

# 交流牵引地铁隧道对油气管道电磁干扰影响的仿真分析

龙意仁<sup>1</sup> 李 易<sup>2</sup> 李鲲鹏<sup>3</sup> 陈 霞<sup>3</sup> 曹晓斌<sup>4</sup>

(1. 中国能源建设集团湖南省电力设计院有限公司, 410007, 长沙; 2. 成都交大许继电气有限责任公司, 610097, 成都; 3. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 4. 西南交通大学电气工程学院, 611756, 成都)

**摘 要** [目的] 目前,我国数个城市开始规划 25 kV 交流供电制式地铁线路,不可避免地会有油气管道与地铁隧道并行区段,地铁运行期间的交流干扰易造成油气管道发生电解腐蚀,从而造成安全事故,为了地铁与油气管道的安全运行,需对交流牵引的地铁隧道与油气管道间的耦合作用进行研究。[方法] 使用 CEDGS 接地仿真计算软件对隧道进行仿真建模,研究不同方法施工的隧道对油气管道交流干扰的影响规律。[结果及结论] 仿真研究结果发现:矿山法施工的隧道对油气管道的交流干扰抑制效果要高于盾构法施工的隧道;油气管道首末端感应电压压差主要和其与接触网位置耦合关系有关;油气管道涂层耐受电压受地表电位和管道感应电压的双重影响。

**关键词** 地铁隧道; 盾构法; 矿山法; 油气管道; 交流牵引; 电磁干扰

**中图分类号** U455.43

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2025.03.021

## Simulation Analysis of Electromagnetic Interference Effects of AC Traction Metro Tunnels on Oil and Gas Pipelines

LONG Yiren<sup>1</sup>, LI Yi<sup>2</sup>, LI Kunpeng<sup>3</sup>, CHEN Xia<sup>3</sup>, CAO Xiaobin<sup>4</sup>

(1. China Energy Engineering Group Hunan Electric Power Design Institute Co., Ltd., 410007, Changsha, China; 2. Chengdu Jiaotong University Xuji Electric Co., Ltd., 610097, Chengdu, China; 3. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China; 4. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 611756, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] Currently, several cities in China are planning 25 kV AC (alternating current) power supply metro lines, inevitably there will be paralld sections of oilgas pipelines run parallel to metro tunnels. During metro operation, AC interference can lead to electrolytic corrosion of oil and gas pipelines, potentially causing safety incidents. To ensure the safe operation of both metro systems and pipelines, it is neces-

sary to study the coupling effects between AC-powered metro tunnels and oil and gas pipelines. [Method] The CDEGS grounding simulation software is used to model metro tunnels and analyzed the impact of different tunnel construction methods on AC interference in oil/gas pipelines. [Result & Conclusion] Simulation results indicate the following: tunnels constructed using the mining method exhibit superior suppression of AC interference in oil and gas pipelines compared to those constructed using the shield tunneling method; the induced voltage difference at both ends of the pipelines primarily depends on their coupling relationship with the catenary network location; and the withstand voltage of pipeline coatings is influenced by both the surface potential and the induced voltage on the pipeline.

**Key words** shield tunneling method; mining method; metro tunnel; oil and gas pipelines; AC traction electromagnetic interference

目前,我国数个城市已开始规划 25 kV 交流供电制式的地铁线路,地铁与高速铁路在轨道交通的信号制式和运行环境上有较大区别。地铁运行于城市的地下隧道中,周边埋设有众多的工业和民用金属设施。相比于运行于山地平原等开阔地带的高速铁路,交流牵引的地铁运行环境会更加复杂。

与直流牵引的地铁相比,对交流牵引的地铁研究不仅限于杂散电流的传播与治理,还需对由牵引电流引起的电磁干扰现象进行研究。有学者基于交流牵引供电系统的电磁干扰现象,研究了其对油气管道的腐蚀影响:文献[1-2]研究了交流输电线路对油气管道的影响,文献[3]通过对某油田埋地管线受电气化铁路杂散电流影响的调查研究,发现电气化铁路的杂散电流会使得油气管道阳极溶解加剧,最终会导致油气管道腐蚀穿孔。在交流牵引的地铁规划建设过程中除了电气设计外,隧道的施

工方式更是重中之重。但国内外对隧道施工方式的研究主要集中在施工工艺、工程安全性、经济性等方向,而在施工方式对电气设计中电磁干扰影响方面的研究较少。在仿真模型方面,文献[4]使用 MALZ 模块对矿山法隧道进行仿真建模,研究了矿山法施工方式下地铁牵引回流的分布特征;文献[5]在 CDEGS 软件中建立含土壤模型的杂散电流模型,仿真分析了土壤结构对于杂散电流的影响;文献[6]利用 MALZ 模块建立水平分层土壤模型,验证了杂散电流动态分布模型。

虽然有学者对交流牵引的地铁电磁干扰现象和隧道施工方式进行过一定的研究,但不同隧道类型对油气管道的电磁干扰影响的研究还较少。本文基于接地和电磁分析软件 CDEGS,对盾构法和矿山法两种不同的施工方法进行合理等效建模,研究了不同施工方法对油气管道交流干扰的影响规律。

## 1 仿真建模分析

交流牵引供电系统在运行过程中,牵引电流易对其他金属导体产生交流干扰。CDEGS 软件中的 HIFREQ 模块能计算埋设和架空导体网络中的电流分布以及由该电流分布产生的电场、磁场和标量电势场。因此,本文利用该模块仿真计算隧道内由接触网电流引起的其他金属设施的感应电压和流经土壤而导致的地电位抬升。

### 1.1 交流牵引的地铁等效仿真模型

在 HIFREQ 模块中建立交流牵引的地铁仿真模型。土壤模型为三层土壤结构,分别为上层本地土壤层、中间空气层和下层混凝土层。

目前,地铁线路多数采用 60 kg/m 钢轨,60 kg/m 标准钢轨的断面面积为 77.45 cm<sup>2</sup>,纵向电阻为 0.04 Ω/km。相对整个地铁隧道截面,钢轨截面形状的影响可以忽略,为方便建模,本文以圆柱形导体对钢轨进行等效。HIFREQ 模块并不提供直接添加过渡电阻的功能,但过渡电阻大小是影响牵引供电系统对外电磁干扰程度的重要因素。给轨道导体添加了具有固定电阻率的绝缘涂层,用以代表轨道的过渡电阻。该涂层的电阻率可以通过公式(1)与轨道的等效过渡电阻互相代换<sup>[7]</sup>。

$$R_g = \rho \int_{r_2}^{r_1} \frac{1}{2\pi r} dr \quad (1)$$

式中:

$R_g$ ——轨地过渡电阻;

$\rho$ ——绝缘层电阻率;

$r_1$ ——导体半径;

$r_2$ ——含绝缘层的导体总半径;

$r$ ——计量电位的点到圆柱截面圆心的距离。

牵引变压器二次侧一端与接触网相连,另一端与钢轨相接,为整个牵引系统提供稳定的 27.5 kV 交流电源。通常一根接触网会同时为多列列车进行供电。基于本仿真模型的普适性研究,结合实际情况后,设定接触网电流为 1 000 A。在仿真模型中,可将牵引变压器等效为一个 1 000 A 的理想电流源。

地铁动车是构成牵引回路的一环。本次仿真计算中,地铁动车对仿真结果无实际影响,故在仿真模型中可将地铁动车等效为一根连接接触网与钢轨的导线。

### 1.2 不同施工方法下的隧道等效模型

地铁隧道的施工方法有明挖法、暗挖法、盖挖法等施工方法。现代地铁多连接居民生活区和核心商业区,隧道多穿行于商业高楼、居民楼、城市主干道等地面设施之下,为了减少居民拆迁、交通改道等问题,除了地铁车站施工以外多采用暗挖法。其中暗挖法又分为矿山法和盾构法两种。因施工原理与施工技术不同,盾构法施工的隧道是由数片独立的预制混凝土管片镶嵌而成,管片间相互作用力支撑隧道整体结构,虽然紧密排列但相互之间无有效的电气连接。而矿山法施工的隧道则是传统钢筋混凝土结构。

因为施工技术不同,矿山法在仿真软件中体现为钢筋纵横相连,为相互贯通的整体钢筋结构;在盾构法中,隧道整体由包含钢筋的施工的隧道片组成,虽然紧密排列但相互之间无有效的电气连接。在本文的仿真模型中,矿山法和盾构法的区别就是隧道结构钢筋是否横向连接成为一个整体。即矿山法隧道模型的结构钢筋间有横向钢筋使之连接,而盾构法中结构钢筋相互独立没有连接。在隧道结构的电磁环境研究中,隧道结构钢筋是否横向连接成为一个整体在钢筋本身的感应电压、回流系统的回流系数分布、大地电位分布等方面均存在着显著的区别。两种不同施工方法下隧道等效模型如图 1 所示。

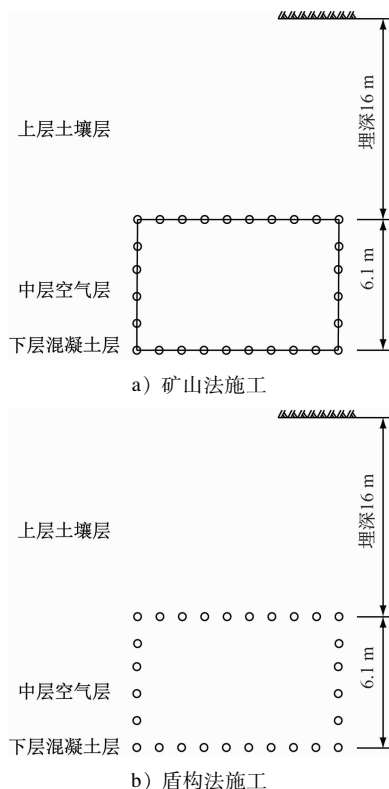


图1 两种不同施工方法下隧道等效模型横截面示意图

Fig. 1 Diagram of tunnel equivalent model cross-sections under two construction methods

## 2 针对不同施工方法对油气管道影响的仿真研究

针对2种不同的施工方法,在地面以下2 m铺设一根长度为1 km的油气管道,管道表面附有厚度3 mm的管道防腐涂层,油气管道整体与隧道平行排列。分别对矿山法和盾构法隧道下交流牵引的地铁进行建模仿真计算,探究两种不同的隧道施工方法对油气管道表面感应电压、表面涂层耐受电压以及地表电位的影响规律。

### 2.1 隧道施工方法对地表电位影响仿真的研究

为了观测地表电位分布,在隧道正上方地面设置与隧道平行且等长(7 000 m)的观测线,观测地表纵向地表电位分布。地表电位分布情况如图2所示。

总体来看,地表电位分布呈现总体从首端至末端线性下降的规律。矿山法施工下首末端地表电位电压降值远远小于盾构法施工,具体数值如表1所示。在盾构法施工下的地表电位最大值在前端出现,为19.771 V,最小值在末端出现,为-19.911 V,地表电位最大电压降为39.682 V。在矿山法施

工下,地表电位最大值在首端为1.400 V,最小值在末端为-1.397 V,地表电位最大电压降为2.797 V。

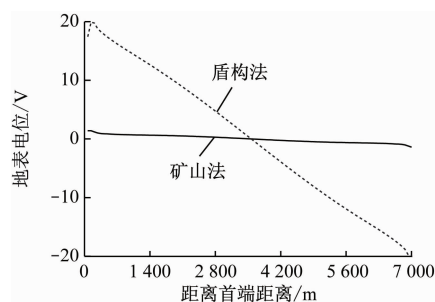


图2 两种不同隧道施工方法下地表电位分布图(仿真)

Fig. 2 Ground surface potential distribution diagram under two tunnel construction methods (simulation)

表1 地表电位分布

Tab. 1 Ground surface potential distribution

施工方法	地表电位/V		
	最大值	最小值	差值
盾构法	19.771	-19.911	39.682
矿山法	1.400	-1.397	2.797

在盾构法和矿山法两种施工方法下,其地表的电位和首末端电压降都存在明显差异,矿山法施工下地表的电位幅值和首末端电压降更低。实际情况下,交流牵引供电系统对地表电位的影响主要有两种:一是由于走行轨绝缘扣件绝缘性能下降,电流在钢轨回流的过程中,通过钢轨向大地泄漏形成杂散电流,致使地表电位升高;二是隧道上部结构钢筋埋设在上层土壤中,当隧道的接触网有电流通过时,钢筋表面产生感应电压,由于隧道上部钢筋混凝土直接和土壤接触,部分电流向土壤泄露致使地表电位升高。在盾构法施工方法下,隧道管片结构钢筋间相互独立,其与接触网间的电磁耦合现象是地表电位上升的主要原因。在矿山法施工方法下,隧道结构钢筋间相互连接成为一个整体,在土壤中起到均压作用,致使地表电位相较于盾构法更低。

### 2.2 隧道施工方法对油气管道感应电压影响的仿真研究

#### 2.2.1 不同施工方法下油气管道感应电压分布

给予隧道内上行线接触网1 000 A电流,下行线接触网处于断电状态,对油气管道表面感应电压分布进行仿真计算,其感应电压分布图如图3所示。

在盾构法和矿山法两种施工方法下,油气管道

表面感应电压幅值均呈现从首端至末端下降趋势。具体仿真数值如表 2 所示。

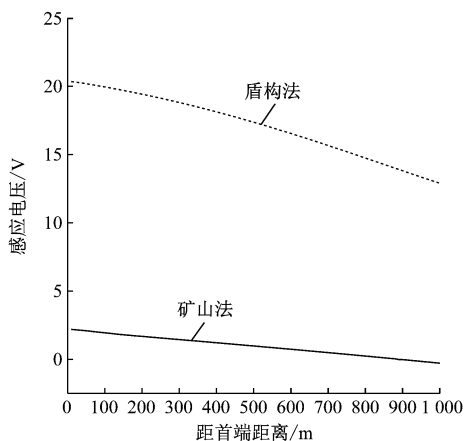


图3 油气管道感应电压分布(仿真)

Fig.3 Induction voltage distribution of oil and gas pipelines (simulation)

表2 油气管道感应电压分布(仿真)

Tab.2 Induction voltage distribution of oil and gas pipelines (simulation)

施工方法	油气管道感应电压/V		
	最大值	最小值	差值
盾构法	20.352	12.900	7.452
矿山法	2.189	-0.284	2.473

当盾构法施工时,油气管道表面感应电压幅值较高,最高值 20.352 V 出现在首端,最低值 12.9 V 在末端出现,两端感应电压降为 7.452 V;当矿山法施工时,油气管道表面感应电压下降至最高 2.189 V,最低 -0.284 V,两端感应电压降为 2.473 V。在盾构法施工下,油气管道表面的感应电压幅值比矿山法施工要高得多,首末端电压降也更高。

### 2.2.2 交流牵引供电系统对油气管道的交流干扰程度分析

根据埋地钢质管道交流干扰防护技术标准,当管道上交流干扰电压不高于 4 V 时,可不采取交流干扰防护措施;高于 4 V 时,应当采用交流电流密度进行评估,交流电流密度计算公式如下:

$$J_{AC} = \frac{8V}{\rho_0 \pi d} \quad (2)$$

式中:

$J_{AC}$ ——评估的交流电流密度,单位  $A/m^2$ ;

$V$ ——感应电压有效值的平均值,单位 V;

$\rho_0$ ——土壤电阻率,单位  $\Omega \cdot m$ ;

$d$ ——破损点直径,单位 m,按交流腐蚀最严重

考虑,取 0.011 3 m。

表 3 是交流干扰的评价指标。

表3 交流干扰评价指标

Tab.3 AC interference evaluation and index

评价项目	交流干扰评价指标		
	弱	中	强
交流电流密度/( $A/m^2$ )	<30	30 ~ 100	>100

矿山法施工下感应电压最大值未到 4 V,故可以不采取交流干扰防护措施;在盾构法施工下,感应电压最大值大于 4 V,应当使用交流电流密度来评估交流干扰程度。图 4 为盾构法施工下油气管道交流电流密度。

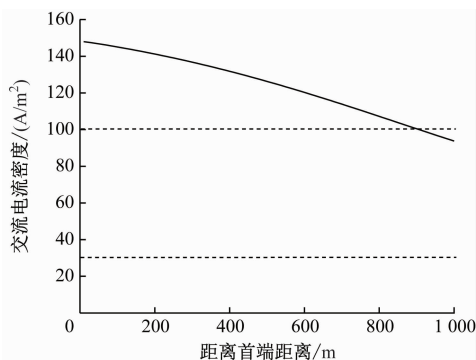


图4 盾构法施工下油气管道交流电流密度(仿真)

Fig.4 AC current density of oil and gas pipeline under shield tunneling construction method

在盾构法施工下,油气管道表面交流电流密度最大值在首端出现,为  $147.94 A/m^2$ ,最小值在末端出现,为  $93.77 A/m^2$ 。绝大部分管道交流电流密度都高于  $100 A/m^2$ ,即大部分管道都处于强交流电磁干扰水平,需要采取电磁干扰防护措施。

### 2.3 隧道施工方法对油气管道表面涂层耐受电压影响的仿真研究

油气管道内部运输的产品常常包含有毒、易燃、易爆等危险因素,一旦油气管道泄漏将造成不可逆的危害。为了减少油气管道与土壤中的酸、碱、盐等化学物质发生反应,防止地铁运行过程中杂散电流产生的交流干扰,往往会给管道铺设防腐涂层和电气绝缘涂层。

本文的仿真计算模型中,对油气管道设置厚度为 0.003 m、电阻为  $100\,000 \Omega \cdot m^2$  的绝缘涂层。

图 5 是油气管道涂层耐受电压分布情况。盾构法和矿山法两种施工方法下,油气管道涂层耐受电压都呈现先短暂上升后下降的趋势。盾构法施工



下的隧道结构中油气管道涂层耐受电压远远高于矿山法施工下的管道涂层耐受电压,具体数值如表4所示。盾构法施工方式下油气管道涂层耐受电压最高为20.177 V,最低为14.269 V,两端电压降为5.908 V;矿山法施工下的油气管道涂层耐受电压最高为1.514 V,最低为0.767 V,两端电压降为0.747 V。根据相关文献<sup>[7-8]</sup>,一般绝缘涂层的耐受电压均在1 000 V以上,故无需再对油气管道绝缘涂层增加防护措施。

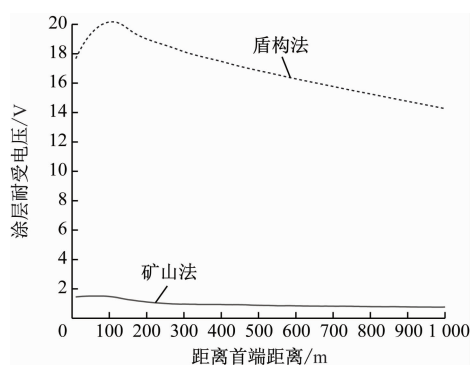


图5 油气管道涂层耐受电压(仿真)

Fig.5 With stand voltage of oil and gas pipeline coating (simulation)

表4 油气管道涂层耐受电压

Tab.4 Withstand voltage of oil and gas pipeline coating

施工方法	涂层耐受电压/V		
	最大值	最小值	差值
盾构法	20.177	14.269	5.908
矿山法	1.514	0.767	0.747

### 3 结语

本文通过对盾构法和矿山法两种施工方法下的地铁隧道建立仿真等效模型,仿真计算了油气管道在两种不同施工方法下表面感应电压、涂层耐受电压以及地表电位的分布,可得如下结果:

1) 隧道采用盾构法施工相比于矿山法施工,不管是油气管道的感应电压还是地表电位都会比矿山法施工要高得多。主要原因是虽然矿山法要比盾构法多了横向钢筋结构,但并没有增强接触网和油气管道的电磁耦合,横向钢筋使得纵向钢筋电气连接成为一个整体,在杂散电流传播过程中起到均压作用,对油气管道电磁感应起到屏蔽作用,同时降低了地表电位和油气管道的感应电压及其涂层的耐受电压。

2) 管道涂层耐受电压受地表电位和管道感应电压的双重影响,管道耐受电压幅值不是地表电位幅值和感应电压幅值的标量差,在治理管道的交流干扰时需要考虑的不仅仅是幅值的变化,也需要考虑到相位的变化。

由于软件限制,无法对土壤进行完美的仿真建模,导致下层土壤中由钢轨泄漏的电流无法如实反映到地表电位的变化之中,所以本文仿真计算的地表电位分布可能与实际情况有所偏差。

### 参考文献

- [1] 董根生, 蒋剑, 相生荣, 等. 750 kV 交流线路对多条油气管道的电磁影响研究[J]. 中国电机(技术版), 2015(10): 16. DONG Gensheng, JIANG Jian, XIANG Shengrong, et al. Study on electromagnetic influence of 750 kV AC power transmission lines on gas/oil pipelines[J]. China Electric Power (Technology Edition), 2015(10): 16.
- [2] 梁盼望, 杨力, 蒋少波. 交流线路对埋地输油气管道的干扰影响机理分析及防护措施[J]. 机电信息, 2020(24): 30. LIANG Panwang, YANG Li, JIANG Shaobo. Mechanism analysis and protective measures of interference of AC lines on buried oil and gas pipelines[J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(24): 30.
- [3] 鲜俊, 王文斌, 梅鹏, 等. 电气化铁路杂散电流对埋地管线干扰影响研究[J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(4): 42. XIAN Jun, WANG Wenbin, MEI Peng, et al. Effect of stray current induced by electric railway on buried pipeline[J]. Total Corrosion Control, 2013, 27(4): 42.
- [4] 李鲲鹏, 靳守杰, 李俊豪, 等. 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[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(7): 102. LI Kunpeng, JIN Shoujie, LI Junhao, et al. Distribution characteristics of traction back-flow under AC power supply system in mined metro tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 102.
- [5] 周奇, 林圣, 邹全德, 等. 土壤结构对城轨中杂散电流分布的影响分析[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(2): 10. ZHOU Qi, LIN Sheng, ZOU Quande, et al. Influence of soil structure on stray current distribution in urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(2): 10.
- [6] 黄晓鹏, 马庆安, 刘伟, 等. 城轨供电系统杂散电流对埋地金属管道的动态干扰研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 735. HUANG Xiaopeng, MA Qing'an, LIU Wei, et al. Study on the dynamic interference of stray current in urban traction power supply system on buried metal pipelines[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(2): 735.
- [7] 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.

(下转第 122 页)

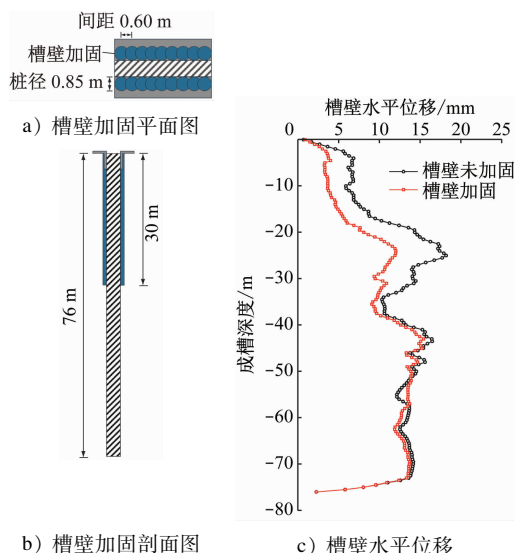


图8 槽壁加固及槽壁水平位移

Fig.8 Horizontal displacement and reinforcement of trench wall

较重的第④层黏土层,成槽抓斗反复抓土过程会扰动泥浆,对槽壁形成卸力和冲击,形成局部塌孔。

2) 槽壁水平位移的发展主要集中在成槽前期,即开挖至④<sub>2b</sub>层。成槽结束时槽壁水平位移最大值为18.18 mm,位于地面以下25 m处。

3) 提高泥浆重度和对槽壁进行加固均能有效地控制槽壁水平位移。

由于槽壁塌孔位置在承压含水层以上,本文所建模型中未考虑承压含水层,在后续的研究中考虑引入承压含水层以优化所建模型。

## 参考文献

[1] LI A J, MERIFIELD R S, LIN H D, et al. Trench stability under bentonite pressure in purely cohesive clay[J]. International Jour-

nal of Geomechanics, 2014, 14(1): 151.

[2] 王启云,林华明,臧万军,等.深厚软弱地层地下连续墙槽壁稳定性分析[J].科学技术与工程,2018,18(35):58.

WANG Qiyun, LIN Huaming, ZANG Wanjun, et al. Stability analysis of trench of diaphragm wall in deep water-soaked soft stratum [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18 (35): 58.

[3] 安辰亮,吴文亮,赵小鹏,等.跨软弱夹层地下连续墙槽壁局部稳定性分析[J].铁道工程学报,2022,39(3):7.

AN Chenliang, WU Wenliang, ZHAO Xiaopeng, et al. Local stability analysis of diaphragm wall trench wall crossing weak interlayer[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(3): 7.

[4] 路乾,胡长明,王晓华,等.地下连续墙成槽施工槽壁整体稳定性分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(3):864.

LU Qian, HU Changming, WANG Xiaohua, et al. Analysis on the overall stability of trenching construction of diaphragm wall [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17 (3): 864.

[5] 朱宁,周洋,刘维,等.苏州粉土地层地连墙施工对地层扰动影响研究[J].岩土力学,2018,39(增刊1):529.

ZHU Ning, ZHOU Yang, LIU Wei, et al. Study of silty soil behavior disturbed for installation of diaphragm wall in Suzhou [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S1): 529.

[6] 严朝锋,张孟喜,周忠群.高水位区地下连续墙穿越粉砂层槽壁稳定性数值分析[J].施工技术(中英文),2021,50(18):51.

YAN Chaofeng, ZHANG Mengxi, ZHOU Zhongqun. Numerical analysis of the stability of diaphragm wall crossing silty sand in high water area [J]. Construction Technology, 2021, 50(18): 51.

· 收稿日期:2024-11-21 修回日期:2024-12-25 出版日期:2025-03-10

Received:2024-11-21 Revised:2024-12-25 Published:2025-03-10

· 通信作者:叶如,高级工程师,67846783@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第117页)

LI Junhao. Study on the influence of AC power supply system on induced voltage and current of subway tunnel grounding system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.

[8] CHRISTIE A B, LEE J, SUTHERLAND I, et al. An XPS study of ion-induced compositional changes with group II and group IV compounds[J]. Applications of Surface Science, 1983, 15(1/2/3/4): 224.

[9] 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.

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.

[10] 盛望群.基于CDEGS的交流电气化铁路对沿线油气管道电

磁干扰影响研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(8):2101.

SHENG Wangqun. Study on influence of AC electrified railway on electromagnetic interference of oil and gas pipelines along the line based on CDEGS [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(8): 2101.

· 收稿日期:2022-12-05 修回日期:2023-03-21 出版日期:2025-03-10

Received:2022-12-05 Revised:2023-03-21 Published:2025-03-10

· 通信作者:龙意仁,高级工程师,1305586220@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license