

无人机在某海上油气输送管道巡检的研究和应用

陈文林（中海石油（中国）有限公司海南分公司，海南 海口 570312）

摘要：随着无人机技术的快速发展，固定翼无人机在海上平台长距离油气输送管道的巡检中发挥了重要作用。其具有成本低、隐蔽性强、可靠性高及操作简便等优势，尤其适合长距离管线的巡检任务。固定翼无人机能够对海上及陆地油气管道周边的施工作业、管线破损及漏油等情况进行高效的空中监控和取证，为巡检决策提供关键的视频和图像数据支持。本文提出了一种基于固定翼无人机的海上油气管道巡检方案，该方案已成功应用，并证明能够以更低的成本、更高的可靠性和更快的响应速度完成油气管道的巡检任务。

关键词：海上平台；油气管道巡检；无人机

海上油气生产平台开采的资源通常通过海底管道和陆地管道输送至陆岸终端进行处理。由于海上平台常常距离陆地较远，甚至超过 100 公里，传统的管道巡检主要依赖船舶和直升机。然而，这种方式费用高、效率低、难以快速部署，无法满足应急监测的需求。部分海底管道在登陆后还需经过陆地管段，这些管段有的长达上百公里，沿途环境复杂，进一步增加了巡检的难度。

配备固定翼无人机能够大幅提升作业人员在复杂环境下的高效监控和取证能力。通过双机接力，固定翼无人机可实现超长时间的滞空侦查，或者通过无人机漫游中继站延展巡检范围。其强劲的续航性能使得在任意地点的定点巡检成为可能。借助空中监控与地面监控系统的联动，无人机可以全天候实时记录事态发展，为地面指挥人员提供有力的决策依据。

固定翼无人机巡检还具有以下优势：首先，采用航空煤油动力的机型，续航能力显著提升，能够高效覆盖大范围区域；其次，搭载可见光和红外双光吊舱，具备昼夜监控能力；再次，针对气田管网巡检难度大、巡检点多、管线长的特点，无人机巡检显得尤为有效；最后，通过规划航线实现自动巡检，及时发现异常，极大提高了巡检自动化程度，既提升了效率和效果，又降低了成本和风险。

1 无人机巡检的要求和难点

在海上多平台及其相关海管及陆管的巡检作业中，主要任务包括：沿管线路由全程拍摄高清视频、发现并跟踪船舶、抓拍高清图片。当发现非法作业时，通过与海警飞控平台联动，快速处置，实现警企合作，保障安全生产。此外，还需要建立生产运行协同平台和工作环境，提升运营指挥的一体化水平，提高运营决策效率和应急处理能力。具体的巡检工作应包括以下基本功能：

按照飞控海图对海管路由进行日常巡检，完成水面区域的日常监视。应用光学设备监控管道及周边区域，及时发现异常情况。巡查重点包括海底管道路由是否有对管道安全运行造成威胁的作业（如挖泥、抛锚、拖锚、掏砂、炸鱼、拖网、海底爆破等），以及是否存在油气泄漏或新建建筑物。

每次巡检结束后，应及时处理和分析巡检结果，形成专业的无人机巡检报告，包括照片、视频、巡航轨迹记录、巡检目标和潜在安全隐患。

无人机应能持续对可疑船舶和陆地车辆进行悬停监视、实时跟拍和取证，尤其是在紧急情况如管道损坏、泄漏、溢油或非法入侵时。系统应具备智能识别功能，能自动拍摄并取证，将实时数据传送至相关部门，并确保在规定时间内可回溯数据。

尽管无人机巡检带来便利，但也面临诸多挑战。首先，海上平台往往距离陆地较远，巡检路线长，信号覆盖难度较大。传统固定翼无人机的信号覆盖范围通常不超过 50 公里，若要实现更远距离的通讯，需要提升起飞点天线高度或增加飞行高度。然而，飞行高度增加可能影响目标的影像清晰度，超出通讯范围后，无人机将进入盲飞模式，存在较大的安全隐患。其次，海上作业环境复杂，巡检空域风速大、气象不稳定，长距离飞行对无人机的飞行稳定性构成了巨大挑战。

2 无人机巡检研究内容

为实现无人机的远距离高质量巡检，需要研究无人机远距离通讯、AI 识别及 AR 叠加路网、抗 GPS 诱骗和干扰等主要功能。

2.1 机 - 机中继远程通信

无人机的信号很容易受到楼房、山区等障碍物的

阻挡，导致距离3~5公里可能就会丢失信号，无法覆盖更远距离。为了让信号传输距离更远，需要寻找更高的地点假设天线，但是寻找制高点费时费力，且有安全隐患，不易到达，操作性较低。并且在紧急情况下需要快速部署，无法在第一时间找到最高点。

经过研究，可采用中继无人机解决该问题。增加一台中继无人机在高空实现通信中继功能，中继无人机可通过选频等技术规避干扰，采用双天线收发等高技术提高系统可靠性和通信能力，实时将前方任务机回传的视频等信号回传至地面控制站，而任务机可低空完成巡检任务，能够更加清晰的观察被巡检目标。

2.2 AI 识别功能

无人机在海上和陆地巡航时，由于其覆盖范围广、飞行时间长，需要实现高效的自动目标识别算法以识别和报警异常目标。异常目标可能包括海上油气管道上方的船舶抛锚作业、陆地管道上方的土方挖掘等。此外，系统还需对管道附近的船舶或人员密集区域进行统计分析，以支持全面的监控和管理。

无人机的机载计算系统应具备实时处理能力，直接从吊舱获取影像数据，并在机载端完成目标检测与识别，无需依赖地面服务器进行数据处理。这种本地处理的方案不仅提高了实时响应速度，还减少了数据传输延迟。识别结果可叠加至实时视频中，并通过数据链路传回指挥中心，以便进一步确认和记录。

在目标检测中，基于监督学习的算法广泛应用于识别任务，如YOLO(You Only Look Once)和SSD(Single Shot MultiBox Detector)。这两种深度学习模型通过卷积神经网络 (CNN) 实现高效的目标检测。YOLO 以其端到端的训练和高速度著称，而 SSD 在处理不同尺度目标时表现优异。然而，这些方法在处理数据集不平衡的情况下（例如，异常样本稀少）存在挑战。

在面对异常样本稀少的情境时，传统的监督学习方法可能不足以应对。这种情况下，异常检测 (Anomaly Detection) 技术变得尤为重要。异常检测方法，如主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 和卷积自编码器 (Convolutional Autoencoder, ConvAE)，能够有效识别数据中的异常模式。PCA 通过降维提取数据的主要成分，并识别与主要成分偏离的异常样本；ConvAE 则通过重构误差来检测异常样本，其核心思想是将正常样本通过编码器压缩，再通过解码器重建，异常样本通常在重建过程中产生较大的误差，从而被识别。

AI 识别功能的提升依赖于对深度学习和异常检测技术的有效整合，结合本地处理能力和实时数据分析，能够显著提高无人机在复杂环境中的目标检测和异常警报能力。

2.3 AR 路径叠加显示

在无人机巡检过程中，在海上没有明显标志物，或遇到雾霾天气，无人机的天空视角可能无法有效辨识具体目标区域，从而对巡检任务造成影响，此外，当飞机拍摄到异常目标时，我们根据图像并不能判断这些异常目标的具体位置。

利用 AR 技术，可以解决无人机不会“认路”的问题，通过将地理信息导入到无人机中，可以利用这些地物信息进行导航，让无人机沿着管道位置飞行，从而避免偏离飞行方向。和 AI 识别功能配合使用，可以实现人员、动物等目标的自动检测与跟踪，道路、河流自动检测与分割，便于管理人员实时检测目标情况，及时做出合理决策。

3 无人机巡检在南海某油气田的应用

南海某油气田由三个中心平台和一个陆岸终端组成，共建设有两条海底管道分别将三个中心平台所产的天然气和凝析油输送到陆岸终端，管道总长度将近300公里，其中一条海底管道登陆海南岛后，还要经过约70公里的陆地管段才能到达陆岸终端，陆地管段沿途经过村庄、道路、市镇、农田，管道周边建设和经济活动频繁，管控难度较大，单靠人员巡检难以满足安全管理要求。通过采用无人机服务，实现对南海某油气田多个海上平台的海上和陆地长输管线的巡检工作。

3.1 无人机平台介绍

3.1.1 建设方案

建设的无人机系统由天空端、中继端、地面端、远程端四部分组成，将空中高稳定吊舱视频实时回传，单机可进行 200km 范围内的巡检，通过增加中继机，可将巡检范围扩展到 300km，实现对船舶、人、车辆等特定目标的自动识别检测、异常提示、锁定跟踪等功能。

3.1.2 无人机配置

建设方案采用油电混合垂直起降固定翼无人机，最大起飞重量 55kg，采用四旋翼与固定翼相结合的复合翼结构，可垂直起降。采用三冗余度安全的飞行控制自驾仪，稳定可靠。配备吊舱专属触控终端，综合性能优异。支持动平台起降，可满足海上移动船舶上

起降的要求。采用大展弦比机翼、高升力翼型、低风阻机身等高效气动设计，使得整机升阻比较高，结合高能量密度电池和优秀的重油动力系统，大大增加航时。得益于出色的结构设计和先进复合材料结构，结构重量低，最大可用有效任务载荷重量可达 10kg，兼容正射相机、倾斜相机、光电吊舱等多种载荷。

3.1.3 安全系统配置

安全系统专为复合翼无人机打造的三冗余度自动驾驶仪，采用三个高性能传感器，三个传感器独立工作，飞控收到各传感器的测量数据后，进行判断、筛选和融合。飞控具备自研抗 GNSS 干扰算法，在卫星导航被压制或被干扰时，可以准确判断并安全返航。同时内置差分双天线定向，避免强磁干扰。

3.1.4 智能设备

机载 AI 系统可以智能识别人、车等特定目标，支持多个目标的智能识别，预知目标和实时视频的 AR 叠加，可实时显示管道、村庄和建筑的名称等。同时平台还搭载了定位识别系统、智能防撞系统等，进一步保障飞行安全。无人机平台同时配备了大功率喊话器，和摄像头配合，可实现超远距离实时喊话，实时管理指挥现场情况。

3.2 实际飞行测试

3.2.1 飞行航线

任务机航线全程约 300km，按里程分为 A1~A11 飞行点位，飞行高度 300m。中继机航程约 150km，分为 B1~B5 航点，飞行高度约 1200m。首先中继机单独起飞，前出 70km 到达既定位置后盘旋，任务机进入既定空域后展开任务作业，沿海底和陆地管道飞行，利用 AR 叠加技术将管道线叠加至镜头画面中，观察作业海域和陆地有无特殊情况，在任务机到达 A6 点后盘旋海上平台观察。任务机执行完巡检任务后自动返航到机场，之后中继机自动返回。

3.2.2 飞行测试结果

本次测试过程基本完成设定任务，任务机及中继机配合完成了 300km 远距离不间断飞行，飞行过程中动力和燃油充足，通讯链路测试良好，能够实时将 AR 处理后图像传回地面控制站，对于巡检路线上的异常情况能做到智能报警，提醒操作人员及时采取措施，并可随时进入盘旋模式进行抵近观察，通过高功率喊话器对特定区域进行喊话警告，将进一步保证管线安全。飞抵平台附近时能够清晰观察到平台上和附近船舶的活动细节。中继机能够保持在 1200m 高度巡

航，很好的完成了通讯链路保障。

4 总结和提升

本文研究了固定翼无人机在海上油气输送管道巡检中的应用，提出了一种综合利用无人机技术的巡检方案。通过系统的设计和实际应用测试，验证了该方案在降低巡检成本、提高效率和可靠性方面的优势。具体而言包括三个方面：

4.1 技术优势

固定翼无人机具备长时间航行和大范围巡检的能力，相较于传统的船舶和直升机，其成本显著降低，操作更加灵活。无人机配备的双光吊舱实现了全天候监控，能够在昼夜和各种天气条件下有效执行巡检任务。

4.2 系统设计

通过引入中继无人机和 AR 技术，解决了海上长距离巡检中的信号覆盖问题和视角定位难题。中继无人机提高了信号传输的稳定性，AR 技术增强了目标识别的准确性和导航的可靠性。

4.3 应用效果

在南海某油气田的实际应用中，无人机系统成功实现了对 300km 长输管线的巡检任务，数据传输稳定，异常情况响应及时。飞行测试证明了任务机与中继机的协作模式在长距离巡检中的有效性，显著提升了巡检效率和数据准确性。

经过现有的研究和应用取得了显著成果，但无人机在海上油气管道巡检中的应用仍面临许多挑战和发展空间。未来的工作可以从以下几个方面进行进一步探索和优化，在智能识别方面，需要进一步提高 AI 识别算法的精度和鲁棒性，特别是在复杂环境下的目标检测和异常识别能力。可以考虑引入更先进的深度学习模型，来提升检测和分类的性能。在通信技术方面，要继续增强无人机的通信能力，探索利用卫星通信等新兴技术来克服传统通信链路的限制。研究更加高效的中继网络结构，以提高远程通信的稳定性和数据传输速度。通过以上研究和优化方向的探索，无人机在海上油气管道巡检中的应用将更加成熟，技术水平和实际效果将不断提升，为油气行业的安全管理和运营优化提供更有力的支持。

作者简介：

陈文林（1983-），男，民族：汉；籍贯：广东阳江；学历本科，工程师，从事海洋石油天然气开采工作。