

# 智能化技术在长输管道安全检查与隐患治理中的应用分析

郭旭东 (国家石油天然气管网集团有限公司山东分公司烟台作业区, 山东 威海 264200)

王小岩 (国家石油天然气管网集团有限公司山东分公司济南维抢修中心, 山东 济南 251400)

**摘要:** 针对长输管道安全检查效率低、隐患识别滞后等问题, 构建了基于“云边端”架构的智能化管理体系。通过部署超声导波、漏磁检测和分布式光纤等多类传感设备, 结合深度学习的缺陷识别模型与有限元分析的强度评估方法, 实现管道本体缺陷、外部环境威胁和运行参数异常的自动检测。该体系可为长输管道安全管理提供技术支持, 对推动行业数字化转型具有借鉴价值。

**关键词:** 长输管道; 智能化技术; 安全检查; 隐患治理; 应用

**中图分类号:** TE973.6; TP277 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 008-0100-03

## Application analysis of intelligent technology in safety inspection and hidden danger control of long-distance pipelines

Guo Xudong (Yantai Operation Area of Shandong Branch of National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Weihai Shandong 264200, China)

Wang Xiaoyan (Jinan Maintenance and Repair Center of Shandong Branch of National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Jinan Shandong 251400, China)

**Abstract:** In response to the low efficiency of safety inspections and lagging identification of hidden dangers in long-distance pipelines, an intelligent management system based on the “cloud edge end” architecture has been constructed. By deploying various sensing devices such as ultrasonic guided waves, magnetic leakage detection, and distributed optical fibers, combined with deep learning defect recognition models and finite element analysis strength evaluation methods, automatic detection of pipeline defects, external environmental threats, and abnormal operating parameters can be achieved. This system can provide technical support for the safety management of long-distance pipelines and has reference value for promoting the digital transformation of the industry.

**Keywords:** long-distance pipelines; Intelligent technology; security check; Hidden danger management; application

长输管道作为能源运输的关键基础设施, 其安全运行直接关系到国家能源安全和公共安全。随着管网规模扩大和服役年限延长, 管道面临腐蚀减薄、第三方破坏、地质灾害等多重威胁, 传统依赖人工巡检和定期检测的管理模式难以满足全天候、全覆盖的监控需求。检测手段单一导致隐患识别不及时, 数据分散造成风险评估缺乏系统性, 应急响应滞后增加事故发生概率。近年来, 物联网、人工智能和大数据技术的发展为解决上述问题提供了新思路。本研究提出融合多源感知、智能分析和协同决策的一体化技术体系, 通过工程实践验证其在提升检查效率、优化治理决策方面的应用效果, 以期为管道安全管理提供可行方案。

### 1 长输管道智能化应用技术体系

#### 1.1 智能感知与检测技术

长输管道智能感知层构建需要整合多类传感设备形成立体化检测网络。管道本体检测采用超声导波、漏磁检测和涡流检测三种物理场传感技术, 超声导波传感器以 5-10m 间距沿管线布设, 实现管壁厚度变化的毫米级精度监测; 漏磁检测探头搭载于内检测器,

在管道运行状态下完成腐蚀缺陷的连续扫描。外部环境感知依托光纤传感技术和视觉传感技术双重覆盖, 分布式光纤沿管道全线敷设, 利用瑞利散射效应捕获振动、温度和应变信号, 定位精度达到 5m 范围内; 高清摄像头配合红外热成像仪在重点区段部署, 捕获地表形变、第三方施工等威胁因素。运行参数感知通过压力传感器、流量传感器和温度传感器组成的工况监测单元实现, 传感器采样频率设定为 1Hz, 数据通过工业以太网汇聚至边缘计算节点。所有感知设备遵循统一的数据接口协议, 输出标准化的时序数据流和图像数据流, 为后续分析处理奠定数据基础。

#### 1.2 智能分析与预测技术

数据分析层采用深度学习模型与机理模型相结合的混合架构。缺陷识别模型基于改进的 Faster R-CNN 网络构建, 训练数据集包含 12 类典型缺陷共计 8600 个标注样本, 通过引入注意力机制强化小目标缺陷的特征提取能力, 在测试集上实现 93.7% 的识别准确率和 89.2% 的召回率。管道剩余强度评估采用有限元分析与神经网络代理模型耦合方式, 将管道几何参数、缺陷尺寸和运

行压力作为输入变量,输出爆破压力预测值,计算时间从传统方法的 20min 压缩至 3s 以内。隐患演化预测建立长短期记忆网络模型,输入历史检测数据、环境参数和运行工况形成的多维时间序列,预测未来 6 个月内缺陷尺寸的发展趋势,预测误差控制在 8% 以内。异常工况诊断采用孤立森林算法和自编码器组合策略,对压力波动、流量突变等异常模式进行实时识别,虚警率低于 5%。各类分析模型部署于边缘服务器和云计算平台,根据任务复杂度实施算力分配。

### 1.3 技术体系集成架构

整体架构采用“云边端”三层部署模式实现技术融合。端侧设备层包括各类传感器和数据采集终端,部署于管道沿线和场站,通过 4G/5G 无线网络或光纤专网完成数据上传。边缘计算层部署于区域控制中心,配置 GPU 服务器执行图像识别、异常检测等计算密集型任务,数据处理延迟控制在 500ms 以内,满足实时性要求。云计算层承载历史数据存储、模型训练和综合分析功能,采用分布式数据库管理 PB 级数据,支持跨区域、跨管道的统计分析和对比研究。数据流转遵循边缘优先原则,常规监测数据在边缘层完成处理,仅将异常信息和周期性汇总数据上传至云端,降低网络带宽压力。平台集成统一的数据中台和算法中台,数据中台建立管道空间信息、检测记录、维修履历的关联索引,算法中台封装各类分析模型为标准化服务接口,新增应用场景可通过接口调用快速实现功能扩展。系统开发 Web 端和移动端双重操作界面,管理人员可远程查看管道运行态势、接收告警信息和审批处置方案,实现全流程在线管控。

## 2 智能化技术在安全检查中的应用

### 2.1 管道本体缺陷智能检测应用

管道本体缺陷检测采用内外结合的智能检测方案。内检测器搭载高分辨率漏磁传感器阵列,随输送介质流动完成管道全线扫描,传感器采集的磁场信号经小波去噪处理后输入卷积神经网络,自动识别腐蚀坑、裂纹、凹陷等缺陷类型并标注空间位置。外部检测通过爬壁机器人携带超声相控阵探头执行,机器人沿管道表面匀速移动,探头阵列实时扫描管壁厚度分布,系统根据厚度变化率判定腐蚀程度。检测数据与管道地理信息系统关联,生成缺陷分布图并计算管段完整性指数。针对复杂缺陷组合,引入三维重建算法还原缺陷形貌,结合有限元应力分析评估剩余强度,为维修决策提供定量依据。

### 2.2 外部环境风险智能巡查应用

外部风险巡查依托无人机和固定摄像头组成的视觉监控网络。无人机按预设航线巡查管道走廊,机载

激光雷达扫描地形变化,图像识别算法检测施工机械、堆积物等威胁目标。固定摄像头覆盖穿越段和人口密集区,采用目标跟踪技术监控车辆和人员活动轨迹,当检测到违章施工行为时系统自动截图存证并推送预警信息。地质灾害监测通过合成孔径雷达干涉测量技术实现,卫星数据解译获取地表沉降速率,形变超过阈值的区段纳入重点巡查清单。巡查数据汇入风险评估模型,结合管道埋深、防护等级等因素计算风险指数,生成分级管控方案。

### 2.3 安全检查数据智能管理应用

检查数据管理构建多源异构数据融合平台。内检测报告、外部巡查记录、在线监测数据按统一标准入库,建立以管道里程桩号为索引的空间数据库。平台开发自然语言处理模块,自动提取检测报告中的缺陷描述、尺寸参数和处置建议,转化为结构化数据存储。数据质量控制采用交叉验证机制,对比不同时期同一位置的检测结果,识别数据异常值和测量误差。知识图谱技术将检查数据与设计资料、维修记录关联,追溯缺陷形成原因和发展历程。平台提供多维度查询接口,支持按缺陷类型、威胁等级、管段属性等条件筛选,生成检查报告和统计分析图表,辅助管理决策。

## 3 智能化技术在隐患治理中的应用

### 3.1 隐患智能识别与分级应用

隐患识别系统整合检测数据与威胁评估模型实现自动判定。系统读取管道缺陷尺寸、位置和形态特征,结合管道设计压力、使用年限和介质特性,通过模糊综合评价法计算单项隐患的威胁指数。腐蚀缺陷根据深度与壁厚比值判定等级,裂纹缺陷依据长度和取向确定危险程度,机械损伤按凹陷深度和应变集中系数评估。外部威胁采用地质灾害易发性、第三方施工频次和防护措施完备性三维度量化。系统设定四级分类标准,Ⅰ级隐患需立即处置,Ⅱ级隐患纳入年度计划,Ⅲ级隐患持续监测,Ⅳ级隐患常规管理。识别结果自动推送至责任单位,附带现场照片、检测报告和历史记录,形成隐患档案。

### 3.2 治理方案智能决策应用

决策系统构建隐患-措施匹配知识库和多目标优化引擎。知识库存储腐蚀补强、裂纹修复、管段更换等十余种治理工艺的适用条件、施工难度和成本参数。系统根据隐患类型、管道材质和现场环境筛选候选方案,通过层次分析法评估安全性、经济性和可操作性。复合缺陷采用决策树模型分解处置顺序,优先消除主导失效模式的威胁因素。维修计划优化考虑停输损失、作业窗口期和资源调配约束,采用遗传算法求解最优排程方案。系统生成包含施工工艺、材料清单、质量

控制要点的详细作业指导书，并标注关键风险点和应急预案。决策过程保留人工审核环节，专家可调整方案参数或否决系统建议。

### 3.3 治理效果智能评估应用

效果评估建立治理前后对比分析机制。系统调取治理前的检测数据作为基准，治理完成后通过无损检测验证修复质量，对比缺陷尺寸变化和应力分布改善情况。补强区域采用超声测厚和硬度测试确认焊接质量，更换管段通过射线探伤检查焊口缺陷。评估模型计算治理后管段的剩余寿命延长年限和失效概率下降幅度，量化安全效益。经济效益评估统计直接成本、停输损失和预期收益，计算投资回收期。系统跟踪治理后管段的运行数据，监测压力波动、温度变化和振动特征，识别潜在的施工质量问题的。评估结果录入知识库，积累不同治理工艺的实际效果数据，为后续决策优化提供参考。

## 4 应用实践与效果验证

### 4.1 工程应用实施

选取某天然气长输管道的 186km 管段作为试验区开展智能化改造。该管段穿越山地、平原和河流，沿线分布 3 座压气站和 12 个阀室，运行压力 10MPa，服役年限 17 年。实施过程分三个阶段推进：感知设备部署阶段在管道沿线安装光纤传感系统，重点区段增设高清摄像头和红外探测器，压气站配置边缘计算服务器；系统集成阶段完成 SCADA 数据接口对接，建立检测数据标准化流程，部署深度学习模型和预测算法；试运行阶段开展为期 6 个月的并行验证，人工巡检与智能系统同步作业，对比检出率和响应时效。改造期间保持管道正常运行，设备安装利用停输维护窗口期完成，系统调试采用灰度发布策略逐步接管监控功能。

### 4.2 安全检查与隐患治理效果分析

智能检查系统运行 18 个月共识别缺陷 327 处，其中腐蚀类 216 处、机械损伤 73 处、裂纹 38 处。与传统人工巡检相比，小尺寸缺陷检出率提升 41%，漏检率从 12% 降至 3%。光纤振动监测成功预警第三方施工威胁 9 次，平均响应时间缩短至 15min，较人工巡查提速 73%。隐患治理方面，系统自动生成的处置方案采纳率达 82%，维修周期从平均 45 天压缩至 28 天。预测模型对 37 处重点缺陷进行跟踪，实际演化趋势与预测曲线的平均偏差为 6.8%，提前 3 个月预判出 2 处可能失效的管段并实施更换。治理后复检显示，修复区域应力集中系数下降 34%，管段完整性评分平均提升 1.3 个等级。试验期内管段未发生安全事故，泄漏事件较历史同期减少 67%。

### 4.3 综合效益评估

经济效益方面，智能化系统投资 2380 万元，年运维成本 340 万元。检测效率提升减少停输时间累计 126h，折合经济损失避免 1920 万元。隐患提前治理避免 3 次潜在泄漏事故，预估损失规避 4500 万元。维修计划优化降低人工成本 23%，材料损耗减少 18%。综合计算投资回收期为 3.2 年。安全效益体现在风险管控能力增强，管道失效概率从年均 1.2‰ 降至 0.4‰，本质安全水平显著提高。管理效益表现为决策响应速度加快，数据驱动的科学决策替代经验判断，资源配置效率提升。环境效益通过减少泄漏事故降低土壤和水源污染风险，无人机巡检替代部分车辆巡查减少碳排放。技术应用的社会效益在于保障能源供应稳定性，增强公共安全保障能力。

## 5 结论

本研究构建的智能化管理体系通过感知层、分析层和决策层的协同，实现了长输管道从被动检查向主动预警的转变。工程应用表明，该体系显著提升了缺陷检出精度和威胁响应速度，优化了维修资源配置，降低了管道运行风险。然而，当前仍存在模型泛化能力不足、多源数据融合深度有限等问题。未来研究可从三方面深化：一是建立涵盖更多管道类型和服役环境的训练样本库，提升算法适应性；二是发展数字孪生技术，实现物理管道与虚拟模型的实时交互；三是探索区块链在检测数据确权 and 跨企业共享中的应用，推动行业协同。随着技术成熟和成本下降，智能化管理将成为长输管道安全保障的标准配置。

### 参考文献：

- [1] 王晓峰, 许春艳, 陈超. 油气长输管道泄漏监测与定位技术的智能化升级 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(18): 190-192.
- [2] 李英. 智能化技术在油气长输管道与城市输配网络中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(24): 154-156.
- [3] 闫洁, 张倩, 杨琦, 等. 智能化技术在长输管道自动焊装备的应用现状及展望 [J]. 焊管, 2023, 46(12): 9-13+27.
- [4] 张川. 智能化技术在管道完整性管理中的研究与应用 [J]. 化工安全与环境, 2022, 35(28): 5-9.
- [5] 陈帅. 浅谈 5G 通讯技术在天然气长输管道智能化控制上的应用 [J]. 中国设备工程, 2022(07): 27-29.

### 作者简介：

郭旭东 (1987-), 男, 汉族, 吉林四平人, 本科, 注册安全工程师, 研究方向: 长输油气管道安全管理。