

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2022.02.008

# 轨道交通隧道内牵引网 感应电压研究

周 丹<sup>1</sup>, 何治新<sup>1</sup>, 艾晓宇<sup>1</sup>, 李鲲鹏<sup>1,2</sup>, 曹晓斌<sup>2</sup>

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广州 510010; 2. 西南交通大学电气工程学院, 成都 611756)

**摘要:** 中国部分城市轨道交通采用工频单相交流制式, 以提升列车的运行速度和运输能力。牵引供电系统发生故障时, 有可能采用单侧停电抢修方案, 如果此时接触网的感应电压过高, 将对检修人员造成安全威胁。依据广州地铁 22 号线设计资料, 搭建地铁隧道的仿真模型, 计算得到一侧线路停电检修, 另一侧线路正常运行时接触网上的感应电压, 获得牵引电流、隧道之间的距离等因素对感应电压的影响规律。发现采用单端接地方式时, 接触网上的感应电压将超过安全标准, 可通过双端接地方式将感应电压降到安全限值以下。根据上述研究结果, 交流供电制式下城轨进行单边停电作业时, 检修区间的接触网必须采用双端接地方式。该结论可为地铁管理部门制定安全措施时提供参考。

**关键词:** 城市轨道交通; 交流供电; 感应电压; 检修; 接地

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2022)02-0055-06

## Induced Voltage on Overhead Catenary Line in Adjacent Tunnel of Rail Transit

ZHOU Dan<sup>1</sup>, HE Zhixin<sup>1</sup>, AI Xiaoyu<sup>1</sup>, LI Kunpeng<sup>1,2</sup>, CAO Xiaobin<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Metro Design &amp; Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756)

**Abstract:** Some rail transit systems in China adopt a power frequency single-phase AC system to improve the running speed and transportation capacity of trains. When the traction power supply system fails, a one-sided power outage emergency repair scheme may be adopted. If the induction voltage on the catenary is too high, it harms the maintenance personnel. In this study, a simulation model of a subway tunnel was built based on the design data. The induced voltage on the overhead catenary line is obtained when it is cut off for maintenance, and the other side of the line is in regular operation. The influences of the traction current, distance between the tunnels, and other factors on the induced voltage were also determined. It was found that the inductive voltage on the overhead catenary line exceeded the safety level when the single-ended grounding mode was adopted. If the double-ended grounding mode is adopted, it will be reduced to below the safety limit. Based on the above research results, this study proposes that when the subway unilateral power outage maintenance operation is adopted in the AC power supply system, both ends of the maintenance interval must be grounded. The conclusion of this study can be used as a reference for subway management departments to formulate safety measures.

**Keywords:** urban rail transit; AC power supply; induced voltage; maintenance and repair; grounding

收稿日期: 2021-04-24 修回日期: 2021-08-08

第一作者: 周丹, 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道交通牵引供电系统设计工作, zhou dan@dtsjy.com

引用格式: 周丹, 何治新, 艾晓宇, 等. 轨道交通隧道内牵引网感应电压研究[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(2): 55-60.

ZHOU Dan, HE Zhixin, AI Xiaoyu, et al. Induced voltage on overhead catenary line in adjacent tunnel of rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(2): 55-60.

轨道交通牵引供电系统可分为工频单相交流制、低频单相交流制与直流制<sup>[1]</sup>。目前我国城市轨道交通采用直流制供电,列车行驶速度较慢,还会带来杂散电流腐蚀等问题<sup>[2-3]</sup>。随着城市范围的扩展与市域(郊)铁路的发展,我国新建了一些采用工频单相交流供电的线路,该供电方式可以提升列车的运行速度和运输能力,在一定程度上解决大城市与周边卫星城的交通问题<sup>[4]</sup>。

牵引网之间由于交流电的电磁耦合作用,运行线路可以在停电检修线路上产生感应电压。应急情况下隧道段有可能采用单侧停电抢修,如果感应电压过高,将有可能对检修人员造成安全威胁。李群湛等<sup>[5-6]</sup>研究了新型城市轨道交通交流牵引供电系统;杨昱等<sup>[7]</sup>、雷栋等<sup>[8]</sup>通过建立轨道的分布参数模型,研究了轨道电位分布;岳新华<sup>[9]</sup>研究了地铁交流供电系统钢轨电位的分布规律;曹晓斌等<sup>[10]</sup>研究了铁路站场牵引回流系统及电磁感应的问题。

但地铁线路以隧道为主,只有车辆段和进出车辆段的部分线路位于地面以上,其电磁感应方式有别于高铁。本文以广州地铁22号线设计资料为依据,通过仿真计算隧道段一侧牵引网停电检修,另一侧线路正常运行时,检修线路的感应电压及影响因素,为停电检修的安全措施提供参考意见。

## 1 交流轨道交通线路的仿真建模

### 1.1 隧道部分的仿真模型

带回流线的直接供电方式是目前应用最为广泛的一种交流供电制式,本次研究的广州地铁22号线采用该直接供电方式。22号线全长30.8 km,均为地下线;其区间隧道采用盾构结构,盾构区间均为单线隧洞,只在车站、出入线等个别位置存在相邻线路,最小线间距为5.1 km,通常情况下两条隧道的间距为12~16 m左右。隧道的外径 $\Phi=8\,500\text{ mm}$ ,内径 $\Phi=7\,700\text{ mm}$ ,隧道壁厚度为400 mm。

隧道内的接触网采用了刚性旋转腕臂悬挂方式,回流线设置在腕臂吊柱的对侧,通过绝缘子固定在隧道壁上。安装的回流线型号为JT150,计算其截面积为 $147.12\text{ mm}^2$ ,回流线在轨面5 800 mm以上。各导线的安装位置如图1所示。

仿真模型中回流线的相对电阻率为1,相对磁导率为1,半径为0.02 m,埋深8 m,位于隧道内接触网侧上方,二者之间的间距2 m。

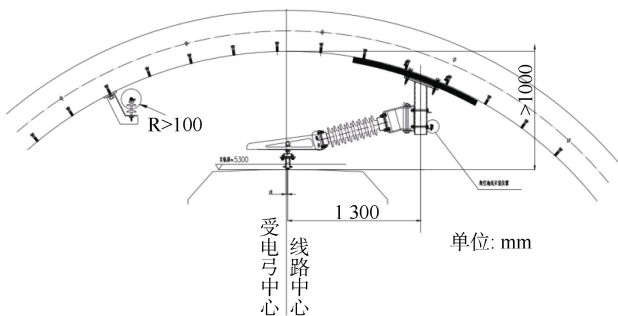


图1 隧道接触网各导线位置

Figure 1 Position of each overhead catenary wire in tunnel

接触网载流部件:由CTA150型接触线和HL2213汇流排组成,其相对电阻率为1,相对磁导率为1,半径为0.07 m,埋深8.7 m,位于隧道内,如图2所示。

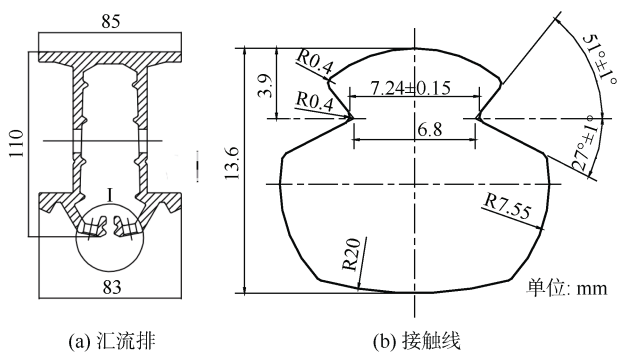


图2 接触网载流部件

Figure 2 Current-carrying components of catenary

钢轨采用60型标准钢轨,其截面面积为 $77.45\text{ cm}^2$ ,纵向电阻为 $0.04\text{ }\Omega/\text{km}$ 。对地过渡电阻按照新建线路取标准过渡电阻 $15\text{ }\Omega\cdot\text{km}$ ,在模型中采用厚度0.01 m、电阻率为 $500\,000\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 的涂层实现<sup>[11]</sup>。

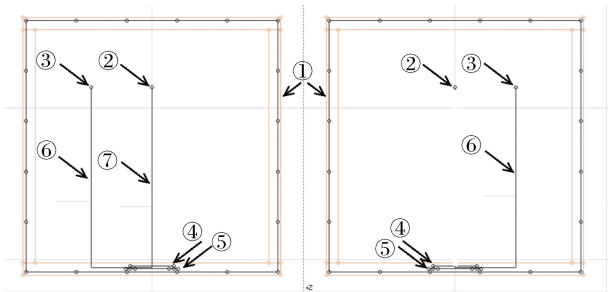
排流网参数:根据实测,单根钢筋相对磁导率为249.1,相对电阻率为4。钢筋的直径为0.008 m,纵向6根,间距0.15 m,横向15根均匀排列,埋深13.1 m。

图3为地铁隧道的仿真模型,内部土壤电阻率按空气设置。

在CDEGS的HIFREQ模块中,由于无法设计复杂的土壤结构,本文中将土壤等效为水平3层,如图4所示。上层土壤电阻率为 $32\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ,中层按空气设置为 $10^{18}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ,下层按勘测资料设为 $1\,000\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 。

### 1.2 地铁隧道外区间的仿真模型

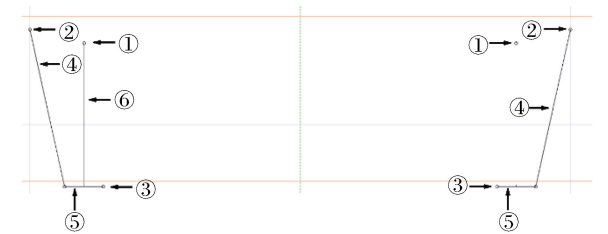
隧道外的牵引网结构由钢轨、回流线、接触网与供电线组成,牵引网结构布置示意图如图5所示。



注：①为隧道壁内的结构钢筋；②是接触网；③是回流线；④和⑤分别是钢轨与排流网；⑥是连接钢轨与回流线的吸上线；⑦是考虑到停电检修时，接触网与钢轨将通过短接线接地。本文中接地点设在 7 500 m 的位置。

图 3 隧道仿真模型

Figure 3 Simulation model of tunnel



注：①是接触网；②是回流线；③是钢轨；④是连接钢轨与回流线的吸上线；⑤是钢轨之间的均流线；⑥是停电检修时，接触网与钢轨的接地短接线。

图 4 牵引网电磁感应仿真模型

Figure 4 Electromagnetic induction simulation model of traction network

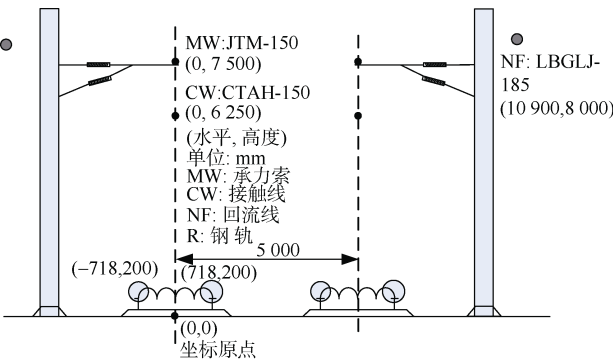


图 5 隧道外牵引网结构

Figure 5 Structure of traction network outside the tunnel

本文根据实际线路参数，采用 CTA150 接触线，JTMH95 承力索与 60 kg/m 规格的钢轨。土壤类型选择均匀土壤，土壤的电阻率为 100  $\Omega\cdot\text{m}$ ，钢轨与大地间过渡电阻取 15  $\Omega\cdot\text{km}$ 。隧道外的牵引网具体参数如表 1 所示。

表 1 牵引网的线路参数

Table 1 Parameters of traction network

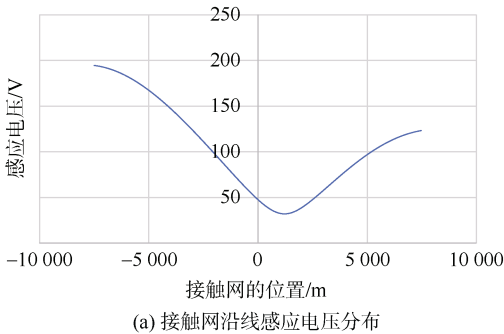
| 线路<br>型号 | 参数                     |                      |                                        |                                         |
|----------|------------------------|----------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
|          | 横截面积/<br>$\text{mm}^2$ | 计算半径/<br>$\text{cm}$ | 直流电阻/<br>$(\Omega\cdot\text{km}^{-1})$ | 自感/<br>$(\text{mH}\cdot\text{km}^{-1})$ |
| P60      | 7 745                  | 4.97                 | 0.04                                   | 0.19                                    |
| CTA150   | 150                    | 0.7                  | 0.115                                  | 0.05                                    |
| JTMH95   | 95                     | 0.55                 | 0.242                                  | 0.05                                    |

## 2 隧道内上下行感应电压仿真计算

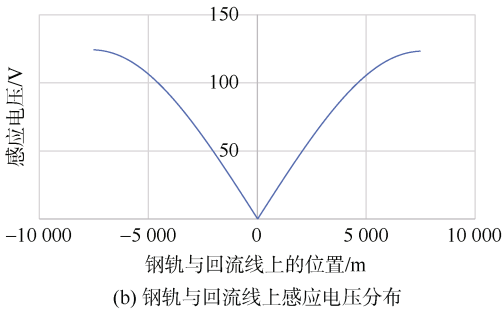
本部分主要仿真一条隧道运行正常，另一条隧道停电检修时，隧道内接触网上产生的感应电压。如图 4 所示，左侧的线路停电检修，右侧的线路正常运行。

### 2.1 单端接地感应电压分布

当上行线路有负载，下行线路检修接地时，激励电流源设置为 800 A，可得仿真结果如图 6 所示。其中接触线的长度为 15 km(图 6 中-7500~7500 m)。接地线位置位于右侧，即横坐标 7 500 m 处。



(a) 接触网沿线感应电压分布



(b) 钢轨与回流线上感应电压分布

图 6 单端接地感应电压分布

Figure 6 Distribution of induced voltage for single-ended grounding

由图 6(a)可知，接触网的感应电压呈两侧高、中间低的趋势，最高感应电压为 185 V。由图 6(b)可知，钢轨同样呈两侧高、中间低的趋势，但由于钢轨全线接地，因此钢轨具有明显的对称性，最高感应电压为 122 V。造成该现象的原因是：运行线路上的牵引电流通过钢轨回流到变电所的过程中，由于走行轨对地不

绝缘,因此会造成牵引电流从 $-7\,500\text{ m}\sim 0\text{ m}$ 这半个区间内是从钢轨泄漏到大地,而从 $0\sim 7\,500\text{ m}$ 这半个区间是从大地流回钢轨。泄漏电流造成钢轨两端的大地电位抬升,而 $0$ 电位出现在区间的中部。

由于在右侧将钢轨与接触线短接时,检修时,隧道内的大地电位与钢轨和回流线的电位基本相等。因此人体实际承受的感应电压如图7所示。

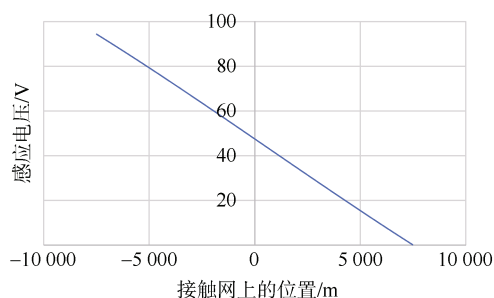


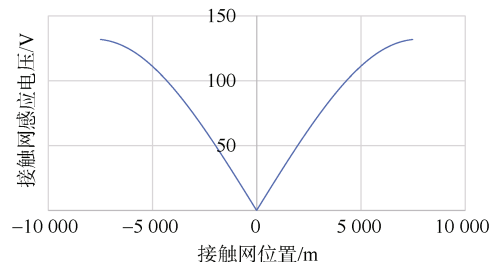
图7 人体实际承受感应电压分布

Figure 7 Actual voltage distribution of human body

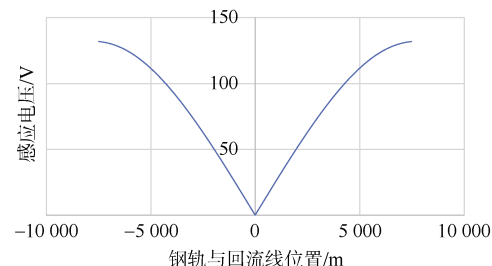
从图7中可以看出,当长度大于 $7\,000\text{ m}$ 时,二者电压差最大值达到了 $91.6\text{ V}$ ,超过我国标准规定的交流电情况下 $50\text{ V}$ 安全电压值<sup>[12-13]</sup>。

## 2.2 双端接地感应电压分布

同样将激励电流源设置为 $800\text{ A}$ ,除接触网右侧 $7\,500\text{ m}$ 处安装接地线外,在左侧 $-7\,500\text{ m}$ 处再增加一根接地线,即将接触网首末双端接地,仿真得到的电位分布结果如图8所示。



(a) 接触网沿线感应电压分布



(b) 钢轨与回流线上感应电压分布

图8 双端接地感应电压分布

Figure 8 Distribution of induced voltage for two-end grounding

由图9可知,当接触网采用双端接地方式时,人体实际承受的电压呈M形状分布,两端与中间低,最大值远小于 $50\text{ V}$ ,仅为 $0.4\text{ V}$ 。由此可见,双端接地模式可以极大地减小接触网上的人体实际承受电压。造成该现象的主要原因是:当接触网采用双端接地方式时,接触网与钢轨可以形成一个闭合的线圈,此时最大的电压差为感应电流在该闭合回路上形成的最大电压差。在考虑到工人在接触网上作业时,有可能会断开接触网上的电连接,造成该闭合线圈开路,即此时断口上的电压相当于单侧接地的最大人体承受电压,因此下文中主要考虑接触网单端接地。

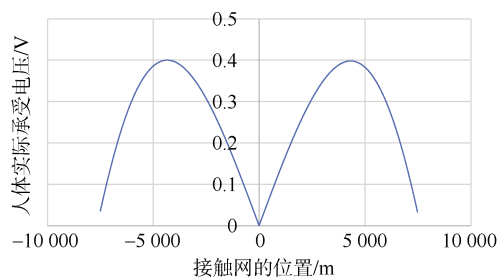


图9 人体实际接触电压分布

Figure 9 Actual contact voltage distribution of the contact network

## 3 感应电压的影响因素研究

### 3.1 隧道间距对感应电压的影响

为了研究隧道间距对感应电压的影响,保持上述仿真参数不变,设置牵引电流为 $800\text{ A}$ ,改变接触线间距为 $8\text{ m}$ 、 $10\text{ m}$ 、 $12\text{ m}$ 、 $14\text{ m}$ 、 $16\text{ m}$ 。仿真得到检修线路上接触网的感应电压如表2所示。

表2 不同隧道间距下的接触线感应电压

Table 2 Contact line induced voltage at different tunnel spacing

| 接触网间距/m | 8    | 10   | 12   | 14   | 16   |
|---------|------|------|------|------|------|
| 感应电压/V  | 91.7 | 91.7 | 91.6 | 91.5 | 91.5 |

从仿真结果来看,在牵引电流不变的情况下,检修线路接触网上的感应电压基本不会受到隧道间距的影响,上表中两条线路的间距从 $8\text{ m}$ 增加到 $16\text{ m}$ 时,检修线路上的感应电压基本一致。

### 3.2 牵引电流对感应电压的影响研究

在单端接地的仿真模型中,设置运行线路的牵引电流为 $200\text{ A}$ 、 $400\text{ A}$ 、 $600\text{ A}$ 、 $800\text{ A}$ 、 $1\,000\text{ A}$ ,可得感应电压与牵引电流的关系如表3所示。由表3可知,随着牵引网激励源电流的增大,对应的感应电压也会明显上

升，当牵引电流为 400 A 时，其感应电压已超过安全电压 50 V 的要求。

表 3 感应电压与牵引电流的关系  
Table 3 Relationship between induced voltage and traction current

|        |      |      |      |      |       |
|--------|------|------|------|------|-------|
| 激励电流/A | 200  | 400  | 600  | 800  | 1 000 |
| 感应电压/V | 33.5 | 59.4 | 67.1 | 91.6 | 116   |

3.3 隧道对感应电压的影响

根据仿真模型图 5，本文中仿真计算了非隧道段接触网上的感应电压，得到当一条线路有牵引负荷时，检修线路单端接地情况下的最大感应电压如表 4 所示。

表 4 地面段牵引电流与感应电压的关系  
Table 4 Relationship between traction current and induced voltage in ground segment

|        |       |       |       |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 电流/A   | 200   | 400   | 600   | 800   | 1 000 |
| 感应电压/V | 292.1 | 315.9 | 345.4 | 375.1 | 402.8 |

图 10 为隧道内与地面段区间单边停电检修时，在牵引所侧接地，负荷集中在供电区间末端时的感应电压分布情况。

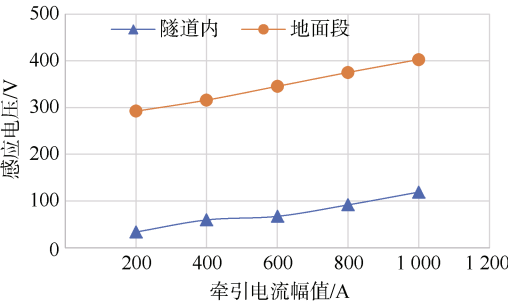


图 10 感应电压随电流的变化  
Figure 10 Variation of induced voltage with current

从图中可以看出，两种情况下，感应电压均随牵引电流增大而呈线性增长，二者的比例关系如表 5 所示。

表 5 隧道段与地面段感应电压比例  
Table 5 Proportion of inductive voltage between tunnel segment and ground segment

|        |     |     |     |     |       |
|--------|-----|-----|-----|-----|-------|
| 激励电流/A | 200 | 400 | 600 | 800 | 1 000 |
| 比例关系   | 8.7 | 5.3 | 5.1 | 4.1 | 3.4   |

4 隧道段单侧停电检修安全措施研究

4.1 牵引电流的工况选取

根据该线路的规划，该线路单个列车的负荷曲线

为如图 11 所示。

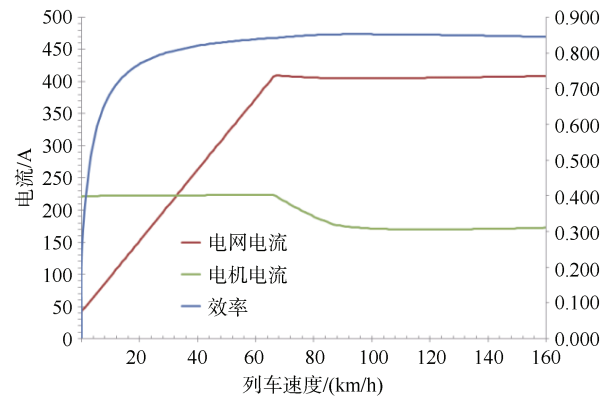


图 11 牵引电网电流、电机电流、效率对速度曲线  
Figure 11 Traction grid current, motor current, efficiency versus speed curve

根据图 11 给出的单个列车的运行速度曲线及其规划，近期正常情况下每个供电臂运行列车 8 对，仿真得到牵引变电站平均负荷电流为 335.5 A，在高峰时段运行列车 15 对时，牵引变电站平均负荷电流为 564.3 A，远期规划高峰时间段运行列车 24 对，仿真得到平均负荷电流为 627.1 A。发生短路故障时，仿真得到短路稳态电流有效值为 7 000 A。

4.2 不同工况下实际可触及感应电压差

在实际的检修作业中，只有钢轨与接触网之间的电压才为实际的可触及感应电压差。根据不同的工况，得到隧道内实际可触及感应电压差如表 6 所示。

表 6 不同工况的可触及感应电压  
Table 6 Touchable induced voltage under different working conditions

| 工况     | 单端接地  | 双端接地 |
|--------|-------|------|
| 近期正常工况 | 38.9  | 0.2  |
| 近期早高峰  | 65.5  | 0.4  |
| 远期早高峰  | 72.7  | 0.4  |
| 对地短路故障 | 812.0 | 4.4  |

从表中可以得出，当采用接触网单端接地时，仅在近期正常工况下，其可触及感应电压才能满足安全要求，而双端接地情况下，即使发生了对地短路故障的最严重工况，其可触及感应电压也能满足安全要求。因此建议在隧道段，供电臂首末端均需要将接触网接地。

5 结论

本文针对单相交流供电制式的轨道交通，研究了

接触网的感应电压及其影响因素,得到主要结论如下:

1) 接触网与钢轨的感应电压均呈两侧高、中间低的趋势。但实际威胁人身安全的主要是接触网与钢轨及回流线的电压差,当采用单端接地方式,牵引电流为 800 A 时,其感应电压可达 185 V 以上,但其与钢轨及回流线的电压差仅为 91.6 V。

2) 接触网与钢轨的感应电压差受接地方式的影响极大。在 800 A 牵引电流作用下,采用单端接地时,电压差仅为 91.6 V,采用双端接地时该电压差仅为 0.63 V。造成该现象的原因是:采用双端接地时,接触网与钢轨形成闭合的线圈回路,相当于短路。考虑到作业时有可能断开接触网上的电联接线,造成接触网开路,因此提出安全作业时需要按单端接地方式考虑。

3) 研究了广州地铁 22 号线不同的实际工况对可触及感应电压差的影响。当采用接触网采用单端接地时,仅在近期早高峰时,其可触及感应电压将达到 65.5 V,发生故障短路时可超过 800 V,严重影响检修人员的人身安全,因此建议隧道段,供电臂首末端均需要将接触网接地。

## 参考文献

- [1] 韩旭红. 城市地铁杂散电流及抑制措施深入研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.  
HAN Xuhong. Depth-study on the city subway stray current and suppression measures[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [2] 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, 2012.  
ZHANG Zemeng. Research on protection of stray current in metro system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [3] 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(12): 42-47.  
ZHAO Yuhui, ZHOU Xiaojun. Numerical analysis of metro stray current distribution[J]. Urban mass transit, 2009, 12(12): 42-47.
- [4] 范锦江, 陈慧民, 姜东杰. 城市轨道交通不同牵引供电制式的比较[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(12): 97-100.  
FAN Jinjiang, CHEN Huimin, JIANG Dongjie. On different urban rail transit traction power supply mode[J]. Urban mass transit, 2016, 19(12): 97-100.
- [5] 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, 2015, 50(2): 199-207.  
LI Qunzhan. Industrial frequency single-phase AC traction power supply system and its key technologies for urban rail transit[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(2): 199-207.
- [6] 李群湛. 论干线铁路与城市轨道交通统一牵引供电方式[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(11): 1179-1189.  
LI Qunzhan. Unified traction power supply mode for trunk railway and urban rail transit[J]. Scientia sinica (technologica), 2018, 48(11): 1179-1189.
- [7] 杨翌, 刘明光, 李娜等. 钢轨电位分布模型及仿真[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(2): 137-141.  
YANG Gang, LIU Mingguang, LI Na. Research on model of rail potential distribution and its simulation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(2): 137-141.
- [8] 雷栋, 董安平, 张雪原, 等. 重载电气化铁道钢轨电位的测试与分析[J]. 铁道学报, 2010, 32(5): 41-46.  
LEI Dong, DONG Anping, ZHANG Xueyuan, et al. Test and analysis of rail potentials of heavy haul electric railways[J]. Journal of the China railway society, 2010, 32(5): 41-46.
- [9] 岳新华. 城市轨道交通交流供电系统钢轨电位研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.  
YUE Xinhua. Research on rail potential of urban rail transit based on AC power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [10] 曹晓斌, 何方方. 铁路站场牵引回流系统的回流特性研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(12): 45-49.  
CAO Xiaobin, HE Fangfang. Research on return current characteristics of traction return current system in station yard[J]. Journal of the China railway society, 2017, 39(12): 45-49.
- [11] 李俊豪. 交流供电制式对地铁隧道接地系统感应电压电流的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.  
LI Junhao. Study on the influence of induced voltage and current in metro tunnel grounding system base on AC power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [12] 特低电压(ELV)限值: GB/T 3805-2008[S]. 北京: 北京标准出版社, 2008.  
Extra-low voltage (ELV)—limit values: GB/T 3805-2008[S]. Beijing: Standards Press of Beijing, 2008.
- [13] 低压电气装置 第 4-41 部分: 安全防护 电击防护: GB/T 16895.21-2020[S]. 北京: 北京标准出版社, 2020.  
Low-voltage electrical installations. Part 4-41: Protection for safety. Protection against electric shock: GB/T 16895.21-2020[S]. Beijing: Standards Press of Beijing, 2020.

(编辑: 王艳菊)