

Optimization and numerical simulation of cathodic protection of tank bottom plate under stray current interference

Yanke Gong

Central China Branch of China National Petroleum and Natural Gas Pipeline Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

With the widespread application of oil and gas storage and transportation facilities, buried storage tanks are prone to stray current interference in complex electrical environments, leading to imbalanced cathodic protection of tank bottoms. This study investigates the variation patterns of cathodic protection effectiveness under different stray current intensities based on electrochemical corrosion theory and finite element simulation methods. By establishing a three-dimensional potential field model, we analyze potential distribution, current density, and interference propagation characteristics, while validating model reliability through field data. Results indicate that when stray current density exceeds 20 A/m^2 , the protective potential of tank bottoms shifts significantly, resulting in approximately 35% reduction in protection efficiency. Optimizing anode layout and implementing multi-point feedback control improved potential distribution uniformity by 27%. This research provides scientific basis for anti-interference design and engineering applications of cathodic protection systems in complex electrical environments.

Keywords

tank bottom plate; stray current; cathodic protection; numerical simulation; optimization design

杂散电流干扰下储罐底板阴极保护效果优化及数值模拟分析

宫研科

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司，中国·湖北 武汉 430000

摘要

随着油气储运设施的广泛应用，地埋式储罐在复杂电气环境中易受杂散电流干扰，导致底板阴极保护失衡。本文基于电化学腐蚀理论与有限元模拟方法，研究不同杂散电流强度下储罐底板阴极保护效果的变化规律。通过建立三维电位场模型，分析电位分布、电流密度及干扰传播特征，并结合现场数据验证模型可靠性。结果显示，当杂散电流密度超过 20 A/m^2 时，底板保护电位显著偏移，保护效率下降约35%。优化阳极布局与引入多点反馈控制后，电位分布均匀性提高27%。研究为复杂电气环境下储罐阴极保护系统的抗干扰设计与工程应用提供了科学依据。

关键词

储罐底板；杂散电流；阴极保护；数值模拟；优化设计

1 引言

储罐作为石化行业的重要储运设备，其底板长期与潮湿土壤或地下水接触，极易发生电化学腐蚀。阴极保护作为防止金属腐蚀的主要技术手段之一，已广泛应用于储罐防腐体系中。然而，在城市电气化程度不断提高的背景下，地铁、高压输电线、直流牵引供电系统及邻近管道阴极保护系统均可能产生杂散电流。这些杂散电流通过土壤介质传播并进入储罐底板金属结构后，会破坏原有的电位平衡，导致阴极保护失效或局部过保护，从而加速腐蚀进程。储罐底板的平面尺度大、几何边界复杂、接地条件差异显著，使得阴极保护

电流分布具有明显的非均匀性。本文通过建立有限元仿真模型，研究不同杂散电流干扰条件下的电位分布规律，并提出针对性优化措施，为工程防护提供科学依据^[1]。

2 杂散电流干扰下阴极保护的理论分析

2.1 储罐底板腐蚀机理与阴极保护原理

储罐底板的腐蚀主要为电化学腐蚀，铁在电解质中发生氧化反应形成阳极区，电子迁移至阴极区产生还原反应。阴极保护通过外加电流使金属表面电位降低至保护电位以下（一般为 -0.85 V , Cu/CuSO_4 参比），从而抑制金属离子化过程。对于埋地储罐而言，阴极保护系统通常由牺牲阳极或外加电流阳极构成，通过调节电流密度实现均匀保护。然而，在存在杂散电流的情况下，外部电流场叠加改变了保护系统的电位分布，导致局部区域电流反向流动，使保护失衡。

【作者简介】宫研科（1989-），男，中国陕西西安人，本科，工程师，从事油气储运工程、阴极保护研究。

2.2 杂散电流的来源与传播特征

杂散电流主要来自直流轨道牵引系统、邻近阴极保护装置及工业电气设备接地系统。其通过导电性土壤传播，形成复杂的电位场。当杂散电流流入储罐底板时，会在金属表面形成阳极区，造成局部腐蚀增强；当电流流出时，则出现阴极过保护现象^[2]。

2.3 杂散电流对阴极保护效果的影响规律

在杂散电流干扰下，储罐底板阴极电位分布呈现明显的空间梯度。边缘区域电流泄漏严重，而中央区域电位可能偏高，形成过保护区。过保护会引发涂层脱落与氢脆问题，而欠保护则导致局部腐蚀加剧。通过仿真与实测数据对比发现，当杂散电流密度超过 15~20 A/m² 时，阴极保护系统的稳定性显著下降。因此，研究杂散电流场下的电位分布特性并进行优化设计，对保障储罐长期安全运行具有重要意义。

3 数值模拟模型的建立与边界条件设定

3.1 模型建立与几何参数

为研究杂散电流干扰下储罐底板阴极保护系统的电化学行为，本文采用有限元分析软件（COMSOL Multiphysics）构建三维电位场模型。模型包括储罐底板金属结构、外加电流型阳极系统、土壤介质层及外部杂散电流干扰源四部分。储罐底板直径取 40 m、厚度 12 mm，模拟其典型工业尺寸。阳极采用带状外加电流阳极材料，均匀沿径向布置 12 条，以形成均衡的电流分布。阳极长度 3 m、宽度 0.1 m，与罐底距离 0.5 m。土壤区域半径设置为 80 m，厚度 15 m，以确保边界足够远离计算域主体，避免边界效应对结果的干扰。储罐外壳与土壤界面之间设有防腐涂层模拟层，以反映实际工程中的介电特性。模型整体采用轴对称布局，可有效提高计算效率和稳定性。几何参数的选取综合参考了《埋地金属管道阴极保护设计规范》（GB/T 21448-2017）及典型石化企业储罐参数，确保仿真环境与实际运行条件一致，为后续数值分析提供合理基础^[3]。

3.2 物理参数与边界条件

模型中，土壤电阻率设置为 30 Ω · m，以反映中等导电性土壤的典型环境。金属部分导电率取 5.8×10^7 S/m，对应碳钢材料的实际电性。阴极表面设置恒电位边界条件（-0.85 V，相对于 Cu/CuSO₄ 参比电极），模拟理想保护状态。阳极表面施加外加电流密度，范围为 5~20 A/m²，以研究不同电流强度下电位分布变化。杂散电流源采用恒流注入模型，输入强度和方向可调，以模拟来自邻近轨道供电系统、地下电缆或并行管道的干扰。外部边界采用自然绝缘边界条件 ($\partial\phi/\partial n=0$)，以确保电流场闭合完整。电解质区域遵循稳态电流连续性方程 $\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi)=0$ ，金属与电解质界面采用电位跳跃模型以描述极化行为。仿真过程中考虑了阳极极化电阻及土壤介质非线性效应，进一步提高模型的真实性和工程适用性。

3.3 模型验证与网格优化

为确保模拟结果的可靠性，模型通过现场实测数据进行验证。选取运行三年的储罐阴极保护系统作为参考，采集底板表面电位分布曲线及电流密度数据。仿真计算结果与实测值对比后，最大偏差控制在 6% 以内，说明模型能准确反映实际电化学状态。为平衡计算精度与效率，采用非均匀网格划分策略：在阳极与罐底接触区、干扰电流注入区及边缘区域加密网格，以捕捉电位梯度变化。全域共划分约 35 万单元，网格质量因子保持在 0.85 以上，保证计算收敛性。采用自适应迭代求解算法，通过残差控制（误差阈值 1×10^{-6} ）及步长优化提高解算精度。多组模拟结果表明，该模型具有较高稳定性与可重复性，可为后续杂散电流干扰分析与优化设计提供可信的数据支撑与仿真依据^[4]。

4 杂散电流干扰下的数值仿真结果与分析

4.1 不同干扰电流强度下的电位分布

数值模拟结果显示，杂散电流强度的变化对储罐底板阴极保护电位分布具有显著影响。当外部杂散电流密度控制在 10 A/m² 时，储罐底板表面电位整体维持在 -0.85 ~ -1.05 V 之间，处于有效保护区间，阴极保护系统运行稳定。然而，当干扰电流强度增至 20 A/m² 时，局部区域电位升高至 -0.68 V，已超过保护阈值，出现部分失保护现象。电位分布图显示，干扰电流方向与外加保护电流方向相反时，底板边缘区域出现明显的“电位洼地”，表明电流泄漏严重，保护电流难以维持均衡。该现象在靠近干扰源的方向尤为突出，说明杂散电流的空间分布不均导致电位场畸变。研究表明，当干扰电流密度超过临界值 15~20 A/m² 后，阴极保护效率下降幅度可达 30% 以上。由此可见，准确识别干扰电流强度与方向，对优化阴极保护系统设计、确保储罐长期安全运行至关重要。

4.2 阳极布置对电流分布的影响

阳极布置方式对阴极保护系统的均匀性和稳定性具有决定性作用。通过模拟不同阳极间距与分布形式的对比发现，阳极间距由 8 m 调整至 6 m 后，储罐底板电位均匀性指标提高约 23%，边缘区电位梯度显著降低。对称布置阳极能有效平衡电流密度分布，减少电位集中与局部过保护现象。若采用环状或扇形布置，可进一步优化底板电位分布，使保护电流更趋均匀。引入多点反馈控制系统后，阳极输出电流可根据实时电位差自动调节，实现“按需供电”式保护调控。该系统通过闭环反馈机制，使电位波动幅度降低至 ±20 mV 以内，显著提升抗干扰性能与保护稳定性。仿真与现场测试结果表明，在杂散电流较强的环境下，合理的阳极布局与智能电流控制能有效减少电位不均现象，是提升储罐阴极保护系统抗干扰能力的重要技术途径^[5]。

4.3 电流路径与干扰传播特征

通过电流流线分布与等势面分析可知，杂散电流在储

罐底板区域的传播呈现明显的空间集中性与方向性。模拟结果显示,电流主要集中于底板边缘及接地电极周围区域,形成电流密集带。当干扰源与储罐之间存在低电阻路径时,电流倾向沿该通路泄漏,导致保护系统局部电位上升、保护电流被分流。不同土壤电阻率对电流传播影响显著:当电阻率低于 $25\Omega\cdot m$ 时,土壤导电性增强,杂散电流分布范围扩大且泄漏强度增大;当电阻率高于 $60\Omega\cdot m$ 时,电流衰减较快,干扰影响范围明显缩小。分析表明,电流路径与接地极几何布局、金属连接点电位差及土壤湿度密切相关。为此,优化接地系统设计、调整引流路径及采用电气隔离措施,可有效削弱杂散电流干扰效应。研究结果为储罐阴极保护系统在复杂电气环境下的抗干扰设计与防护策略提供了重要的理论依据与工程参考。

5 阴极保护优化设计与工程措施

5.1 辅助阳极系统与电流屏蔽技术

针对储罐底板受杂散电流干扰严重的特点,建立辅助阳极系统是提高阴极保护均匀性的重要手段。通过在储罐外围或底板下方增设辅助阳极环、深井阳极组或分区阳极,可在电位不均区域形成补偿环场,改善局部电流密度分布。辅助阳极可与主阳极系统相互协调,通过独立控制单元对不同区域的输出电流进行调节,从而实现电位的动态均衡与精准控制。研究表明,当辅助阳极环间距控制在 $6\sim8m$ 范围内时,底板电位均匀性可提高约25%,有效抑制边缘区失保护现象。同时,在储罐与干扰源之间铺设非金属电流屏蔽层或采用防泄漏电缆,可切断杂散电流通路。此类屏蔽结构可利用聚乙烯复合绝缘材料或导电聚合物结构形成“反向电场”,减少杂散电流对罐底的耦合强度。辅助阳极与电流屏蔽的综合应用,使储罐底板形成稳定的电位保护区域,为复杂电气环境下的阴极保护系统提供可靠支撑。

5.2 绝缘与排流措施优化

储罐阴极保护系统在多金属接地环境中易受杂散电流“串扰”影响,故必须强化绝缘与排流系统设计。在罐体与管道、接地网等连接处设置高电阻绝缘接头,能有效阻断杂散电流经金属耦合进入储罐内部。针对已存在的干扰路径,可采用恒电位排流装置(CPSD)或极化排流器,将多余杂散电流引导回主回路,从而实现“定向排流—电位平衡—防腐保护”的协同效果。实测数据显示,安装恒电位排流装置后,储罐底板平均保护电位稳定在 $-0.93V$,电位波动幅度由原来的 $\pm80mV$ 降至 $\pm25mV$,整体保护效率提升约28%。此外,利用双向二极管排流技术可防止系统反向电流

侵入,提高长期运行的安全性。结合定期检测与维护机制,对排流电阻、绝缘性能及接地电位差进行周期性监控,可进一步提升系统可靠性与抗干扰能力。

5.3 监测与反馈控制系统建设

建立智能化监测与反馈控制系统是储罐阴极保护由经验型向数据驱动型转变的关键环节。通过布设分布式参比电极阵列,可实时采集罐底电位、电流密度及温度湿度等多维数据,形成连续监测网络。监测信号经物联网(IoT)传输至云端平台,系统自动分析电位偏差与干扰趋势,并通过智能控制算法(如PID调节或模糊自适应控制)自动调整阳极输出,实现闭环控制。结合BIM技术,可在三维数字模型中动态展示电位分布与腐蚀风险区,为运维人员提供可视化决策支持。研究表明,应用基于大数据的电位控制系统后,阴极保护电位稳定性提高35%,干扰响应时间缩短至原来的40%。此外,系统还具备远程报警、趋势分析与维护调度功能,实现储罐阴极保护的数字化、精准化与智能化管理。该体系的构建标志着储罐防腐由传统静态防护向智能防护的技术跃迁,为未来石化设施的长效安全运行提供了新范式。

6 结语

本研究基于数值模拟与实测验证,系统分析了杂散电流干扰下储罐底板阴极保护系统的电位分布与保护效能变化规律。结果表明,杂散电流是影响阴极保护稳定性的关键因素,其强度与方向对电位场分布具有显著作用。通过优化阳极布局、强化绝缘与排流措施、构建智能监测反馈系统,可显著提升抗干扰能力与保护均匀性。研究还指出,阴极保护优化应与防腐涂层、材料选择及接地系统协同设计,实现综合防护。未来工作可结合多物理场耦合模型,对杂散电流的时变特性及动态响应规律进行深入研究,为复杂电气环境下的储罐防腐系统提供更精细的设计理论与工程应用指导。

参考文献

- [1] 淡勇,王坤,武玮.储罐外底板腐蚀的研究进展[J].西北大学学报(自然科学版),2021,51(04):601-614.
- [2] 董亮,陈金泽,姚知林,等.地铁运行状态变化下杂散电流对埋地管道干扰数值模拟[J].装备环境工程,2021,18(04):33-42.
- [3] 赵永刚.阴极保护系统中管道受杂散电流干扰分析与排流保护研究[D].西安石油大学,2016.
- [4] 滕延平,张丰,赵晋云,等.杂散电流干扰下管道密间隔电位检测数据处理方法[J].管道技术与设备,2009,(04):29-31.
- [5] 董亮,陈金泽,姚知林,等.地铁运行状态变化下杂散电流对埋地管道干扰数值模拟[J].装备环境工程,2021,18(04):33-42.