

数字化转型背景下油气管道运维管理体系构建

罗炼

国家石油天然气管网集团有限公司云南分公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ME.2026050015

摘 要 : 随着能源安全战略的深化与数字技术的爆发式增长, 油气管道作为国家能源大动脉的运维管理也正在发生着由传统的、人工化的模式向数字化、智能化模式的转变。本文主要研究数字化转型背景下油气管道运维管理体系的重塑途径。文章先对运维管理所具有的主动预防、数据驱动、全域协同等特点进行了分析; 然后提出了一种以感知层、平台层、应用层为三层的架构; 最后给出了以全生命周期风险管控、智能决策辅助、跨域资源协同和绿色低碳运营为效能提升路径的建议。研究表明, 在将物联网、大数据、人工智能、数字孪生技术融合起来之后, 可以明显提高管道系统本质安全水平和运行效率。

关 键 词 : 油气管道; 数字化转型; 运维管理体系; 数字孪生; 主动预防; 智能决策

Construction of Oil and Gas Pipeline O&M Management System Under Digital Transformation

Luo Lian

Pipechina Group Yunnan Branch, Kunming, Yunnan 650000

Abstract : Driven by national energy security strategies and the rapid advancement of digital technologies, the operation and maintenance (O&M) of oil and gas pipelines—often regarded as the nation’s energy lifelines—is undergoing a fundamental shift from traditional, manual-intensive processes to data-driven, intelligent models. This paper explores strategies for restructuring pipeline O&M management systems within the context of digital transformation. It begins by identifying the core characteristics of modern O&M, including proactive prevention, data-centricity, and cross-domain collaboration. Subsequently, a three-tier architecture comprising the perception, platform, and application layers is proposed. Finally, the study outlines key pathways for performance enhancement: full-lifecycle risk control, intelligent decision support, cross-functional resource synergy, and green, low-carbon operations. The results demonstrate that the integration of IoT, Big Data, Artificial Intelligence, and Digital Twin technology significantly improves the intrinsic safety and operational efficiency of pipeline systems.

Keywords : oil and gas pipelines; digital transformation; O&M management system; digital twin; proactive prevention; intelligent decision-making

引言

在全球能源结构加速转型与国家“双碳”目标的双重约束下, 油气管道作为长距离、大流量、高风险的连续输送系统, 它的安全稳定运行同国家能源安全和社会经济稳定有着直接的关系^[1]。传统的油气管道运维模式一直依靠定期巡检、人工记录和经验判断, 存在响应滞后、数据孤岛严重、风险预警能力差等结构上的问题, 已经不能满足现在越来越复杂管网运行环境以及高强度保供的需求。数字化转型不是技术的简单叠加, 而是管理思想、组织架构、业务流程、技术体系等各方面的全面改变。目前以5G、云计算、边缘计算、人工智能为代表的新型信息技术已经渗透到石油天然气行业全产业链的各个环节, 使管道运维由原来的粗放型管理向精细化、智能化转变。创建符合新时代需要的数字化运维管理体系, 既是改善管道全生命周期管理效能的必然趋势, 又是推动行业高质量发展的关键动力。

一、数字化转型驱动下的运维管理新特征

(一) 从“被动抢修”向“主动预防”转变

传统的油气管道运维是按“故障发生-报警-响应-抢修”

的线性逻辑来运行的, 对于突然发生的泄漏或者第三方破坏等突发情况, 往往会造成安全事故和经济损失。采用 DAS、FBG、无人机激光雷达等技术, 可以实现对管道物理量的毫秒级实时感知, 把数据采集频率由原来的小时级提高到秒级甚至毫秒级。根

据大量的历史和实时的监测数据进行融合分析，采用机器学习算法建立模型，可以准确地发现微小的异常信号，在故障发生之前就发出预警，并且自动生成维护工单。从事后处置转向事前预防，非计划停输事件发生率大幅下降，提前把安全管理关口前移到了事前，由“治标”走向“治本”，使管道系统达到本质安全^[2]。

（二）从“经验决策”向“数据驱动”转变

长期以来，油气管道调度指挥、检修策略制定以及资源调配都依靠专业工程师个人经验，该种决策模式主观性强、一致性差、难复现，面对复杂的工况很难得出最佳的方案。数字化转型冲破束缚，创建起统一的数据治理准则，把 SCADA，GIS，完整性管理以及视频监控这些不同种类的异构数据融合起来，塑造出一个标准化的数据资产池。在此基础上，采用大数据分析引擎以及深度学习算法对压力波动、流量变化等各方面的数据进行深入挖掘，从而得到各个工况的风险等级和运行瓶颈。以多源数据为基础建立综合评分模型，得到动态的风险热力图。由于采用数据驱动型的运维策略，因此可以保证运维策略的准确性和客观性，并且具有可追溯性，减少由于人为因素造成的误差。

（三）从“单点管控”向“全域协同”转变

传统的运维模式下，管道各个段落的监控、检测、维修等环节各自为政，造成信息孤岛，从而使得跨部门、跨区域的协同工作变得十分困难，应急响应的时间也会变长。数字化转型采用云边端协同架构来创建起“源端感知、云端处理、终端执行”的全域协同网络。创建统一的信息化管理平台，使管道全线的状态信息可以实时共享并且业务流可以无缝对接，从而消除地域和部门之间的壁垒。当出现突发险情的时候，系统会自动调用周边巡线人员、应急物资库、救援队伍以及上下游站场等各个方面的资源，从而达到资源最优分配的目的，并且可以实现指令的秒级下发。同时用数字孪生技术，在虚拟空间里可以对管网做全方位的仿真推演，模拟应急预案的效果，进而得到最佳的协同作战方案。全域协同机制可以提高复杂环境下应急反应的速度以及整个作战能力，保证管道系统发生突发事件的时候可以迅速恢复并保持稳定。

二、数字化转型背景下运维管理体系的核心架构

（一）感知层：构建天地一体化智能监测网络

感知层是数字化运维体系的神经末梢，它的主要任务就是对管道本体及其周围环境进行全方位、全天候、高精度的感知。该层次抛弃了单一的地面巡检和固定式仪表监测的方式，创建起“空天地”一体化的立体监测网。在地面上布置5G传输的高密度智能传感器阵列，即光纤光栅应变计、分布式声波传感（DAS）、高精度压力温度变送器和阴极保护电位在线监测仪等，可以对管道的应力、振动、泄漏、腐蚀等进行微观检测^[3]。在“天”空上，用装载有合成孔径雷达（SAR）、高光谱相机和激光雷达的无人机群组，做周期性的广域巡查和灾害隐患扫描，主要针对地表沉降、水土流失以及第三方施工入侵这些宏观风险展开识别工作。另外利用卫星遥感技术，对长距离穿越生态敏感区的管道做大面积形变监测。边缘计算网关对前端采集的海量原始数据做初

步的清洗、滤波和特征提取，只把高价值的数据传送到云端，既减小了带宽的压力，又保证了数据传输的实时性和安全性，给上层应用提供了一个良好的数据基础。

（二）平台层：打造数据中台与数字孪生底座

平台层是数字化转型的大脑，是进行数据采集、存储、管理、分析和建模的场所。该层级首先要搭建起企业级数据中台，打通 SCADA、GIS、PIMS、ERP 等异构系统之间的数据壁垒，创建起统一的数据标准、元数据管理以及安全访问控制体系，从而达到多源异构数据的标准化接入和融合治理。在此基础上再加上大数据计算框架以及人工智能算法库，就可以对大量的时序数据、空间数据、非结构化视频数据展开并行处理和深入挖掘。更重要的是建立一个高保真的管道数字孪生底座，用 BIM（建筑信息模型）、GIS（地理信息系统）技术把管道的物理实体在虚拟空间里 1:1 地映射出来。该底座除了具有管道几何尺寸、材质性质、焊接信息等静态数据之外，又包含了实时压力、流量、温度等各种动态数据，并且还有以前的维修史、地质灾害档案等所有的生命周期数据。利用数字孪生体可以对物理世界中的设备进行无损检测、水力仿真和应急演练，在虚拟环境里实现物理世界和数字世界的实时交互以及双向反馈，给运维决策提供准确的数字镜像。

（三）应用层：部署智能化业务应用场景

应用层是数字化转型价值的最终落脚点，是给一线运维人员和管理者提供智能化业务服务的地方。该层次依靠平台层的能力来创建智能巡检、泄漏检测、风险预警、应急指挥以及资产全生命周期管理等诸多应用。智能巡检上用计算机视觉算法自动识别无人机回传视频中违章施工、植被侵占和设备缺陷，代替人工判读，在泄漏检测上用负压波法、声学成像和物料平衡算法实现分钟级的微小泄漏定位和确认，在风险预警上用机器学习模型预测管道剩余寿命和腐蚀速率，自动生成预防性维修建议。另外开发移动作业终端 APP，完成工单派发、现场填报、电子签名、知识图谱查询等移动办公，极大地提高了现场作业效率。这些应用场景并不是孤立存在的，而是通过业务流程引擎来串联起来，形成了一个发现问题、问题诊断、问题决策、问题执行、问题反馈的闭环式管理流程，使数字化技术真正变成生产力。

表 2：数字化运维体系三层架构功能与技术支撑对照

架构层级	核心功能	关键技术支撑	输出成果示例
感知层	多维数据采集、边缘预处理	DAS/FBG、5G、无人机、边缘计算	实时监测数据流、特征向量
平台层	数据融合治理、数字孪生建模	大数据平台、BIM+GIS、AI 算法库	统一数据湖、三维可视化模型
应用层	智能业务场景、闭环流程管理	移动端应用、工作流引擎、知识图谱	预警工单、维修建议、应急方案

三、数字化转型背景下油气管道运维管理效能提升路径

（一）基于全生命周期数据的完整性管理深化

针对油气管道完整性管理中数据碎片化与评估滞后的痛点，需

要将全生命周期数据当作完整性管理深化的基础。需要创建起从设计、建设、投产、运行到报废全过程的数字档案,把设计图纸、焊接记录、试压报告、内检测数据和历次维修记录等归入结构化档案并建立关联索引。运行期间用大数据技术分析历史内检测数据以及实时运行压力、腐蚀速率等数据的相关性,创建动态腐蚀发展模型来预估将来一段时间内腐蚀发展状况以及最大减薄量^[4]。

例如,针对老旧管线,不再依靠定期全面开挖来检验,而是把阴极保护电流分布数据同土壤电阻率数据融合起来,借助有限元分析软件模拟腐蚀坑的扩展状况,进而合理制订补强或者更换方案。基于数据驱动的深度完整性管理,不但可以缩减不必要的开挖验证成本,而且明显改善了风险控制的精确性,保证管道在全生命周期内安全裕度一直处在可控制的状态之中。

（二）构建自适应的智能风险预警与决策支持系统

随着管道运行环境越来越复杂,传统的静态阈值报警已经不能满足要求,必须建立具有自适应能力的智能风险预警和决策支持系统。该系统要依靠强化学习、深度学习算法,在以往事故案例及现场情况发生改变的时候,随时对风险预警的高低以及优先次序展开调整。

汛期或者地质灾害高发期,系统会自动把地表位移监测的报警阈值降低一些,对降雨量、地下水位等环境因素进行更加敏感的分析,从而达到风险等级的实时更新的目的。集成专家系统和知识图谱技术,当系统检测到异常的时候,不仅可以发出报警信息,还可以自动关联相似的历史案例,给出最佳的处理方案和所需要的资源清单,帮助管理人员做出科学的决策。另外利用数字孪生技术对多场景进行仿真推演,模拟不同的应急处置措施效果,为管理者提供可视化决策依据,将风险控制在萌芽状态,避免事态扩大。

（三）实施跨域融合的协同作业与资源优化配置

为打破部门壁垒与地域限制,提升整体运维效率,应该实行跨域融合的协同作业以及资源优化配置的机制。就具体的实施而言,创建统一的运维指挥调度中心,将巡线、维修、应急、物资等各方面的资源进行整合,形成一张图的指挥调度模式。发生突发事件的时候,系统就会自动制定出最佳的救援路线,安排最接近现场的抢修队伍以及物资储备,借助5G专网对现场进行高清视频回传并且给予远程专家指导的即时沟通。

再者,实行“网格化”管理模式,把长输管道分成若干个责任网格,每个网格有一支专职的数字化运维队伍,对本区域内日常监测、隐患排查和小型维修负全责,责任到人,任务到岗。此外利用物联网技术对抢修车辆、设备、备件实施实时定位及状态

监控,创建智能物资调配模型,依照预测性维护结果事先规划重要备件的配备计划,缩减等待时长。依靠这样的跨域融合协同机制,大大缩短了应急响应的时间,提高了资源利用率,形成了上下联动、左右协同的高效运维局面。

（四）推进绿色低碳导向的能效优化与碳排放管理

在双碳目标之下,运维管理要加入绿色低碳思想,推进能效改善和碳排放精细管理。另一方面,用大数据、人工智能技术对泵站、压缩机组运行参数进行实时分析和优化,创建出能效改善模型,调节机组转速、阀门开度和运行组合,保证设备一直处于高效运转区,减少单位输量的能耗。另一方面,创建管道全生命周期的碳排放核算体系,从电力消耗、燃料燃烧、材料使用等各方面采集数据,准确地算出各个环节的碳足迹。系统可以对高耗能环节和碳排放热点进行识别,并给出相应的节能改造建议,即推广变频调速技术、使用余热回收系统和使用环保型防腐材料^[5]。

此外,通过深度融合数字孪生技术,可以构建出高度仿真的虚拟运行模型来模拟各种设备运行策略、生产调度方案,并对其进行分析,以预测和计算各种策略所引起的碳排放量的变化趋势和数值。该过程给管理层评价各种方案的环保效益和可行性赋予结实、直观的数据根基,进而使他们作出科学合理的低碳经营策略和长期减排打算。依靠技术同管理的融合,推动油气管道运维实现绿色转型,达成经济效益和环境效益的双丰收。

四、结语

数字化转型是油气管道行业高质量发展的必然之路,本质就是依靠数据的流动和重组来改变运维管理底层逻辑以及业务流程。行业由被动抢修向主动预防、由经验决策向数据驱动、由单点管控向全域协同转变,迈入智能化发展的新阶段。以天地一体化感知、数据中台和数字孪生底座、智能化应用场景为三层架构,给转型提供技术支持。开展全生命周期完整性管理等举措,可以提高运维效率,防止发生安全事故,改善运营费用。

未来,随着量子计算等前沿技术的出现,运维体系也会向着自主化、无人化、智慧化的方向发展,产生自愈智能管网。这就需要企业在技术架构更新的过程中,对组织文化等各方面做深层次的变化。只有坚持创新驱动,融合数字技术同能源业务,才能形成现代化的油气管道运维管理新体系,为能源行业可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1] 潘涛,邱宇,于凯平,等. 跨国油气管道属地化运维与全生命周期管理研究 [J]. 国际石油经济, 2026, 34(03): 86-94.
- [2] 贺永利, 许克军, 崔振伟, 等. 油气管道工程一体化智能管控思考与应用探索 [J]. 油气储运, 2025, 44(10): 1179-1191.
- [3] 尚舵, 郁振其, 卢春雨, 等. 新型工业化背景下油气管道项目建设数字技术应用和展望 [J]. 数字化转型, 2025, 2(03): 54-61+80.
- [4] 冯庆善. 智能油气管网系统建设与运行方法论研究 [J]. 油气储运, 2024, 43(08): 841-854.
- [5] 冯庆善, 王春明, 何嘉欢, 等. 油气储运企业生产运维流程开发探索与实践 [J]. 油气储运, 2023, 42(01): 9-15.