

无人机巡护技术在天然气管道安全管理中的应用

王明¹ 付帅² 张帆²

1. 国家管网集团北京管道有限公司内蒙古输油气分公司 内蒙古 呼和浩特 010000

2. 国家管网集团北京管道有限公司山西输油气分公司 山西 太原 030000

摘要: 传统的人工巡护方式在效率、覆盖范围、响应速度及高风险区域作业能力等方面存在明显短板,难以满足现代长距离、复杂地形、高压天然气管道的安全管理需求。近年来,无人机(UAV)技术迅速发展,在电力、交通、测绘等领域已广泛应用,其在天然气管道巡护中的潜力日益凸显。本文系统梳理了无人机巡护技术的发展现状,深入分析其在天然气管道安全管理中的应用场景、关键技术与挑战。研究表明,无人机巡护可显著提升管道巡护效率与精度,降低人工成本与安全风险,增强对第三方施工破坏、地质灾害、泄漏隐患等风险的早期识别与预警能力。

关键词: 无人机;天然气管道;安全巡护;泄漏检测;智能识别;数字孪生

引言

天然气是清洁、高效、低碳的化石能源,在我国“双碳”战略推进中至关重要。据国家能源局统计,截至2024年底,我国天然气管道总里程超90万公里,构建起庞大管网系统。但天然气易燃易爆且无色无味,泄漏遇明火易引发重大事故,确保其管道安全稳定运行备受关注。传统天然气管道巡护依赖人工徒步或车辆巡查及部分固定监测点,存在局限:巡护周期长、效率低,难高频次全覆盖;受地形限制,部分管段难抵达;人工判断主观性强,易漏检微小隐患;面对突发险情响应滞后。同时,城市化进程加快使管道沿线第三方施工频繁,加剧安全风险。在此背景下,以无人机为代表的智能巡护技术出现,其机动灵活、作业高效、成本可控且能搭载多种传感器,可为管道安全管理提供新路径。

1 无人机巡护技术概述

1.1 无人机类型与平台选择

用于管道巡护的无人机主要包括固定翼无人机、多旋翼无人机和垂直起降固定翼无人机(VTOL)三类:(1)多旋翼无人机:操作简便、悬停能力强、起降场地要求低,适用于短距离、精细化巡护任务,如阀室、站场周边、城市管网等。典型代表如大疆Matrice 300 RTK。(2)固定翼无人机:续航时间长(可达数小时)、飞行速度快、覆盖范围广,适合长距离干线管道的应用。但对起降条件要求较高。(3)VTOL无人机:兼具固定翼的长航时与多旋翼的垂直起降能力,是当前长输管道巡护的主流选择,尤其适用于地形复杂、起降不便的区域。

1.2 核心载荷技术

无人机巡护效能高度依赖于所搭载的传感器(载荷):

(1) 可见光高清摄像机:用于拍摄管道沿线地表状况、标

识桩完整性、植被覆盖、第三方施工迹象等,是基础巡护手段。(2)热成像相机(红外热像仪):可探测管道表面温度异常,识别因保温层破损、内部堵塞或泄漏导致的局部温升,对埋地管道泄漏具有间接诊断能力。(3)激光甲烷遥测仪(TDLAS):基于可调谐二极管激光吸收光谱技术,可在数米至数十米距离内非接触式检测甲烷浓度,灵敏度高(可达ppm级),是泄漏检测的核心装备^[1]。(4)激光雷达(LiDAR):可穿透植被获取高精度三维点云数据,用于构建管道走廊数字高程模型(DEM),监测地表形变、滑坡、沉降等地质灾害。(5)多光谱/高光谱相机:通过分析植被胁迫指数(如NDVI异常),间接识别地下泄漏对植被生长的影响,适用于植被覆盖区的泄漏筛查。

1.3 飞行控制与数据处理系统

现代巡护无人机普遍集成高精度GNSS(如RTK/PPK)、惯性导航系统(INS)和自动航线规划软件,可实现厘米级定位与全自动飞行,按照规划的飞行路线和飞行时间自动起降,无需人工干预。巡护数据通过4G/5G或卫星链路实时回传至监控中心,并由智能处理系统自动识别管道周边的大型机械、地貌变化、气体浓度分析等处理,生成结构化巡护报告。

2 无人机在天然气管道安全管理中的应用场景

2.1 日常巡护与隐患排查

在常规运维中,无人机可替代人工徒步巡护,按预设周期对管道全线或重点区段进行系统性巡护。在巡护工程中可智能分析摄像头捕捉到的实时画面中是否有大型机械挖掘等可能破坏管道的行为,并向管道管理人员发出预警,以便及时处置突发事件。通过对比历史影像数据,系统能够敏锐捕捉到管道沿线发生的细微变化。例

如,标志桩或警示牌的缺失、损坏不仅影响管道标识的完整性,也可能为后续施工埋下误挖风险;管道上方出现的违规占压或违章建筑会直接威胁管道本体安全;而第三方施工机械在管道保护带内作业则是当前最常见且最危险的外部威胁之一。此外,地表出现的裂缝、塌陷或严重水土流失等异常地貌,往往是地质活动或管道泄漏的早期征兆。无人机凭借其高空视角与高频次覆盖能力,能够及时发现这些隐患,为预防性维护争取宝贵时间。

2.2 泄漏检测与应急响应

泄漏检测是无人机技术最具突破性的应用领域。搭载激光甲烷遥测仪的无人机可在管道正上方低空匀速飞行,对沿线空气中的甲烷浓度进行连续扫描。一旦检测到异常峰值,系统会立即标记地理位置并发出警报,引导地面人员精准定位泄漏点。相较于传统依赖手持检测仪的人工地毯式排查,无人机可在短时间内完成数十公里管线的扫描,效率提升一个数量级以上^[2]。在发生疑似泄漏报警或已知事故后,无人机更可作为“空中眼睛”第一时间赶赴现场。它不仅能传回实时高清视频,帮助指挥中心全面掌握现场态势,提前预判现场风险,保障人员人身安全。还能同步提供气体扩散范围与浓度分布图,为制定科学、安全的应急处置方案提供关键依据,有效避免救援人员盲目进入高风险区域,极大提升了应急响应的安全性与时效性。

2.3 地质灾害与环境风险监测

天然气管道往往穿越地质条件复杂的区域,如山区、河谷、黄土高原等,长期面临滑坡、泥石流、地面沉降等地质灾害的威胁。无人机通过定期执行LiDAR扫描或倾斜摄影任务,可获取管道走廊高精度的三维地形数据。通过对不同时期的点云或数字高程模型进行差分分析,系统能够自动识别出毫米级的地表形变,从而对潜在的地质灾害进行早期预警。在汛期、地震或强降雨等极端天气事件之后,无人机可迅速出动,对受灾区域进行快速评估,判断管道是否因地质变动而受损或暴露,为抢修队伍的精准部署和资源调配提供第一手资料,将灾害对管道安全的影响降至最低。

2.4 第三方施工监管

随着城镇化进程加速,天然气管道,尤其是城市及近郊段,面临着来自市政工程、房地产开发、道路修建等各类第三方施工的严峻挑战。这类活动往往是管道安全事故的主要诱因。无人机在此场景下展现出强大的监管能力。通过定期巡航或对高风险区域进行定点监控,无人机能够实时发现第三方违规施工等高危行为。并且还集成了远程喊话功能,可在发现违规行为时立即进行语

音警告,起到即时震慑作用^[3]。同时,整个过程的视频证据可自动上传至管理平台,形成从“发现—预警—监视—处置”的完整监管闭环,不仅提高了反应效率,也减轻了人员的工作量,同时无人机具有更广阔的视野,能识别人员不易察觉的风险,为管道智能化管理提供有力抓手。

3 关键技术与系统集成

3.1 多源数据融合分析

单一传感器的数据存在局限性,难以全面、准确地反映复杂的管道安全状况。例如,可见光影像无法穿透茂密植被,热成像数据则容易受到日照、风速等气象条件的干扰。因此,构建一个多源数据融合分析框架成为提升巡护智能水平的关键。该框架旨在将来自可见光相机、热红外相机、激光甲烷检测仪、LiDAR等多种载荷的数据,在统一的时空坐标系下进行精确配准与融合。通过这种融合,系统可以综合利用不同数据源的优势,例如利用LiDAR穿透植被获取真实地表高程,再叠加可见光影像进行地物分类,同时结合甲烷浓度异常点进行交叉验证。在此基础上,借助机器学习算法,系统能够提取更为鲁棒和丰富的多模态特征,从而显著提高对各类安全隐患的综合判别能力和识别准确率。

3.2 人工智能与智能识别

人工智能,特别是深度学习技术,正在深刻改变无人机巡护的数据处理模式。通过对海量历史巡护图像进行标注和训练,可以构建专用的卷积神经网络(CNN)模型,如基于ResNet或EfficientNet架构的模型,使其具备自动识别特定目标的能力。这些模型能够从纷繁复杂的背景中精准定位出“挖掘机”、“推土机”等机械,识别出“地表裂缝”、“土壤翻动”等异常地貌,甚至能通过分析植被颜色和纹理的变化来判断其是否受到地下泄漏气体的胁迫^[4]。这种“边飞边识”或“飞完即识”的智能识别能力,将巡护人员从繁重的巡护工作中解放出来,使他们能够将精力集中在告警的核实与应急情况的处置上,极大地提升了巡护体系的运行效率和智能化水平。

3.3 数字孪生与可视化平台

将无人机巡护获取的动态数据与静态的管道地理信息系统(GIS)和资产管理系统深度融合,是构建管道数字孪生体的核心步骤。在这个虚拟的数字世界中,物理管道及其周边环境被精确映射,所有巡护发现的隐患、实时数据记录等信息都以可视化的方式呈现在三维平台上。管理人员无需亲临现场,即可在指挥中心全景式地掌握管道的健康状态。更重要的是,数字孪生平台支持进行风险模拟和应急预案推演,例如模拟某处发生泄漏后气体的扩散路径,或评估一次滑坡对管道结构的潜在

影响。这种从被动响应向主动预防的转变，标志着管道安全管理进入了全新的智能化时代。

3.4 自动化与系统融合

为进一步解放人力、提升响应速度，无人机巡护的终极形态是实现全流程自动化。这依赖于“无人机机场”（Drone-in-a-Box）系统的部署。这些小型自动化机库可沿管道网络分布式建设，内置充电、数据上传和气象感知功能。当收到巡护指令后，无人机可自动从机库起飞，执行预设任务，完成后自主返航、充电并上传数据，真正实现“无人值守”。

同时，无人机系统可与光纤预警系统和视频监控系统进行联动，三个系统数据实时联动，经算法分析后自动生成预警信息和处置建议，从而实现优势互补、信息互联。凭借搭载的AI智能算法，不但能够智能识别管道潜在的各类风险，而且能够做到各系统互相验证，确保预警信息准确无误，为管理决策提供可靠技术支撑。同时系统可7×24小时全时在线，实时监控管道安全状况，发现异常立即报警，有效提升应急响应速度，成功构建起“天空地”立体化防控网络。

4 面临的挑战分析

尽管前景广阔，无人机在管道巡护领域的规模化应用仍面临多重挑战。首先是法规与空域管理问题，我国低空空域尚未完全开放，跨行政区域的长距离飞行审批流程复杂且耗时，制约了无人机的灵活部署。其次是技术瓶颈，即便是最先进的VTOL无人机，其单次续航时间通常也不超过2小时，对于超长距离干线管道，仍需依赖中继站点或频繁更换电池，影响了作业连续性。再者，无人机的作业效能受天气影响较大，在强风、雨雪、沙尘等恶劣环境下，不仅飞行安全难以保障，所采集的数据质

量也会大打折扣。此外，巡护过程中涉及大量敏感的地理信息和关键基础设施数据，如何确保数据在传输、存储和处理过程中的安全与隐私，是一个不容忽视的问题。目前，行业内还缺乏统一的无人机巡护作业规范、数据格式标准和验收准则，导致不同系统之间难以兼容，阻碍了技术的标准化推广。最后，这项技术的普及也对人才提出了新要求，亟需培养一批既精通管道运维知识，又掌握无人机操作与数据分析技能的复合型人才。

5 结语

无人机巡护技术正深刻变革天然气管道安全管理的传统范式。其在提升巡护效率、增强风险预警能力、降低运营成本与安全风险等方面展现出巨大价值。尽管在法规、技术、标准等方面仍面临挑战，但随着技术迭代与政策完善，无人机将成为天然气管道“空地一体化”智能监测体系的核心组成部分。未来，通过构建以无人机为前端感知节点、以数字孪生为中枢、以AI决策为大脑的智慧管道安全管理系统，将有力支撑我国天然气管网向更安全、更智能、更高效的方向发展，为国家能源安全与“双碳”目标实现提供坚实保障。

参考文献

- [1]张连志.探究无人机技术在天然气管道巡检中的应用实践[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(09):113-115+118.
- [2]李春奇,张健铭,王佳楠,等.基于无人机的天然气管道巡检系统研究[J].石油化工自动化,2024,60(05):71-75.
- [3]苏庆伟.无人机技术在长输天然气管道山区段巡检应用研究[J].化工管理,2023,(31):61-64.
- [4]田明亮.基于无人机的山区天然气管道智能巡检系统设计与应用[J].化工管理,2023,(01):135-137.