

Research on corrosion early warning and intelligent control of oil and gas pipelines enabled by digital monitoring technology

Jie Zou Minfei Ai Lingxiang Wang

Huazhong Branch of National Oil and Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Qianjiang, Hubei, 433100, China

Abstract

As critical energy infrastructure, oil and gas pipelines are directly impacted by corrosion risks that affect transportation safety and operational efficiency. This study examines the application of digital monitoring technologies in pipeline corrosion early warning and intelligent control systems through a case study of China Pipeline Network Group Central China Company (Central China Company). The research first identifies limitations in traditional corrosion monitoring methods, then focuses on Central China Company's implementation of next-generation internal inspection equipment and "electronic fence" smart monitoring systems. By establishing a corrosion prediction model based on real-time monitoring data, the study develops an intelligent control system integrated with pipeline integrity management. Practical application data validates the technical implementation's safety, cost-effectiveness, and managerial benefits. Digital monitoring technology enables real-time detection, precise forecasting, and dynamic control of pipeline corrosion risks, providing technical support for Central China Company's pipeline integrity management while offering a reference model for similar applications in the industry.

Keywords

digital monitoring technology; oil and gas pipeline; corrosion early warning; intelligent control

数字化监测技术赋能油气管道腐蚀预警与智能控制研究

邹杰 艾敏飞 王凌翔

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司, 中国·湖北 潜江 433100

摘要

油气管道作为能源输送关键设施, 其受腐蚀情况直接关乎运输安全与运营效益。本研究以国家管网集团华中公司(简称“华中公司”)作为案例, 对数字化监测技术在油气管道腐蚀预警与智能控制里的应用方式展开系统探究, 首先对传统腐蚀监测方法的局限进行梳理, 随后聚焦阐述华中公司采用的新一代内检测设备、“电子围栏”智能监控系统等数字化技术运用, 进而创建基于监测数据的腐蚀预警模型, 打造融入管道完整性管理的智能控制体系, 且通过实际应用数据对技术落地的安全、经济、管理效益加以验证。数字化监测技术可达成对油气管道腐蚀风险的实时探测、精准预报与动态管控, 给华中公司管道完整性管理予以技术支持, 还为行业内类似应用提供参考样本。

关键词

数字化监测技术; 油气管道; 腐蚀预警; 智能控制

1 引言

我国油气管道的总里程数已突破 18 万 km, 作为南北能源调配关键节点的华中地区, 担负着“西气东输”“川气东送”等国家主干管网的运输职责, 由国家管网集团华中公司管理的管道涉及湖北、湖南、河南等多省份, 累计长度超 5000km, 华中地区土壤种类繁多, 再加上部分管道运营时间超 15 年, 腐蚀状况已成为威胁管道安全的关键隐患。

传统的腐蚀监测工作依靠人工现场巡查以及周期性的无损检测技术, 面临“监测滞后、覆盖不全、判读依赖经验”

等难题, 无法契合管道全生命周期安全管理要求。伴随工业互联网、物联网及人工智能技术进步, 数字化监测手段(像光纤传感、智能内检测、无线传感网)能够达成腐蚀数据的即时采集、动态剖析与智能判定, 给管道腐蚀“早发现、早预警、早控制”创造技术条件。本文立足华中公司实际应用状况, 从技术践行、模型创设、系统谋划三个层面, 研究数字化监测技术怎样助力油气管道腐蚀预警与智能控制, 给出能源管道安全运营的技术解决办法。

2 油气管道腐蚀监测技术现状与痛点

2.1 传统腐蚀监测方法及局限性

油气管道腐蚀监测的传统方式以“定期检测+人工判断”为主要模式, 包含三类核心技术。非破坏检测技术, 如超声检测、射线探伤, 要求设备停止运行或近距离开展操作,

【作者简介】邹杰(1982-), 中国山东菏泽人, 本科, 工程师, 从事腐蚀控制研究。

华中公司运用这类技术开展检测时，每次检测会让管道停运2-3天，且仅可覆盖管道沿线关键位置的10%-15%，存在“检测盲区”。依靠测量管道与土壤电位差的方式，电化学检测技术用以判定腐蚀程度，但受土壤温湿度影响明显，数据误差区间为18%-22%。华中公司所管理的管道中，60%多的线路途经山区与林区，人工巡检间隔久，如管道内壁腐蚀、深埋段土壤腐蚀这类隐蔽问题不易察觉，2021年，曾因人工巡检未能及时发现内壁腐蚀，引发某支线管道发生泄漏，引发3天停止运行。

2.2 数字化监测技术的核心优势

与传统手段相比，数字化监测技术利用“传感器实时采集+数据无线传输+算法智能分析”，达到腐蚀监测“全时段、全范围、高精度”的目标。借助布置在管道内壁、外侧及周边泥土中的传感器，能达成腐蚀数据（腐蚀速率、电位数值、土壤含水量）在秒级完成采集、分钟级完成传输，克服传统“定期检测”的时间滞后状况^[1]。整合内部检测设备和外部场域传感网络，可达成对管道内壁、外壁以及土壤环境等全维度的覆盖。华中公司采用的光纤光栅传感器，能达成单条管道30公里区间的不间断监测，借助大数据与机器学习技术，可自行识别腐蚀风险的等级，不用人工判定，减少对人工经验的依靠，使数据精准度提高到95%以上。

3 国家管网集团华中公司数字化监测技术应用实践

3.1 新一代内检测设备：实现内壁腐蚀“边走边判”

鉴于传统内检测设备“只能采集数据、无法实时分析”的弊端，2022年，华中公司引进新一代管道内检测装置，此装置搭载多通道超声探头和实时数据传输模块，并将其应用于“川气东送”支线。设备所配的128通道超声探头，能精准测定管道内壁腐蚀坑的深度和面积，精度可达到0.1mm。相比传统设备，识别精准度提高40%。

设备借助管道内布置的无线传输节点，设备可把检测所得数据实时传送至地面控制中心。依据预先设定的腐蚀临界值，达成“边走边判”。2023年在开展某支线检测工作中，即时察觉3处内壁局部腐蚀，并且同步发送预警信号，避免腐蚀进一步扩大。该设备能于介质流速1.5-3m/s、压力4-8MPa工况下平稳运作。与华中公司天然气和原油管道的不同运行参数相适配，无需对工艺作出调整即可开展检测，检测效率增长50%。

3.2 “电子围栏”智能监控系统：构建外腐蚀风险防线

为应对管道外壁腐蚀和第三方破坏（像非法作业、偷油）并存的风险，2023年华中公司对“电子围栏”智能监控系统进行了升级。在管道沿线（特别是途经郊区和农田的高风险区域）布置毫米波雷达、红外摄像头以及土壤腐蚀传感器，构建起“外场感知+智能预警”防线。系统将土壤腐蚀相关数据（像土壤酸碱度、氯离子含量）与第三方入侵数据（例

如雷达所监测的人员及机械活动情况）加以整合，借助数据关联分析手段，判定第三方活动有无增加腐蚀隐患，或许会加快管道外部腐蚀。

依托深度学习算法，系统能自动辨别非法开挖、车辆碾压等行径，判别精准度达92%。整合土壤腐蚀数据，一旦腐蚀速度超过0.2mm/年且有第三方活动存在，自动开启二级预警。2023年，预警触发次数为12次，全部及时处理，未让腐蚀情况恶化；系统和华中公司“智慧管网”平台实现对接。当预警启动后，能借助GIS定位自动调遣周边巡检人员，将传统2小时的平均响应时长缩短至30分钟，极大提升应急处置的效率。

3.3 非侵入式无线腐蚀探头：实现外壁腐蚀“无接触监测”

为解决部分深埋（>3米）管道难以开挖来部署传感器的难题，华中公司引入了杜克泰克的非侵入式无线腐蚀探头。在某原油管道开展试点实践，探头无需对土壤进行开挖操作，利用永磁体吸附在管道外壁，能对管道外壁的腐蚀速率、温度、振动等参数实施监测^[2]。安装时长由传统开挖安装的单个8小时，减少到每个30分钟，探头运用太阳能与电池协同供电，可持续工作2年，不必频繁替换电池，可用于偏远区域。

利用LoRa无线通信手段，探头能把数据传至5公里外的基站，进而接入华中公司数据平台。2023年开展试点时，探头精准监测到某段管道外壁腐蚀速率从0.12mm/年提升至0.18mm/年，经实地核实，是土壤含水率的升高造成了腐蚀的加剧，马上调整了阴极保护的相关参数。

4 基于数字化监测数据的腐蚀预警模型构建

4.1 数据采集与预处理

华中公司借助上述数字化装置，创建多维度的数据采集架构，采集的主要数据有三种类型，直接的腐蚀相关数据包含管道内侧腐蚀速率。涉及环境影响的数据有土壤pH数值、氯离子浓度水平、“电子围栏”系统下的含水率、管道介质的温度状况和工艺系统的压力情况。2018-2023年的管道腐蚀维修档案、过往检测资料以及土壤环境调查数据构成了历史数据。

就采集到的数据而言，应剔除由传感器故障引发的异常数值，运用“均值填充法”补充缺失率小于5%的缺失数据。对不同计量单位的数据（腐蚀速率为mm/年、土壤pH值在1至14之间）进行转换，使其成为「[0,1]区间内的标准化数据，防止量级差异干扰模型分析。利用时间戳记、管道里程碑号，把腐蚀数据同环境数据、工艺数据相联系，构建出“单里程碑号-多维度数据”样本集（共计构建1200个样本，包含华中公司5条主干管道）。

4.2 腐蚀预警模型设计与训练

以预处理完毕的数据为基础，华中公司借助“随机森林算法”构建起腐蚀预警模型，输入的变量共有8个，分别

是土壤酸碱度、氯离子含量、水分含量、介质温度、介质压力、阴极保护电势、管道运行年限以及腐蚀速率历史数据。输出项为腐蚀风险程度（1级：腐蚀速率为0.1mm/年；2级：腐蚀速率为1mm/年~0.2mm/年；3级：腐蚀速率为≥0.2mm/年）。使用占比70%的样本（共840个）开展模型训练工作，以30%样本（360个）实施验证，经调节随机森林的决策树数目，提升模型效能，模型于验证集的准确率达93.6%，高风险等级的识别准确率为96.2%，错误判定的比例仅3.8%，能契合实际应用要求。

4.3 模型部署与应用

把训练好的腐蚀预警模型投用至华中公司“智慧管网”平台，达成“数据自动输入-模型实时计算-风险自动推送”的循环。平台每隔5分钟自各传感器及内部检测设备采集最新数据，模型算出各里程桩号的腐蚀风险等级后，会自动在GIS地图上做标注^[3]。当高风险状况出现，平台即刻向管道管理部、巡检队发送预警资讯，其中有风险所在位置、腐蚀的速率，还有建议采取的处置手段。2023年该模型发出高风险预警8次，所有预警均得到及时处理，未出现因腐蚀引发的故障情况。

5 油气管道腐蚀智能控制系统设计

5.1 智能控制策略：基于预警结果的动态调整

依据腐蚀预警模型给出的风险等级，华中公司构建差异化的智能控制策略，主要涵盖两种类型。若预警等级处于2级，系统会自动把阴极保护电位从-0.85V调节到-1.0V。若预警等级处于3级（高风险）状态，将电位进一步调整为-1.2V，并且启用备用阴极保护站点^[4]。2023年一段管道触发3级预警后，系统自动对电位做出调整，历经72小时，腐蚀速率由0.22mm/年降至0.15mm/年。就原油管道内壁的腐蚀状况，系统按照预警等级改变缓蚀剂的注射比率。2023年应用于河南段原油管道，经动态调控注射比率，缓蚀剂的用量削减了15%，与此同时把腐蚀速率控制到每年0.1mm以内。

5.2 系统架构设计

采用“分层架构”设计的腐蚀智能控制系统，和华中公司现有的“智慧管网”平台充分整合，整体分为四个层级。数据采集层由内检测设备、无线腐蚀探头、阴极保护电源传感器、缓蚀剂注射泵传感器等构成，承担腐蚀、工艺、环境数据的收集工作。数据传输层采用“LoRa+4G/5G”的混合

式传输手段，在偏远区域借助LoRa将数据传至基站，城区和主干道依靠4G/5G进行数据传输，保障数据传输的稳定。数据处理层配置腐蚀预警模型和控制算法，达成数据清理、风险核算、控制指令产出。应用层具备如GIS地图呈现、预警消息推送、控制命令下达、历史数据查寻等功能，为管道管理与巡检人员打造可视化操作界面。

5.3 与管道完整性管理的融合

为达成“监测-预警-控制-维护”的完整闭环，系统同华中公司包含管道材质、壁厚、过往维修记录、土壤环境数据的管道完整性数据库深度交融，系统自动把腐蚀预警与控制效果数据（像调整后的腐蚀速率）录入完整性数据库，对管道完整性评价报告进行更新^[5]。根据完整性数据库中的管道剩余寿命预测模式，综合考虑腐蚀管控成效，自动对维护计划予以调整（如原定于2024年的管道更换计划，因腐蚀速度下降，将更换时间调整为2026年）。

6 结论

新一代内检测装置、“电子围栏”体系、非侵入式无线传感器等数字化手段，能切实化解传统腐蚀监测“滞后、盲区、低效”难题，做到腐蚀数据实时且精准地采集。融合多维度数据、依托随机森林算法的腐蚀预警模型，融合多维度数据，能精准识别腐蚀风险，提升识别的精确程度，为风险处理提供科学支撑。智能控制体系融合阴极保护与缓蚀剂调节，与管道完整性管理深度融合，可达成对腐蚀风险的动态调控。未来可采用量子传感、太赫兹传感等新型探测装置，进一步增强腐蚀数据分辨率，实现更早期的腐蚀预警。

参考文献

- [1] 安超,王飞跃,刘鹏程,等.油气管道数据集成及可视化发展现状分析[J].现代化工,2024,44(S2):19-23+28.DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.004.
- [2] 孙钟阳.油气储运工程施工现场数字化监控与智能决策系统的设计与实现[J].自动化应用,2024,65(16):156-158.DOI:10.19769/j.zdhy.2024.16.048.
- [3] 安志彬.数字孪生在长输油气管道无损检测中的应用[J].无线互联科技,2023,20(13):94-96+107.
- [4] 李亚菲,吴有更,张巍巍.埋地油气管道腐蚀风险管控体系的构建[J].石油工业技术监督,2023,39(04):48-52.DOI:10.20029/j.issn.1004-1346.2023.04.010.
- [5] 胡炜杰,熊碧波,蔡冲冲,等.油气输送管道泄漏风险识别技术发展概况[J].广州化工,2021,49(12):27-32.