数值模拟技术在高压直流接地极干扰 埋地管道领域的研究现状

刘青松¹,胡上茂²,蔡汉生²,邓 军¹,彭 翔¹,张 义²,刘 刚²,贾 磊²

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663)

[摘 要] 为更好地了解数值模拟技术在高压直流干扰埋地管道领域的研究现状,通过对国内外高压直流干扰埋 地管道研究成果的总结,介绍了数值模拟技术的计算方法,分析了 CDEGS 与 Beasy 2 款数值模拟计算软件的计算 原理并对比了各自的优势与不足,总结了数值模拟技术在埋地管道高压直流干扰研究中的应用现状。在此基础 上,指出了当前数值模拟技术存在的问题,并展望了数值模拟技术用于埋地管道高压直流干扰的计算方向,为相关 研究人员和工程人员提供参考和借鉴。

[关键词] 数值模拟;高压直流;接地极;千扰;埋地管道
 [中图分类号] TG172 [文献标识码] A doi: 10.16577/j.issn.1001-1560.2023.0149
 [文章编号] 1001-1560(2023)06-0173-09

Research Status of Numerical Simulation Technology in the Field of HVDC Grounding Pole Interference in Buried Pipelines

LIU Qing-song¹, HU Shang-mao², CAI Han-sheng², DENG Jun¹, PENG Xiang¹, ZHANG Yi², LIU Gang², JIA Lei²

(1. Maintenance & Test Center, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China;

2. Electrical Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to better understand the research status in the field of HVDC interference in buried pipelines by numerical simulation technology, the research results of HVDC interference in buried pipelines at home and abroad were summarized. The method of calculation of numerical simulation technology was introduced, the calculation principles of two numerical simulation and calculation softwares, CDEGS and Beasy, were analyzed, and their advantages and disadvantages were compared. In addition, the application status of numerical simulation technology in the study of HVDC interference in buried pipelines was summarized. On this basic, the current problems in numerical simulation technology were pointed out, and the future calculation direction of numerical simulation technique used for HVDC interference in buried pipelines was prospected, which would provide reference and inspiration for relevant researchers and engineers.

Key words: numerical simulation; high voltage direction current (HVDC); grounding electrode; interference; buried pipelines

0 前 言

随着能源经济的发展,国家正全力发展高压电网 和油气管网,高压直流(HVDC)输电为我国的能源输送 提供了一种重要的方式^[1]。目前,我国已建成哈密南-郑州、葛洲坝-上海等数十条高压直流输电线路,未来 随着双碳目标的进一步落实,还会有更多已规划的直 流输电线路建成^[2,3]。由于地理条件限制和实际生产 需要,埋地金属管道与高压输电线路建设于同一"公共 走廊"的情况愈加普遍,相互干扰的问题日趋严重。由 于其固有的技术特性,高压直流输电系统在运行中不 可避免会对埋地油气管道产生干扰^[4,5]。目前,国内外 已发现多起高压直流接地极干扰埋地管道的案例^[6-8]。 对此,管道从业人员已开展了大量现场测试^[9-11]、智能 测试桩监测^[12,13]和室内模拟试验^[14-16],对高压直流对 埋地管道干扰有了一定认识。高压直流可对较大范围

[[]收稿日期] 2022-12-23

[[]基金项目] 南方电网公司科技项目(CGYKJXM20190489)资助

[[]通信作者] 胡上茂(1983-),博士,高工,主要从事直流输电接地极与周边环境相互影响研究,电话:020-36625326,E-mail: husm@ csg.cn

174

内的埋地管道产生干扰,监测发现受干扰管线长度甚 至可达到 600 km。接地极放电导致的管地电位偏移不 仅会加速管体腐蚀并增加氢脆敏感性,还可能导致站 场、阀室内的设备发生烧蚀,或引起管道附件(恒电位 仪、电位传送器等)损坏^[8,17]。若管地电位超过 35 V, 还会威胁管道维护人员的人身安全^[18]。面对如此强的 干扰问题,管道方需要采取合理的缓解措施有效降低 管道运行安全风险。然而,目前对于高压直流干扰的 防护研究处于起步阶段,国内外均无成熟经验。想要 从源头降低高压直流对管道的干扰,也应在设计阶段 就确定防护措施。鉴于此,数值模拟技术在已建和新 建管道的应用,可为埋地管道高压直流干扰的预测和 缓解方案提供有效工具。

对此,本文重点介绍了数值模拟技术的计算方法, 阐述了 CDEGS 与 Beasy 2 款数值模拟计算软件的计算 原理;总结了数值模拟计算方法在干扰研究中的应用 现状,在此基础上,指出了当前研究存在的问题,并展 望了高压直流干扰的发展方向。本工作可为实际生产 中高压直流对埋地管道干扰的认识和评估提供参考。

1 数值模拟计算技术

早期的研究人员在设计阶段采用镜像波法或者公 式法计算接地极参数^[19,20],但是这种相对比较传统的 方法无法对实际复杂的土壤工况进行模拟。因此,随 着计算机的发展,研究者们开始尝试采用数值模拟计 算方法来获取被保护体表面的电位和电流分布状况。 目前涌现出的数值模拟计算方法主要为有限差分法、 有限元法和边界元法^[21-23],这些计算方法在埋地阴极 保护管道的设计和近海平台等都得到了良好应用,并 且可以使复杂的问题得到快速解决,节省了人力、物力 并实现了优化设计。下面将对常见的 3 种数值模拟计 算方法原理与相关应用情况进行概述。

1.1 数值模拟计算方法

有限差分法(Finite Difference Method, FMD)是近 似求解偏微分方程边值问题最常用的方法。基本思想 即将需要求解的区域划分为网格,在网格点上列写差 分方程。用代数式[$\Phi(x+\Delta x) - \Phi(x)$]/ Δx 近似代替原 微分方程中的导数 d Φ/dx ,即用折线近似代替原边界 曲线最终求解出微分方程^[23]。从 20 世纪 60 年代开 始,有限差分方法已用于电化学体系中来计算多电极 系统的电流分布及铜、锌的电偶腐蚀等,并用来掌握腐 蚀过程的电流和电位分布规律^[23]。钱海军等^[24]采用 有限差分方法对大口径输水管道管内阴极保护电位分 布进行了计算;张鸣镝等^[25]利用有限差分方法计算了 在装有海泥的槽中被保护海底管道表面的电位分布及 其随保护时间的变化;但由于该方法计算结果的准确 度与网格交叉点即节点的数目和分布有关,对于非常 复杂的几何边界,有限差分法并不适用。

有限元法也称有限元素法(Finite Element Method, FEM),广泛应用于以拉普拉斯方程和泊松方程所描述 的物理场中^[23]。从 20 世纪 60 年代开始有研究者采用 有限元计算以掌握腐蚀过程的电位分布规律,邱枫 等^[26]利用有限元程序计算了钢质储罐底板外侧、码头 钢管桩和埋地钢管在带状牺牲阳极保护下,阴极保护 电位的分布情况。Munn^[27]应用有限元法研究了牺牲 阳极以及钢板在电解液中的腐蚀行为。当前的计算结 果表明,有限元法的优点在于不受结构形状限制,考虑 到采用该方法时也需要将全部区域进行网格划分,但 是想要得到被保护体表面的电位,还需要很高的精度 和庞大的数据储备量。

边界元法(Boundary Element Method, BEM)是于 20 世纪 80 年代初在阴极保护领域出现的一种数值计算 方法。该方法以微分方程的基本解为基础,建立边界 积分方程,然后对边界积分方程通过离散、插值等手 段,获得关于边界上未知数的方程组,进而获得所要求 的物理量^[23]。Degiorgi等^[28]采用边界元方法模拟了船 侧推进器阴极保护系统的电位分布。梁旭巍等^[29]将 BEM 应用于油田区域阴极保护阳极位置的优化设计, 最终确定了最佳阳极位置和电流输出。与有限差分法 和有限元法相比,边界元法在阴极保护系统中的应用 具有数据输入容易、精度高的明显优势,但是该方法在 解决处于不均匀电阻率的问题时,通常需要划分为多 个区域进行处理,会增加计算建模的时间成本,这是其 劣势所在^[23]。

1.2 高压直流干扰仿真软件

目前, 埋地油气管道行业内常用的 2 款高压直流 干扰下埋地管道的干扰预测与评估仿真软件为英国的 Beasy 和加拿大的 CDEGS 软件。2 款软件的计算思路 近似, 首先建立几何模型, 用不同计算方法求解数学模 型, 模型校核, 然后将计算完的数据进行整理, 最后根 据干扰评估结果, 进行相应的优化设计, 具体计算思路 见图 1。

尽管2款软件的数值模拟计算思路近似,但是由 于计算方法原理不同,用于埋地管道高压直流干扰预 测与评估时采用的评价准则也不同。如 Beasy 软件基 于边界元法,考虑到了管道的极化效应,计算结果为断



图 1 高压直流干扰下埋地管道的干扰预测与 评估仿真软件的计算思路

Fig. 1 The calculation idea of simulation software for buried pipeline interference prediction and evaluation under HVDC interference

电电位,对应的干扰预测与缓解目标为经典的-0.85~-1.20 V(vs CSE)电位准则;CDEGS 基于电磁干扰原理,通过求解麦克斯韦方程组,未考虑极化效应,主要关注人体安全电压,常用缓解目标为35 V 接触电压。下面将对2款常用仿真软件数学模型求解原理进行总结:

Beasy 仿真软件的计算原理即基于边界元法求解 拉普拉斯方程,该方程描述了阴极保护系统周围介质 中电势场的分布规律,其被广泛地用于求解阴极保护 系统中电位和电流密度的分布。根据欧姆定律,电流 密度正比于电位φ的梯度,数值模拟计算的电位分布 控制方程如下:

$$\begin{cases} V_{:} \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \\ \Gamma_{A}: \phi = \phi_{a/s} = \phi_{a} - \Delta \phi_{a/s} \overrightarrow{\mathbb{R}} \sigma_{a} \frac{\partial \phi}{\partial n} + J_{a} = 0 \\ \Gamma_{C}: \sigma_{c} \frac{\partial \phi}{\partial n} + f(\phi_{c} - \phi) = 0 \\ \Gamma_{I}: \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \\ \phi_{a} - \phi_{c} = \Delta \phi_{\text{power}} \end{cases}$$

式中,*V*为计算求解的电解质区域, ϕ 为求解区域内各 处的电位,*x*,*y*,*z*为空间坐标; Γ_A 为包围辅助阳极体的 电解质边界, ϕ_a 为辅助/牺牲阳极体电位, $\Delta\phi_{a/s}$ 为辅 助/牺牲阳极对电解质电位,即通常所说的阳极极化电 位, J_a 为辅助阳极表面极化电流密度, σ_a 为辅助阳极附 近电解质的电导率; Γ_c 为包围阴极体的电解质边界, ϕ_c 阴极体电位, σ_c 为阴极附近电解质的电导率; Γ_1 为 电解质绝缘边界; $\Delta\phi_{power}$ 为外加电源电压。

为了求解上述方程,需给定准确合理的边界条件,

在电位场的数值计算中,边界条件通常有以下3类:

(1)边界上的电位 ϕ 已知,即 $\phi=\phi_0$,称为 Dirichlet 边界条件,或称第1类边界条件;

(2)边界上的电流密度 *J* 已知,即 *J*=*J*₀,称为 Neuman 边界条件,或称第 2 类边界条件;

(3)边界上的电流密度 J 与电位 ϕ 的函数关系已 知,即 $J = f(\phi)$ 或 $\phi = f(J)$,也称为第 3 类边界条件。对 于阴极保护系统来说,第 3 类边界条件多是金属的极 化边界条件,即电流密度 J 与电位 ϕ 满足非线性的极 化边界条件。

在阴极保护系统的数值模拟中,根据阴极保护系统的特点,边界条件又可分为阴极边界条件、阳极边界条件和其他边界条件(主要是绝缘边界条件和对称边界条件)。在高压直流干扰计算中,主要采取第3类边界条件,即通过测试阴、阳极材料在实际电解质中的极化曲线而得到电位和电流密度的关系。

与 Beasy 不同的是, CDEGS 数值模拟计算软件是 基于矩量法(Method of Moments, MoM)进行麦克斯韦 方程组求解,通过建立高压直流接地极与管道相对位 置的模型,输入干扰源与管道参数,进行模拟计算分析 从而得出所需结果。对于高压直流干扰的计算,采用 MultiFields 软件包中的 HIFREQ 模块,理论基础为电磁 场法,进行计算电场和磁场的分布。其电磁干扰的电 磁场分布满足麦克斯韦方程组:

$$\begin{cases} \nabla \cdot D = \rho_{e0} \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \times H = J_0 + \frac{\partial I}{\partial t} \end{cases}$$

式中, ρ_{e0} 是自由电荷的体密度, J_0 是电流密度, $\frac{\partial D}{\partial t}$ 是 位移电流密度。在解麦克斯韦方程组的时候,可在边 界条件已知的情况下来确定方程组的唯一解。在2种 不同介质的分界面上,由于介电常量 ε 、磁导率和电导 率 σ 不同,相应的有3组边界条件。

(1)磁介质界面上的边界条件 由"高斯定理"可以得到磁感应强度法向分量连续性的条件:
n・(B₂ - B₁) =0,或者 B_{2N} = B_{1N},然后把安培环路定
理 ∯H・dl = I₀运用当中,可以得到磁场强度切向分量
连续性的条件:

 $n \times (H_2 - H_1) = 0, \vec{u} \neq H_{2T} = H_{1T}$

(2)电解质界面上的边界条件 当介质分界面上

没有自由电荷时,即可得到电位连续性的条件:

 $n \times (D_2 - D_1) = 0$,或者 $D_{2N} = D_{1N}$

把 ∮E · d*l* = 0 运用到其回路上,就得到了电场强度 切向分量连续性的条件:

 $n \times (E_2 - E_1) = 0$,或者 $E_{2T} = E_{1T}$

(3)导体界面上的边界条件 一般在导体表面会 有自由电荷积累,所以利用高斯定理,可以得到电位移 矢量的法线分量的边界条件为:

 $n \times (D_2 - D_1) = 0$,或者 $D_{2N} - D_{1N} = \sigma_{e0}$

这里 σ_{e0} 是导体分界面上的自由电荷面密度,通过 矩量法将干扰系统进行离散化处理,并利用迭代法进 行数值计算,最终得到该目标边界条件下麦克斯韦方 程的数值解。

根据以上2款软件的工作原理,对于已建管线和 直流输电线路,若现场监测结果显示管道受高压直流 干扰时干扰电压大于35V,可采用CDEGS^[30-32]软件进 行优化设计,以使人身安全电压降至可接受范围。若 管道受高压直流干扰时干扰电位较小,但是断电电位 仍不满足阴极保护准则,可采用Beasy软件进行缓解设 计,以保证管道受高压直流干扰时管道电位满足标准 要求。对于新建管道或者直流输电线路,由于无法确 定管道受高压直流干扰时的电位偏移情况,2款软件均 可以进行干扰预测与评估。

2 数值模拟技术在高压直流干扰埋地管道的 应用现状

高压直流干扰程度大,干扰极性不确定,缓解难度 高,仅依靠现场监测获取干扰参数的变化规律较为困 难。因此,数值模拟计算可为高压直流的干扰预测和 缓解提供有效工具。目前,一些研究者也采用仿真软 件对土壤电阻率、接地极选址与安全距离和干扰防护 措施进行研究。

2.1 土壤电阻率干扰

对于均一的土壤电阻率环境,接地极单极运行时, 电流线是垂直于接地极等效半球体表面向外辐射,大 地中任意半径为 R 的半球表面上各点的电流密度均匀 且相等^[33]。然而,我国幅员辽阔,油气管道跨度大,沿 线土壤复杂多变,不同地区土壤环境对管道受高压直 流干扰不同。目前报道的高压直流干扰案例表明,广 东地区深层土壤电阻率高,管道受高压直流干扰大,如 天广直流输电单极运行时,西气东输二线管道管地电 位最正值为 304 V^[34];而上海地区接地极对临近管道

最大干扰仅为 6.9 V。通过相关报道表明:我国不同地 区接地极的土壤分层结构和土壤电阻率不同,同一管 道沿线不同位置的土壤电阻率也有所差异[31]。鉴于 此,为解决复杂土壤模型的干扰情况,一些研究者采用 仿真软件模拟计算了不同土壤环境中高压直流干扰规 律:付龙海[35]以某实际管道和接地极参数进行仿真建 模,研究结果表明对于均一的土壤结构,接地极址分别 为土壤电阻率 50 Ωm 和 3 500 Ωm 的均匀土壤中,管道 受干扰的程度增加了 50 倍。房媛媛等^[36] 通过 CDEGS 仿真模拟,提出了对于双层的土壤结构,无论是上层或 者下层土壤电阻率增大时,埋地金属管道同一位置的 电位都会增大。吕超等[37]也设计了双层土壤结构,土 壤模型如图 2,表层土壤电阻率低,为 100 Ω·m,厚度 为 0.1~9.0 km;底层土壤电阻率高,为 1 000 Ω·m;作 为对照,也计算了整体土壤电阻率为 100 $\Omega \cdot m$ (表层 厚度无穷大)和1000Ω·m(表层厚度为0)2种工况 条件下的管地电位,得到的表层土壤厚度与最大管地 电位关系如图3,研究结果证明了管道所受干扰由表层 和深层土壤电阻率共同决定,即对于双层土壤结构,表 层土壤厚度小于 0.15 km 时,管道所受干扰主要由深层 土壤决定,当表层土壤厚度大于9.0 km时,所受干扰主 要由表层土壤电阻率决定。



对于实际工况而言,接地极和管道的局部土壤电 阻率均不相同,局部的土壤电阻率也会影响管道的干 扰程度。为此,董晓辉等^[38]通过仿真计算提出了接地 极和周边的土壤电阻率均会影响地面电位分布;吕超 等[37]也计算了接地极和管道附近的局部土壤电阻率对 管道的干扰程度,并以西北和华南2个典型土壤中的 高压直流接地极干扰进行了电位监测,最终证实了无 论是接地极还是管道,均呈现出局部土壤电阻率低,管 道干扰程度小的规律。综上,土壤电阻率会影响高压 直流对管道的干扰程度,因此,在采用仿真软件对管道 受高压直流干扰预测与评估时,需要准确收集接地极 的土壤分层结构和测试管道沿线不同的土壤电阻率. 并将实际的土壤结构在仿真模型中准确体现,以保证 评估的准确性。同时,为了对土壤电阻率干扰的仿真 效果进行验证,建议在接地极临近的不同土壤结构的 管道位置安装腐蚀挂片、智能电位测试桩、电阻探针或 者其他腐蚀监测技术,并将仿真和监测结果进行对比, 以更好地评价不同土壤环境对埋地金属管道所受高压 直流干扰的影响^[39,40]。

2.2 接地极选址与安全距离

对于新建高压直流输电系统,合理的接地极选址 是最直接有效降低管道干扰风险的方法。对此,CSA Z662"Oil and Gas Pipeline System"^[41]指出在一定的土 壤条件下,直流接地极可对 70 km 外的管道产生干扰。 我国电力行业 DL/T 437^[42]"高压直流接地极技术导 则"提出接地极址设计前要评估接地极址对周围环境 的影响,在预选地址 10 km 范围内原则上不应有埋地 金属管道、铁道及有效的接地送变电设施,若不能避 开,应对接地极电流对这些构件产生的腐蚀等不良影 响的程度进行评估。此外, DL/T 5224^[43]也提出, 在接 地极址选择中,对可能的每个接地极址方案应进行不 小于10 km 范围内的地质结构调查,同时应收集不小 于 50 km 范围内地下金属管线等设计资料。由此可 见,在接地极与管道相互靠近时,接地极址的土质等对 管道干扰影响很大。根据目前的监测数据和土壤电阻 率影响高压直流干扰程度的仿真结果[36,37,44],低电阻 率中形成的电势梯度较小,穿越电势场时管道两端的 电压差较小,管地电位小。因此,对于新建直流输电工 程,尽量将高压直流接地极埋设在土壤电阻率较低区 域以降低管道干扰风险。除此之外,也有研究者采用 数值模拟技术研究接地极各项参数对人身安全的影 响,进而计算了安全距离。曹国飞等[45]以人身安全电 压±35 V为标准,分别计算管道长度、防腐涂层对安全

距离的影响,结果表明,管线越长,防腐层面电阻率越 高,管线所受干扰越大,同时需要的安全距离越大。曹 方圆等[46]也通过数值模拟技术以实际管道与接地极的 路由进行计算,最终得到结论,在相同的计算工况下, 3PE 涂层管道安全距离为 18 km, FBE 涂层管道安全距 离为9 km, 而土壤 pH 值对安全距离无影响。以上计 算研究现状表明,管道长度、防腐层面电阻率和接地极 址周围的土壤电阻率均影响到高压直流干扰下管道的 安全距离。但从实际工程来看,高压直流干扰下管道 的安全距离并不能一概以标准规定的限值而论。以目 前行业内已经获得的高压直流干扰监测结果看,广东 地区管道所受干扰程度最大,与接地极距离较远的管道 也会受到显著干扰;而上海地区管道即使在接地极址10 km 范围内,其干扰可小于 35 V。因此,采用数值模拟技 术可以研究管道干扰程度与距接地极安全距离的变化规 律及关系,但是这种单一的评价指标只能用于指导工程 的初步判断,对于管道干扰风险的强弱和安全距离关系 的适用性和有效性还有待进一步开展实证研究。

2.3 干扰防护措施

面对高压直流接地极的干扰,需要电力方和管道 方共同采取防护措施。目前,电力方除了优化接地极 极址外,也可采用控制入地电流和改变接地极形式控 制干扰程度。杨超等[10] 通过数值模拟评估了入地电流 对管道的影响,作者以金丝接地极为研究对象,某管道 与该接地极最近距离为 860 m, 计算了在 50 A 的不平 衡电流和1000,2000,3000,4000,5000 A 为故障电 流条件时,干扰程度与入地电流呈正相关关系。房媛 媛等[36]研究了双环形、星形和直线型接地极的干扰程 度,在入地电流、土层参数和接地极埋深相同情况下, 直线型的干扰程度大;但是对于实际工况,接地极与长 距离管道相比,接地极可看成点源,形状对管道干扰影 响不显著。此外,面对高压直流的干扰,国内外尚无成 熟通用的缓解方案和标准;管道行业主要采用数值模 拟计算并参考 GB 50991-2014"埋地钢制管道直流干 扰防护技术标准"[47]中的阴极保护、分段绝缘和排流 保护的防护措施。如杨超等^[10]对某管道受金丝接地极 干扰进行了计算研究,提出了分段隔离和提高阴极保 护输出是降低该管道受金丝干扰较为合理的缓解方 式;赵雅蕾等[48]确定了分段绝缘可降低隔离区域内管 段受到的高压直流干扰,但隔离区域外管道受到的干 扰反而加剧,即采用分段绝缘的缓解措施可能在管道 侧进一步引入新的干扰。也有研究者采用数值模拟计 算研究强制排流和直接排流的防护措施,如:蒋卡克 178 Vol.56 No.6 Jun. 2023

等^[12]采用 Beasy 模拟软件对上海天然气管网进行了干 扰评估与防护,由于上海天然气管网在城市周边,无法 采取敷设锌带的缓解措施,最终提出了调整10处阴极 保护输出和增设3座强排站可满足杂散电流干扰防护 的要求;对于接地排流,主要是在管地电位较高的位置 安装低电阻接地极体,将管道电位与附近电位进行"平 衡",降低管道干扰水平:付龙海^[35]研究了排流接地的 间距对管道高压直流干扰的影响,排流地床间距分别 为1 km 和5 km 时,缓解效果分别为21%和5%;赵雅 蕾等[48]也研究了在接地极与管道的垂直点两侧分别敷 设1,5,10,15 km的锌带,得到了锌带越长,保护范围 越大的结论。考虑到高压直流接地极单极运行极性的 不确定性,可在锌带与管道之间安装单向导通装置,以 降低锌带的使用寿命:对于新建工程,可将锌带与管道 同沟敷设,以大大降低工程费用。然而,对于管道方降 低高压直流干扰问题,无论是强制排流或者接地排流, 建设的成本和工作量均较大,而目前暂无成熟可借鉴 的缓解经验,可以在现场实际缓解前,通过数值模拟技 术进行计算和分析,同时需要结合现场实际施工条件 确定具有高可行性的优化防护方案^[49]。此外,为更好 评价排流效果,对于已建管线,建议在现场受接地极干扰 的近端管道和远端管道均安装智能电位采集仪,通过采 集仪对管道的电位和阴极保护电流密度进行监测,根据 施加排流防护措施前后管道电位和电流密度的变化情 况,以验证仿真计算的准确性和实用性:若将锌带接地排 流的仿真结果应用于现场,也可以在锌带位置安装智能 接地排流设施,对比接地极单极运行期间智能采集仪的 电位和锌带的排流量,以最终确定排流效果。

3 数值模拟技术迫切需要解决的问题与研究 方向

针对以上分析,尽管数值模拟技术可以进行高压 直流干扰预测与评估,但是鲜有文献报道将数值模拟 技术的缓解方案应用于现场。可见,面对管道受高压 直流干扰时的缓解难题,还需学术界和工程界进行更 加深入研究。因此,还需解决以下问题:(1)接地极和 管道的土壤参数是影响计算精度的主要问题,但是目 前的仿真模型中只收集接地极附近很小范围内的土壤 模型,且模型中将管道侧与接地极侧的土壤参数等同, 这将导致计算结果与实际情况存在很大差异;(2)管道 受接地极放电干扰时,从管体腐蚀角度,如何根据壁厚 和腐蚀深度精确地进行量化计算,从而合理地选择接 地极址或者确定管道与接地极的安全距离也需要深入 研究;(3)为获取准确的计算参数和几何模型,需电力 方和管道方建立沟通协调机制,如电网方和管道方需 分别提供准确的接地极参数和管道基础参数,电网方同 时需提供每次接地极单极运行时的入地电流,需根据每 次入地电流时管道的实际电位偏移情况,多次校核仿真 模型,确保准确计算模型后再进行缓解优化设计;(4)管 道侧的缓解措施不能单纯地从仿真模型时干扰程度较高 的位置设置缓解措施,还需要根据现场管道的实际情况, 是否具备施工条件等多种因素进行综合考虑。

4 结束语

对于埋地管道面临的高压直流干扰问题,目前的 数值模拟研究结果表明,减小接地极入地电流,接地极 址尽量选择在整体土壤电阻率较低位置,管道侧增设 锌带、强制排流和分段绝缘等措施均可以降低干扰水 平,这些缓解设计方案可以为实际工程提供有效指导。 考虑到实际受高压直流干扰的管道较长,土壤环境变 化大,接地极和管道的基础参数使用局限,还需进一步 完善数值模拟技术,以提高计算的准确性和缓解措施 的适用性。最后,电力方和管道方需要建立沟通与协 调机制,根据现场监测和入地电流信息,多次校核仿真 模型,从多方面共同入手破解高压直流干扰缓解难题, 以最终实现工程应用。

[参考文献]

- [1] 秦润之,杜艳霞,姜子涛.高压直流输电系统对埋地金属管道的干扰研究现状[J].腐蚀科学与防护技术,2016,28(3):263-268.
 QIN R Z, DU Y X, JIANG Z T. HVDC transmission system for buried metal pipes current status of interference research [J].Corrosion Science and Protection Technology,2016,28 (3):263-268.
- [2] 苏 磊,赵丹丹,傅晨钊.高压直流系统接地极电流的影响及抑制措施研究综述及展望[J].陕西电力,2017,45
 (3):27-32.

SU L, ZHAO D D, FU C Z. Review and prospect on influence of grounding electrode current in HVDC system and its suppression method [J]. Shanxi Electric Power, 2017, 45 (3):27-32.

- [3] 何衍和,肖磊石.高压直流输电系统接地极对油气管道 影响分析[J].贵州电力技术,2016,19(8):42-46.
 HE Y H, XIAO L S. Summary analysis of the impact of HVDC grounding electrode on oil and gas pipelines [J]. Guizhou Electric Power, 2016, 19(8):42-46.
- [4] 李丹丹.高压直流输电线路对某埋地金属管道的干扰规

材料保护

律研究[D].成都:西南石油大学,2014.

LI D D. Study on the interference law of HVDC transmission line to a buried metal pipeline[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.

[5] 吴江伟,宋 鹏.高压入地电流对埋地管道电位的影响 [J].电气工程,2017,5(2):196-203.

> WU J W, SONG P. Effect of high voltage incoming current on potential of buried pipeline [J]. Electric Engineering, 2017,5(2):196-203.

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

> 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.

[7] 孙建桄,曹国飞,韩昌柴.高压直流输电系统接地极对 西气东输管道的影响[J].腐蚀与防护,2017,38(8): 631-636.

> SUN J G, CAO G F, HAN C C. Influence of HVDC Transmission System Ground Electrode on West-East Gas Pipeline [J]. Corrosion & Protection. 2017,38(8):631-636.

 [8] 程 明,张 平.鱼龙岭接地极入地电流对西气东输二线 埋地钢制管道的影响分析[J].天然气与石油,2010,28
 (5):22-26.

> CHENG M, ZHANG P. Analysis of influence of ground entry current of Yulong Ling ground pole on buried steel pipeline of West - East gas transmission [J]. Natural Gas and Oil,2010,28(5):22-26.

[9] 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. The interference law of urban infrastructure to oil and gas pipeline and its identification method [J]. Corrosion & Protection, 2018, 39 (3):222-226.

 [10] 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):167-170.

> 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, 2017,41(6): 166–170.

[11] NICHOLSON P. High voltage direct current interference with underground/underwater pipelines: The 65th NACE annual conference[C]. Houston:NACE,2010.

[12] 蒋卡克,葛彩刚. 高压直流输电接地极对埋地管道的干

扰及防护措施研究[J].石油化工腐蚀与防护,2019,36(5):13-19.

JIANG K K, GE C G. Interference of HVDC grounding electrode to buried pipelines and protective measures [J]. Petrochemical Corrosion and Protection, 2019,36(5):13–19.

 [13] 顾清林,姜永涛,曹国飞,等.高压直流接地极对埋地管道的干扰监测及影响规律[J].油气储运,2021,40(1): 7-12.

GU Q L, JIANG Y T, CAO G F, et al. Interference monitoring and Influence Law of HVDC grounding pole to buried pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(1):7-12.

- [14] 秦润之,杜艳霞,路民旭,等.高压直流干扰下 X80 钢 在广东土壤中的干扰参数变化规律及腐蚀行为研究[J]. 金属学报,2017,54(6):886-894.
 QIN R Z, DU Y X, LU M X, et al. Study of Interference Parameters Variation Regularity and Corrosion Behavior of X80 Steel in Guangdong Soil under High Voltage Direct Current Interference[J]. Acta Journal of Metal, 2017, 54(6): 886-894.
- [15] DAI N W, CHEN Q M, ZHANG J X, et al. The corrosion behavior of steel exposed to a DC electric field in the simulated wet-dry cyclic environment[J]. Materials Chemistry and Physics,2017,192(5):190-197.
- [16] 熊 娟,张文艳,杜艳霞,等. 高压直流干扰下管线钢在 西南土壤中的腐蚀规律研究[J].油气田地面工程,2019, 38(12):97-102.
 XIONG J, ZHANG W Y, DU Y X, et al. Corrosion law study on pipeline steel in southwestern soil under high voltage direct interference[J]. Oil and Gas Field Surface Engineering, 2019,38(12): 97-102.
- [17] 应 斌. 高压直流输电系统接地极对长输管道安全运行的影响[J].油气田地面工程, 2014,5(7):23-24.
 YING B. Influence of ground pole of HVDC system on safe operation of long distance transmission pipeline[J]. Oil and Gas Field Surface Engineering, 2014,5(7):23-24.
- [18] GB/T 3805-2008,特低电压(ELV)限值[S]. GB/T 3805-2008, Extra low voltage (ELV) limit[S].
- [19] LAGACE P J, HOULE J L, GERVAIS Y, et al. Evaluation of the voltage distribution around toroidal HVDC ground eletrodes in n - layer soils [J]. IEEC Trans Power Deliv, 1988,3(4):1 573-1 575.
- [20] 陈水明,施广德,赵智大.圆环形直流输电接地极电流场分析[J].高电压技术,1994(1):3-7.
 CHENG Y M, SHI G D, ZHAO Z D. Analysis of ground electrode current field of circular DC transmission[J]. High Voltage Technique,1994(1):3-7.

180

[21] 钱 成. 直流接地极入地电流对埋地金属管道的电磁影 响分析[D]. 吉林:东北电力大学, 2018.

QIAN C. Research on the electromagnetic influence of ground current from DC earth electrode on the buried metal pipeline [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2018.

- [22] 商善泽. 直流接地极入地电流对埋地金属管道腐蚀影响的研究[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2016.
 SHANG S Z. Research on the corrosion influence of ground current from DC earth electrode on the buried metal pipeline
 [D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2016.
- [23] 路民旭,张 雷,杜艳霞.油气工业的腐蚀与控制[M]. 北京:化学工业出版社,2015.

LU M X, ZHANG L, DU Y X. Corrosion and control in the oil and gas industry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.

[24] 钱海军,刘小光,张树霞,等.管内阴极保护的数值模拟
 (Ⅱ)——有限差分法计算大口径管内的电位分布[J].
 化工机械,1997,65(5):36-38.

QIAN H J, LIU X G, ZHANG S X, et al. Numerical simulation of cathodic protection in Tubes (II) — Finite difference method for calculating potential distribution in large diameter tubes[J]. Chemical Machinery, 1997,65(5):36-38.

 [25] 张鸣镝,殷正安.有限差分法计算海底管道阴极保护时的电位分布[J].中国腐蚀与防护学报,1994,14(1): 77-81.

ZHNAG M D, YIN Z A. The finite difference method is used to calculate the potential distribution of submarine pipeline under cathodic protection [J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 1994, 14(1):77–81.

- [26] 邱 枫, 徐乃欣. 钢质贮罐底板外侧阴极保护时的电位 分布[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1996,8(1):29-36.
 QIU F, XU N X. Potential distribution on the outside of steel tank bottom plate under cathodic protection [J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 1996,8(1):29-36.
- [27] MUNN W D. CATHODIC PROTECTION ATTAINS NEW RECORD[J]. Highways & Heavy Construction, 1989, 33 (5):23-25.
- [28] DEGIORGI V G, III E, LUCAS K E. Scale effects and verification of modeling of ship cathodic protection systems [J].
 Engineering Analysis with Boundary Elements, 1998, 22 (1):41-49.
- [29] 梁旭巍,吴中元,孟宪级,等.油田区域性阴极保护计算 机辅助优化设计研究[J].天津纺织工学院学报,1998,8
 (5):90-94.

LIANG X W, WU Z Y, MENG X J, et al. Study on com-

puter aided optimization design of regional cathodic protection in oilfield [J]. Journal of Tianjin Textile Institute of Technology, 1998, 8(5): 90-94.

- [30] 古 形,白 锋,岳 晨,等.高压直流接地极入地电流 对埋地金属管道的腐蚀影响[J].腐蚀与防护,2019,40 (12):902-906.
 GU T, BAI F, YUE C, et al. Effect of high voltage DC grounding current on buried metal pipeline corrosion [J].
- Corrosion & Protection, 2019, 40(12):902-906.
 [31] 古 形,白 锋,刘震军,等.高压直流输电体系对埋地 金属管道腐蚀的影响参数[J].腐蚀与防护, 2019, 40 (7):68-73.
 GU T, BAI F, LIU Z J, et al. Influence parameters of HVDC system on buried metal pipeline corrosion[J]. Corro-

sion & Protection, 2019, 40(7):68–73.

- [32] 徐淑珍,朱子述. 芦潮港-嵊泗直流工程预选极址的接地极计算和分析[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(12): 1 494-1 497.
 XU S Z, ZHU Z S. Calculation and analysis of ground pole in preselected pole site of Luchao Port - Shengsi DC project [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33 (12):1 494-1 497.
- [33] 迟兴和,张玉军.直流接地极与大地中金属管道的防护 距离[J].电网技术,2008,32(2):71-75.
 CHI X H, ZHANG Y J. The protective distance between the DC grounding pole and the metal pipe in the earth[J]. Power Grid Technology, 2008, 32(2):71-75.
- [34] 胡亚博,吴志平,吴世勤,等. 高压直流接地极对埋地管 道腐蚀的影响和管控思考[J]. 油气储运, 2021, 40(3):
 256-261.
 HU Y B, WU Z P, WU S Q, et al. Consideration on the influence of HVDC grounding pole on buried pipeline corrosion

fluence of HVDC grounding pole on buried pipeline corrosion and its control [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(3):256-261.

- [35] 付龙海.高压直流接地极对临近管道的电磁干扰及防护 分析[J]. 电瓷避雷器, 2019, 2(1):89-94.
 FULH. Analysis of electromagnetic interference and protection of HVDC ground pole to adjacent pipeline[J]. Electric Porcelain Arrester, 2019, 2(1):89-94.
- [36] 房媛媛, 卢 剑. 直流接地极的地电流对埋地金属管道腐蚀影响分析[J]. 南方电网技术, 2013, 7(6): 71-76.
 FANG Y Y, LU J. Analysis on the Influence of HVDC Grounding Electrode's Ground Current on the Corrosion of Buried Metal Pipelines[J]. Southern Power System Technology, 2013,7(6):71-76.
- [37] 吕 超,张钰暄,李永发,等. 土壤环境对埋地金属管道 所受高压直流干扰的影响[J].腐蚀与防护,2020,41(4):

拉料保护

43-47.

LV C, ZHANG Y X, LI Y F, et al. Effect of Soil Environment on HVDC Interference to Buried Metal Pipeline [J]. Corrosion & Protection, 2020, 41(4):43-47.

[38] 董晓辉,杨 威,唐 程,等.特高压直流入地电流对附近杆塔地网腐蚀评估[J].高电压技术,2009,35(7).
 343-327.

DONG X H, YNAG W, TANG C, et al. Evaluation on corrosion of nearby tower network by UHV direct current [J]. High Voltage Technique, 2009, 35(7): 343-327.

[39] 冯南战,李志忠,李亨特,等.高压变电站接地网的腐蚀 防护与监测技术研究进展[J].腐蚀科学与防护技术, 2018,30(3):8-12.

FENG N Z, LI Z Z, LI H T, et al. Research progress of corrosion protection and monitoring technology for grounding networks in high voltage substations [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(3):8–12.

 [40] 王天正,徐 霞,郝晋堂,等.高压变电站接地网的远程 腐蚀监测技术[J].腐蚀科学与防护技术,2016,28(2):
 5-9.

> WANG T Z, XU X, HAO J T, et al. Remote corrosion monitoring technology for grounding network of high voltage substation [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2016, 28(2):5-9.

- [41] CSA Z662:19, Oil and pipeline systems[S].
- [42] DL/T 437-2012,高压直流接地极技术导则[S]. DL/T 437-2012, Technical guidelines for high voltage DC grounding poles[S].
- [43] DL/T 5224-2014,高压直流输电大地返回系统设计技术 规程[S].
 DL/T 5224-2014, Technical specification for design of HVDC earth return system[S].
- [44] 李 亚. 特高压直流输电接地极电流场分布特性研究[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2019.

LI Y. Research on current distribution characteristics of ground electrode in UHVDC transmission [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2019.

 [45] 曹国飞,顾清林,姜永涛,等.高压直流接地极对埋地管道的电流干扰及人身安全距离[J].天然气工业,2019, 39(3):125-132.

CAO G F, GU Q L, JIANG Y T, et al. Current Inference of HVDC ground electrode to buried Pipelines and its personal safety distance [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(3): 125–132.

 [46] 曹方圆,白 锋.直流接地极电流干扰下埋地金属管道防护距离影响因素研究[J].高压电器,2019,55(5): 136-143. CAO F Y, BAI F. Research on the factors influencing the protective distance of buried metal pipeline under the interference of DC earthed electrode current [J]. High - voltage Electrical Apparatus, 2019, 55(5):136-143.

[47] GB 50991-2014, 埋地钢制管道直流干扰防护技术标 准[S].

GB 50991-2014, Technical standard for DC interference protection of buried steel pipelines[S].

[48] 赵雅蕾,李自力,房翔鹏,等.高压直流接地极对埋地管道的干扰及防护研究[J].石油化工高等学校学报,2017,30(6):75-80.
 ZHAOYL,LIZL, FANGXP, et al. Research on inter-

ference and protection of high voltage DC grounding pole to buried pipeline [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2017, 30(6):75-80.

[49] 周 毅,姜子涛,马学民,等.陆上油气管道受高压直流 接地极干扰的腐蚀与防护实例分析[J].中国安全生产 科学技术,2019,15(7):156-160.
ZHOU Y, JIANG Z T, MA X M, et al. Case study on corrosion and protection of onshore oil and gas pipeline subjected to high voltage DC grounding electrode interference[J]. China Safety Production Science and Technology, 2019, 15 (7):156-160.

[编校:郑 霞]

(上接第 155 页)

- [74] LIU J H, LIU F H, XU J, et al. Effect of current density on interface structure and performance of CF/β - PbO₂ electrodes during zinc electrowinning[J]. Ceramics International, 2020, 46(2); 2 403–2 408.
- [75] 许健,周生刚,竺培显,等.碳纤维基体层状复合电极材料的电化学性能[J].功能材料,2016,47(10):10118-10123.
 XUJ, ZHOUSG, ZHUPX, et al. Electrochemical properties of layered composite electrode materials based on carbon fiber [J]. Journal of Functional Materials, 2016, 10
- [76] RAMS J, URENA A, ESCALERA M D, et al. Electroless nickel coated short carbon fibres in aluminium matrix composites [J]. Composites Part A Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(2):566-575.

(47): 10 118-10 123.

[77] XU J C, YU H, XIA L, et al. Effects of some factors on the tribological properties of the short carbon fiber - reinforced copper composite [J]. Materials and Design, 2004, 25: 489-493.