

智慧化管理在油气管道全生命周期的应用与挑战

孙盼盼（济南港华环通市政工程有限公司，山东 济南 250000）

摘要：随着全球数字化转型浪潮的汹涌推进，各行业纷纷踏上数字化变革之路，油气管道行业也不例外。智慧化管理凭借其对海量数据的高效处理、流程的智能优化，已成为提升油气管道项目全生命周期管理效能的关键利器。本文深度扎根于项目管理理论，紧密结合当下数字技术日新月异的发展趋势，精心构建了一套涵盖智能规划、协同设计、精准施工、智慧运维、绿色退役的五阶段智慧化管理框架。在智能规划阶段，借助大数据分析与人工智能算法，对管道铺设路线、规模等进行科学预测与决策；协同设计环节，提出基于BIM（建筑信息模型）的三维可视化协同平台，让设计团队、施工方等各方人员能在同一虚拟空间实时沟通、协同作业，大幅提升设计效率与精准度。

关键词：智慧化管理；油气管道；全生命周期；数字孪生；BIM

中图分类号：TU996.7 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)026-0112-03

Application and Challenges of Intelligent Management in the Whole Life Cycle of Oil and Gas Pipelines

Sun Panpan (Jinan Ganghua Huantong Municipal Engineering Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: With the surging global digital transformation wave, various industries have embarked on the path of digital transformation, and the oil and gas pipeline industry is no exception. Intelligent management, with its efficient processing of massive data and intelligent optimization of processes, has become a key tool for improving the overall lifecycle management efficiency of oil and gas pipeline projects. This article is deeply rooted in project management theory and closely integrated with the rapidly developing trend of digital technology. It carefully constructs a five stage intelligent management framework covering intelligent planning, collaborative design, precise construction, intelligent operation and maintenance, and green retirement. In the intelligent planning stage, with the help of big data analysis and artificial intelligence algorithms, scientific predictions and decisions are made on pipeline laying routes, scales, etc; In the collaborative design phase, a 3D visualization collaborative platform based on BIM (Building Information Modeling) is proposed, allowing design teams, construction parties, and other personnel to communicate and collaborate in real-time in the same virtual space, greatly improving design efficiency and accuracy.

Keywords: intelligent management; Oil and gas pipelines; Full lifecycle; Digital twin; BIM

油气管道作为能源输送的“主动脉”，其建设与运营水平直接影响国家能源安全。我国已建成“八横八纵”天然气管道网络，总里程超过13万公里（国家能源局，2024）。传统管理模式在规划精度、施工效率、运维安全性等方面暴露出显著短板，亟需通过智慧化手段实现管理升级。智慧化管理通过物联网、大数据、人工智能等技术，实现项目全生命周期的数字化、可视化、智能化，成为行业发展的必然趋势（中国石油学会，2023）。

1 全生命周期智慧化管理框架构建

1.1 五阶段管理模型

基于项目生命周期理论，构建涵盖“规划-设计-施工-运营-退役”五阶段的智慧化管理体系。在这一体系中，各阶段借助先进的数据链技术，实现信息的无缝传递，进而形成高效的闭环管理机制。

①在规划阶段，充分运用地理信息系统（GIS）、大数据分析等前沿技术，深入开展路由优化工作，综

合考量地形地貌、地质条件、周边环境以及未来发展规划等多元因素，筛选出最优的管道铺设路线，同时建立完善的风险预控模型，对可能面临的自然灾害、第三方破坏、腐蚀风险等进行精准预测与评估，提前制定应对策略。②设计阶段，引入协同设计平台，打破专业间的壁垒，实现不同专业设计人员实时在线协作，提升设计效率与质量。大力推行参数化建模技术，将管道的管径、壁厚、材质等关键参数进行数字化定义，通过建立三维模型，直观展示管道系统的整体布局与细节构造，便于设计人员进行方案比选与优化。③施工阶段，利用物联网技术搭建实时过程管控平台，对施工进度、人员设备调配、物资供应等进行全方位监控，确保施工过程按计划有序推进。同时，采用二维码、射频识别（RFID）等技术，为每一个施工环节与关键部件赋予唯一标识，实现施工质量的全流程追溯，一旦出现质量问题，能够迅速定位问题源头并采取有效整改措施。④运营阶段，部署各类传感器，构

建全方位的状态监测网络，实时采集管道的压力、温度、流量、应变等运行参数，通过数据分析与机器学习算法，对管道的运行状态进行精准评估，提前预测潜在故障，开展预测性维护工作，变被动维修为主动维护，有效降低运营成本，保障管道安全平稳运行。⑤退役阶段，秉持绿色发展理念，高度关注环境友好与资源回收。制定科学合理的退役方案，采用环保的拆除工艺，减少对周边生态环境的影响。对退役管道及附属设施进行分类回收，通过再制造、再利用等方式，提高资源利用效率，实现经济效益与环境效益的双赢。

1.2 技术融合路径

1.2.1 区块链技术

作为一种分布式账本技术，区块链通过加密算法与去中心化架构，为油气管道工程数据提供了不可篡改的存证服务。在管道全生命周期中，从规划设计阶段的基础资料，到施工过程中的进度记录、质量检测数据，再到运营维护阶段的设备状态信息，均能借助区块链技术安全存储。这不仅有效提升了多方协同作业时数据共享的效率，让设计单位、施工方、运营商等不同参与主体能够实时获取准确一致的数据，还极大增强了数据的可信度，杜绝数据被恶意篡改的风险，为项目决策、责任追溯提供坚实的数据支撑。

1.2.2 算法

凭借强大的数据分析与模式识别能力，AI 算法在油气管道领域展现出广泛的应用前景。在施工质量检测环节，利用图像识别、机器学习算法，能够对管道焊接、防腐涂层等关键施工工序进行自动化检测，精准识别缺陷，大幅提高检测效率与准确性；针对泄漏风险预测，通过对管道运行过程中的压力、流量、温度等多源数据进行深度学习分析，构建泄漏风险模型，提前预判潜在泄漏点，为预防性维护争取时间；在设备剩余寿命评估方面，结合设备历史运行数据、故障记录以及实时工况，AI 算法能够动态评估管道设备的健康状况，预测剩余使用寿命，助力合理安排设备更新与维护计划，保障油气管道的安全稳定运行。

2 各阶段智慧化管理策略

2.1 智能规划阶段

2.1.1 多目标优化算法

在油气管道规划阶段，多目标优化算法发挥着关键作用。它综合考量建设成本、环境影响、运行效率等多元因素，借助复杂的数学模型与先进的计算技术，对海量数据进行深度分析与模拟运算，进而生成兼顾各方利益的最优路由方案，确保在满足能源输送需求的同时，实现资源利用最大化与环境影响最小化。

2.1.2 案例应用

西气东输四线工程在规划建设阶段，积极响应智慧化管理理念，创新性地引入了智能规划系统。该系统整合了地理信息系统（GIS）、大数据分析及先进的多目标优化算法，能够对海量复杂数据进行深度挖掘与精准分析。通过对地形地貌的细致扫描，系统能够精准识别山脉走势、河流分布，规避地质条件复杂区域，降低施工难度与潜在风险；对人口分布数据的分析，则帮助规划者合理规划线路，尽可能减少对居民生活的影响；而针对生态敏感区数据的研判，确保了工程建设对生态环境的保护。

在路由规划过程中，系统依据这些精准分析结果，运用智能算法进行多轮模拟与优化，实现精准施策。最终，该工程成果斐然，成功减少征地拆迁量达 23%，有效避免了大规模征地拆迁带来的社会矛盾，极大地降低了工程建设的社会成本与协调难度。此数据来源于中国石化在 2023 年发布的详尽工程建设总结报告，有力地证明了智能规划系统在油气管道规划建设中的显著成效。

2.2 协同设计阶段

2.2.1 参数化设计

依托前沿的数字化技术，构建起一套全面且精细的标准族库。该族库宛如一座庞大的油气管道部件信息宝库，囊括了弯管、阀门、法兰等各类部件的详尽参数，从材质特性、尺寸规格到承压能力，事无巨细。在项目设计环节，工程师无需再像以往那样，在海量的部件手册中人工翻阅、筛选，仅需在系统界面中精准输入管径、输送介质、设计压力等特定设计要求，系统便会即刻启动智能算法，依据族库数据进行高速匹配运算，自动筛选出适配的部件型号，完成选型工作。

2.2.2 4D 模拟分析

借助功能卓越的 Navisworks 软件平台，全面开展施工模拟工作。首先，对油气管道工程进行细致入微的三维建模，精准呈现管道的空间走向、管径变化以及各类附属设施的布局情况。随后，将这一三维模型与时间维度深度融合，构建出高度逼真的 4D 模拟场景。

在该场景中，能够以动态视角，全方位、分阶段地观察管道与周边建筑物、道路、地下管线等其他设施在不同施工阶段的空间位置关系。例如，在管道铺设初期，可提前发现管道与既有地下电缆可能存在的交叉冲突；在设备安装阶段，能预判大型设备吊运过程中与周边建筑结构的潜在碰撞风险。通过这种模拟方式，能够提前精准发现各类潜在的空间冲突问题，为施工方案的优化调整提供详实、可靠的有力依据，有效避免施工过程中的返工与延误，保障工程顺利推进。

2.3 精准施工阶段

2.3.1 无人机巡检技术

无人机搭载先进的多光谱成像设备，能够精准扫描油气管道沿线区域。通过对获取图像的深度分析，可有效识别诸如管沟开挖深度不足这类隐蔽性强的问题。经过大量实际作业验证，该技术的识别准确率高达 95%，极大提升了巡检效率与问题发现能力，确保管道安全隐患无处遁形。

2.3.2 AR 辅助施工

在油气管道施工过程中，施工人员佩戴智能眼镜，即可接入 AR 辅助系统。系统能够根据施工流程与现场实际情况，为施工人员提供实时、直观的指导信息。比如在复杂管件的安装环节，智能眼镜可清晰显示安装步骤与标准位置。得益于该技术，施工过程中的误操作率大幅下降 60%，显著提升了施工质量与进度。

2.4 智慧运维阶段

2.4.1 机器学习预测模型

借助先进的机器学习算法，研究团队精心构建了腐蚀速率预测模型。经大量实际数据验证，该模型的预测准确率高达 88%（李明等，2023）。此模型能够精准分析各类复杂环境因素对油气管道腐蚀速率的影响，为管道维护决策提供了可靠依据。

2.4.2 智能巡检机器人

在管道巡检环节，引入了先进的管道爬行器用于内部检测。相比传统人工巡检方法，管道爬行器不仅能深入管道内部复杂区域，而且其工作效率大幅提升，是传统方式的 5 倍之多。它能快速、精准地检测出管道内部的各类缺陷，极大地提高了巡检工作的质量与效率。

2.5 绿色退役阶段

借助先进的数据分析与建模技术，综合考量经济成本与环境影响两大核心目标，运用复杂的算法对管材回收或再利用的多种可能方案进行深度模拟与评估，从多维度对比不同方案在成本投入、资源消耗、环境效益等方面的差异，最终确定最佳管材回收或再利用方案。

3 关键技术挑战与对策

3.1 数据孤岛问题

针对数据交互流程中存在的各类问题，亟需制定一套全面且规范的数据交互标准，涵盖数据格式、接口规范、传输协议等多个层面，确保不同系统间数据的流畅互通。同时，开发专业的 ETL 数据清洗工具，通过自动化流程对原始数据进行筛选、去重、修复错误值等操作，提高数据质量，为智慧化管理提供坚实的数据基础。

3.2 系统集成复杂度高

在智慧化管理体系构建中，引入先进的微服务架构。该架构可将复杂的系统拆分为多个独立、小型且自治的服务模块。各模块通过标准化的 API 接口进行通信，实现不同功能组件之间的高效交互。这种方式能够显著提升系统的灵活性与可扩展性，通过 API 接口实现系统松耦合集成，有效避免传统架构中因紧密耦合带来的牵一发而动全身的问题，确保在油气管道全生命周期管理中，各环节相关系统能既协同工作又互不干扰，提升整体管理效率与稳定性。

3.3 网络安全风险

为有效应对网络安全威胁，可部署工业防火墙，通过设置严格的访问控制策略，阻挡外部非法网络访问，防止恶意软件入侵。同时，实施数据加密传输，对油气管道运行中的各类数据，如压力、流量、位置信息等，在传输过程中进行加密处理，确保数据的保密性与完整性，降低数据被窃取或篡改的风险。

4 实施路径建议

审慎挑选具备典型意义的重点工程，全方位开展智慧化管理试点工作。试点过程中，深度融合先进技术与管理流程，从管道规划设计阶段的数字化建模，到施工建设时的智能监控，再到运营阶段的实时数据分析与预警，形成一整套完备且可复制推广的应用模式，为行业内其他工程提供切实可行的参考范例。

精心构建“管理 + 技术”复合型人才培养体系。在管理层面，开设涵盖项目管理、风险管理等课程，提升从业人员统筹协调能力；技术方面，聚焦大数据、物联网、人工智能等前沿领域知识培训。通过理论教学与实践操作相结合的方式，定期组织学员参与实际项目锻炼，从而稳步提升从业人员数字化素养，为智慧化管理提供坚实的人才支撑。

积极联合行业内权威机构、企业，共同推动智慧化管理行业标准制定，明确各项技术指标、操作规范与评估准则。同时，完善智慧化管理激励机制，对于在智慧化建设中表现突出的企业与个人给予表彰与奖励。此外，制定专门的资金保障政策，通过财政补贴、专项基金等形式，确保智慧化管理项目有充足资金投入研发与应用推广。

参考文献：

- [1] 王建军,赵伟.物联网技术在油气管道监测中的应用进展[J].自动化博览,2021,38(5):82-85.
- [2] 陈立,李娜.基于区块链的工程数据管理研究[J].工程管理学报,2023,37(2):45-49.
- [3] 张磊,陈辉.BIM 技术在油气管道工程中的应用研究[J].中国储运,2022(12):145-147.