

人工智能在天然气长输管道施工与运营中的应用研究

吴 东 (中国石油化工股份有限公司西南油气分公司油气销售中心, 四川 德阳 618000)

摘 要: 天然气长输管道作为影响民生安全及生活质量的重要工程, 若在施工及运营中有效应用人工智能技术, 有利于实现管道工程的规模化建设。本文结合某工程实例, 从施工管理与运营管理两个层面总结技术要点, 强调施工单位可采用智慧工地系统, 从质量管理、安全管理、进度管理等部分, 展现施工中智能管理技术的应用价值。运营管理则以高精度泄漏智能定位、设备健康状态预测性维护、智能调度与应急指挥为关键内容展开研究, 未来将朝着构建可视化监测与智能预警系统、深化大数据分析挖掘的方向进行创新发展。

关键词: 天然气长输管道工程; 人工智能技术; 大数据技术; 传感器

中图分类号: TE973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 031-0093-03

Research on the Application of Artificial Intelligence in the Construction and Operation of Long-Distance Natural Gas Pipelines

Wu Dong (Sinopec Southwest Oil and Gas Branch Oil and Gas Sales Center, Deyang Sichuan 618000, China)

Abstract: As an important project that affects people's livelihood safety and quality of life, the effective application of artificial intelligence technology in the construction and operation of natural gas long-distance pipelines is conducive to achieving large-scale construction of pipeline projects. This article summarizes the technical points from the perspectives of construction management and operation management, based on a certain engineering example. It emphasizes that construction units can adopt smart construction site systems to demonstrate the application value of intelligent management technology in construction, including quality management, safety management, and schedule management. Operations management focuses on high-precision leak intelligent positioning, predictive maintenance of equipment health status, intelligent scheduling, and emergency command. In the future, innovative development will be carried out towards building visual monitoring and intelligent warning systems, deepening big data analysis and mining.

Keywords: natural gas long-distance pipeline engineering; Artificial intelligence technology; Big data technology; sensor

1 天然气长输管道工程实例

本文以某个全长为 185km 的天然气长输管道工程为例, 深入探索人工智能技术的实践运用要点, 通过该实例的技术应用成果, 直观展现人工智能技术的实用价值。实际上, 在该工程中推荐人工智能技术, 是为了提高整体安全服务水平, 保障施工质量, 也是为了建立智能化预警及巡检服务机制, 在保证在新技术辅助下, 促进管道施工与运营活动的智能化转变。

2 管道施工中人工智能技术的应用要点

2.1 管道施工质量智能管理

在施工阶段可由项目负责人使用智慧工地系统, 全方位识别质量缺陷。该系统应用过程, 需要施工单位在现场先行配备防爆出入口集装箱、壁挂式防爆显示器、智能监控、可支撑支架等设备, 而后智能采集多设备反馈信息, 协助项目负责人动态评估质量达标情况。其中防爆出入口集装箱可要求现场人员输入个人信息, 以自定义预报方式判断现场施工过程管道是否存在泄漏隐患, 或是否存在人员侵入性行为, 必要时可智能抓拍陌生人影像信息, 创造有利的施工条件。配置的防爆可折叠支架, 选择铝合金材质的厚度为 5mm 的铝管, 将其嵌入到管道施工现场, 便于通过该

系统提高高质量施工提出的防爆要求。除上述系统以外, 还可运用 AI 智能监督系统, 此系统质量缺陷识别准确率在 90% 以上, 其隐患场景数量多达 20 类, 适用于管道施工活动中。通过完善的训练模型, 系统可识别包括气孔、未熔合、未焊透、裂纹、夹渣等十余种常见缺陷, 覆盖管道焊接质量验收规范中的核心指标。不仅识别缺陷类型, 还能精准定位缺陷位置 (如焊缝具体坐标), 并评估缺陷尺寸 (如裂纹长度、气孔直径), 为后续修复提供量化依据。同时模型输出缺陷识别的置信度分数很高, 可辅助工程师判断检测结果, 降低误判风险。

2.2 施工现场安全智能管理

在管道施工阶段, 安全始终是项目的核心要素, 在施工现场的安全管理中, 通过计算机视觉、物联网 (IoT)、机器学习等技术, 可构建智能监控系统, 实现对人、机、环境的全方位实时感知与风险管控, 极大的提升了施工安全水平。

针对施工现场人员、设备、环境等安全要素, 基于计算机视觉的智能监控系统构建如下:

①通过布置智能摄像头, 结合人脸识别、姿态识别、行为分析算法。部分场景采用可穿戴设备 (如智

能安全帽、定位标签），实现人员轨迹追踪。实时识别人员未佩戴安全帽、未系安全带等违规行为；识别人员疲劳状态；通过电子围栏技术划定高风险区域（如吊装区、管沟边缘）；结合语音播报、手机 APP 推送、现场警示灯等多渠道预警，确保信息及时传达，自动发出预警。在该项目中，算法需适应复杂的环境，在夜间采用热成像技术、雨天或沙尘天气通过图像增强算法提升识别精度。通过应用该系统，项目日均识别 30 余起违规行为，经干预后违规率下降 70%。

②针对施工设备的安全管控，项目主要利用目标检测算法、激光雷达、设备状态监测传感器，监控施工机械作业范围，预防机械伤害事故。具体流程为：实时追踪挖掘机、起重机等大型设备作业范围，当人员或其他设备进入危险半径时，通过声光报警提醒操作员；系统实时分析机械运行参数（如转速、油耗、温度），识别异常工况（如发动机过热、液压系统故障），预防机械故障引发的次生事故；通过预设标准操作流程（SOP），自动检测设备操作是否合规。

③环境安全风险预警方面，主要基于无人机航拍与图像识别技术，实时监测管沟边坡稳定性，预警滑坡风险。通过无人机定期采集边坡影像，利用 InSAR（合成孔径雷达干涉测量）技术分析毫米级形变，结合机器学习模型预测滑坡风险；部署传感器网络，实时监测管沟周边土壤湿度、地下水位变化，预警管涌、地基沉降风险；整合气象局数据，提前预测暴雨、大风等极端天气，自动调整施工计划或启动应急响应。系统运行以来，累计识别安全隐患 200 余起，有效提升了现场安全管理水平。

2.3 现场施工进度智能管理

为实现智能化管理，施工单位可直接使用管道项目管理软件，实时关注施工进度，并智能化给定管理决策。该软件是融合 BIM 技术与 GIS 技术研发而成的智能管理工具，主要具备项目规划、进度跟踪与监控、质量管理等核心功能。项目负责人可从软件显示信息中实时获取更新的工程进度信息，并智能化绘制甘特图，该软件还设有智能预警机制，一旦实际进度与计划进度偏差较大，则立即显示“进度延误”等监控信息。最关键的是，该软件可随时根据施工进度智能管理需求进行升级，且多部门人员均能在软件提供的实时互动场景内，高效完成施工任务，使燃气管道快速投运，满足燃气供应需求。

智能管理系统的优化应用思路涵盖以下两点：

①针对管道施工场景的特殊性，对 YOLOv8 模型进行定制化训练与优化，引入注意力机制（CBAM 模块）和数据增强策略（Mosaic 增强）。经现场验证，模型

对管沟开挖边界识别准确率达 94.1%，管道布设定位误差小于 0.3m，焊缝区域识别 F1-score 达 0.91，接口密封状态识别准确率超 90%。

②系统将实时图像输入模型，每 6h 输出一次施工进度状态，自动识别管沟开挖、管道布设、焊接、回填等关键环节的完成情况，并与 BIM+ 进度计划进行比对，生成可视化进度分析报告，包括进度偏差率、关键路径预警等指标。

3 人工智能在管道运营阶段的应用

3.1 高精度泄露智能定位

①天然气管道运营期间，最主要的是精准识别管道泄漏位置，以维护运营安全。应用人工智能技术以后，能协助运维人员精准定位泄漏位置，避免燃气泄漏引起严重的公共安全事故。具体可利用地理信息系统采集有效数据，并联合传感器设备判断气体浓度等指标的合规性，若超出安全阈值，快速显示定位结果，且基本上有漏点的部分可见压力及气体浓度显著波动表现。

②利用巡检机器人搭载高精度传感器，自动采集管道运行参数，通过边缘计算技术实现数据的实时处理与分析。目前的巡检机器人主要分为内检测机器人与地表巡检机器人。前者主要通过电磁阵列传感器（EMAT）、超声波探头和漏磁检测（MFL）技术，结合 AI 图像识别算法，自动识别管道内腐蚀、焊缝缺陷和几何变形，生成缺陷分级报告。后者集成了激光雷达（LiDAR）、红外热成像和气体检测模块，可自主穿越复杂地形，检测地表沉降、第三方破坏、植被侵占等风险。无论哪种机器人都搭载了 AI 推理芯片，可实现数据的本地化处理，仅上传异常数据或关键帧，降低通信成本。

③结合卫星遥感与无人机巡查，实现对管道沿线地质灾害风险的智能评估与预警。卫星主要监测管道沿线的地表，识别滑坡、冻土融化等潜在风险；分析植被变化，预警土壤湿度异常以及地下孔洞。无人机巡查主要检测管道是否存在腐蚀、涂层剥落以及非法占压等情况。

3.2 设备健康状态预测性维护

在该项目中，4 座站场和 7 座阀室横跨 185.3km，设备类型多样（压缩机、泵阀、调节阀等），监测点位超百个，传统人工巡检耗时耗力。管道穿越山区、农田、河流等地形，部分区域信号覆盖弱，需解决数据传输延迟与中断问题。因此需要构建关键设备（压缩机、泵阀等）的预测性维护模型：通过采集设备运行参数，结合历史维护数据，利用时间序列分析算法，预测设备剩余寿命和故障概率，生成最优维护计划，

变“事后维修”为“预测性维护”，降低非计划停机时间。数据采集与传输架构上，压缩机采用三轴振动传感器+温度传感器组合，泵阀安装压力变送器+电流互感器，阀室增设环境监测传感器。边缘计算网关：内置 AI 芯片，实时执行异常检测（如基于阈值报警）和特征提取（如振动信号的频谱分析），仅传输关键数据至云端，降低带宽需求。通信层方面，光纤主干网覆盖站场，阀室采用 5G+LoRa 混合通信：5G 用于高频次实时数据传输。

智能预警方面采用分级预警响应流程：①红色预警（故障概率 >90%）：自动触发紧急停机指令，同时推送工单至就近运维团队（含导航路径和 AR 实景维修指南）。②黄色预警（故障概率 60%-90%）：生成备件预采购申请，调度人员提前巡检。③蓝色预警（潜在异常）：记录异常特征，作为模型迭代输入。

3.3 智能调度与应急指挥

开发基于自然语言处理的智能调度系统：通过语音识别与语义理解技术，实现调度指令的自动识别与分发；构建应急情景智能推演模型，在发生异常工况时，自动生成应急处置方案，提升应急响应效率。

在项目中调度指令需覆盖 185.3km 管道及 11 个关键节点（站场+阀室），要求系统具备全局协调能力和快速响应能力。因此可在各站场和阀室部署边缘计算节点，实现本地语音指令的实时识别（抗噪处理），并通过云平台统一分发指令。例如，调度员可通过语音命令“降低站场 2 的输送压力至 3.5MPa”快速执行操作，指令经 NLP 解析后自动触发站场 2 的 PLC 控制系统。针对跨区域操作（如全线压力调整），系统可自动生成协同指令序列，确保各站场和阀室的执行时序正确，避免压力波动风险。

应急指挥方面，主要利用 GIS 网络分析功能，识别泄漏点上下游阀门等敏感目标，内部则采用计算流体力学方法，建立气体扩散、液体流淌的数学模型，结合实时监测数据、GIS 管道地图、历史泄漏案例库等，进行动态推演。每次实际应急处置后，系统会自动记录处置过程与结果，更新应急推演模型，提升响应准确性。

4 应用成效与展望

通过人工智能技术的应用，本项目在施工质量合格率、安全事故预防、以及工程运行效率优化等方面取得了显著成效。施工质量合格率较传统模式提升约 23%，安全隐患识别响应时间缩短 42%，运维效率显著提高，初步实现了从“被动应对”向“主动预防”的转变。实践表明，人工智能技术已成为推动管道工程智能化转型的核心驱动力。

4.1 构建可视化监测与智能预警系统，优化自启动应急效果

天然气长输管道施工及运营过程，具有严格的安全要求，故未来发展阶段，随着人工智能技术的有力推广，各关联单位有必要通过积极研发并应用可视化监测与智能预警系统，随时从系统反馈信息中，预判施工安全隐患或质量缺陷，直接参考系统发布的预警结果及监测图像，自动化启动应急预案，以提高验收合格率与运营安全水平。实现该预期目标时，具体可利用多传感器融合技术，将气体浓度传感器、位移传感器、压力传感器等传感器设备，合理布置在管道施工路径中，经过每秒自动采集 100 次以上相关数据，为施工单位或管理组织提供可视化监测服务，针对细微变动现象，也能精准捕捉变化特征，可为应急指令“即时性响应”体系的构建提供依据。

4.2 深化大数据分析挖掘，提升决策智能化水平

建立管道工程专属大数据中心，整合地质环境、气象、设备状态、市场供需等多维度数据，开发深度学习模型精准预流量波动、能耗峰值及市场需求。例如，通过时间序列分析预测冬季天然气需求峰值，提前调度储备资源；利用自然语言处理（NLP）技术解析行业标准、历史案例及学术论文，自动生成符合规范的施工方案。

4.3 加强复合型人才培养，为智能化转型提供人才保障

联合高校设立“AI+管道工程”联合实验室，开设“智能管道工程”课程，培养既懂工程原理又掌握 AI 技术的复合型人才；构建“基础-进阶-专家”三级培训体系，面向一线人员开展 AI 工具实操培训（如机器人巡检操作）；面向管理层开设智能决策课程（如大数据分析）；面向研发团队深化算法创新研究（如腐蚀预测模型开发）。

参考文献：

- [1] 张晨. 基于新一代 ICT 技术的天然气长输管道智能工地管理体系建设与应用 [J]. 石化技术, 2023, 30(7): 354-355+358.
- [2] 王居伟. 天然气管道完整性管理建设与关键技术分析 [J]. 化工管理, 2023(8): 1-3.
- [3] 于越. 天然气管道建设工程数字化管理思考 [J]. 石化技术, 2023, 30(9): 383-385.
- [4] 范志刚, 杨健, 刘玉辉. 天然气管道建设中的生态保护与环境监测技术体系构建研究 [J]. 实验室检测, 2023, 1(3): 198-200.
- [5] 于龙, 孟頔, 赵冰. 卫星通信赋能长输天然气管道应急体系建设 [J]. 中国宽带, 2023, 19(8): 151-153.