

长输天然气管道阴极保护监测方法与效率提升研究

齐 伟 (中油国际管道公司, 北京 100000)

摘 要: 长期运行的长输天然气管道易受土壤腐蚀和环境因素干扰, 使管道安全风险上升。本文围绕阴极保护在管道运行时的应用现状, 剖析现有监测手段的局限以及运行中的问题, 提出结合数据采集与分析的监测策略, 运用实时监测、故障诊断、运行调度优化及管理制度完善等方法, 开展提升阴极保护效率的研究。研究发现, 改进监测手段与管理策略能大幅提升管道阴极保护效能, 减少腐蚀隐患, 维持长输天然气管道的安全稳定运作。

关键词: 天然气管道; 阴极保护; 监测方法; 效率提升

中图分类号: TE988

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 030-0118-03

Study on cathodic protection monitoring method and efficiency improvement of long distance natural gas pipeline

Qi Wei (Petrochina International Pipeline Company., Beijing 100000, China)

Abstract: Long-term operation of long-distance natural gas pipelines is susceptible to soil corrosion and environmental disturbances, increasing safety risks. This study examines the current application of cathodic protection in pipeline operations, analyzes limitations of existing monitoring methods and operational challenges, and proposes a monitoring strategy integrating data acquisition and analysis. The research employs real-time monitoring, fault diagnosis, operational scheduling optimization, and management system improvements to enhance cathodic protection efficiency. Findings demonstrate that optimized monitoring techniques and management strategies can significantly improve pipeline cathodic protection.

Keywords: natural gas pipeline; cathodic protection; monitoring method; efficiency improvement

作为能源运输关键基础设施, 长输天然气管道的持续安全运作关乎能源供应与经济发展, 在复杂地质和多变环境下, 管道易受腐蚀威胁, 阴极保护作为关键的一种防护手段, 其效果直接关系到管道的安全与使用寿命。开展阴极保护监测方法与效率提升策略的研究, 可精准评估管道腐蚀风险, 优化资源配置, 提升运行管理质量, 对保障天然气运输安全、削减维护成本和提升管道使用年限来说意义重大。

1 长输天然气管道阴极保护现状与问题

1.1 长输天然气管道阴极保护现状

在国内能源输送系统中, 长输天然气管道处于核心位置, 阴极保护技术作为主要防腐措施得以广泛应用, 管道大多采用牺牲阳极和外加电流相融合的保护办法, 通过管控管道表面电位来抑制金属的腐蚀, 处于不同地质环境时, 阴极保护系统能切实降低管道表面的腐蚀率, 增加管道的使用期限。伴随管道规模拓展和运行里程增加, 各类防腐材料、保护装置及监测设施日益完备, 为管道安全运行筑牢技术根基, 打造出覆盖管道全程的综合防护格局。

1.2 运行中存在的主要问题

在长输天然气管道实际运行时, 阴极保护存在一定缺陷, 比如阴极保护监测系统有一些缺陷, 实时数

据采集能力欠佳, 致使管道异常状况难以实时察觉, 加大腐蚀和事故的潜在风险; 管道故障诊断与分析方法匮乏, 难以有效实施预测性维护; 局部腐蚀和损伤无法预先处理, 危及管道长期安全; 管网运行调度未达优化, 流量改变对阴极保护效果造成影响, 造成部分管段防护不充分, 削弱整体防护效率。此外, 管理制度与操作流程存在欠缺, 整体管控能力欠佳, 维护执行难以达到标准化要求, 管理效率与执行效果均受限。

2 长输天然气管道阴极保护监测方法

2.1 电位测量法

电位测量法借助在管道表面布置参考电极, 实时监控管道和土壤间的电位差, 完成对阴极保护状态的连续评定。一般在管道沿线每隔 15 ~ 20km 设置测点, 测量电位范围为 -0.85 ~ 1.2V, 可精准体现不同土壤电阻率情况下的保护成效。测量系统应适应 -20 ~ 50℃ 的温度区间, 要将土壤湿度变化时的电位偏差控制在 $\pm 0.03V$ 以内, 同时保障长期监测具备稳定性和重复性, 借助定期对参考电极进行校准以及开展数据校验, 进一步提升测量精准度, 保证沿线监测数据可靠, 为优化保护策略提供助力^[1]。该方法可借助历史数据搭建电位变化趋势模型, 对管道腐蚀敏感区域

表 1 实施前后监测系统关键参数对比

参数指标	优化前	优化后	提升效果
电位测量精度	±0.05 V	±0.03 V	提高数据可靠性和趋势分析精度
数据采集频率	15~20 min/次	5~10 min/次	实时性提升，异常点响应更快
电流监测范围	100~3000 A	100~5000 A	覆盖高负荷段，保护均衡性增强
工作温度范围	-20~50℃	-40~120℃	扩展环境适应能力，保证极端条件下稳定运行
传输方式	有线传输	LoRa/NB-IoT	提高数据覆盖范围和远程监控能力
异常告警响应时间	1~2 h	<30 min	提前干预管段异常，降低腐蚀风险

预先发出警报，降低运营风险。

2.2 电流密度测量法

电流密度测量法通过测定管道表面各部分的阴极保护电流分布情况，识别保护过度或不足的区域，进而优化保护参数，典型电流采集值处于 100 ~ 5000A 区间，采样间隔 2 ~ 3 个月，可对沿线腐蚀敏感区域与关键接口段的防护状况进行监测。该方法可与管道埋深、涂层电阻、管径变化等技术指标相整合，实现对保护均匀性和局部保护效率的综合剖析，还能对异常电流区段开展重点巡查与调控，电流密度监测既能增强管道防护效果，为长期寿命评估构建数据基础，并且凭借比较不同管段电流的波动情形，助力优化阴极保护电流的分配，增强系统运行效率。

2.3 遥测监控法

遥测监控技术则依靠在线传感器与无线数据传输装置，实时监测管道沿线阴极保护状况，传感器能在 -40 ~ 120℃温度、5 ~ 95%RH 湿度的复杂环境中正常工作，采用 LoRa 或者 NB-IoT 技术开展数据传输工作，传输距离达 10 ~ 20km，速率为 10 ~ 100kbps，实现监测点与控制中心的持续连接^[2]。系统可自动收集管道电位、电流及环境参数，当数据出现异常时启动智能预警，依托数据分析平台，开展趋势预测并精准定位异常情况，加快监测响应并增强管道安全保障，而且利用积累历史数据并开展模式分析，依托历史数据积累与模式分析，优化维护方案，降低人工巡检频次和维护费用。

2.4 无损检测技术

利用无损检测技术来评估管道涂层和金属基材的腐蚀状态，综合电化学噪声、超声波和涡流检测等方式，能分析管道内部缺陷及腐蚀发展趋势，常见检测频率设定在 100 ~ 500Hz，扫描速度设定为 0.5mm/s，能在涂层厚度变化幅度为 ±0.3mm 的区间内识别局部

腐蚀现象。该技术能在 -20 ~ 50℃的高低温环境中应用，可应对沿线复杂地质状况，助力管道安全管理与预测性维护策略落地，借助定期无损检测以及数据对比，为管道防腐优化提供精准依据，并且延长管道使用时长，还可在管道关键节点构建监测档案，为长期腐蚀管控提供科学支撑。

3 长输天然气管道阴极保护效率的提升策略

3.1 建设实时监测系统，实现智能预警

搭建覆盖管道沿线的实时监测系统，可对阴极保护状态开展连续观测，实现潜在腐蚀和异常状况的早期察觉，系统整合在线传感器、电位测量以及电流密度监测功能，经无线传输平台把数据传至监控中心，可对管道保护状态展开动态分析，监测系统可在复杂温湿度环境中稳定运转，确保数据连贯且可靠。实时监测既增强了管道运行的安全性，还为预测性维护奠定了数据基础，让保护策略的调整更具科学性与精准性，实施前后监测系统关键参数对比具体情况见表 1。

某西部管道借助在沿线布置实时监测装置，实现对重点管段电位和电流变化的不间断监控，当数据异常出现，监测中心会马上发出警报，调配维护人员前往现场检查和调整，切实防止局部腐蚀蔓延，并且削减了传统人工巡检的频率与成本。该系统借助历史数据对比，预估了管道沿线高风险区域的潜在演变趋势，为全面防腐管理给予了可信依据，可对管道沿线长期运行态势进行分析并优化维护方案，让防护举措更为精准科学，且与调度系统和信息化管理平台协同联动，实现对异常事件的快速响应及决策支撑，极大提升管道运行安全性和管理效率。

3.2 开展故障诊断分析，推进预测维护

故障诊断与预测性维护借助对监测数据开展综合剖析，找出管道阴极保护系统的潜在问题，且提前规划维修方案，综合电位、电流、涂层状态与环境因素

等多维信息开展数据分析,参考历史趋势创建模型,预估可能出现腐蚀或保护不达标的区域^[3]。诊断系统一般能处理 100 ~ 500 条传感器数据流,将计算响应时间控制在 10 ~ 12h 之间,可对关键节点实施重点监测并迅速干预,进而在问题恶化前采取应对举措,减少突发故障和意外事件,数据模型可衡量不同运行状况下保护效率的变动,为阴极保护参数的动态调整提供支撑。

一条位于华北的长输管道借助构建故障诊断平台,对沿线管段电位波动和涂层异常数据开展长期跟踪剖析,借助预测性维护的指引,管理人员可预先安排局部维修工作以及阴极保护参数的调节,让管道在不同季节和环境状况下始终处于安全保护状态。该平台进一步融合了管道沿线的气温、土壤湿度以及流量变化数据,使维护计划与运行条件相互协同,提升了维护资源利用率,极大增强了管道防腐的可靠性,同时凭借数据可视化和分析报告为管理决策给予支撑,让管道沿线风险评估更科学精准。

3.3 优化管网运行调度,强化流量控制

优化管网运行的调度方案能有效增强阴极保护效果,通过科学调配天然气流量与压力,使管道各段的电化学环境保持平稳,降低局部保护失衡现象。调度系统要结合管道沿线的流量、压力、温度以及土壤电阻率等指标,实现动态管控,一般流量调整区间为设计流量的 80% ~ 120%,压力调节的精度可达 ± 0.05 MPa,让电位维持在 $-0.85 \sim 1.2$ V 区间,保障沿线各段都处于有效保护状况,系统可结合监测数据即时优化外加电流输出,降低局部保护出现过量与不足情况的风险^[4]。

在国内实践中,某东部管道借助优化调度流程,科学分配沿线高负荷段的流量,还依据监测数据调节外加电流输出,优化调度既降低了局部电位过低的风险,又削减了保护系统的能耗,实现安全性与经济性的均衡。借助实时监测电位与流量的变动,调度中心可于流量高峰时段灵活调节参数,让阴极保护效果在不同运行条件中维持稳定,提升了管道整体防腐管理成效,调度优化与管道智能监测平台深度融合,可开展历史数据解析和趋势预估,为制定长期运行策略提供支撑,大幅提升管网管理的科学性与可靠性。

3.4 完善管理制度流程,提高综合管控水平

构建健全的管理制度和操作流程可明显提升阴极保护系统整体效率,制度设计要囊括巡检、维护、数据采集、分析与应急处理各环节,保证各环节职责分明、操作有序,管理流程需实现对实时监控数据的分析与反馈支持^[5]。一般将数据处理响应时长控制在 10

~ 12 h,可根据管道实际状态把巡检和维护周期调节到 2 ~ 3 个月,同时结合沿线土壤的电阻率、温度以及管道埋深等指标,确保保护策略精准实施,实施标准化管理,可降低人为操作失误,增强管道沿线防护工作的可控性与持续性,构建闭环控制体系,保障管道阴极保护效果在各种环境条件中稳定可靠。

在国内多条长输管道应用中,某北方管道优化管理制度与流程,将巡检、维护和数据分析深度融合,实现了对管道沿线阴极保护状况的持续跟进,管理中心可在数据异常或局部电位偏低时迅速调整维护计划,并且组织重点巡检以及实施局部保护优化举措,让管道腐蚀问题及时解决。制度优化后,管道维护执行更趋标准化,综合管控能力显著增强,同时降低了人工调度与管理的滞后性,提高整体防腐效能和安全保障水准。

4 总结

实施优化举措,采取优化手段,可显著增强长输天然气管道阴极保护效能,保障其安全稳定运行。伴随智能监测技术与大数据分析的进步,管道防腐管理将实现更高的精准度与效率,借助实时数据采集、故障预判和动态调度的改良,可更早识别并干预管道沿线的腐蚀风险,同时提升管理流程的标准化与信息化水平,进而进一步削减人为操作误差和维护成本。未来防腐体系会朝着数字化、智能化以及全生命周期管理的方向迈进,实现管道运行安全、经济且可持续的综合目的,为国内能源输送打下坚实基础。

参考文献:

- [1] 董增寿,白雪,王兴.一种天然气长输管道阴极保护监测系统的设计[J].内蒙古科技与经济,2022(12):109-110.
- [2] 江永强.长输天然气管道受杂散电流干扰的监测及防护探讨[J].石油和化工设备,2022,25(03):96-98.
- [3] 丁融.长输天然气管道阴极保护常见缺陷与解决措施研究[J].现代工程科技,2025,4(01):113-116.
- [4] 赵珺,鬲新鹏,刘剑,等.阴极保护数据记录仪 uDL2 在天然气埋地管道杂散电流采集方面的作用[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(24):134-136.
- [5] 陈川,寇爽.埋地长输天然气管道阴极保护系统常见故障分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(14):41-43.

作者简介:

元伟(1989-),男,汉,山东莱芜人,本科,工程师(中级),长输管道线路工程师,合资公司线路组组长,研究方向:长输天然气管道的运行维护,(管道完整性,阴极保护,维抢修)。