

长输管线智能化巡检技术及其在管道完整性管理中的应用

王 琦 (北京石油化工工程有限公司西安分公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 本研究聚焦长输管道智能化巡检技术体系与管道完整性管理的融合应用, 通过剖析无人机巡检、分布式光纤传感、惯性导航检测等核心技术的集成逻辑, 结合国内典型工程实践, 验证了智能化巡检对管道风险防控的技术价值。研究表明, “空天地一体化”智能巡检系统可实现管道全生命周期数据的闭环管理, 使高后果区实时监控覆盖率提升至100%, 预警响应时间缩短超60%。针对技术推广中的现实挑战, 提出了从技术迭代、管理优化到标准体系建设的系统性解决方案, 为油气管道数字化转型提供理论与实践参考。

关键词: 长输管道; 智能巡检; 完整性管理; 光纤预警; 惯性导航

中图分类号: TE88 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 027-0157-03

Intelligent Inspection Technology for Long-Distance Pipelines and Its Application in Pipeline Integrity Management

Wang Qi (Beijing Petrochemical Engineering Co., Ltd. Xi'an Subsidiary, Xi'an Shaanxi 710000, China)

Abstract: This study focuses on the integrated application of intelligent pipeline inspection technology systems and pipeline integrity management. By analyzing the integration logic of core technologies such as UAV inspection, distributed optical fiber sensing, and inertial navigation detection, combined with domestic engineering practices, it verifies the technical value of intelligent inspection in pipeline risk prevention. Research demonstrates that the “air-space-ground integrated” intelligent inspection system achieves closed-loop management of pipeline lifecycle data, increasing real-time monitoring coverage of high-consequence areas to 100% and reducing warning response time by over 60%. Addressing practical challenges in technology promotion, systematic solutions are proposed, ranging from technological iteration and management optimization to standard system construction, providing theoretical and practical references for the digital transformation of oil and gas pipelines.

Keywords: long-distance pipelines; intelligent inspection; integrity management; optical fiber warning; inertial navigation

长输管道作为能源输送的关键基础设施, 其安全运行直接关联国家能源安全与生态环境安全。在此背景下, 管道完整性管理理念逐步成为行业共识, 其核心在于通过全生命周期数据采集、风险评估与预防性维护实现管道本质安全。随着物联网、人工智能等技术的突破, 智能化巡检技术通过多源传感网络构建与大数据分析, 推动管道管理从“事后处置”向“事前预警”转型。本文系统梳理智能化巡检技术架构, 深入分析其在完整性管理各环节的应用路径, 并结合典型案例量化实施成效, 为行业技术升级提供决策依据^[1]。

1 长输管道智能化巡检技术体系

1.1 空地一体化立体巡检网络

空地一体化技术通过空中、地面、地下多维度监

测手段的协同配合, 构建起覆盖管道全域的感知网络, 如表1所示。其中, 无人机智能巡检系统凭借搭载的激光雷达与高光谱成像设备, 能够对管道沿线进行1:500精度的三维地貌建模。

此外, 无人机配备的红外热像仪可捕捉埋地管道泄漏引发的地表温度异常, 检测灵敏度能达到0.5℃温差。在智能视频监控网络方面, 基于深度学习技术的AI摄像头部署于管道高后果区域, 借助YOLOv9算法可对机械挖掘、管道占压等威胁行为进行实时识别。这些智能摄像头可与周界振动光纤协同工作, 形成融合“视频识别”与“振动预警”的双重主动防护体系, 显著提升入侵行为的识别能力。同时, 集成了北斗定位与物联网通信功能的5G+移动巡检终端, 实

表1 空地一体化技术构成与功能

技术模块	核心设备	监测功能	应用场景
空中巡检单元	固定翼 / 多旋翼无人机、红外热像仪	地表变形扫描、非法施工识别、植被覆盖监测	地质灾害区、无人区、沼泽地带
地面监控单元	AI摄像头、振动光纤、声波传感器	人员入侵识别、机械施工报警、泄漏声波捕捉	高后果区、站场阀室、第三方施工区
移动处置单元	5G智能终端、GPS定位装备	任务派发、现场查证、应急处置	全天候巡护、预警响应、维修作业

表 2 完整性管理各环节技术应用

管理环节	核心需求	智能技术应用	管理效能提升
数据采集	管道空间数据、环境参数、运行状态	IMU 内检测、无人机航测、物联网传感	数据采集效率提升 70%，坐标精度达厘米级
风险评估	腐蚀、第三方破坏、地质灾害分析	数字孪生系统、机器学习风险模型	高后果区识别率 100%，风险预测准确率 85%
维修决策	维修优先级排序、维修方案优化	BIM 维修模拟、资源调度算法	维修成本降低 30%，应急响应时间缩短 60%
效能评价	管理闭环验证、KPI 量化分析	大数据分析平台、可视化看板	事故率下降 50%，完整性管理达标率 100%

现了对巡护人员实时轨迹的精准追踪和任务的智能调度分发。

1.2 分布式传感与智能预警技术

传感技术作为管道监测的“神经末梢”，通过物理信号捕捉实现早期风险预警。 Φ -OTDR 振动光纤系统以通信光缆为感应介质，依托相位敏感光时域反射技术对地表振动进行实时感知，新型系统引入 Transformer 神经网络进行信号特征提取，可精准区分机械挖掘（准确率达 96.3%）、车辆通行（准确率 92.1%）与自然干扰（准确率 89.7%）。次声波泄漏检测技术通过在关键阀室部署传感器阵列，捕捉管道泄漏产生的特定频段声波信号，并应用盲源分离（BSS）等先进算法，实现对泄漏点的快速定位。阴极保护智能监测技术则将脉冲电流法（PCM）与地理信息系统（GIS）深度集成，实时采集并分析管道防腐层电位状态，能够高效识别防腐层的微小破损缺陷，这些智能传感与预警技术的综合应用，大幅降低了系统误报率，有效提升了对于非法入侵活动和泄漏事件的预警准确性与响应能力^[2]。

1.3 高精度定位与三维测绘技术

空间数据的精准获取是管道变形监测的重要基础。惯性导航内检测（IMU）技术通过搭载高精度陀螺仪与加速度计的智能检测器，在管道内部行进过程中以 0.02% 的应变分辨率采集三维坐标数据。该技术能够有效监测管道发生的细微位移变化，为相关防护措施的制定提供重要的量化依据。多源数据融合定位技术则通过整合高精度差分定位（RTK）、IMU 内检测数据以及 GIS 地形数据，构建起管道“地空一体”的精密坐标参考框架。

1.4 数字孪生与智能决策平台

大数据技术通过深度挖掘巡检数据价值，为管理决策提供核心支撑。管道数字孪生系统整合 SCADA 实时运行数据、IMU 内检测结果及 GIS 地形信息，构建高度仿真的管道三维虚拟模型^[3]。该平台支持动态模拟不同工况下的油品输送过程，并通过仿真分析辅助优化调度方案，实现输送效率提升与能耗优化。AI

风险预测模型则依托卷积神经网络（CNN）对无人机巡检图像进行智能分析，自动识别地表沉降、裂缝等潜在隐患；同时，结合历史数据训练的时序预测模型（如 LSTM）可对管道腐蚀速率进行短期预测，为预防性维护计划的制定提供科学预判依据。

2 智能化巡检在管道完整性管理中的应用实践

2.1 全周期数据采集与状态感知

智能化巡检彻底革新传统管道数据采集模式，构建起多维度感知网络，如表 2 所示。在基础数据数字化方面，借助 IMU 内检测技术获取管道精准坐标、埋深及弯头位置等空间信息，以此建立管道基线数据库；通过无人机航拍采集地表覆盖与地形地貌数据，并将其融入管道地理信息系统；同时利用智能传感器实时采集腐蚀电位、管壁应变和泄漏信号等物理参数，实现基础数据的全面数字化管理。

2.2 风险评估与预警响应优化

多源数据融合推动风险评估从定性分析向定量研判转变。动态风险评级模型整合光纤振动频次、IMU 位移量、腐蚀速率等关键指标，采用熵权-TOPSIS 复合算法动态赋权，构建管道风险指数（PRI）量化评估体系，当 PRI 值突破分级阈值时自动触发蓝、黄、红三级预警。智能预警联动处置机制建立“感知-复核-查证-决策”全流程闭环，振动报警触发后，系统自动调取视频监控进行 AI 行为识别初筛，确认威胁后调度无人机实施多光谱扫描与三维实景取证，最终融合多源数据生成处置预案，通过流程再造实现分钟级响应，显著提升风险防控的靶向性与时效性。

2.3 维修决策与资源智能调配

数据驱动模式重构维修资源配置范式。维修优先级矩阵基于 IMU 位移速率、腐蚀深度及管段服役年限等参数，构建涵盖安全风险、环境影响与经济成本的多目标优化模型，输出科学维修序列并划分 A-D 级风险管段，指导资源定向投放^[4]。数字工单闭环管理系统贯通全生命周期管理链，依托 GIS 空间分析智能匹配最近维修团队，实时协同备件库存与特种设备资源，通过移动终端上传处置过程影像实现远程质量监督，

并采用无人机复检与传感器数据比对完成效果验证,形成“智能诊断-精准派单-高效处置-科学验证”的数字化运维生态。

2.4 管理效能量化评价体系

智能化巡检构建“监测-分析-优化”的管理进化体系。KPI 动态监测系统通过巡线轨迹覆盖率、隐患识别准确度等核心指标构建效能雷达图,利用可视化看板实现实时监控、异常根因分析与跨区域绩效对标。AI 自进化机制采用联邦学习框架支持跨区域模型协同训练,持续学习误报样本优化振动识别阈值,通过 LSTM-RNN 混合网络预测新型风险模式,并自动沉淀风险特征库与处置案例库,形成“数据驱动优化-模型迭代升级-策略持续演进”的良性循环,为管理体系提供核心进化引擎。

3 技术实施挑战与优化路径

3.1 技术层面瓶颈与突破方向

当前智能化巡检技术在实施中面临系统集成、环境适应及缺陷识别等技术瓶颈。系统集成方面,多源异构系统如光纤预警、视频监控、IMU 内检测等因协议不统一导致数据融合效率低下,优化方案是开发基于 OPC UA 的边缘计算网关,实现协议转换与数据轻量化处理。复杂环境适应性不足表现为-30℃以下环境中无人机电池续航缩短 50%,沙漠地区沙尘暴易造成摄像头失效,可通过采用石墨烯发热膜的无人机电池保温技术和开发自清洁防尘的摄像头防护罩来解决。

3.2 管理与应用层面挑战及对策

在智能化巡检技术推广应用中,管理与应用层面面临运维成本、标准体系及组织变革等挑战。运维成本方面,智能巡检系统初期投资是传统方案的 3-5 倍,且专业数据分析人才短缺,应对策略是构建“云-边-端”架构,将非实时数据上传云端分析以降低本地硬件投入,同时联合高校开设管道智能运维专业培养复合型人才。标准体系缺失表现为行业缺乏统一的智能巡检技术标准,数据安全风险突出,解决路径是推动《油气管道智能巡检技术规范》等标准制定,并建立基于区块链的数据溯源机制保障数据安全。组织变革存在阻力,传统巡检队伍数字化转型意愿低,跨部门数据共享不畅,可通过建立“AI 初筛+人工复核”的协同机制,将数据共享纳入部门 KPI 考核,推动组织流程重构来应对^[5]。

4 典型案例对比分析

4.1 山东董潍智慧管道项目

该项目构建了“生产指挥-安全监控-应急管理-完整性管理”四大智慧系统,通过部署 191 台 AI 摄

像头,实现高后果区监控 100% 全覆盖;同时依托数字孪生平台集成 SCADA 实时数据,对油品输送过程进行动态模拟。项目投运 3 年来成效显著,累计减少原油运输车辆 264 万辆次,降低碳排放 140.8 万 t,为企业节约物流成本达 32 亿元,在提升管道安全管控能力的同时实现了经济效益与环境效益的双重优化。

4.2 陕西延长石油空地一体化巡护

该项目创新构建“无人机+振动光纤+5G 终端”立体巡检网络,通过建设无人机机场实现自动巡检功能,振动光纤与 5G 终端的联动设计,使报警响应时间控制在 15min 以内。实际应用效果显示,第三方施工识别效率较传统模式提升 300%,人工巡检频次降低 50%,年节约运维成本达 800 万元,有效实现了巡检效率提升与成本优化的双重目标。

4.3 天津港南疆管线智能检测

该项目采用“PCM+RTK+ 无人机”组合技术,通过无人机搭载 PCM 设备开展防腐层检测,单月完成 23 次检测作业,较传统方式效率提升 64%;同时开发管道综合管理系统,实现视频监控与风险预警的联动响应。在实际应用中,该技术组合在冬季保供期间实现隐患整改率 100%,并为《天津市管道保护条例》的出台提供了技术实践支撑,有效推动了区域管道安全管理的标准化进程。

5 结语

长输管道智能化巡检技术通过多技术融合与数据驱动,为完整性管理带来技术范式革新。实践证实,智能巡检系统可将高后果区监控覆盖率提升至 100%,预警响应时间缩短超 60%,推动管道管理从“被动应急”向“主动预防”转型。其中,IMU 内检测与光纤预警技术在冻土区、滑坡带等复杂场景中优势显著,已成为管道安全管控的核心支撑。

参考文献:

- [1] 王海洋.长输管道智能运维探索与实践[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(21):17-19.
- [2] 邓志强,陈远鹏,袁尹,等.长输管线智能巡查系统在油气长输管道中的应用研究[J].自动化应用,2024,65(16):294-297.
- [3] 管锡昭,黄素琴,邓志强.无人机智能巡检系统在长输管道中的应用研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(19):110-112.
- [4] 张锐.油气长输管道巡检中智能视频监控技术应用研究[J].石化技术,2022,29(07):244-246.
- [5] 张明.天然气长输管道运行安全风险及预防措施[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(04):87-89+92.