

油气管道无人机巡检中通信技术优化与应用研究

唐经纶¹

TANG Jinglun

摘要

利用无人机进行巡线作业对油气管道运输在提升管道巡检效率、保障作业安全的同时,也能够促进系统自动化与智能化发展,完成智慧站场互联。为充分探讨无人机通信技术给管道巡检带来的优势,文章介绍了当前油气管道巡检的现状,对比了无人机巡检代替有人巡检队伍的优劣,对油气管道无人机巡检作业中涉及的数据传输方式进行了阐述。针对当前无人机管道巡检技术中普遍存在的通信技术的瓶颈与挑战,结合目前已经建设的无人机巡检工程项目,研究并展开分析了无人机通信技术的优化对巡线效率、检测成本、作业安全等方面的关键提升,并对无人机巡线的应用前景进行了展望。

关键词

无人机;管道巡检;无线通信;技术优化

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.09.042

0 引言

油气管道是当前能源储运的重要组成部分,其将石油天然气等化石燃料从上游输送至下游,以供交通运输、合成原料、工农业生产、居民用能等所需,因此被誉为能源运输的大动脉。国际能源署发布的《全球能源评论 2025》报告指出,2024 年全球能量需求增长速度快于过去十年平均水平,对所有燃料和技术的需求都将扩大,2024 年天然气和石油的全球需求与 2023 年同比增长了 2.7% 和 0.8%,中国天然气需求增长量最大(如图 1 所示),增长超过 7% ($3 \times 10^{10} \text{ m}^3$)。

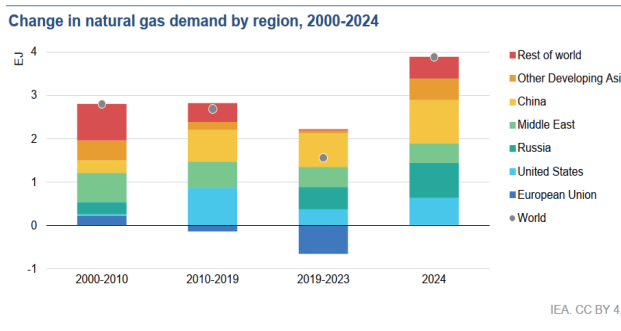


图 1 2000—2024 年区域天然气需求变化

(摘自《全球能源评论 2025》报告)

在全球能源体系背景下,石油天然气的能源地位短期

1. 国家管网集团工程创新有限公司华东设计院
江苏徐州 221008

- [13] ZHOU J H, LU Q H, DAI W B, et al. Guest editorial: federated learning for industrial IoT in industry 4.0[J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2021, 17(12): 8438-8441.
- [14] LI H A, GE L H, TIAN L. Survey: federated learning data security and privacy-preserving in edge-Internet of things[J]. Artificial intelligence review, 2024, 57(5): 130.
- [15] LUO J. Research on image recognition methods based on deep learning[J]. Journal of physics: conference series, 2019, 1395: 25-27.
- [16] ZHANG H Q, LI J, LIU S Q, et al. A human body infrared image recognition approach via DCA-Net deep learning models[J]. International journal on artificial intelligence tools,

2023, 32(5): 2360004.

【作者简介】

熊子言(2004—),男,广西玉林人,本科,研究方向:联邦学习。

蓝肖萍(2002—),女,广西河池人,本科,研究方向:联邦学习、车联网和无线携能通信。

葛丽娜(1969—),女,广西环江人,博士,教授、硕士生导师,研究方向:计算机网络与信息安全。

王哲(1991—),通信作者(email:designbyyili@163.com),男,河南南阳人,博士,副教授、硕士生导师,研究方向:计算机网络、携能通信与智能算法。

(收稿日期:2025-03-04 修回日期:2025-08-29)

内难以撼动，截至目前国家管网集团目前已构建起总里程 1.043×10^5 km的油气管道。管道运输凭借其低能耗、高连续性及低碳属性，已成为陆域及近海能源输送的绝对主导方式。

然而，由于管道运输的特殊性，生产运营中这一基础设施经常面临诸多挑战。一方面，全球服役超过30年的老旧管道占全部管道的35%以上，长期运行导致的材料疲劳与腐蚀有可能造成介质泄漏；另一方面，人为因素如蓄意破坏、打孔盗油、第三方施工等也会给管道运行安全带来极大威胁。此外诸如地震、暴雨洪水等极端自然灾害、复杂周边地形、极端地缘政治军事行动的破坏对管线周围生态环境造成不可估量的灾难性影响^[1-2]。从维护经济和生态环境的重要性和极端环境下管道周围环境勘探的角度出发，保证管道储运的平稳安全运行是确保能源安全的重中之重。

人工巡检与定期进行管线检测是目前主流的管道维护方式，但是从维护时间、成本以及精度等多个维度出发，当前人工巡检的方式已经逐渐不能适应日益增长的能源需求带来的安全运行压力。在此背景下，管道巡检技术的智能化转型已成为必然。得益于科技进步，无人机巡线技术正逐步发展起来，并以维护成本低、巡线效率高、检测精度高、数据维度多等特点变成当前管线巡检的新型手段。截至2023年，无人机巡检的渗透率已经达到32%以上，但自然环境可能造成的通信延迟、数据丢包现象，导致巡检任务经常需要重复执行。

1 无人机巡检技术现状与挑战

1.1 无人机巡线与无线通信技术

利用无人机自控技术，结合图像实时传输技术和图像识别手段进行隐患排查和管线监控，是目前无人机管道巡线的主要应用方向^[3]。数据传输系统的质量将直接影响地面数据站和无人机的双向通信，进而影响巡线和隐患排查的时效性和准确度。当前通信数据传输主要通过Wi-Fi传播、4G/5G和数传电台等方式实现无限传播。近距离的小范围巡线可通过Wi-Fi快速回传，一般面对长距离的长输管道则需通过4G/5G通信实现。此外4G/5G技术也基本满足数据回传的高速要求；数传电台技术则是为了应对复杂电磁环境下的电磁干扰，通过一系列数据加密和纠错技术保证数据的安全和隐私。

1.2 当前无人机在油气管道巡检中的问题与挑战

无人机虽然有维护成本低、巡线效率高、检测精度高、数据维度多等特点，但目前仍存在诸多影响无人机巡检的因素。虽然当前无人机的维护成本较人工巡检队的成本较低，但仍然需要考虑前期无人机大规模推广的成本，想要达成无人机在实际巡检中的稳定应用，还应考虑长期培养无人机操作及维修的相关体系和人员配置。

无人机长输管道沿线巡检作业一般会受到复杂地理环境、气候变化，以及农田山区等季节性人为因素影响。油气管道为避免对沿线经济造成负面影响，也为了避免出现如打孔盗油等现象，一般会建设在人烟稀少或人力难以轻易接触的地区，这些地区通常传统的4G/5G基站覆盖有限，从而可能造成一定的带宽瓶颈，进而影响无人机的图像回传功能。同时地理环境和气候环境的变化，如山区的植被遮挡等，也可能导致信号的多径效应。在实际应用中，应当充分考虑无人机的信号衰减与干扰。

当前常见的无人机巡线技术主要通过无人机遥感图像处理技术搭配地面控制系统来完成。无人机通过飞控系统按照导航系统和路标定点巡线，拍摄管线沿线的高清图像数据并通过无线通信系统及时准确输送至地面站。此过程中传感器的数据和高清回传视频对无人机通信技术的低延时性有严格要求，并且由于无人机可能携带多种模式的传感器数据，如红外、气体泄漏检测仪器等，可能额外增加无人机的载荷；大带宽通信模块（如5G）能耗较高，也会影响无人机的续航能力。

2 无人机通信技术优化方向

无人机巡检的通信技术优化可以从覆盖范围、信号干扰、实时性和能耗等方面，开展有针对性地改善。

2.1 多模态通信融合

卫星通信是利用人造卫星搭建的通信网络在地面接收站之间传输信息的技术，具有频带宽、容量大、适用于多种业务、覆盖能力强、性能稳定、不受地理条件限制、成本与通信距离无关等特点。目前国内已有部分站场接入卫星系统，为数据传输提供冗余方案。由于卫星与地面站距离较远，因此信号传输存在明显延时，在基站覆盖范围内4G/5G信号较好的区域，应优先使用基站信号传输。

卫星通信的设备成本较高，需要较长的部署和安装时间。5G模块除了成本问题，其额外的性能开销也可能导致续航和航载问题。LoRa（Long Range）是一种专为低功耗广域网（LPWAN）设计的无线通信技术，旨在实现长距离、低功耗的数据传输，非常适合物联网（IoT）应用。其覆盖范围可达2~5 km，郊区可达15 km。LoRa具有大网络容量、成本较低、支持加密等特点，其设备电池寿命可达数年，可长期部署于管线沿线。

当前，可以结合5G、卫星通信和低功耗广域网，构建动态切换的混合网络，如图2所示。除利用地面基站无线通信的方式，可进一步利用中继无人机作为“空中基站”拓展通信覆盖范围，作为无线通信的信号补强方案。

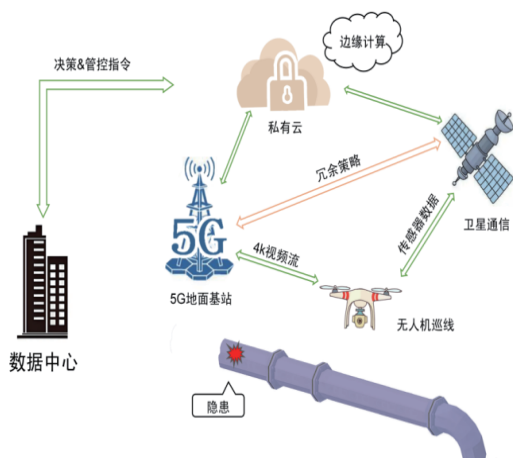


图2 无人机巡线通信技术示意图

2.2 回传数据预处理

无人机巡线作业中，图传系统需要将高清管线图像或视频实时回传至地面站，对于实时性有较高要求的情况，应考虑尽量压缩带宽以减缓数据上传的压力。由于管道巡线一般要求无人机按照指定路线前进，可在无人机端或地面站端部署边缘计算节点，缓存和分发静态视频或图像以降低服务器的负载，提前处理管线缺陷识别和图像的平滑降噪工作，从而减低传输数据量和传输延时。

针对无人机录制的管线视频可利用视频压缩技术，在相同分辨率和码率下有更小的文件写入来降低带宽需求。目前 H.265 编码格式可以较 H.264 节省约 40% 的存储空间。除 H.265 外，还可以利用硬件进行 AI 驱动的视频压缩算法，如 Nvidia AV1 编码，以降低带宽需求。

2.3 抗干扰与自适应技术

无人机在不同地区作业时可能受到电磁干扰，可以利用机器学习算法实时选择最优路段。在油气管道无人机巡检中，动态频谱分配（dynamic spectrum allocation, DSA）通过实时感知电磁环境并智能选择最优频段，可显著提升通信可靠性和抗干扰能力，其采用多台无人机共享频谱占用数据，提升检测精度^[4]。同时可采用跳频扩频（FHSS/DSSS）增强抗干扰能力，适用于无人机跨越工业复杂电磁环境^[5]。

2.4 天线与 MIMO 技术

智能波束成形技术利用相控阵天线动态调整波束方向，聚集信号能量至接收端，从而减少多径损耗^[6]。智能天线多输入多输出技术（multiple input multiple output, MIMO）和波束成形技术可提升信号定向传输效率，多无人机协作形成虚拟 MIMO 阵列，提升空间复用增益^[7]。

3 方案与应用实例研究

3.1 双模通信技术实现

当前可通过低轨卫星+5G 通信的方式实现无人机巡线全

球通信覆盖问题。系统上电后执行加电自检，核查 5G 基带芯片信噪比、卫星模块锁星仰角与双天线驻波比；通过自检后发起并行双链路注册，5G 链路通过 5G 用户永久性标识完整完成 AMF 鉴权，卫星获取临时链接 ID；5G 侧建立 PDU Session，卫星侧建立动态分配 IP 数据服务，建立服务后同步系统时钟；每 200 ms 执行一次链路质量检测，确保 5G 参考信号接收功率（RSRP）大于 -110 dBm、信干噪比（SINR）大于 10 dB，卫星每比特能量噪声密度比（Eb/N0）大于 6 dB、雨衰减量大于 3 dB；针对应用层采用 QUIC 协议将数据流分割为 1 kB 的 chunk，并添加双模标识头进行区分，物理层针对 5G 和卫星链路做差异化编码；当 5G 信号 RSRP 小于 -120 dBm 的时间持续 3 s 以上或卫星通信信号 Eb/N0 小于 4 dB 的时间持续 5 s 以上时，强制采取模式切换，当剩余电量小于 30% 时优先采取更低功耗链路，检测到兴趣点或高价值目标（如管道裂缝、原油泄漏）时启用双发模式，并在切换时对资源进行预分配（流程图如图 3 所示）。

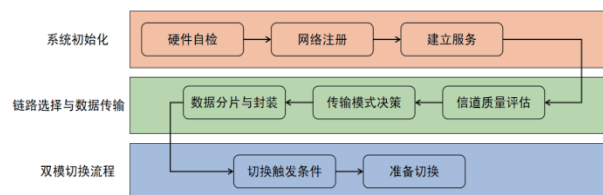


图3 5G+ 卫星通信双模切换流程图

在双模切换流程中，实行基于业务类型选择传输策略（如表 1 所示）。飞行控制指令优先级最高，元数据优先级最低。5G 和卫星技术互为补充，覆盖全域。

表 1 双模通信业务优先级

业务类型	优先级	首选链路	冗余策略
飞行控制指令	0	双发	先到有效
4K 视频流	1	5G/LTE/ 光纤通信	FEC+ 卫星补包
传感器数据	2	卫星	5G 突发传输
元数据	3	自适应	按带宽动态选择

3.2 无人机巡检案例分析

（1）应用案例一

某公司在西部某管道试验“5G+ 卫星”双模通信技术。该地区面临地形复杂、环境高危、人工巡检风险大、设备腐蚀性等挑战。该项目在智能化运维中采用了无人机巡检和双模通信技术，以提高管道安全监测效率和通信可靠性，成功将无人机巡检效率提升 40%，数据传输时延降低至 50ms 以下。这一案例是能源行业智能化转型的典型范例。

卫星备份采用亚太 6D 高通量卫星（HTS），单波束容量 1 Gbit/s，时延约 600 ms，覆盖全管线。在无人机端集成 5G 模组，在卫星终端内置相控阵天线。当无人机进入 5G 覆盖区时，优先使用 5G 传输高清视频，在无人区自动切换至

卫星，传输压缩后的关键数据。传输协议基于 QUIC 协议的多路径传输（MP-QUIC），切换时数据包丢失率 <0.1%。数据处理方面，在 5G 基站边缘计算端部署 YOLOv7 模型，实时识别管道表面缺陷，仅回传报警信息 + 坐标，减少卫星带宽占用 70%。

通过实时数据传输，无人机可动态调整巡检路径（如绕开沙尘暴区域），任务时间缩短 25%。双模通信支持多机协同，单日巡检里程从 50 km 提升至 70 km。对比传统 4G 方案（仅能回传 10% 数据），双模通信实现 100% 数据可用性，漏检率下降 60%。泄漏报警到达控制中心时间从 15 min 压缩至 2 min。按西部某管道年巡检成本 1.2 亿元计算，效率提升 40% 可节省 4 800 万元 / 年，同时大大降低泄漏事故风险。

在地面泵站、阀室等关键节点首先部署 5G 基站（Sub-6 GHz 频段），覆盖半径 3~5 km，峰值速率 1 Gbit/s。无人机采用长航时固定翼无人机与多旋翼无人机结合，搭载高分辨率光学相机、红外热成像仪、激光甲烷检测模块，并沿管道每 50~100 km 设置无人机起降基站。主模式采用管道敷设光纤通信，传输视频流、传感器网络状态等大带宽数据，备用模式采用 5G 专网 + 卫星通信模型保障重点区域和无人区的数据交换与应急回传。

该案例可以看出，“5G+ 卫星”双模通信在长距离能源基础设施巡检中具备显著优势。未来随着星间激光通信、NTN（非地面网络）等技术不断完善、成熟，无人机有望成为“空天地一体化”能源物联网的核心节点，进一步推动行业无人化、智能化进程。

(2) 应用案例二

NordStream 一期和二期天然气管道连接俄罗斯与德国，总长 1 224 km。该管线部署基于 LoRaWAN 协议的耐压传感器节点，截至 2023 年第一季度，有传感器节点 230 个，无人机增至 6 架。固定翼无人机携带 LoRaWAN 网关，在管道上方 100 m 高度巡航，接收海底传感器数据，通过卫星链路（铱星二代）回传至岸基控制中心。结合 AIS（船舶自动识别系统）数据，识别管道附近船舶活动，触发无人机重点巡查。对比传统方案（有人船巡检 + 光纤传输），运营成本降低 60%（年节省约 1 200 万欧元）。数据回传延迟从小时级降至 15 min 内，泄漏响应速度提升 80%。2022 年北溪管道爆炸事件后，该技术被纳入欧盟《Critical Infrastructure Resilience Directive》推荐方案，计划推广至其他海底电缆和管道项目。

3.3 双模通信技术研究进展和成果

在油气管道无人机巡检中，双终端通信技术的首要目标是解决复杂地形下的通信覆盖问题，其次是通信质量与可靠性问题。目前研究已取得显著进展：（1）双模通信终端体积和功耗优化，支持 5G 与卫星自动切换；（2）国内已有团队基于人工智能强化学习模型开发出动态链路选择模型，可通

过及时切换链路保障数据连续性；（3）突破 5G 频段（3.5 GHz）与卫星 Ku/Ka 频段协同抗干扰技术，通过双频段信号互补，在电磁复杂区域误码率降至 10⁻⁶ 以下。

4 未来趋势与建议

油气管道无人机巡检中的通信技术正经历快速演进，朝着低时延、高可靠性、大带宽、低成本的方向发展。多链路智能融合与动态切换将进一步提升鲁棒性与效率，通过人工智能深度赋能优化通信决策与资源分配，共同推动无人机巡检向更智能、更自主、覆盖更广、效率更高、安全性更强的方向发展，进一步突破低轨卫星成本、6G 技术落地及自主组网稳定性等瓶颈，以实现全自主、全天候的管道智能巡检体系。

当前针对无人机通信续航和功耗问题，应进一步标准化协议制定，统一多厂商设备通信接口，降低异构网络整合难度，开发低功耗通信芯片，减少性能损耗。针对不同应用场景定制采购高成本的问题，应推动建立运营商 - 卫星商 - 管道企业联合模式实验室，开放合作平台，共享通信基础设施完成相关生态建设。针对管道通信技术开拓研发可设置虚拟测试场，利用数字孪生技术模拟管道环境，预判通信瓶颈，以及在数字空间模拟暴雨、沙尘暴等极端场景通信表现，优化协议参数。强化数据加密与区块链技术，确保巡检数据不可篡改，保护企业安全与隐私。通过以上策略，可显著解决当前存在覆盖盲区、成本占比大等痛点，为油气管道的运营提供强大技术支撑。

参考文献：

[1] 王炜. 基于无人机技术在原油长输管道巡护中的探索 [J]. 信息系统工程, 2018, 12(20): 18.

[2] 王菱扬. 基于无人机的管线巡检方案 [J]. 数字通信世界, 2023(7): 86-88.

[3] 岳彬, 汪潇雨, 郭冬磊. 无人机输油管线巡检关键技术及应用 [J]. 石油库与加油站, 2021,30(1): 12-16.

[4] 邓国胜. 通信智能化系统的射频信号调度与功率管理技术 [J]. 江苏通信, 2025,41(1):48-51.

[5] 苏萌. 跳频扩频通信系统的仿真研究 [J]. 计算机与网络, 2024, 50 (4): 355-358.

[6] 严健. 5G 网络中的智能天线选择与波束成形技术探究 [J]. 通信与信息技术, 2024(5):5-8.

[7] 罗文翠. 无人机协作多输入多输出技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.

【作者简介】

唐经纶（1995—），男，山东平邑人，硕士，助理工程师，研究方向：通信与信息工程设计。

（收稿日期：2025-05-26 修回日期：2025-09-12）