

广州地铁 22 号线交流牵引供电系统电磁干扰问题分析

赵云云¹ 桑国阳¹ 龙意仁² 李鲲鹏^{1,3} 叶俊⁴ 曹晓斌³

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 中国能源建设集团湖南省电力设计院有限公司, 410007, 长沙;

3. 西南交通大学电气工程学院, 611756, 成都; 4. 阳光电源股份有限公司, 230088, 合肥)

摘要 [目的]当地铁线路正常运行时,由于钢轨对地不能做到完全绝缘,采用交流牵引供电系统的地铁会对邻近金属油气管道产生交流干扰。因此,有必要研究地铁交流牵引供电系统对外部电磁干扰的问题。[方法]以广州某金属油气管道与广州地铁 22 号线并行段为例,建立地铁隧道与金属油气管道耦合模型,对金属油气管道进行电磁干扰仿真分析;计算了与隧道呈不同夹角的油气管道各段的电磁感应电压、地电位和涂层耐受电压,分析了电磁干扰的主要影响因素。[结果及结论]交流牵引供电制式下,管道涂层实际承受电压为涂层内部金属管道表面的电压和外部土壤中的地电位的差值,地铁隧道在金属管道表面产生的感应电压幅值是土壤地电位幅值的 10 倍以上,金属油气管道受到的电磁干扰以管道与地铁的电磁感应电压为主;金属油气管道及地铁隧道并行段是产生电磁干扰的主要区段;增加回流线可以极大地降低金属油气管道的电磁感应电压,回流线的位置与数量对减少电磁干扰效果有极大的影响。

关键词 地铁; 交流牵引供电系统; 电磁干扰

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.023

Analysis of Electromagnetic Interference Problems in AC Traction Power Supply System of Guangzhou Metro Line 22

ZHAO Yunyun¹, SANG Guoyang¹, LONG Yiren², LI Kunpeng^{1,3}, YE Jun⁴, CAO Xiaobin³

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China; 2. China Energy Construction Group Hunan Electric Power Design Institute Co., Ltd., 410007, Changsha, China; 3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 611756, Chengdu, China; 4. Sunshine Power Supply Co., Ltd., 230088, Hefei, China)

Abstract [Objective] During the normal operation of metro lines, due to incomplete rail-ground insulation, metro that adopts AC (alternating current) traction power supply system can cause electromagnetic interference on adjacent metallic oil and gas pipelines. Therefore, it is necessary to study the exter-

nal electromagnetic interference problem caused by metro AC traction power supply system. [Method] Taking the parallel section of a metallic oil and gas pipeline in Guangzhou and Guangzhou Metro Line 22 as example, a coupled model of the metro tunnel and the pipeline is established to simulate and analyze electromagnetic interference on the pipeline. The electromagnetic induction voltages, ground potentials, and coating tolerance voltages of different segments of the oil and gas pipeline with varying angles to the tunnel are calculated, and the main influencing factors of electromagnetic interference are analyzed. [Result & Conclusion] Under the format of AC traction power supply system, the actual voltage endured by the pipeline coating is the difference between the voltage on the surface of the internal metal pipeline and the ground potential in the external soil. The induced voltage amplitude generated by the metro tunnel on metallic pipeline surface is more than 10 times the amplitude of soil ground potential, with the electromagnetic induction voltage between the pipeline and the metro being the main factor causing electromagnetic interference on the metallic oil and gas pipeline. The parallel section of the metallic oil and gas pipeline and the metro tunnel is the main area generating electromagnetic interference. Adding return line can significantly reduce the electromagnetic induction voltage on the metallic oil and gas pipeline, and the position and quantity of the return line have a significant impact on reducing electromagnetic interference.

Key words metro; AC traction power supply system; electromagnetic interference

随着城市轨道交通线路的速度目标值越来越高,传统直流牵引供电系统制式的地铁由于其供电电压较低,需在区间设置大量牵引变电所,以延长供电距离。在这种情况下,直流牵引供电系统具有结构复杂、供电设备投资成本较高等缺点。此外,在直流牵引系统制式下,列车再生制动产生的能量

不易返回电网,需增加价格不菲的专用设备,还要配以复杂的控制装置^[1],无法满足现在与未来的节能减排目标。鉴于此,越来越多的城市开始规划建设交流供电制式的地铁。

由于地理条件与成本限制,地铁线路需与油气管道敷设在同一公共走廊,这将会在一定范围内造成两者平行接近或交叉穿越等情况。交流牵引供电系统大多以钢轨和大地作为回流路径,由于钢轨对地不能做到完全绝缘,在线路正常运行时将会存在地中交流杂散电流,进而对邻近金属油气管道产生交流干扰^[2]。交流杂散电流极易导致电极表面产生去极化作用,造成邻近埋地金属油气管道的绝缘层所承受的电压过高,进而导致可能击穿金属油气管道绝缘层并击毁阴极保护设备,最终导致金属油气管道交流腐蚀穿孔,并对邻近操作人员的人身安全造成威胁^[3-4]。广州地铁 18 号线和 22 号线均采用钢轨对地绝缘架设,并在道床中敷设了全线贯通的排流网,以减小地铁在运行过程中对周围油气管道的影响。

目前,国内外学者对金属油气管道的电磁干扰问题进行了大量研究。文献[5]采用 EMTP-ATP 软件建立仿真模型,研究了电力系统架空线路短路引起的地下管道感应电压问题。文献[6]研究了高压输电线和交流电气化铁路对埋地管道的共同影响。文献[7]研究了交流变电站对邻近管道的电磁干扰影响。文献[8]研究了高压交流输电线与管道间的平行长度、高压线稳态运行电流和土壤电阻率对埋地管道电磁干扰的影响规律。文献[9]基于 CDEGS 软件,研究了交流电气化铁路对沿线油气管道电磁干扰的影响。以上文献的研究对象均是位于地面以上的电气化铁路,未研究位于地下的城市轨道交通对金属油气管道产生的交流电磁干扰问题。

鉴于此,本文基于地铁隧道的实际情况,建立地铁上下行隧道与金属油气管道模型,研究了采用交流牵引供电系统的地铁线路对埋地金属油气管道的电磁干扰方式、影响程度、影响因素,以及减少电磁干扰危害的可行性措施。本文研究可为防治油气管道电磁干扰提供依据,也可为今后交流供电制式地铁线路的设计和规划提供指导。

1 地铁隧道与金属油气管道耦合模型

1.1 土壤结构模型

以广州某金属油气管道与广州地铁 22 号线并

行段为例,建立地铁隧道、牵引供电系统与金属油气管道耦合模型。模型中的所有参数均来自于实际设计参数及现场勘测数据。在交流牵引供电系统中,将大地作为交流杂散电流的回流路径,故土壤结构会对交流杂散电流的分布产生影响。该地铁隧道区段的土壤结构模型参数如表 1 所示。

表 1 土壤结构模型参数
Tab. 1 Soil structure model parameters

分层名称	电阻率/ ($\Omega \cdot \text{m}$)	厚度/m	相对 磁导率	相对介电 系数
空气层	1×10^{18}	∞	1	1
顶层(地面土壤)	31	13.67	1	1
中间层(混凝土)	1 000	5.00	1	1
底层(深层土壤)	200	∞	1	1

1.2 耦合模型

地铁隧道上下行两路的水平间距为 16 m,金属油气管道部分与地铁线路并行,地铁隧道与金属油气管道间有一条长约 600 m 的平行段,管道埋深为 1.7 m,隧道顶部埋深为 13.67 m,即管道距隧道顶部的垂直距离为 11.97 m。管道的管径为 610 mm,壁厚为 15.9 mm,输送介质为天然气,管道设计压力为 9.2 MPa,运行压力为 8.6 ~ 8.8 MPa。管道采用直缝埋弧焊接钢管,钢管材质为 API 5L X65,屈服强度为 450 MPa,焊缝系数为 1.0,强度设计系数为 0.4,管道相对电阻率为 9.86,相对磁导率为 300。管道涂层为 3PE(聚乙烯)防腐涂层,涂层电阻率为 $1 \times 10^5 \Omega \cdot \text{m}$,涂层厚为 3 mm。在仿真模型中,管道设置为空心导线,半径为 300 mm,壁厚为 15.9 mm,涂层电阻率为 $1 \times 10^5 \Omega \cdot \text{m}$,涂层厚为 3 mm。

根据管道与地铁隧道的位置关系,把金属油气管道划分为 4 段:第 1 段与地铁线路夹角为 45° ,长度为 1 690 m;第 2 段与地铁线路夹角为 30° ,长度为 360 m;第 3 段位于地铁线路正上方,与地铁线路并行,长度为 600 m;第 4 段垂直于地铁线路,长度为 2 000 m。4 段管道总长为 4 650 m。地铁隧道与金属油气管道位置示意图如图 1 所示。

1.3 仿真模型等效参数

在 CDEGS 软件中所建立的模型包括接触线、钢轨、回流线、排流网、结构钢筋及油气管道等。仿真模型等效参数如表 2 所示。

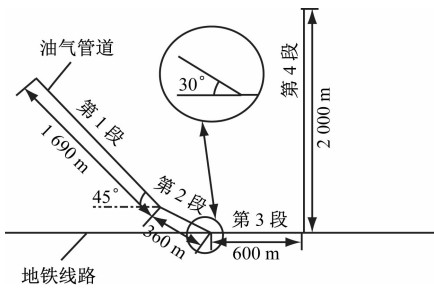


图1 地铁隧道与金属油气管道位置示意图

Fig.1 Diagram of metro tunnel and metallic oil and gas pipeline position

表2 仿真模型等效参数

Tab.2 Equivalent parameters of simulation model

名称	型号	等效半径/m	相对电阻率	相对磁导率
接触网	CTA150	0.020	1.00	1
钢轨	P60	0.050	17.94	1
排流网	LGG120	0.008	249.10	1
油气管道	API 5L X65	0.310	9.86	300

2 金属油气管道电磁干扰仿真分析

2.1 不同类型耦合电压的分布规律

交流杂散电流干扰对埋地管道的影响主要包

括容性耦合、阻性耦合、磁感应耦合^[10]。由于金属油气管道通常有良好的绝缘防护层,内阻较高,因此可忽略容性耦合的影响。交流牵引供电系统大多以钢轨和大地作为回流路径,线路正常运行时存在地中交流杂散电流,引起地电位有所变化,进而产生阻性耦合。同时,由于接触网与回流系统中的电流在外界产生的磁场不能相互抵消,导致周边金属油气管道两侧存在磁场差,从而在钢管上产生感应电压。

将地铁隧道与金属油气管道耦合模型的仿真数据绘制成金属油气管道的电磁感应、地电位和管道涂层耐受电压的分布曲线,如图2所示。由图2可知:①金属油气管道的电磁感应电压变化落差较大,整体随着金属油气管道的走向呈下降的趋势;最大电磁感应电压位于油气管道首端;金属油气管道与地铁隧道并行段的下降幅度最大。②管道沿线地电位较低,且沿线地电位变化范围较小,变化幅值约为2 V,这说明金属油气管道对于地面有电流泄漏现象,但泄漏到大地中的电流并不多。③电磁感应电压幅值远远大于地电位,且金属油气管道涂层耐受电压值为管道电磁感应电压与地电位的差值。

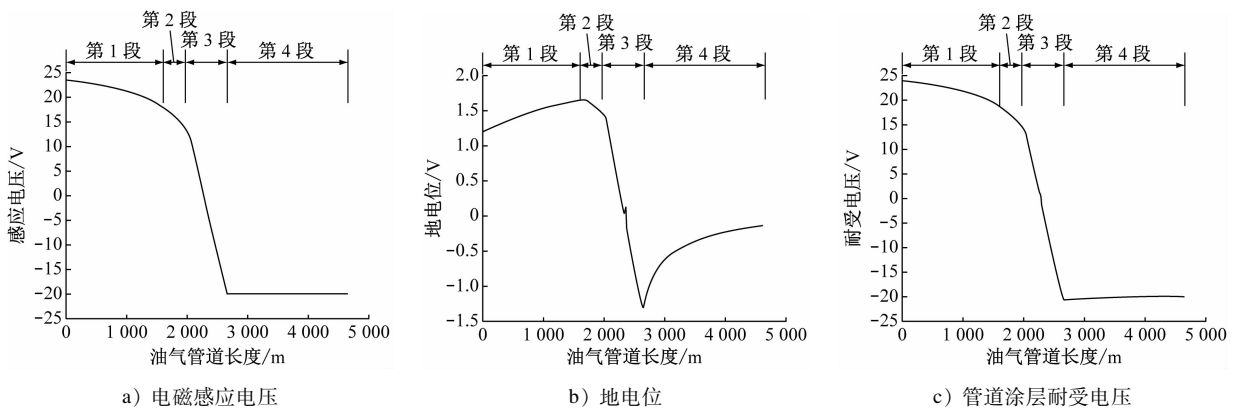


图2 金属油气管道电磁感应、地电位及管道涂层耐受电压的分布曲线

Fig.2 Distribution curves of electromagnetic induction, ground potential, and pipeline coating withstand voltage of metallic oil and gas pipelines

2.2 电磁干扰影响分析

2.2.1 管道敷设方向对电磁干扰的影响

利用所建立的地铁隧道与金属油气管道耦合模型,通过仿真计算研究了首段及末段金属油气管道的电磁感应电压、地电位和涂层耐受电压的分布情况,其中不设回流线时,各电压情况如表3—表5所示。不同区段电磁干扰的强度并不相同。电磁

感应电压变化最大的管道段为第3段,即金属油气管道与地铁隧道平行敷设的那一段,其电磁感应电压差高达31.218 V。电磁感应电压变化最小的管道段为第4段,即金属油气管道与地铁隧道垂直敷设的那一段,其电磁感应电压差非常小,几乎为0。此外,即使地电位变化幅度并不大,但金属油气管道沿线最大地电位差也位于第3段,地电位差为

2.713 V。

表 3 不设回流线时的管道电磁感应电压
Tab.3 Pipeline electromagnetic induction voltage without return line

管道分段名称	首端电磁感应电压/V	末端电磁感应电压/V	首末端电磁感应电压差值/V
第 1 段	23.405	17.161	6.244
第 2 段	17.161	11.566	5.595
第 3 段	11.566	-19.652	31.218
第 4 段	-19.652	-19.922	0.270

注:首端电磁感应电压最大幅值为 23.405 V;末端电磁感应电压最大幅值为 -19.922 V;首末端电磁感应电压差值最大幅值为 31.218 V。

表 4 不设回流线时的管道地电位
Tab.4 Pipeline ground potential without return line

管道分段名称	首端地电位/V	末端地电位/V	首末端地电位差值/V
第 1 段	1.200	1.665	-0.465
第 2 段	1.665	1.376	0.289
第 3 段	1.376	-1.337	2.713
第 4 段	-1.337	-0.146	-1.191

注:首端地电位最大幅值为 1.665 V;末端地电位最大幅值为 -1.337 V;首末端地电位差值最大幅值为 2.713 V。

表 5 不设回流线时的管道涂层耐受电压
Tab.5 Pipeline coating withstand voltage without return line

管道分段名称	首端管道涂层耐受电压/V	末端管道涂层耐受电压/V	首末端管道涂层耐受电压差值/V
第 1 段	23.994	17.993	6.001
第 2 段	17.993	12.422	5.571
第 3 段	12.422	-20.378	32.800
第 4 段	-20.378	-19.995	-0.383

注:首端管道涂层耐受电压最大幅值为 23.994 V;末端管道涂层耐受电压最大幅值为 -20.378 V;首末端管道涂层耐受电压差值最大幅值为 32.800 V。

综上所述,不论是电磁感应电压还是地电位,管道第 3 段并行段两端的电压差值均最大。由此可知,金属油气管道和地铁隧道并行段受到电磁干扰的影响最大,是需要重点防范的区段。

2.2.2 耦合类型对电磁干扰的影响

金属油气管道电磁感应电压与管道涂层耐受电压对比情况如图 3 所示。由于管道涂层耐受电压为管道上的电磁感应电压与地电位之差,从图 3 可

以看出,管道涂层耐受电压与管道上的电磁感应电压基本一致,地电位产生的影响基本可以忽略,因此可以认为金属油气管道所承受的电磁干扰主要来源于金属油气管道上的电磁感应电压。

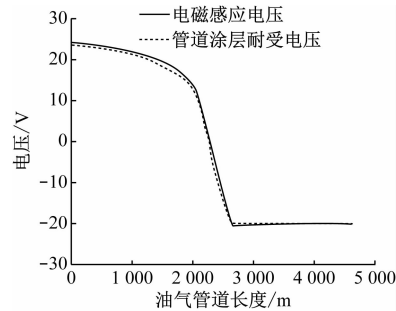


图 3 金属油气管道电磁感应电压与管道涂层耐受电压对比
Fig.3 Comparison of electromagnetic induction voltage and pipeline coating withstand voltage of metallic oil and gas pipeline

3 电磁干扰主要影响因素

3.1 回流线影响

在城市轨道交通领域中,回流线的作用是减少牵引供电系统对外电磁泄漏量,从而达到降低电磁干扰的目的。本文选取无回流线、回流线在地铁轨道侧方、回流线位于接触网上方、接触网侧方和上方各一根回流线、接触网上方两根回流线和接触网上方三根回流线这几种回流线方案进行研究。隧道横切面轨道、接触网和回流线位置示意图如图 4 所示。不同回流线方案下,金属油气管道电磁感应、地电位及管道涂层耐受电压的分布曲线如图 5 所示。

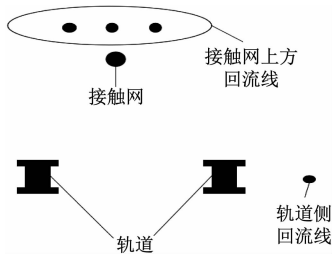
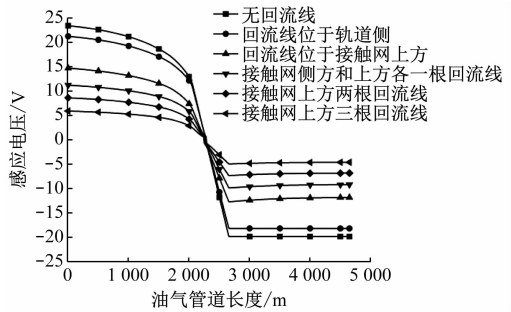
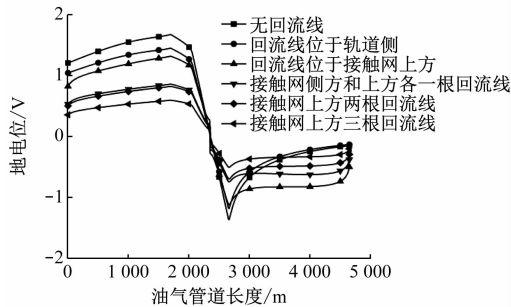


图 4 隧道横切面轨道、接触网和回流线位置示意图
Fig.4 Location diagram of tunnel cross-section track, catenary and return line

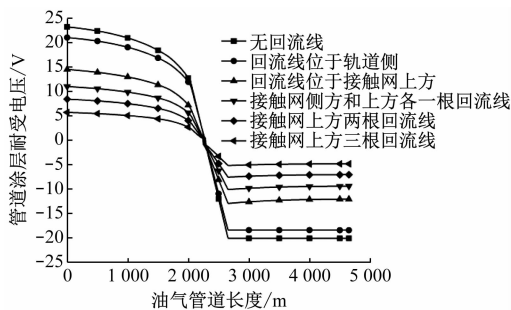
回流线的位置及数量均能起到降低管道电磁感应电压的作用。若回流线位于轨道侧,管道的最大电磁感应电压由无回流线时的 23.405 V 下降到



a) 电磁感应电压



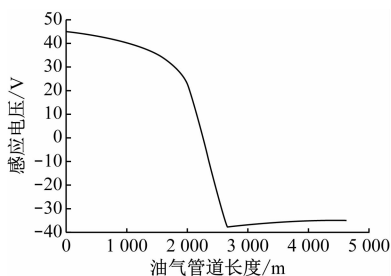
b) 地电位



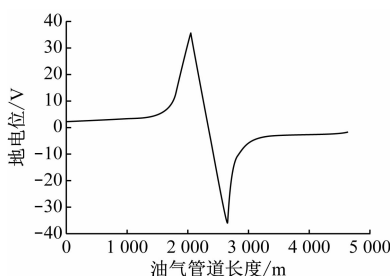
c) 管道涂层耐受电压

图5 不同回流线方案下金属油气管道电磁感应、地电位及管道涂层耐受电压的分布曲线

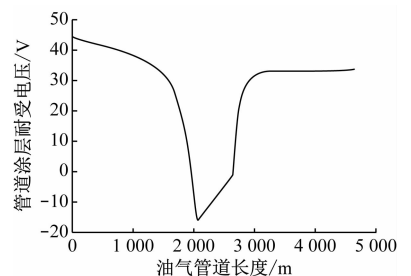
Fig. 5 Distribution curves of electromagnetic induction, ground potential, and pipeline coating withstand voltage of metallic oil and gas pipelines in different return line schemes



a) 电磁感应电压



b) 地电位



c) 管道涂层耐受电压

图6 结构钢筋全线连通时金属油气管道电磁感应、地电位及管道涂层耐受电压的分布曲线

Fig. 6 Distribution curves of electromagnetic induction, ground potential, and pipeline coating withstand voltage of metallic oil and gas pipelines with structural reinforcement connected throughout the entire line

21.228 V,下降率小于10%。当回流线位于接触网正上方时,管道的最大电磁感应电压由无回流线时的23.405 V下降到14.698 V,下降率为37.2%。当接触线上方和轨道侧各安装一根回流线时,管道最大电磁感应电压从23.405 V下降到11.202 V,下降率为52.1%,仅比回流线位于接触网正上方的情况多降低了14.8%,因此在轨道侧加回流线的方案效果并不理想。当接触线上方安装两根回流线时,管道最大电磁感应电压从23.405 V下降到8.605 V,下降率为63.2%。当接触线上方安装三根回流线时,管道最大电磁感应电压为5.885 V,下降率为74.9%。综上所述,在接触网上方增加回流线可以有效降低管道的电磁感应电压,增加三根回流线时,金属油气管道上的感应电压已低于其允许承受的电压水平^[2]。

3.2 隧道结构钢筋影响

隧道壁的结构钢筋产生的感应电压会对金属油气管道产生电磁干扰。结构钢筋全线连通时,金属油气管道电磁感应、地电位及管道涂层耐受电压的分布曲线如图6所示。当结构钢筋全线连通时,金属油气管道内部钢管上的电磁感应电压及管道沿线地电位均有所增加。

当采用交流供电制式时,交流电磁场在结构钢筋上会产生电磁感应电压,且结构钢筋越长,钢筋两端的感应电压差越大。由于结构钢筋不是对地绝缘架设,在电磁感应电压作用下,结构钢筋周边的土壤电位会有所上升,导致平行于地铁的金属油气管道周边地电位有所上升。但由于地铁隧道结构钢筋与金属油气管道的长度及走向并不相同,故二者的电磁感应电压相位也不同,则地电位与管道内部钢管的电磁感应电压相位也不一致,不能相互抵消,最终导致管道涂层耐受电压有所上升。

4 结语

通过建立地铁隧道与金属油气管道电磁干扰耦合模型,研究了电磁干扰的主要影响因素与减少电磁干扰的措施,主要获得以下结论:

1) 交流牵引供电制式下,管道涂层实际承受电压为涂层内部金属管道表面的电压和外部土壤中地电位的差值,地铁牵引供电系统会引起油气管道金属表面感应电压和外部地电位的变化,从而引起油气管道涂层承受电压的变化。地铁隧道在金属管道表面产生的感应电压幅值是土壤地电位幅值的10倍以上,因此金属油气管道受到的电磁干扰以管道与地铁的电磁感应电压为主。

2) 电磁感应电压与金属油气管道及地铁隧道的相对位置及走向有关。当油气管道与地铁隧道水平夹角为 90° 时,油气管道两端产生的电磁感应电压几乎为0。金属油气管道及地铁隧道并行段的管道两段电磁感应电压差非常大,因此金属油气管道及地铁隧道并行段是产生电磁干扰的主要区段。

3) 增加回流线可以极大地降低金属油气管道的电磁感应电压,回流线的位置与数量对减少电磁干扰效果有极大的影响,回流线应尽量靠近接触线,并布置在靠近并行段油气管道的一侧。

4) 地铁隧道的结构钢筋通过电磁感应增大了对外泄漏电流,在全线连通时,不仅提高了金属油气管道的电磁感应电压,还提高了金属油气管道沿线的地电位,整体上表现为油气管道所受的电磁干扰有所增强。

参考文献

- [1] 周应东,陈民武,吕亚博,等.城市轨道交通新型牵引供电系统设计探讨[J]. 电工技术, 2019(9): 73.
ZHOU Yingdong, CHEN Minwu, LYU Yabo, et al. Discussion on design of new traction power supply system for urban rail transit[J]. Electric Engineering, 2019(9): 73.
- [2] 王新华,陈振华,何仁洋.埋地钢质管道交流干扰测试与评价[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(1): 66.
WANG Xinhua, CHEN Zhenhua, HE Renyang. Testing and assement of AC interference on buried steel pipelines[J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(1): 66.
- [3] 杨光.交流输电线路单相接地故障下油气管道交流干扰的缓

解[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(2): 165.

YANG Guang. Mitigation of AC interference on oil and gas pipelines due to single-phase earth fault in AC transmission line[J]. Corrosion & Protection, 2016, 37(2): 165.

- [4] 王爱玲. 750 kV 高压交流输电线路对埋地管道的干扰规律研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2013.
WANG Ailing. 750 kV high-voltage AC transmission lines on buried pipelines disturbance study[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.
- [5] MILEŠEVIĆ B, FILIPOVIĆ-GRČIĆ B, RADOŠEVIĆ T. Electromagnetic fields and induced voltages on underground pipeline in the vicinity of AC traction system[J]. Energy and Power Engineering, 2014, 8(7): 1333.
- [6] FICKERT L, SCHMAUTZER E, BRAUNSTEIN R, et al. Reduction of the electrical potential of interfered pipelines due to currents of high voltage power lines and electric railways[J]. E & I Elektrotechnik und Informationstechnik, 2010, 127(12): 362.
- [7] 薛纪新,陈瑞瑞,刘君亮.交流变电站对管道电磁干扰缓解措施研究[J]. 管道技术与设备, 2019(6): 56.
XUE Jixin, CHEN Ruihui, LIU Junliang. Study on mitigation measures for electromagnetic interference of AC substation on pipeline[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2019(6): 56.
- [8] 杨超,李自力,崔淦,等.埋地管道与高压交流输电线路之间的安全距离[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(1): 56.
YANG Chao, LI Zili, CUI Gan, et al. Safe distance between buried pipelines and high voltage AC transmission lines[J]. Corrosion & Protection, 2016, 37(1): 56.
- [9] 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.
- [10] 吴长访,王波,裴青,等.铁秦线管道交流杂散电流干扰检测与评价[J]. 管道技术与设备, 2014(1): 36.
WU Changfang, WANG Bo, PEI Qing, et al. AC stray current testing and evaluation of the Tieling-Qinhuangdao pipeline[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2014(1): 36.

· 收稿日期:2021-08-05 修回日期:2021-10-20 出版日期:2024-02-10
Received:2021-08-05 Revised:2021-10-20 Published:2024-02-10
· 通信作者:赵云云,正高级工程师,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