

交流供电制式下矿山法地铁隧道的 牵引回流分布特征分析

李鲲鹏^{1,2} 靳守杰³ 李俊豪¹ 曹晓斌¹ 朱传林¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 611756, 成都; 2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州;
3. 广州地铁集团有限公司, 510330, 广州//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 为了提高城市轨道交通的线路运输能力和列车运行速度,我国几个主要城市新规划了 25 kV 交流供电制式的城市轨道交通线路。交流供电制式下牵引回流系统的泄漏电流侵入周边管线设备后,将威胁到人员与设备的安全。建立矿山法地铁隧道模型,对比研究了交流、直流 2 种供电制式下泄漏电流的大小及分布特征。研究发现:交流供电制式下的泄漏电流远大于直流供电制式下的泄漏电流,其泄漏电流大小随牵引供电区间长度的增加而快速增大;钢轨对地泄漏电阻和土壤电阻率均不是泄漏电流的主要影响因素;交流供电制式下的泄漏电流主要通过空间电磁耦合产生,减少电磁耦合强度才是降低泄漏电流的主要途径。

关键词 地铁; 交流供电; 矿山法; 牵引回流; 泄漏电流

中图分类号 U223.6+2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.07.022

Distribution Characteristics of Traction Backflow under AC Power Supply System in Mined Metro Tunnel

LI Kunpeng, JIN Shoujie, LI Junhao, CAO Xiaobin, ZHU Chuanlin

Abstract In order to improve the line transport capacity and vehicle running speed of urban rail transit, new urban rail transit lines with 25 kV AC power supply system have been planned in several major cities in China. The safety of personnel and equipment will be endangered by the leakage current of traction backflow system when it invades into the pipeline equipment surrounding these urban rail transit lines. The model of metro tunnel built by mining method is established, and the magnitude and distribution characteristics of leakage current under AC and DC power supply systems are compared. It is found that the leakage current of AC power supply system is much larger than that of DC power supply system, and its leakage current increases rapidly with the increase of traction power supply interval length. Rail-ground leakage resistance and soil resistivity are not the main factors affecting the leakage cur-

rent. The leakage current of AC power supply system is mainly generated through space electromagnetic coupling, and reducing the intensity of electromagnetic coupling is the main way to reduce the leakage current.

Key words metro; AC power supply; mining method; traction backflow; leakage current

First-author's address School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 611756, Chengdu, China

与直流供电制式相比,采用 25 kV 交流供电制式的线路,因接触网供电区间长度较长,列车的运行速度较快^[1]。因此,我国在几个主要的大城市规划了 25 kV 交流供电制式的城市轨道交通线路。

直流供电制式下地铁的杂散电流是回流系统的 1 个重要问题^[2-3]。采用交流供电制式后,杂散电流的问题可能比直流供电制式更加严重,其主要原因:三相交流变压器的一相与牵引变电所接地网及钢轨相连,另外两相连接不同区间的接触网。列车从接触网上取得牵引电流,再通过车轮传给钢轨。由于钢轨与大地无法做到绝对绝缘,因此牵引电流通过由钢轨、回流线和大地组成的回流系统回到变电所。此外,交流牵引电流不仅可以通过钢轨对地的泄漏电阻流入大地,还可通过空间电磁耦合在隧道与桥梁等钢筋结构中产生感应电流。这些电流流入大地后成为杂散电流,危害周边人身与设备安全。

大量学者已经对传统直流制供电地铁牵引回流分布进行了研究^[4-6],而交流制下的地铁隧道回流属新生事物,尚未见相关的研究报告。本文根据设计的需求,对比分析了交流供电与直流供电 2 种制式下泄漏电流的分布规律,重点研究了交流供电下矿山法地铁隧道结构中泄漏电流的分布规律及影响因素,为设计人员提供参考。

1 建立地铁隧道模型

1.1 设定走行轨的等效参数

城市轨道交通线路大多采用 60 kg/m 型钢轨,其断面面积为 77.45 cm^2 ,等效的圆柱体截面半径为 0.05 m。走行轨纵向电阻为 $0.04 \text{ } \Omega/\text{km}^{[7]}$ 。

轨道对地之间存着一定的过渡电阻。本文采用 CDEGS 软件建模,通过添加固定电阻率的绝缘涂层实现对过渡电阻的控制。涂层电阻率的计算公式为:

$$\rho = \frac{2\pi R_g}{\ln r_2 - \ln r_1} \quad (1)$$

式中:

ρ ——绝缘层电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$;

R_g ——轨地过渡电阻, Ω ;

r_1 ——裸导体半径, m;

r_2 ——含绝缘层的导体总半径, m。

CJJ/T 49—1992《地铁杂散电流腐蚀防护技术规程》规定:兼用作回流的地铁走行轨与隧道主体结构(或大地)之间的过渡电阻值不应小于 $15 \text{ } \Omega \cdot \text{km}$ 。(编者注:该标准现已修订为 CJJ/T49—2020《地铁杂散电流腐蚀防护技术标准》。)

R_g 取 $15\,000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ 、 r_1 取 0.05 m 时,设涂层的厚度为 0.01 m,则 r_2 取 0.06 m。根据式(1)可计算得到涂层的电阻率 ρ 为 $500\,000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ 。

1.2 建立牵引电流与牵引供电区间的等效模型

交流供电制式下牵引供电区间长度在 15 km 左右,因此本文在仿真中以 15 km 作为 1 个牵引供电区间,且设定列车位于区间末端、牵引变电所位于区间首端,牵引电流为 2 000 A。

根据上文的计算结果,得到单根钢轨的仿真等效模型如图 1 所示,其内部为 1 根半径为 0.05 m 的实心圆柱形钢铁,长为 15 km;外覆厚度为 0.01 m、电阻率为 $500\,000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ 的涂层。轨道的埋深取 20 m。

1.3 建立隧道的等效模型

由于隧道内部充满空气,由于 CDEGS 软件的 MALZ 模块无法设置过于复杂的土壤结构,因此仿真中用长度为 15.1 km、横截面为 $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 的长方体代替。空气的电阻率取 $1 \times 10^{18} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ 。

1.4 建立隧道的结构模型

地铁隧道的施工方法有矿山法、盾构法、明挖法和沉管法等,其中:埋深较大时多采用矿山法和

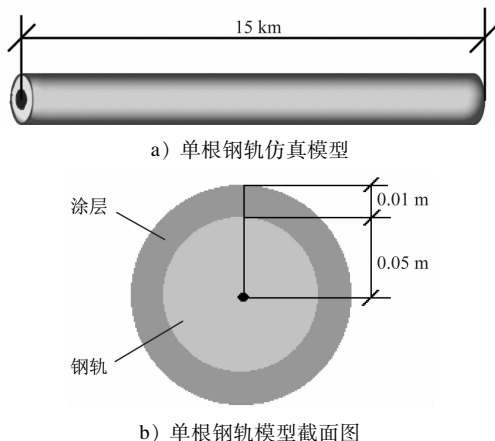


图1 轨道等效模型示意图

盾构法,埋深较小时多用明挖法、盾构法和沉管法等方法^[8]。杂散电流外溢时主要流经隧道壁的混凝土层和隧道外的土壤层。本文将土壤层的电阻率设为 $200 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$,混凝土的电阻率取 $800 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ 。地铁隧道的整体结构示意图如图 2 所示。

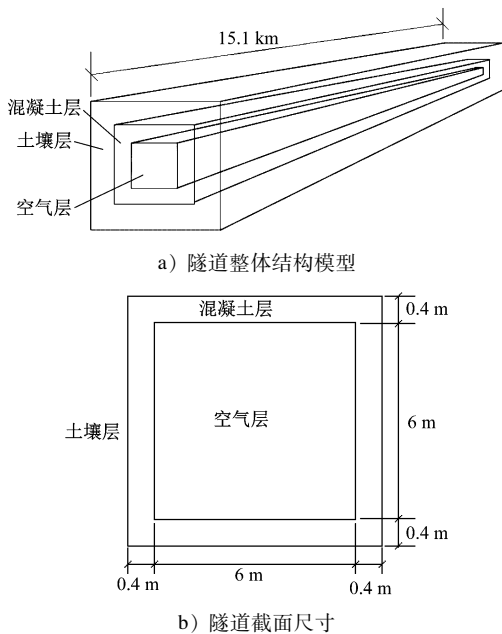


图2 地铁隧道结构示意图

2 不同供电制式下地铁牵引回流分布特征

交流供电制式地铁线路采用的是直接供电加回流线的供电方式,每隔 1 段距离采用吸上线将回流线与钢轨相连。为比较直流与交流 2 种供电制式的区别,仿真时在机车位置分别往钢轨中注入交流 2 000 A 和直流 2 000 A 的电流,其电流分布如图 3 所示,横坐标的 0 点处为该供电区间的中心点。

根据钢轨电流和回流线电流分布规律的仿真

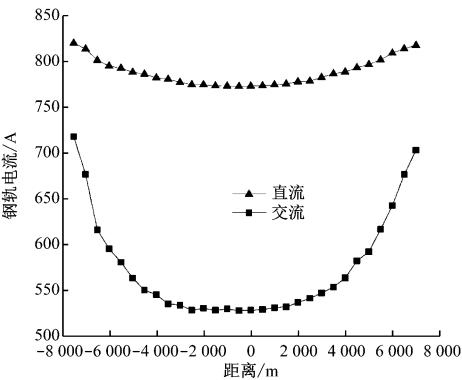


图3 交流与直流制式下钢轨电流分布情况对比

结果,当总牵引电流为2 000 A时,得到直流与交流2种供电制式下不同位置处的泄漏电流如表1所示。

表1 不同的距机车位置下不同供电制式电流大小对比

距机车 位置/km	交流制式下的电流/A			直流制式下的电流/A		
	钢轨 电流	回流线 电流	泄漏 电流	钢轨 电流	回流线 电流	泄漏 电流
0	717	562	4	819	360	2
1.5	615	500	270	801	350	48
3.5	550	453	447	786	345	83
5.5	528	443	501	775	342	108
7.5	527	440	506	772	340	116
9.5	531	450	488	775	344	106
11.5	553	475	419	786	349	79
13.5	616	530	238	801	356	42
15.0	710	563	17	817	359	7

由表1计算可知:交流制式下流过回流线的电流占总牵引电流的22.0%~28.1%,直流制式下流过回流线的电流占总牵引电流的17.0%~18.0%,因而交流制供电下的回流线回流能力大于直流制供电下回流线的回流能力。在供电区间的中点(距机车位置7.5 km)处,交流制式下的泄漏电流值约为直流制式下泄漏电流值的4.3倍。造成泄漏电流差异如此大的主要原因是:交流供电制式下牵引电流可以通过空间电磁耦合传入周边隧道的结构钢筋中,并通过结构钢筋流入大地,从而导致泄漏电流的途径增加,泄漏电流增大。

3 交流供电制式下牵引回流分布因素

3.1 牵引供电区间长度对牵引回流分布的影响

交流制供电下地铁车站的站间距一般要比直流制供电下的站间距大,其范围为2 km至20 km不

等。本文研究时先保持其他参数不变,仅改变供电区间距离,利用CDEGS软件仿真计算得到不同牵引供电区间长度下的回流电流分布情况,如图4~5所示。为了便于分析,将不同长度下的供电区间中点与图4~5中横坐标的0点对齐。

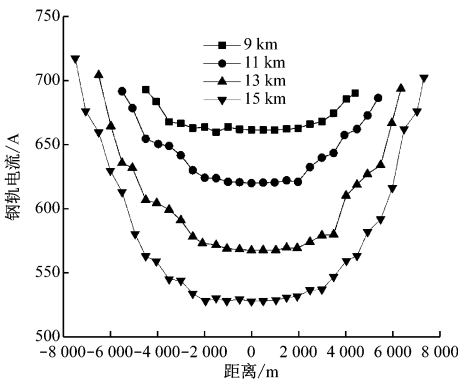


图4 不同牵引供电区间长度下的钢轨电流分布

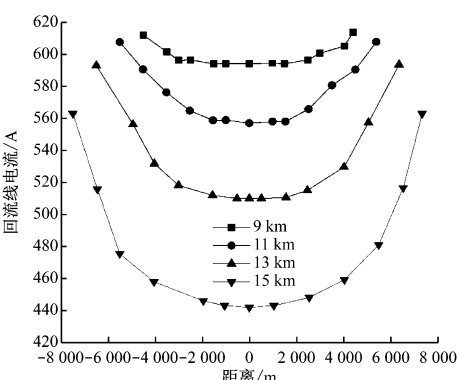


图5 不同牵引供电区间长度下的回流线电流分布

从图4~5可以发现,图中各条线都呈U型,即中点处的电流小于两端的电流。将总牵引电流减去2根钢轨的电流和1条回流线的电流后,可得到不同供电区间长度下对应的泄漏电流值,其分布规律如图6所示。

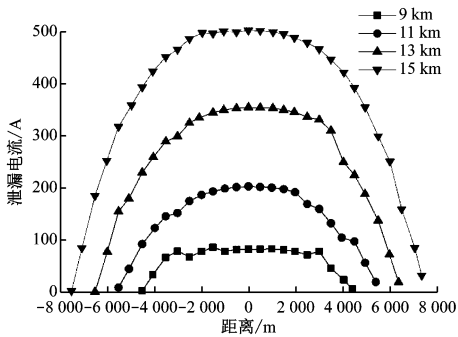


图6 不同牵引供电区间长度下的泄漏电流分布

由图4~6可知,即使牵引供电区间的长度发生

变化,泄漏电流的最大值依然出现在供电区间的中点处,此处的钢轨电流值和回流线电流值最小。表2给出了不同牵引供电区间长度下供电区间中点的电流分配情况。

基于表2的数据,通过计算可以得到:牵引供电区间长度为15 km时,其中点处的泄漏电流为505 A,占总牵引电流的25.2%;牵引供电区间长度为9 km时,其中点处的泄漏电流为84 A,仅占总牵引电流的4.2%。因而可以得出结论,大地的泄漏电流大小与牵引供电区间的长度密切相关。

表2 不同牵引供电区间长度下供电区间中点的电流分配			
牵引供电区间长度/km	单根钢轨电流/A	回流线电流/A	泄漏电流/A
15	527	441	505
13	567	509	357
11	620	557	203
9	661	594	84

3.2 土壤电阻率对回流电流分布的影响

本文以广州某地铁线路为例进行研究。该线路的实测土壤电阻率区域范围为15~600 Ω·m,故在模型中分别设置了土壤电阻率的5个等级:15 Ω·m、150 Ω·m、200 Ω·m、400 Ω·m、600 Ω·m,用以研究土壤电阻率对回流分布的影响。仿真得到的钢轨电流分布及泄漏电流分布分别如图7~8所示。

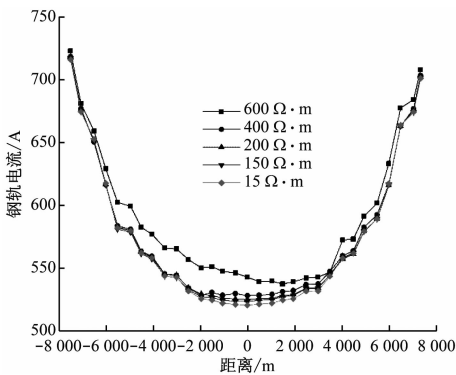


图7 不同土壤电阻率下的钢轨电流分布

从图7~8可以看出,随着土壤电阻率增大,供电区间中点处流过的钢轨电流增大,泄漏电流减少。当土壤电阻率为15 Ω·m时,供电区间中点处的泄漏电流为519 A;当土壤电阻率增至600 Ω·m时,供电区间中点处的泄漏电流减少到471 A,但其变化量仅占总牵引电流的2.4%。

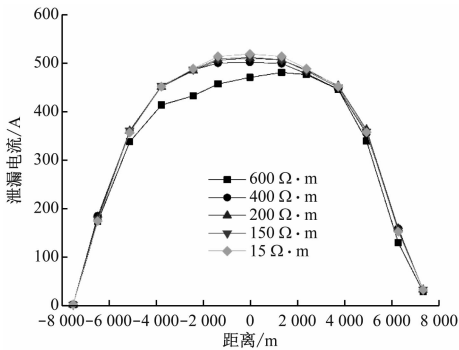


图8 不同土壤电阻率下的泄漏电流分布

通过上述分析可知,牵引供电区间的长度才是影响交流供电制式下泄漏电流的主要因素,土壤电阻率对牵引回流系统的影响并不大。因此,减少牵引供电系统对地泄漏电流的主要途径是减少牵引供电系统与周边结构钢筋的电磁耦合系数,设计中可通过减少供电区间长度或将隧道结构钢筋进行绝缘分段实现。

4 结论

- 1) 交流供电制式下的泄漏电流不仅可以通过钢轨对地泄漏电阻产生,还可以通过空间电磁耦合传入周边隧道等设施的结构钢轨中,这导致了交流供电制式的泄漏电流大于直流供电制式的泄漏电流。如在15 km的牵引供电区间内,交流供电制式下的泄漏电流可达400 A,为同等条件下直流供电制式下泄漏电流的5倍左右。
- 2) 交流供电制式下的牵引供电区间长度越长,泄漏电流越大,且最大泄漏电流与区间长度呈非线性关系。当供电区间长度为9 km时,其最大泄漏电流小于100 A;当供电区间长度增大至15 km时,其最大泄漏电流大于500 A。
- 3) 土壤电阻率对泄漏电流有一定的影响,但不是泄漏电流的主要影响因素。
- 4) 交流供电制式下泄漏电流主要通过空间电磁耦合产生,因此对采用交流供电制式的城市轨道交通线路进行设计时,可以通过减少供电区间长度或将隧道结构钢筋进行绝缘分段的方式来减少电磁耦合,以降低泄漏电流。

参考文献

[1] 李群湛.城市轨道交通交流牵引供电系统及其关键技术[J].西南交通大学学报(自然科学版),2015(2):199.

(下转第109页)

小于目标点4的位移,则存在匀速段;②如果位移 s 大于目标点4的位移,则递减目标点3的速度,直到位移 s 小于等于目标点4的位移;③如果速度减到小于目标点4速度,则应舍弃目标点3,重新进行S曲线规划。

2.3.2.3 水平曲线和下降曲线

水平曲线只包含S曲线的匀速阶段,如图2的目标点4至目标点5区段。

下降曲线如图2中的从目标点8到停车点区段,如图4所示,此时S曲线规划可能出现以下3种情况:①当列车以固定加加速度经过加减速、匀减速、减减速阶段后运行速度达到目标点速度时,如果走行距离小于目标点位移,其运行曲线如图4a)所示;②如果走行距离等于目标点位移,其运行曲线如图4b)所示;③当目标速度比较小,列车只经过加减速、减减速即可达到目标速度时,此时走行距离小于目标点位移,其运行曲线如图4c)所示。

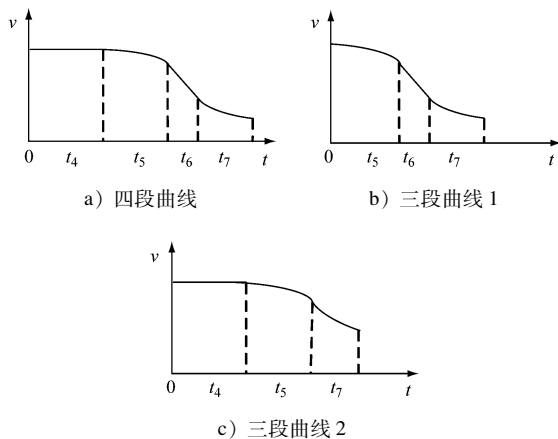


图4 下降曲线规划图

如果以当前设定的最大加速度 a_{\max} 、加加速度 J 运行至运行速度为0时,列车运行位移超过停车点位移,则舍弃目标点8,重新进行S曲线规划。

2.4 步骤4

根据列车位置代入步骤3所计算的 s 基于时间 t 的曲线,获得 t ,再把 t 代入 s ,基于时间 t 的曲线求得 v 。

2.5 步骤5

根据步骤4获得的 v 对列车进行加减速控制。

3 结语

本文对FAO模式下城市轨道交通列车运行的S曲线加减速控制方法进行研究。在实际运营中,该研究可提高列车运行的稳定性,提升乘客的乘坐舒适度。此外,此研究可减缓机械设备冲击性,降低机械设备的磨损及设备的噪声,从而延长设备的使用寿命。

参考文献

- [1] 郭新贵,李从心. S曲线加减速算法研究[J]. 机床与液压,2002(5):60.
- [2] 林一松,汤兆宏,区锐相,等. 一种S曲线加减速计算方法[J]. 制造技术与机床,2005(11):74.
- [3] 石川,赵彤,叶佩青,等. 数控系统S曲线加减速规划研究[J]. 中国机械工程,2007(12):1421.

(收稿日期:2019-09-23)

(上接第105页)

- [2] 赵宇辉,周晓军. 地铁杂散电流分布的数值分析[J]. 城市轨道交通研究,2009(12):42.
- [3] 李鲲鹏,曹晓斌,沈豪,等. 环境因素对地铁钢轨扣件绝缘性能影响的试验研究[J]. 城市轨道交通研究,2020(3):48.
- [4] 庞原冰,李群湛,刘炜. 基于电场的地铁杂散电流模型研究[J]. 城市轨道交通研究,2008(2):27.
- [5] DOLARA A, FOIADELLI F, LEVA S. Stray current effects mitigation in subway tunnels[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4):2304.
- [6] 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(4):68.
- [7] 刘明杰. 基于CDEGS的杂散电流动态特性分析[D/OL]. 成

都:西南交通大学,2018[2018-04-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD201802&filename=1018709913.nh&v=2adyFp0uQlu0G6jNY0IW06irLkMYGU%25mmd2BwyjcGLNLiPHGWAK%25mmd2BVKoLPL6PQNKa8s8H>.

- [8] 蒋博林. 浅埋暗挖地铁隧道施工安全性和风险分析研究[D/OL]. 重庆:重庆交通大学,2011[2011-04-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD2012&filename=1011249135.nh&v=Ar9HULS5QfMIQm5MRPXMGDyxBOfiDQa%25mmd2FulXyVlcgCHHwCfM1hSSivtqf39fcHzLG>.

(收稿日期:2019-06-24)