DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.04.015
文章编号：1000-128X(2023)04-0107-10

城市轨道交通杂散电流对沿线变电站偏磁特性的影响研究

孙晓鹏[1]，张宇华[1]，暴家良[1]，张璐科[1]，陈　璐[2]
（1.上海电力大学 电气工程学院，上海　200901；
2.国网上海市电力公司，上海　200122）

摘　要：为研究城市轨道交通动态运行时杂散电流对沿线变电站偏磁特性的影响，文章基于上海某220 kV变电站及其附近城市轨道交通系统，利用CDEGS软件建立“轨道交通系统-变电站交流电网”耦合仿真模型，对地铁“启动-惰行-制动-停止”一个完整运行周期下轨道交通系统各结构层次电位和电流变化规律、杂散电流空间分布及变压器中性点偏磁直流进行仿真分析，并与现场检测数据进行对比。结果表明：在此仿真模型中，仅牵引变电站向列车供电时钢轨电位低，对变压器中性点偏磁直流影响较小；制动列车跨区间供电时钢轨电位大幅提高，最大可达25.424 V，变压器中性点偏磁直流可达1.2 A；列车运行105 s钢轨泄漏电流总量最大，可达21.647 A，列车启动12 s，钢轨泄漏电流总量17.908 A，流入变压器中性点电流比例最大，可达3.473%。列车一个完整运行周期下，某些钢轨区间钢轨电位存在正负交替变化，可能导致变压器中性点偏磁直流反向。

关键词：杂散电流；偏磁直流；耦合仿真模型；运行周期；跨区间供电；城市轨道交通
中图分类号：U239.5　　**文献标识码：**A

Research on the influence of stray current from urban rail transit on the magnetic bias characteristics of substations along the line

SUN Xiaopeng[1], ZHANG Yuhua[1], BAO Jialiang[1], ZHANG Luke[1], CHEN Lu[2]

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 2000901, China;
2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: In order to study the influence of stray current from urban rail transit systems in dynamic operation on the magnetic bias characteristics of substations along the line, simulation analysis was conducted in the current study, with a coupled simulation model of "rail transit system - substation AC power grid" established by CDEGS software based on a 220 kV substation in Shanghai and its nearby rail transit system, across a complete metro train running cycle of "starting-coasting-braking-stopping", involving the potential and current variation rules of each structural level, the spatial distribution of stray current and the bias DC of the transformer neutral point. Comparison was then made between the simulation results and the field test data. Based on the results, in this simulation model, the rail potential is low only when the traction substation supplies power to trains, with little effect on the bias DC of the transformer neutral point; the rail potential greatly increases when power is supplied across sections for train braking, up to 25.424 V, and the bias DC of the transformer neutral point can reach 1.2 A; the total rail leakage current peaks, i.e. 21.647 A, after train operation for 105 s, while it is 17.908 A at 12 s after train starting; the highest proportion of inflow to the transformer neutral point is 3.473%. During a complete train running cycle, the rail potential in some rail sections alternates between positive and negative, which may cause bias DC reversing of the transform-

基金项目：国家电网有限公司科技项目资助（520940200013）
通信作者：孙晓鹏（1996—），男，硕士研究生，研究方向为城市轨道交通杂散电流；E-mail: 2992314957@qq.com
引用格式：孙晓鹏,张宇华,暴家良,等.城市轨道交通杂散电流对沿线变电站偏磁特性的影响研究[J].机车电传动,2023(4):107-116.
Citation: SUN Xiaopeng,ZHANG Yuhua,BAO Jialiang,et al.Research on the influence of stray current from urban rail transit on the magnetic bias characteristics of substations along the line[J].Electric drive for locomotives,2023(4):107-116.

er neutral point.

Keywords: stray current; bias DC; coupled simulation model; train running cycle; cross-section power supply; urban rail transit

0 引言

目前城市轨道交通系统大多采用直流牵引供电，列车牵引电流通过钢轨回流至牵引变电站，由于钢轨存在纵向电阻，导致钢轨存在对地电位且钢轨对地并非完全绝缘，钢轨电流从紧固件处泄漏到大地中形成杂散电流[1-3]，造成沿线地下钢筋腐蚀、管道过电压，或侵入沿线变电站，造成变压器发生偏磁现象[4-5]。随着地铁的大力建设，对其运行产生的危害也成为国内外研究的热点。

目前国内外大多采用分布式电阻网络解析模型对轨道交通侧杂散电流分布进行研究，LEE C H[6]和刘燕[7]据杂散电流产生及分布规律，建立了以钢轨-排流网-大地3层结构的电阻网络解析模型，为定量分析杂散电流泄漏提供理论支撑。王爱民[8]基于CDEGS软件提出一种较高仿真精度的长线路杂散电流仿真建模方法，为工程研究杂散电流分布提供参考。钢轨多采用悬浮铺设，钢轨对地绝缘程度对钢轨电流泄漏造成影响[9-12]，文献[13]利用CDEGS软件仿真研究了不均匀过渡电阻对杂散电流分布特性的影响，得出杂散电流大小与过渡电阻大小成反比关系。文献[14]通过建立钢轨电位动态模型仿真分析了列车动态运行下直流牵引供电系统电流跨区间传输现象。钢轨对地电位过高是造成钢轨电流泄漏的主要因素，文献[15]提出了一种变流器牵引电力系统(NRC-TPS)，通过为轨道电流提供零电阻环路可以有效降低钢轨电位和杂散电流。文献[16]基于蒙特卡罗方法模拟优化轨道交通杂散电流泄漏监测，提高泄漏点定位的经济性和有效性。泄漏到土壤中的杂散电流会侵入附近变电站，从而使变压器出现偏磁现象[17-19]。文献[20]证明了列车运行状况以及轨道交通系统与交流电力系统的相对位置会对直流电流的分布产生影响。

在以往的研究过程中，大多是对轨道交通杂散电流腐蚀或列车牵引控制策略进行研究，而对变压器偏磁特性的研究较少。对列车进行动态分析时，均理想地认为仅牵引变电站对列车提供牵引电流，忽视了列车启动和制动过程中列车跨区间供电现象，造成钢轨电位、杂散电流理论仿真值远小于实际现场监测值。本文通过搭建“轨道交通系统-变电站”耦合仿真模型，参考列车实际的牵引供电方案，对地铁“启动-惰行-制动-停止”一个完整运行周期下轨道交通侧各结构层次电位、电流变化规律进行研究，对列车启动和制动过程中“单边供电-双边供电”、“单区间-跨区间”交替供电模式下杂散电流空间分布及变压器偏磁直流变化规律进行仿真分析，并与现场监测结果进行对比，具有较强的现实研究意义。研究成果可为地铁线路规划、电网发展规划提供参考，为杂散电流的监测和治理提供理论支撑。

1 城市轨道交通杂散电流侵入交流电网变压器原理分析

上海某220 kV变电站附近轨道交通系统采用直流牵引供电方式，牵引变电站供给电能给35 kV交流母线，经过降压、整流，由接触网向列车直接供电。列车牵引电流自列车处经钢轨回流至牵引变电站负极。由于钢轨对地并非完全绝缘、钢轨紧固件与大地混凝土结构直接相连，这导致杂散电流的产生。钢轨沿线泄漏到土壤中的杂散电流在土壤中呈现出电场分布，当轨道交通路基与附近变电站存在电位差时，杂散电流流入交流电力系统接地网，造成变压器出现直流偏磁现象，杂散电流会通过变压器中性点流入其他变压器，在交流系统中传递，轨道交通杂散电流传递示意图如图1所示。

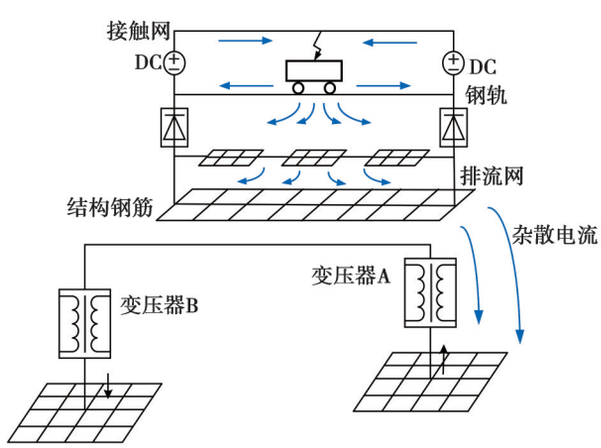


图 1 轨道交通杂散电流传递示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stray current transmission in rail transit system

附近沿线变电站中性点电流大小可表示为：

$$\Delta I=\left(K_1\Delta I_{s1}+K_2\Delta I_{s2}+K_3\Delta I_{s3}+\cdots+K_n\Delta I_{sn}\right)+\left(\Delta I_{a1}+\Delta I_{a2}+\Delta I_{a3}+\cdots+\Delta I_{an}\right)+\Delta I_{m} \tag{1}$$

式中：ΔI_{sn}为通过不同钢轨紧固件位置处泄漏到大地中的电流；K_n为对应泄漏电流流入变压器中性点的比例，由于钢轨沿线泄漏电流会回流至两端牵引变电站，K_n的取值与钢轨紧固件位置处电位、变电站接地网电位、两端牵引变电站电位叠加电场有关，导致K_n的取值较难确定；ΔI_{an}为与变电站有电气联系的变电站中性点出现负电位时由此变压器流入其他变电站的电流；ΔI_{m}为

附近周围环境电场导致的中性点偏磁电流。

本文基于地铁“启动–惰行–制动–停止”一个完整运行周期对杂散电流引起交流电网变压器偏磁直流进行仿真分析。由于系统接触网的电气连通性及等效24脉波不控整流机组能量的单向流通性，列车在制动工况时，列车再生制动向接触网回馈能量，根据线路中其他列车位置、牵引电流大小、列车自身用电等情况与牵引变电站按最优牵引供电方案进行电能分配，导致列车牵引电流来自其他供电区间制动列车或牵引变电站。制动列车或牵引变电站单独为启动列车供电时构成列车单边供电模式，分析模型如图2所示。

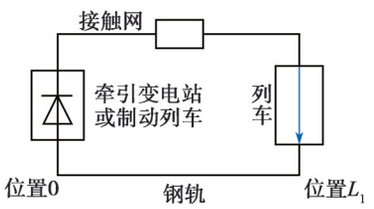
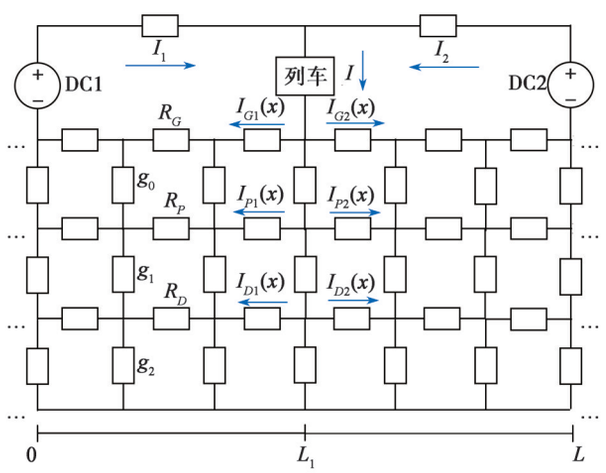


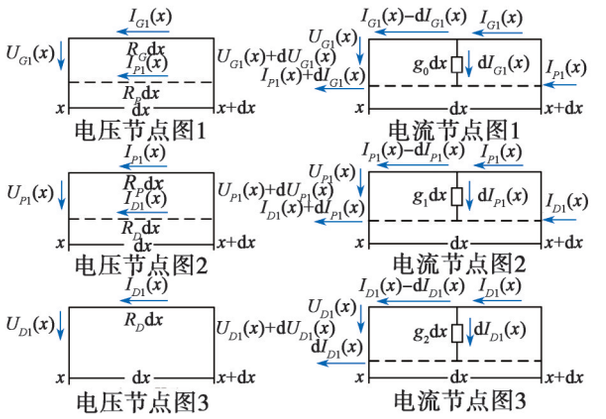
图 2　单边供电模型

Fig. 2　Unilateral power supply model

地铁供电电阻网络模型采用“钢轨–排流网–结构钢筋–大地”4层结构，牵引变电站和列车等效为电流源，各金属结构等效为电阻，轨道交通4层结构电阻网络模型如图3(a)所示。



(a) 电阻网络模型



(b) 电压节点与电流节点图

图3　双边供电模型

Fig. 3　Bilateral power supply model

本文中对图2所示的单边供电电阻网络模型进行推导如下：

在 $0\leqslant x\leqslant L_1$ 区间内，根据基尔霍夫电压定律（$\Sigma U=0$），由图3中的电压节点图可得：

$$\left.\begin{aligned}&U_{G1}(x)+\mathrm{d}U_{G1}(x)+I_{P1}R_P=U_{G1}(x)+I_{G1}R_G\\&U_{P1}(x)+\mathrm{d}U_{P1}(x)+I_{D1}R_D=U_{P1}(x)+I_{P1}R_P\\&U_{D1}(x)+\mathrm{d}U_{D1}(x)=U_{D1}(x)+I_{D1}R_D\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

根据基尔霍夫电流定律（$\Sigma I=0$），由图3中电流节点图可得：

$$\left.\begin{aligned}&I_{G1}(x)=I_{G1}(x)-\mathrm{d}I_{G1}(x)+U_{G1}(x)\times g_0\mathrm{d}x\\&I_{P1}(x)=I_{P1}(x)-\mathrm{d}I_{P1}(x)+U_{P1}(x)\times g_1\mathrm{d}x\\&I_{D1}(x)=I_{D1}(x)-\mathrm{d}I_{D1}(x)+U_{D1}(x)\times g_2\mathrm{d}x\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

即可得：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{y}(x)}{\mathrm{d}x}=\boldsymbol{M}\times\boldsymbol{y}(x)\tag{4}$$

$$\boldsymbol{y}(x)=\begin{bmatrix}U_{G1}(x)\\U_{P1}(x)\\U_{D1}(x)\\I_{G1}(x)\\I_{P1}(x)\\I_{D1}(x)\end{bmatrix},f=\begin{bmatrix}0\\0\\-I_1R_D\\0\\0\\0\end{bmatrix}\tag{5}$$

$$\begin{bmatrix}U_{G1}(x)\\U_{P1}(x)\\U_{D1}(x)\\I_{G1}(x)\\I_{P1}(x)\\I_{D1}(x)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}b_{11}&b_{12}&b_{13}&b_{14}&b_{15}&b_{16}\\b_{21}&b_{22}&b_{23}&b_{24}&b_{25}&b_{26}\\b_{31}&b_{32}&b_{33}&b_{34}&b_{35}&b_{36}\\b_{41}&b_{42}&b_{43}&b_{44}&b_{45}&b_{46}\\b_{51}&b_{52}&b_{53}&b_{54}&b_{55}&b_{56}\\b_{61}&b_{62}&b_{63}&b_{64}&b_{65}&b_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}C_1\mathrm{e}^{\lambda_1x}\\C_2\mathrm{e}^{\lambda_2x}\\C_3\mathrm{e}^{\lambda_3x}\\C_4\mathrm{e}^{\lambda_4x}\\C_5\mathrm{e}^{\lambda_5x}\\C_6\mathrm{e}^{\lambda_6x}\end{bmatrix}\tag{6}$$

λ_1~λ_6 为矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的特征值，$[b_{1f}\ \ b_{2f}\ \ b_{3f}\ \ b_{4f}\ \ b_{5f}\ \ b_{6f}\ ]^{\mathrm{T}}$ 为特征值对应的特征向量。

边界条件为 $I_{G1}(0)=I_1,I_{P1}(0)=0,I_{D1}(0)=0,I_{G1}(L_1)=I_1,I_{P1}(L_1)=0,\ I_{D1}(L_1)=0$。

C_1~C_6 为边界条件决定的系数。制动列车与牵引变电站共同向启动列车供电时，分析模型如图4所示，此时制动列车和牵引变电站分别提供电流 $\lambda_1 I$、λ_2（其中 $\lambda_1+\lambda_2=1$）。

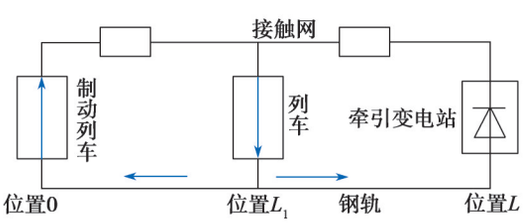


图4　双边供电分析模型图

Fig. 4　Bilateral power supply analysis model

在 $L_1<x\leqslant L$ 区间时，特征值的求法与 $0\leqslant x\leqslant L_1$ 区间相似，根据式(7)边界条件求得边界条件系数和此区间的钢轨、排流网、结构钢筋的电压和电流 $U_{G2}(x)$、$U_{P2}(x)$、$U_{D2}(x)$、$I_{G2}(x)$、$I_{P2}(x)$、$I_{D2}(x)$，具体如下：

$$\left.\begin{array}{l} I_{G1}(0)=\lambda_1 I \\ I_{P1}(0)=0 \\ I_{D1}(0)=0 \end{array}\right\},\left\{\begin{array}{l} I_{G2}(L-L_1)=I_2 \\ I_{P2}(L-L_1)=0 \\ I_{D2}(L-L_1)=0 \end{array}\right\}$$
$$\left.\begin{array}{l} I_{G1}(L_1)=\lambda_1 I \\ I_{P1}(L_1)=0 \\ I_{D1}(L_1)=0 \end{array}\right\},\left\{\begin{array}{l} I_{G2}(L-L)=I_1 \\ I_{P2}(L-L)=0 \\ I_{D2}(L-L)=0 \end{array}\right\} \tag{7}$$

$$\left\{\begin{array}{l} U_G=U_{G1}(x<L_1)+U_{G2}(x\geqslant L_1) \\ U_P=U_{P1}(x<L_1)+U_{P2}(x\geqslant L_1) \\ U_D=U_{D1}(x<L_1)+U_{D2}(x\geqslant L_1) \\ I_G=I_{G1}(x<L_1)+I_{G2}(x\geqslant L_1) \\ I_P=I_{P1}(x<L_1)+I_{P2}(x\geqslant L_1) \\ I_D=I_{D1}(x<L_1)+I_{D2}(x\geqslant L_1) \end{array}\right. \tag{8}$$

钢轨对地电位为 $U_G+U_P+U_D$，排流网对地电位为 U_P+U_D，结构钢筋电位为 U_D，流入大地的电流为 $I-I_G-I_P-I_D$。

2 仿真模型

本文中根据上海某220 kV变电站及其附近轨道交通分布情况利用CDEGS软件HIFREQ模块建立“轨道交通-交流电网变电站”耦合仿真模型，交流电网系统中220 kV变压器有21条220 kV出线，轨道交通系统及变电站参数、位置分布见图5所示。本文对牵引变电站2到牵引变电站3之间B列车一个完整运行周期下杂散电流对220 kV变电站偏磁直流影响进行研究，除220 kV变电站外各变电站距离轨道交通系统均很远，超出杂散电流影响范围。

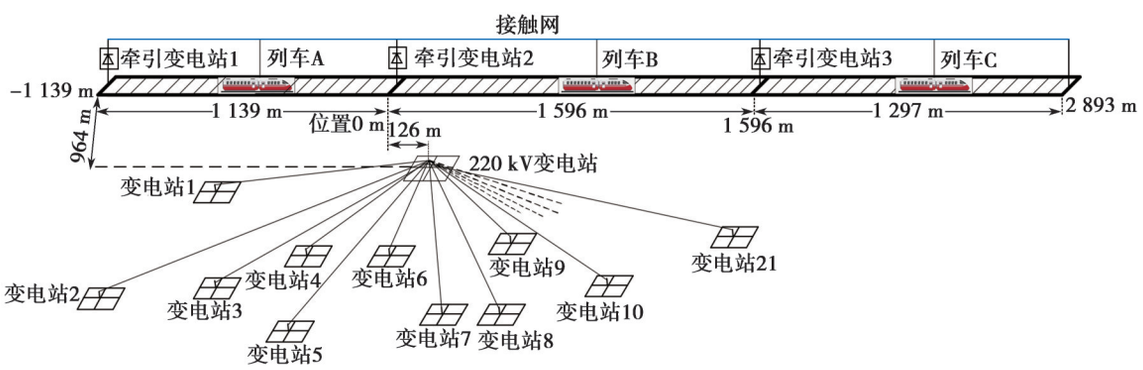


图 5 “轨道交通-交流电网变电站”耦合仿真模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the coupled simulation model of "rail transit - AC power grid substation"

图5所示轨道交通系统供电电阻网络模型包括“接触网-钢轨-排流网-结构钢筋”4层结构，利用圆导体等效各层金属结构，CDEGS地铁模型如图6所示，各层结构参数见表1。

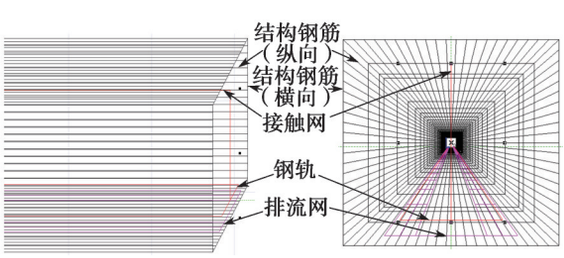


图 6 地铁轨道交通模型

Fig. 6 Metro rail transit model

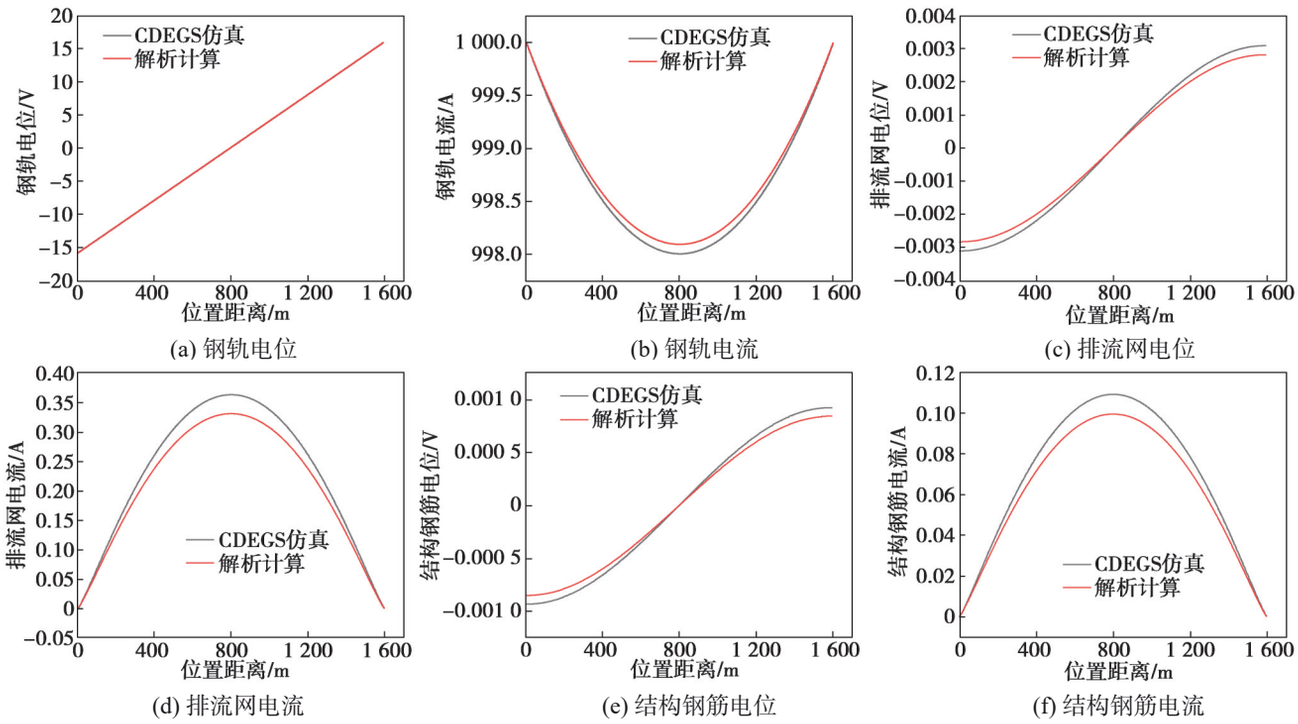
为验证轨道交通CDEGS模型的正确性，本文对电阻网络解析模型和CDEGS仿真结果进行对比。CDEGS仿真中，参考牵引变电站2、3之间距离，设置钢轨长度1 596 m，列车位于钢轨中间798 m位置处，牵引电流2 000 A。在理论计算时，设置钢轨纵向电阻为20 mΩ/km，钢轨对地过渡电阻为40 Ω·km，排流网、结构钢筋纵向电阻为50 mΩ•km，排流网、结构钢筋过渡电阻0.5 Ω/km[13]。解析计算结果和仿真结果见图7，钢轨、排流网、结构钢筋电位解析计算结果与仿真计算结果基本一致，电位最大偏差分别不超过0.9%、1.6%、2.4%。在列车位置处钢轨、排流网、结构钢筋电流解析计算曲线与仿真计算偏差最大，钢轨电流偏差不超

表1 轨道交通模型各结构参数

Table 1 Structural parameters of the rail transit model

名称	参数	数值或说明
钢轨	数量	2
	半径/m	0.08
	纵向电阻/(Ω·km^{-1})	0.02
钢轨涂层	电阻/Ω	5 000
	厚度/m	0.005
排流网	数量	6
	半径/m	0.02
	纵向电阻/(Ω·km^{-1})	0.05
结构钢筋	数量	22（钢轨下层部分）
	半径/m	0.02
	纵向电阻(Ω·km^{-1})	0.05
接触网	半径/m	0.03
	电阻	0
	涂层类型	绝缘

过 0.19 A，排流网电流偏差不超过 0.051 A，结构钢筋电流偏差不超过 0.017 A，可以证明 CDEGS 模型的正确性和适用性。解析计算和 CDEGS 仿真存在偏差的原因主要总结如下：①CDEGS 仿真模型中钢轨涂层单位长度电阻、排流网和结构钢筋与钢轨之间间距、土壤电阻率大小和电阻网络模型中的过渡电阻存在差别。②解析计算模型的边界条件较为理想化，而 CDEGS 软件更偏于工程实际。



(a) 钢轨电位　(b) 钢轨电流　(c) 排流网电位

(d) 排流网电流　(e) 结构钢筋电位　(f) 结构钢筋电流

图 7　解析计算与 CDEGS 仿真结果

Fig. 7　Analytical calculation and CDEGS simulation results

3　仿真结果

列车 B 启动过程中牵引电流由处在制动过程的列车 C 和牵引变电站 2 按最优供电策略共同提供，列车 B 制动运行时向牵引变电站 1 和牵引变电站 2 之间处在启动过程的列车 A 回馈制动电能，对列车 B “启动–惰行–制动–停止”不同工况下杂散电流进行仿真分析，需要考虑相邻地铁站地铁列车启动、制动过程。列车 A、B、C 3 列车牵引电流随时间变化曲线和列车 B 牵引电流来源如图 8 所示，3 列列车运动轨迹随时间变化如图 9 所示，依据以上数据利用 CDEGS 软件对列车施加激励进行仿真分析。当线路上列车再生制动能量过剩会导致牵引网网压升高而超过设定值，通过制动电阻吸收再生制动能量使牵引网网压维持在设定值。本文仿真中，认定跨区间供电不会导致牵引网压高于设定值。

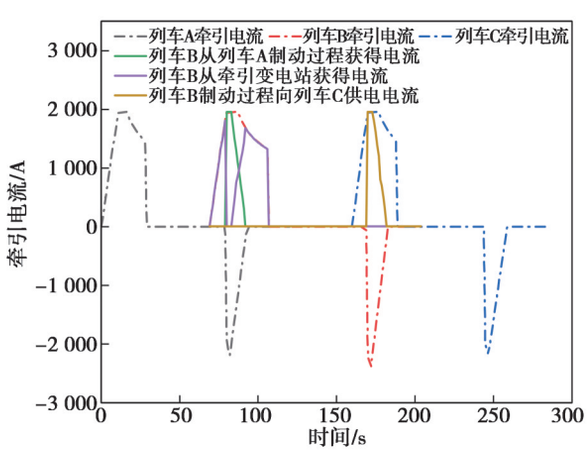


图 8　列车牵引电流变化曲线

Fig. 8　Variation curve of traction current

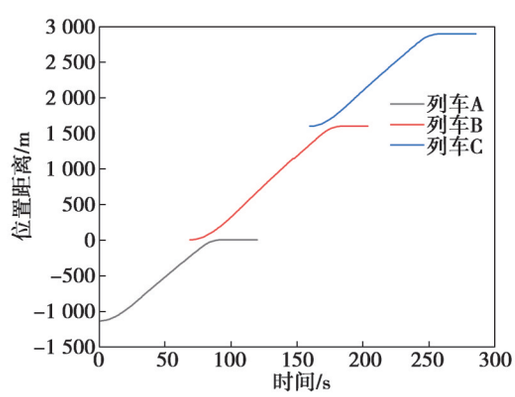


图 9　列车位置随时间变化曲线

Fig. 9　Variation curve of train position over time

3.1　牵引电流回流路径

列车 B 一个完整运行周期下牵引电流回流路径见图 10 所示，列车 B 启动过程中按牵引电流来源可分为牵引变电站向列车 B 供电、制动列车 C 向列车 B 供电、制动列车 C 和牵引变电站共同向 B 列车供电，制动过程分为制动列车 B 向列车 A 供电、制动列车 B 和牵引变电站共

同向列车A供电。牵引电流自列车处经钢轨回流至供电侧，列车B启动、制动过程存在“单边供电–双边供电”、“单区间–跨区间”交替供电情况，列车行进过程中列车位置不断改变，均导致牵引电流回流路径不断变化。牵引变电站单独向列车供电时，牵引电流回流路径最短，制动列车参与向启动列车供电时会形成跨区间供电，当制动列车和牵引变电站共同向启动列车供电时，构成跨区间双边供电模式，牵引电流回流路径最长。

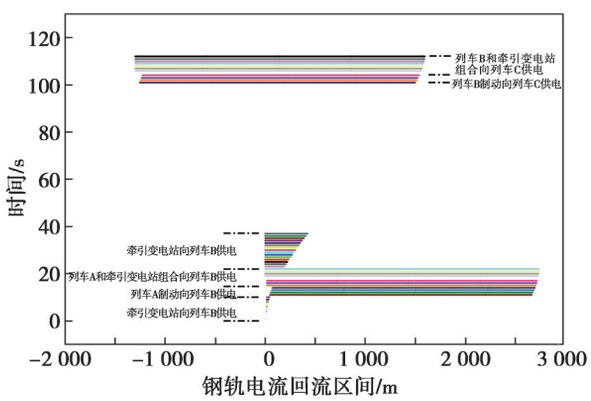


图10 牵引电流回流路径

Fig. 10 Traction current return path

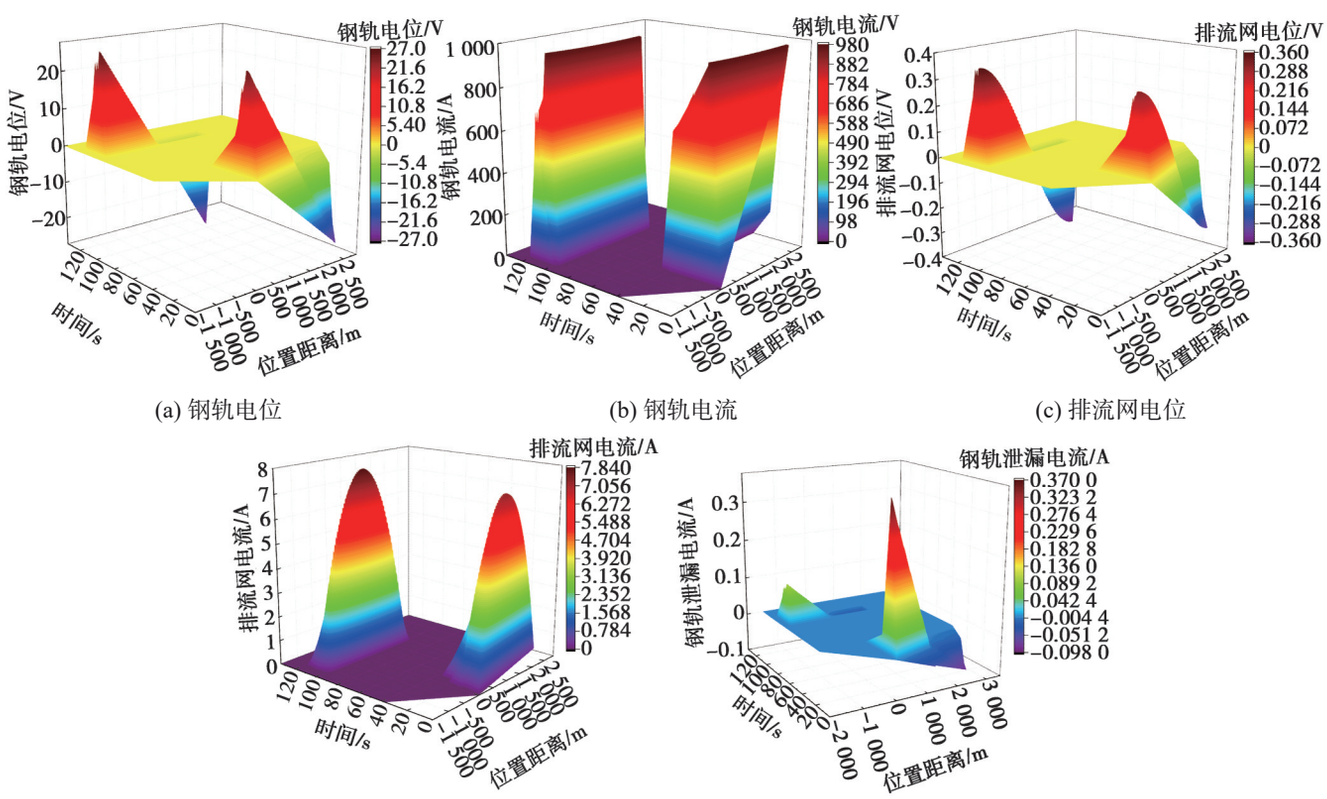
3.2 轨道交通各结构层次电位和电流动态分布

列车在“启动–惰行–制动–停止”整个运行周期下轨道交通各结构层次电位、电流动态分布如图11所示，抽取列车运行10 s、11 s、15 s、23 s、101 s、105 s时刻仿真结果如图12所示。结构钢筋电位、电流分布分别与排流网电位、电流分布呈现出相同变化规律，仅幅值大小存在差别，在以下研究过程中，对结构钢筋表述部分省略。

在启动过程1~10 s（1阶段）过程中，仅牵引变电站向列车B供电，牵引电流自列车位置通过钢轨回流至牵引变电站，此过程牵引电流回流路径较短，钢轨沿线对地电位幅值较低。钢轨泄漏电流与钢轨电位呈现相同分布规律，钢轨电流在钢轨对地电位为正的区间泄漏，自钢轨电位为负的区间流回钢轨，从而使钢轨电流呈现先减后增的类抛物线分布。排流网电位受钢轨泄漏电流分布影响，以列车位置和牵引变电站中点呈中心对称分布。排流网电流和钢轨电流变化规律相反。列车行驶位置处钢轨、排流网电位最高。

列车启动11~14 s（2阶段）过程中，列车C处在制动过程，列车B牵引电流完全由列车C回馈制动能量提供，此过程中列车C跨区间向列车B供电，钢轨电位大幅升高，钢轨泄漏电流增大，排流网电位升高、电流随之增大。

列车启动15~22 s（3阶段）过程中，列车C制动电流下降，由牵引变电站和制动列车C共同向列车B供电，形成近似双边供电的供能模式。列车B左右两侧区间等同于并联电路模型，牵引变电站供电区间长度(钢轨电阻)小于制动列车C供电区间长度（钢轨电阻），从列车处回流至牵引变电站电流略大于牵引变电站提供给列车B的牵引电流，此差值大于“牵引变电站—列车”区间钢轨泄漏电流总量，导致自列车位



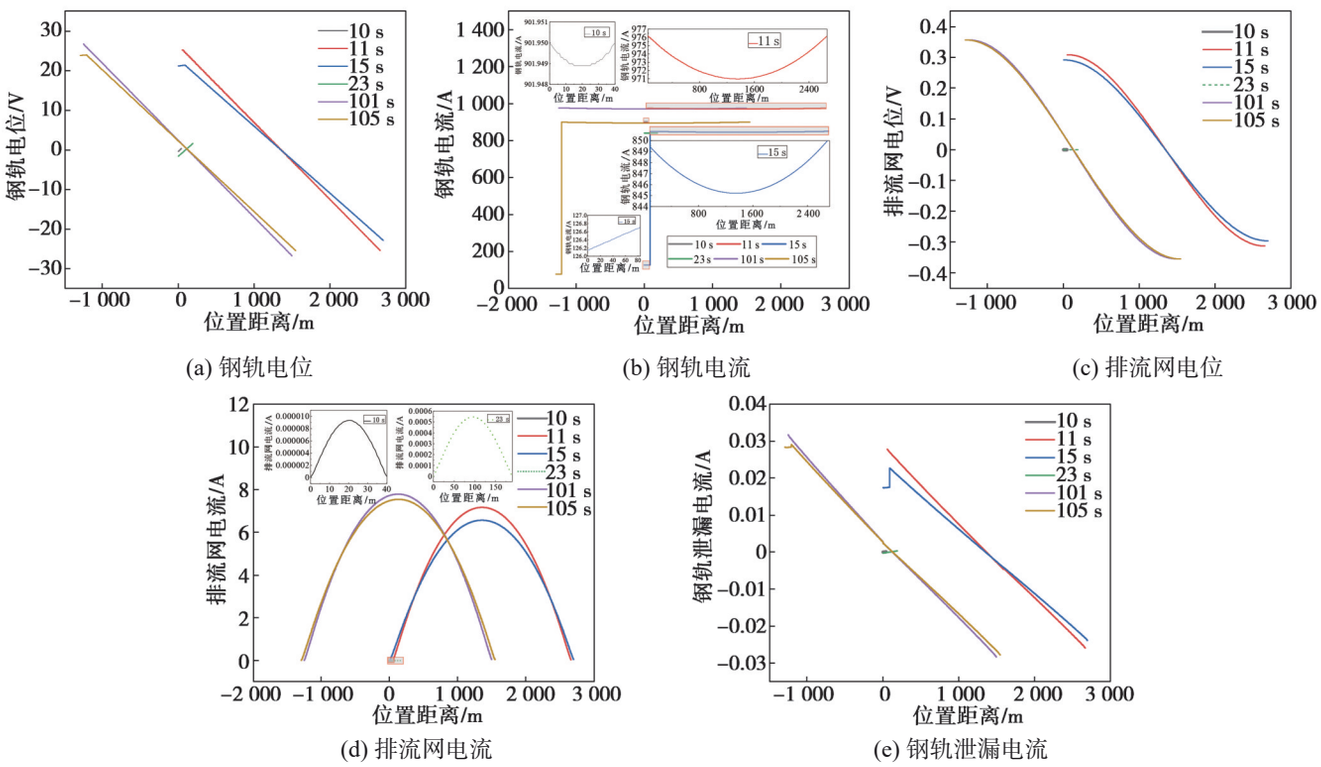
(a) 钢轨电位 (b) 钢轨电流 (c) 排流网电位

(d) 排流网电流 (e) 钢轨泄漏电流

图11 一个运行周期下钢轨和排流网电位、电流以及钢轨泄漏电流动态分布

Fig. 11 Dynamic distribution of potential and current of rail and drainage net and rail leakage current in one train operation cycle

置回流至牵引变电站电流呈减小趋势，此区间钢轨电位呈下降趋势但恒大于0。列车的通过钢轨回流至制动列车C电流略小于列车A提供的牵引电流，钢轨电流呈现出先减小后增大趋势，钢轨电位处于负电位的区间较长，杂散电流流回钢轨电流比例较大。列车运行15~18 s过程中，列车牵引电流不变，牵引电流通过钢轨回流区间长度差别极小，可忽略此影响。随着制动列车跨区间供电电流比例下降，钢轨电位降低，当列车B牵引电流完全由制动列车C提供时，钢轨电位最高为25.424 V，当牵引电流56.34%来源于制动列车时，钢轨电位最高为12.592 V。此过程中列车左右区间钢轨电流呈现不均衡分布，但“牵引变电站—列车”供电区间长度较短，对钢轨电位整体分布和沿线泄漏电流影响较小，因此，对排流网电位、电流影响不大。



(a) 钢轨电位　(b) 钢轨电流　(c) 排流网电位

(d) 排流网电流　(e) 钢轨泄漏电流

图12　部分时刻钢轨和排流网电位、电流以及钢轨泄漏电流分布

Fig. 12　Distribution of potential and current of rail and drainage net and rail leakage current at specific moments

列车启动23~37 s过程中，列车C制动过程结束，由牵引变电站向列车B单独供电，轨道交通各结构层次电位、电流分布规律与列车启动1阶段无异，此过程列车行驶距离更远，牵引电流回流路径增长，钢轨、排流网对地电位相对列车启动1阶段更高，排流网电流、钢轨泄漏电流相对列车启动1阶段更大。

列车B行驶100~104 s时，列车制动运行，通过接触网向处在启动过程的列车A供电，此时列车B等效为电源，牵引电流自列车A位置经钢轨回流至列车B，列车B位置处钢轨、排流网电位最低。列车B行驶105~112 s过程中，列车B和牵引变电站共同向列车A供电，此过程与列车B启动3阶段相似，仅牵引电流通过钢轨回流路径改变。

4　杂散电流空间分布及对变压器中性点偏磁直流影响

轨道交通运行时，由于钢轨存在对地电位差且钢轨对地并非完全绝缘，钢轨电流泄漏到土壤中从而形成杂散电流，杂散电流在大地中呈现出电场分布，会侵入附近交流电网系统，从而使变压器出现偏磁现象。本文在钢轨侧依据牵引电流回流路径设置不同长度、宽度4 000 m的观测网，通过对观测网电位及电流密度幅值分布研究地铁杂散电流的空间分布及对变压器中性点偏磁直流影响。

列车B一个完整运行周期下变压器中性点偏磁直流变化曲线见图13所示。列车B启动1阶段，仅牵引变电站向列车供电，随着列车牵引电流增大，回流路径增长，

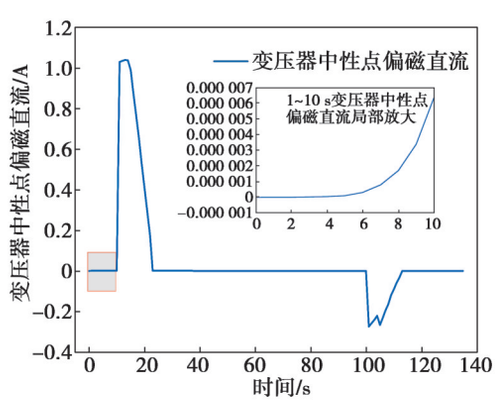
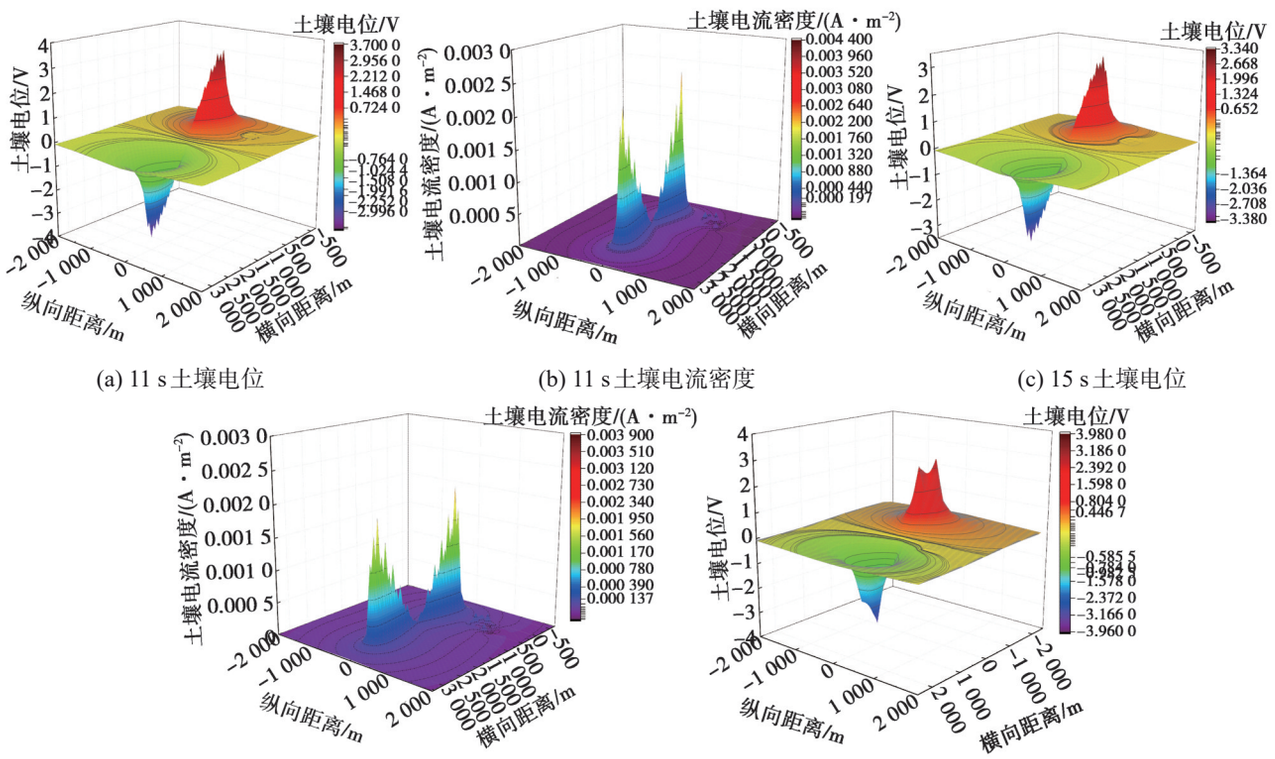


图13　变压器中性点偏磁直流变化曲线

Fig. 13　Variation curve of bias DC of transformer neutral point

变压器中性点偏磁直流呈指数函数增大，但此过程因钢轨沿线泄漏电流很小，且牵引变电站与列车距离较短，牵引变电站负电位对杂散电流回流路径影响很大，导致杂散电流很大比例流入钢轨负电位区间及排流网，极少比例的电流会侵入交流电网变电站，变压器偏磁直流数量级很小，列车启动10 s时，变压器偏磁直流为6.7 μA。

列车B启动2阶段，制动列车单独向列车B供电，形成单边供电跨区间供电模式，此时供电距离较长，钢轨对地电位较高、钢轨泄漏电流较大。列车启动11 s时土壤空间电位及等电流密度幅值分布分别见图14(a)、图14(b)所示，列车B钢轨位置处路基电位最高，可达3.25 V，制动列车A处钢轨电位最低，为−3.25 V。制动列车C和列车B位置处土壤电流密度幅值最大，但钢轨电流自钢轨对地电位为正的区间泄漏，自钢轨对地电位为负的区间流回钢轨，因此制动列车C和列车B处土壤电流密度幅值相同，流动方向相反。变电站接地网导电性远大于土壤，金属接地网对土壤中杂散电流呈现出吸附和屏蔽效应，土壤中杂散电流向接地网密集分布，土壤等电位曲线在变电站接地网附近出现凹陷畸变。此时变电站接地网处在土壤电位正区域，杂散电流从接地网流入变压器中性点，列车运行11 s时变压器偏磁直流为1.02 A。在此过程中列车C制动运行速度大于列车B启动运行速度，牵引电流不变，制动列车供电距离增大，变压器中性点偏磁直流增大。



(a) 11 s土壤电位　(b) 11 s土壤电流密度　(c) 15 s土壤电位

(d) 15 s土壤电流密度　(e) 101 s土壤电位

图14　观测网电位、电流密度幅值空间分布

Fig. 14　Amplitude spatial distribution of observed grid potential and current density

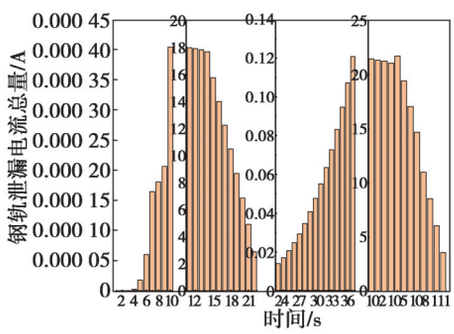
列车B启动3阶段，制动列车C和牵引变电站共同向列车B供电。此过程牵引电流中制动列车C供电比例下降，钢轨对地电位和钢轨泄漏电流减小，杂散电流空间电位和电流密度幅值均下降，分别见图14(c)、图14(d)所示，列车启动15 s时，列车B位置处土壤电位最大为3.02 V，电流密度幅值最大为0.002 1 A/m^2，相比制动列车单独供电情况有所下降。在此阶段杂散电流对变压器中性点偏磁直流近似线性减小，3阶段结束时，变压器中性点偏磁直流从0.990 3 A下降为0.171 0 A。

列车B启动4阶段，列车C制动结束，由牵引变电站单独向列车B供电，与1阶段一致，此过程变压器中性点偏磁直流由0.002 510 A变化至0.000 739 A。

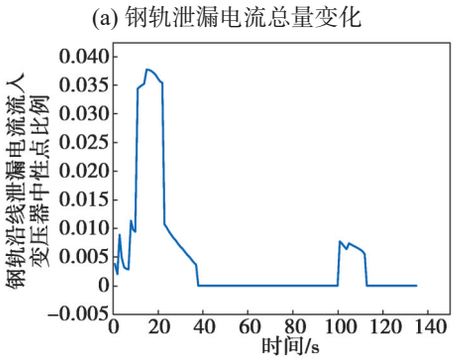
列车B制动运行1阶段，列车B等效为电流源向处在启动过程的列车C单独供电，与启动过程单边供电相似，但此时牵引电流自列车A通过钢轨回流至列车B，使得列车A、B中点位置到列车B区间钢轨电位为负，变电站接地网呈现负电位，列车运行101 s时观测网电位如图14(e)所示，与之有电气联系的变电站接地网处不受轨道交通杂散电流影响，变压器中性点偏磁直流自其他变电站中性点流入此220 kV变电站变压器中性点，变压器中性点偏磁直流反向，数值为−0.27 A。随着列车A、B行进，变电站接地网处电位升高，自其他变电站流入此变压器中性点偏磁直流减小。列车B制动2阶段，列车B与牵引变电站共同向列车A供电，变压器中性点偏磁直流为负，且大小呈下降趋势。但列车制动并非导致变压器中性点偏磁直流反向的直接

原因，列车运行过程中，钢轨部分区间对地电位正负发生改变，其空间电位及杂散电流流动方向改变，当其附近存在变电站时，变压器中性点偏磁直流发生“正–负”或“负–正”的方向改变。

取钢轨对地电位为正的钢轨区间的泄漏电流进行积分得到列车 B 整个运行周期下钢轨泄漏电流总量及流入变压器中性点电流比例分布如图 15 所示。列车 B 启动 11~23 s 和列车制动过程中，钢轨泄漏电流总量及侵入交流电网变压器中性点电流比例均较大，列车运行 105 s，由列车 B 制动单独向列车 A 供电改变为和牵引变电站共同向列车 A 供电时，钢轨泄漏电流总量最大，可达 21.647 A，此时 0.738% 泄漏电流流入变压器中性点。列车启动 12 s，钢轨泄漏电流总量 17.908 A，流入变压器中性点电流比例最大，可达 3.473%。



(a) 钢轨泄漏电流总量变化



(b) 钢轨泄漏电流流入变压器中性点比例

图 15　钢轨泄漏电流总量及侵入变压器中性点电流比例

Fig. 15　Total rail leakage current and inflow proportion to transformer neutral point

5　现场检测

在 23:10—23:30 时间段（地铁临近停运），对上海市某 220 kV1# 主变压器进行中性点电流监测，现场监测数据与仿真结果对比见图 16 所示，仿真结果与现场监测数据具有较高吻合度，证明轨道交通会造成变压器中性点出现偏磁直流，且随着地铁列车的启动和制动会造成变压器中性点电流呈现周期性变化。但现场监测数据值总体大于仿真结果值，且个别时间点偏磁直流出现波峰，与仿真结果差别较大。造成变压器中性点出现偏磁直流误差的原因较多，如：①实际地下电磁场环境复杂，变电站附近接地电气设备较多，会对变压器偏磁电流产生影响；②与 220 kV 变电站有电气联系的其他变电站中性点出现负电位时存在附加电流；③存在能导致“轨道交通–交流电力系统”附近电场和大地电位产生波动的不可预知因素。

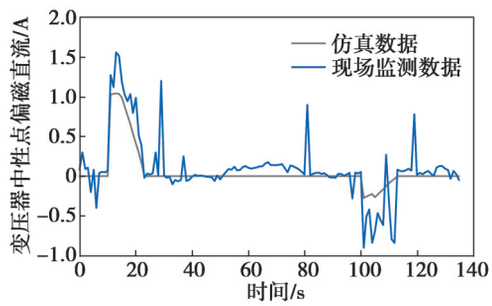


图 16　变压器中性点电流现场监测与仿真对比

Fig. 16　Comparison of transformer neutral point current between field monitoring and simulation

6　结论

本文依据上海某 220 kV 变电站及其附近轨道交通系统利用 CDEGS 软件搭建“轨道交通系统–交流电网变电站”耦合仿真模型，对地铁列车一个完整运行周期下杂散电流对变压器偏磁直流影响进行仿真分析，得出以下结论：①列车启动、制动过程中存在“单边供电–双边供电”、“单区间–跨区间”交替供电情况，牵引电流回流路径时刻变化，牵引变电站单独向列车供电时，牵引电流回流路径最短，当制动列车和牵引变电站共同向启动列车供电时，构成跨区间双边供电模式，牵引电流回流路径最长。当牵引电流中由制动列车 C 供电比例下降时，钢轨对地电位和钢轨泄漏电流减小，杂散电流空间电位降低、电流密度幅值均下降。②轨道交通杂散电流会造成交流电网变压器出现偏磁现象，仅牵引变电站向列车供电时，对变压器偏磁影响较小，在制动列车跨区间供电情况下影响较大，偏磁电流可达 1.2 A，且列车制动或在行进过程中，钢轨部分区间对地电位正负发生改变，其空间电位及杂散电流流动方向改变，当其附近存在变电站时，变压器中性点偏磁直流发生“正–负”或“负–正”的方向改变。本文仿真结果与现场监测数据具有较高符合度，证明了本文研究结果的正确性及适用性。③列车动态运行过程中，钢轨泄漏电流及流入交流电网变压器电流比例不同，在此仿真模型中，列车运行 105 s，钢轨泄漏电流总量最大，可达 21.647 A，此时 0.738% 泄漏电流流入变压器中性点。列车启动 12 s，钢轨泄漏电流总量 17.908 A，流入变压器中性点电流比例最大，可达 3.473%。④随着制动列车跨区间供电电流比例下降，钢轨电位降低，在此仿真模型中，当列车 B 牵引电流完全由制动列车 C 提供时，钢轨电位最高为 25.424 V，当牵引电流 56.34% 来源于制动列车时，

钢轨电位最大12.592 V。

参考文献：

[1] 庞原冰. 城市轨道交通杂散电流研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
PANG Yuanbing. Study on subway stray current in urban rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.

[2] 李威. 地铁杂散电流腐蚀监测及防护技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
LI Wei. Monitoring and protection technology of stray current corrosion in subway[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2004.

[3] 曹阿林. 埋地金属管线的杂散电流腐蚀防护研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
CAO Alin. Protection against stray current corrosion of buried metals pipeline[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.

[4] 吴书煜, 汲胜昌, 孙建涛, 等. 在运换流变压器振动监测及其变化规律[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1561-1570.
WU Shuyu, JI Shengchang, SUN Jiantao, et al. Vibration monitoring and variation law of converter transformer in operation[J].High voltage engineering, 2022, 48(4): 1561-1570.

[5] 熊奇, 王沐雪, 黄浩, 等. 复杂地质情况下接地极土壤模型建立及研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2269-2277.
XIONG Qi, WANG Muxue, HUANG Hao, et al. Establishment of earth model for HVDC earth electrode in complicated terrain[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2269-2277.

[6] LEE C H, WANG H M. Effects of grounding schemes on rail potential and stray currents in Taipei rail transit systems [J]. IEE Proceedings: Electric power applications, 2001, 148 (2): 148-154.

[7] 刘燕, 王京梅, 赵丽, 等. 地铁杂散电流分布的数学模型[J]. 工程数学学报, 2009, 26(4): 571-576.
LIU Yan, WANG Jingmei, ZHAO Li, et al. Mathematical model of distribution of metro stray current[J]. Chinese journal of engineering mathematics, 2009, 26(4): 571-576.

[8] 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.

[9] 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.

[10] IBRAHEM A, ELRAYYAH A, SOZER Y, et al. DC railway system emulator for stray current and touch voltage prediction[J]. IEEE transactions on industry applications, 2017, 53 (1): 439-446.

[11] 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. Analysis of stray current dynamics based on CDEGS[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[12] 肖本旺, 王渝红, 欧林, 等. 直流偏磁抑制措施研究综述[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 209-216.
XIAO Benwang, WANG Yuhong, OU Lin, et al. Reviews of the restraining measures of DC bias[J]. High voltage apparatus, 2015, 51(10): 209-216.

[13] 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.

[14] 杜贵府, 张栋梁, 王崇林, 等. 直流牵引供电系统电流跨区间传输对钢轨电位影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 129-139.
DU Guifu, ZHANG Dongliang, WANG Chonglin, et al. Effect of traction current transmission among power sections on rail potential in DC mass transit system[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2016, 31(11): 129-139.

[15] WANG Miao, YANG Xiaofeng, WANG Lulu, et al. Resonant switched capacitor converter based DC autotransformer for urban rail transit[C]//IEEE. 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). San Antonio: IEEE, 2018: 1441-1446.

[16] LIU Chenlei, GAO Lei, TIAN Yang, et al. Stray current leakage analysis of rail transit based on Monte Carlo method [C]//IEEE. 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Wuhan: IEEE, 2021: 1-6.

[17] 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.

[18] BHAGAT S, 杨晓峰, 王淼, 等. 城市轨道交通杂散电流治理的综述与评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 4851-4863.
BHAGAT S, YANG Xiaofeng, WANG Miao, et al. Review and evaluation of stray current mitigation for urban rail transit[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36(23): 4851-4863.

[19] GU Jingda, YANG Xiaofeng, 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, 2021, 7(1): 225-239.

[20] 胡颖. 城市轨道交通供电系统对电网的影响及控制[J]. 建材技术与应用, 2020(1): 38-41.
HU Ying. Influence and control of urban rail transit power supply system on power grid[J]. Research and application of building materials, 2020(1): 38-41.

收稿日期：2022-04-07
修回日期：2022-05-16