

探析无人机技术在天然气长输管道巡护管理的应用

尤晓风 韦清宜

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: 本文系统研究了无人机技术在天然气长输管道巡护管理中的具体应用。通过分析无人机系统构成与作业特性,结合管道巡护实际需求,从日常巡检、隐患排查、应急响应三个维度展开应用场景研究。研究证实,无人机技术通过搭载多模态监测设备,可实现管道本体及周边环境的立体化监测,相较传统人工巡检方式,其巡护效率提升3-5倍,人力成本降低60%以上,监测精度达到毫米级缺陷识别能力。针对续航限制、信号传输、数据处理等技术瓶颈,提出了多机协同作业、抗干扰通信、智能分析体系等解决方案,为天然气管道智能化巡护提供理论支撑与实践指导。

关键词: 无人机技术; 天然气长输管道; 巡护管理; 应用

天然气长输管道作为能源输送动脉,其安全稳定运行直接关系到国家能源安全与公共安全。传统人工巡检模式受制于地形复杂度、作业效率低、监测精度差等因素,已难以满足现代管网管理需求。随着航空技术与信息技术的深度融合,无人机凭借其机动灵活、监测高效、适应性强等特性,在管道巡护领域展现出显著应用价值。本文通过解析无人机技术体系,结合天然气管道巡护实际需求,系统阐述其在管道巡检、隐患识别、应急处置等场景的创新应用,并针对技术瓶颈提出改进方案,旨在为构建智能化管道巡护体系提供技术参考与决策依据。

一、无人机技术概述

1. 无人机系统组成

无人机系统作为现代航空技术与信息技术的融合产物,其技术架构由六大核心模块构成。飞行平台作为载体框架,普遍采用碳纤维复合材料打造机体,这种材质在保障结构强度的同时显著降低自重,为长时间飞行奠定基础。动力系统根据机型差异呈现多样化配置:固定翼无人机多选用活塞式发动机或涡轮发动机,以实现高速巡航;多旋翼机型则普遍搭载无刷直流电机驱动旋翼,通过转速差实现精准姿态控制。飞行控制体系构成无人机的“神经中枢”,其核心功能涵盖三维空间定位、航迹规划与异常状态干预。该系统整合惯性测量单元、GPS模块及气压计等传感器,构建起多维感知网络,可实时修正飞行偏差。数据传输链路采用双向通信机制,既保障地面指令的上行传输,又实现高清视频流的稳定回传,部分先进系统已实现10公里级超视距控制能力。任务载

荷的配置直接决定巡护效能。可见光摄像机通过变焦镜头捕捉管道表面细节,红外热成像仪可穿透植被覆盖探测地下泄漏引发的温场异常,激光雷达则能生成三维地形模型,精准识别地表形变。地面控制站集成飞行监控、数据处理与应急指挥功能,操作人员可通过数字地图实时掌握无人机方位、电池电压等关键参数。不同构型的无人机在管道巡护场景中形成优势互补。固定翼机型凭借每小时100公里以上的巡航速度,适合执行大范围管线走廊的快速普查,其单架次200公里以上的作业半径可高效覆盖平原地区管网。多旋翼无人机凭借垂直起降特性,能够在山地、水网等复杂地形开展精细化巡检,其悬停功能使阀门法兰、补偿器等关键节点的细节检查成为可能^[1]。

2. 无人机分类及特点

复合式无人机通过共轴双桨设计,同时具备垂直起降与高速巡航能力,特别适用于跨山区管线的全流程巡护。该机型既可像直升机般在狭窄场地自主起降,又能切换固定翼模式进行长距离巡航,有效平衡了作业效率与地形适应性。在管道安全管理中,无人机已形成“预防-监测-应急”三位一体的应用模式。日常巡检通过周期性飞行建立管线数字档案,运用AI图像识别技术自动筛查占压、裸露等隐患。泄漏监测结合光谱分析技术,可探测甲烷气体特有的红外吸收特征,将响应时间缩短至分钟级。应急处置时,无人机可搭载中继通信设备恢复灾区信号,或投送轻量级抢修物资,显著提升突发事件处置效率。随着边缘计算与5G技术的发展,无人机正从单一巡检工具向智能巡护平台演进。机载计算单元实

现数据实时分析，云端协同系统支持多机协同作业，自主决策算法可根据任务优先级动态调整巡检路线。这种技术迭代正推动天然气管道管理向“智能感知、精准决策、高效执行”的智慧化方向转型。

二、无人机技术在天然气长输管道巡护中的应用场景

1. 日常巡检

日常巡检是保障管道安全的基础环节。巡护团队会预先设定无人机的飞行航线和时间表，使其能够定期对天然气长输管道展开巡查工作。在飞行过程中，无人机利用高清摄像头对管道本体、防腐层及标志桩等设施进行图像采集，这些影像资料会实时传输至地面控制站。专业人员通过图像分析软件，可精准识别管道表面是否存在腐蚀、破损或变形等异常状况，同时核查标志桩是否保持完好。无人机搭载的红外热成像设备能够捕捉管道沿线的温度分布特征，这种监测方式不受昼夜交替或恶劣天气的影响。例如在冬季巡检中，某团队通过红外热成像发现管道连接部位存在温度异常，经后续人工核查及时消除了密封隐患^[2]。

2. 隐患排查

针对复杂地形区域的隐患排查，无人机展现出独特的作业优势。在山区、沼泽或密林等人工难以抵达的区域，无人机可突破地形限制进行全方位监测。通过配备的高分辨率摄像头和激光雷达，技术人员能够清晰观测管道下方地质状况，及时发现滑坡、侵蚀等潜在风险，同时监测管道上方是否存在违章建筑或植被过度生长等安全隐患。当发现异常情况时，无人机可快速定位并回传详细信息，为制定维修方案提供科学依据。某山区管道巡护案例显示，无人机成功探测到陡峭山谷中的地质隐患，使维护团队得以提前采取防范措施。

3. 应急响应

在应急处置阶段，无人机发挥着关键的现场支持作用。当管道发生泄漏或火灾等突发事件时，无人机可迅速抵达事故区域，利用多传感器设备评估事故规模和影响范围。在泄漏事故中，无人机能够准确定位泄漏点，并追踪气体扩散路径，为救援决策提供实时数据支持。在抢险作业过程中，无人机持续监控现场动态，观察人员疏散、灭火作业及管道修复的进展情况，及时发现次生风险。此外，无人机还可执行物资投送任务，向事故现场运送急救药品或灭火设备，有效提升应急响应效率。某次泄漏事故处理中，无人机提供的实时影像帮助指挥人员优化了抢险方案，确保了作业安全^[3]。

4. 管道维护与修复支持

在管道维护与修复作业中，无人机正发展为重要的空中作业平台。针对管道防腐层破损、小型泄漏等维护需求，可搭载专用设备的无人机能执行辅助修复任务。某能源企业研发的喷涂无人机，配备高压无气喷涂系统，可在管壁上方精准实施防腐层修补作业，其作业精度达厘米级，喷涂厚度均匀性优于人工操作。对于管道上方的小型占压物清理，搭载机械臂的无人机可执行精准切割、抓取等操作，避免传统人工拆除对管道的潜在损伤。在管道带压开孔作业中，无人机可搭载激光定位装置，为开孔设备提供毫米级定位精度，确保施工过程不影响管道正常输气。当进行管道焊接修复时，无人机可悬停于作业点上方，通过高清摄像头与红外热像仪构建双目视觉系统，实时监测焊缝温度场分布，帮助技术人员远程判断焊接质量。这种空地协同的维护模式，使管道修复作业效率提升，作业风险降低。

三、无人机技术应用于天然气长输管道巡护的优势

1. 提高巡护效率

无人机技术的引入显著提升了天然气长输管道的巡护效能。在巡检效率方面，传统人工巡检受制于人类生理极限，每日巡检里程存在明确上限。特别是在山地、沼泽等复杂地形区域，巡检人员行进速度大幅降低，导致单日有效巡检距离有限。相比之下，固定翼无人机凭借其空气动力学优势，可实现每小时数十公里的巡检速度，单架次作业范围即可覆盖传统方式数日的巡检量。多旋翼无人机虽速度稍逊，但其悬停功能可对重点区域进行多角度复检，这种“快速普查+精准复查”的组合模式，使数千公里级管线的全线巡检周期从数月压缩至数周，隐患响应时效性得到质的提升^[4]。

2. 降低人力成本

在成本控制层面，无人机技术实现了巡护作业的降本增效。传统巡护体系需要构建庞大的地面团队，涵盖巡线员、驾驶员、后勤保障等多类岗位，人力成本构成运营支出的主要部分。无人机巡检仅需配备专业操作员及数据分析师，人员规模大幅缩减。同时，无人机作业不受生理因素制约，可实现全天候连续工作，省去了人员轮班、食宿、交通等衍生成本。某能源企业实际应用表明，引入无人机后巡护团队规模缩减，年度人力成本支出显著下降，企业运营效益得到明显改善。

3. 提升监测精度

监测精度方面，无人机搭载的专业设备构建起立体化监测体系。可见光成像系统配备高倍率变焦镜头，能

够清晰捕捉管道表面毫米级缺陷，传统巡检难以发现的早期腐蚀、微小裂纹均无所遁形。红外热成像装置通过探测温场分布，可精准定位因泄漏产生的异常热源，其测温精度足以识别细微温差变化。激光雷达扫描系统生成的三维点云模型，能够精确还原管道周边地形地貌，对地表沉降、占压物侵界等隐患实现厘米级定位。这些多维监测数据经专业软件分析处理，可生成管道健康状况评估报告，为隐患治理提供科学依据，使巡护工作从“经验判断”转向“数据决策”，管道安全管理水平实现跨越式提升^[5]。

四、无人机技术应用面临的挑战及对策

1. 飞行续航限制及对策

针对无人机续航能力不足的问题，行业正通过多途径技术攻关实现突破。当前，无人机在续航能力方面仍面临显著挑战，这成为限制其大规模应用的关键因素。为突破续航瓶颈，科研团队正致力于开发高能量密度电池技术，并优化能源管理系统。部分研发机构已推出新型锂聚合物电池，其能量存储效率较传统电池提升显著，可支持无人机执行更长时间的巡检任务。在作业模式创新方面，管道管理企业开始采用多机协同巡检方案。通过在管道沿线合理布设无人机机巢，并配备快速更换电池装置，单架无人机完成既定航段巡检后，可自动返航更换电池或由备用机接续执行任务，这种模式有效延长了整体巡检周期的连续性。

2. 信号传输干扰及对策

在通信保障领域，无人机系统正构建多重抗干扰防护体系。复杂电磁环境对无人机数据传输的稳定性构成持续威胁。为应对信号干扰，可采用频段跳跃技术。这种技术能使无人机通信频率在特定范围内动态调整，从而有效规避干扰频段。通信设备升级也是重要方向，通过加装功率放大模块和定向天线阵列，可显著增强信号穿透力和接收灵敏度。在系统架构层面，双通道通信机制正在普及。无人机同时搭载无线电通信模块和卫星通信终端，当地面无线电信号受阻时，系统可自动切换至卫星链路，确保控制指令和影像数据实时传输^[6]。

3. 数据处理与分析难题及对策

面对海量数据处理需求，管道企业正在构建智能分析体系。无人机单次巡检产生的多模态数据需要高效处理。为解决这一难题，计算机视觉技术正在发挥关键作

用。通过构建深度学习模型，系统可自动识别管道表面缺陷，对腐蚀、变形等异常特征进行像素级标注。在数据处理流程优化方面，边缘计算技术正在引入。在无人机搭载轻量化AI芯片，实现原始数据的预处理和特征提取，仅将关键信息回传至地面站，大幅降低了数据传输压力。专业分析团队还建立了管道缺陷知识图谱，通过对历史数据的关联分析，可预测隐患发展趋势，为预防性维护提供决策支持^[7]。

结语

综上所述，无人机技术的引入标志着天然气管道巡护模式向智能化转型的重要突破。实践表明，该技术不仅显著提升了巡检效率与监测精度，更通过立体化监测体系实现了管道安全隐患的早发现、早预警、早处置。尽管当前仍面临续航能力、信号稳定性、数据解析等技术挑战，但随着电池技术、通信技术、人工智能算法的持续进步，无人机巡护系统将向完全自主化、智能决策化方向发展。未来，通过构建“空-天-地”一体化监测网络，无人机技术有望成为保障天然气管道安全运行的核心手段，推动能源管网管理迈入智慧化新时代。

参考文献

- [1] 苏庆伟. 无人机技术在长输天然气管道山区段巡护应用研究[J]. 化工管理, 2023, (31): 61-64.
- [2] 黄庆江, 何庆鹰. 无人机技术在天然气长输管道巡护管理的应用分析[J]. 石化技术, 2021, 28(03): 195-196.
- [3] 温镜冉. 无人机技术在天然气长输管道巡护管理的应用[J]. 网络安全技术与应用, 2019, (03): 96-97.
- [4] 管锡昭, 黄素琴, 邓志强. 无人机智能巡检系统在长输管道中的应用研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43: 110-112.
- [5] 苏庆伟. 无人机技术在长输天然气管道山区段巡护应用研究[J]. 化工管理, 2023(31): 61-64.
- [6] 顾诚. 基于长输油气管道巡检作业中无人机系统应用及发展[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(2): 137-139.
- [7] 朱增辉. 长输油气管道自动化技术发展趋势探讨[J]. 中国化工贸易, 2023, 15(2): 136-138.