

# 智能清管器在长输原油管道内腐蚀检测中的应用效能评估

许业霖<sup>1</sup> 唐泉鑫<sup>2</sup>

1. 天津滨海概念人力信息科技有限公司 天津市 300459; 2. 天津滨海概念人力信息科技有限公司 天津市 300459

DOI:10.32629/ems.v8i3.18753

**[摘要]** 智能清管器作为一种先进的检测工具,在长输原油管道腐蚀状况评估中展现出重要价值。通过集成传感技术与数据分析能力,该设备能够实现对管道内壁腐蚀位置、形态及程度的精准识别。本文围绕其在实际应用中的检测效率与准确性展开评估,探讨其在复杂运行条件下的表现,验证其在保障管道运行安全、延长使用寿命方面的应用潜力。研究结果为智能清管器的推广应用提供了实践基础与理论支持。

**[关键词]** 智能清管器;长输原油管道;腐蚀检测;效能评估;管道完整性

## 引言:

原油管道作为能源运输的重要载体,其安全运行直接关系到国家能源保障与环境保护。在长期运行过程中,腐蚀问题成为影响管道安全的主要因素之一。传统检测手段存在响应滞后、数据精度低等问题,已难以满足现代管道管理需求。智能清管器凭借其高效、精准的检测能力,正逐步成为腐蚀检测的关键手段。本文将以前述效能评估为切入点,系统分析智能清管器在长输原油管道腐蚀检测中的实际应用表现与价值。

## 一、长输原油管道腐蚀问题的现状与挑战

长输原油管道作为国家能源运输命脉,其运行安全与稳定性直接关系到能源供应系统的高效运转。在长期服役过程中,管道内壁不可避免地受到介质、环境及操作条件的综合作用,腐蚀问题日益严重。原油中所含的水分、硫化物、二氧化碳、氯离子等腐蚀性介质,在温度、压力变化及流动状态的影响下,与钢制管道产生复杂的电化学反应,导致局部腐蚀、均匀腐蚀、应力腐蚀开裂等问题频发。外部环境对管道腐蚀的影响不容忽视,尤其是土壤湿度长期处于高水平时,会加速电化学反应过程,促使腐蚀速率显著提升。来自周边电力设施或金属构筑物的杂散电流干扰,以及阴极保护系统运行不稳定或失效,均可能导致局部保护不足甚至反向腐蚀,进一步危及管道结构的稳定性与长期运行的可靠性。

在实际运行中,管道腐蚀具有隐蔽性强、扩展速度快、难以人工直观监测的特点,使得常规巡检与传统静态检测手

段难以准确评估腐蚀发展程度及其分布状态。利用人工定点超声检测或电位测量等方法,仅能覆盖有限区域,无法实现对长距离管道全覆盖、高频率的连续监测<sup>[1]</sup>。部分腐蚀发生在管道底部或内壁焊缝附近,位置隐蔽,难以通过外部检测方式发现。由于管道多处于复杂地形、交叉施工区段或高风险区域,增加了检测作业的复杂性与危险性,迫切需要更加高效、自动化程度更高的检测技术介入,以实现管道腐蚀风险的早期识别与预警。

在这种背景下,智能清管器逐渐成为管道腐蚀检测的重要工具。它集成了高精度传感器、惯性导航系统和数据处理单元,能够在管道正常运行状态下进行非干扰式检测。通过磁漏、超声、涡流等多种物理检测方法,实时采集管道内壁的腐蚀数据,生成精确的腐蚀图谱与缺陷评估模型。这种方式提升了检测效率和覆盖率,还能够捕捉微小腐蚀损伤及其演化趋势,显著提升了管道完整性管理水平。智能清管器凭借其高精度传感技术与智能数据处理能力,能够在不停输的条件下实现对管道全生命周期状态的实时监测与评估,显著提高了检测效率与缺陷识别精度。其应用减少了人为操作误差与检测盲区,还降低了运维成本,正逐步成为现代油气管道腐蚀管理中不可或缺的重要工具。

## 二、智能清管器技术原理及检测能力分析

智能清管器作为长输原油管道内部腐蚀检测的关键设备,其技术基础建立在多种无损检测原理与智能化数据处理能力的集成之上。该设备搭载磁漏探伤(MFL)、超声检测(UT)、

电磁超声 (EMAT) 以及涡流检测等传感模块, 在管道内部运行过程中实现对壁厚变化、金属损伤、裂纹及腐蚀坑等缺陷的实时探测。尤其是在 MFL 技术中, 强磁场使管道钢体进入磁饱和状态, 一旦存在腐蚀或缺损区域, 磁通将发生泄漏, 经过传感器捕捉磁场扰动信号, 实现对缺陷位置和程度的精准定位。超声波检测技术通过高频声波在管道内壁传播并反射的物理特性, 精准测量壁厚变化, 从而识别出内部腐蚀、层间脱粘及材料分层等结构性缺陷。该技术在复杂工况下仍具备良好的稳定性和穿透力, 能够提供连续、精细的壁厚数据, 辅助建立高精度的腐蚀图谱, 为管道完整性评价和风险等级划分提供多维度、可量化的技术支持。

在检测能力方面, 智能清管器展现出远超传统检测工具的精度与覆盖范围。其具备全程在线运行的能力, 无需停止输油流程即可完成对整个管道长度的连续扫描, 极大提高了检测频次与数据实时性。搭载的惯性导航系统能够实现高精度定位, 使检测数据与管道坐标一一对应, 便于后续运维单位精准挖掘和维修<sup>[2]</sup>。当前高端型号的智能清管器检测精度可达亚毫米级, 能够识别出微小的凹陷、腐蚀坑及焊缝缺陷, 对于早期腐蚀问题具有极高的敏感性。其高速数据采集系统结合边缘计算与智能算法, 能够在现场自动完成数据预处理、特征提取及异常识别, 大幅减少人工解读误差和分析周期, 提升了腐蚀评估的科学性与客观性。

智能清管器还具备良好的适应性与模块化扩展能力, 适用于多种复杂工况条件下的检测任务。在高黏度原油、复杂介质流态、不同管径变化及管道内沉积物较多的环境中, 其稳定运行能力和检测性能仍能保持较高水平。一些新型清管器甚至集成 AI 算法, 实现基于历史数据的缺陷模式识别与腐蚀趋势预测, 为管道运行单位提供前瞻性的维护建议。将传感数据、地理信息系统 (GIS) 与数字孪生模型结合, 智能清管器不仅是一个数据采集平台, 更是长输原油管道完整性管理的核心节点, 极大地提升了腐蚀检测的效率、精度与智能化水平, 为管道全生命周期健康管理奠定了技术基础。

### 三、智能清管器在实际管道腐蚀检测中的应用实践

在我国西部某重要原油输送干线上, 智能清管器被广泛应用于长距离埋地管道的腐蚀检测任务, 并取得了显著成效。该区域管道运营时间已超过十五年, 受复杂地质结构、原油

杂质成分和温差变化影响, 管道内壁腐蚀风险长期存在。传统检测方式难以有效覆盖全线腐蚀状态, 存在检测盲区与滞后性问题。智能清管器投用后, 结合磁漏与超声双模式检测手段, 在不中断原油输送的前提下, 对全长超过 300 公里的输油管道开展高频率、高精度检测作业, 成功识别出多个隐蔽性腐蚀区域, 包括底部沉积物覆盖下的均匀腐蚀区和沿焊缝分布的局部深坑型腐蚀, 有效避免了因腐蚀失效引发的重大安全风险。

在复杂工况条件下的应用也进一步验证了智能清管器的稳定性与适应性。某段穿越山地的长输原油管道, 其内壁存在严重积蜡、沉积物和不规则管道变径结构, 清管器在运行中面临高阻力与非均匀流态的影响。选用具有自适应结构与抗卡阻设计的智能清管器, 并对导航系统进行动态校准, 设备依然完成了对关键区域的完整扫描<sup>[3]</sup>。数据回传结果显示, 检测图谱连续性良好, 信号稳定, 能够准确识别沿管线逐渐扩展的腐蚀带, 且定位误差控制在 1 米以内, 为后续人工开挖修复提供了极具参考价值的数据基础。相关运营单位根据清管器检测报告, 开展了针对性维修与阴极保护优化, 明显改善了该段管道的电位分布和腐蚀趋势。

随着检测技术与数据处理能力的不断升级, 智能清管器在应用实践中逐步实现从单一检测工具向综合评估平台的转变。多个油田输油主干线上已建立起基于智能清管器巡检数据的完整性管理体系。检测结果不再仅用于故障发现, 更成为运行风险等级划分、运维资源优化配置的重要依据。一些清管器甚至配备无线数据传输和边缘分析模块, 检测结束后立即完成缺陷识别与分级评估, 并通过 GIS 平台上传至中央管控系统, 实现了检测—分析—决策的闭环管理。在实际工程中, 这种数字化检测模式提升了腐蚀识别效率, 也显著降低了检测运维成本, 提高了原油管道运行的安全系数与经济效益。

### 四、检测结果数据分析与效能评估

在完成对长输原油管道的智能清管器检测作业后, 所得数据经过统一采集、处理与分析, 形成系统化腐蚀缺陷数据库。检测结果以腐蚀位置、类型、尺寸、面积分布、腐蚀深度百分比等为关键指标, 构建出管道腐蚀风险分布图谱。

在效能评估方面, 智能清管器所展现出的多维数据精度

与检测稳定性可通过与历史检测数据、人工开挖结果以及第三方无损检测对比进行综合分析。具体指标包括误报率、漏检率、定位误差、缺陷尺寸误差等。根据实际管道项目中回掘验证数据,智能清管器对腐蚀深度的预测误差控制在 $\pm 10\%$ 以内,横向定位精度优于 $\pm 1$ 米,远高于传统检测手段的水平。其对小于10%壁厚损失的早期腐蚀亦具备识别能力,极大提高了腐蚀检测的敏感性与覆盖广度<sup>[4]</sup>。效能评估还包括对数据处理效率的分析,经过内置算法对百万级信号点进行快速处理与自动化标注,大幅减少了人工介入时间,提升了检测—评估—运维响应链条的整体效率。

基于上述分析成果,智能清管器的腐蚀检测能力已不仅限于缺陷发现,更在于其对管道完整性管理系统的全链条赋能。对检测数据进行可视化建模与趋势预测,可实现腐蚀速率估算与未来风险预判,从而支持制定科学的维修计划与风险分级策略。在多个实际工程案例中,智能清管器辅助运营单位实现了基于数据的腐蚀风险管理转型,有效降低了维护成本与事故发生率。其效能评估结果证明,该技术具备较高的工程适用性、经济合理性与发展前景,为长输原油管道腐蚀检测提供了更加智能化、系统化的技术路径。

### 五、提升智能清管器应用效果的关键因素探讨

在提升智能清管器在长输原油管道腐蚀检测中应用效果的过程中,设备本身的技术集成度与适配能力成为核心要素。不同管道系统在结构、介质流速、压力条件及腐蚀类型上存在显著差异,因此要求清管器具备高度的工况适应性与模块化设计能力。高性能传感器的选型和布局对检测结果的精度有直接影响,磁漏传感器排布密度、超声探头数量与布设角度都决定了对微小腐蚀特征的捕捉能力。针对管道中可能存在的焊缝跳动、积蜡沉积、弯头干扰等复杂因素,清管器需具备良好的抗干扰与自动调整能力,以保障数据连续性与信号稳定性,从而提升检测过程的可靠性与数据解读的一致性。

另一个关键因素在于检测数据的处理与分析机制。智能清管器所采集的数据体量庞大,结构复杂,涵盖多类型信号与高时间精度样本。如何构建高效的数据分析流程,直接决定了其检测效能的实现程度。高性能信号处理算法、机器学习识别模型及腐蚀特征提取技术的应用,将信号转化为结构性缺陷信息,显著提高数据解读速度与准确性<sup>[5]</sup>。增强与地

理信息系统(GIS)、数字孪生平台的深度融合,能够实现腐蚀缺陷空间可视化、演化趋势动态呈现以及维护策略智能推荐,从而推动检测数据向风险控制和决策优化延伸。具备自主学习能力的智能模型还可根据历史检测数据不断迭代优化,提升对罕见或复杂腐蚀形态的识别效率,强化检测系统整体智能水平。

提升智能清管器应用效果还需在运维管理机制上加以完善。设备运行前的清管作业与介质调配、运行过程中的压力控制与速度匹配、运行后的数据接收与校核等环节构成一个完整的操作闭环。清管器的运行质量与检测效果密切相关,需建立标准化作业规程与全流程质量控制体系。对于长输原油管道运营单位而言,还应加强清管器使用人员的技术培训与数据解读能力建设,形成检测—分析—维修—反馈的闭环管理体系。推动不同设备厂商之间的数据标准兼容与互联互通,将有助于构建统一、高效、智能的腐蚀检测与完整性管理平台,真正实现智能清管器在工程实践中的深度融合与持续优化。

### 结语:

本文围绕智能清管器在长输原油管道腐蚀检测中的应用效能展开系统分析,结合技术原理、实际案例与数据评估,全面探讨了其在提升检测精度与保障管道安全方面的重要作用。研究表明,智能清管器凭借其高集成度、智能化与可视化特点,已成为现代管道完整性管理中的关键技术装备。未来,通过优化技术参数、强化数据融合与完善运维体系,其在原油管道腐蚀监测中的应用潜力将更加显著。

### [参考文献]

- [1] 岳春梅.天然气管道通径检测器多材料柔性检测指研究[D].中国石油大学(北京),2024.
- [2] 辛佳兴.油气管道内壁缺陷交变励磁检测方法研究[D].中国石油大学(北京),2023.
- [3] 秦睿.高含硫天然气集输管道智能清管器骨架优化设计研究[D].西南石油大学,2023.
- [4] 莫天鹏.天然气黑粉射流清管器结构优化及流场分析[D].中国石油大学(北京),2023.
- [5] 栗辉霖.单井注入管线通球清管器设计与试验研究[D].东北石油大学,2020.