

交流输电线路对管道腐蚀影响的安全距离研究

姜子涛^{1*}, 周冰², 董绍华¹, 魏百发³, 刘冠一¹, 汪麟¹, 董廷涛¹

1 中国石油大学(北京)管道技术与安全研究中心, 北京 102249

2 中国石油集团工程技术研究院, 天津 300450

3 上海格麟倍科技发展有限公司, 上海 201100

* 通信作者, jiangzitao1986@163.com

收稿日期: 2020-12-21

国家自然科学基金青年基金(No. 52004312)、中国博士后科学基金(No. 2020M670582)和中国石油大学(北京)科研基金(No. 2462020YXZZ044, No. 2462020YXZZ045, No. 2462019YJRC012)联合资助

摘要 随着我国经济的高速发展, 能源输送网络不断建设完善, 在许多地区由于地理位置限制使得高压输电线路和油气管道形成“公共走廊”。高压交流输电线路通过电磁感应作用对埋地管道产生交流干扰, 当电流从管道防腐层破损点流出时会引发交流腐蚀问题。实际工程中掌握输电线路与管道的安全距离, 就可以从选址阶段进行有效避让, 避免后期管道可能受到的干扰问题。针对该问题, 首先确定了交流腐蚀的安全指标, 然后利用数值模拟技术建立了交流输电线路对埋地管道交流干扰模型, 计算研究了典型的土壤电阻率、防腐层、输电线路等级、输电系统不平衡度、管径情况下的输电线路与管道的安全距离。结果表明: 输电线路电压等级越高, 需要的安全距离越大。对于 220 kV 及以下高压交流输电线路(单相电流小于 1000 A), 当其与管道间距大于 868 m 时, 管道所受交流腐蚀风险可以忽略。并行长度越长, 需要的安全距离越大。当并行长度大于 40 km 时, 安全距离变化不大。土壤电阻率、管道防腐层以及输电线路等级对安全距离影响比较明显。土壤电阻率越低, 所需的安全距离越大, 因此当管道处于农田土或者盐碱土中时, 需要更大的安全距离。管道防腐层质量越好, 所需的安全距离也越大, 因此 3PE 防腐层需要更大的安全距离。输电系统不平衡度对安全距离影响较小, 这表明对于临近安全距离的管道, 其交流干扰的主要来源是相线之间位置差异, 而不是电流的不平衡性。管道直径对于安全距离的影响也比较小, 这是因为管道的纵向阻抗相比于泄漏阻抗要低很多, 也就导致其对纵向电场的累积效果影响不大, 因此对安全距离影响较小。在此基础上建立了安全距离图谱和评价方法, 并将该方法应用于某实际管道的交流干扰分析, 结果显示根据安全距离可以很好地判断管道的干扰风险。本研究成果为新建管道与输电线路避让提供了方法和参考依据。

关键词 安全距离; 交流干扰; 电磁感应; 输电线路; 管道腐蚀

Research on safety distances between AC transmission lines and buried pipelines for mitigating AC corrosion

JIANG Zitao¹, ZHOU Bing², DONG Shaohua¹, WEI Baifa³, LIU Guanyi¹, WANG Lin¹, DONG Tingtao¹

引用格式: 姜子涛, 周冰, 董绍华, 魏百发, 刘冠一, 汪麟, 董廷涛. 交流输电线路对管道腐蚀影响的安全距离研究. 石油科学通报, 2021, 04: 638-647

JIANG Zitao, ZHOU Bing, DONG Shaohua, WEI Baifa, LIU Guanyi, WANG Lin, DONG Tingtao. Research on safety distances between AC transmission lines and buried pipelines for mitigating AC corrosion. Petroleum Science Bulletin, 2021, 04: 638-647. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.04.045

1 Pipeline Research Center, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 CNPC Research Institute of Engineering Technology, Tianjin 300450, China

3 Shanghai Gelinbei Technology & Development Co., LTD, Shanghai 201100, China

Abstract With the rapid development of China's economy and the substantial construction of energy transmission networks, high voltage transmission lines and oil and gas pipelines usually form a "Right-of-Way", especially in space restricted areas. AC transmission lines can induce AC interference in the pipeline. When the AC current flows out from the defects of the pipeline's coating, AC corrosion will be caused. The safe distances between AC transmission lines and pipelines should be clearly defined for keeping them away from each other at the routing stage, and possible interference on the pipeline will be avoided. In this paper, safety indicators for AC corrosion were first identified, then numerical simulation was used to establish the buried pipeline's AC interference model. The safe distances in typical conditions were calculated. These include soil resistivity, pipeline coating, voltage level of HVAC transmission line, three-phase imbalance and pipeline diameter. The results indicated that the higher the voltage of the transmission line, the greater the safety distance required. For high-voltage AC transmission lines with voltage less than 220 kV and phase current less than 1000 A, when the distance between the pipelines and the high voltage transmission line was greater than 868 m, the AC corrosion risk of the pipelines could be ignored. The longer the parallel length was, the greater the safety distance required. When the parallel length was greater than 40 km, the safety distance did not change much. Soil resistivity and pipeline coating had obvious effects on the safety distance. The lower the resistivity of the soil, the greater the safety distance required, and therefore greater safety distance was required when the pipeline was in farmland or saline soil. The better the coating of the pipeline, the greater the safety distance was required, so a greater safety distance was needed for 3PE coated pipeline. Three-phase imbalance current had little effect on the safe distances, which indicated that the main source of AC interference for pipelines near safety distance was the position difference between phase lines, rather than the current imbalance. The pipeline diameter also had little effect on the safety distance. It was due to the longitudinal impedance of the pipeline being much lower than the leakage impedance, it had little effect on the longitudinal electric field. And on this basis, a safety distances map and evaluation method were established. Then, this method was applied to the AC interference assessment of a real pipeline, and the results showed that the interference risk of a pipeline can be estimated well from the safety distance. The results of this study provide a method and reference for dealing with pipelines and high voltage transmission lines in "Rights-of-Way".

Keywords safe distances; AC interference; electromagnetic induction; AC transmission line; pipeline

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.04.045

0 引言

随着我国经济的高速发展,能源输送网络不断建设完善,在许多地区由于地理位置限制使得高压输电线路和油气管道形成“公共走廊”。在“公共走廊”里面,输电线路与埋地管道长距离交叉并行,此时交流输电系统可通过电感耦合、电阻耦合以及电容耦合的方式对埋地管道产生交流干扰。其中电容耦合主要是对于未埋入地下的管道,由于电容效应在管道上产生电干扰,其干扰能量较低。电阻耦合主要是指输电线路发生故障或者雷击时,大量电流通过杆塔接地进入大地对附近的管道产生瞬时的高压干扰,其特点是干扰时间短、瞬时电压高,主要危害是大电流的热效应和高电压的“介电击穿”导致管道防腐层击穿、管壁金属熔化以及管道沿线附属设备损坏。电感耦合是指输电线路通过法拉第电磁感应在金属管道上产生交流干扰^[1-2]。交流干扰产生的交流电流通过金属/土壤界面时,会加速钢质管道管壁发生的腐蚀(一般称为交流腐蚀),威胁管道运行安全^[3-7]。此外,电感耦合效

应还会在管道上产生持续稳定的交流干扰电压,对接触管道的人员造成安全危害。对于管道的交流干扰的防护可采取梯度控制线、集中排流、屏蔽线、绝缘接头等,但是对于新建的管道或者高压交流输电线路,采用空间上的远离,提前规划路线使得管道与高压交流输电线路保持一定的间隔距离可以有效地降低埋地管道的交流干扰水平以及后期消减维护费用。因此,输电线路与管道间隔多远时既能保证交流干扰风险可以忽略同时又能保证“公共走廊”的范围尽量小(“安全距离”)是电力和管道工作人员最关心的问题。国内外相关学者也对此进行了研究,如:赵晋云等人^[8]调研汇总了电力行业相关标准和油气管道相关标准后发现,各类标准中关于埋地管道与交流接地体间的最小距离从几米到几十米不等,但是国内外各行业标准并不一致,实际应用中容易产生矛盾。另外,有些标准主要针对交流接地体,即主要考虑电阻耦合的情况,而对于电感耦合的干扰问题考虑不足。杨超等人^[9]利用公式计算了埋地管道与高压输电线路的安全距离,但是其研究以4V的干扰电压作为安全的判断标准,

并未采用目前国内外认可度比较高的交流电流密度限值。Wang等人研究了不同土壤环境中的最小安全距离,并提出了最小安全距离的确定方法。但是,其研究主要针对国外输电线路,而且安全距离的确定主要依靠相关软件实现^[10]。此外,我国标准GB/T 50698-2011^[11]参考英国标准CEN/TS 15280:2006^[12]提出管道与高压交流输电线路、交流电气化铁路的间隔距离大于1000 m时,不需要进行干扰调查测试。但是,这些标准中对于安全距离的规定过于简单,对于影响交流腐蚀的重要参数缺乏考虑,实际工程中诸如管道属性、土壤情况、输电线路等级等都会对安全距离产生影响,这使得在应用时会放大管道与输电线路间距,产生不必要的路由浪费。此外,目前对于交流腐蚀的评价指标主要采用电流密度,而管道交流干扰电流密度的大小与土壤电阻率、管道防腐层情况等参数息息相关,不同工况条件下安全距离如何确定缺乏系统研究。

本文利用数值模拟技术计算研究了土壤电阻率、防腐层、输电线路等级、输电系统不平衡度以及管径对安全距离的影响。并提出并确定了输电线路对管道电磁干扰的极限并行距离,简化了长距离并行工况下的安全距离的确定(“公共走廊”)。明确了进行输电线路对埋地管道电磁干扰分析过程中重要参数,建立了输电线路与管道安全距离更加快捷准确的评价方法,为埋地管道和高压交流输电线路选线及相互避让提供参考和借鉴。

1 交流腐蚀安全限值

对于交流干扰的评价指标,国内外专家和学者开展了一些研究工作。Kim等人^[13-14]的实验显示当阴极

保护电位为 $-1100 \text{ mV}_{\text{CES}}$ (相对于饱和硫酸铜参比电极的电位),交流电流密度降至 20 A/m^2 以下时,交流腐蚀问题可以忽略。Fu等人^[15]认为当交流电流密度小于 20 A/m^2 ,阴极保护电位 $-950 \text{ mV}_{\text{CSE}}$ 可以有效地保护管道免于腐蚀。唐德志等人^[16]的试验结果表明当阴极保护电位达到 $-0.97 \text{ V}_{\text{SCE}}$,交流电流密度小于 50 A/m^2 时,碳钢的腐蚀速率低于 0.01 mm/y 。虽然对于交流干扰的具体评价限值有所不同,但是大部分学者通过腐蚀试验认为交流电流密度是交流腐蚀的主要衡量指标^[17-26]。

本文参考目前国际上比较认可的NACE SP214-2018^[27]标准中的说明:当直流电流密度大于 1 A/m^2 时,交流电流密度应小于 30 A/m^2 。当直流电流密度小于 1 A/m^2 时,交流电流密度应小于 100 A/m^2 。同时,考虑比较严苛的情况,选取交流电流密度小于 30 A/m^2 为交流腐蚀的安全限值。

2 计算模型的建立

2.1 计算方法

国内外学者对于交流输电线路对埋地钢质管道交流干扰的计算方法做了大量研究^[28-32],主要的求解方法有两种:

(1)建立等效电路根据经典公式进行求解。管道上的 dx 长度上的等效电路图如图1所示,对微单元运用基尔霍夫电压定律可以建立式(1),经过变换得到式(2)。

$$E dx = -U + I(Z' dx) + (U + dU) \quad (1)$$

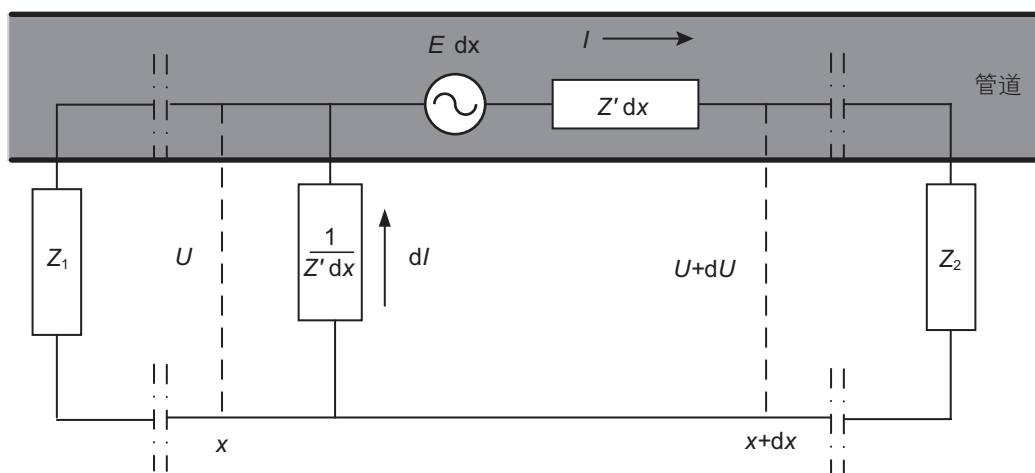


图1 管道微单元等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of pipeline microelement

$$E - IZ' = \frac{dU}{dx} \quad (2)$$

式中 E 为纵向电场强度, V/m; I 为纵向电流, A; Z' 为管道的纵向阻抗, Ω/m ; U 电位, V; x 为微单元的位置, m。

根据电流泄漏位置可以建立式(3), 变换得到式(4)。

$$dI \left(\frac{1}{Y' dx} \right) = -U \quad (3)$$

$$\frac{dI}{dx} = -Y' U \quad (4)$$

式中 Y' 为管道的泄漏电导, S/m。

将式(2)两边对 x 微分, 并将式(4)带入其中, 得到式(5)。根据两端关系作为边界条件, 通过求解式(5)得到管道沿线交流电压分布^[30]。

$$\frac{d^2U}{(dx)^2} = Z' Y' U \quad (5)$$

(2)数值模拟方法求解麦克斯韦方程。本文所采用

的数值模拟软件, 基于矩量法 (MoM) 进行求解。其主要过程为: 首先, 通过建立一系列的基函数, 将麦克斯韦的算子方程化为基函数的线性组合。然后, 建立一组线性无关的权函数, 将权函数与代数方程取内积进行 N 次抽样检验, 利用算子的线性和内积的性质, 将 N 次抽样检验的内积方程化为矩阵方程。最后, 对所形成的矩阵求逆, 得到原始方程的数值解^[31]。

2.2 模型参数

选择常见的 33 kV、110 kV 以及 220 kV 高压交流输电线路进行建模计算。这 3 种输电线路的相线及屏蔽线的典型几何分布 (杆塔结构), 如图 2 所示。3 种等级的高压输电线路的典型负载情况: (1)33 kV 输电线路, 单相电流 300 A; (2)110 kV 输电线路, 单相电流 600 A; (3)220 kV 输电线路, 单相电流 1000 A。模拟计算管道为钢质埋地管道, 埋深 1.5 m。

高压交流输电线路与埋地管道的位置关系如图 3 所示。高压输电线路与埋地管道并行, 在并行段起始

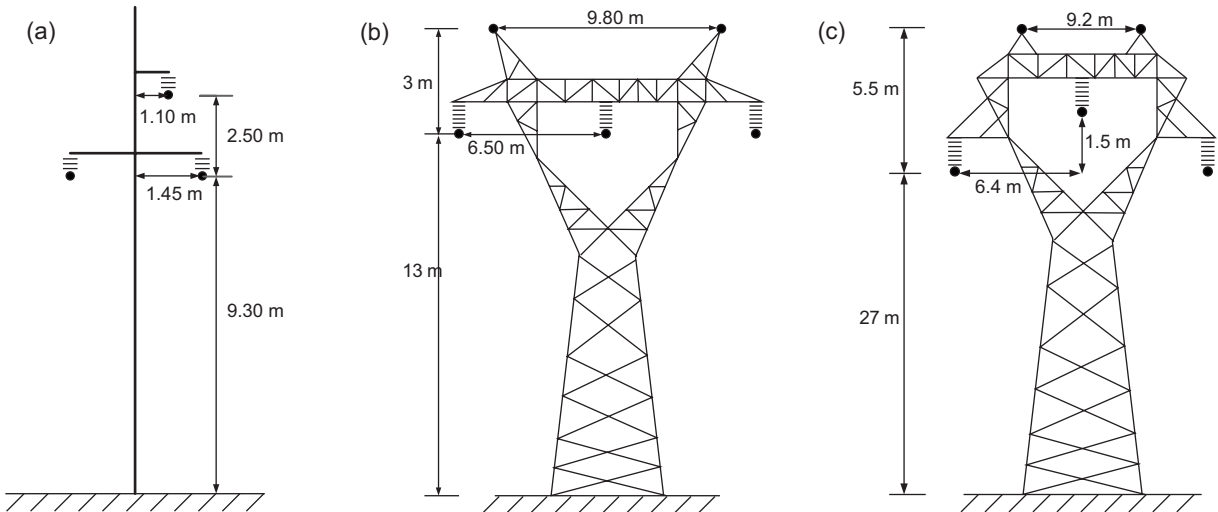


图 2 高压交流输电线路杆塔结构示意图: (a)33 kV; (b)110 kV; (c)220 kV。

Fig. 2 Schematic diagram of HVAC transmission line towers: (a)33 kV; (b)110 kV; (c) 220 kV

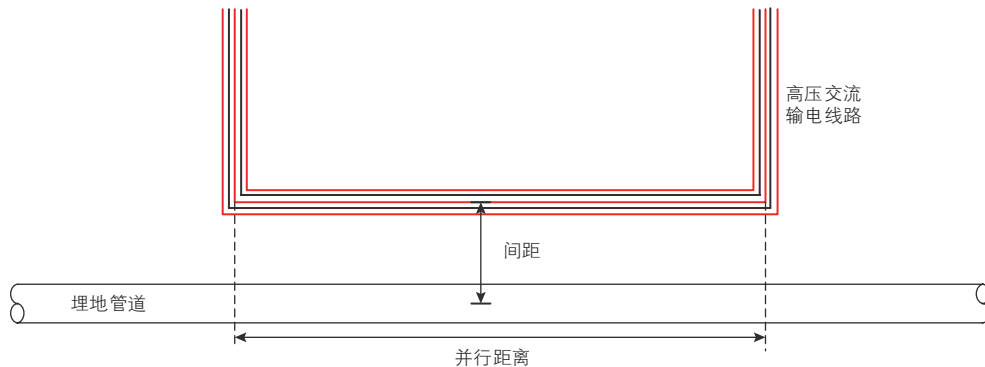


图 3 高压交流输电线路与埋地管道的位置关系示意图

Fig. 3 The map of HVAC transmission line and buried pipeline

处和结束处高压交流输电线路以 90° 与管道分离。间距为杆塔中心与管道中心的水平距离。计算不同并行长度下, 间距为多少时管道沿线交流电流密度小于 30 A/m^2 , 并以此为安全距离。

基础模型为 3PE 管道, 直径 1016 mm , 壁厚 17.5 mm , 管道电阻率为 $9.78 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$; 输电线路为 220 kV , 单相电流 1000 A , 不平衡度 1% ; 土壤电阻率为 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 。计算单一参数改变情况下的“安全距离”。计算的工况如下:

(1) 土壤电阻率: $5 \sim 5000 \Omega \cdot \text{m}$ 。

(2) 3 种典型的管道防腐层: 石油沥青防腐层, 面电阻率 $10000 \Omega \cdot \text{m}^2$; FBE 防腐层, 面电阻率 $30937 \Omega \cdot \text{m}^2$; 3PE 防腐层, 面电阻率 $100000 \Omega \cdot \text{m}^2$ 。

(3) 输电线路等级: 33 kV (单相电流 300 A), 110 kV (单相电流 600 A), 220 kV (单相电流 1000 A)。

(4) 输电线路 3 相不平衡度: $1\% \sim 4\%$ 。

(5) 管道直径: 219 mm 、 500 mm 、 1016 mm 。

3 计算结果与讨论

3.1 不同土壤电阻率时的安全距离

计算不同土壤电阻率时埋地管道与交流输电线路之间的安全距离如图 4 所示。由于埋地管道与高压交流输电线路并行距离越长, 间距越小电磁感应越明显, 因此交流干扰越高。因此, 图 4 中不同电阻率曲线右下方区域是安全的, 而在曲线左上方区域交流腐蚀风险比较高。

由图可见土壤电阻率对安全距离影响很大, 土壤电阻率越低所需要的安全距离越大, 如: 在沿海地区等低土壤电阻地区需要更远的安全距离, 控制管道的

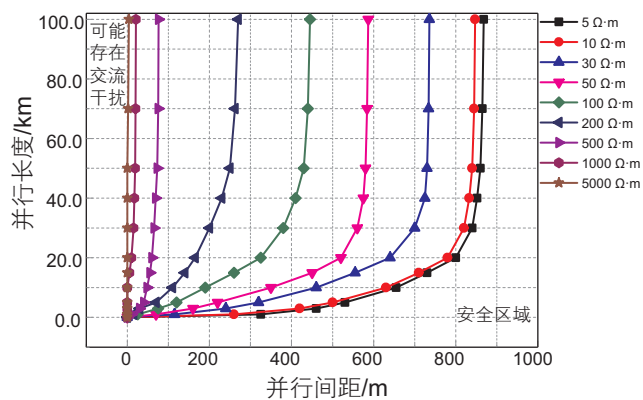


图 4 不同土壤中的安全距离计算结果

Fig. 4 Safe distances in various soil resistivities

交流腐蚀风险。土壤电阻的降低有两方面影响: 一是管道泄漏电阻降低, 管道漏失电流增加, 导致管道干扰电压降低; 二是土壤电阻率降低导致交流电流密度上升。即公式 1 中 V 降低, ρ 也降低。而它们的作用之和形成了最终影响。但是, 对于油气管道, 大多外部涂覆了绝缘防腐层, 其绝缘电阻率相对于土壤高很多, 因此土壤电阻率降低对泄漏阻抗的影响比较小, 即对干扰电压影响较小。因此, 合作用下表现为随着土壤电阻率的降低, 干扰电流密度增加, 安全距离增加。在计算的土壤电阻率范围内, 埋地管道与高压交流输电线路间距大于 868 m 时, 管道一定处于安全区间。

当并行距离大于 40 km 时, 安全距离变化不大。这是由于虽然随着并行长度的增加纵向电场不断累积, 但是管道的泄漏阻抗也在不断减小, 纵向阻抗不断增加。使得达到一定长度后, 管道干扰随着并行长度的增加变化不大。因此, 安全距离也变化不大。

定义该安全距离为并行极限长度时的安全距离, 不同土壤中并行极限长度时的安全距离如图 5 所示。对典型土壤中不同并行典型长度的安全距离进行分析。在农田土中(典型值 $50 \Omega \cdot \text{m}$), 并行长度小于 1 km 时, 安全距离 70 m ; 并行长度小于 10 km , 安全距离约为 350 m ; 并行长度小于 20 km , 安全距离约为 520 m ; 并行极限长度时, 安全距离约为 600 m 。在沙土(典型值 $1000 \Omega \cdot \text{m}$)中, 并行长度小于 10 km 时, 高压交流输电线路对管道的电感耦合干扰比较小; 当并行极限长度时, 可选择 25 m 为安全距离。

在实际工程中, 对于新建管道采用高电阻率的回填土增加管道附近的土壤电阻率可以降低管道防腐层

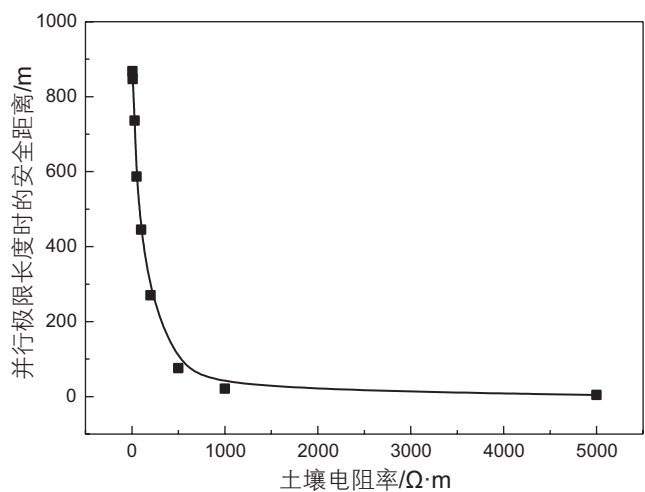


图 5 不同土壤中并行极限长度时的安全距离

Fig. 5 The safe distances of the limit parallel length in different soils

破损点的交流电流，减小交流腐蚀风险。但是，需要考虑高电阻土壤容易结固，使得土壤与管道防腐层破损点不良接触，导致正常的阴极保护无法奏效，而存在自然腐蚀问题。

3.2 不同防腐层管道的安全距离

计算不同防腐层管道与高压交流输电线路之间的安全距离如图 6 所示。由图可见，随着防腐层质量的提高，安全距离增加，即采用电阻率较高的防腐层增加了管道的交流腐蚀风险，需要更远的安全距离。这是由于较好的防腐层，其泄漏阻抗较小，输电线路在管道上产生的纵向电场更容易累积，形成较高的干扰电压。3PE防腐层并行极限长度时的安全距离为 587 m，FBE防腐层并行极限长度时的安全距离为 327 m，石油沥青防腐层并行极限长度时的安全距离 167 m。

由此可见，埋地钢质管道采用较好绝缘性能较好的防腐层虽然能够降低管道的阴极保护电流需求，减少管体由于施工或第三方破坏产生的防腐层破损情况。但是，对于电感耦合的交流干扰来说，却增加了管道交流腐蚀风险。可以想象，如果管道防腐层完好无损，即使有很高的干扰电压，没有电流密度从破损点流出，也就没有腐蚀风险。但是，实际工程中由于埋地钢质管道直径大、自重大、距离长，施工过程中难免有防腐层破损。此外，两端预制防腐层管道连接处补口无法完全保证绝缘。使得现阶段在役管道均存在不同程度的防腐层破损。因此，对于管道受交流干扰区域，是否要进行防腐层修复变成了难题。如果无法探明所有缺陷，修复部分缺陷会增加其他缺陷的腐蚀风险。笔者认为，交流干扰的防护需要以排流为主，对于缺

陷修复应选择缺陷腐蚀深度深的、面积大的、处于高后果区进行修复补强，而对于其他缺陷可不作处理并定期进行评估。

3.3 不同高压交流输电线路等级的安全距离

计算不同高压交流输电线路等级与埋地管道之间的安全距离如图 7 所示。由图可见，随着高压交流输电线路等级的提高，安全距离增加。33 kV输电线路的并行极限长度时的安全距离为 548 m。110 kV输电线路的并行极限长度时的安全距离为 566 m。220 kV输电线路的并行极限长度时的安全距离为 587 m。当并行长度大于 40 km时，不同等级的输电线路的安全距离差别不大(差别小于 10%)。但是，当并行长度较短时，差别比较明显，如：并行长度小于 10 km时，33 kV，110 kV以及 220 kV的安全距离分别为 190 m，250 m和 350 m。这是由于管道上的交流干扰是由输电线路的 ABC 三相共同的电磁感应产生的。ABC 三相相角相差 120°，完全对称的情况下其磁场相互抵消。但是，由于在杆塔上与管道距离不一致，因此产生了交流干扰。当并行距离较短时，ABC 三相位置不对称影响明显，同时又由于三相的电流存在很大区别，因此安全距离差别很大。而当并行距离较长时，ABC 三相位置不对称影响减弱，导致安全距离差别较小。

3.4 输电系统不平衡度对安全距离的影响

计算输电线路不平衡度对安全距离的影响，结果如图 8 所示。由图可见，随着不平衡度的增加，管道与输电线路之间的安全距离在略微增加，但其影响较小。

对于三相输电系统，A、B、C 三相产生的磁场相

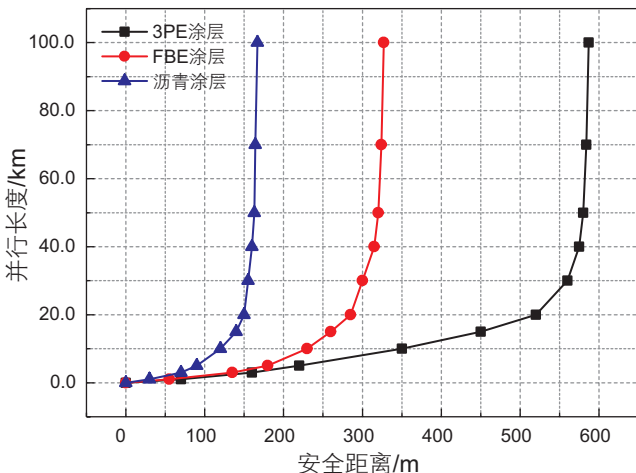


图 6 不同防腐层管道的安全距离计算结果
Fig. 6 Safe distances for the pipeline with various coatings

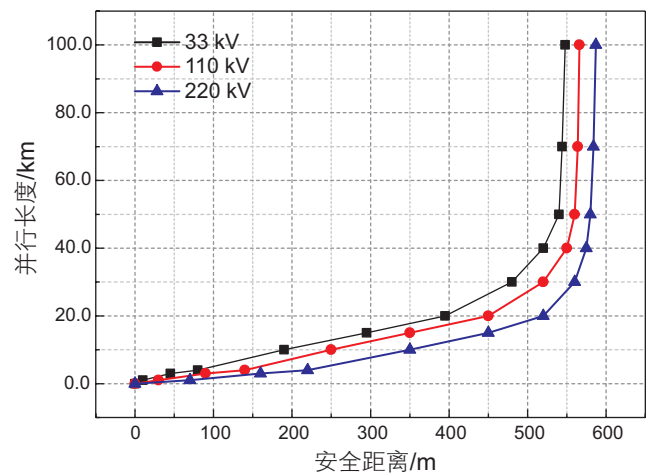


图 7 不同高压交流输电线路等级的安全距离计算结果
Fig. 7 Safe distances for various HVDC transmission lines

差 120° ，因此相互抵消。管道上之所以产生交流干扰主要来源有两部分：一是三相对于管道距离的不同(空间位置不平衡)产生的磁场；二是三相电流不相等(电流不平衡度)产生的磁场。由该部分计算结果可见，电流不平衡度不同时对安全距离影响较小，即在本文计算的工况下，埋地管道安全距离的主要受到输电系统相线几何位置的影响，而负载电流不平衡影响相对较小。

3.5 管径对安全距离的影响

计算不同管径管道的安全距离如图9所示。由此可见，随着管径的减小管道与输电线路之间的安全距离略有增加，但变化很小，即管道的管径对安全距离不大。这是由于管道的纵向阻抗相比于泄漏阻抗来说

要低很多，也就导致其对纵向电场的累积效果影响不大，因此对安全距离影响较小。

需要注意的是，本文虽然计算了多种实际工况下输电线路对埋地管道交流干扰的安全距离。但是，实际工程中的参数更加复杂多变，本文研究成果可用于粗略判断管道可能的腐蚀风险情况，如：同塔多回线路、负载电流变化等。在实际工程中应用可通过相对关系大概判断其安全距离边界，例如：对于同塔双回线路，如果两回采用ABC/CBA的逆相序排布，两回路的电磁场相互抵消，因此安全距离应该小于单回的安全距离。而如果两回采用ABC/ABC的同相序排布，电磁场相互叠加，所需要的安全距离更大。而对于负载电流变化的情况，相关研究表明负载电流与管道干扰电压呈正比关系^[9,27]，根据公式1可以将电流变化换算为土壤电阻率的变化，再根据安全距离图获得实际的安全距离。

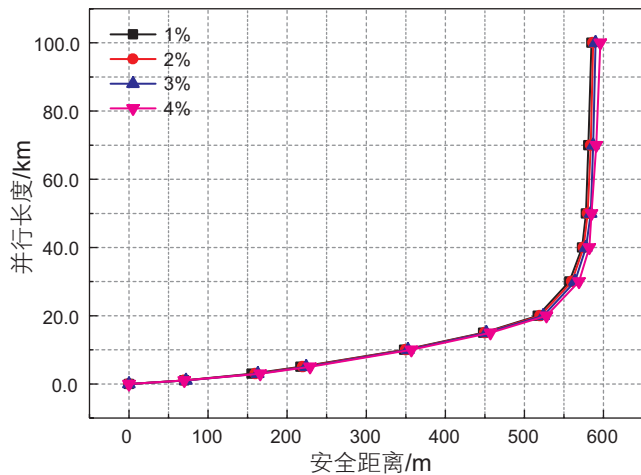


图8 高压交流输电线路不平衡度对安全距离影响的计算结果
Fig. 8 Safe distances for HVDC transmission lines with various unbalances

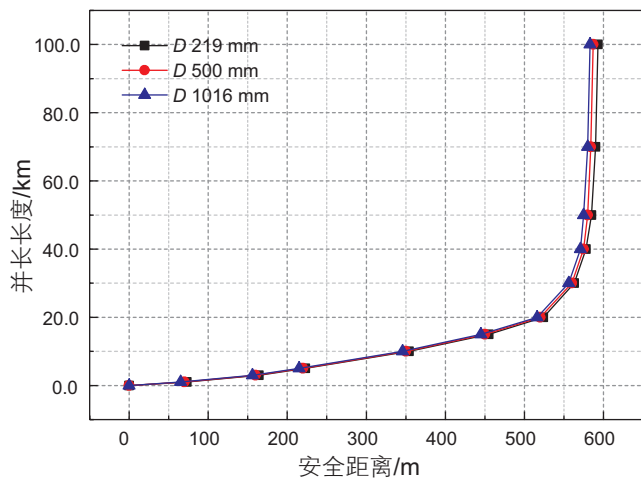


图9 管径对安全距离影响的计算结果
Fig. 9 Safe distances for various diameters of pipelines

4 现场应用及验证

为了验证所得方法的准确性，对我国中西部某管道的干扰情况进行了应用和现场测试验证。中西部某管道直径 1016 mm，壁厚 17.5 mm，防腐层为 3PE。某输电线路处于“公共走廊”与管道存在 2 处长距离并行，其中第一处并行长度约 8 km(图 10)，第二处并行长度约 20 km(图 11)。现场测得这两处位置土壤电阻率均为 $80 \Omega \cdot \text{m}$ 。输电线路电压等级为 220 kV，其工作的相电流为 850 A。利用安全距离对这两个区段的交流腐蚀风险进行分析，具体如下：

第 1 步：由于两处并行长度分别为 8 km 和 20 km，均未达到 40 km。因此，没有达到并行极限长度，需要结合并行长度进行分析。

第 2 步：由于实际工程中的土壤电阻率以及输电线路负载电流与计算所用参数并不相同，因此需要进行转换。负载电流与管道的干扰电压呈正比，而土壤电阻率与电流密度呈反比。因此，可将电流的变化和土壤电阻率的变化转化为土壤电阻率单一参数的变化(式 6)。本案例中实际电流为 850 A，实际土壤电阻率为 $80 \Omega \cdot \text{m}$ 。转换后为电流 1000 A，土壤电阻率 $94 \Omega \cdot \text{m}$ 。

$$\rho = \frac{\rho_0 I}{I_0} \quad (6)$$

式中 ρ 为转换后的土壤电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ； ρ_0 为实际的土壤电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ； I 为转换后的电流，A； I_0 为实

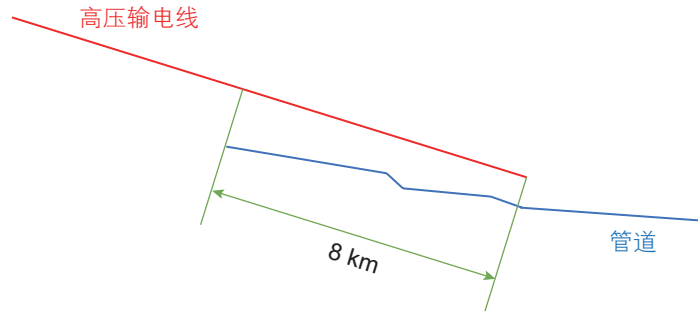


图 10 中西部某管道与 220 kV 输电线路第一处长距离并行
Fig. 10 First parallel section between pipeline and 220 kV transmission line

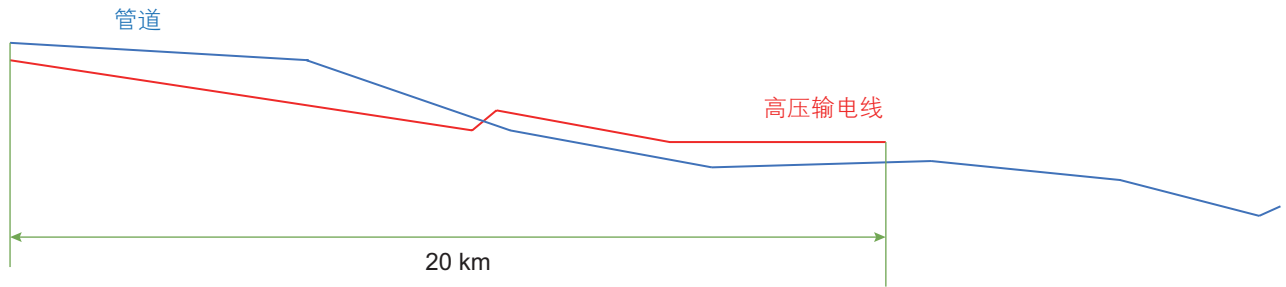


图 11 中西部某管道与 220 kV 输电线路第二处长距离并行
Fig. 11 Second parallel section between pipeline and 220 kV transmission line

际的电流，A。

第 3 步：根据 2 处并行长度 8 km 和 20 km 结合图 4，可知并行长度为 8 km 时， $50 \Omega \cdot m$ 土壤电阻率中的安全距离为 340 m， $100 \Omega \cdot m$ 土壤中的安全距离为 180 m，利用线性差值的方法得到 $94 \Omega \cdot m$ 土壤电阻率环境中的安全距离为 199 m。同理，并行长度为 20 km 时， $50 \Omega \cdot m$ 土壤电阻率中的安全距离为 520 m， $100 \Omega \cdot m$ 土壤中的安全距离为 325 m，利用线性差值的方法得到 $94 \Omega \cdot m$ 土壤电阻率环境中的安全距离为 348 m。

第 4 步：第 1 处并行段管道与输电线路最小间距为 470 m，大于 199 m 的安全间距，因此管道处于安全状态不需要进行防护。第 2 处并行段管道与输电线路并行然后交叉，接着又并行，间距最大为 309 m，小于 348 m 的安全距离。因此，可能存在交流腐蚀风险。

对本案例分别进行数值模拟技术计算和现场检测，结果如图 12–13 所示。由图可见，第 1 处长距离并行段最大交流电流密度 7.6 A/m^2 ，小于 30 A/m^2 的限值，交流腐蚀风险可以忽略。而第 2 处长距离并行段最大

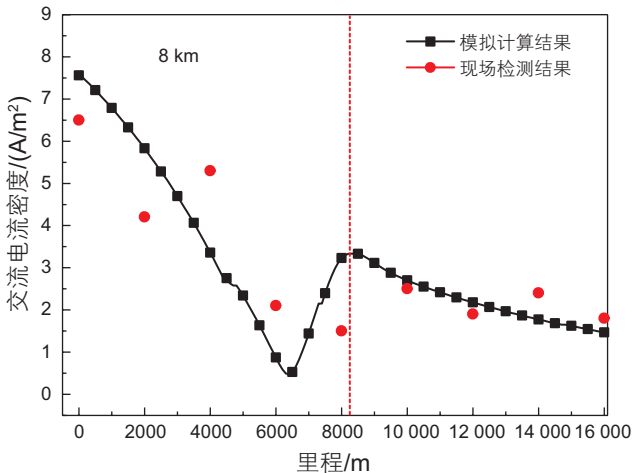


图 12 第一处长距离并行管道干扰电流密度
Fig. 12 AC current density of pipeline in first parallel section

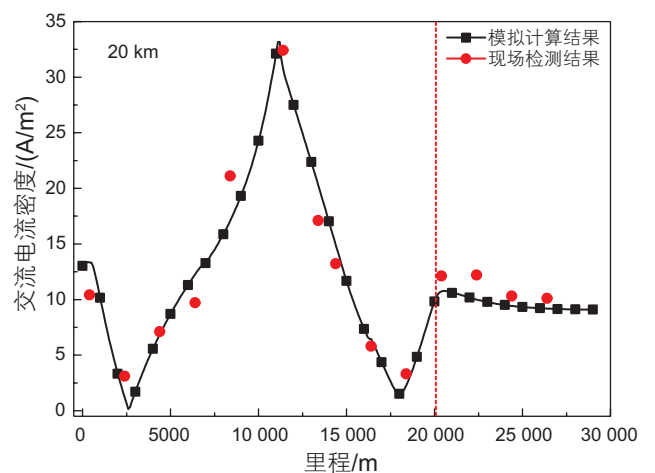


图 13 第二处长距离并行管道干扰电流密度
Fig. 13 AC current density of pipeline in second parallel section

交流电流密度为 33.2 A/m^2 , 大于 30 A/m^2 的限值, 交流腐蚀风险不能忽略。现场检测结果也得到与模拟计算结果相同的结论。由此可见, 采用本文所提出的安全距离与实际相符合。

5 结论

围绕高压交流输电系统对埋地管道电磁感应产生的交流干扰问题, 利用数值模拟技术计算研究了不同工况下高压交流输电系统与埋地管道的安全距离, 得出如下结论:

(1) 对于 220 kV 及以下高压交流输电线路(单相电流小于 1000 A), 当埋地管道与其间距大于 868 m 时, 管道所受交流腐蚀风险可以忽略。

(2) 土壤电阻率越低需要的安全距离越大。在农田土中($50 \Omega \cdot \text{m}$), 并行距离大于 20 km 的情况, 可以以 600 m 作为安全距离。在沙土($1000 \Omega \cdot \text{m}$)中, 并行长

度小于 10 km 时, 高压交流输电线路对管道的电感耦合干扰比较小, 可不考虑电感耦合干扰问题。当并行长度比较长时, 可选择 25 m 为安全距离。

(3) 随着管道防腐层质量的提高安全距离增加。在农田土中, 220 kV 及以下输电线路与 3PE 防腐层管道并行极限长度时的安全距离为 587 m; 与 FBE 防腐层管道并行极限长度时的安全距离为 327 m; 与石油沥青防腐层管道并行极限长度时的安全距离为 167 m。

(4) 随着高压交流输电线路等级的提高安全距离增加。当并行长度大于 40 km 时, 不同等级的输电线路的安全距离差别不大。但是, 当并行长度较短时, 差别比较明显。

(5) 输电线路不平衡度和管道管径对安全距离的影响比较小, 分析确定安全距离时可忽略其影响。

(6) 将安全距离评价方法应用于某实际管道的交流干扰分析, 结果显示根据安全距离可以很好地判断管道的干扰风险。

参考文献

- [1] 藤延平, 祖宏波, 董士杰, 等. 管道交流杂散电流干扰技术研究现状与发展趋势[J]. 管道技术与设备, 2012, 2: 3-5. [TENG Y P, ZU H B, DONG S J, et al. The current situation and trend of research on AC stray current interference[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2012, 2: 3-5. (in Chinese)]
- [2] ZHU M, ZHANG Q, YUAN Y F, et al. Study on the correlation between passive film and AC corrosion behavior of 2507 super duplex stainless steel in simulated marine environment[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2020, 864: 1-14.
- [3] ZHANG S X, LI Z L, YANG C, et al. The AC corrosion mechanisms and models: A review[J]. Corrosion, 2020, 76(2): 188-201.
- [4] LUCCA G. AC interference from a faulty power line on nearby buried pipelines: influence of the surface layer soil[J]. Iet Science Measurement & Technology, 2020, 14(2): 225-232.
- [5] BUCHLER M. On the mechanism of cathodic protection and its implications on criteria including AC and DC interference conditions[J]. Corrosion, 2020, 76(5): 451-463.
- [6] WEI B X, QIN Q Y, BAI Y L. Short-period corrosion of X80 pipeline steel induced by AC current in acidic red soil[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105: 156-175.
- [7] MORAN A, LILLARD R S. AC corrosion evaluation of cathodically protected pipeline steel[J]. Corrosion, 2019, 75(2): 144-146.
- [8] 赵晋云, 潘红丽, 高强, 等. 油气管道与高压输电线路距离的相关标准[J]. 油气储运, 2013, 32(1): 82-84. [ZHAO J Y, PAN H L, GAO Q, et al. Relevant standards for distance from oil and gas pipeline to high-voltage power line[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(1): 82-84. (in Chinese)]
- [9] 杨超, 李自力, 崔淦等. 埋地管道与高压交流输电线之间的安全距离[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(1): 56-59. [YANG C, LI Z L, CUI G. Safe distance between buried pipelines and high voltage AC transmission line[J]. Corrosion and Protection, 2016, 37(1): 56-59. (in Chinese)]
- [10] WANG C, LIANG X, RADONS R. Minimum separation distance between transmission lines and underground pipelines for inductive interference mitigation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1299-1309.
- [11] GB/T 50698-2011, 埋地钢质管道交流干扰防护技术标准[S]. [GB/T 50698-2011, Standard for AC interference mitigation of buried steel pipelines[S]. (in Chinese)]
- [12] DD CEN/TS 15280-2006, Evaluation of a. c. corrosion likelihood of buried pipelines- Application to cathodically protected pipelines[S].
- [13] KIM D K, MURALIDHARAN S, HA T H, et al. Electrochemical studies on the alternating current corrosion of mild steel under cathodic condition in marine environments[J]. Electrochimica Acta, 2006, 51(25): 5259-5267.
- [14] KIM K D, HA T H. Alternating current induced corrosion[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2004, 39(2): 117-123.

- [15] FU A Q, CHENG Y F. Corrosion of pipeline steel in the presence of alternating current and the new CP recommendation[C]. 8th International Pipeline Conference. 2010: paper No.64380.
- [16] TANG D, DU Y, LU M, et al. Study on CP criteria for mild steel in the presence of AC interference[C]. The 69th NACE Annual Conference, 2014: paper No.3802.
- [17] HOSOKAWA Y, KAJIYAMA F. New CP maintenance concept for buried steel pipelines— current density— based CP criteria, and on-line surveillance system for CP rectifiers[C]. The 59th NACE Annual Conference, 2004: paper No.04047.
- [18] HOSOKAWA Y, KAJIYAMA F. Case studies on the assessment of AC and DC interference using steel coupons with respect to current density CP criteria[C]. The 61st NACE Annual Conference. Houston: NACE, 2006: paper No.06161.
- [19] MARTIN B. A history of stray current corrosion[J]. Corrosion & Materials, 2006, 31(3): 12–14.
- [20] HAYDEN J L R. Alternating-current electrolysis[J]. American Institute of Electrical Engineers, 1907, 26(1): 201–229.
- [21] MCCOLLUM B, AHLBORN G H. The influence of frequency of alternating or infrequently reversed current on electrolytic corrosion[J]. Institute of Electrical Engineers, 1916, 35(1): 301–345.
- [22] HEWES F. Four phenomena affecting cathodic protection and corrosion rates[J]. Material Protection, 1969, 8(9): 67–71.
- [23] HAMLIN A W. Some effects of alternating current on pipeline operation. Materials Performance, 1980, 19(1): 18–27.
- [24] HEIM G, PEEZ G. The influence of alternating currents on buried cathodically protected high pressure natural gas pipeline[J]. Gas-Erd-gas, 1992, 133(3): 137–143.
- [25] PRINZ W. AC induced corrosion on cathodically protected pipelines[J]. UK Corrosion 92, 1992, 1.
- [26] PAGANO M A, LALVANI S B. Corrosion of mild steel subjected to alternating voltages in seawater[J]. Corrosion Science, 1994, 36(1): 127–140.
- [27] NACE SP21424–2018. Alternating Current Corrosion on Cathodically Protected Pipelines: Risk Assessment, Mitigation, and Monitoring[S].
- [28] 贝克曼 W V, 施文克 W, 普林兹 W. 阴极保护手册: 电化学保护的理论与实践[M]. 化学工业出版社, 2005. [BAECKMANN W V, SCHWENK W, PRINZ W. Handbook of cathodic protection: theory and practice of electrochemical protection[M]. Chemical Industry Press, 2005.(in Chinese)]
- [29] 哈林顿. 计算电磁场的矩量法[M]. 国防工业出版社, 1981. (HARRINGTON. Field computation by moment method[M]. National Defence Industry Press, 1981. (in Chinese))
- [30] 蒋俊. 交流线路正常运行时对平行敷设油气管道的电磁影响[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 78–80+92. [JIANG J. Electromagnetic influence of normally operating AC power transmission line on Gas/Oil pipeline parallel to transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 78–80+92. (in Chinese)]
- [31] 李本良, 葛小宁, 李燕雷等. 计算 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流输电线路对埋地油气管线磁感应影响的快速二阶差分方法[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3305–3310. [LI B L, GE X N, LI Y L, et al. A fast second-order difference method for calculating magnetic inductive influence of $\pm 1100\text{ kV}$ HVDC transmission line on buried oil/gas pipeline[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3305–3310. (in Chinese)]
- [32] 蒋俊, 郭剑, 陆家榆. 交流输电线路单相接地故障对输油输气管道的电磁影响与线路参数的关系[J]. 电网技术, 2010, 34(06): 10–13. [JIANG J, GUO J, LU J Y. Relation between transmission line parameters and electromagnetic impact on petroleum/gas pipelines due to single-phase earth fault in AC transmission line[J]. Power System Technology, 2010, 34(06): 10–13. (in Chinese)]

(责任编辑 王雨墨 编辑 马桂霞)