

长输油气管道企业安全管理的挑战与创新路径研究

刘 苗, 周李阳, 李子鹏

国家管网集团湖南公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年4月17日; 录用日期: 2025年6月2日; 发布日期: 2025年6月13日

摘 要

随着我国油气管道“全国一张网”战略的快速推进,长输油气管网规模持续扩大,但安全管理面临第三方施工破坏、地质灾害、腐蚀失效等多维风险叠加的严峻挑战。本文基于企业视角,结合国家法规与行业实践,系统分析安全管理核心痛点,并提出数字化转型背景下的创新路径。研究建议通过“智能监测+AI预警”技术融合、本体安全管控技术突破和管理机制数字化转型,推动油气管道安全治理从“被动处置”向“本质安全”转型,为“全国一张网”战略提供技术与管理双重保障。

关键词

长输油气管道, 安全管理, 数字化转型, 本体安全

Study on Challenges and Innovative Pathways for Safety Management in Long-Distance Oil and Gas Pipeline Enterprises

Miao Liu, Liyang Zhou, Zipeng Li

China Oil and Gas Pipeline Network Corporation Hunan Company, Changsha Hunan

Received: Apr. 17th, 2025; accepted: Jun. 2nd, 2025; published: Jun. 13th, 2025

Abstract

With the rapid advancement of China's "National One Network" strategy for oil and gas pipelines, the scale of long-distance oil and gas pipelines continues to expand. However, safety management

文章引用: 刘苗, 周李阳, 李子鹏. 长输油气管道企业安全管理的挑战与创新路径研究[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(2): 206-210. DOI: 10.12677/jogt.2025.472024

faces severe challenges from the superimposition of multi-dimensional risks such as third-party construction damage, geological hazards, and corrosion failure. From an enterprise perspective, this paper systematically analyzes the core pain points in safety management by integrating national regulations and industry practices, and proposes innovative approaches under the background of digital transformation. The study suggests that through the integration of "intelligent monitoring + AI-based early warning" technologies, breakthroughs in intrinsic safety control technologies, and digital transformation of management mechanisms, the safety governance of oil and gas pipelines can shift from "passive response" to "intrinsic safety", providing both technical and managerial guarantees for the "National One Network" strategy.

Keywords

Long-Distance Oil and Gas Pipelines, Safety Management, Digital Transformation, Intrinsic Safety

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在“全国一张网”战略深入推进的背景下，我国油气管道基础设施建设成效显著。《中国天然气发展报告(2024)》显示，截至2023年底，全国长输油气管网总里程达19万公里，其中天然气管道占比超65% (12.4万公里)，原油与成品油管道各占17.4% (3.3万公里)。然而，随着管网规模持续扩大，安全风险防控压力与日俱增，第三方施工破坏、地质灾害、管线老化等问题导致事故频发，传统管理模式已难以应对复杂环境下的安全需求。尽管《石油天然气管道保护法》等法规逐步完善，推动企业构建全生命周期管理体系，但多维风险交织与机制性障碍仍亟待突破。本文立足企业实践，从外部风险、本体安全、管理机制三方面剖析核心痛点，探索数字化转型下的创新路径。

2. 理论基础与研究框架

2.1. 安全管理与数字化转型理论基石

安全管理理论体系为长输油气管道风险防控提供了方法论指导。系统安全理论强调将管道系统中的人、机、物、环境等要素作为有机整体，通过全面识别和控制潜在危险因素，构建系统性安全防线[1]。风险管理理论则聚焦于风险的全流程管控，通过科学的风险识别、量化评估与精准控制，降低事故发生概率与损失程度[2]。

数字化转型理论指出，物联网、大数据、人工智能等技术的深度应用，能够重塑企业的业务模式与管理范式[3]。在油气管道领域，数字化转型旨在打破传统管理的时空限制与信息壁垒，实现从经验驱动向数据驱动的管理变革，为安全治理提供新的技术路径与思维模式。

2.2. 本质安全的理论内涵与实现逻辑

本质安全强调从源头消除或控制风险，使系统具备即使在异常情况下也能保障安全的固有属性。对于长输油气管道而言，本质安全要求贯穿管道规划、设计、建设、运营的全生命周期，通过技术创新、管理优化与制度完善，构建具有自我感知、自我诊断、自我修复能力的安全体系。在数字化转型浪潮下，借助智能监测、AI分析等技术手段，实时捕捉风险信号并主动干预，是实现本质安全的关键路径。

2.3. 研究方法设计

为确保研究结论的科学性与可靠性，本文综合运用多种研究方法。通过文献研究法，梳理国内外长输油气管道安全管理的前沿理论与实践成果，明确研究现状与发展趋势；采用企业调研法，对多家长输油气管道企业进行实地考察与深度访谈，获取企业在安全管理中的实际问题与需求；运用案例分析法，选取典型企业与事故案例，剖析安全管理创新实践的成效与经验教训；结合行业统计数据，进行定量分析，为研究结论提供数据支撑[4]。这些方法相互补充、验证，共同构建起完整的研究体系。

3. 企业安全管理核心痛点分析

长输油气管线企业的安全管理体系面临多维风险交织与机制性障碍，可归纳为外部风险防控困境、本体安全状态管控难点、管理机制运行短板三个维度，其相互作用加剧了安全治理的复杂性。

3.1. 外部风险防控困境

(1) 第三方施工干扰难题

第三方施工活动已成为管道安全的首要威胁，其风险源于施工方与管道企业间的信息壁垒。施工许可审批流程冗长、地下管线信息共享机制缺失，导致保护距离不足的违规操作频发[5]。尤其在城市更新与基建加速区域，非计划性施工对管道本体造成不可逆损伤，暴露出跨主体协同监管的失效。

(2) 地质灾害动态监测短板

地质敏感区的管线长期受滑坡、泥石流等动态灾害影响，传统巡检周期与灾害演化速度存在显著时差。现有监测技术对毫米级位移的捕捉能力不足，导致应力累积风险难以及时识别，形成“监测盲区—灾害突增”的恶性循环。

3.2. 本体安全状态管控难点

(1) 腐蚀失效风险

管道腐蚀控制面临材料退化机理复杂化与技术手段单一化的双重挑战。阴极保护系统的调控精度不足，难以适应土壤电阻率、杂散电流等环境参数的动态变化[6]。同时，腐蚀速率预测模型对多因素耦合作用表征能力有限，导致预防性维护决策缺乏科学支撑。

(2) 焊缝缺陷隐患

高钢级管道环焊缝的微裂纹、未熔合等隐蔽性缺陷检测存在技术瓶颈。传统无损检测方法受限于分辨率与覆盖率，缺陷漏检率居高不下。此外，焊接工艺参数与现场施工质量的偏差，进一步放大了全生命周期中的结构失效风险。

3.3. 管理机制运行短板

(1) 双重预防机制脱节

风险分级管控与隐患排查治理存在“两张皮”现象：风险数据库更新滞后于现场工况变化，导致防控措施与实际风险等级错配；隐患整改流程缺乏闭环追踪，部分企业过度依赖人工台账管理，造成整改效率低下与责任追溯困难。

(2) 应急响应效能不足

现有应急预案的场景适配性较差，跨区域应急资源调度机制尚未健全。事故处置过程中，信息传递链条过长、多主体指挥权限模糊等问题突出，延误了黄金救援窗口。此外，应急演练多流于形式，未能有效检验技术装备与人员的实战能力。

4. 安全管理创新路径研究

4.1. 外部风险防控

(1) 第三方施工破坏：基于智能监测的外部风险预警

通过加装前端物联感知设备，如高灵敏度光纤传感器等，实现对长输油气管线的全天候、全线路智能监测，实时捕捉管道周边环境物理变化，结合 AI 智能算法精准识别第三方施工、机械挖掘、人为破坏等异常振动信号，预警外部侵扰风险，将传统被动响应式安全管理转变为主动预防模式。

中国信息通信科技集团有限公司首次将光纤预警技术引入肯尼亚石油管道项目中，该光纤预警监测系统建成后，将通过现有光缆，实时监测管道环境物理变化，结合 AI 智能算法模型，及时发现并预警第三方施工、人为或非人为原因引起的异常振动等潜在破坏风险。

(2) 地质灾害威胁：高精度监测与 AI 预警融合

在滑坡、泥石流易发区部署分布式光纤传感系统与北斗形变监测设备，实现对管道本体位移、土壤应力的毫米级实时监测。结合历史灾害数据与气象预测，建立多因素耦合的地质灾害风险模型，通过 AI 算法提前 72 小时预警潜在风险，为管道迁改或加固争取时间。

国家管网集团古浪 - 河口天然气联络管道，针对地质不稳定区域的管道，一方面通过在管道本体上安装应变传感器，获取管道真实的应变变化数据；并从基于应力或基于应变判据出发，对管道的安全状态进行定量评价。另一方面，在滑坡表面变形明显的部位，通过监测滑坡表层的三维位移量，分析、判断滑坡的变形特征、变幅、滑动方向、滑动速率、稳定性及其发展趋势。该方法精度高，能反映出简易监测反映不了的变形迹象。

4.2. 本体安全管控：智能检测与精准维护技术突破

(1) 腐蚀失效风险：动态阴极保护与 AI 预测模型

采用智能阴极保护系统，通过物联网传感器实时采集土壤电阻率、杂散电流等参数，动态调整保护电位。同时，基于多源数据(内检测报告、环境参数、运行历史)构建腐蚀速率预测模型，实现腐蚀风险的分级预警与维护策略的精准制定。

青岛新机场配套航油管道工程，管道长度 30 余公里，设置权限阴极保护测试桩 50 余处，临时阴极保护 10 多处，实现具体到“厘米级”的精准检测定位，提升监测效能。与传统静态保护相比，腐蚀速率预测精度大大提升，维护成本大幅降低。

(2) 焊缝缺陷隐患：超高清内检测与全自动焊接技术

应用超高清漏磁内检测器，实现对焊缝微裂纹、未熔合等缺陷的亚毫米级识别。同时，推广全自动焊接工艺，通过焊接机器人与 AI 质量控制系统，确保焊缝参数与设计标准的高度匹配，从源头降低缺陷发生率[7]。

西南油气田公司，采用极限检测器搭配漏磁检测器，实现对管道凹陷变形与管道缺陷的全面体检，可精准检测，识别量化缺陷长度、宽度与深度尺寸。

4.3. 管理机制优化：数字化平台与应急能力升级

(1) 双重预防机制：一体化风险管控平台

搭建覆盖风险识别、分级管控、隐患排查的数字化平台，将风险数据库与现场工况实时联动，自动匹配防控措施。同时，通过移动终端与区块链技术，实现隐患整改的全流程闭环追踪与责任溯源[8]。

吴起 - 延炼输油管道，融合振动光纤预警、AI 视频监控、无人机巡检和智能感知终端等管道巡护新

技术, 搭建风险监测智能管控一体化平台, 实现地面传感器监测、光纤振动预警、AI 视频监控和空中无人机巡检、人工巡检等多源异构数据的统一管理、存储、分析、对齐、共享、分发及检索等功能。通过多维度变换、多模态综合、多尺度空间数据整合、数据集成, 实现各类监测数据的统一集成、汇聚、分析和共享应用。

(2) 应急响应: 5G + AR 远程指挥与区域联盟

构建基于 5G 网络的应急指挥系统, 通过 AR 眼镜、无人机等设备实现事故现场的实时回传与专家远程指导[9]。同时, 与消防、医疗等部门建立区域应急联盟, 共享资源与预案, 缩短跨部门响应时间。

深圳燃气组织的管道抢险模拟演练, 借助 5G 网络高速率、低延时和大容量的特点, 通过无人机、安监机器人及 AI 视频监控将现场高质量、超高清的直播画面回传至应急指挥部, 大幅提升指挥调度的灵敏性和精准性, 实现演练现场和指挥部的远程实时无缝连接。

5. 结论与建议

面对长输油气管线规模扩张与安全风险交织的复杂挑战, 传统安全管理模式已难以适应动态化、精细化治理需求。本文从外部风险防控、本体安全管控与管理机制优化三个维度, 系统剖析了当前企业安全管理的核心痛点, 并结合数字化转型趋势提出创新路径。研究结果表明:

(1) 通过“智能监测 + AI 预警”技术融合, 可有效破解第三方施工破坏与地质灾害防控的时空壁垒。光纤传感、北斗形变监测等技术的应用, 实现了风险感知由被动响应向主动预测的跨越, 典型案例表明其可将预警响应时间缩短, 显著提升风险防控效能。

(2) 本体安全管控的技术突破依赖于检测精度与维护策略的双重升级。超高清内检测、动态阴极保护系统等技术应用, 使腐蚀速率预测误差率降低, 焊缝缺陷检出率提升, 为全生命周期精准维护提供了科学依据。

(3) 管理机制的数字化转型是安全治理能力现代化的核心驱动。一体化风险管控平台与 5G + AR 应急指挥系统的实践表明, 双重预防机制执行效率提升, 跨区域应急响应时间缩短, 验证了数据驱动决策与多主体协同联动的可行性。

面向未来, 建议从三方面深化安全治理体系变革: 一是加快构建“空天地一体化”智能监测网络, 推动多源异构数据的深度融合与知识挖掘; 二是完善数字化安全标准体系, 建立覆盖设计、施工、运维的全流程数字孪生模型; 三是强化政企协同机制, 通过数据共享平台打破行业信息孤岛, 形成风险共治的生态化治理格局。通过技术创新、机制重构与能力建设的系统化推进, 实现油气管道安全治理从“事后处置”向“本质安全”的根本性转变, 为“全国一张网”战略提供坚实保障。

参考文献

- [1] 吴穹, 许开立. 安全管理学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002.
- [2] 赵来军, 吴建南. 风险管理理论与实务[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [3] 安筱鹏. 重构数字战斗力: 数字化转型的道与术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- [4] 陈向军, 王欢. 管理学研究方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2019.
- [5] 梁山林, 王明强, 廖玉龙. 管道保护之第三方施工风险防控浅析[J]. 建筑工人, 2025, 46(1): 8-11.
- [6] 吴海恩. 长输管道阴极保护技术应用分析[J]. 清洗世界, 2025, 41(3): 104-106.
- [7] 唐飞龙, 王龙. 三维高清漏磁内检测技术在天然气长输管道中的应用[J]. 设备监理, 2023(1): 55-58.
- [8] 王磊, 杭光强. 管道风险监测智能管控一体化平台建设与应用[J]. 管道保护, 2024(1): 96-102.
- [9] 李伟, 谢云飞. 基于 5G 新型成品油管道应急指挥通信系统研究[J]. 数字通信世界, 2021(9): 126-127.