

长输管道阴极保护技术应用与优化

刘江涛 袁生财 张彩艳 (陕西延长石油集团榆林炼油厂, 陕西 榆林 718500)

摘要: 本文系统探讨了长输管道阴极保护技术的原理、应用现状及优化策略。通过分析阴极保护技术在实际工程中的应用案例,总结了当前存在的主要问题,并提出了相应的优化措施。研究表明,通过智能化升级、系统间干扰治理、新材料应用等技术手段,可显著提升阴极保护系统的效果与可靠性,为长输管道的安全运行提供重要保障。

关键词: 长输管道; 阴极保护; 优化策略; 智能监测; 腐蚀控制

中图分类号: TE988.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 035-0096-03

Application and Optimization of Cathodic Protection Technology for Long-Distance Pipelines

Liu Jiangtao, Yuan Shengcai, Zhang Caiyan (Yulin Refinery, Shaanxi Yanchang Petroleum Group, Yulin Shaanxi 718500, China)

Abstract: This paper systematically explores the principle, application status, and optimization strategies of cathodic protection technology for long-distance pipelines. By analyzing the application cases of cathodic protection technology in actual projects, the main existing problems are summarized, and corresponding optimization measures are proposed. The research shows that through technological means such as intelligent upgrading, interference management between systems, and the application of new materials, the effectiveness and reliability of the cathodic protection system can be significantly improved, providing an important guarantee for the safe operation of long-distance pipelines.

Keywords: Long-distance pipelines; Cathodic protection; Optimization strategies; Intelligent monitoring; Corrosion control

1 阴极保护技术原理与系统组成

1.1 阴极保护的基本原理

阴极保护技术的基本原理是通过向被保护金属施加阴极电流,使其表面发生阴极极化,电位负移至金属表面阳极的平衡电位,从而消除因化学不均匀性引起的腐蚀电池效应。从电化学角度分析,当金属发生腐蚀时,表面会形成阳极区和阴极区,阳极区发生氧化反应(金属溶解),阴极区发生还原反应。

阴极保护通过两种方式实现这一目标:牺牲阳极法是通过连接电位更负的金属(如镁、锌合金)与被保护管道形成原电池,牺牲阳极溶解提供保护电流;外加电流法则利用外部直流电源,将负极连接管道,正极连接辅助阳极,通过电源系统提供持续的保护电流。两种方法各有适用场景,需根据管道长度、土壤电阻率、电源可用性等因素综合选择。

1.2 阴极保护系统的关键组件

一个完整的阴极保护系统通常包含以下几个关键组成部分:①电源系统:对于外加电流法,恒电位仪是核心设备,它能根据参比电极反馈的电位信号自动调节输出,使管道电位维持在设定范围。传统整流器已逐步被高性能恒电位仪取代,现代设备具备远程监控和自动调节功能。②辅助阳极:是将保护电流导入土壤的载体,常见材料包括高硅铸铁、混合金属氧化

物(MMO)、石墨等。阳极的地床设计(浅埋或深井)直接影响电流分布和系统寿命。研究表明,MMO阳极具有消耗率低、电流输出均匀等优势,已成为新建项目的首选。③参比电极:是测量管道电位的基准,其稳定性直接关系到保护效果的准确性。饱和硫酸铜电极(CSE)是最常用的类型,在实际应用中需定期校准以确保测量精度。④电绝缘装置:包括绝缘接头、绝缘法兰等,用于防止保护电流非预期流失,是确保阴极保护系统有效运行的关键。统计表明,多数阴极保护系统故障与电绝缘失效密切相关。

此外,测试桩、电缆等附属设施也是系统不可或缺的组成部分,它们共同构成了完整的阴极保护体系。

2 长输管道阴极保护技术应用现状

2.1 阴极保护技术在长输管道中的应用范围

我国长输管道的阴极保护技术应用始于1958年的克拉玛依-独山子输油管道,经过数十年发展,已形成完善的技术标准体系。目前,几乎所有新建长输管道均配套建设了阴极保护系统,其应用范围覆盖原油、成品油、天然气等多种介质输送管道。

特别是在西气东输、中俄东线等重大管道工程中,阴极保护系统与管道本体同步设计、同步施工、同步投运,体现了“防腐层与阴极保护并重”的理念。这些系统大多采用外加电流法为主,牺牲阳极法为辅的

保护方案,针对特殊地段(如穿越段、站场)则采取个性化设计。

随着管道建设向沙漠、深海等复杂环境延伸,阴极保护技术也面临新的挑战。例如,在延长石油靖边段管输系统的集输管网中,管道长度达数百公里,环境条件恶劣,传统阴极保护系统出现了诸多不适应问题。

2.2 当前存在的主要问题与挑战

根据现场实践和研究成果,当前长输管道阴极保护系统主要面临以下几方面问题:①系统有效性不足。延长石油靖边段管输系统的案例分析显示,部分管段阴极保护电位不达标,保护率不足70%。即便以通电电位作为评价标准,保护率也偏低,如果以更严格的断电电位评价,保护率更低。导致这一问题的原因复杂多样,包括:阳极地床设计不合理、电绝缘装置失效、管道间电连续性不良等。②环境因素影响显著。阴极保护效果受环境因素影响显著,特别是土壤电阻率随季节变化的现象。在延长石油靖边段管输系统中,每年12月至次年4月期间,由于气候干燥和土壤冻结,阳极地床接地电阻显著增大,最大可达 40Ω ,导致恒电位仪输出受限,保护效果下降。这种季节性波动给阴极保护系统的稳定运行带来严峻挑战。③系统间干扰问题突出。随着管道网络日益密集,不同阴极保护系统之间的相互干扰问题愈发突出。在复杂输油气站场,多个阴极保护系统共存,形成复杂的干扰网络。研究表明,系统间干扰可使保护效率降低高达40%,导致部分区域保护不足,而部分区域又出现过保护现象。④传统管理方式效率低下。目前,许多在役管道的阴极保护系统仍依赖人工定期巡检,数据采集频率低,问题发现和处理滞后。在延长石油靖边段管输系统中,由于集输管网结构复杂,人工测试周期长,难以实时掌握系统运行状态。

3 长输管道阴极保护技术优化策略

3.1 系统设计与运行优化

针对阴极保护系统在实际运行中暴露出的问题,需从设计和运行层面进行全方位优化:

①阳极地床优化设计。阳极地床是影响阴极保护系统效果的关键因素。对于接地电阻过高的问题,可采用深井阳极地床替代传统浅埋阳极。研究表明,深井阳极地床活性区顶端距离地面的深度不应低于15m,这能有效减少季节变化对接地电阻的影响。在延长石油靖边段管输系统跨越芦河段的优化案例中,将浅埋阳极更换为深井阳极后,系统稳定性显著提升。此外,阳极地床的合理选址也至关重要。应避免高土壤电阻率区域,与管道及其他埋地构筑物保持安全距

离,同时考虑后期扩展和维护的便利性。对于已有系统,可通过添加降阻材料或增加辅助阳极数量等方式改善接地电阻。

②电绝缘与电连续性管理。电绝缘是阴极保护的基本前提。应定期检查绝缘接头、绝缘法兰的有效性,防止保护电流异常流失。延长石油靖边段管输系统跨越万亩林冲沟段的案例表明,管道保温铝板与抱箍扁铁直接接触等意外搭接是导致绝缘失效的常见原因。针对这一问题,可采取以下措施:a.定期进行绝缘性能测试,特别是在站场等复杂区域;b.对绝缘装置采取机械保护和防护措施,延长其使用寿命;c.加强新建项目绝缘装置安装质量监督,确保施工质量。

同时,保证被保护管道系统的电连续性也至关重要。管道之间的跨接质量直接影响电流分布和保护效果。应使用可靠的跨接技术和材料,并定期检查连接状态,避免因松动或腐蚀导致电连续性下降。

3.2 智能化监测与管理技术

随着物联网、大数据等技术的发展,阴极保护系统正经历向数字化、智能化的转型升级:

①远程监测系统。阴极保护远程监测系统集成了阴保检测技术、智能仪表技术、无线通信技术和计算机网络技术,可实现对通电电位、断电电位、交流电压等参数的精准测量、自动采集和远程传输。这类系统通常由智能测试桩、数据传输网络和主站服务器三部分组成,具有以下优势:a.实时掌握系统运行状态,及时发现异常;b.减少人工巡检工作量和成本,提高数据采集频率和准确性;c.支持历史数据查询和趋势分析,为优化决策提供依据。

②智能诊断与预警。基于大数据和人工智能技术,现代阴极保护系统可实现对潜在故障的智能诊断和预警。通过分析历史数据建立预测模型,系统能够在问题发生前发出预警,提示维护人员及时干预。例如,当排流电流连续多日超过额定值的80%时,系统可自动预警“可能存在接地极失效或杂散电流源增强”。

智能诊断系统还能够识别传统方法难以发现的隐性故障,如恒电位仪性能退化、防腐层破损加剧等。这种预测性维护模式相比传统的定期检修和事后维修,可显著提高系统可靠性和使用寿命。

3.3 杂散电流干扰防治技术

杂散电流干扰是影响阴极保护效果的重要因素,特别是在电气化铁路、高压输电线路附近的管道。针对这一问题,可采取以下综合防治措施:

①极性排流器与阴极保护的协同应用。传统单一的防护措施往往难以有效应对复杂干扰环境。创新性地采用极性排流器与阴极保护协同方案,可同时解决

杂散电流干扰和土壤腐蚀问题。在这一方案中：极性排流器负责动态阻断干扰电流，当管道电位因外部干扰升高时自动导通，将杂散电流导入接地极；阴极保护系统则维持管道电位的稳定，抑制电化学腐蚀；两者通过智能监测系统实现联动，根据实时数据动态优化运行参数。延长石油靖边段管输系统穿越太中银铁路段优化案例的实践表明，这一协同方案应用后，管道腐蚀穿孔率降为零，保护电位波动缩减 80%，效果显著。

②干扰区域的分级防护。根据杂散电流强度和作用方式，可将管道沿线划分为不同风险等级区域，采取有针对性的防护策略：强干扰区（如跨越电气化铁路段）：采用协同防护方案，增加监测点密度，提高系统响应速度；中等干扰区（如穿越 35KV 高压线段）：以防为主，防治结合，重点加强监测和定期评估；弱干扰区：以常规阴极保护为主，兼顾未来发展可能带来的干扰风险。这种分级防护策略既保证了防护效果，又优化了资源分配，提高了经济效益。

3.4 新型材料与技术创新

技术创新是推动阴极保护系统优化的不竭动力，近年来涌现出许多新材料和新技术：

①新型阳极材料。混合金属氧化物（MMO）阳极因其消耗率低、电流输出稳定等优点，逐步替代传统高硅铸铁阳极。在新建项目中，MMO 阳极的使用寿命可达 20 年以上，远优于传统材料。同时，针对高温环境开发的特种阳极材料也在不断发展，为苛刻条件下的管道防护提供了新选择。

②脉冲电流技术。脉冲电流阴极保护技术是近年来的研究热点。通过将连续直流改为脉冲输出，可提高电流分布均匀性，减少能耗。新疆油田的研究项目正在探讨脉冲电流技术在当地条件下的适用性，初步结果显示该技术有望改善高电阻率土壤中的保护效果。

③太阳能阴极保护系统。对于偏远无市电地区，太阳能阴极保护系统提供了一种可靠的电源解决方案。这类系统利用太阳能电池板发电，配合蓄电池组，可为阴极保护设备提供连续稳定的直流电源。尽管初始投资较高（约为交流电源的 4-5 倍），但运行成本低且环保无污染，在沙漠、戈壁等偏远地区具有显著优势。

4 结论

本文通过分析长输管道阴极保护技术的应用现状和存在问题，提出了系统化的优化策略，主要得出以下结论：第一，当前长输管道阴极保护系统普遍存在有效性不足、受环境影响大、系统间干扰严重等问题。

延长石油靖边段管输系统的案例显示，部分系统保护率不足 70%，季节性土壤电阻率变化可导致接地电阻波动达 300% 以上，严重影响保护效果。第二，通过阳极地床优化、电绝缘与电连续性管理等技术措施，可显著提升阴极保护系统的性能。将浅埋阳极更换为深井阳极，确保绝缘装置有效性和管道间电连续性，是解决当前问题的有效途径。第三，智能化转型是阴极保护技术发展的必然趋势。远程监测系统能够实现阴保参数的实时采集和传输，大幅提升管理效率；智能诊断与预警技术则可在问题发生前识别隐患，实现预测性维护。第四，针对复杂的杂散电流干扰环境，采用极性排流器与阴极保护协同防护方案，可有效抑制干扰，提高系统稳定性。实践证明，该方案可使保护电位波动减少 80% 以上，显著降低腐蚀风险。

5 结束语

长输管道阴极保护技术的优化是一个系统工程，需要从设计、运行、监测、维护等多个环节入手，结合具体工况采取有针对性的措施。随着新技术不断涌现和管理水平持续提升，阴极保护技术将在保障长输管道安全运行方面发挥更加重要的作用。

参考文献：

- [1] 冯朋鑫, 宋考平, 于淑珍, 等. 苏里格气田集输管道阴极保护运行检测及优化案例分析 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(06): 676-682.
- [2] 李自力, 刘建国, 崔淦, 等. 基于宏电池腐蚀原理的埋地管道阴极保护电位极限研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(01): 144-150.
- [3] 刘智勇, 杜艳霞, 张国权, 等. 交直流杂散电流干扰下埋地管道的腐蚀行为与防护技术进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2021, 33(04): 459-468.
- [4] 张丰, 陈振华, 陈旭, 等. 基于物联网的油气管道阴极保护智能监测系统的设计 [J]. 油气储运, 2022, 41(05): 554-560.
- [5] 杜艳霞, 李晓刚, 刘智勇. 深井阳极地床在区域性阴极保护中的应用与优化 [J]. 材料保护, 2019, 52(08): 134-138.
- [6] 胡士信, 石薇, 郑辉. 我国管道阴极保护技术现状与未来发展 [J]. 油气储运, 2017, 36(10): 1081-1087.
- [7] 石薇, 郑辉, 李岩, 等. 基于断电电位测试的埋地管道阴极保护有效性评价方法 [J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(11): 1-7.

作者简介：

刘江涛 (1976-), 男, 汉族, 陕西靖边人, 本科, 工程师, 研究方向: 石油化工, 储运, 安全。