

智能化阴极保护在油气长输管道管理中的应用

杨丽婷（山东省天然气管道有限责任公司，山东 济南 250000）

张军礼（山东省中远天然气技术服务有限责任公司，山东 济南 250000）

摘要：随着油气长输管道规模扩大与环境复杂化，管道腐蚀防护面临严峻挑战。阴极保护作为控制外腐蚀的关键技术，其传统管理模式存在效率低、预警滞后等问题。物联网、大数据与人工智能等智能化技术的发展，为阴极保护系统升级提供了新路径。智能化阴极保护通过实时感知、精准分析与主动调控，可实现腐蚀状态的智能诊断与闭环管理，显著提升管道防护的时效性和预见性。本文探讨了该系统的关键技术、架构及演进方向，阐明其对保障管道安全、推动智能运维的重要意义。

关键词：智能化；阴极保护；油气长输管道；管理；应用

中图分类号：TE988.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2026）002-0091-03

Application of Intelligent Cathodic Protection in Management of Oil and Gas Long-distance Pipeline

Yang Liting (Shandong Natural Gas Pipeline Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Zhang Junli (Shandong COSCO Natural Gas Technology Service Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: With the expansion of long-distance oil and gas pipelines and the complexity of environment, pipeline corrosion protection is facing severe challenges. As a key technology to control external corrosion, the traditional management mode of cathodic protection has some problems, such as low efficiency and delayed early warning. The development of intelligent technologies such as Internet of Things, big data and artificial intelligence provides a new path for upgrading cathodic protection system. Intelligent cathodic protection can realize intelligent diagnosis and closed-loop management of corrosion state through real-time perception, accurate analysis and active regulation, and significantly improve the timeliness and predictability of pipeline protection. This paper discusses the key technology, architecture and evolution direction of the system, and expounds its important significance for ensuring pipeline safety and promoting intelligent operation and maintenance.

Keywords: intelligence; Cathodic protection; Long-distance oil and gas pipeline; Management; app; application

油气长输管道作为国家能源供应的战略性基础设施，其安全高效运行关乎国计民生。随着管道管理向数字化、智能化转型，阴极保护技术迎来了全新的发展机遇。将物联网、大数据、人工智能等智能技术深度融合于阴极保护体系，能够构建实时监测、精准评估、智能调控的全生命周期管理新模式。这一变革不仅能够显著提升管道腐蚀防护的精准性和时效性，延长管道使用寿命，更可推动管道管理从传统被动维护向主动智能运维转变，为保障国家能源安全、提升管道运营效益注入强大科技动能，具有重要的战略价值和现实意义。

1 阴极保护技术与智能化发展概述

1.1 阴极保护技术的基本原理与分类

阴极保护技术是通过施加外部电流，使金属管道电位负向极化至免蚀区，从而抑制其电化学腐蚀的防腐方法。主要分为两种手段：强制电流法与牺牲阳极法。强制电流法依托外部直流电源和辅助阳极，向管道施加可控的保护电流，适用于长距离、大口径、高电阻率环境，具有输出可调、保护范围广的优点。牺

牲阳极法则利用电位更负的金属（如镁、锌）与被保护管道连接，通过自身的电化学腐蚀提供的电流保护管道，通常用于短距离、低电阻率环境，以及复杂区域的局部保护。二者相辅相成，互为补充，共同构成了长输管道阴极保护体系。

1.2 智能化技术在管道保护中的演进

早期阶段，阴极保护测试电位测试主要依赖人工完成，通过人工手段耗时长、采集数据量少、数据记录难，恒电位仪输出调控困难，需要通过反复测试、试凑等手段确保管道阴极保护的有效性。随着干扰环境的复杂化，对阴保数据量需求的剧增，人工方式远远不能满足决策需求，阴极保护逐渐进入到数字化阶段，引入了自动采集技术和简易的有线无线传输，使得电位记录变得轻松，减少了大部分人工测试时间，增大了数据量，实现了长周期连续监测。随着物联网技术的进一步发展，对于远传、精准化的需求越来越高，通过更高精度的传感器、更可控的晶体管、更稳定快捷的通讯方式、更便利的供电方式等多方面的变革，多种智能化阴保设备如智能恒电位仪、智能测试

桩、智能阴极保护平台等逐渐应用起来。近年来，阴极保护技术更是与大数据、云计算与人工智能算法的有了进一步融合，使得系统不仅能实现大量阴极保护数据的汇聚，更能进行智能分析、AI预测和数字孪生，逐步向智慧阴保迈进，实现了从状态监测向趋势预测、风险评估与辅助决策的跨越，显著提升了管道腐蚀防护的预见性和主动性。

2 智能化阴极保护系统的核心架构

2.1 多维度数据采集网络的感知层

智能化阴极保护系统的基础是多维度的数据采集网络。电位采集器作为最常见的电位采集终端部署于测试桩、恒电位仪、干扰缓解设施等关键位置，实现对管道腐蚀防护状态的全方位感知。极化探头作为电位采集器重要的感知单元，由参比电极和不同型号的试片构成，一般试片成组出现， 1cm^2 试片适用于测试交流干扰情况， 6.5cm^2 适用于测试阴极保护有效性。通过极化探头的可感知包括通电电位、断电电位、交流干扰电压、交流电流密度、直流电流密度、自然电位、等核心阴极保护参数。同时，可集成环境温度、土壤电阻率等干扰因素监测数据。这些实时、连续的多源异构数据，共同构成了评估管道阴保有效性、识别保护缺陷与外部干扰的基础数据池。

2.2 高效稳定数据传输通道的网络层

智能化阴极保护系统当中，网络层主要担负起现场监测数据向后台平台传送的任务，它的运行是否稳定，直接影响到系统应用的效果。从实际工程情况看，油气长输管道沿线环境复杂，不同区段在通信条件、电源保障、维护便利性上存在较大差异，单一通信方式很难满足全线需求，因此在建设过程中一般会采用多种通信手段相结合的方式。站场、阀室等基础设施条件较好的地方多采用有线网络或者4G、5G的通信方式来完成运行参数的实时上传，从而满足连续监测和远程控制的需要。对于沿线分布比较分散的测试桩，由于供电条件受限，一般结合太阳能供电系统，采用低功耗通信模块，采用定时采集、分批上传的方式传输重要数据，保证基本监测要求的同时也考虑系统的稳定性、经济性。在运行过程中，通信中断和信号不稳定时常出现。为了减少此类问题对数据完整性的影响，系统一般会在前端设备中设置本地存储功能，等通信恢复之后再行数据补传，从而保证监测数据的连续性和可追溯性，给后续分析和决策提供可靠的参考依据。

2.3 数据处理与智能决策中心的平台层

平台层是智能化阴极保护系统集中管理、分析应用的核心，它的主要作用是对分散采集的数据进行统一处理，形成运维人员可以理解和使用的信息化成果。

平台对不同来源数据整理分类后用曲线、表格形式展示管道电位变化、干扰情况和设备运行状态，使运行人员可以很快掌握总体防护水平。在此基础上，根据现行规范要求以及以往的运行经验，对监测数据进行对比分析，对欠保护、过保护或者异常干扰等情况进行提示。分析结果更多的是起辅助判断的作用，运维人员缩小排查范围，提高问题处置效率。部分系统可以依据分析结果，给恒电位仪输出参数提出调整建议，在人工确认之后再行调节，从而减少频繁的人工现场试调。就运行效果而言，通过平台集中管理和分析可以大大降低人工统计、反复核算的工作量，使阴极保护管理从事后检查向过程管控转变。

2.4 智能阴保系统的应用与反馈

结合实际运行情况可知，智能化阴极保护系统在日常管道管理中已经显现出其应用价值。运维人员通过持续监测关键参数，可以及时掌握管道防护状态的变化情况，对异常趋势做到早发现、早处理，减少问题长期积累带来的风险。系统运行时，监测、分析、调整之间就形成了一个明确的反馈关系。平台根据采集到的数据得出分析结果，现场设备根据调整要求对参数进行调整，调整后的效果再通过后续的监测进行验证。一定程度上减少了以往依靠经验反复调试的情况，使阴极保护运行更加平稳。

3 智能化阴保技术的应用困境与对策

3.1 设备可靠性与环境适应性挑战

从工程应用角度来讲，智能化阴极保护设备长期处于野外工作环境，其可靠性问题不容忽视。由于土壤条件的变化、温差的影响、长期运行老化等原因，部分监测设备在使用过程中会出现测量误差变大、信号不稳定的现象，从而给数据判断带来一定的干扰。同时野外供电条件较弱也是影响系统稳定运行的因素。太阳能供电设备在连续阴雨或者冬季光照不足的时候，会降低供电能力，从而引起数据中断。在工程实施过程中要合理选择设备型号，提高防护等级，根据运行情况定期校验、维护。加强设备状态管理、分级维护，可以减少设备故障给系统整体运行带来的影响。

3.2 数据安全与隐私保护挑战

伴随着智能化阴极保护系统的大规模应用，有关运行数据的安全问题也引起了人们的注意。系统运行过程中会涉及到管道运行状态、设备参数等信息，如果数据在传输或者存储过程中出现泄露或者被篡改，会对管道的安全运行造成不良影响。在实际的管理中要从技术、制度两方面加强防护措施。技术层面用加密传输、访问权限控制等方式保证数据传输和存储的安全性；管理层面要确定数据使用和管理的责任，规

范平台的操作流程,防止人为的误操作或者违规使用。多方面措施共同落实才能保证系统应用推进的同时,数据安全可控。

3.3 标准体系缺失与复合型人才培养

当前,智能化阴极保护技术的规模化应用正受到标准体系滞后与专业人才断层的双重制约。在标准方面,从智能极化探头、智能测试桩等前端感知设备的技术规范,到各类设备间的通信协议、采集数据的格式定义,再到上层平台的应用接口与智能分析算法的性能评价,均缺乏统一的国家与行业标准。这种标准的缺失导致不同厂商的系统难以互联互通,数据共享与融合分析存在壁垒,系统的工程质量与可靠性评估也缺乏公认依据,严重制约了产业的健康发展。与此同时,该领域对复合型人才的需求极为迫切,传统腐蚀防护工程师往往缺乏物联网架构、大数据分析机器学习算法的知识,而信息技术人才又对电化学腐蚀机理、阴极保护工程实践知之甚少。解决人才短缺问题需要多方协同发力。在高等教育层面,应推动材料、自动化、计算机等学科的交叉融合,设立相关课程与研究方向。企业需建立系统的在职培训与技能认证体系,加速现有人才的知识更新。

4 智能化阴保技术的演进方向

4.1 数字孪生与全生命周期管理

数字孪生技术将成为未来智能化阴极保护系统的核心演进方向。通过整合高精度地理信息、管道本体数据、多源传感信息及环境参数,在虚拟空间构建与物理管道完全对应的动态数字孪生体。该孪生体能实时映射管道全线的极化状态、保护电流分布与腐蚀风险,并模拟不同环境条件、调控策略及突发干扰下的系统响应。基于此,可实现管道从设计、施工、运维到退役的全生命周期数字化管理,在设计阶段优化保护方案,在运行阶段预测长期性能衰减,并为新建、改线等重大决策提供高保真仿真验证平台,从而全面提升管理的预见性与经济性。

4.2 人工智能深度应用

人工智能在阴极保护领域的应用将从当前的状态识别与预警,向更深层次的自主决策与因果发现演进。一方面,基于深度强化学习的智能体将能实现对大规模分布式阴极保护系统的自适应协同优化控制,动态平衡保护效果与能耗。另一方面,利用图神经网络、知识图谱等技术,系统可深度融合管道物理模型、化学机理与海量运行数据,超越传统相关性分析,揭示复杂环境因素导致腐蚀速率突变的深层因果机制。这将推动阴极保护从基于经验的“阈值报警”模式,升级为基于机器认知的“机理驱动”的智能诊断与根因

分析模式,显著提升应对复杂耦合失效的决策水平。

4.3 绿色低碳技术融合

管道阴极保护长期运行时,强制电流设备的用电量以及牺牲阳极的消耗,一直为运维管理所重视。智能化监测手段使用之后,运营者就可以更直接的看到管道实际防护的情况,这样给减少不必要的能耗创造出了条件。通过对通电电位、断电电位以及电流的变化情况进行分析可以及时发现过保护现象,对恒电位仪输出值进行调节,避免长时间处于偏高的保护水平,从而达到节约电力消耗的目的。部分偏远管段采用太阳能供电的方式为测试桩、监测设备提供能源支持,在实际运行中取得较好的效果。利用智能系统对供电状况以及设备运行情况实施监测,从而能够对清洁能源的运用状况加以评定,及时察觉供电缺乏或者异常情况,保证监测数据的连续性。通过牺牲阳极消耗情况统计分析来合理地制定出更换方案,既不会导致频繁更换或者过多配置,又能减少施工过程对周边环境造成的影响。从实际运行效果上看,智能化技术的运用,使阴极保护在达到防腐目的的同时,也更重视运行经济性以及资源利用效率。

5 结束语

油气长输管道阴极保护是一项长期、连续的基础性工作,运行效果的好坏直接影响到管道的安全和使用寿命。随着管道规模越来越大,运行年限越来越长,传统的以人工检测为主的管理方式已经不能满足精细化管理的要求。智能化阴极保护系统给提高管理效率、运行水平提供了新的途径。智能化系统可以提高监测频率、降低人工巡检工作量,帮助运行人员判断等几个方面发挥着积极作用,使阴极保护的管理由以前阶段性的检查变成连续的监控、动态的调整。同时也在应用过程中也暴露出设备适应性、数据安全、标准统一等各方面的不足,需要在以后的建设和运行中不断改进。

参考文献:

- [1] 戴俊. 油气长输管道腐蚀问题与阴极保护防腐技术[J]. 化工管理, 2025(25):109-112.
- [2] 张浩, 黄宇航, 尹凡, 等. 长输油气管道阴极保护电位智能监测技术应用研究[J]. 中国信息界, 2025(01): 243-245.
- [3] 任立杰. 油气长输管道腐蚀监测技术与应用综述[J]. 中国石油和化工, 2024(10):68-69.
- [4] 姚广玉, 路强强, 孙尧, 等. 在役输油站场智能化区域性阴极保护系统设计策略[J]. 化工管理, 2024(23):119-122.
- [5] 陈金泽. 埋地管道阴极保护系统智能化故障诊断技术研究[D]. 常州: 常州大学, 2021.