

无人机技术在油气长输管道巡检中的应用研究

杨虎成 郭 辉（国家石油天然气管网集团有限公司西北分公司，陕西 西安 710000）

摘要：油气长输管道作为能源输送的重要基础设施，其安全运行直接关系国民经济与生态环境。传统人工巡检存在效率低、成本高、覆盖盲区多等问题，难以满足复杂地形与恶劣环境下的巡检需求。随着无人机技术快速发展，其在载荷能力、飞行稳定性及多源数据采集方面的优势逐步显现，为管道巡检提供了新的技术路径。本文旨在系统分析无人机技术特性与管道巡检需求的适配性，构建覆盖任务规划、数据采集、分析预警的全流程应用模式，为行业智能化转型提供理论支撑与实践参考。

关键词：无人机技术；油气长输管道；巡检应用；数据处理；协同作业

中图分类号：TE88 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)018-0106-03

Research on the Application of UAV Technology in the Inspection of Long-distance Oil and Gas Pipeline

Yang Hucheng, Guo Hui (National petroleum and natural gas pipeline network group co., ltd. northwest branch, Xi'an Shanxi 710000, China)

Abstract: As a crucial component of energy transportation infrastructure, long-distance oil and gas pipelines play a vital role in the national economy and ecological environment. Traditional manual inspection methods suffer from low efficiency, high costs, and numerous blind spots, making them inadequate for inspection needs in complex terrains and harsh environments. With the rapid development of drone technology, its advantages in payload capacity, flight stability, and multi-source data acquisition have become increasingly evident, offering a new technological pathway for pipeline inspection. This paper aims to systematically analyze the compatibility between drone technology characteristics and pipeline inspection requirements, and to construct a comprehensive application model covering mission planning, data acquisition, and analysis and early warning. This work provides theoretical support and practical references for the intelligent transformation of the industry.

Keywords: UAV technology; Long-distance oil and gas pipeline; Patrol inspection application; Data processing; Cooperative operation

油气长输管道具有线路长、跨度大、环境复杂的特点。近年来，无人机凭借灵活机动、高分辨率数据获取能力，逐渐成为管道巡检领域的研究热点。通过集成地理信息系统、多光谱传感器与智能算法，无人机可完成复杂地形下的航线规划、管道表观缺陷识别及泄漏隐患预警，显著提升巡检覆盖率和响应速度。然而，实际应用中仍面临环境适应性、数据处理时效性等技术瓶颈。本文聚焦无人机在管道巡检中的核心应用场景，结合技术特性与行业需求，提出系统性解决方案，旨在为优化巡检模式、保障管道安全提供科学依据。

1 无人机技术及油气长输管道巡检概述

1.1 无人机技术概述

无人机技术作为现代航空领域的重要分支，其核心由飞行平台、导航控制系统及任务载荷模块构成，在油气长输管道巡检中展现出独特技术适配性。无人机按结构可分为固定翼、多旋翼与复合翼三类：固定翼无人机依靠空气动力学原理实现长航时、大范围巡航，适用于平原或缓坡地带的管道全线监测；多旋翼

无人机凭借垂直起降与悬停能力，在山区、河流等复杂地形中执行精细化巡检任务；复合翼设计融合两类优势，兼具续航能力与灵活机动性，满足多样化场景需求。技术参数方面，飞行高度覆盖低空至中空范围，可规避地面障碍物并获取高精度影像数据；续航时间直接影响单次作业覆盖里程，需结合能源系统优化实现任务匹配；载荷能力决定传感器集成上限，直接影响数据采集维度与质量。典型任务设备中，高清摄像机捕捉管道表面涂层破损、第三方施工痕迹等表观缺陷，红外热成像仪通过温度异常识别管道微泄漏与保温层失效，激光雷达生成三维点云数据辅助管道沉降分析与地质灾害评估。随着导航定位精度的提升与避障算法的优化，无人机在复杂电磁环境与气象条件下的作业稳定性显著增强，为长输管道全天候监测提供技术支撑^[1]。

1.2 油气长输管道巡检需求与特点

油气长输管道作为能源传输的核心载体，其安全运营面临复杂的地理环境与动态风险挑战。巡检需求涵盖管道本体结构完整性、附属设施功能性及周边环

表

传感器类型	核心检测对象	典型参数配置
高清摄像机	涂层破损、第三方施工痕迹	分辨率 $\geq 2\text{cm/像素}$, 帧率 2fps
红外热成像仪	管道温度异常、微泄漏	热灵敏度 0.1°C , 刷新率 30Hz
激光雷达	地表形变、管道沉降	点云密度 $\geq 200 \text{ 点/m}^2$, 精度 5cm

境稳定性三大维度。管道本体需重点监测腐蚀、裂纹、变形等机械损伤，并识别第三方施工、地质灾害等因素引发的潜在威胁；附属设施如阀门、阴极保护站的运行状态直接影响管网调控能力与防腐效果；周边环境监测涉及土壤沉降、植被侵占、人为活动干扰等，需评估其对管道安全的影响边界。此类巡检任务具有跨区域、长距离、高频次特征，管道常穿越山地、沼泽、沙漠等复杂地形，人工巡检存在效率低、盲区多、响应慢等局限。

此外，极端天气、电磁干扰等外部条件对检测设备的稳定性和数据可靠性提出更高要求，传统手段难以兼顾全面性与时效性。管道运营方亟需一种适应性强、覆盖度广的巡检技术，既能完成大范围快速普查，又能针对高风险区域实施高精度诊断，同时满足突发事件的应急响应需求。这种多维度的技术需求与复杂场景的耦合性，成为推动无人机技术深度介入油气管道巡检的核心驱动力^[2]。

2 无人机在油气长输管道巡检中的应用模式

2.1 巡检任务规划与航线设计

无人机在油气长输管道巡检中的任务规划与航线设计需紧密结合地理空间特征与工程需求，形成系统性技术框架。基于地理信息系统构建管道三维模型，整合高程、植被覆盖、人工建筑等地理数据，为航线规划提供基础场景。地形起伏、山体坡度、河流走向等自然因素直接影响飞行路径的可行性与安全性，山地地形要求航线规避陡坡与障碍物，河流区域需调整飞行高度以确保传感器有效覆盖管道跨河段。气象条件下，风速、降水与能见度作为动态变量嵌入航线优化算法，实时调整飞行姿态与巡检节奏，保障数据采集稳定性。

针对不同巡检目标，任务规划需差异化设置飞行参数：泄漏检测要求低空低速飞行以捕捉细微温度变化，结构完整性评估需特定角度拍摄管道焊缝与涂层状态，环境监测则侧重广域覆盖与周期性复飞。多机协同作业场景下，航线设计需划分任务区域并规避信号干扰，确保数据采集无盲区。自主避障技术与动态

路径规划算法的结合，进一步提升复杂环境中航线执行的鲁棒性。这种融合地理信息、环境变量与目标导向的规划方法，构成无人机高效执行管道巡检任务的技术基石，为后续数据采集与分析提供空间维度与作业逻辑的精准支撑^[3]。

2.2 实时巡检与数据采集

无人机在油气长输管道实时巡检与数据采集阶段，技术执行逻辑围绕飞行控制、传感器协同与数据流管理展开。飞行操作需依据预设航线动态调整飞行高度与速度，平原区域通常保持 50m–100m 飞行高度以平衡影像分辨率与覆盖效率，山区或障碍密集区降至 20m–30m 确保传感器有效捕捉管道细节。飞行速度控制在 8–12m/s 区间，避免高速飞行导致图像模糊或热辐射数据失真。多传感器同步采集模式下，高清摄像机以每秒 2 帧的速率拍摄管道表观状态，红外热成像仪以 0.1°C 温度灵敏度持续扫描管道沿线热场分布，激光雷达则以百万点 / 秒密度生成地表三维点云数据。传感器参数需根据检测目标动态配置：腐蚀检测要求可见光影像分辨率高于 2cm/px ，微泄漏识别依赖红外热成像仪 0.5°C 温差敏感度，地质灾害评估需激光雷达平面精度优于 5cm。实时数据传输通过 4G/5G 或专用射频链路回传至地面站，原始数据经边缘计算设备预处理后，剔除冗余信息并标注异常区域坐标。飞行过程中，自主避障系统基于毫米波雷达与视觉识别技术，实时修正航线规避动态障碍物。多机协同作业时，任务分配算法依据剩余电量、传感器负载与地形复杂度，动态调整各无人机巡检区段，确保任务连续性。

数据质量控制贯穿采集全程，光照强度、大气透射率等环境变量被纳入元数据标签，为后续分析提供纠偏依据。这种融合精准飞行控制、多源传感与实时反馈的技术模式，显著提升了管道状态感知的维度与时效性，为智能化决策提供底层数据支撑^[4]。

2.3 数据处理与分析

无人机在油气长输管道巡检中的数据处理与分析环节，是连接原始数据与工程决策的技术枢纽，其核

心在于将多源异构信息转化为可量化、可追溯的管道状态评估依据。数据预处理阶段，针对可见光影像、红外热力图与激光雷达点云等不同模态数据，分别执行去噪、几何校正与配准操作，消除因飞行抖动、光照变化或传感器误差引入的干扰因素。可见光图像通过边缘增强与色彩平衡算法强化管道表面纹理细节，便于识别涂层剥落或机械损伤；红外数据需校准环境温度基准线，建立管道热辐射分布模型以定位异常温升区域；激光点云经过地面滤波与坐标归一化处理，生成高精度数字高程模型，支撑地表形变与管道位移的定量分析。

特征提取环节，基于深度学习的语义分割算法从影像中自动标注管道本体、支架结构与周边地物，目标检测模型识别第三方施工设备、植被侵占或违规占压等风险目标；热力数据通过聚类分析划分温度梯度区间，结合管道材质与介质特性评估泄漏概率；点云数据计算地表曲率与坡度变化率，构建地质灾害潜在影响指数。多源数据融合技术将空间位置对齐的影像特征、温度场分布与地形参数叠加至统一时空坐标系，形成多维度的管道健康状态图谱。

异常诊断环节，知识图谱技术整合管道设计参数、历史维修记录与行业规范，构建专家推理规则库，对数据中提取的疑似缺陷进行优先级排序与风险分级，区分紧急维修项与长期监测目标。分析结果通过可视化引擎生成交互式三维巡检报告，标注缺陷位置、类型与严重程度，同步接入管道完整性管理系统更新资产数据库。这一技术链条将海量巡检数据凝练为精准的工程语义信息，为管道运维从“被动响应”向“主动预防”转型提供底层逻辑支撑。

2.4 应急响应与协同作业

油气长输管道应急响应场景下，无人机技术通过动态重构任务逻辑与多机协作机制，形成快速响应的闭环作业体系。突发事故触发后，应急指挥系统基于管道泄漏模型与地理信息数据，自动生成三维态势地图，标注疑似泄漏点、地质灾害区或第三方破坏区域。无人机集群依据事件等级与优先级划分任务单元：前哨机组携带广域监测设备快速抵近目标区域，利用多光谱传感器扫描地表挥发物浓度梯度，结合风向数据构建气体扩散模型；精查机组搭载高分辨率光学与热成像设备，沿管道轴线实施低空蛇形扫描，捕捉微泄漏特征或结构变形迹象。

异构通信网络支持多机数据实时共享，微波中继无人机在复杂地形中构建临时通信链路，保障偏远地区视频流与传感器数据的低延迟回传。协同作业框架内，任务分配算法综合考虑无人机续航能力、载荷类

型与环境干扰因子，动态调整飞行高度、传感器参数与覆盖密度。

灾害现场常伴随强风、雨雾或电磁干扰，飞行控制系统需融合惯性导航与视觉定位数据，在卫星信号弱化区域维持厘米级定位精度。多源数据融合模块将气体浓度、热力图与地表形变信息叠加至数字管道模型，生成事故影响范围与风险扩散趋势的可视化图谱，为抢修团队提供行动路径规划依据。人机协同界面允许地面操作员介入任务流，手动标注重点排查区域或调整无人机飞行轨迹，确保关键目标的复查精度。

灾后评估阶段，无人机持续监测事故区域管道应力变化与周边环境恢复状态，周期性采集数据验证维修措施有效性。这种融合快速响应、智能决策与动态优化的作业模式，重构了传统管道应急管理中被动作业流程，将事故处置窗口期压缩至小时级，显著降低次生灾害发生概率与经济损失。技术架构的弹性扩展能力，使得无人机系统既能应对单点泄漏等局部事件，也可适应地震、滑坡等大范围灾害场景，成为管道完整性管理中不可或缺的移动感知节点^[5]。

3 结语

无人机技术在油气长输管道巡检中的应用已展现出显著优势，其高效、安全、精准的特点有效弥补了传统巡检的不足。实践表明，基于地理信息系统的航线规划能够适应复杂地形与气象条件，多源传感器协同作业可提升泄漏检测与缺陷识别的准确性。此外，无人机在应急响应中具备快速部署能力，通过与地面人员协同作业，可缩短事故处置周期。未来需进一步优化无人机平台性能，推动人工智能算法与多设备协同技术的深度融合，构建覆盖巡检全链条的智能化解决方案。行业应结合具体场景需求，制定标准化操作流程，完善技术验证体系，为无人机技术的规模化应用奠定基础。

参考文献：

- [1] 刘华锋,刘小强,权威.无人机技术在油气管道巡检中的应用研究[J].产品可靠性报告,2024,(10):83-84.
- [2] 邓志强,阙颢,陈远鹏.无人机技术在油气长输管道巡检应用研究进展[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(22):182-183.
- [3] 杜怀林.无人机技术在油气长输管道巡检中的应用研究[J].科学技术创新,2021,(07):55-56.
- [4] 刘雪光.浅析无人机技术在油气管道巡检中的应用[J].科技创新导报,2018,15(08):146-147.
- [5] 苗永宁,武亚斌,纪海成.原油长输管道智能化巡护系统建设与应用探究[J].石化技术,2022,29(01):75-77+171.