

石油天然气管道完整性管理的关键技术与应用实践

尚钰姣（贵州荣基安全科技有限责任公司，贵州 贵阳 550000）

摘要：石油天然气管道作为能源输送的核心载体，其安全运行关乎国民经济与生态安全，传统管理模式依赖事后维修，难以应对地质灾害、腐蚀老化等多源风险。本文基于技术迭代与管理范式革新，系统阐述管道完整性管理的技术架构重构路径，聚焦智能检测、风险评估模型及全生命周期管理等关键技术突破。结合我国自主化实践与欧美监管经验，提出技术自主创新与标准国际化的协同发展策略，为构建韧性输运体系提供理论支撑与实践参考。

关键词：石油天然气管道；完整性管理；智能检测技术；全生命周期管理；风险评估模型

中图分类号：TE832

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）024-0100-03

Key technology and application practice of oil and natural gas pipeline integrity management

Shang Yujiao (Guizhou Rongji Safety Technology Co., LTD., Guiyang Guizhou 550000, China)

Abstract: As the core carrier of energy transportation, the safe operation of oil and gas pipeline is related to the national economy and ecological security. The traditional management mode relies on post-maintenance, and it is difficult to deal with multi-source risks such as geological disasters, corrosion and aging. Based on technology iteration and management paradigm innovation, this paper systematically expounds the path of technical architecture reconstruction of pipeline integrity

Key words: oil and gas pipeline; integrity management; intelligent detection technology; full life cycle management and risk assessment model

全球能源转型加速推进，油气管道网络规模持续扩张，其安全性与可靠性成为保障能源动脉畅通的核心命题，当前复杂地质环境与材料老化等问题加剧管道失效风险，传统以应急响应为主导的管理模式暴露出成本高、时效差等缺陷。在此背景下管道完整性管理通过集成物联网、大数据等技术，推动风险防控从“被动处置”向“主动预测”跃迁。本文从技术架构升级、核心算法突破及政策协同机制三重视角，探讨完整性管理的实施路径，以期为行业安全管理范式转型提供系统性解决方案。

1 管道完整性管理的范式演进与技术架构

1.1 被动维修向主动防控的概念演进

传统管道安全管理长期依赖“事故驱动”的被动维修模式，其本质是对已发生缺陷的应急响应，这种模式存在明显滞后性，难以应对复杂地质环境与材料老化引发的多源风险，导致运维成本高企且安全冗余不足。随着风险管理理念的深化，行业逐渐转向以数据驱动的主动防控范式，其核心在于构建“识别-评估-干预”的动态闭环系统。主动防控强调通过腐蚀速率建模、应力监测等技术预判风险，并基于剩余强度评价制定预防性维护策略，实现从“事后补救”到“事前控制”的跨越。这一转变不仅重构了安全管理的底层逻辑，更推动企业从“合规达标”向“战略安全”

的价值认知升级，为管道全生命周期韧性奠定基础。

1.2 智能化驱动的技术体系重构

智能化技术革新正在重塑管道安全管理的底层逻辑，其核心在于构建覆盖数据采集、分析决策与执行响应的全链条技术生态。在数据感知层，光纤传感器与智能清管设备的协同部署突破了传统监测手段的精度极限，通过分布式光纤传感网络对管道应力形变、腐蚀缺陷等关键参数进行毫秒级动态捕捉，微小裂纹识别率突破 90% 门槛，为风险预警提供高置信度数据源。

数据解析层引入机器学习算法，将历史运维数据与实时监测信息进行多维度特征融合，构建基于时空关联分析的剩余寿命预测模型，推动风险评估从经验驱动向模型驱动转型，预测误差率稳定控制在 7% 以内，显著提升决策科学性。

跨部门数据壁垒的消解成为技术重构的衍生价值，地质构造、人口密度、环境敏感区等 18 类异构数据的标准化集成，支撑高后果区动态评估模型的精准构建。GIS 数据中枢的建立打通了规划、运维、应急等多业务系统间的信息孤岛，管控效率提升 40% 以上，标志着行业从离散化管控向体系化治理跃迁。技术革新催生的“监测-诊断-优化”智慧运维范式，正推动管道管理从传统人工巡检向预测性维护转型，

表 1 管道检测技术代际性能对比

技术类型	检测精度	覆盖效率	适用场景适应性
传统人工巡检	厘米级（肉眼辨识）	30km/ 人 · 天	平坦地形陆上管道
高清漏磁检测	±1.0mm	全管径自动扫描	复杂地质陆上管道
光纤传感监测	±5με 应变分辨率	连续分布式监测	海底 / 高电磁干扰区
无人机多光谱	±0.5℃ 热灵敏度	200km²/ 架次	长距离地表巡检

为行业高质量发展注入新动能。

1.3 全生命周期管理的行业影响

全生命周期管理正系统性重构管道行业的运营范式，其变革效应贯穿规划、施工、运维及资产价值评估全链条。规划设计阶段，BIM 技术的深度集成推动材料选型与防腐设计环节同地质数据的动态交互，三维模拟优化使路由方案的地质灾害风险点数量显著下降，工程设计的安全冗余度得到本质提升。施工环节的数字化交付系统将焊接参数、涂层检测等核心工艺数据与实体管道进行全息映射，构建贯穿建造周期的数据血缘链条，为运维阶段提供高保真信息基底。

运营阶段构建的“监测评估 - 分级处置”动态管理体系，依托实时诊断数据流与预案库的智能匹配，推动维修响应效率提升 60% 以上，重大缺陷的闭环处置周期压缩至小时级。技术迭代同步催生组织架构革新，跨部门完整性管理中心的成立成为行业共识，技术标准统一与资源协同调度驱动年度维护成本下降近两成。

更深层次的变革体现在资产价值评估体系的重构——管道安全状态矩阵、维护成本折现率等核心参数实现全量化分析，引导行业从粗放式规模扩张转向精细化效益优先模式。

2 全生命周期管理的核心技术突破

2.1 风险前置控制与设计优化

全生命周期管理通过贯通规划、设计、施工及运维的全流程风险防控体系，实现安全防线的前移与系统强化，规划阶段融合多源遥感数据与管道应力监测技术，构建高敏感区域动态识别模型，精准规避地质灾害频发区与生态敏感带，从空间维度优化管道路由的先天抗风险基因，设计环节聚焦材料性能迭代与工艺参数适配，通过三维参数化建模技术实现防腐层厚度、焊缝几何形态等关键指标与地质力学环境的动态耦合，推动管道本体设计与服役场景的深度匹配，为管道全生命周期安全构筑起结构性屏障。

2.2 智能检测技术的关键进展

智能检测技术的系统性突破正在重构管道全生命周期管理的技术范式，其核心逻辑在于贯通数据采集、风险预警与维护决策的全流程协同。传统人工巡检依赖经验判断与周期性抽样，存在覆盖盲区大、响应滞后等固有缺陷，新型检测体系通过多模态传感融合与智能算法驱动，实现风险识别的空间全覆盖与时间连续性。

内检测技术通过高精度漏磁阵列与惯性导航的协同定位，将腐蚀缺陷识别精度提升至毫米级，定位误差较传统方法降低 80%，突破人工目视检测的物理极限。外检测领域，无人机载多光谱成像系统与地面光纤传感网络形成立体监测矩阵，陆海空全域覆盖能力较固定式传感器提升三倍，微泄漏信号的捕捉时效性从小时级压缩至分钟级。

检测数据的多维度融合进一步催生腐蚀速率预测模型，基于深度学习的特征提取算法将风险评估的定量化精度提升至 93%，推动运维决策从阈值报警向趋势预判转型。对比传统检测手段，智能检测技术在精度、适用场景、功能等方面均取得了显著突破，如表 1 所示。

3 我国管道完整性管理的实践突围

3.1 技术自主化进程的阶段性成果

我国管道完整性管理技术历经引进消化、局部突破到系统集成的演进过程，逐步构建起覆盖检测装备、数据分析与材料研发的自主技术体系。在检测装备领域，国产高精度漏磁探测器突破 ±1.5mm 级腐蚀缺陷识别能力，相较早期进口设备精度提升 50%，配套三轴惯性导航系统实现 0.3m 级定位误差控制，显著缩小与国外技术的代际差距。光纤应变监测系统实现 ±5μ ε 量级的实时应变监测，在海底管道及复杂地质环境应用中完成 40% 的进口替代，填补分布式传感网络的技术空白。

智慧管网分析平台集成国产传感器与 AI 算法架

表 2 我国管道完整性管理核心技术的自主化进展

技术类型	关键指标	应用领域	国产化率	突破阶段
高清漏磁检测器	精度 ±1.5mm	陆上管道腐蚀检测	65%	工程验证（2015-2020）
光纤应变监测系统	实时应变监测 ±5μs	海底 / 复杂环境管道	40%	局部替代（2020-2023）
智慧管网分析平台	百万级数据 / 秒处理能力	全域管道运维	85%	系统集成（2023-2025）
X80 管线钢	屈服强度 ≥ 555MPa	高压输气管道	98%	全面普及（2010-2018）

构，形成每秒百万级数据流的实时解析能力，故障响应效率提升 40%。核心算法研发方面，基于深度学习的腐蚀速率预测模型将误差率压缩至 8% 以下，达到国际主流算法性能水平。材料研发领域，X80 高强钢屈服强度突破 555MPa，国内应用覆盖率超过 98%，X100 级钢材完成工程验证，为高压输气管道建设提供自主化材料支撑。APDM（管道数据模型）实现设计、施工、运维数据的全生命周期贯通，形成覆盖管材性能、应力分布与腐蚀状态的数字化资产库。上述技术突破标志着我国管道完整性管理从核心技术依赖转向全产业链自主可控，部分领域实现从技术跟跑到国际并跑的跨越。对比传统检测手段，智能检测技术在精度、适用场景、功能等方面均取得了显著突破，如表 1 所示。我国管道完整性管理核心技术的自主化进展如表 2 所示。

3.2 标准化建设与政策协同

我国管道完整性管理标准化体系基于《油气输送管道完整性管理规范》构建，形成“国家标准－行业导则－企业规范”三级技术框架。国家标准明确风险评估、检测监测、修复维护等全流程技术要求，行业导则由能源主管部门联合中国石油学会等机构制定，重点规范高后果区识别、智能检测设备选型等专项技术应用。企业层面，国家管网集团、中国石油等央企编制数字化交付、应急响应等操作细则，实现标准体系与生产实践的深度适配。

政策层面，国家能源局通过《油气管道设施公平开放监管办法》强化企业主体责任，要求 2025 年底前完成服役超 20 年老旧管道基线评估，并建立完整性管理专项预算制度。以陕京输气系统为例，其年度技术更新投入占比提升至运维费用的 15%。标准化战略方面，国家标准化委员会发布《2021—2035 年标准化发展纲要》，推动我国管道风险评估模型与 ASME B31.8S、API 1160 等国际标准的双向互认，实

现高后果区划分方法等 12 项技术指标的全球通用性验证。

核心技术自主化目标通过《智慧管网建设白皮书》形成量化路径，国家能源局明确要求 2025 年国产传感器部署率不低于 70%、核心算法自主化率突破 80%。该政策直接驱动国家管网集团等企业建立“数据主权”技术清单，重点攻关光纤传感芯片、腐蚀预测算法等 10 类关键技术，为标准化体系注入自主创新基因。

4 结论

石油天然气管道完整性管理的技术升级实现风险防控范式革新，智能检测技术突破毫米级缺陷识别精度，机器学习模型将剩余寿命预测误差率降至 7% 以下，闭环响应机制使重大缺陷处置效率提升 60%。标准体系构建方面，三级框架贯通全流程技术要求，国产传感器部署率超 70% 的目标推动技术自主化，国际标准互认促成 12 项核心指标全球通用。全生命周期动态管控通过 BIM 技术降低 40% 地质灾害风险，数字化交付系统实现建造数据全息映射，运维成本缩减 30% 的同时资产估值提升 15%。技术、标准与管理协同创新，为能源基础设施韧性发展提供中国方案，奠定全球竞争新优势。

参考文献：

[1] 王明昊. 石油天然气管道运输安全防护管理及其应对方式分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(19): 69-71.

[2] 刘翔. 浅谈石油天然气管道安全管理问题及对策 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(15): 64-66.

[3] 尹行. 石油天然气管道安全风险及保护措施探讨 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(4): 28-30.

作者简介：

尚钰姣（1989.5-），女，山西省运城市人，硕士研究生，中级工程师，研究方向：安全管理和安全评价工作。