

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2022.02.007

# 列车运行工况对电力变压器 直流偏磁影响的仿真分析

仰 枫, 李春茂, 郭裕钧, 曹晓斌

(西南交通大学电气工程学院, 成都 611756)

**摘 要:** 地铁中存在的杂散电流会对地表电位分布产生影响, 而如果周边存在电力变压器时, 变压器中流过的直流电流会造成变压器发生直流偏磁, 然而, 目前关于地铁地表电位分布对周边变压器直流偏磁影响研究较少, 为此考虑了列车上下行 4 种不同运行状况, 搭建地铁地表电位仿真模型, 并计算相应情况下变压器励磁电流畸变率, 得出上下行列车同时出站时, 对变压器直流偏磁影响最严重的结论, 为预防电力变压器发生直流偏磁提供理论依据。

**关键词:** 地铁; 杂散电流; 电力变压器; 直流偏磁

中图分类号: TP391.9; U228.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2022)02-0050-05

## Simulation Analysis of the Effect of Train Operating Conditions on DC Bias of Power Transformer

YANG Feng, LI Chunmao, GUO Yujun, CAO Xiaobin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756)

**Abstract:** With the rapid development of economic construction and the continuous expansion of urban scale, to solve the contradiction between the supply and demand of urban transportation, China has developed a robust urban rail transit construction in recent years, forming a complex urban rail transit network in large cities. Several cases have shown that stray current in the metro affects the surface potential distribution, and if there is a power transformer nearby, the DC current flowing through the transformer causes the transformer to be DC biased. However, regarding the current situation of the Metro surface potential distribution, there is limited research on the influence of DC bias of surrounding transformers. For this reason, this study considers four different operating conditions of up and down trains, builds a metro surface potential simulation model, calculates the transformer excitation current distortion rate under corresponding conditions, and obtains the up and down direction when the trains leave the station at the same time. The conclusion that has the most serious impact on the DC bias of the transformer provides a theoretical basis for preventing the DC bias of the power transformer.

**Keywords:** metro; stray current; power transformer; DC bias

随着地铁建设的大力发展, 地铁周边电力变压器出现直流偏磁现象越来越严重。对于地铁附近变电站变压器直流偏磁现象, 国内外经过广泛研究, 认为主要与地铁引起的地表电位分布有关。电位分布不同引

起电力变压器发生直流偏磁, 增加谐波含量, 对电网设备产生多种危害。

地表电位方面, 武汉大学建立地铁仿真模型, 仿真分析了不同过渡电阻对钢轨电位影响<sup>[1]</sup>。西南交通

收稿日期: 2021-05-20 修回日期: 2021-07-10

第一作者: 仰枫, 男, 硕士研究生, 从事地铁对电力变压器直流偏磁研究, mufeng\_yang11@163.com

引用格式: 仰枫, 李春茂, 郭裕钧, 等. 列车运行工况对电力变压器直流偏磁影响的仿真分析[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(2): 50-54.

YANG Feng, LI Chunmao, GUO Yujun, et al. Simulation analysis of the effect of train operating conditions on DC bias of power transformer[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(2): 50-54.

大学根据理论公式推导出过渡电阻与杂散电流的关系，并对仿真模型进行改进<sup>[2-3]</sup>。文献[4-7]通过对地铁杂散电流建模，研究多列车同时运行下，钢轨纵向电阻对钢轨电位和杂散电流分布的影响。

文献[8]建立了双边供电模型，研究了钢轨过渡电阻对杂散电流分布的影响。国外学者首先研究杂散电流对埋地金属的腐蚀性关系，随着地铁的发展，也开始研究杂散电流对周边电力设备造成的影响<sup>[9-11]</sup>。

在直流偏磁方面，Dolara 等<sup>[11]</sup>对比研究了直流励磁和交流励磁两种情况对变压器直流偏磁的影响；肖华对变压器直流偏磁现象进行研究，表明直流偏磁对变压器铁芯发热、运行噪声等影响较大<sup>[12]</sup>；文献[13]首先指出地铁运行产生的杂散电流会对变压器造成直流偏磁的影响；文献[14]明确了地铁杂散电流是城市电网主变压器直流偏磁的主要原因，并提出了相应的解决措施。但这些文献只针对单列车运行对变压器直流偏磁的影响，且影响机理尚不明确。为此，本文利用有限元软件建立了上下行列车的动态仿真模型，分析了列车运行在不同工况下其地表电位变化规律，通过电力系统仿真软件计算出相应位置变压器励磁电流畸变情况，为地铁周边电力变压器直流偏磁防治提供理论依据。

## 1 地表电位仿真及其影响因素

### 1.1 地铁对周边电力变压器的影响

变压器直流偏磁是指在变压器励磁电流中产生直流分量引起变压器铁心半周磁饱和，以及由磁饱和产生的一系列电磁效应<sup>[15]</sup>。由于钢轨过渡电阻不完全绝缘，钢轨泄漏电流在地表产生电位差，如果周边存在电力变压器，且中性点电位不相等时，会在线路中流过直流电，直流电流产生的磁通使得变压器饱和，进而出现直流偏磁，直流电流将从一台变压器中性点流进另一台变压器中性点，通过架空线路形成回路，一般为了充分利用电力变压器，变压器工作在铁芯饱和特性曲线转折点处，因此非常小的电压就可以使变压器发生直流偏磁。

地铁的钢轨对地不能达到完全绝缘，有部分钢轨回流电流会泄露至地下，称为杂散电流。该电流会对周边地表电位产生影响，当杂散电流大于某一阈值时，就会使得周边电力变压器产生直流偏磁。

### 1.2 数学模型

为了对列车上下行运行造成周边土壤电位畸变进

行定量描述，本节建立钢轨—排流网—大地的电阻网络模型，模型基于以下假设：

- 1) 假设土壤均匀分布；
- 2) 假设列车以单边供电方式运行，列车牵引供电电流已知，分别为  $I_1$ 、 $I_2$ ，供电区间长度为  $L$ ；
- 3) 假设在列车运行中，不存在容性或感性效应，可以用电阻网络模型等效。

模型中将列车和牵引供电站等效为电流源，建立的电阻网络模型如图 1 所示：

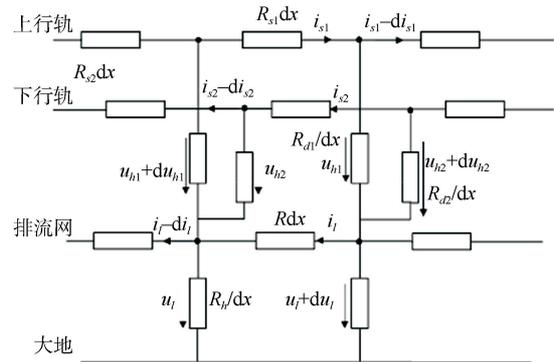


图 1 上下行列车电阻网络模型

Figure 1 The resistance network model of the outbound and return trains

图 1 中， $R_{s1}$ 、 $R_{s2}$  分别为上、下行钢轨的纵向电阻； $i_{s1}$ 、 $i_{s2}$  分别为上、下行钢轨的纵向电流，方向相反； $R_{d1}$ 、 $R_{d2}$  分别为上、下行钢轨对排流网的过渡电阻； $R_l$  为排流网的纵向电阻； $R_h$  为排流网对大地的过渡电阻； $u_{h1}$ 、 $u_{h2}$  分别为上、下行轨对排流网电压。根据基尔霍夫定律建立的微分方程如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du_{h1}}{dx} = R_{s1}i_{s1} - R_l i_l \\ \frac{du_{h2}}{dx} = R_{s2}i_{s2} - R_l i_l \\ \frac{di_{s1}}{dx} = \frac{u_{h1}}{R_{d1}} \\ \frac{di_{s2}}{dx} = \frac{u_{h2}}{R_{d2}} \\ \frac{du_l}{dx} = R_l i_l \\ \frac{di_l}{dx} = \frac{u_l}{R_h} \end{array} \right. \quad (1)$$

方程边界条件为：

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{s1}(0) = i_{s1}(L) = I_1 \\ i_{s2}(0) = i_{s2}(L) = I_2 \\ i_l(0) = i_l(L) = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

基于公式求解得到  $i_{s1}$ 、 $i_{s2}$ 、 $i_l$ ，总的泄露电流为  $I_1+I_2-i_{s1}-i_{s2}-i_l$ 。公式中可以看到，在考虑上下行列车运行时，泄露电流由两部分综合而成，变化情况更加复杂。

### 1.3 仿真建模

本节利用有限元软件对地铁系统建模，模型包括钢轨、轨枕、混凝土层、排流网等结构。由于钢轨结构对地表电位分布影响不大，将钢轨等效为圆柱导体并假设无穷远处电位为 0。钢轨下方放置轨枕、混凝土层、排流网结构。记区间左端地铁站为 1 号变电站，右端地铁站为 2 号变电站，列车 A 从 1 号变电站向 2 号变电站行驶，列车 B 从 2 号变电站向 1 号变电站方向行驶，如图 2 所示。

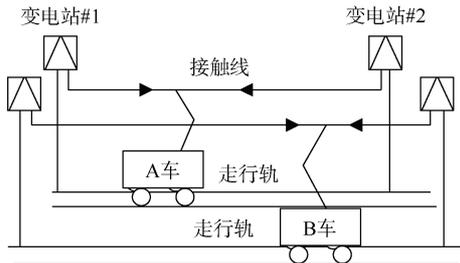


图 2 列车运行示意

Figure 2 Schematic of train operation

采用单一变量法，假设列车 A 状态不变，对比分析表 1 中的 4 种情况。

表 1 列车运行情况假设

Table 1 Assumptions of train operation

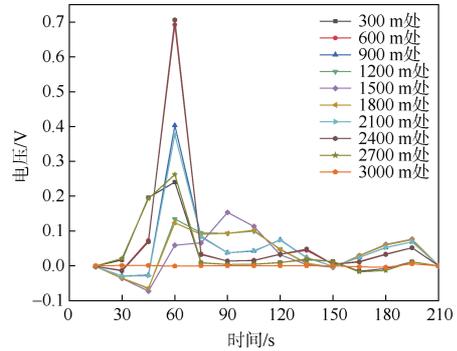
列车运行状况	列车 A	列车 B
工况 1	出 1 号站	出 2 号站
工况 2	出 1 号站	区间匀速
工况 3	出 1 号站	区间减速
工况 4	出 1 号站	进 1 号站

列车在不同状态运行时，其牵引电流也不相同，当列车出站时，电流上升并达到峰值，当列车匀速运行在区间中部时，电流保持在很小的值，用于克服摩擦力，当列车即将进站，列车牵引电流为负值，因此地表电位是时变函数。

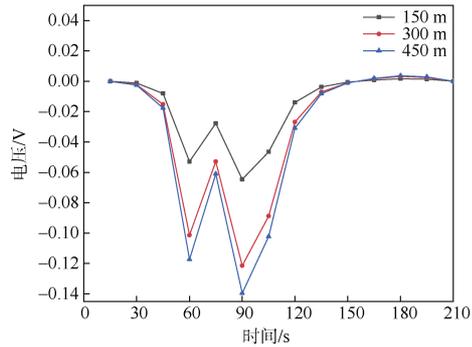
## 2 结果分析

### 2.1 地表电位动态仿真

电力变压器的落点位置对变压器中性点电位差有重要影响，取地铁线路平行方向和垂直方向仿真电位进行对比，其中变电站 1 和变电站 2 区间长度为 3 000 m，对比得到地表电位分布如图 3~6 所示。



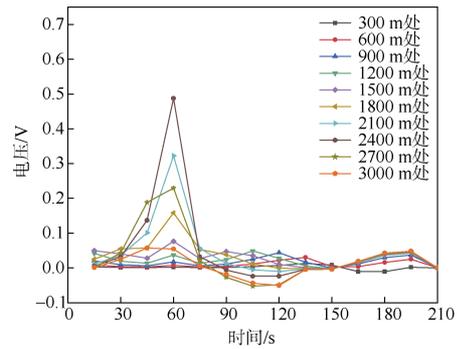
(a) 水平方向



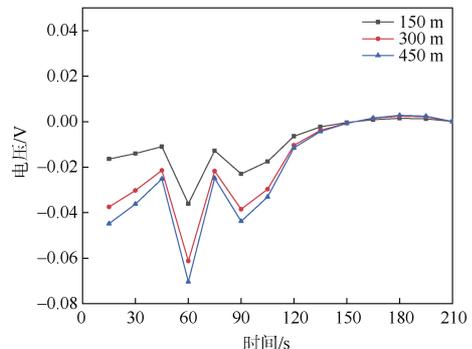
(b) 区间中部垂直方向

图 3 工况 1 下地铁周边地表电位差

Figure 3 Ground potential differences around the subway under working condition 1



(a) 水平方向



(b) 区间中部垂直方向

图 4 工况 2 下地铁周边地表电位差

Figure 4 Ground potential differences around the subway under working condition 2

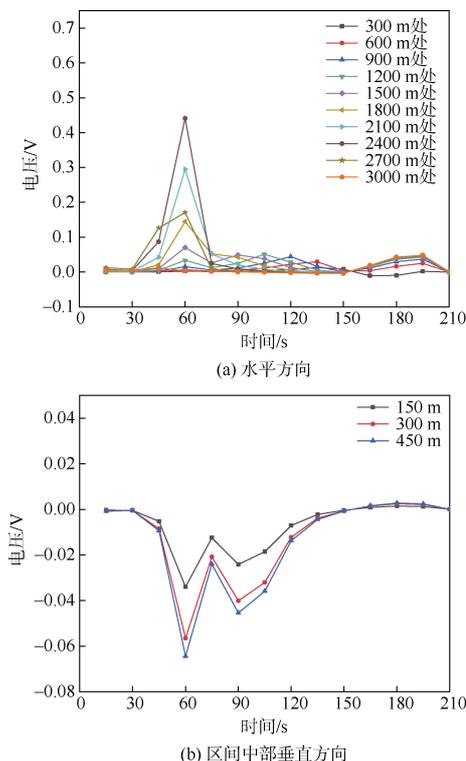


图5 工况3下地铁周边地表电位差

Figure 5 Ground potential differences around the subway under working condition 3

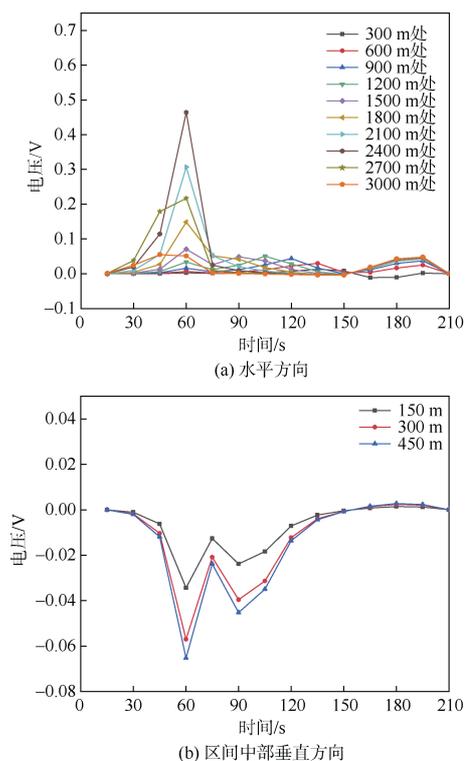


图6 工况4下地铁周边地表电位差

Figure 6 Ground potential differences around the subway under working condition 4

列车在4种工况下,水平方向上均在距离地铁站2400 m处达到峰值;垂直方向上,随着距离的增大,电位差也逐渐增大,但是变化幅值较小。当列车运行在工况2~4时,水平和垂直方向上幅值与列车运行在工况1时情况相比均明显减小,此外垂直方向上,受A车影响,首位端电位变化不再对称,且幅值明显低于对称运行。因此初步推测工况1下变压器直流偏磁最严重。

## 2.2 变压器励磁电流分析

利用电力系统仿真软件搭建变压器—传输线模型,设置变压器工作在饱和特性曲线转折点处,取上述4种工况下最大电压变化曲线作为电力系统仿真的输入(即水平沿线2400 m处电位变化曲线),仿真分析得到变压器励磁电流变化曲线如图7所示。

从图7中可以看到,当没有地铁通过时,变压器中性点不存在电位差,此时线路中没有直流分量,变压器励磁电流为正弦波,幅值为0.05 A,磁通也为正弦波;当列车运行在工况1下,励磁电流畸变情况严重,电流最大可达0.15 A;相对于工况4(即单列车运行时),明显高于单列车运行状态。因此,上下列车运行相比于单列车运行对周边变压器直流偏磁情况更加严重。对励磁电流选取第一个周期进行傅里叶分析,结果如表2所示,表中正常情况下畸变率仅有0.23%;而在工况1下,由于地表电位幅值变化较大,励磁电流畸变率达到了7.89%;当处于工况3和工况4时,励磁电流畸变率近似不变,且工况3略低于工况4,这是因为列车制动运行,导轨中流过负向电流对地表电位的削弱作用,因此地表电位幅值较单列车运行时低。

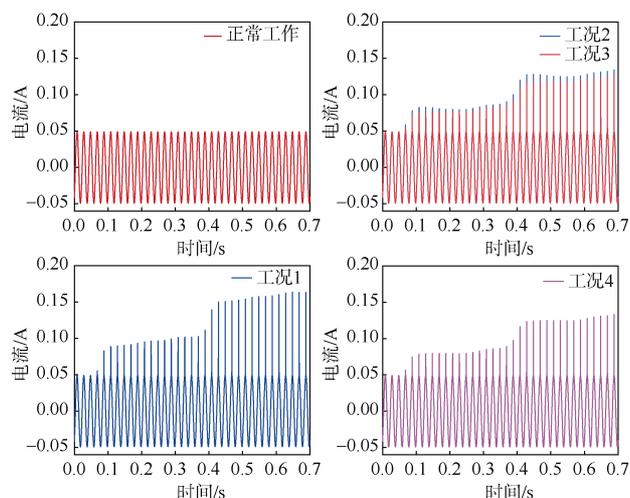


图7 2400 m处变压器励磁电流变化曲线

Figure 7 Variation curve of transformer excitation current at 2400 m

表2 励磁电流畸变率

Table 2 Distortion rate of excitation current

工况	畸变率(THD)/%
正常工作	0.23
工况 1	7.89
工况 2	6.76
工况 3	5.02
工况 4	5.90

### 3 结语

本文建立上下列车有限元仿真模型以及变压器-传输线仿真模型,通过仿真得出当上下行的两列车同时出站时,地表电位峰值达到最大,对应变压器直流偏磁情况最为严重;当其中一辆列车加速运行,另一辆列车减速运行时地表电位峰值最小,直流偏磁相对较轻,此外相对于单列车运行时,双列车运行的危害较大。因此,为保障地铁周边变压器正常运行,应调整地铁运行时间,避免地铁同时进站造成变压器直流偏磁,从而影响正常用电。

#### 参考文献

- 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. The influence of subway track on the stray current distribution of ground transition resistance[J]. High voltage technology, 2015, 41(11): 3604-3610.
- 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. The influence of rail-to-ground transition resistance of urban rail transit on the distribution characteristics of stray current[J]. High voltage technology, 2018, 44(8): 2738-2745.
- 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 urban rail transit long line[J]. High voltage technology, 2020, 46(4): 1379-1386.
- 庞原冰,李群湛. 地铁杂散电流模型讨论[J]. 重庆理工大学学报, 2007, 21(11): 110-113.  
PANG Yuanbing, LI Qunzhan. Discussion on metro stray current model[J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2007, 21(11): 110-113.
- 范伟. 地铁杂散电流的数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.  
FAN Wei. Numerical simulation study of subway stray current[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- 梅进武,林国松. 多列车运行情况下的地铁杂散电流分析[J]. 电气化铁道, 2017, 28(4): 68-70.  
MEI Jinwu, LIN Guosong. Metro stray current analysis under multi-train operation[J]. Electrified railway, 2017, 28(4): 68-70.
- 赵楠. 地铁杂散电流的影响因素分析[J]. 中国科技信息, 2017(3): 101-103.  
ZHAO Nan. Analysis of influencing factors of subway stray current[J]. China science and technology information, 2017(3): 101-103.
- 汪佳. 多列车运行下地铁杂散电流分布研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.  
WANG Jia. Study on subway stray current distribution under multi-train operation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- BODEN P J, EVANS J M. Reduction of stray-current attack in electrochemical machining[J]. Electrochimica acta, 1971, 16(7): 1071-1079.
- ZABOLI A, VAHIDI B, YOUSEFI S, et al. Evaluation and control of stray current in DC-electrified railway systems[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2017, 66(2): 974-980.
- DOLARA A, FOIADELLI F, LEVA S. Stray current effects mitigation in subway tunnels[J]. IEEE transactions on power delivery, 2012, 27(4): 2304-2311.
- 肖华. 特高压直流输电引起的变压器直流偏磁问题的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
XIAO Hua. Research on transformer DC bias caused by UHV DC transmission[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- 张晶焯,鲁海亮,文习山,等. 地铁杂散电流对变压器影响的初步研究[C]//中国电机工程学会高电压专业委员会 2015 年学术年会. 西安, 2015.  
ZHANG Jingzhuo, LU Hailiang, WEN Xishan, et al. Preliminary study on the influence of subway stray current on transformers [C]//High voltage professional committee of china electrical engineering society 2015 academic annual meeting. 2015.
- 蔡茂,李佳,彭卿,等. 城市地区主变直流偏磁研究与处理[J]. 电气自动化, 2017, 39(1): 7-9.  
CAI Mao, LI Jia, PENG Qing, et al. Research and treatment of main transformer DC bias in urban areas[J]. Electric automation, 2017, 39(1): 7-9.
- 薛静,赵莉华,丰遥,等. 一种基于交叉小波的变压器振动信号幅频特征量提取方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 505-511.  
XUE Jing, ZHAO Lihua, FENG Yao, et al. A method for extracting the amplitude-frequency feature quantity of transformer vibration signal based on cross wavelet[J]. High voltage technology, 2019, 45(2): 505-511.

(编辑:王艳菊)