应用技术

与交流输电线路交叉或并行管道的安全评价方法

孙银娟¹,姜子涛²,刘 曼¹,王九震²,邵治翠¹,樊学华³,陈更生²,刘冠一²

(1.长庆工程设计有限公司,西安 710018;2.中国石油大学(北京)油气管道输送安全国家工程实验室/ 石油工程教育部重点实验室/城市油气输配技术北京市重点实验室,北京 102249;

3. 中国石油工程建设有限公司北京设计分公司,北京 100085)

摘 要: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,造成埋地管道的交流腐蚀。 了解输电线路对管道的干扰规律,掌握输电线路与管道的安全评价方法,就可以从选线阶段合理设计, 避免或者减小管道运行期间可能受到的干扰问题。通过数值模拟技术建立了交流输电线路对埋地管 道交流干扰计算模型,计算研究了交流输电线路三相布置方式及相间距对管道的干扰规律,并确定了 典型的输电线路等级和不同交叉角度下输电线路与管道的临界距离。结果表明:三相为水平布置时管 道干扰电压最大,管道干扰电压随相间距线性增加;输电线路电压等级越高,需要的临界距离越大;输 电线路与管道交叉角度越小,需要的临界距离越大,根据输电等级和输电线路长度的不同,交叉角度限 值不同。在此基础上建立了临界距离图谱和安全评价方法,简化了临界距离的确定方法。

关键词: 交流干扰;交叉;并行;输电线路;管道;电磁感应

中图分类号: TG174.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-748X(2025)01-0079-09

近年来,我国经济迅速发展,对电力、石油等 能源需求增大,油气管网和输电系统建设日益完 善。由于地理位置、空间等原因的限制,高压交流 输电线路和埋地管道经常出现长距离并行及交叉 的情况,形成"公共走廊"^[1]。在这种情况下,埋地 管道会受到来自交流输电线路的交流干扰,对管 道造成严重的交流干扰腐蚀[2-7]。交流输电线路 对埋地管道的交流干扰包括三种形式[8]:容性耦 合、感性耦合和阻性耦合。容性耦合指管道未埋 入地下时,由于输电线路和管道的电容作用管道 上产生于扰电压,一般可忽略不计。阻性耦合发 生在输电线路发生故障时,此时电流通过输电线 路杆塔接地极进入大地并对管道产生瞬间干扰, 由于干扰时间短、干扰电压高,可能会击穿管道防 腐蚀层、融合管壁并危害人身安全。感性耦合主 要指交流输电线路正常运行时形成的交变磁场在 管道上感应出的交流电压。

收稿日期:2023-12-15

对于新建管道和高压输电线路,首先应该保 证二者之间有足够的安全距离,即远距离避让。 管道和高压输电线路远离可以降低管道受到交流 干扰和后续交流干扰防护的成本。因此,将管道 所受交流干扰控制在可接受范围且在有限空间内 满足高压输电线路与管道的安全距离是行业研究 热点。阮亦根等^[9]以实际管道为研究对象,对输 电线路不同相线高度和不同土壤电阻率下的管道 安全距离进行了研究;任晓达^[10]通过软件模拟计 算了管道与高压输电线路平行或者交叉时两者间 最小安全距离,但是这些研究者考虑的因素较少 目都以4V干扰电压作为标准,未使用交流电流 密度限值。英国标准 CEN/TS 15280-2006 Evaluation of a. c. Corrosion Likelihood of Buried Pipelines-Application to Cathodically Protected Pipe-Lines 提出当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1000m时, 不需要进行干扰调查测试;国标 GB/T 50698-2011《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》提出管 道与110 kV 及以上高压交流输电线路的夹角不宜 小于 55°。但是,这些标准对于交叉角度及安全距 离的规定过于统一,未考虑实际情况中可以影响管 道所受交流干扰的众多重要因素。

基金项目:中俄管道重大风险防控与安全保障关键技术 (2022YFC3070100)

通信作者:姜子涛(1986-),副教授,博士,主要从事油气管 道杂散电流干扰预测及防护研究,010-89732205, jiangzitao1986@163.com

笔者通过专业的数值模拟软件计算并研究了交流输电线路三相布置方式及相间距对管道的干扰影响,输电等级、交叉角度等对最小安全距离(临界距离)的影响。得到了输电线路和管道并行及交叉情况下最小安全距离和各输电等级下交叉角度限值,并绘制了临界距离评价图谱,以期简化输电线路和管道交叉及并行工况下的临界距离的确定。建立高压交流输电线路和埋地管道的安全评价方法,以期为新建管道与输电线路避让提供方法和参考依据。

1 管道交流干扰安全限值

国内外已有很多标准规定了交流干扰的评价指标。交流干扰电压是直接评价依据,CEN/TS 15280-2006标准规定当(土壤电阻率 ρ)不超过 25 Ω ·m时,干扰电压不得大于4V,当 ρ 超过25 Ω · m时,干扰电压不得大于10V;美国NACE SP0177-2019 Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems规定管道电压不应大于 15V,我国铁路行业标准TB/T 2832-1997《交流电 气化铁道对油(气)管道(含油库)的影响容许值及防 护措施》规定管道上的电压应不大于60V。然而,交 流干扰电压是从人员安全角度考虑的指标,交流电流 密度才是评价管道交流腐蚀的主要指标^[11-25]。

笔者参考国内最新石油行业标准 SY/T 0087. 6-2021《钢质管道及储罐腐蚀评价标准 埋地钢质 管道内腐蚀直接评价》中对交流干扰指标的规定:一 般情况下交流电流密度应小于 30 A/m²;在阴极保 护电位负于-0.90 V(相对于铜/硫酸铜参比电极, CSE,下同),且直流电流密度小于 1 A/m² 或阴极 保护电位正于-1.15 V时,交流电流密度可以大于 30 A/m²,但是应小于 100 A/m²。为对管道达到最 大程度的保护,选定交流电流密度小于 30 A/m² 为 管道交流干扰的安全限值。

2 计算方法及模型建立

2.1 计算方法

空间中电磁场的相互作用规律满足 Maxwell 方程组,在均匀、线性、各向同性的非磁性媒质中,其 积分形式见式(1)。

$$\oint \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{S} = 0$$

$$\oint \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = \iint \left(\boldsymbol{j}_0 + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \right) \cdot d\boldsymbol{S}$$

$$\oint \boldsymbol{D} \cdot d\boldsymbol{S} = q_0$$

$$\oint \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{l} = -\iint \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \cdot d\boldsymbol{S}$$
(1)

式中:**B** 为磁感应强度矢量;dS 为面微元;**H** 为磁场 强度矢量;dl 为线微元;*j* 。为传导电流密度矢量;**D** 为电位移矢量;**E** 为电场强度矢量;*q* 。为自由电荷 量;*t* 为时间。

只有当边界条件已知时,求解 Maxwell 方程才 能得到唯一解。在两种不同的介质分界面上,由于 介电常数、磁导率和电导率不同,对应三组边界条 件^[26]。

(1) 磁介质界面上的边界条件

在如图1所示的扁状高斯面应用∯**B**・d**S**=0, 得到磁感应强度法向分量连续性的边界条件如式 (2)所示。



图 1 介质界面上的边界条件:法向分量

Fig.1 Boundary conditions at the interface: normal component 图 2 所示的狭长矩形闭合环路,同时认为介质 界面上没有传导电流,因此有 \oint **H** · d*l* =0,得到磁场 强度切向分量连续性条件如式(3)所示。 $n \times (H_2 - H_1) = 0$ (3)



图 2 介质界面上的边界条件:切线分量



$$\boldsymbol{n} \times (\boldsymbol{D}_2 - \boldsymbol{D}_1) = 0 \tag{4}$$

在闭合环路上有 $\oint E \cdot dl = 0$,因此得到电场强 度切向分量连续性边界条件如式(5)所示。

$$\boldsymbol{n} \times (\boldsymbol{E}_2 - \boldsymbol{E}_1) = 0 \tag{5}$$

(3) 导体界面上的边界条件

• 80 •

导体表面可能存在自由电荷积累,因此利用 高斯定理得到电位移矢量的法线分量的边界条件 如式(6)所示,其中σ_e,是导体分界面上的自由电 荷面密度。

$$\boldsymbol{n} \times (\boldsymbol{D}_2 - \boldsymbol{D}_1) = \boldsymbol{\sigma}_{e0} \tag{6}$$

在高斯面上利用电流的连续方程 $\frac{dq_0}{dt} + \oint j_0 \cdot dS = 0$,得到传导电流密度法向分量的边界条件如式(7)所示。此外,在导体表面边界条件下,式(2)和式(5)也成立。

$$\boldsymbol{n} \cdot (\boldsymbol{j}_{02} - \boldsymbol{j}_{01}) = -\frac{\partial \sigma_{e0}}{\partial t}$$
(7)

目前,对于一定边界条件下的 Maxwell 方程求 解,主要有以矩量法(MoM)^[21]为代表的积分类方 法和以时域有限差分法(FDTD)^[22]为代表的微分类 方法。笔者采用专业的数值模拟软件进行模拟,该 软件基于矩量法进行计算求解。通过建立一系列基 函数,将 Maxwell 的算子方程简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,得到目标 的电场或磁场分布^[23-26]。

2.2 计算模型及参数

总结输电线路杆塔的典型参数,由此进行110, 220,500,750 kV高压交流输电线路的建模计算。 4 种交流输电线路的负载情况见表1,其相线及地线 的空间分布见图3,具体数据也见表1。



图 3 交流输电杆塔模型

Fig. 3 AC transmission tower model

表 1 4 种交流输电线路的负载情况及杆塔参数 Tab. 1 Load conditions and tower parameters of four AC transmission lines

输电等级/kV	负载情况	三相距离/m	杆塔高度/m	地线距离/m	地线高度/m
110	单相电流 1 000 A	6.5	13	9.8	16
220	单相电流 1 500 A	13.0	27	22.0	32
500	单相电流 2 000 A	15.0	36	24.0	43
750	单相电流 2 500 A	26.8	42	31.2	54

高压交流输电线路与管道的位置关系如图 4 所示,计算不同交叉角度下高压交流输电线路与 管道的安全距离(管道交流干扰密度小于 30 A/ m²)。计算模型的管道参数为长 100 km,直径 377 mm,壁厚 6.4 mm,埋深 1.5 m,土壤电阻率 100 Ω•m,防腐蚀层电阻率 100 000 Ω•m²。输电 线路的参数如下:等级为 110,220,500,750 kV; 长度为 100 km;输电线路与管道交叉角度为 10°~ 90°;相线布置方式有水平布置、垂直布置、双回路垂 直布置。



图 4 高压交流输电线路与埋地管道的位置关系示意

Fig. 4 Schematic diagram of the positional relationship between high-voltage AC transmission lines and buried pipelines:

(a) intersection; (b) parallelism

3 结果与讨论

3.1 交流输电线路三相布置方式对管道干扰的影 响规律

采用 220 kV 高压交流输电线路与管道并行模型,将三相布置方式分别设置为水平布置、垂直布置及双回路垂直布置,其与管道的空间位置如图 5 所示,图中三相距离 S 为 13 m,塔高 H 为 27 m,交流输电线路与管道相距 D 为 500 m。





由图 6 可见:当高压交流输电线路与管道并行 时,干扰电压出现两个峰值,分别在输电线路的起点 和终点,且水平布置时管道干扰电压最大。这是因 为管道与输电线路并行段,管道上的纵向感应电动 势方向相同导致干扰电压不断累积。管道与大地形 成回路,作为对称结构,并行起始和结束两端电位相 反,并行段中点电位为0,因此并行段中点干扰电压 为0,管道干扰电压呈对称分布,在并行起始和结束



图 6 不同相线布置方式下管道的干扰电压

Fig.6 Interference voltage of pipelines with different arrangements of phase lines: (a) parallel of pipelines and lines; (b) intersection of pipelines and lines

两端形成两个峰值。而在并行段以外的管段,管道 上不再有纵向感应电动势,但是由于管道的内阻和 不断泄漏的电流,干扰电压逐渐下降。

相线为水平布置时,管道干扰电压最大,这是由 于 ABC 三相产生的磁场不平衡造成输电线路对管 道产生纵向电动势。而 ABC 三相的磁场不平衡,是 由于其距离管道远近不同。

若导线为无限长,载流直导线(即三相输电线) 的磁场分布见式(8)

$$\boldsymbol{B} = \frac{u_0 I}{2\pi r_0} \tag{8}$$

式中:**B** 为磁感应强度矢量; *u*₀ 为磁导率; *I* 为电流; *r*₀ 为距离。

由式(8)可知,三相输电线的磁感应强度矢量与 其至管道的距离成反比,距离越近,磁感应强度矢量 越大,管道上产生的纵向电动势越大,管道干扰电压 越大。

当三相水平布置时,C相与B相与管道的距离 差为

$$\sqrt{(D+13)^2 + H^2} - \sqrt{D^2 + H^2} = \sqrt{D^2 + H^2 + 169 + 26D} - \sqrt{D^2 + H^2}$$
(9)

同理,当三相垂直布置时,C相与B相与管道的 距离差为

 $\sqrt{D^2 + (H+13)^2} - \sqrt{D^2 + H^2} =$

 $\sqrt{D^2 + H^2 + 169 + 26H} - \sqrt{D^2 + H^2}$ (10)

将两式展开,可以看出两式仅存在 26D 和 26H 不同。本计算模型中,管道与输电线路距离 D 为 500 m,远远大于输电线路塔高 H(27 m)。因此,相 线为水平布置时位置不平衡差距更大,管道上的纵 向电动势更大,管道干扰电压最大。

当高压交流输电线路与管道交叉时,相线采用 水平布置方式,输电线路与管道的交叉处出现了第 三个干扰电压峰值。这是由于交流输电线路为三相 输电,三相相位相差 120°,输电线路在管道上产生 的感应电动势表达式如下:

$$\begin{cases} E_{\rm A} = \alpha \frac{I}{L_A} \angle 90^{\circ} \\ E_{\rm B} = \alpha \frac{I}{L_B} \angle -150^{\circ} \\ E_{\rm C} = \alpha \frac{I}{L_C} \angle -30^{\circ} \end{cases}$$
(11)

式中: L_A , L_B , L_C 分别表示三相与管道的距离, α 为 感应系数。对交叉点前的管道纵向感应电动势在x轴和y轴上进行矢量分解合成,结果如下:

$$\begin{cases} x: E_x = \alpha I \times \left(\frac{1}{L_A} - \frac{1}{L_B} \times \sin 30^\circ - \frac{1}{L_C} \times \sin 30^\circ\right) = \frac{\alpha I}{2} \times \left(\frac{2}{L_A} - \frac{1}{L_B} - \frac{1}{L_C}\right) \\ y: E_y = \alpha I \times \left(\frac{1}{L_C} \times \cos 30^\circ - \frac{1}{L_B} \times \cos 30^\circ\right) = \frac{\sqrt{3}\alpha I}{2} \times \left(\frac{1}{L_C} - \frac{1}{L_B}\right) \end{cases}$$

$$(12)$$

交叉点之后的输电线路三相中的 A 相和 C 相 位置互换,输电线路在管道上产生的感应电动势表 达式如下:

$$\begin{cases} E_{\rm A} = \alpha \frac{I}{L_{\rm C}} \angle 90^{\circ} \\ E_{\rm B} = \alpha \frac{I}{L_{\rm B}} \angle -150^{\circ} \\ E_{\rm C} = \alpha \frac{I}{L_{\rm A}} \angle -30^{\circ} \end{cases}$$
(13)

对交叉点后的管道纵向感应电动势在x轴和y轴上进行矢量分解合成,结果如下:

$$\begin{cases} x: E_x = \alpha I \times \left(\frac{1}{L_A} - \frac{1}{L_B} \times \sin 30^\circ - \frac{1}{L_C} \times \sin 30^\circ\right) = \frac{\alpha I}{2} \times \left(\frac{2}{L_C} - \frac{1}{L_B} - \frac{1}{L_A}\right) \\ y: E_y = \alpha I \times \left(\frac{1}{L_C} \times \cos 30^\circ - \frac{1}{L_B} \times \cos 30^\circ\right) = \frac{\sqrt{3} \alpha I}{2} \times \left(\frac{1}{L_A} - \frac{1}{L_B}\right) \end{cases}$$
(14)

由于交叉前 A 相距离管道最近, C 相距离管道 最远, 即 $L_A > L_B > L_C$, 所以式(12)中 $E_X < 0$, $E_Y > 0$, 合成纵向感应电动势在第二象限; 交叉点 后 A 相和 C 相位置互换, C 相距离管道最近, A 相 距离管道最远, 即 $L_C > L_B > L_A$, 所以式(14) $E_x >$ $0, E_y < 0$ 中, 合成纵向感应电动势在第四象限, 交 叉点前后的感应电动势矢量合成见图 7。



after (b) the intersection point of three-phase induced electromotive force

由图 7 可以看出,二者合成纵向感应电动势在 相反的象限内,这说明在交叉点前管道上的纵向感 应电动势由于方向相同而不断累积,交叉点后管道 上的纵向感应电动势由于方向不同而不断减少,在 交叉点会出现一个干扰电压峰值。

3.2 交流输电线路相间距对管道干扰的影响规律

采用不同输电等级高压交流输电线路与管道并 行模型,计算交流输电线路相间距变化对管道干扰 的影响。由图8可见,管道的最大干扰电压随相间 距的增加是线性增加的,且输电等级越高斜率越大。

输电线路三相与管道的空间位置图如图 9 所示,其中 S 为相间距,D 为 B 相与管道的水平距离, H 为三相与管道的垂直距离,三相与管道的距离分 别为 r_A , r_B , r_c ,将三相与管道的各自间距进行矢量 合成得到 r_0 ,合成过程如下:











$$\begin{cases} x: r_{x} = \sqrt{(D-S)^{2} + H^{2}} - \\ \sqrt{D^{2} + H^{2}} \times \sin 30^{\circ} - \\ \sqrt{(D+S)^{2} + H^{2}} \times \sin 30^{\circ} \\ y: r_{y} = \sqrt{(D+S)^{2} + H^{2}} \times \cos 30^{\circ} - \\ \sqrt{D^{2} + H^{2}} \times \cos 30^{\circ} \\ r_{0} = \sqrt{r_{x}^{2} + r_{y}^{2}} \end{cases}$$
(15)

保持 D 和 H 不变,改变相间距 S,计算三相的 合成距离 r_0 ,计算结果如图 10 所示。



Fig. 10 Composite distance at different phase intervals

由图 10 可知,当三相间距改变时, r₀ 呈现线 性变化,从式(8)可以得到管道区域的磁感线强度 矢量也是线性变化,管道上的交流干扰电压也是 线性变化。

3.3 交流输电线路与管道不同交叉角度下的安全 评价方法

交流输电线路与管道交叉时,不仅应关注交叉 角度,还应注意交叉结束后输电线路的走向。将交 叉结束后输电线路与管道并行情况下的间距称为临 界距离,输电线路与管道的间距超过临界距离,管道 受交流干扰影响较小。由图 11 可见,随着输电线路 与管道交叉角度的减小,初期的临界距离增加幅度 很小,而当交叉角度减小到一定程度后,临界距离急 剧增加。如输电线路等级为 220 kV,随着交叉角度 从 90°降低到 45°,临界距离只增加了 150 m;而当 交叉角度从 45°减小到 30°时,临界距离增加 300 m。此外,当交叉角度减小到某一限定值(即交 叉角度限值),此时无法得到临界距离。即当高压交 流输电线路与管道的交叉角度小于交叉角度限值 时,无论管道与输电线路相距多远,管道都会受到严 重的交流干扰。220 kV 输电线路与管道的交叉角 度限值为 30°。随着交叉角度的减小,管道上产生 的纵向感应电动势初期增加缓慢,临界距离增加幅 度较小:当交叉角度减小到一定程度后,纵向感应电 动势急剧增加,管道交流干扰电压迅速变高,所需临 界距离急剧增加。到达交叉角度限值,由于输电线 路长度保持不变,无论管道与输电线路间隔多远,管 道所受交流干扰电压都会超过标准值,即不存在临 界距离。





Fig. 11 Critical distance between transmission lines and pipelines at different intersection angles conditions

交叉角度限值随着输电等级(单相电流)的增加 而减小,交流输电线路和管道交叉角度的限值与单 相电流的关系如图 12 所示。

对其进行线性拟合,结果如下:

$$\theta = 0.027 \times I - 8.5$$
 (16)



图 12 交叉角度限值与单相电流关系

Fig. 12 Cross angle limit and single-phase current relationship

式中:θ为交叉角度限值;I为单项电流。

确定单相电流,可根据此式进行判断:当高压交 流输电线路与管道的交叉角度小于交叉角度限值 时,管道受到严重交流干扰且不存在临界距离;反之 则可以计算临界距离来缓解管道的交流干扰。

对不同交叉角度下临界距离 h 与单相电流 I 进行拟合,由图 13 可知,高压交流输电线路与管 道的临界距离和单相电流近似为线性关系,拟合 结果见式(17):





其他交叉角度限值下临界距离与单相电流的关 系同样可以用 *h* = *a* × *I* + *b* 来表示,将所得 *a*,*b* 分 别对交叉角度作图,结果见图 14。

对 a, b 曲线分别进行拟合,结果如下:

$$\begin{cases} a = 21.31 \times \exp\left(\frac{-\theta}{8.77}\right) + 0.96 \\ b = -349.51 - \frac{1095.64}{1 + (\theta/29.34)^{6.11}} \end{cases}$$
(18)

综上所述,采用本工作所用模型,已知高压输电 线路单相电流,即可得到不同角度下的临界距离,并 据此判断管道是否受到严重的交流干扰,判断公式 如下:



图 14 a,b 与交叉角度关系

Fig. 14 The relationship between *a* , *b* and the intersection angle

$$\theta > 0.027 \times I - 8.5$$

$$\{ h > a \times I + b \\ a = 21.31 \times \exp\left(\frac{-\theta}{8.77}\right) + 0.96 \\ b = -349.51 - \frac{1095.64}{1 + (\theta/29.34)^{6.11}}$$

$$(20)$$

因此,在工业上可以采用该公式对输电线路与 管道交叉情况的干扰风险进行大致判断。该公式使 用方法如下:当高压交流输电线路与管道的交叉角 度满足公式(19),且交叉后输电线路两侧沿着该交 叉方向一直延伸至输电线路与管道垂直间距满足公 式(20)时,管道的交流干扰风险较低。反之,管道交 流干扰风险较高。

4 结 论

(1)高压交流输电线路与管道和并行时管道干 扰电压出现两个峰值,且当三相水平布置时干扰电 压最大;高压交流输电线路与管道交叉时,由于在交 叉点后纵向感应电动势反向,管道干扰电压出现三 个峰值。

(2)管道的最大干扰电压随相间距线性增加, 且随着输电等级的提高,斜率增大。

(3)随着交叉角度的减小,输电等级的提高,高 压交流输电线路和管道所需要的临界距离增大。 (4)随着交叉角度从 90°开始减小,临界距离增 加幅度很小,当交叉角度减小到交叉角度限值时,临 界距离急剧增加。当输电线路等级为 220 kV 时, 随着交叉角度从 90°降低到 45°,临界距离只增加了 150 m;而随着这交叉角度从 45°减小到 30°时,临界 距离增加 300 m。

(5) 高压交流输电线路的交叉角度限值随输电 等级(单相电流)的增加而增加,建立了在不同单相 电流下的交叉角度限值评价方法,并根据交叉角度 限值和临界距离建立了高压交流输电线路与管道的 安全评价方法。

参考文献:

[1] 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):2101-2108.

SHENG W Q. 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): 2101-2108.

[2] 姜子涛,曹国民,钟良,等.城镇基础设施对油气管道的 干扰规律及其识别方法[J].腐蚀与防护,2018,39(3): 222-226.

JIANG Z T, CAO G M, ZHONG L, et al. Regularity and distinguishing methods of the interference on oil and gas pipeline caused by urban infrastructure[J]. Corrosion & Protection, 2018, 39(3): 222-226.

[3] 李振军.高压/特高压直流输电系统对埋地钢质管道干 扰的现场测试与分析[J].腐蚀与防护,2017,38(2): 142-146,150.

LI Z J. Field test and analysis of interference of high or ultra high voltage direct current transmission system to underground steel pipeline [J]. Corrosion & Protection, 2017, 38(2):142-146, 150.

[4] 杨超,李兆玲,杨任继,等.高压直流接地极对埋地管道的干扰及防护[J].中国石油大学学报(自然科学版), 2017,41(6):166-170.

YANG C, LI Z L, YANG R J, et al. Interference and protection of buried pipelines due to HVDC grounding electrode[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2017,41(6):166-170.

[5] 江波,常熔,孙其刚.鱼龙岭接地极对广东管网阴保系统的影响及对策[J].油气田地面工程,2013,32(9):126.
 JIANG B, CHANG R, SUN Q G. Influence of yulongling grounding electrode on Yin protection system of Guangdong pipe network and

countermeasures [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2013, 32(9):126.

- [6] CAROLI C E, SANTOS N, KOVARSKY D, et al. ITAIPU HVDC ground electrodes: interference considerations and potential curve measurements during Bipole II commissioning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3):1583-1590.
- [7] NICHOLSON P.. High voltage direct current interference with underground/underwater pipelines
 [C]//The 65th NACE Annual Conference. Houston: NACE, 2010: No. 10102.
- [8] CIGRE. Guide on the influence of high voltage ac power systems on metallic pipelines [R]. Paris: CIGRE,1995.
- [9] 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.
 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.
- [10] 任晓达. 高压交流输电线路对金属管道干扰规律研究
 [J]. 中国科技信息,2016(18):54-56.
 REN X D. Study on interference law of high voltage AC transmission line to metal pipeline[J]. China Science and Technology Information,2016(18):54-56.
- [11] HAMLIN A W. Some effects of alternating current on pipeline operation [J]. Materials Performance, 1980, 19(1): 18-27.
- [12] 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, [S. l. :s. n.],2004.
- [13] MARTIN B. A history of stray current corrosion[J]. Corrosion & Materials, 2006, 31(3): 12-14.
- [14] HAYDEN J L R. Alternating-current electrolysis[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1907, XXVI(1):201-229.
- [15] MCCOLLUM B, AHLBORN G H. The influence of frequency of alternating or infrequently reversed current on electrolytic corrosion [J]. Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 1916, 35(3):371-397.
- [16] 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.
- [17] HEWES F W. Four phenomena affecting cathodic

• 86 •

protection and corrosion rates [J]. Corrosion Engineering Digest, 1972, 21(5):224-229.

- [18] 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.
- [19] PAGANO M A, LALVANI S B. Corrosion of mild steel subjected to alternating voltages in seawater[J]. Corrosion Science, 1994, 36(1):127-140.
- [20] 赵凯华,陈熙谋. 新概念物理教程-电磁学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2006:408-410.
 ZHAO K H, CHEN X M. New concept physics course-electromagnetics[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press,2006:408-410.
- [21] HARRINGTON R F. Field computation by moment methods[M]. New York: Macmillan, 1968.
- [22] YEE K E. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. IEEE Transactions on Antennas

and Propagation, 1966, 14(3): 302-307.

- [23] SOUTHEY R D, DAWALIBI F P, VUKONICH W. Recent advances in the mitigation of AC voltages occurring in pipelines located close to electric transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(2): 1090-1097.
- [24] SOUTHEY R D, DAWALIBI F P. Computer modeling of AC interference problems for the most cost-effective solutions[C]//The 53rd NACE Annual Conference, Houston: NACE, 1998:98564.
- [25] SOUTHEY R D, DAWALIBI F P, LI Y, et al. Increasing the cost-effectiveness of AC interference mitigation designs with integrated electromagnetic field modeling [C]//The 60th NACE Annual Conference, Houston: NACE, 2005:05623.
- [26] SOUTHEY R D, RUAN W, DAWALIBI F P. AC mitigation requirements: A parametric analysis[C]// The 56th NACE Annual Conference. Houston: NACE, 2001:01604.

Safety Evaluation Method for Pipelines Crossing or Parallel with AC Transmission Lines

SUN Yinjuan¹, JIANG Zitao², LIU Man¹, WANG Jiuzhen², SHAO Zhicui¹, FAN Xuehua³, CHEN Gengsheng², LIU Guanvi²

(1. Changqing Engineering Design Co., Ltd., Xi'an 710018, China;

2. National Engineering Laboratory for Pipeline Safety/ MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering/Beijing Key

Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China;3. China Petroleum Engineering Construction Beijing Design Branch Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: High voltage AC transmission lines generate AC interference on buried pipelines through electromagnetic induction, causing AC corrosion in buried pipelines. Understanding the interference laws of transmission lines on pipelines and mastering the safety evaluation methods for transmission lines and pipelines can enable them to be designed reasonably from the selection stage, avoiding or reducing the interference problems that may occur during pipeline operation. A numerical simulation model was established to calculate the AC interference of AC transmission lines on buried pipelines. The interference law of three-phase layout and phase spacing of AC transmission lines on pipelines was studied, and typical transmission line levels and critical distances between transmission lines and pipelines at different interference voltage was the highest, and the pipeline interference voltage increased linearly with the phase spacing. The higher the voltage level of the transmission line, the greater the critical distance required. The smaller the intersection angle between transmission lines and pipelines, the greater the critical distance required. The intersection angle limited varies depending on the transmission level and length of the transmission line. And based on this, a critical distance map and safety evaluation method were established, simplifying the determination of critical distance.

Key words: AC interference; cross; parallel; transmission line; pipeline; electromagnetic induction