

引文: 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.

HE Yongli, XU Kejun, CUI Zhenwei, et al. Exploration of the thinking and application of integrated intelligent management and control in oil and gas pipeline engineering[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(10): 1179–1191.

油气管道工程一体化智能管控思考与应用探索

贺永利¹ 许克军² 崔振伟³ 姜浩³

1. 中国石油天然气股份有限公司天然气销售分公司; 2. 福建昆仑能源液化天然气有限公司; 3. 昆仑数智科技有限责任公司

摘要:【目的】在全球能源结构深刻变革与“双碳”目标驱动下, 油气管道作为连接能源生产与消费的重要基础设施, 其高效安全运行对能源系统稳定性至关重要。然而, 传统工程建设与生产运行模式已难以应对当前复杂的管理需求与技术挑战。为此, 亟需探索油气管道工程一体化智能管控实现路径, 着力解决数据质量问题, 为行业智能化升级提供理论支撑与技术指导。【方法】基于油气管道智能化建设多阶段演进规律, 揭示数据应用向智能决策发展的趋势, 指出数据质量是制约智能化发展的核心瓶颈, 并剖析其具体应用难点; 提出涵盖设备设施层、边缘层、资源层、平台层、应用层、展现层的 6 层级一体化智能管控总体架构, 并详细梳理各层级功能在工程建设期与运营一体化智能管控的关联性; 围绕提升数据质量这一核心目标, 从数据采集、数据处理、数据应用、数据移交角度出发, 提出架构落地应用的解决方案与实施路径, 并结合典型场景开展应用实践。【结果】通过构建工程数智化模型, 实现了从工程建设期到生产运营期数据的无缝对接, 有效解决了数据完整性、一致性、准确性及可用性不足的问题, 显著提升了智能决策支撑能力。通过中国石油福建昆仑能源 LNG 接收站及配套外输管道工程应用案例, 验证了新建管控架构在提升数据质量、缩短业务流程时间、降低项目投资等方面的有效性, 显著提高典型场景智能化水平。【结论】研究形成的一体化智能管控解决方案为油气管道工程提供了可复制的实施框架, 对行业智能化升级具有重要参考价值。未来, 随着大数据、人工智能等现代信息技术的深度融合, 油气管道行业的智能化发展将更加全面深入。持续优化数据治理能力、强化技术融合创新, 将是推动行业向更高层次智能化迈进的关键所在。(图 3, 参 36)

关键词: 油气管道; 数字化转型; 智能化管控; 总体架构; 数据质量; 风险预警

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)10-1179-13

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.10.010

Exploration of the thinking and application of integrated intelligent management and control in oil and gas pipeline engineering

HE Yongli¹, XU Kejun², CUI Zhenwei³, JIANG Hao³

1. PetroChina Natural Gas Marketing Company; 2. Fujian Kunlun Energy Liquefied Natural Gas Co., Ltd.;

3. Kunlun Digital Technology Co., Ltd.

Abstract: [Objective] Against the backdrop of profound global energy restructuring and the pursuit of “dual-carbon” goals, oil and gas pipelines play a critical role in connecting energy production and consumption. Consequently, their efficient transmission and safety are vital to the stability of energy systems. However, traditional engineering construction and operational models struggle to meet the complex management requirements and technical challenges that have emerged. To address these issues, this paper explores the implementation pathway for integrated intelligent management and control in oil and gas pipeline engineering, with a particular focus on resolving data quality issues. The aim is to provide theoretical support and technical guidance for the intelligent upgrading of the oil and gas industry. [Methods] By revealing the development patterns of data applications based on the characteristics in the multiple stages of the construction toward intelligence in oil and gas pipeline engineering, this initial investigation identified data quality as the core bottleneck hindering progress toward intelligence and analyzed the specific challenges associated with data applications. Following this, a six-level overall architecture for integrated intelligent management and control was established, encompassing the equipment and facility layer, edge layer,

resource layer, platform layer, application layer, and presentation layer. Subsequently, a detailed analysis was conducted to examine functional correlations with pipeline operation at these levels of integrated intelligent management and control during pipeline construction. Consequently, with a focus on the primary goal of improving data quality, solutions and implementation pathways were proposed for the application of the proposed overall architecture, considering the aspects of data collection, data processing, data application, and data transfer. Furthermore, this overall architecture was applied practically in typical scenarios. **[Results]** An engineering model incorporating both digital and intelligent capabilities was developed to facilitate a seamless transition from the construction period to the operation period. This model provides an effective approach to address inadequacies in data integrity, consistency, accuracy, and availability, significantly enhancing support for intelligent decision-making. A case study based on an LNG terminal and the supporting export pipeline of Fujian Kunlun Energy Liquefied Natural Gas Co., Ltd., CNPC, validated the effectiveness of the proposed architecture for integrated intelligent management and control in several areas, including improving data quality, reducing business process time, and lowering project investment costs, underscoring significantly elevated levels of intelligence in typical scenarios. **[Conclusion]** The systematic solutions developed in this research provide a replicable integrated intelligent management and control paradigm for oil and gas pipeline engineering, offering significant reference value for the industry's intelligent upgrade. With the deep integration of modern information technologies such as big data and artificial intelligence, along with the gradual refinement into a unified standard framework in the future, the oil and gas pipeline industry is poised for further development in intelligence, both in depth and breadth. Continuously optimizing data governance capabilities and strengthening technological integration and innovation are recognized as essential for advancing the industry to a higher level of intelligence. (3 Figures, 36 References)

Key words: oil and gas pipeline, digital transformation, intelligent management and control, overall architecture, data quality, risk warning

目前,全球能源发展正处在国际格局动荡变革、极端气候灾害频发、新一轮技术革命爆发、能源行业进入低碳转型的多期叠加状态,深刻影响全球能源格局^[1]。油气作为衔接传统化石能源与新能源的过渡性能源,其高效输送与安全保障对能源系统稳定性至关重要。其中,油气管道承担着中国陆上约 85%原油、30%成品油以及 99%天然气的运输任务^[2]。截至 2024 年,中国油气管道总里程超过 19×10^4 km,已形成较为完备的基础网络^[3]。随着全球能源结构的深刻变革,油气管道在能源供应链中的战略地位愈发突出,成为连接能源生产与消费的重要基础设施^[4]。同时,能源产业智能化升级进程加快,互联网、大数据、人工智能等现代信息技术加快与能源产业深度融合。国家能源局发布《“十四五”现代能源体系规划》,明确提出要实施智慧能源示范工程,实现油气管网全数字化移交、全智能化运营、全生命周期管理等示范应用^[5]。

油气管网全生命周期管理涵盖多方面内容,其中管网建设期包括设计、采购、施工及投产试运,而管网运营期包括安全运行监测、输送工艺分析、运行工况调节与调运方案制定等^[6]。随着全球能源需求增长与“双碳”目标的推进,传统工程建设与生产运行模式已难以适应当前复杂的管理需求与技术挑战^[7]。在此背景下,推动

油气管网数字化、智能化转型成为行业发展的必然选择^[8]。然而,数据质量作为数字化、智能化建设的关键,存在数据完整度低、建设期与运营期数据不一致、数据底座无法真实反映工程实体、数据应用难度高等问题。究其根源,在于缺乏统一的一体化智能管控顶层设计框架,未能从资产生命周期角度打通数据流,难以为运营维护提供可信的单一工程数据源,进而保障数据的完整性、合规性及一致性^[9]。

油气管道工程一体化智能管控包括过程管理一体化、建设与运营一体化两个层面。鉴于此,首先,从多个维度剖析行业应用现状与难点;其次,提出涵盖设备设施层、边缘层、资源层、平台层、应用层、展现层的 6 级架构,详细梳理提升两个“一体化”中数据质量的技术措施;最后,提出支撑工程一体化智能管控架构落地的解决方案与实施路径,并基于上述体系架构与研究方法,探讨一体化智能管控在油气管道行业中的典型应用案例与实施效果。

1 研究现状与难点

1.1 研究现状

油气管道工程智能化建设具备阶段性特征^[10]。目

前, 随着以人工智能为代表的技术应用, 油气管道工程正从数字化转型阶段加速迈进到智能化发展阶段。

1.1.1 信息化建设阶段

油气管道的信息化建设起始于 20 世纪 90 年代, 主要依赖 SCADA 系统开展生产数据的自动化监控与数据采集, 通过传感器采集管道的压力、流量、温度等关键数据, 并通过中心控制室进行远程监控。SCADA 系统在本质上是一种工业物联网系统, 具备采集管道与站场的运行数据、远程操控设备启停、故障与连锁报警等功能, 其本质是管道的运行监控系统^[1]。信息化建设阶段主要围绕自动化系统的数据集成展示与管道运营管理业务流程的线上化, 并通过专家经验分析历史数据, 辅助生产决策。此阶段的核心任务是监控管道运行状态与提升管理效率。

1.1.2 数字化转型阶段

在油气管道数字化转型阶段, 行业引入大数据、云计算、数字孪生及边缘计算等技术, 通过场景数字化、业务模板化及数据治理等方法, 集成分析大规模数据流并借助机理或数据模型处理实时数据, 以实现智能化运营与全生命周期管理, 提升工程建设与生产运营的效率、安全性, 在事故预警、设备维护、资源调度等方面成效显著。如中俄东线天然气管道采用“移动端+云计算+大数据”体系架构, 集成项目全生命周期数据, 实现管道从建设期到运营期的资产数字化、可视化、智能化管理^[12]。中缅原油管道则通过构建精准映射管道实体及业务场景的数字孪生体, 基于该模型开展全生命周期运行场景的在线仿真、预测、优化、预演、预警及决策, 有效指导了实体管道的运行优化与应急管控^[13]。在国外, 美国实施的“智能管道完整性管理系统”借助数字孪生技术与机器学习算法, 实现了对管道健康状况的高效预测与智能诊断, 形成了工

程建设期与生产运营期的数据连续管理, 显著降低了运营风险与成本^[14]。欧洲 E-energy 能源项目则整合智能发电、智能电网、智能储能技术, 形成了跨领域融合的智能能源网络体系, 为油气管网与能源互联网的深度融合形成示范^[15]。目前, 管道智能化建设的大多数业务场景处于数字化转型阶段。

1.1.3 智能化发展阶段

2024 年初, 随着人工智能技术的高速发展, 以 ChatGPT、DeepSeek 等为代表的生成式大模型兴起, 油气 AI 大模型的应用已实现从技术探索向深度赋能行业发展, 有效促进了行业在效率提升、成本优化及决策智能化等方面的发展。此阶段智能化建设的主要标志体现为以下 3 个层面: ①在交互与数据驱动层面, 以人机语言交互为手段, 通过行业大模型预测与生成新的“未来数据”, 其核心特征包括自动生成工艺优化方案、实现自定义及自适应人机语言交互黑屏调控, 以及通过多源异构数据(即设计、施工、监测的结构化、非结构化及半结构化数据)实时融合支撑应急决策; ②在管理执行层面, 管理者通过人机自然语言交互, 以执行智能系统下达的设备大修更换指令、协调对外交流及应急响应为主要工作内容; ③在技术支撑层面, 通过知识图谱等智能系统实现自主运维^[16]。目前, 工程设计文档校验、生产操作工艺智能问答、生产运营智能问数等业务场景已初步探索至这一阶段。

从上述 3 个阶段的分析可以得出, 油气储运长输管道智能化建设阶段的演进实质是数据要素应用水平的演进(图 1)。在信息化建设阶段, 通过将线下流程线上化, 采集生产与管理数据, 依赖专家经验对历史数据进行分析, 辅助决策。在数字化转型阶段, 通过建立数学模型, 对数据进行实时分析, 提升了数据应用效率。在智能化发展阶段, 基于大模型, 对未来数据进

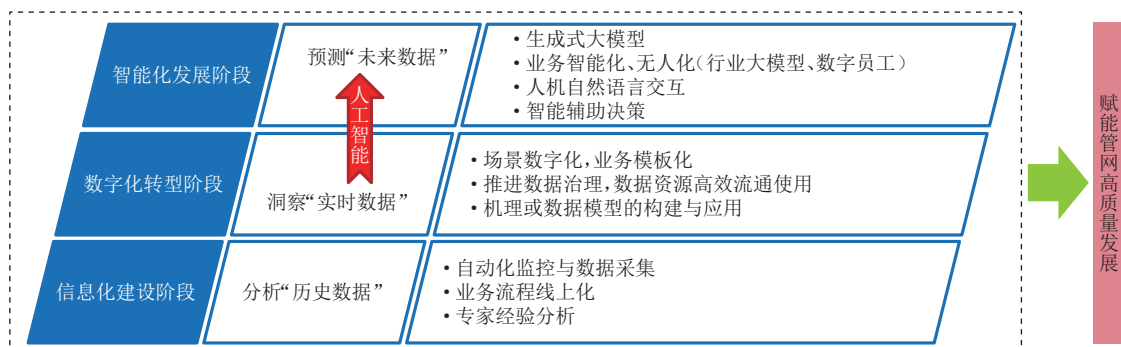


图 1 油气管道工程智能化发展阶段示意图

Fig. 1 Development stages of oil and gas pipeline engineering toward intelligence

行预测,根据业务需求生成新的数据,指导管理决策。

1.2 应用难点

尽管业内在油气长输管道智能化建设领域进行了长期的探索,积累了丰富的数据,但受到数据质量制约,全业务场景的智能化发展仍面临多重挑战。

1.2.1 数据完整性

数据完整性主要指在油气管道全生命周期内,通过标准化采集协议与分布式存储架构,确保多源异构数据的完整采集、连续存储及跨系统整合,形成覆盖建设、管理、运营全环节的可追溯数据链,为智能决策提供无断点、无缺失的基础支撑。当前,大数据技术在油气管道智能化建设中的应用尚处于初级阶段,数据完整性不足且基础薄弱:管道建设与运营数据分散于独立系统,数据孤岛现象突出,未能形成全生命周期一体化管理模式^[17];大量数据缺乏系统性整合与深度分析,价值未能最大化发挥;压力、流量、温度、腐蚀状态等多维度数据若未深入分析处理,无法支撑预测性维护、故障诊断及安全预警等应用,难以实现全生命周期数据应用^[18];大数据分析平台标准化建设滞后,缺乏统一标准规范,数据质量与共享面临困境;数据采集全面性不足,制约深度学习与机器学习算法在管道智能化中的应用效果。因此,如何提升大数据深度挖掘能力、构建完整数据治理框架并实现管道数据标准化与共享^[19],成为智能化转型的核心难题。

1.2.2 数据一致性

数据一致性要求建设期与运营期的多源异构数据通过统一的数据标准、语义映射规则及协议转换机制,实现跨系统、跨阶段的无歧义匹配与协同应用,确保同一数据实体在不同业务场景下的定义、格式与逻辑关系统一。当前,建设期与运营期数据脱节问题突出,表现为管道状态感知不全面、评估模型构建困难、数据样本质量低^[20]。尽管建设阶段通过先进技术采集了大量工程数据,但数据未能有效传递至运营管理系统,直接导致建设期与运营期缺乏有效对接反馈,影响后期运营优化与故障诊断的准确性。其根本原因在于缺少统筹规划,相关技术标准不统一,导致智能化建设质量参差不齐^[21]。此外,新技术应用程度不均衡,缺乏系统顶层设计引领,制约整体转型速度与质量^[22]。

1.2.3 数据准确性

数据准确性主要指采集的数据能否真实、准确地反映油气管道工程实体,形成可信、可溯、可验证的高

保真数据资产,支撑对管道应力分布、腐蚀速率等关键参数的毫米级仿真分析精度等上层应用构建。数据准确性是数字孪生是否真实的核心指标,影响可视化模型构建与管道运维效率^[23]。当前,数字孪生技术在智慧能源领域应用发展较为分散,缺乏统一的应用实施框架,难以完全真实映射物理实体运行状态^[24]。具体表现为两个方面:①工程建设期数据采集滞后于实体进展,存在数据补录、资料后补问题,直接导致数据完整性缺失、质量差且采集效率低;②数字孪生体构建依赖大量实时数据,但现有传感器技术与数据采集精度无法满足实时性与高精度要求,尤其在冻土、沙漠等复杂地理环境或极端工况下,数字孪生模型难以准确反映管道实际运行状态,导致其在故障诊断等场景中的应用效果受限。因此,未来需强化数字孪生技术与高精度传感器的深度融合,通过先进算法模型动态校准数据,提升数字孪生体对复杂工况的实时映射精度与可靠性,实现管道状态的精准监控。

1.2.4 数据可用性

数据可用性主要指通过数据治理与服务化封装技术手段,将油气管道全生命周期产生的多源异构数据转化为可被业务系统直接调用的标准化服务,确保数据在决策支持、故障诊断等场景中具备可访问、可解析、可复用的核心价值属性。现有的智能管道管理系统在功能设计时,侧重数据采集与处理,但忽视现场操作的实际需求,这种功能设计与业务需求的脱节导致系统无法实时反映现场工况与运营需求,显著影响生产过程响应速度与决策质量。此外,智能化系统功能常停留在理论设计层面,缺乏对油气管道实际操作复杂性的深度适配,其输出的智能决策支持与操作指令虽基于数据分析,但因缺乏对实际操作环境动态变化的深刻理解,难以向操作员提供有效指导或解决方案。上述问题的根本原因在于系统开发阶段缺乏与现场操作人员的深度沟通,导致系统设计未能有效覆盖核心业务场景与操作需求。

2 一体化智能管控总体架构

油气储运长输管道智能化发展的核心瓶颈在于数据质量问题,即数据完整性、一致性、准确性、可用性不足,导致智能决策支撑薄弱且业务场景应用受限。为破解这一难题,需围绕油气管道过程管理一体化、建

设与运营一体化智能管控建设两个层面, 深入开展油气管道全生命周期一体化智能管控框架研究^[25]: 探索建立各方协同机制与数据标准, 开发油气管道工程一体化智能管控平台, 为管道工程建设、安全输送及高效运行提供一体化智能管控解决方案。通过系统性提升数据质量, 实现工程建设与运营管理的无缝对接与协同

优化, 最终增强管理变革动力并推动管网价值提升。

油气管道工程一体化智能管控总体架构基于设备与设施层、边缘层、资源层、平台层、应用层以及展现层 6 大核心组成部分(图 2), 通过分级应用、中台解耦、数据溯源的机制, 实现从工程建设期到生产运营期的无缝对接, 进而实现数据质量问题的分层治理与系统性优化。

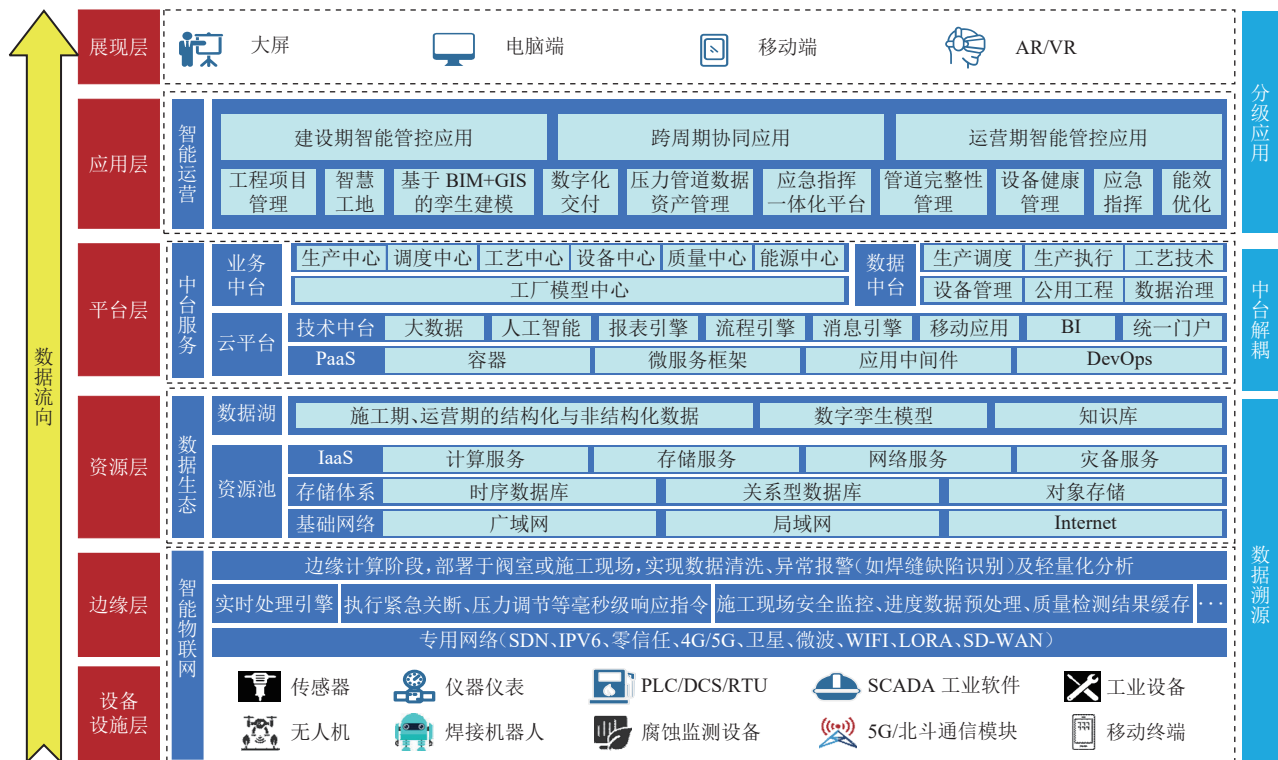


图 2 油气管道工程一体化智能管控总体架构图

Fig. 2 Overall architecture for integrated intelligent management and control in oil and gas pipeline engineering

2.1 设备与设施层

现有油气管道存在对建设期多源异构数据采集不全面、复杂工况下数据采集稳定性不足等问题, 影响采集数据的完整性。需要制定数据资源目录明确数据采集范围, 并应用安全可靠的数据采集技术保障数据采集链路畅通。为此, 建立设备与设施层作为基础支撑层, 主要包括管道本体工程数据、传感器及监测设备等硬件设施。该层采用永久设施与临时设施统筹规划、充分复用的建设思路, 通过部署高精度的传感器、智能机器人、无人机、光纤监测等设备, 智能感知管道建设中的焊缝工艺数据与管道运营期的温度、压力、流量、腐蚀状态、泄漏位置等关键信息, 实现对管道工程建设状态与生产运行状态的实时感知。将采集到的数据利用专用网络传输至上层系统, 实现建设期工程数据与运营期 SCADA、GIS 数据的全量采集, 解决数据完整性缺陷难题。

2.2 边缘层

由于采集数据受感知设备固有误差、数据清洗机制缺失及数据链污染扩散等问题影响, 导致数据准确性难以满足上层应用需求。针对这一问题, 将边缘层部署于阀室或施工现场, 通过实时处理引擎对现场数据实施清洗、异常报警及轻量化分析, 以降低数据传输延迟并保障实时响应性。在工程建设期, 借助人工智能技术构建数据交付方、接收方、应用方的 3 级审核机制, 通过边缘层嵌入的数据清洗引擎实现实时异常检测并自动纠偏, 从而提升数据准确性; 在生产运营期, 构建包含小波降噪、卡尔曼滤波等算法的自适应滤波算法组, 对采集的数据开展实时可信度评估与噪声消除, 进一步强化数据准确性。此外, 需统筹规划建设期与运营期的边缘计算资源及应用, 通过在各关键节点部署边缘智能终端, 实现对管道现场数据的智能分析、故障预警及本地决策, 形成全周期数据质量管控的边缘支撑体系。如通

过 AI 智能算法对焊缝缺陷进行识别,将过程数据与工厂对象关联与融合;运营期通过振动声学法测量设备机壳的振动或噪声信号,对设备状态^[26]等进行分析。

2.3 资源层

由于多源异构数据分散存储于不同系统,缺乏统一的元数据管理机制,导致数据标准缺失、格式混乱、录入源头不一致及非结构化数据与管道实体关联缺失,形成数据孤岛问题。为此,资源层通过构建统一的数据治理、存储与共享体系,实现全生命周期数据的标准化管理与跨阶段协同应用。

在数据湖层面,采用分布式文件系统与列式数据库实现全生命周期数据的统一存储,覆盖结构化数据、半结构化数据及非结构化数据。通过构建标准化数据接入接口,集成物联网实时数据、地理信息数据及第三方数据服务,形成多模态数据资源池。通过建立数据字典,规范数据采集、地图影像、三维模型等要素,为数据湖提供标准化输入。

在资源池构建中,引入特征对齐技术,以管道环焊缝、阀门等基线特征为空间锚点,利用相似度算法匹配施工期坐标数据,实现建设期与运营期数据的时空关联。通过主数据管理平台对物料编码、单位编码等核心元数据进行清洗治理,消除业务系统间的数据语义歧义。

通过上述措施,资源层实现数据资产的全域整合,构建可追溯的管道数字孪生体,并通过覆盖数据质量、安全、权限的监控体系强化治理效能,提升数据调用响应效率与跨系统协同能力。

2.4 平台层

由于工程建设期与工厂运营期智能化系统分期建设,缺乏统一规划,导致业务流程不统一、数据复用率不足、平台技术架构不统一等问题,具体表现为软件功能可用性差、数据价值未被充分利用。通过在平台层构建统一的云平台,并基于云平台搭建业务中台、数据中台,对服务进行封装,解决智能化系统“用”的问题。

业务中台通过标准化业务流程与接口规范,整合设计、采购、施工、运维等全生命周期业务单元,建立跨系统的服务共享机制。如基于微服务架构,对管道完整性管理、智能巡检、应急响应等核心功能模块进行封装,实现业务逻辑与数据逻辑的解耦。

数据中台则依托工业物联网与分布式存储技术,对多源异构数据进行治理,通过 ETL(Extraction Transformation Loading)工具链实现数据清洗、元数据

管理及质量校验。构建全域数据资产目录,建立基于管道里程桩号的空间-时间统一数据索引体系,解决建设期 GIS 坐标与运营期传感数据空间的对齐难题。

云平台包括技术中台与 PaaS 两个层面,技术中台的核心作用是以基础引擎为核心,为智能应用提供报表、流程、消息基础服务能力,依托模块化、标准化能力沉淀,支撑业务快速迭代与创新。PaaS 平台作为云计算架构的中间层,提供统一开发环境、运行环境及数据库等服务,提供敏捷开发的能力,提升系统可靠性。

2.5 应用层

应用层作为上述各层业务功能的承载层,以业务场景驱动构建智能应用体系,通过贴合业务实际的功能设置与流程优化提升系统可用性。在工程建设期间,通过搭建工程建设一体化平台、智慧工地平台及基于 BIM+GIS 的数字孪生建模等建设期智能管控应用,实现对设计、采购、施工及投产试运等工程建设全生命周期的数字化管理;在工程建设向生产运营移交期间,通过构建数字化交付系统、压力管道数据资产管理等跨周期协同应用,打通建设期与运营期的数据链路,实现资产数据的标准化移交与无缝对接;在生产运营期间,通过搭建管道完整性管理系统、设备健康管理等运营期智能管控应用,对管道运行状态进行实时监测、风险预警及工艺优化,实现从工程建设到生产运营的全周期智能化闭环管理。

2.6 展现层

展现层是最终用户与系统交互的接口层,重点提升用户交互体验。该层通过可视化界面与人机交互技术,展现管道运行的各项指标与系统状态,为运维人员、管理人员的监控、管理与决策提供支持。展现层通过图形化界面、实时仪表盘、警报提示等方式,将系统运行情况、关键设备状态以及潜在风险等信息直观地呈现给用户,便于运维人员快速响应并做出决策。

3 解决方案与实施路径

油气管道工程一体化智能管控总体架构明确了油气长输管道工程建设与管道运营之间的统筹关系。然而,实现这一架构的过程中,油气管道智能化建设仍面临数据采集时效性差、数据处理效率低、数据应用与实际业务脱节、数据移交困难等诸多方面的挑战。将一体

化智能管控总体架构作为基础,以解决行业应用的技术难点为目标,从数据采集、数据处理、数据应用、数据移交4个方面出发,提出解决方案与实施路径,为油气管道工程数据质量提升提供技术支撑。

3.1 数据采集

当前油气管道智能化建设中存在显著的数据采集时效性差的问题,导致采集的数据无法及时反映现场实际情况,影响对管道状态的精确监控及预测性维护的应用效果,从而降低了整体运维效率与智能化水平。随着网络安全风险日益增加,在提升数据采集时效的同时,也需要提升网络安全防护能力,如何平衡效率与安全成为亟待解决的关键问题之一。

3.1.1 工程建设期工业 5G 网络

工业 5G 网络作为关键基础设施,在数据采集与传输中扮演着至关重要的角色。工业 5G 网络通过其低时延、高带宽、大连接的特点,为多源异构感知终端提供稳定可靠的数据传输通道。在油气管道工程建设现场,工业 5G 基站按照“永临结合”的原则进行部署,既满足施工期的实时监控需求,又兼顾运营期的长期监测要求。通过高精度传感器、智能机器人、无人机等设备接入 5G 网络,实现对管道温度、压力、流量、腐蚀状态等关键参数的实时感知。在网络安全方面,打造“内生安全+主动防御”的立体防护架构^[27]。在工控安全领域,研发基于国产化 PLC 控制器,通过形式化验证确保固件代码零漏洞。构建管道安全态势感知平台,应用图神经网络分析攻击特征,实现 APT(Advanced Persistent Threat)攻击的提前 48 h 预警。应用抗量子计算区块链技术^[27],建立设备全生命周期数字护照,实现零部件溯源信息不可篡改。开发多模态生物认证系统,通过 SM9 算法建立端到端加密通道,保障 SCADA 系统控制指令的安全传输^[28]。

3.1.2 数据采集标准

为了提升数据完整性与准确性,需要建立统一的数据标准体系。应明确数据采集的范围,分析数据采集类型:对于管理类数据(如工程进度、质量、HSE、成本等)与物联数据(如视频监控、大型机具、关键设备物流、现场气象等),分别采取不同的技术手段进行采集,如在智能检测领域可引入航天科技的遥感监测技术^[29]。同时,制定涵盖设计、采购、施工等全生命周期的数据采集规范,明确各类感知终端的接口标准与技术要求。建立“技术标准-管理标准-操作标准”的 3 级

贯通的标准化体系,特别是在油气储运资产完整性领域,建立标准框架^[30]需主导制定行业级技术规范。

3.2 数据处理

在数据处理环节,最突出的问题是数据处理效率低下,主要体现在:①多源异构数据的清洗、融合及分析过程复杂,缺乏高效的数据处理算法与工具支持;②边缘层与平台层之间的数据传输、处理存在延迟,尤其是在大规模数据场景下,传统的集中式处理模式难以适应分布式采集的需求;③数据处理过程中缺乏智能化手段,导致异常检测、噪声消除等关键步骤依赖人工干预,进一步降低了处理效率。这些问题不仅限制了智能决策的支持能力,还影响了上层应用的响应速度与准确性,成为制约油气管道智能化发展的瓶颈之一,主要依托边缘计算、数据湖及中台服务等技术来解决。

3.2.1 数据清洗

原始数据中常常包含噪声、重复、错误及缺失值等问题。数据清洗能够识别并纠正错误信息,删除重复数据,填补缺失值,去除不必要的冗余数据,有效提升数据质量。清洗后的数据更加准确、完整,用户可以更高效地从中提取有价值的信息,用于数据分析与决策。边缘计算作为油气管道智能化的重要组成部分,在数据清洗中扮演着关键角色。通过将计算能力下沉到靠近数据源的边缘节点,边缘计算能够显著减少数据传输延迟,提高实时性,同时降低对云端算力的依赖。通过统筹考虑建设期与运营期的边缘计算资源,边缘层能够实现硬件设施的高效复用,减少重复投资,同时提升系统的整体性能与可靠性。构建“边缘智能节点-区域云-中心云”的 3 级算力网络。在无人值守站场部署国产化边缘智能终端,集成轻量化 AI 推理框架,实现压力异常、微泄漏等工况的本地毫秒级响应。建立云边任务调度机制,通过容器化技术动态分配计算资源。

3.2.2 数据存储

对于油气管道数据应用而言,数据存储是其中关键的一环^[31]。数据存储可将分散于各处的数据集中,通过统一标准,消除不同数据源间的数据差异,极大提高了数据一致性。数据湖作为资源层的核心组成部分,承担着全生命周期数据整合、存储及治理的重要任务。经过数据湖整理、存储后的数据去除了冗余与错误,结构清晰、易于查询,有效提升了可用性。数据湖提供了海量数据的存储能力,通过标准化接入接口、统一元数据

管理及多模态数据融合技术,解决多源异构数据分散存储的问题,为智能化分析与决策提供坚实基础。整合后的数据,建立管道数字资源库,应用本体论构建领域知识图谱,融合油气管道地质灾害风险管理的各类数据,构建油气管道地质灾害风险管理知识图谱,建立管道地质灾害风险识别、风险评价、风险控制为一体的知识管理模式^[32]。推行“建管一体”管理模式,要求施工阶段采集的 BIM+GIS 数据直接接入后期运维系统,实现全生命周期数据资产化管理^[33]。

3.2.3 数据流转

提高数据流转效率可加速数据在各环节的传输,减少数据处理延迟与误差,确保不同系统、部门之间数据实时同步,增强数据一致性。高效流转还能使数据及时投入分析应用,避免过时或错误数据干扰,提高数据可用性。业务中台、数据中台等中台服务化技术手段在提高数据流转效率方面发挥着关键作用。

业务中台可对企业核心业务能力进行抽象与沉淀,形成通用的业务服务组件。当不同业务部门有数据流转需求时,能直接调用这些组件,避免重复开发,极大地缩短数据流转的响应时间。业务中台还能对业务流程进行统一编排与调度,确保数据按照最优路径流转,减少不必要的等待与迂回。

数据中台则着重于数据的整合与治理。将分散在各个业务应用的数据进行汇聚、清洗及标准化,使数据资源库转化为有价值的数据资产库。数据在流转过程中无需进行复杂的格式转换与纠错,提高了流转的顺畅度。此外,数据中台还提供丰富的数据分析与挖掘工具,能实时洞察数据流转中的瓶颈与问题,并及时进行优化调整,进一步提升数据流转效率。

3.3 数据应用

在数据应用层面,油气管道智能化建设面临系统功能应用构建与生产业务实际脱节的问题,在系统设计时未充分考虑现场操作的实际需求,其功能难以真正贴合生产场景,不能解决生产一线的实际问题,导致系统推广应用的阻力极大。

3.3.1 建设期智能管控应用

工程项目管理应用构建的核心在于重构工程建设业务流,其通过改变传统“工作流+表单”模式,建立以油气管道实物对象为核心的全生命周期管理流程。该流程以三维设计模型为基础支撑,系统可自动识别长输管道实物对象清单,分解高级工作包并构建多层次任务

结构,同时关联人力、机具、材料等资源需求计划,实现资源的动态优化配置。在此基础上,通过建立标准化施工工序检测体系保障施工质量与工艺规范化,并制定科学的工程绩效评价标准,为项目管理提供量化依据。依托三维设计模型,可进一步实现多维度、多层次的统计分析,从进度、成本、质量、安全等关键维度开展动态监控与趋势预测;同时,工程建设多方协同平台的搭建,则为各参建单位提供了业务统一办理与数据无缝流转的渠道,有效打破信息孤岛,并提升协同效率。

智慧工地应用作为工程项目管理的重要支撑,其核心是围绕工程建设“人机料法环”5大要素构建可靠可用的数据应用体系,为项目顺利实施提供保障。以焊缝缺陷识别为例,其技术路线包含缺陷分割、特征提取、特征选择及缺陷识别4个环节:缺陷分割采用 Otsu 法及其改进方法提取缺陷区域,特征提取获取边缘、纹理等缺陷特征,特征选择通过频谱法、统计法、模型法等筛选、区分不同缺陷的特征,最终实现缺陷类型的精准判别^[34-35]。通过融合 X 射线检测图像与声发射信号特征,在边缘侧构建基于深度学习的缺陷识别算法,可将识别准确率提升至 97% 以上^[36]。在一体化智能化管控架构下,通过开发基于迁移学习的数字孪生体,可实现焊缝数据采集、处理及可视化的同步进行,在焊缝施工过程中实时完成数据的动态采集、处理与展示,显著提升数据应用效率。

3.3.2 运营期智能管控应用

运营期智能管控运营的核心是辅助生产决策,实现无人值守或少人值守,通过在建设期移交的静态工程数智化模型上叠加动态生产运营数据,形成动态工程数智化模型,以工艺系统、设备设施、工控网络为核心,建立生产运营业务模型。在管道完整性管理方面,整合 GIS 坐标、应力数据及腐蚀监测信息,建立空间-时间统一索引体系,实时评估管道风险并预警地质灾害、第三方破坏等威胁。在设备健康管理方面,基于迁移学习算法构建设备预防性检维修模型算法,融合边缘层振动声学信号与资源层历史维护数据,实现压缩机、阀门等关键设备的故障预测与精准诊断。在生产监控与工艺优化方面,依托平台层实时处理引擎,动态分析压力、流量、温度等多维数据,通过遗传算法自动生成输送工艺调优方案。在应急决策支持方面,在展现层集成三维可视化告警驾驶舱,结合知识图谱推理引擎,分钟内即可生成泄漏定位与应急处置方案。

3.4 数据移交

结合设计三维模型与地理信息系统, 构建油气管道工程数智化模型(图 3), 提高数据可用性。在建设期, 将工程设计、施工进度、材料信息等数据整合到数字化模型中, 形成建设期静态信息模型, 随着工程实体的进展, 不断更新数字化模型中的数据, 实现数据底座与实际工程同步, 确保工程数字化模型与物理实体一致。通过数字化交付技术, 完成油气管道建设数字化资产与工

程实体的规范化移交, 为智慧管道运营奠定数据基础。在工程交付运营期时, 叠加动态信息模型, 实现对管道运行状态的实时监控与动态优化, 形成动态信息模型。运营期人员可以基于该模型进行管道的实时监控、故障诊断及维护计划制定等工作。通过扩展生产监控、工艺分析、过程控制、数字管道等智能运营应用, 构建覆盖全生命周期的企业级智能运营体系, 推动管道管理从传统模式向数字化、智能化转型升级。

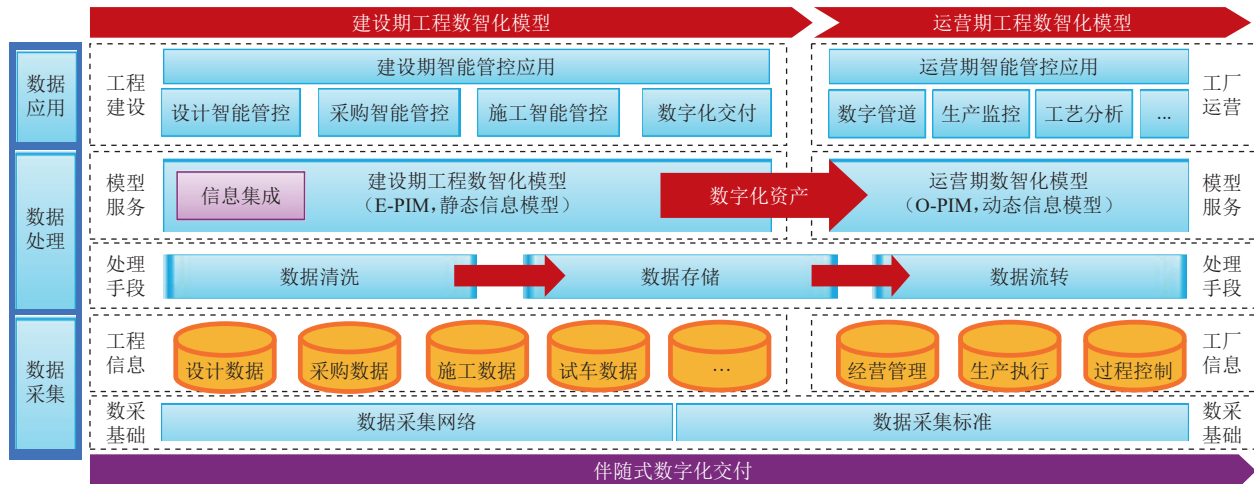


图 3 工程数智化模型构建框架图
Fig. 3 Framework for the digital and intelligent engineering model

4 应用案例

中国石油福建昆仑能源 LNG 接收站工程及配套外输管道工程涵盖场平、外输管道、储转、码头、公路、外电 6 大工程, 数据类型多且采集点分散, 导致数据质量管控难度大。通过一体化智能管控总体架构的落地应用, 实现工程业务架构、技术架构、数据架构、应用架构的规范统一, 有效减少了系统的重复建设。通过建立数据身份 ID, 实现数据一处录入、多处共享; 同时, 实现数据产生即交付, 提高了工程实体与数据采集的同步率, 显著提高了数据的完整性、一致性、准确性及可用性。

4.1 焊接作业数据质量提升实践

焊接作业是 LNG 接收站工程质量管控的核心环节, 其数据质量直接决定工程建设水平。基于一体化智能管控架构, 通过设计三维模型数据解析与轻量化处理, 精准识别管道工程实物对象, 搭建焊接全生命周期智能化应用, 实现以高级工作包为核心的全流程一体化管控, 显著提升设计、采购、施工协同效率, 业

务办理流程时间较传统模式平均缩短 30%。在数据治理层面, 首先整理焊接作业数据资源目录, 编制标准化数据编码, 明确各环节数据类型并确权, 从源头保障数据完整性; 其次, 在焊接作业过程中同步采集全流程数据, 依托 3 级审核机制与自动校验算法, 实现焊接工艺数据与工艺评定的实时对比分析, 确保数据准确性; 同时, 将形成的焊接数据自动关联至设计三维模型, 通过数字化交付流程无缝移交至工厂运营期系统, 保障跨阶段数据的一致性; 最后, 建立多维度分析算法, 自动评估焊工合格率并构建 4D 进展可视化应用, 提升数据在质量管控与决策支持中的可用性。

4.2 伴随式数字化交付实践

传统工程采用阶段式数字化交付模式, 部分项目甚至在竣工后才进行数据交付, 导致工程数字化交付数据采集滞后于实体进展, 存在数据后补、校验机制缺失等问题, 进而引发数字孪生体失真、数据质量低下等后果。针对上述痛点, 通过应用工程数智化模型实施伴随式数字化交付, 在智能化建设详细设计中梳理出了工程建设期与管道运营期的数据资源目录, 内

置到数字化交付系统中,保障了建设期数据采集的完整性。建立了数字化交付 3 级校验机制,制定了数据检验校验标准与数据质量缺陷的处理流程,开发了数据质量自动校验工具,并伴随工程实体进展同步采集数字化交付数据,避免因数据滞后导致的漏报、假报,确保数据质量符合要求。通过建设期与运营期一体化统筹,提前考虑管道运营期可用的数据资产,对数据资源目录抽提与解析,进一步形成了“可管、可用”的数据资产清单,确保建设期与运营期数据的一致性。依托的统一技术中台构建业务应用,确保技术架构的统一性,复用技术中台能力,降低项目投资,构建业务中台、数据中台统一对业务流程模型进行设计,并对项目数据进行分发,构建工程状态智能评价与预警模型、视频 AI 隐患识别模型、4D 焊缝缺陷识别模型,对数据进行分析预测,辅助现场决策。

通过上述实践应用,有效提升了中国石油福建昆仑能源 LNG 接收站及配套外输管道工程数据质量,减少数据重复采集与应用重复建设,智能化建设总投资从 $4\,900 \times 10^4$ 元降至 $4\,300 \times 10^4$ 元;通过在边缘侧进行数据校验,实现一次录入错误率降低 4%;通过伴随式数字化交付,实现一次录入缺失率降低至 5.25%;通过一体化智能管控平台,实现一次录入一致性问题发生概率下降 12%。可见,数据质量得到了显著提升,建设期的数据与运营期的数据实现无缝整合,确保了整个项目在全生命周期内的精确管理,有效降低了项目投资,为生产运营智能化应用建设提供了高质量的数据底座。

5 结论及建议

1) 优化数据采集以提升数据完整性与准确性。首先需要优化数据采集环节:通过引入工业 5G 网络、高精度传感器等先进技术及设备,确保多源异构数据能够实时、全面地采集,并覆盖工程建设期与运营期的全生命周期。同时,制定统一的数据标准体系,明确数据采集范围与技术要求,避免因设备或协议不兼容导致的数据缺失。建立“技术标准-管理标准-操作标准”3 级贯通的标准化体系,特别是在数字孪生领域,主导制定行业级技术规范,从根本上解决数据孤岛问题,保障数据链的连续且可追溯。

2) 强化数据处理以确保数据一致性与可用性。针

对数据一致性与可用性问题,需要从数据处理环节入手,构建高效的跨层协同机制。当前,多源异构数据的清洗、融合及分析过程复杂,传统集中式处理模式难以满足实时性需求。为此,应加强边缘层与平台层之间的协作,采用分布式存储与计算技术,减少数据传输延迟。在边缘层部署嵌入式数据清洗引擎,利用人工智能算法对采集数据进行初步处理,自动纠偏异常值并消除噪声;在平台层则通过数据中台实现全域数据资产整合,借助特征对齐技术与相似度算法完成建设期与运营期数据的时空关联。此外,还需完善主数据管理平台,对物料编码、单位编码等核心元数据进行清洗治理,消除业务系统间的数据语义歧义。通过这些措施,不仅能够提升数据一致性,还能为上层智能应用提供精准数据支持,增强数据可用性。

3) 推动技术融合以提升数据质量与应用效能。推动技术融合是提升油气管道工程数据质量的关键路径。通过深度融合大数据、人工智能、物联网及数字孪生等现代信息技术,可构建全方位、多层次的数据治理与应用体系。首先,大数据与人工智能的结合能够优化数据清洗、异常检测及预测分析流程,显著提高数据处理效率与准确性。其次,物联网技术为多源异构数据的实时采集提供了稳定支撑,而数字孪生则实现了物理实体与虚拟模型的精准映射,确保了数据的一致性与完整性。此外,云、边、端协同架构进一步强化了数据传输与计算能力,使跨层数据共享更加高效。通过整合这些先进技术,不仅能解决当前数据质量存在的问题,还能为油气管道工程智能化升级提供强大动力,助力行业迈向更高水平的数字化与智能化发展阶段。

参考文献:

- [1] 徐金红,王立敏,戚永颖,黄佳音.发展新质生产力建设现代化能源产业体系:“第十一届全国石油经济学术年会暨 2025 年油气市场形势研讨会”综述[J]. 国际石油经济, 2024, 32(12): 14-26, 52. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2024.12.004.
- XU J H, WANG L M, QI Y Y, HUANG J Y. Developing new quality productivity forces and building a modernized energy industry system: overview of the 11th annual national petroleum economic research conference and 2025 oil and gas market seminar[J]. International Petroleum Economics, 2024, 32(12): 14-26, 52.

- [2] 宫敬, 宋尚飞, 魏生远, 史博会, 张引弟. 管道运输对能源供应链韧性和安全性的关键作用[J]. 前瞻科技, 2024, 3(2): 19–29. DOI: [10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.002](https://doi.org/10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.002).
- GONG J, SONG S F, WEI S Y, SHI B H, ZHANG Y D. Key role of pipeline transportation in resilience and security of energy supply chain[J]. Science and Technology Foresight, 2024, 3(2): 19–29.
- [3] 汪月圆, 刘小慷. 智慧管道国内外发展现状及前景分析简述[J]. 山东化工, 2022, 51(8): 90–94. DOI: [10.3969/j.issn.1008-021x.2022.08.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-021x.2022.08.027).
- WANG Y Y, LIU X K. Analysis on the development status and prospect of smart pipeline at home and abroad[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(8): 90–94.
- [4] 黄维和, 沈鑫, 郝迎鹏. 中国油气管网与能源互联网发展前景[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, 21(1): 1–6. DOI: [10.15918/j.jbitss1009-3370.2019.3518](https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2019.3518).
- HUANG W H, SHEN X, HAO Y P. Prospects of China's oil and gas pipeline network and energy Internet development[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2019, 21(1): 1–6.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知[EB/OL]. (2022-01-29)[2025-05-12]. https://zfxzgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice of the National Development and Reform Commission and the National Energy Administration on issuing the “14th Five Year Plan for Modern Energy System”[EB/OL]. (2022-01-29)[2025-05-12]. https://zfxzgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm.
- [6] 梁永图, 邱睿, 涂仁福, 杜渐, 廖绮, 邵奇. 中国油气管网运行关键技术及展望[J]. 石油科学通报, 2024, 9(2): 213–223. DOI: [10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.016).
- LIANG Y T, QIU R, TU R F, DU J, LIAO Q, SHAO Q. Key technologies and prospects for the operation of oil and gas pipeline networks in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2024, 9(2): 213–223.
- [7] 董绍华, 张轶男, 左丽丽. 中外智慧管网发展现状与对策方案[J]. 油气储运, 2021, 40(3): 249–255. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2021.03.002](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2021.03.002).
- DONG S H, ZHANG Y N, ZUO L L. Intelligent pipeline network at home and abroad: recent development, existing problems and solutions[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(3): 249–255.
- [8] 刘合, 任义丽, 李欣, 邓岳, 王勇涛, 曹倩雯, 等. 油气行业人工智能大模型应用研究现状及展望[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 910–923. DOI: [10.11698/PED.20240254](https://doi.org/10.11698/PED.20240254).
- LIU H, REN Y L, LI X, DENG Y, WANG Y T, CAO Q W, et al. Research status and application of artificial intelligence large models in the oil and gas industry[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 910–923.
- [9] 高立兵, 赵学良, 索寒生, 刘东庆, 罗梦迪, 井琳琳. 基于信息模型的石化资产生命周期管理研究进展及展望[J/OL]. 化工进展: 1–13[2025-05-12]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-1836>. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2024-1836](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-1836).
- GAO L B, ZHAO X L, SUO H S, LIU D Q, LUO M D, JING L L. Research progress and prospects of petrochemical asset lifecycle management based on information models[J/OL]. Chemical Industry and Engineering Progress: 1–13[2025-05-12]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-1836>.
- [10] 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(8): 841–854. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.08.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.08.001).
- FENG Q S. Research on construction and operation methodology for intelligent oil and gas pipeline network systems[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(8): 841–854.
- [11] 钱建华, 牛彻, 杜威. 管道智能化管理的发展趋势及展望[J]. 油气储运, 2021, 40(2): 121–130. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2021.02.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2021.02.001).
- QIAN J H, NIU C, DU W. Development trend and prospect of intelligent pipeline management[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(2): 121–130.
- [12] 王振声, 陈朋超, 王巨洪. 中俄东线天然气管道智能化关键技术创新与思考[J]. 油气储运, 2020, 39(7): 730–739. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2020.07.002](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2020.07.002).
- WANG Z S, CHEN P C, WANG J H. Key technological innovations and thinking of pipeline intelligence in China–Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(7): 730–739.
- [13] 邹永胜, 梁俊, 高建章, 熊明, 吴志锋, 李章青, 等. 中缅原油管道智能化运行辅助决策系统建设方案[J]. 油气储运, 2021, 40(4): 377–385. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2021.04.003](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2021.04.003).
- ZOU Y S, LIANG J, GAO J Z, XIONG M, WU Z F, LI Z Q, et al.

- Development scheme of the assistant decision system for intelligent operation of China-Myanmar Crude Oil Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(4): 377-385.
- [14] 张来斌, 胡瑾秋, 肖尚蕊. 油气智慧管道“端+云+大数据”跨域“信息-物理”安全保障技术现状及发展趋势[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(6): 1825-1836. DOI: [10.13637/j.issn.1009-6094.2023.0213](https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2023.0213).
- ZHANG L B, HU J Q, XIAO S R. Research status and development trends of “End & Cloud & Big Data” cross-domain security and safety guarantee technology for oil & gas intelligent pipelines system[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(6): 1825-1836.
- [15] 杰里米·里夫金. 第三次工业革命[M]. 张体伟, 孙豫宁, 译. 北京: 中信出版社, 2012: 12-25.
- RIFKIN J. The third industrial revolution[M]. ZHANG T W, SUN Y N, translated. Beijing: China CITIC Press, 2012: 12-25.
- [16] 张来斌, 王金江. 工业互联网赋能的油气储运设备智能运维技术[J]. 油气储运, 2022, 41(6): 625-631. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2022.06.004](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2022.06.004).
- ZHANG L B, WANG J J. Intelligent operation and maintenance technology of oil & gas storage and transportation equipment based on industrial Internet[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(6): 625-631.
- [17] 张浩. 基于管道完整性管理的数据融合[J]. 煤气与热力, 2022, 42(7): 40-42. DOI: [10.13608/j.cnki.1000-4416.2022.07.019](https://doi.org/10.13608/j.cnki.1000-4416.2022.07.019).
- ZHANG H. Data fusion based on pipeline integrity management[J]. Gas & Heat, 2022, 42(7): 40-42.
- [18] 郭淼, 朱晓宇, 黄国家, 李茂东, 李志敏. 油气管道全生命周期管理标准化与信息化发展分析[J]. 现代化工, 2022, 42(5): 14-18. DOI: [10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.05.003](https://doi.org/10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.05.003).
- GUO M, ZHU X Y, HUANG G J, LI M D, LI Z M. Analysis on standardization and informatization development of oil and gas pipeline full life cycle management[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(5): 14-18.
- [19] 安超, 王飞跃, 刘鹏程, 王宏军, 李萍, 张涛. 油气管道数据集成及可视化发展现状分析[J]. 现代化工, 2024, 44(增刊 2): 19-23, 28. DOI: [10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.004](https://doi.org/10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.004).
- AN C, WANG F Y, LIU P C, WANG H J, LI P, ZHANG T. Analysis on development situation of integration and visualization for oil and gas pipeline data[J]. Modern Chemical Industry, 2024, 44(S2): 19-23, 28.
- [20] 谢小娟, 蔡勤, 杨宁祥, 陈英红. 基于数字孪生的管道运行状态监测平台构建方法研究[J]. 石油化工自动化, 2025, 61(1): 63-66. DOI: [10.3969/j.issn.1007-7324.2025.01.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-7324.2025.01.017).
- XIE X J, CAI Q, YANG N X, CHEN Y H. Research on construction method of pipeline operation status monitoring platform based on digital twin[J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2025, 61(1): 63-66.
- [21] 李柏松, 王学力, 徐波, 孙巍, 王新, 赵云峰. 国内外油气管道运行管理现状与智能化趋势[J]. 油气储运, 2019, 38(3): 241-250. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2019.03.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2019.03.001).
- LI B S, WANG X L, XU B, SUN W, WANG X, ZHAO Y F. Operation and management status and intelligentization trend of global oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(3): 241-250.
- [22] 韩景宽, 李育天. 我国油气管网建设“十三五”回顾及“十四五”展望[J]. 石油规划设计, 2021, 32(1): 1-4, 66. DOI: [10.3969/j.issn.1004-2970.2021.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-2970.2021.01.001).
- HAN J K, LI Y T. Review of oil and gas pipeline network in the 13th Five-Year Plan and prospect in the 14th Five-Year Plan in China[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2021, 32(1): 1-4, 66.
- [23] 刘鑫, 涂圣文, 侯燕芳, 林冬, 舒洁, 唐雨. 数字管道三维空间可视化建模技术研究进展[J/OL]. 油气储运: 1-14[2025-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20250106.1417.004.html>.
- LIU X, TU S W, HOU Y F, LIN D, SHU J, TANG Y. Research progress on 3D spatial visualization modeling technology for digital pipelines[J/OL]. Oil & Gas Storage and Transportation: 1-14 [2025-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20250106.1417.004.html>.
- [24] 唐文虎, 陈星宇, 钱瞳, 刘刚, 李梦诗, 李立涅. 面向智慧能源系统的数字孪生技术及其应用[J]. 中国工程科学, 2020, 22(4): 74-85. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2020.04.010](https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2020.04.010).
- TANG W H, CHEN X Y, QIAN T, LIU G, LI M S, LI L C. Technologies and applications of digital twin for developing smart energy systems[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(4): 74-85.
- [25] 陈朋超. “双碳”愿景下管网多介质灵活输运与智能化高效利用发展战略思考[J]. 油气储运, 2023, 42(7): 721-730. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.07.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.07.001).
- CHEN P C. Strategic thinking on pipeline network development for flexible multi-media transport and intelligent efficient utilization under dual carbon vision[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(7): 721-730.

- [26] 何潇, 刘泽夷, 胡嵩乔, 刘畅, 周东华. 动态系统的实时安全性评估技术[J]. 自动化学报, 2025, 51(2): 249–270. DOI: [10.16383/j.aas.c240096](#).
- HE X, LIU Z Y, HU S Q, LIU C, ZHOU D H. Real-time safety assessment techniques of dynamic systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2025, 51(2): 249–270.
- [27] 郭江兴, 季新生, 贺磊, 谢宇, 牛玉坤, 张帆. 网络安全战略与方法发展现状、趋势及展望[J]. 中国工程科学, 2025, 27(1): 14–27. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2024.10.052](#).
- WU J X, JI X S, HE L, XIE Y, NIU Y K, ZHANG F. Development status, trends, and prospects of cybersecurity strategies and methods[J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(1): 14–27.
- [28] 姜奇, 赵晓敏, 赵贵川, 王金花, 李兴华. 自适应分数级融合的多模态生物特征认证[J]. 西安电子科技大学学报, 2023, 50(4): 11–21. DOI: [10.19665/j.issn1001-2400.2023.04.002](#).
- JIANG Q, ZHAO X M, ZHAO G C, WANG J H, LI X H. Adaptive score-level fusion for multi-modal biometric authentication[J]. Journal of Xidian University, 2023, 50(4): 11–21.
- [29] 蔡小莉, 鲍云飞, 黄巧林. 基于卫星遥感的大气甲烷探测反演技术综述[J]. 航天返回与遥感, 2025, 46(1): 160–173. DOI: [10.3969/j.issn.1009-8518.2025.01.014](#).
- CAI X L, BAO Y F, HUANG Q L. Review of atmospheric methane detection and inversion techniques based on space remote sensing satellites[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2025, 46(1): 160–173.
- [30] 王振声. 油气储运资产完整性管理一体化标准体系建设与思考[J]. 油气储运, 2022, 41(4): 372–380. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2022.04.002](#).
- WANG Z S. Construction and consideration of integrated standard system for integrity management of oil and gas storage and transportation assets[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(4): 372–380.
- [31] 李涛, 孙延吉, 王会军, 田娜. 大数据在油气长输管道应用现状及发展方向[J]. 石油化工自动化, 2020, 56(6): 10–14, 18. DOI: [10.3969/j.issn.1007-7324.2020.06.002](#).
- LI T, SUN Y J, WANG H J, TIAN N. Application status and development direction of big data in oil and gas long distance transportation pipeline[J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2020, 56(6): 10–14, 18.
- [32] 吴张中. 油气管道地质灾害风险管理知识图谱构建与应用[J]. 油气储运, 2023, 42(3): 241–248. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.03.001](#).
- WU Z Z. Construction and application of knowledge graph of geohazard risk management for oil and gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(3): 241–248.
- [33] 付斌, 汤建, 卢艳琳, 何涛, 胡曦, 于智博. 我国天然气企业数据资产管理体系建设的思考[J]. 天然气技术与经济, 2024, 18(3): 56–62, 76. DOI: [10.3969/j.issn.2095-1132.2024.03.009](#).
- FU B, TANG J, LU Y L, HE T, HU X, YU Z B. Constructing the management system of data assets for China's natural-gas enterprises[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2024, 18(3): 56–62, 76.
- [34] 罗仁泽, 王磊. 基于深度学习模型的油气管道焊缝缺陷智能识别[J]. 天然气工业, 2024, 44(9): 199–208. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2024.09.018](#).
- LUO R Z, WANG L. Weld defect intelligent identification for oil and gas pipelines based on the deep learning models[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(9): 199–208.
- [35] MENTOURI Z, DOGHMANE H, GHERFI K, ZAGHDOUDI R, BOUROUBA H. Tool combination for the description of steel surface image and defect classification[C]. Fez: The 2nd International Conference on Embedded Systems and Artificial Intelligence ESAI 2021, 2021: 1–13.
- [36] WANG J Z, LI Q Y, GAN J R, YU H M, YANG X. Surface defect detection via entity sparsity pursuit with intrinsic priors[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(1): 141–150. DOI: [10.1109/THI.2019.2917522](#).

(编辑: 黄星烨)

基金项目: 中国石油数字化转型技术研究项目“工程建设领域数字化转型技术研究”, 2021DJ7501。

作者简介: 贺永利, 男, 1980年生, 高级工程师, 2010年博士毕业于中国地质大学油气田开发专业, 现主要从事液化天然气方向的研究工作。地址: 北京市东城区东直门9号, 100020。电话: 0591-63096096。Email: 34040933@qq.com

• Received: 2025-03-25

• Revised: 2025-05-15

• Online: 2025-06-13

