

# 石油长输管道腐蚀在线监测与智能预警系统开发

王宝磊 李亮

西藏青藏石油管道有限公司 西藏自治区拉萨市 850032

**【摘要】**石油长输管道作为油气资源跨区域输送的关键载体，其安全运行直接关系到能源供应的稳定性与社会公共安全。腐蚀是影响石油长输管道安全稳定运行的核心隐患，易引发管道泄漏、破裂等重大事故，造成严重的经济损失与生态污染。传统的离线检测手段存在时效性差、覆盖范围有限等弊端，难以满足管道全生命周期完整性管理的需求。本文围绕石油长输管道腐蚀在线监测与智能预警系统的开发展开研究，为提升石油长输管道腐蚀防控能力提供技术支撑。

**【关键词】**石油长输管道；腐蚀在线监测；智能预警系统；管道完整性管理

**【中图分类号】**TE988 **【文献标识码】**A

Development of an Online Monitoring and Intelligent Early Warning System for Corrosion in Long-Distance Oil Pipelines

Wang Baolei Li Liang

Xizang Qingzang Petroleum Pipeline Co., Ltd., Lhasa, Tibet Autonomous Region 850032

**【Abstract】** As a critical carrier for the cross-regional transportation of oil and gas resources, the safe operation of long-distance oil pipelines directly affects the stability of energy supply and public safety. Corrosion is a core hazard that impacts the safe and stable operation of long-distance oil pipelines, potentially leading to major accidents such as pipeline leaks and ruptures, resulting in severe economic losses and ecological pollution. Traditional offline detection methods have drawbacks such as poor timeliness and limited coverage, making it difficult to meet the needs of integrity management throughout the pipeline's entire lifecycle. This paper focuses on the development of an online monitoring and intelligent early warning system for corrosion in long-distance oil pipelines, providing technical support to enhance the corrosion prevention and control capabilities of long-distance oil pipelines.

**【Key words】** long-distance oil pipelines; corrosion online monitoring; intelligent early warning system; pipeline integrity management

## 引言

管道在服役过程中，长期受到输送介质、土壤环境、杂散电流等多种因素的侵蚀，腐蚀问题贯穿于管道设计、施工、运维的全生命周期。传统的管道腐蚀检测方法以离线检测为主，包括超声检测、磁粉检测、漏磁检测等，这类方法需要停机作业或定期开挖，存在检测周期长、覆盖范围窄、数据滞后性强等问题，无法及时捕捉管道腐蚀的动态变化过程。随着物联网、大数据、人工智能等技术的快速发展，构建腐蚀在线监测与智能预警系统成为管道完整性管理的必然趋势。该系统可实现对管道腐蚀状态的实时、连续、全域监测，通过智能算法对腐蚀数据进行分析研判，提前发出故障预警，为管道运维决策提供科学依据。

## 1 系统整体架构

腐蚀在线监测与智能预警系统采用分层式架构设计，一是感知层。作为系统的数据源头，负责管道腐蚀状态的实时感知与数据采集。主要由各类腐蚀监测传感器、数据采集终端组成，传感器包括腐蚀挂片、电阻式腐蚀探针、超声波测厚传感器覆盖、杂散电流监测传感器等，可实现对管道内壁腐蚀速率、外壁腐蚀坑深度、外防腐层完整性覆盖、杂散电流强度等关键参数的采集。二是传输层。负责将感知层采集的数据实时传输至决策层，是连接感知层与决策层的桥梁。根据管道沿线的网络覆盖情况，可选择无线传输与有线传输相结合的方式，确保数据传输的稳定性与实时性。同时，传输层配备数据加密模块，防止数据在传输过程中被篡改或泄露。三是决策层。是系统的核心处理单元，负责对传输层上传的数据进行清洗、分析、建模与研判。该层级搭载大数据分析平台与人工智能预警模型，通过对历史腐蚀数据与实时监测数据的对比分析，计算管道腐蚀的发展趋势，评估腐蚀风险等级，并生成预警信号<sup>[1]</sup>。四是应用层。是系统的人机

交互界面,面向管道运维人员、管理人员,提供数据可视化、风险预警、决策支持等功能。通过 Web 端、移动端等多终端访问,可实时查看管道腐蚀监测数据、风险分布图谱、预

警信息等,同时支持生成腐蚀防控报告,为运维决策提供数据支撑。石油长输管道腐蚀在线监测与智能预警系统分层架构及功能对照表如下表 1 所示。

表 1 石油长输管道腐蚀在线监测与智能预警系统分层架构及功能对照表

| 架构层级 | 核心组成                               | 主要功能                             | 技术要求  |
|------|------------------------------------|----------------------------------|---|
| 感知层  | 腐蚀挂片、电阻式探针、超声波测厚传感器、杂散电流传感器、数据采集终端 | 实时采集内壁腐蚀速率、外壁坑深、防腐层完整性、杂散电流强度等参数 | 传感器防护等级 $\geq$ IP67,采集频率可设(1次/h~1次/d)         |
| 传输层  | LoRa 模块、NB-IoT 模块、5G 基站、光纤网络、加密网关  | 实现监测数据的加密传输与断点续传,连接感知层与决策层       | 传输延迟 $\leq$ 5s,数据加密采用 AES-256 协议,丢包率 $<$ 0.1% |
| 决策层  | 大数据分析平台、LSTM 预测模型、风险评估引擎、数据库服务器    | 数据清洗融合、腐蚀趋势预测、风险等级判定、预警规则触发      | 模型预测精度 $\geq$ 90%,支持 10 万+传感器数据并行处理           |
| 应用层  | Web 端管理平台、移动端 APP、GIS 可视化系统、报告生成工具 | 数据可视化展示、多渠道预警推送、运维决策支持、自动生成报告    | 支持多终端同步,预警信息推送响应时间 $\leq$ 10s                 |

## 2 系统核心功能模块开发

### 2.1 腐蚀数据采集与传输模块

一是传感器部署。根据管道的运行工况与腐蚀风险点分布,采用重点区域密集部署、一般区域均匀部署的原则,在管道弯头、变径处、低洼段、杂散电流干扰区等高危区域,密集部署超声波测厚传感器与杂散电流监测传感器;在一般管段,采用腐蚀挂片与电阻式腐蚀探针相结合的方式,实现腐蚀速率的长期监测。传感器安装需采用无损安装技术,避免对管道本体造成损伤。二是数据采集与预处理。数据采集终端按照预设的采集频率,自动采集传感器的监测数据,并对数据进行初步预处理,包括异常数据剔除、数据格式转换、数据压缩等,减少无效数据对后续分析的干扰<sup>[1]</sup>。三是数据安全传输。传输层采用加密传输协议,对预处理后的数据进行加密处理,通过无线或有线传输方式上传至决策层。同时,设置数据重传机制,当数据传输失败时,自动触发重传流程,确保数据的完整性。

### 2.2 腐蚀风险智能分析模块

一是数据清洗与融合。对传输层上传的数据进行深度清洗,剔除因传感器故障、传输干扰导致的异常数据;同时,将腐蚀监测数据与管道的历史运维数据、环境数据进行融合,构建多维度的腐蚀数据库。二是腐蚀模型构建。基于机器学习算法,构建管道腐蚀速率预测模型。以土壤 pH 值、杂散电流强度、介质流速、防腐覆盖层完整性等为输入变量,以腐蚀速率为输出变量,通过对历史数据的训练,使模型能够精准预测不同工况下的腐蚀发展趋势。三是风险等级评估。根据管道腐蚀的严重程度,将腐蚀风险划分为低风险、中风险、高风险三个等级。设定风险阈值,当实时监测的腐蚀速率、腐蚀坑深度等参数超过阈值,或预测模型显示腐蚀

风险将在未来一段时间内达到高风险等级时,系统自动将风险等级提升。

### 2.3 智能预警与应急处置模块

一是多维度预警。系统支持阈值预警、趋势预警两种预警方式。阈值预警是指当实时监测参数超过预设阈值时,系统自动触发预警;趋势预警是指当腐蚀预测模型显示腐蚀风险将在当前当前发展趋势下达到高风险等级时,系统提前发出预警。预警信息通过短信、移动端 APP、Web 端等多渠道推送至运维人员,确保预警信息的及时触达。二是应急处置指导。系统内置应急处置知识库,针对不同等级的腐蚀风险,提供对应的应急处置建议。例如,当出现高风险预警时,系统建议运维人员立即赶赴现场,开展应急检测;当出现中风险预警时,系统建议增加监测频率,加强管道巡检。同时,系统支持关联管道的应急处置预案,为运维人员提供标准化的处置流程。

### 2.4 数据可视化与报告生成模块

一是数据可视化展示。通过 GIS 地图、折线图、柱状图等多种可视化方式,实时展示管道的腐蚀监测数据、风险分布情况、预警信息等。运维人员可通过移动端 APP 随时随地查看,实现对管道腐蚀状态的远程监控<sup>[1]</sup>。二是自动报告生成。系统根据预设的报告模板,自动生成管道腐蚀防控周报、月报、年报。报告内容包括腐蚀监测数据统计、风险等级变化趋势、预警信息汇总、运维建议等,可直接用于管道完整性管理的决策参考。

## 3 系统开发的关键技术应用

### 3.1 高精度腐蚀监测技术

高精度腐蚀监测技术是保障系统数据准确性的基础,直

接决定了腐蚀风险研判的可靠性<sup>[4]</sup>。针对石油长输管道内、外壁腐蚀的不同特点,该技术整合了多种传感器的监测优势,实现了多维度、高精度的腐蚀状态感知。对于管道内壁腐蚀,采用电阻式腐蚀探针与腐蚀挂片相结合的监测方式,电阻式探针通过金属试片的腐蚀失重转化为电阻变化,利用高精度电阻测量芯片实现腐蚀速率的实时计算,测量精度可达 $\pm 0.01\text{mm/a}$ ;腐蚀挂片则通过定期回收分析,对探针监测数据进行校准,确保长期监测数据的准确性。对于管道外壁腐蚀,采用超声波测厚传感器进行壁厚监测,传感器采用脉冲反射法,可穿透管道外防腐层直接测量管壁厚度,壁厚测量误差 $\leq 0.1\text{mm}$ ,能够精准捕捉腐蚀坑的深度变化;同时搭配杂散电流监测传感器,基于霍尔效应实时监测管道周围杂散电流的强度与方向,为杂散电流干扰下的腐蚀防控提供数据支撑。所有传感器均采用防水、防尘、抗电磁干扰的设计,防护等级 $\geq \text{IP67}$ ,可适应管道沿线高温、高湿、多沙尘的恶劣工况,且支持无损安装,避免对管道本体造成损伤。

### 3.2 物联网混合传输技术

物联网混合传输技术是连接感知层与决策层的桥梁,解决了管道沿线地理环境复杂、网络覆盖不均导致的数据传输难题。系统采用 LoRa+NB-IoT+5G+光纤的混合传输模式,针对不同区域的网络条件灵活选择传输方式。在管道沿线偏远、网络覆盖薄弱的区域,采用 LoRa 技术实现数据的远距离低功耗传输,单基站覆盖距离 $\geq 5\text{km}$ ,满足长距离、广范围的监测需求;在网络覆盖中等的区域,采用 NB-IoT 技术,其低功耗、广连接的特性可支持海量传感器的同时接入;在管道枢纽站、城市近郊等网络覆盖良好的区域,采用 5G 技术实现监测数据的高速传输,传输带宽 $\geq 100\text{Mbps}$ ,确保大数据量的快速上传;在关键管段与数据中心之间,采用光纤传输作为骨干网络,保障数据传输的稳定性与安全性。为了提升数据传输的可靠性,传输层配备了加密网关与断点续传模块,采用 AES-256 加密协议对传输数据进行加密处理,防止数据被篡改或泄露;当网络中断时,数据采集终端可自动缓存监测数据,待网络恢复后实现断点续传,确保数据的完整性,整个传输过程的延迟 $\leq 5\text{s}$ ,丢包率 $< 0.1\%$ 。

### 参考文献

- [1]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.
- [2]闻小虎, 魏晓静, 葛鹏莉, 等. 关于油田集输管道腐蚀监测与防护措施的思考[J]. 清洗世界, 2022, 38(09): 161-163.
- [3]黄辉, 马红莲, 李长春, 等. 高含水原油集输管道内腐蚀预测及监测方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(18): 8050-8055.
- [4]张伟. 长输天然气管道完整性管理与管道腐蚀检测技术[J]. 全面腐蚀控制, 2021, 35(02): 78-80.
- [5]孙振华, 刘丽, 陈凯, 等. 超声导波在胜利油田埋地管道腐蚀监测中的现场应用与分析[J]. 内江科技, 2019, 40(01): 20-22.

### 3.3 人工智能风险预测技术

人工智能风险预测技术是系统的核心智能引擎,实现了从被动监测到主动预警的跨越。系统采用长短期记忆网络(LSTM)构建腐蚀风险预测模型,该算法能够有效处理时间序列数据,解决了传统机器学习算法在长期趋势预测中精度不足的问题。模型的输入变量涵盖多维度数据,包括实时监测的腐蚀速率、壁厚变化、杂散电流强度,以及管道的历史运维数据、土壤 pH 值、地下水位、季节变化等环境数据,通过对海量历史数据的训练,模型能够精准捕捉各因素与管道腐蚀之间的关联规律。在模型应用过程中,系统可实时将新采集的监测数据输入模型,输出未来 7~30 天的管道腐蚀发展趋势,并根据预设的风险阈值,将腐蚀风险划分为低、中、高三等级<sup>[5]</sup>。为了提升模型的适应性,系统设置了自动迭代优化机制,定期根据新的监测数据与实际腐蚀情况对模型参数进行调整,使预测精度始终保持在 90%以上;同时,模型支持 10 万+传感器数据的并行处理,能够快速完成全管段的腐蚀风险评估,评估响应时间 $\leq 2\text{s}$ 。

### 3.4 数据可视化技术

数据可视化技术是实现人机交互的关键,该系统采用 WebGIS 技术,将管道的地理位置信息与腐蚀监测数据进行关联,实现腐蚀风险的空间可视化展示。运维人员可通过 GIS 地图直观查看各管段的腐蚀风险等级,快速定位高风险管段,提升运维效率。

## 4 结束语

石油长输管道腐蚀在线监测与智能预警系统的开发,是管道完整性管理领域的重要技术创新。该系统依托物联网、大数据、人工智能等先进技术,构建了全流程腐蚀防控体系,实现了管道腐蚀状态的实时监测、风险的智能研判与故障的提前预警。系统的应用可有效提升管道腐蚀防控的时效性与精准性,降低管道运行风险,优化运维管理效率。未来,随着相关技术的不断发展,系统的功能将进一步完善,为石油长输管道的安全稳定运行提供更有力的技术支撑。