的电流  $I_2$  大小等于列车牵引电，方向为流入钢轨，因此  $I_2 = I_{tra1}$ ；当列车处于制动工况，列车向接触网注入的电流  $I_{11}$  大小等于制动电流，方向为流出钢轨，因此  $I_{21} = I_{bra}$ ，从钢轨汲取的电流  $I_{21}$  大小等于制动电流，方向为注入接触网，因此  $I_{11} = -I_{bra}$ 。

3 模型验证

3.1 模型参数

为验证模型仿真计算结果的有效性，利用所提建模方法，建立某单区间线路杂散电流仿真模型，模型中纵向导体参数如表 2 所示。列车运行工况如表 3 所示(其中“+”表示列车牵引工况运行)，基于图 5 所示模型激励设置方法，仿真计算线路钢轨电位、杂散电流和排流网电流，其中模型纵向导体分段间距为 10 m。

单供电区间线路：长度 3 000 m，采用接触网供电，接触网电阻为 0.008 Ω/km；轨道采用 60 kg/m 的标准钢轨，上下行线路每隔 600 m 设置均流线；

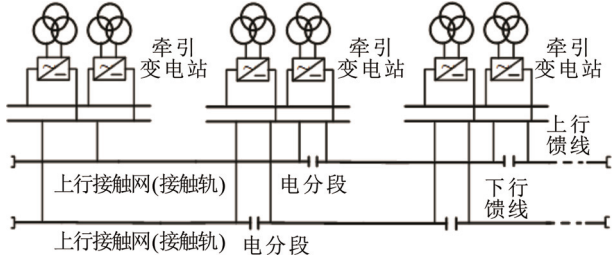


图 3 牵引供电系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of traction power supply system

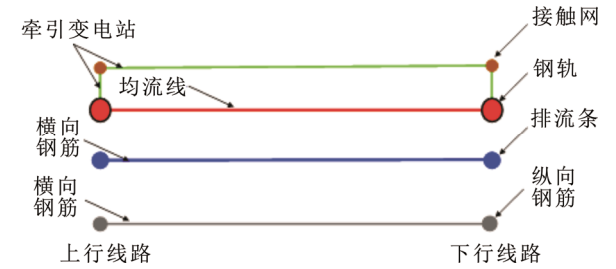


图 4 模型导体结构示意图

Fig.4 Cross section of the stray current simulation model

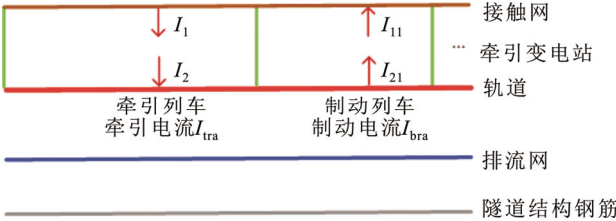


图 5 模型激励设置示意图

Fig.5 Schematic diagram of excitation setting for proposed simulation model of stray current

表 2 模型纵向导体参数

Table 2 Parameters of the longitudinal conductors in the proposed model		
结构	模型导体半径/m	单位长度电阻/(Ω·km <sup>-1</sup> )
接触网	0.009	0.008
轨道	0.068 3	0.02
排流条	0.057 6	0.11
纵向结构钢筋	0.049	0.046

注：钢轨涂层电阻率为 305 kΩ·m。

表 3 仿真模型列车运行工况

Table 3 Simulation model of train operation condition				
参数	数值			
	上行列车	上行列车	下行列车	下行列车
位置/m	800	1 900	500	2 500
牵引电流/A	+2 000	+2 000	+2 000	+2 000

轨道过渡电阻 7 Ω·km。排流网横截面积为 3 470 mm<sup>2</sup>，排流网中排流条总数为 12 根，排流条电阻为

0.66 Ω/km。隧道结构钢筋中纵向钢筋 14 根, 半径为 7 mm, 电阻为 0.32 Ω/km。

3.2 仿真计算结果分析

在相同线路结构、列车运行工况及导体分段间距条件下, 本文模型与图 1 所示的传统模型的钢轨电位、杂散电流和排流网电流仿真计算结果见图 6。

图 6 中, 钢轨电位、杂散电流分布与排流网电流仿真计算结果具有良好的一致性。钢轨电位仿真计算结果最大相差不超过 0.015 V, 相对偏差为 0.19%, 钢轨电位分布相似系数<sup>[16]</sup>为 0.999; 杂散电流分布的最大相差小于 0.002 A, 相对偏差为 0.4%,

杂散电流分布相似系数为 0.998; 排流网纵向电流最大相差小于 0.02 A, 相对偏差为 5%, 排流网电流分布相似系数为 0.990。仿真计算结果偏差产生的原因可能是在建模过程中, 忽略了线路中部分横向金属结构对导体参数的影响; 但是由于仿真结果偏差较小, 因此仍然可以认为所提方法对于线路杂散电流分布特征研究具有有效性。

模型仿真计算过程, 导体分段节点总数与仿真计算时间统计结果如表 4 所示。本文模型分段节点总数约为传统模型的 1/4, 但模型仿真时间小于传统模型的 1/50。在不影响仿真结果精度的条件下, 本文模型仿真计算时间较短, 仿真计算效率较高。

为进一步验证本文模型仿真结果的有效性和仿真效率上的优势, 分别对表 5 所示的列车运行工况进行仿真计算, 模型纵向导体分段间距为 20 m。

上述 3 种工况下钢轨电位、杂散电流、排流网电流仿真计算结果相似系数与仿真计算时间见表 6。

表 4 模型分段总数与仿真性能参数

Table 4 Numbers of model segments and simulation time		
模型	导体分段节点总数	计算时间/s
传统模型	9 683	696
本文模型	2 428	11

表 5 列车运行位置及运行工况

工况 参数		数值			
		上行列车	上行列车	下行列车	下行列车
A	位置/m	800	1 900	500	2 500
	牵引电流/A	+1 500	+2 000	+1 000	+2 000
B	位置/m	800	—	—	2 500
	牵引电流/A	+2 000	—	—	+2 000
C	位置/m	1 500	—	1 500	2 500
	牵引电流/A	+2 500	—	+500	+1 500

表 6 模型仿真计算结果相似性计算及仿真时间对照

Table 6 Similarity calculation and simulation time of model simulation results			
参数	数值		
	工况 A	工况 B	工况 C
钢轨电位相似系数	0.999	0.999	0.999
杂散电流相似系数	0.999	0.999	0.999
排流网电流相似系数	0.995	0.998	0.996
传统模型仿真时间/s	98.5	89.5	98.0
本文模型仿真时间/s	7.5	7.0	7.0

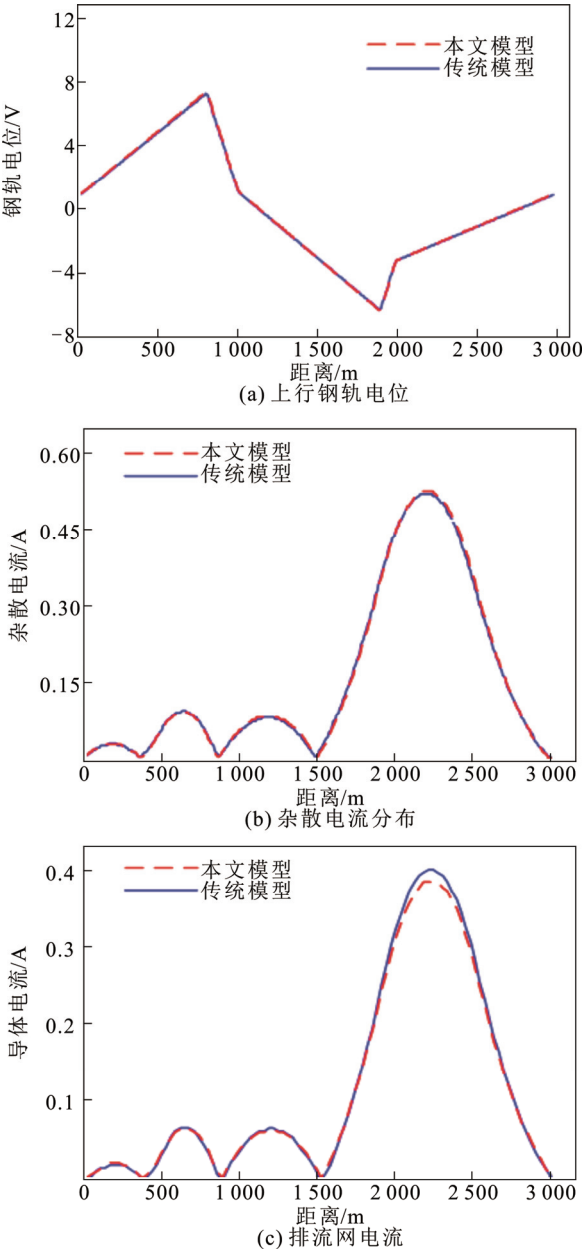


图 6 本文模型与传统模型仿真计算结果

Fig.6 Simulation results of present and reference models



由表 6 可知, 本文模型钢轨电位、杂散电流和排流网电流计算结果与传统模型仿真计算结果相似度 $>0.99$ , 验证模型的有效性; 并且在相同分段间距下, 本文模型纵向导体分段节点总数减少约 75%, 仿真计算时间缩短 98%, 验证了模型在仿真效率上的优势。

综上所述, 本文模型仿真计算结果与传统模型一致, 并不改变仿真结果精度的同时, 仿真速度时间更短, 验证了本文模型的有效性及其在仿真效率上的优势。

4 模型应用

为验证本文所提建模方法的实用性, 依据深圳市某地铁线路的基本情况, 建立长线路杂散电流仿真模型。该线路拓扑结构如图 7 所示, 线路总长 41.7 km, 全线有 30 个车站, 其中 14 座车站含牵引变电站。根据工程实际参数以及文献相关记录参数<sup>[11-14]</sup>, 可等效计算得到杂散电流仿真模型的输入参数如表 7 所示。

基于该线路杂散电流仿真模型, 分析列车运行工况与轨道局部绝缘性能对杂散电流分布的影响。

4.1 列车运行工况影响分析

列车运行工况如表 8 所示。列车在线路中分布位置如图 8 所示。

工况 1: 列车 1 和列车 2 牵引电流均为 2 000 A。  
工况 2: 上行列车运行在牵引工况, 牵引电流为 2 000 A; 下行列车运行在制动工况, 制动电流 1 000 A。  
工况 3: 各列车分别运行在上下行线路各供电区间

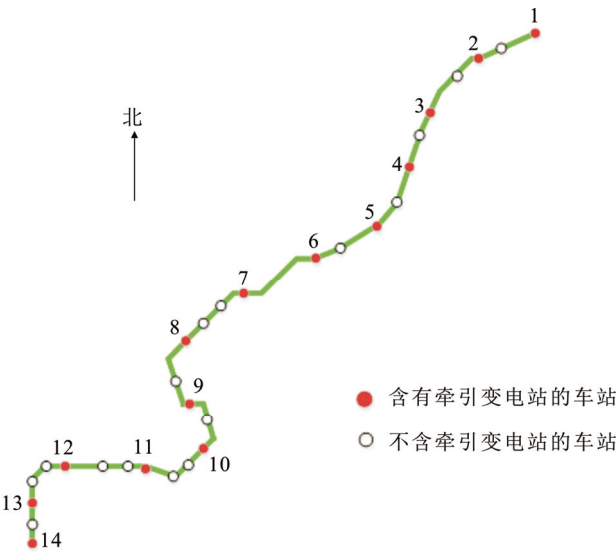


图 7 线路拓扑结构图  
Fig.7 Topological distribution of the DC metro line

中间位置, 列车牵引电流 2 000 A。线路钢轨电位和杂散电流仿真模型仿真计算结果如图 9 所示。

由图 9 可知: 钢轨电位为正值时, 线路中杂散电流增加, 钢轨电位为负值时, 线路杂散电流减少; 改变列车运行状态, 对杂散电流分布影响较大, 例如工况 1 和工况 2 相同列车位置条件下, 改变列车运行状态, 杂散电流分布发生较大变化; 但增加列车数量对杂散电流分布峰值影响较小, 例如工况 3 相比于工况 1 牵引列车数量增加 13 倍, 杂散电流分布的峰值, 仅增加了 1 倍左右。

表 7 模型基本参数

Table 7 Basis parameters of the model		
结构	线路参数	模型参数
钢轨	0.04 $\Omega/\text{km} \times 4$ 根	0.02 $\Omega/\text{km} \times 2$ 根
轨道过渡电阻	6.7 $\Omega/\text{km} \times 2$ 组	305 $\text{k}\Omega \cdot \text{m} \times 0.01 \text{m}$
排流条	0.66 $\Omega/\text{km} \times 12$ 根	0.11 $\Omega/\text{km} \times 2$ 根
纵向结构钢筋	0.69 $\Omega/\text{km} \times 30$ 根	0.046 $\Omega/\text{km} \times 2$ 根

表 8 线路列车运行工况表

Table 8 Operation schedule of railway train		
仿真工况	列车数量	工况
1	2	牵引运行
2	2	混合运行
3	26	牵引工况

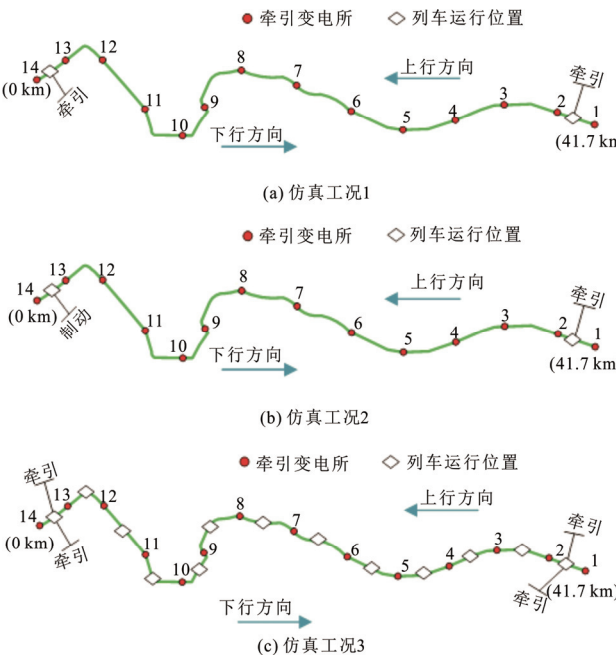


图 8 列车运行位置分布示意图  
Fig.8 Diagram of train location distribution

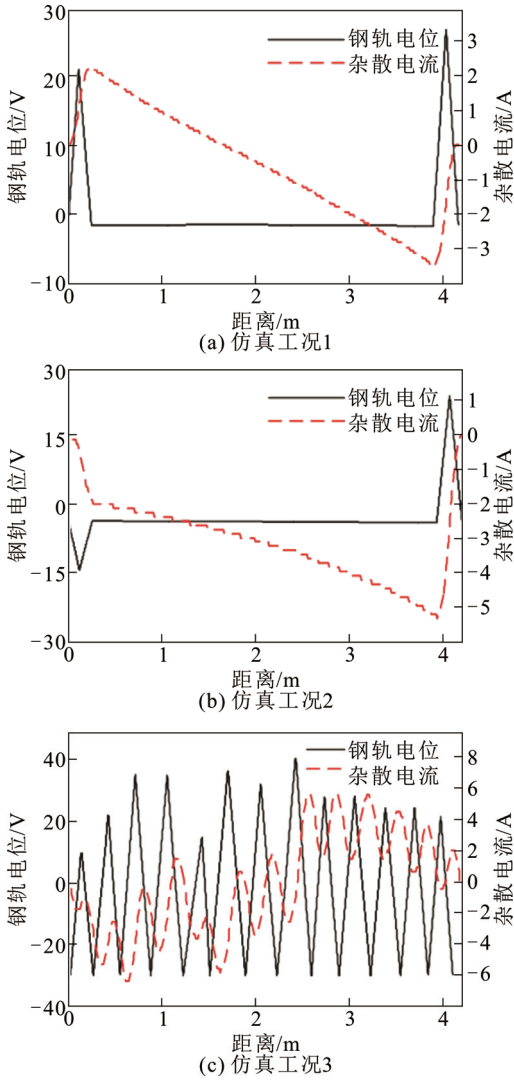


图9 不同工况下钢轨电位及杂散电流仿真计算结果  
Fig.9 Simulation results of rail potential and stray current under different conditions

4.2 局部绝缘性能影响分析

随着城市轨道交通线路的运营, 由于运行环境的不同, 可能会导致轨道局部绝缘性能降低, 导致钢轨过渡电阻减小发生。文中通过改变轨道等效导体涂层电阻率来模拟钢轨局部绝缘的损坏; 轨道等效涂层电阻率越小, 轨道过渡电阻也越小。设置钢轨绝缘破坏位置的涂层电阻率为  $100\text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ , 则根据式(1)可知, 其对应过渡电阻为  $2.15\text{ }\Omega\cdot\text{km}$ 。

表9为绝缘损坏位置及模型涂层电阻率参数。其中列车运行工况与工况3一致, 钢轨电位及杂散电流仿真结果如图10所示。如图10(a)所示, 工况3—工况6的钢轨电位具有良好的一致性, 钢轨电位差异较小。由图10(b)所示, 不同工况下, 杂散电流差异较大, 且在轨道绝缘损坏位置杂散电流明显增

表9 钢轨绝缘损坏位置及等效导体涂层电阻率

Table 9 Location of rail insulation damage and resistivity of equivalent conductor coating

仿真工况	损坏范围/m	涂层电阻率/( $\Omega\cdot\text{m}$ )
4	10 800~11 500	100 000
5	26 500~27 800	100 000
6	35 750~38 200	100 000

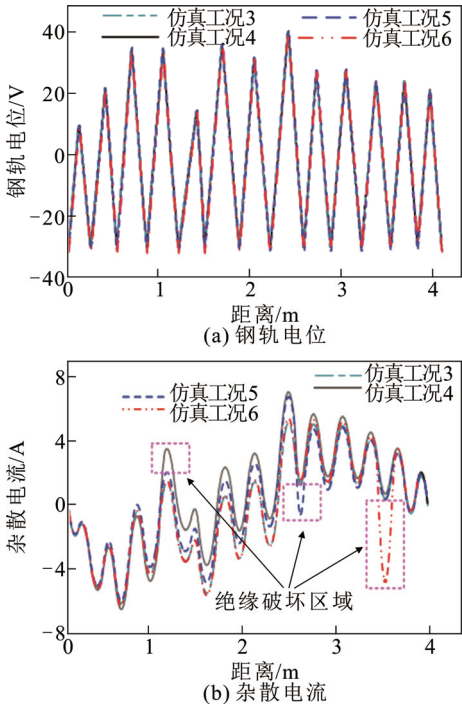


图10 局部绝缘破坏情况下线路杂散电流仿真计算结果  
Fig.10 Simulation results of stray current of transmission line under partial insulation failure

多。工况4—工况6中轨道局部绝缘性能降低为工况3的34%, 局部杂散电流分布分别增加2.35、2.32、5.6 A, 其中工况6局部杂散电流分布最大为工况3的1055%。此外, 线路局部绝缘性能降低, 还将影响线路其他位置的杂散电流分布, 例如工况4中, 线路中非绝缘破坏位置115 000~230 000 m的杂散分布数值也呈现整体增加, 且最大增加1.95 A。可见, 轨道绝缘性能对杂散电流分布影响较大, 因此应加强轨道绝缘性能维护工作, 避免绝缘损坏。

5 结论

1) 基于该方法建立的线路杂散电流仿真模型, 其仿真计算结果与传统杂散电流模型具有良好的一致性, 该方法可以用于线路杂散电流仿真计算。

2) 该方法通过减少线路杂散电流仿真模型导体数量,降低导体分段节点总数,并且在不影响仿真计算结果精度情况下,减少仿真计算时间,提高仿真计算效率。

3) 基于该方法建立深圳市某线路杂散电流仿真模型,并仿真计算线路的钢轨电位和杂散电流,为杂散电流防护及抑制提供参考依据。

## 参考文献 References

- [1] 赵昕,顾保南. 2018年中国城市轨道交通运营线路统计和分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(1): 1-7.  
ZHAO Xin, GU Baonan. Statistical analysis of urban rail transit lines in 2018 China[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(1): 1-7.
- [2] 彭平,周卫华,谢耀恒,等. 关于地铁杂散电流引起的变压器直流偏磁的分析与研究[J]. 变压器, 2017, 54(11): 26-30.  
PENG Ping, ZHOU Weihua, XIE Yaoheng, et al. Analysis and research on DC bias of transformer caused by metro stray current[J]. Transformer, 2017, 54(11): 26-30.
- [3] 刘颖熙,张栋梁,方学礼,等. 直流牵引回流系统杂散电流泄漏量的计算[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 150-154.  
LIU Yingxi, ZHANG Dongliang, FANG Xueli, et al. Calculation of stray current leakage in DC traction reflux system[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(5): 150-154.
- [4] 全江涛,包立珠,童歆,等. 直流输电分布式接地极的建模分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 97-102.  
QUAN Jiangtao, BAO Lizhu, TONG Xin, et al. Modeling analysis of distributed HVDC ground electrode[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 97-102.
- [5] 樊艳芳,耿山,巩晓玲,等. 基于直流偏磁风险指标的变电站选址[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 59-65.  
FAN Yanfang, GENG Shan, GONG Xiaoling, et al. Substation location based on DC bias risk index[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 59-65.
- [6] 王士营. 地铁对区域电网接地回路直流的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.  
WANG Shiyang. Study on the influence of metro on the grounding circuit DC of regional power grid[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2018.
- [7] 张义,蔡汉生,贾磊,等. 高速铁路综合接地系统对牵引变电所接地阻抗测量的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 723-729.  
ZHANG Yi, CAI Hansheng, JIA Lei, et al. Influence of integrated grounding system for high-speed railway on the grounding impedance measurement of traction substation[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 723-729.
- [8] COTTON I, CHARALAMBOUS C A, AYLOTT P, et al. Stray current control in DC mass transit systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(2): 722-730.
- [9] CHARALAMBOUS C A, COTTON I. Influence of soil structures on corrosion performance of floating-DC transit systems[J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(1): 9-16.
- [10] 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.

- [11] 蔡力,王建国,樊亚东,等. 地铁走行轨对地过渡电阻杂散电流分布的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3604-3610.  
CAI Li, WANG Jianguo, FAN Yadong, et al. Influence of the track-to-earth resistance of subway on stray current distribution[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3604-3610.
- [12] 朱峰,李嘉成,曾海波,等. 城市轨道交通轨道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.
- [13] CHARALAMBOUS C A, AYLOTT P. Dynamic stray current evaluations on cut-and-cover sections of DC metro systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(8): 3530-3538.
- [14] 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, China: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [15] 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: GB/T28026.2—2018[S], 2018.  
Railway applications, fixed installations, part 2: protective provisions against the effects of stray current caused by dtraction supply system: GB/T28026.2—2018[S], 2018.
- [16] 尤向阳,葛笑寒,吴萍. 基于零序电流波形相似度的接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 125-130.  
YOU Xiangyang, GE Xiaohan, WU Ping. Grounding fault location method based on waveform similarity of zero-sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 125-130.



WANG Aimin  
Ph.D. candidate



LIN Sheng  
Ph.D., Professor  
Corresponding author

王爱民

1991—, 女, 博士生

主要从事城市轨道交通杂散电流计算方法及分布规律分析研究

E-mail: wam501382@163.com

林圣(通信作者)

1983—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事城市轨道交通杂散电流分析与计算、电力系统保护与故障定位研究

E-mail: slin@swjtu.edu.com

收稿日期 2019-08-15 修回日期 2019-12-26 编辑 曹昭君