

引文: 朱文卫, 许成昊, 王兴华, 等. 高压交流输电线路与并行埋地管道安全距离计算模型[J]. 油气储运, 2024, 43(7): 778-786.

ZHU Wenwei, XU Chenghao, WANG Xinghua, et al. Computational model of safe distance between HVAC transmission line and parallel buried pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(7): 778-786.

高压交流输电线路与并行埋地管道安全距离计算模型

朱文卫 许成昊 王兴华 梁爱武

广东电网有限责任公司

摘要:【目的】中国经济的蓬勃发展加快了公共能源走廊的形成,由于架空线路与油气管道在工程选址上的趋同性,两者交叉跨越、近距离并行或相互靠近的现象十分普遍,由电磁感应引起的管道交流腐蚀问题日益严重,可能导致油气泄漏与火灾爆炸事故,造成严重的经济损失与人员伤亡。【方法】针对这一问题,选取常见的 35 kV、110 kV、220 kV、500 kV 共 4 个电压等级的输电线路为研究对象,利用 CDEGS 数值仿真软件建立电磁干扰模型,采用单一变量法计算不同工况条件下的“管-线”交流干扰,以交流电流密度 30 A/m^2 为判断指标,得到并行区域内高压交流输电线路与埋地管道之间的极限接近距离(安全距离)。【结果】随着“管-线”并行长度增加,安全距离逐渐增大,当并行长度超过 20 000 m 后,安全距离的变化幅度很小;随着土壤电阻率升高,35 kV 输电线路与管道间的安全距离逐渐减小,110 kV 及以上电压等级下的安全距离整体呈先增大后减小的规律;在同一电压等级下,单回塔型电路的安全距离均小于双回塔型电路。【结论】针对实际工程中输电线与管道之间位置关系复杂的情况,通过模型等效的方式进行“化曲为直”,根据管道在路径过程中出现转折点的数目不同提出曲折管道与高压交流输电线等效间距计算方法,并将计算结果与模拟数据进行对比,验证了该模型的有效性。(图 12,表 4,参 20)

关键词: 曲折管道; 交流干扰; 安全限值; 安全距离; 等效模型

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)07-0778-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.07.007

Computational model of safe distance between HVAC transmission line and parallel buried pipeline

ZHU Wenwei, XU Chenghao, WANG Xinghua, LIANG Aiwu

Guangdong Power Grid Corporation

Abstract: 【Objective】The vigorous development of China's economy has stimulated the development of public energy corridors. Owing to the similar preference in choosing sites for overhead power lines and oil-gas pipelines, these two kinds of corridors frequently intersect, run in parallel, or closely approach each other, exacerbating AC corrosion issues in the pipelines attributed to electromagnetic induction. These deficiencies may lead to oil and gas leaks, fires, and explosions, culminating in substantial economic losses and casualties. 【Methods】This study focused on transmission lines featuring typical voltage levels of 35 kV, 110 kV, 220 kV, and 500 kV. CDEGS numerical simulation software was utilized to establish an electromagnetic interference model. A single-variable method was used to calculate AC interference between power lines and oil-gas pipelines across various conditions. The ultimate approach distances (safe distances) between HVAC transmission lines and buried pipelines within the parallel zones were determined based on a judgment index of AC current density set at 30 A/m^2 . 【Results】Safe distances expanded as the parallel lengths of power lines and oil-gas pipelines extended. Minor fluctuations occurred in these distances once parallel lengths exceeded 20 000 m. With increasing soil resistivity, safe distances between 35 kV transmission lines and respective pipelines gradually reduced, while those in scenarios with 110 kV and higher voltage levels generally decreased following an initial increase. In scenarios of the same voltage level, safe distances were shorter in single-circuit tower power line setups compared to double-circuit tower configurations. 【Conclusion】Considering the intricate positional relationships between transmission lines and pipelines in actual applications, this study adopted the model equivalent method to “convert curves into tangents”. It introduced a calculation approach

for determining equivalent spacings between zigzag pipelines and corresponding HVAC transmission lines based on the number of turning points in pipeline routes. The effectiveness of this model was verified through a comparison of the calculation results and simulation data. (12 Figures, 4 Tables, 20 References)

Key words: zigzag pipeline, AC interference, safety limit, safe distance, equivalent model

随着中国经济的快速发展,各行业对能源的需求量迅速增加,高压输电线路与油气管道的建设也进入迅速增长的新时期。受限于可利用国土资源的减少,埋地管道与架空输电线路共用“公共走廊”的情况日趋多见^[1]。架空输电线路对埋地管道产生干扰的形式主要有容性干扰、阻性干扰、感性干扰3种,其中感性干扰发生频率最高,是最能促进管道交流腐蚀的干扰形式^[2]。设置绝缘装置、排流线、屏蔽网对于缓解干扰均有一定效果^[3],但上述事后防护措施所需投入成本较高、施工难度较大。针对即将新建的管道或输电线路,应提前做好路径规划,在有限的可利用国土空间内尽可能减小感应干扰,确定管-线之间的安全间距,制定相应的接近性指导原则^[4]。

针对该问题,国内外学者开展了一定研究工作。姜子涛等^[5]提出对于220 kV及以下的高压交流输电线路(单相电流小于1 000 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,所需安全距离越大,但该研究未考虑线路多回路运行的情况。Christoforidis等^[6]结合有限元计算与标准电路分析,计算了管道的感应电压与电流,但未给出安全距离的具体计算方法。杨超等^[7]以交流干扰4 V为安全限值,利用公式计算得出安全距离,但其并未采用认可度较高的交流电流密度为判断标准。孔朝金等^[8]整理了国内外关于管-线之间安全距离的标准,指出满足标准的长输管道并不意味着不存在交流干扰,应定期监测交流电压。在实际工程中,Wang等^[9]针对马尼托巴水电公司的管道设施,提出一种确定输电线路与地下管道之间最小水平间隔距离的方法,可用于减轻输电线路正常运行时的感应电磁干扰,但其并非针对中国常见电压等级的输电线路。

目前,对于中国常见电压等级不同回路数下安全距离的研究较少,而且上述关于安全距离的研究均基于输电线与管道平行的情况,难以适用于管道曲折多变的现实情况^[10]。针对该问题,利用CDEGS软件进行数值模拟,研究不同土壤电阻率、电压等级及回路数运行下输电线路与管道的安全距离,在此基础上提出

“化曲为直”的思想,将曲折管段等效为平行管段后进行干扰判断。研究成果可为管道部门与电力部门在现有线路的安全评价以及未来新建工程的选址规划提供参考。

1 交流干扰安全限值

目前,国内外学者大多采用交流电流密度 J 评价腐蚀的强弱,其计算公式为:

$$J = \frac{8V}{\rho\pi d} \quad (1)$$

式中: V 为交流干扰电压有效值的平均值,V; ρ 为土壤电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; d 为破损点直径,一般取0.0113 m。

对于交流干扰的评判标准,相较于干扰电压,交流电流密度的认可度更高,但其划分干扰强弱的阈值尚未统一。目前国际上较为认可的NACE SP214-2018《Alternating Current Corrosion on Cathodically Protected Pipelines: Risk Assessment, Mitigation, and Monitoring》规定:当直流电流密度大于1 A/m²时,交流电流密度应小于30 A/m²;当直流电流密度小于1 A/m²时,交流电流密度应小于100 A/m²。考虑较为严苛的工况,选取交流电流密度小于30 A/m²为交流腐蚀的安全限值,此时的管-线之间距离即为安全距离^[11]。

2 数值计算模型

2.1 计算方法

计算感性耦合干扰下的管道电压,需要管道轴线方向的感生场强与管道的特性参数^[12-13],方法如下:

$$|Z'|^2 = R'^2 + (\omega L')^2 \quad (2)$$

$$|Y'|^2 = G'^2 + (\omega C')^2 \quad (3)$$

式中: Z' 为阻抗, Ω/m ; Y' 为导纳,S/m; R' 为电阻负荷, Ω/m ; G' 为漏电负荷,S/m; C' 为通过导入与管道长度有关的电容,S/m; L' 为通过导入与管道长度有关的电感,H; ω 为角频率,rad/s。

应用传输理论^[14-15],为进行粗略估算作出以下假设:管道走向与产生干扰的电力线平行的范围内场强恒定不变;管道参数恒定不变;计算区域内土壤电阻率恒定不变。根据上述理论与假设,建立微分基本管段与临近区域端部闭合电路阻抗的等效电路(图1)^[16]。

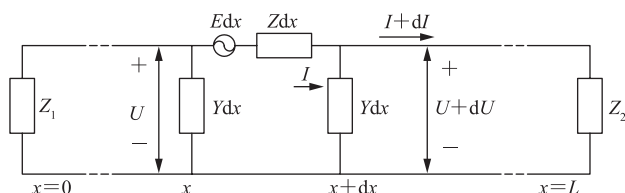


图1 管道微元等效电路图

Fig. 1 Infinitesimal element equivalent circuit diagram of pipeline

由此,可以得出:

$$E dx = -U + I(Z' dx) + (U + dU) = I Z' dx + dU \quad (4)$$

$$dI \left(\frac{1}{Y' dx} \right) = -U \quad (5)$$

式中: E 为感生电压,V; I 为感生电流,A; U 为管道电位,V; x 为位置坐标,m。

当 E 恒定不变时,可得:

$$\frac{d^2 U}{(dx)^2} = Z' Y' U \quad (6)$$

当 $E=0$ 、 $Z'=R'$ 、 $Y'=G'$ 时,解得管道沿线感应电压与感应电流:

$$U = -Z \left[A \exp \left(\sqrt{Z' Y' x} \right) - B \exp \left(-\sqrt{Z' Y' x} \right) \right] \quad (7)$$

$$I = A \exp \left(\sqrt{Z' Y' x} \right) + B \exp \left(-\sqrt{Z' Y' x} \right) + \frac{E}{Z'} \quad (8)$$

式中: A 、 B 为待定系数。

CDEGS软件的编写基础是各项电磁理论^[17-18],不受限于频率的约束,基本算法是矩量法,将研究导体进行微元化,再通过麦克斯韦方程组求解得到所需要的感应电压与电流,所得结果精确可靠。

2.2 模型参数

选择中国常见的35 kV、110 kV、220 kV、500 kV共4个电压等级的高压交流输电线路为研究对象,分别建立单、双回路情况下的典型杆塔模型,即单、双回路塔模型(图2~图5)。单回路塔中,35 kV为“上”字形塔,导线呈不对称三角形布置;110 kV为猫头塔,三相导线呈等腰三角排列,中相导线抬高,导致铁塔的负荷增加,铁塔质量较水平排列有所增加;220 kV与500 kV为酒杯塔,三相导线水平排列,横担长度大于

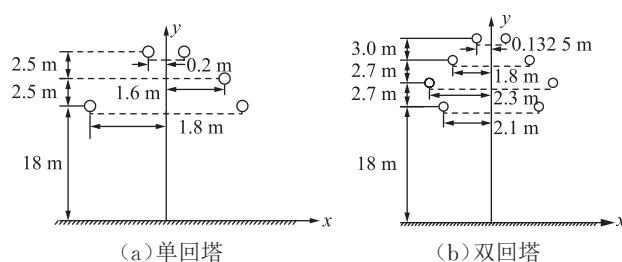


图2 35 kV单、双回路塔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 35 kV single-circuit and double-circuit tower configurations

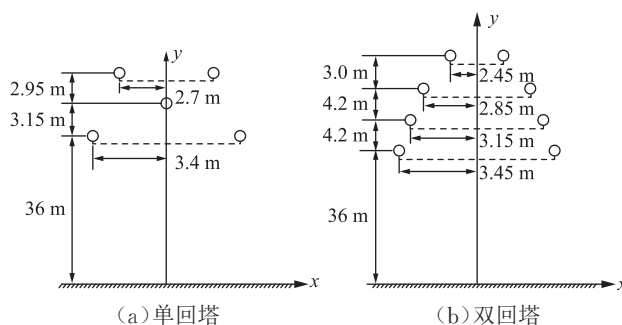


图3 110 kV单、双回路塔示意图

Fig. 3 Schematic diagram of 110 kV single-circuit and double-circuit tower configurations

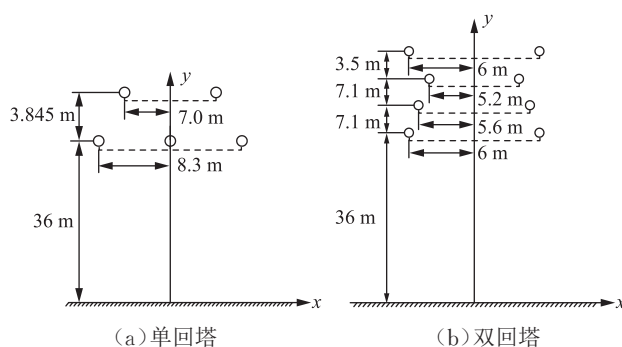


图4 220 kV单、双回路塔示意图

Fig. 4 Schematic diagram of 220 kV single-circuit and double-circuit tower configurations

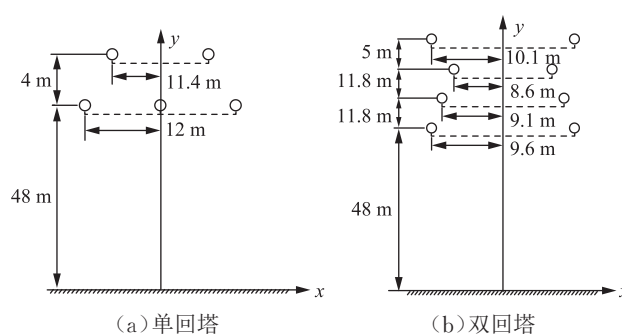


图5 500 kV单、双回路塔示意图

Fig. 5 Schematic diagram of 500 kV single-circuit and double-circuit tower configurations

猫头塔,因而线路所占的走廊较宽。双回路塔上的线路则均为“1”串双回路排列。三相导线按ABC/ABC同相序排列(表1),地线位于塔头最上方(表2)。稳态运行工况下,35 kV输电线路单相运行电流为276 A,

表 1 输电线路导线参数设置表
Table 1 Conductor parameters of transmission line

电压等级/ kV	型号	外径/ mm	相对电阻率	相对磁导率
35	GJ-50	4.50	10.00	300
110	LBGJ-100-30AC	13.00	3.33	1
220	LBGJ-150-40AC	15.75	2.50	1
500	JLB40-150	15.75	2.50	1

表 2 输电线路地线参数设置表
Table 2 Ground wire parameters of transmission line

电压等级/ kV	型号	外径/ mm	相对电阻率	相对磁导率
35	LGJ-240/30	10.80	2.231	1
110	LGJ-400/35	26.82	2.232	1
220	LGJ-630/45	33.60	2.234	1
500	JL/G2A-720/50	36.23	2.235	1

110 kV 输电线路单相运行电流为 612 A, 220 kV 输电线路单相运行电流为 1 224 A, 500 kV 输电线路单相运行电流为 2 628 A。

模拟埋地管道直径 813 mm, 壁厚 8 mm, 相对电阻率为 10, 相对磁导率为 300, 埋深 2 m; 涂层选用 3PE 防腐层, 电阻率 $10^5 \Omega \cdot \text{m}^2$ 。管道远离杆塔端无限延伸, 接地阻抗为 $10^6 \Omega$, 绝缘之间的管段与架空线路平行, 并行间距指管道中心轴线与输电线路中点的距离(图 6)。在模拟中设置土壤电阻率 $10 \sim 1\,500 \Omega \cdot \text{m}$, 电压等级 35 kV、110 kV、220 kV、500 kV, 电路具有单回、双回两种回路, 管段与架空线路并行长度 500~40 000 m。

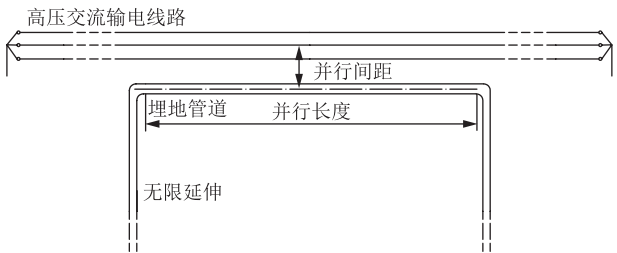


图 6 架空输电线路与埋地管道平行并行示意图
Fig. 6 Schematic diagram of overhead transmission line in parallel with buried pipeline

3 计算结果

3.1 不同土壤电阻率下的安全距离

选取 $10 \sim 1\,500 \Omega \cdot \text{m}$ 范围内 7 种土壤电阻率作为变量, 分别计算 4 个电压等级输电塔与埋地管道的安全距离(图 7、图 8), 曲线下方是交流干扰严重区域, 曲线上方区域的交流腐蚀风险较低。结果表明, 高压交流输电线路与管道之间的安全距离随并行长度的增大

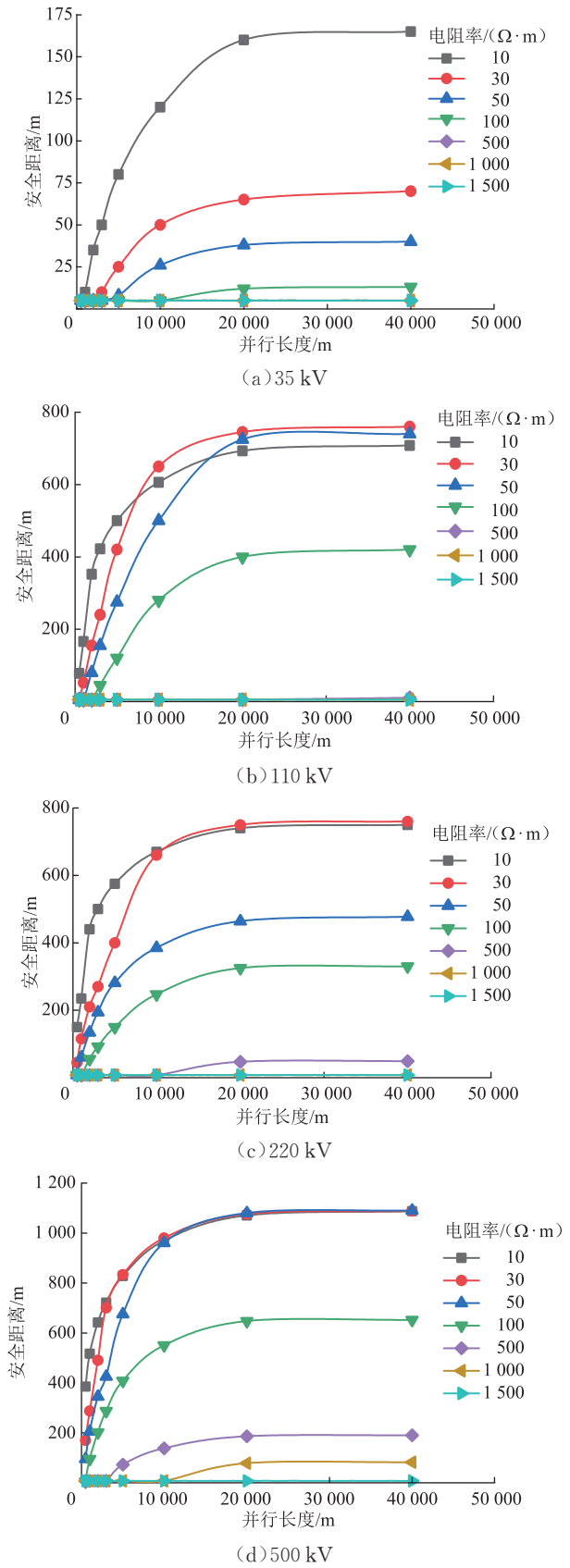
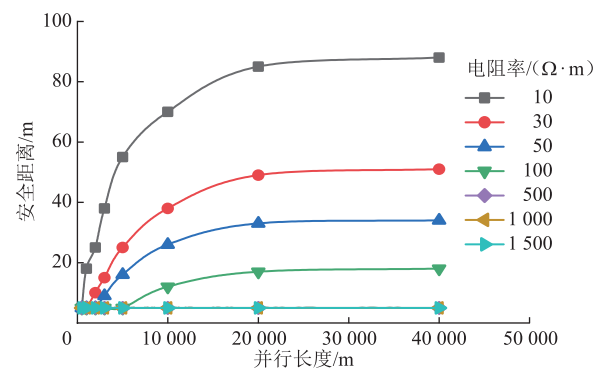
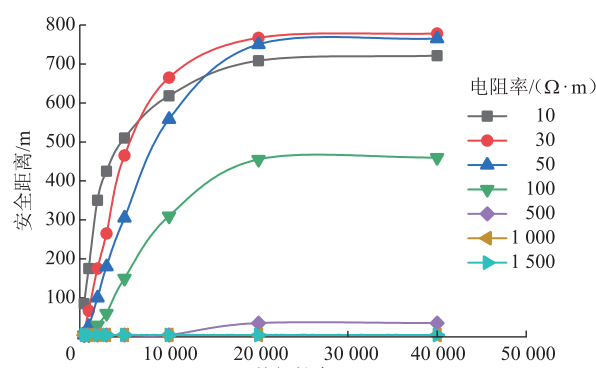


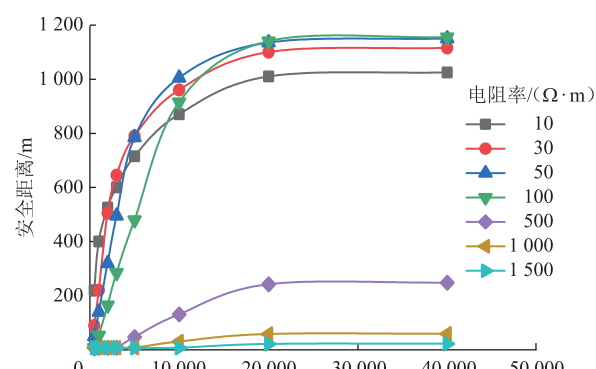
图 7 不同电压等级单回路输电塔与并行管道安全距离随并行长度的变化曲线
Fig. 7 Variation curves of safe distance between single-circuit transmission towers at different voltage levels and parallel pipelines with extending parallel lengths



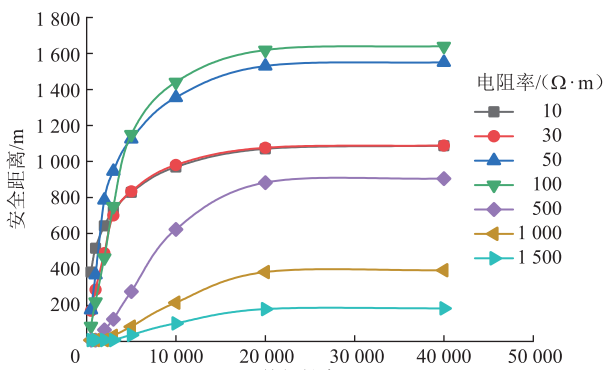
(a) 35 kV



(b) 110 kV



(c) 220 kV



(d) 500 kV

图8 不同电压等级双回路输电塔与并行管道安全距离随并行长度的变化曲线

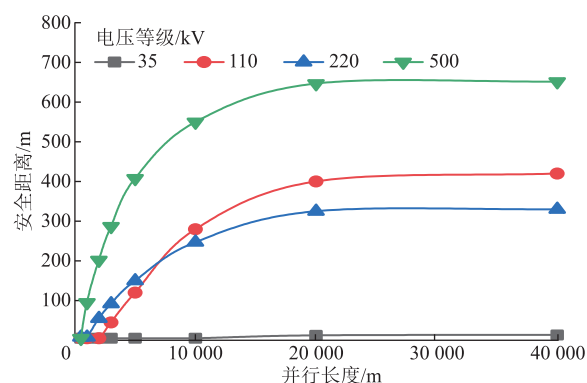
Fig. 8 Variation curves of safe distance between double-circuit transmission towers at different voltage levels and parallel pipelines with extending parallel lengths

而增大,当并行长度大于20 000 m之后,安全距离的增长趋于平缓,其主要原因是:随着并行长度增大,管道沿线的纵向电场不断累积,感性干扰不断加强,此时安全距离增长较快;当并行超过一定长度之后,电磁场趋于饱和,且管道上的泄漏阻抗减小,纵向阻抗不断增大^[5],安全距离变化趋缓。

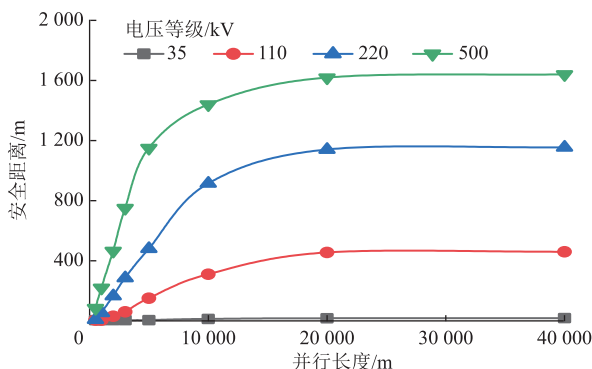
对比不同土壤电阻率下的安全距离可见,随着土壤电阻率增大,35 kV输电线路与并行管道的安全距离逐渐减小,而110 kV及以上电压等级输电线路与并行管道的安全距离整体上呈先增大后减小的趋势。其原因是随土壤电阻率增大,管道泄漏电阻增大,管道漏失电流减小,导致管道干扰电压增大;根据式(1),低电压等级(35 kV)下,土壤电阻率升高导致管道干扰电压的增幅单调递减;而高电压等级(110 kV及以上)下,土壤电阻率的升高将导致管道干扰电压的增幅先增大后减小。

3.2 不同电压等级下的安全距离

保持土壤电阻率100 $\Omega \cdot m$ 不变,分别计算不同电压等级输电线路与并行管道的安全距离(图9),整体而言,电压等级越高,安全距离越大,但在单回



(a) 单回塔



(b) 双回塔

图9 不同电压等级输电线路与并行管道安全距离随并行长度的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of safe distance between transmissions at different voltage levels and parallel pipelines with extending parallel lengths

路条件下, 110 kV 的安全距离大于 220 kV, 其原因为: 虽然 220 kV 输电线路的运行电流大于 110 kV 输电线路, 但 110 kV 单回塔采用三角排列的形式, 而 220 kV 单回塔采用水平排列, 在输电线高度相似的情况下, 输电线的排列结构不同导致 110 kV 输电线路产生的干扰相对较大; 随着并行长度增加, 电磁场不断累积, 因此出现并行超过一定长度之后 110 kV 输电线路安全距离更大的情况。而对于双回塔, 由于各电压等级均采用双回路排列, 电压等级越高, 电磁感

应产生的干扰越强, 安全距离相应越大。

3.3 不同回路条件下的安全距离

保持土壤电阻率 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 不变, 计算 4 个电压等级下单、双回路输电线路与并行管道的安全距离 (图 10), 可见双回路输电线路与并行管道的安全距离始终大于单回路输电线路, 其原因是单回路输电线路多采用水平排列与三角排列, 其产生的工频电场一般小于双回路输电线路的双回路排列, 即双回路输电线路产生的干扰更强^[19], 安全距离相应越大。

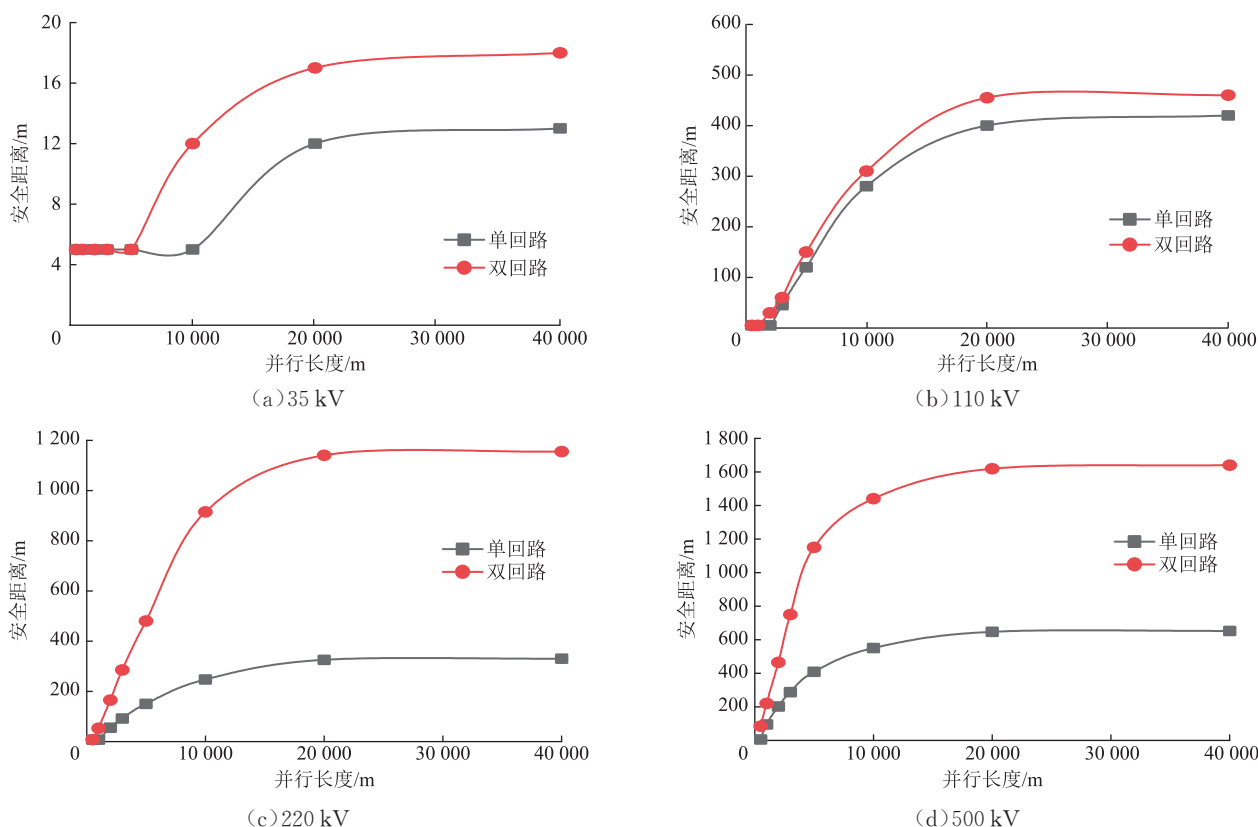


图 10 不同电压等级及回路条件下输电线路与并行管道安全距离随并行长度的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of safe distance between transmission lines at different voltage levels and circuit configurations and parallel pipelines with extending parallel lengths

4 曲折管道等效模型

实际工程中, 输电线路与油气管道均是曲折的, 其相对位置关系是变化的。而在有关管道受输电线路干扰的规范与研究中, 所提及输电线路与油气管道的位置关系是平行的, 无法直接应用。为此, 针对曲折管道进行研究, 以期获得曲折管道与高压交流输电线路的等效距离。

4.1 模型建立

假设管道两端与输电线路的接近距离分别为 h_1 、 h_2 , 输电线路在单位长度管道上将产生感应电动势。距离

线路越远, 感应电动势越小, 且管道金属电位的最大值出现在最接近端, 此时的等效距离 H 为管道两端与输电线路距离的算术平方根 (图 11)^[20], 即:

$$H = \sqrt{h_1 h_2} \quad (9)$$

随着管道曲折次数增多, 节点相应增多。依照式 (9) 将每一小段斜接近管道等效为与输电线路距离 H 的平行管道, 由于管道与输电线路垂直时感应电压为 0, 且管道感应电压具有连续性, 依次将后一段管道与前一段管道作等效, 得到新的等效间距 (图 12), 重复该过程, 最终得到整个曲折管道的等效间距。

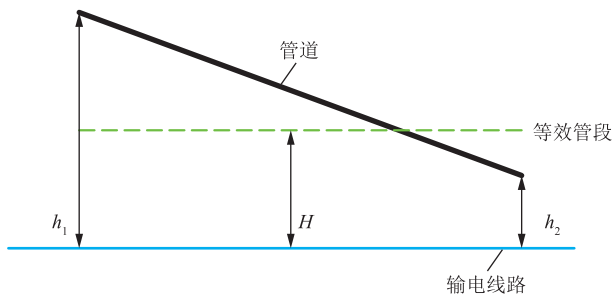


图 11 输电线路与管道斜接近示意图
Fig. 11 Schematic diagram of inclined approach between transmission line and pipeline

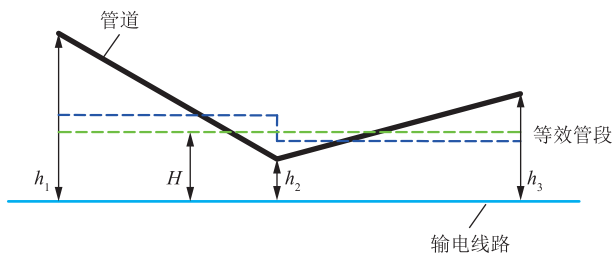


图 12 输电线路与曲折管道并行示意图
Fig. 12 Schematic diagram of parallel extension between transmission line and zigzag pipeline

为模拟工程中更复杂的情况，以节点数 $n=2$ 时的结论为理论基础，增加管段曲折形式，建立不同工况下的干扰模型，推导 $n=3$ 情况下的等效距离公式，再计算 $n>3$ 的情况，最终得到的曲折管道与输电线路之间等效距离的计算公式：

$$H=\begin{cases}\sqrt{h_1h_2},n=2\\[4pt]\sqrt[4]{h_1h_2^2h_3},n=3\\[4pt]2^{n-1}\sqrt{h_1h_2^2h_n^2\prod_{i=3}^{i\leq n-1}h_i^{2^{i-3}+2^{i-2}}},n>3\end{cases}\tag{10}$$

式中： h_i 为第 i 个节点与输电线路间距，m。

4.2 模型验证

假定每段管道长 1 km，改变管道与输电线路的间距，增加曲折次数(节点数)，参照式(10)将曲折管道等效为与输电线路间距为 H 的平行管道，计算管道的感应电压，并将计算结果与 CDEGS 软件模拟所得结果进行对比(表 3、表 4)，可见误差在 20% 以内，所建立的曲折管道等效模型可用于实际工程中曲折管道与高压线之间安全距离的计算。

表 3 节点数为 2 的曲折管道最大感应电压计算值与模拟值对比表

Table 3 Comparison between calculated and simulated maximum induced voltages in zigzag pipeline with 2 nodes					
节点与管道间距/m		等效间距/m	最大感应电压/V		误差
节点 1	节点 2		计算值	模拟值	
1 000	200	447.21	1.28	1.19	7.6%
1 000	400	632.46	1.30	1.18	8.7%
1 000	600	774.60	1.25	1.21	3.2%

表 4 节点数为 5 的曲折管道最大感应电压计算值与模拟值对比表
Table 4 Comparison between calculated and simulated maximum induced voltages in zigzag pipeline with 5 nodes

节点与管道间距/m					等效间距/m	最大感应电压/V		误差
节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5		计算值	模拟值	
1 000	800	600	400	200	329.03	8.39	10.01	19.4%
1 000	800	600	400	400	465.33	7.37	7.49	1.5%
1 000	800	600	400	600	569.91	6.64	6.24	5.9%
1 000	800	600	400	800	658.07	6.10	5.55	9.1%
1 000	800	600	200	200	276.68	10.27	11.25	9.5%
1 000	800	600	200	400	391.29	8.74	8.55	2.2%
1 000	800	600	200	600	479.23	7.63	7.02	8.0%
1 000	800	600	200	800	553.37	6.75	6.00	11.1%
1 000	800	600	600	400	514.97	6.37	6.84	7.4%
1 000	800	600	600	600	630.70	5.92	5.85	1.2%
1 000	800	600	600	800	728.27	5.63	5.35	4.9%
1 000	800	600	800	400	553.37	5.63	6.29	11.8%
1 000	800	600	800	600	677.74	5.43	5.54	2.0%
1 000	800	600	800	800	782.58	5.29	5.16	2.6%
1 000	800	200	400	200	286.82	9.73	10.59	8.8%
1 000	800	200	400	400	405.62	8.72	8.08	7.3%
1 000	800	200	400	600	496.78	7.98	6.70	16.0%

5 结论

1) 以中国常见 4 种电压等级典型架设结构的输电线路为研究对象,利用电磁仿真模拟软件进行交流干扰的计算,得到不同土壤电阻率、电压等级以及回路数下输电线路与埋地管道之间的安全距离,现有研究成果考虑的工况条件相对简单,针对管道与架空线路之间复杂的位置关系,创新性地提出了曲折管道与输电线之间等效距离的计算方法,检验发现 80% 以上的等效计算结果与真实值相比误差小于 10%,全部数据的误差最大不超过 20%。

2) 高压交流输电线与管道之间的安全距离随并行长度的增加而增大,当并行长度大于 20 000 m 之后安全距离的增长趋于平缓。随着土壤电阻率的升高,35 kV 电压等级下的安全距离逐渐减小,而 110 kV 及以上电压等级下的安全距离整体呈现先增大后减小的趋势。在同一电压等级下,单回塔型下的安全距离均小于双回塔型。

3) “管-线”安全距离的提出能够对现有管道受到的交流干扰情况进行初步判断,可为即将建设的管道提供路径规划参考。

参考文献:

- [1] 阮亦根,李自力. 超高压交流输电线路与油气管道安全间距研究[J]. 浙江电力, 2019, 38(4): 92-95. DOI: 10.19585/j.zjdl.201904016.
- RUAN Y G, LI Z L. Study on safety distance between UHV transmission lines and gas pipelines[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(4): 92-95.
- [2] SHABANGU T H, SHRIVASTAVA P, ABE B T, ADEDEJI K B, OLUBAMBI P A. Influence of AC interference on the cathodic protection potentials of pipelines: towards a comprehensive picture[C]. Cape Town: 2017 IEEE AFRICON, 2017: 597-602.
- [3] POPOLI A, SANDROLINI L, CRISTOFOLINI A. Finite element analysis of mitigation measures for AC interference on buried pipelines[C]. Genova: 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, 2019: 1-5.
- [4] 袁艺文. 架空线路与地埋输气管道间安全距离的风险研究[J]. 湖北电力, 2009, 33(4): 57-58. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3986.2009.04.024.
- YUAN Y W. Risk research on insufficient safe distance between overhead transmission line and buried gas transmission pipe[J]. Hubei Electric Power, 2009, 33(4): 57-58.
- [5] 姜子涛,周冰,董绍华,魏百发,刘冠一,汪麟,等. 交流输电线路对管道腐蚀影响的安全距离研究[J]. 石油科学通报, 2021, 6(4): 638-647. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.04.045.
- JIANG Z T, ZHOU B, DONG S H, WEI B F, LIU G Y, WANG L, et al. Research on safety distances between AC transmission lines and buried pipelines for mitigating AC corrosion[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(4): 638-647.
- [6] CHRISTOFORIDIS G C, LABRIDIS D P, DOKOPOULOS P S. A hybrid method for calculating the inductive interference caused by faulted power lines to nearby buried pipelines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1465-1473. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.839186.
- [7] 杨超,李自力,崔淦,丁小勇. 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): 56-59. DOI: 10.11973/fsyfh-201601013.
- YANG C, LI Z L, CUI G, DING X Y. Safe distance between buried pipelines and high voltage AC transmission lines[J]. Corrosion and Protection, 2016, 37(1): 56-59.
- [8] 孔朝金,李刚,郭发龙,孟虎林,李磊,马勤晟,等. 管道与输电线路安全距离标准及做法探讨[J]. 石油和化工设备, 2019, 22(9): 109-111. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8980.2019.09.031.
- KONG C J, LI G, GUO F L, MENG H L, LI L, MA Q S, et al. Discussion on standard and practice for safety distance between pipeline and power lines[J]. Petro & Chemical Equipment, 2019, 22(9): 109-111.
- [9] WANG C Y, LIANG X D, 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. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2941928.
- [10] SUN H F, WANG P, CHANG H J, AI X C, E T L, SU B N, et al. Study on electromagnetic influence of 750 kV AC transmission lines on multiple buried pipelines[C]. Shenzhen: 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2016: 31-34.
- [11] OUADAH M, TOUHAMI O, IBTIOUEN R, BENLAMNOUAR M F, ZERGOUG M. Corrosive effects of the electromagnetic induction caused by the high voltage power

- lines on buried X70 steel pipelines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 91: 34-41. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.03.005.
- [12] QI L, YUAN H, LI L, CUI X. Calculation of interference voltage on the nearby underground metal pipeline due to the grounding fault on overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(5): 965-974. DOI: 10.1109/TEM.2013.2240391.
- [13] POPOLI A, PIEROTTI G, RAGAZZI F, SANDROLINI L, CRISTOFOLINI A. FLARE: a framework for the finite element simulation of electromagnetic interference on buried metallic pipelines[J]. Applied Sciences, 2023, 13(10): 6268. DOI: 10.3390/app13106268.
- [14] TRLEP M, HAMLER A, JESENIK M, STUMBERGER B. Electric field distribution under transmission lines dependent on ground surface[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(3): 1748-1751. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2012806.
- [15] TOURAB W, BABOURI A, NEMAMCHA M. Experimental study of electromagnetic environment in the vicinity of high voltage lines[J]. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2011, 4(2): 209-213. DOI: 10.3844/ajeassp.2011.209.213.
- [16] WANG C Y, LIANG X D, FRESCHI F. Investigation of factors affecting induced voltages on underground pipelines due to inductive coupling with nearby transmission lines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1266-1274. DOI: 10.1109/TIA.2020.2966570.
- [17] MA J, DAWALIBI F P, SOUTHEY R D. Effects of the changes in IEEE std. 80 on the design and analysis of power system grounding[C]. Kunming: Proceedings. International Conference on Power System Technology, 2002: 974-979.
- [18] CRISTOFOLINI A, POPOLI A, SANDROLINI L, PIEROTTI G, SIMONAZZI M. Laplace transform for finite element analysis of electromagnetic interferences in underground metallic structures[J]. Applied Sciences, 2022, 12(2): 872. DOI: 10.3390/app12020872.
- [19] 吴小雁. 基于时谐场计算方法的超高压输电线路磁场影响因素分析[J]. 电气开关, 2016, 54(6): 61-65. DOI: 10.3969/j.issn.1004-289X.2016.06.016.
- WU X Y. Study on factors affecting of EHV transmission lines' magnetic field based on time-harmonic field calculation method[J]. Electric Switcher, 2016, 54(6): 61-65.
- [20] 齐磊, 崔翔, 郭剑, 曹玉杰. 特高压交流输电线路正常运行时对输油输气管道的感性耦合计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(21): 121-126. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2010.21.001.
- QI L, CUI X, GUO J, CAO Y J. Inductive coupling modelling of normally operating UHV AC transmission line to adjacent oil/gas pipeline[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(21): 121-126.
- (编辑: 张腾)
-
- 基金项目:** 广东电网科技项目“交流输电线路对油气管道的影响及其规律、标准化防护方案及效果评价研究”, GDKJXM20220860。
- 作者简介:** 朱文卫, 男, 1985 年生, 高级工程师, 2008 年硕士毕业于西安交通大学电气工程及其自动化专业, 现主要从事输电线路专业方向的研究工作。地址: 广东省广州市海珠区琶洲街道琶洲大道 55 号, 510330。电话: 15876531968。Email: 735228815@qq.com
- Received: 2023-07-07
 - Revised: 2023-07-25
 - Online: 2024-05-09

