

无人飞行器在油气输送管道监测系统的应用进展与展望

王日俊¹, 白越², 曾志强¹, 段能全¹, 党长营¹, 杜文华¹, 王俊元¹

(1. 中北大学机械工程学院, 太原 030051; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:油气输送管道是现今能源输送的重要工具之一,对油气输送管道的监测是保证其安全输送、预防和降低生态环境破坏的重要环节。无人飞行器在监测领域的应用具有很强的灵活性和适应性,具备了在小到大型空间尺度上获得有价值监测数据的能力,使其正在成为现有油气输送管道监测系统的有力补充。在回顾油气输送管道监测系统发展历程的基础上,通过对现有基于无人飞行器油气输送管道监测应用案例的深入分析,讨论其得以应用的优势与局限性。对无人飞行器监测系统应用配置需考虑的主要因素给出建议,并提出三种无人飞行器用于油气输送管道监测的可行方案,最后对无人飞行器在油气输送管道监测系统的未来应用前景进行展望。

关键词:无人飞行器;油气管道;泄漏监测;应用现状

中图分类号:TE832 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2018)06-0112-07

作为一种最安全的石油或天然气运输方式,油气输送管道不断扩张,管道输送日油量不断增加。油气输送管道已在世界范围内形成一个超过300万公里的全球化输送网络^[1-2]。整个全球化输送网络由不同长度的分管道组成,有的长达数千公里,比如哈萨克斯坦—中国原油管道就长达3088公里^[3]。由于油气输送管道的腐蚀老化、地理变化、气候环境以及人为破坏等原因,破损或泄漏事故时有发生^[4]。在管道破裂后,大量的石油和天然气发生泄漏,造成巨大的经济损失。世界范围内,许多国家的油气管道发生了不同类型的灾难性事故。例如,2010年,由于腐蚀和老化的原因,导致一条大型的输油管道(直径>1米)破裂,将超过3000立方米的重质原油泄漏到美国密歇根的Kalamazoo河,数百名密歇根州居民遭受与石油有毒暴露有关的健康影响,清理费用约8亿美元,这使这次事故成为美国历史上最昂贵的岸上泄漏事件。更重要的是,会对周边环境造成破坏与污染,严重影响生态健康和人类安全,比如,2004年,比利时的Ghislenghien,直径1米的地下高压天然气主管道发生爆炸,造成24人死亡,132人受伤。油气的泄漏将对周边植被^[5-6],空气和海水^[7-8]以及野生动物^[9]等造成长期破坏。比灾难性事故发生更为频繁

的小事故或故障,同样可能造成重大的经济损失和环境污染。例如,根据加拿大艾伯塔省的能源资源保护委员会(Energy Resources Conservation Board, ER-CB)的数据,在2011年和2012年,平均每年每1000公里发生故障或事故的管道数量为1.5个。在欧洲,输油管道平均每年每1000公里发生故障或事故的管道数量为0.23个,天然气输送管道则是0.33个^[10]。此外,在过去的几年里,油气输送管道网络的盗窃事件都在增加,已成为泄漏事故最重要的原因之一。油气输送管道网络,通常被安装在偏远地区等难以监控和保护的地域。一旦发生故障或事故,可能会造成巨大的经济损失和生态破坏,甚至会导致国际石油市场中断引起全球能源危机。因此,对油气全球化输送管道网络进行有效监测与维护显得至关重要^[11-12]。定期为管道结构和功能特性提供参数化的监测系统有助于及时发现问题,并进行维护和维修工作,防止事故的发生及其对植被和野生动物的影响^[13]。

1 油气输送管道监测系统的发展

对油气输送管道的监测任务主要是定期评估管道的实时状态和功能,记录事故及其对环境的危害,旨在最大程度地降低发生泄漏等事故的风险。与其

收稿日期:2018-03-27

基金项目:国家自然科学基金项目(11372309);中北大学自然科学基金资助项目(XJJ2016006)。

作者简介:王日俊(1982—),男,山西阳高人,中北大学机械工程学院,讲师,博士,研究方向:无人飞行器故障诊断、载荷稳像技术与应用等。

他基础设施的监测不同的就是此类监测系统必须及早发现泄漏,以防止事故进一步恶化。目前,大多数监测系统主要是通过使用载人轻型飞机或直升机进行定期巡检和空中监视^[14-15],但成本非常高。而且只有发生泄漏或环境已经遭到破坏时,才可能被检测到,难以尽早地监测发现事故。于是,基于分布式传感器网络的实时监测系统应用而生,它通过线缆或无线网络将数据实时发送到监测中心。例如测量实时流量,用于检测泄漏,或通过温度或噪声测量来识别管道壁厚的变化^[16]。但是,传感器网络中的任何一个节点都较易受损,导致得到的监测信息不完整或不准确^[17]。而且传感器网络的可靠性、标准化、功耗、数据的完整性以及传感器节点的安全等问题,仍然存在着很大的挑战,特别是在蓄意破坏较为严重的区域^[18],或长途管道^[19]。由于石油等碳氢化合物的光谱特征非常显著,这为使用高分辨率遥感图像处理技术在油气监测方面的应用提供了基础。例如,星载雷达遥感数据(例如,ERS、RADARAST-1、ENVISAT)和光学图像已用于探测海洋环境中的石油泄漏^[20-21]。差分干涉合成孔径雷达(Differential interferometric synthetic aperture radar, DInSAR)技术具有识别毫米级地面变形和地面沉降的能力^[22-23],可用于监测输送管道周边的地理环境变化。

迄今为止,没有一个监测系统或传感器网络能够提供泄漏应急计划所需的所有信息^[24]。而在2010年5月发生的墨西哥湾深水地平线BP的石油泄漏事件中,将传统机载监测方法和卫星遥感技术相结合,能够准确监测到泄漏的位置、污染程度以及泄漏随时间的变化情况。于是,许多使用卫星遥感图像的监测项目(例如PRESENSE, PIPEMOD和GMOSS)已投资研发,以达到管道运营商所要求的监测需求,但迄今尚未取得令人满意的结论。遥感图像处理技术的迅速发展为其在油气输送管道监测系统的应用提供了技术支撑,然而,执行监测任务的卫星遥感图像在空间和时间数据分辨率的配置上仍然不足以监测油气输送管道。传统的载人机载监测方法能够提供一定补充,但是除了昂贵的载人飞机、有限的飞行频率和飞行时间之外,会被迫飞向非常靠近事故现场的上空,无疑对飞行员的人身安全构成威胁,带来了隐形的安全问题。无人飞行器系统(Unmanned aerial systems, UAS)的成本低、环境适应性强,具有自主巡航飞行和自主起降能力等优点,在监测领域的应用研究逐步得到公众的关注与重视^[25-26]。它具备了在小到大型空间尺度上获得有价值监测数据的能力,使其正在成为现有油气输送

管道监测系统的有力补充。

2 无人飞行器在油气输送管道监测系统的应用现状

迄今为止,正在使用或开发中的油气输送管道监测系统都是基于高空飞行的大型无人飞行平台,这些系统都是非常昂贵和复杂的,而且其中很多都是军事级别的。作为无人飞行平台技术的一部分,小型飞行平台和传感器的快速发展为油气输送管道监控任务提供了一个有力的补充,逐渐显现出巨大的开发与应用潜力。表1总结了现有管道监测系统的应用案例,并指出了多种案例场景。值得注意的是,在每种案例下都有不同的监控目标,以及与其对应的适当策略和飞行平台与传感器的相应组合配置。

表1 无人飞行器的油气输送管道监测应用案例

应用案例	具体内容
美国阿拉斯加的 Prudhoe Bay 油田地区监测系统	需求:检查油气输送管道基础设施与易受洪水侵蚀的区域。 任务:油气区域的监测 技术:利用 Prudhoe Bay 油田道路与输送管道的 3D 地图 飞行平台:PumaTM AE 无人飞行器 机载传感器:LiDAR、可见光与红外摄影机
美国阿拉斯加西北部的 Chuckchi 海海底钻孔开采石油勘测	需求:为符合环境和安全 的相关规定,在海底钻孔开采石油前的环境监测。 任务:对北极的海洋哺乳动物和冰川区进行观测。 技术:从 Westward Wind 研究船上发射,由操作人员在船上进行飞行控制,发送实时视频和遥测数据到研究船上的地面控制系统。 飞行平台:ScanEagle®X200 无人飞行器 机载传感器:可见光与红外摄影机
安哥拉海上油田的监测系统	需求:海上油田安全监测与维护 任务:安哥拉海上油田监测 技术:差热成像技术、地下探测技术 飞行平台:Aerostar®无人飞行器 机载传感器:红外摄影机
阿拉斯加的油气输送管道检测系统	需求:位于阿拉斯加的油气输送管道的泄漏检测与泄漏变化状态监控 任务:油气输送管道监测 技术:在管道顶部和侧部的近距离观测;热利用热图像来探测管道的泄漏点区域;通过重复飞行检测泄漏变化状态。 飞行平台:Aeryon Scout®无人飞行器 机载传感器:高分辨率可见光与红外摄影机

2014 年 6 月,英国石油公司(British Petroleum, BP)和美国 AeroVironment 公司签署了对位于美国阿拉斯加的普鲁德霍湾(Prudhoe Bay)油田地区进行监测的协议,这是美国首例大规模的政府批准的无人飞行器的商业应用案例(表 1 中的案例 1)。AeroVironment 公司的无人飞行器通过可见光与红外摄影测量、LiDAR 数据采集和分析来监测普拉德霍湾的油气输送基础设施,包括约 300 公里的砾石公路,约 1 900 公里的输送管道。使用的是手抛发射的无人飞行器“Puma™ AE”,如图 1 所示。该飞行平台采用锂离子聚合物电池,翼展 2.8 m,重量 6.1 kg,飞行时间达到 3.5 h。具备了防水功能,能够实现距离地面 120~150 m 的低空飞行,飞行速度小于 40 海里,最大航程为 20 公里。这种无人飞行器监测系统的配置可提供高度精确的位置信息,实现普拉德霍湾油田的监测与管理。



图 1 AeroVironment 公司的 Puma™ AE 无人飞行器

2014 年 9 月 24 日,美国的 ConocoPhillips 石油公司宣布已经完成了在阿拉斯加西北部的查克奇海的商业无人飞行器飞行任务(表 1 中的案例 2)。其目的是在海底钻孔开采石油之前,为了符合环境和安全的相关规定,对北极的海洋哺乳动物和冰川区进行勘查。执行飞行任务的无人飞行器是波音公司的 ScanEagle®X200,如图 2 所示。该飞行器搭载有可见光和红外摄像机,它是在 Fairweather 的 Westward Wind 研究船为期一周的航行中发射的。该飞行平台采用燃油/汽油发动机,翼展 3.1 m,重量约 18 kg,飞行时间长达 24 小时,最大有效载荷为 3.4 kg,且具备防水功能。值得强调的是,Puma™ AE 和 ScanEagle®X200 是美国联邦航空管理局(US Federal Aviation Administration, FAA)批准用于商业应用的前两款无人飞行器。它们都获得了限制型号合格证,使北极地区的某些部门能够应用这两款无人飞行器在低于 600 m 的高空,每天 24 小时进行研究和商业用途。该认证预计将是由美国国会批准的开放无人飞行器进行商业用途的先兆。

表 1 中的案例 3 是以色列的 Aeronautics 公司运



图 2 Boeing Insitu 的 ScanEagle®X200 无人飞行器

用搭载有红外摄像机的 Aerostar®飞行平台进行安哥拉海上油田的监测。Aerostar®是一个燃料动力型平台,最大起飞重量 230 kg,可在 250 km 范围内飞行,最大有效载荷 50 kg。Aerostar 是非常适合执行监控飞行任务,具有 12 小时的飞行时间和缓慢的飞行速度,具备自主巡航能力,使其能够在整个夜晚从空中彻底监测每个油田钻机。此外,Aerostar®还可通过反复测量同一区域并应用差热成像来检测地下油气输送管道中的泄漏。



图 3 Aeronautics 公司的 Aerostar®飞行平台

在不同的任务中,英国石油公司采用搭载高分辨率视觉和红外摄像机的 Aeryon Scout®无人飞行器来监测位于阿拉斯加的油气输送管道潜在的泄漏危险。如表 1 中的案例 4 所示。Aeryon Scout®是加拿大 Aeryon Labs Inc. 研制的一款小型电池供电的四轴飞行器,重量 1.4 kg,如图 4 所示。它最大的特点是在长达 25 分钟的飞行时间内在管道附近飞行和悬停,这对管道的顶部和侧面进行飞行高度低于 150 米的近地面观测显得非常实用。此外,还可以搭载热传感器利用热图像来探测管道的热点区域。

与其他技术一样,使用小型无人飞行器用于监测油气输送管道基础设施既有优势也有其局限性,如表 2 所示。相对于其他监测手段,小型无人飞行器的优点是监视任务的成本更低,操作安全性更高,任务灵活性更强。此外,传统的载人飞行平台受到风、云和其他气候因素的限制,小型无人飞行器的飞行高度通常低于 150 米,受气候因素影响降低,同时得到的是高分辨率图像信息。而且某些无人飞行器能够在极



图4 加拿大 Aeryon Labs Inc. 的 Aeryon Scout®无人飞行器

端天气条件下飞行,这在风暴、北极或沙漠气候中执行任务的载人飞行平台提供了安全的替代方案。

表2 基于无人飞行器的油气输送管道监测系统的优势与局限性

优势	局限性
操作安全性高	飞行应用领域的限制
高分辨率的图像与数据	飞行区域的限制
受天气条件影响小	操作人员专业知识缺乏
任务灵活性强	机载传感器在体积、重量等方面的限制
可接近危险区域监测	缺乏统一的监测标准
低成本	缺乏感知与避障能力
节能环保	尚未成熟的图像分析技术

搭载于无人飞行器上传感器类型决定了其在执行任务过程中获取的信息。随着传感器的小型化和电池的相关技术的发展,可用于小型无人飞行平台的传感器范围一直在不断增加,文献[27]中总结了传感器技术在小型无人飞行器监测系统中的应用现状。但传感器受尺寸,重量等相关因素的限制仍然存在[28]。因此,选择无人飞行平台和传感器的组合获得必要的数据来监测油气输送管道仍然是一个难题。而对一些相对成熟的油气泄漏监测技术,仍然没有适合无人飞行平台的传感器(如激光荧光雷达 Laser Fluorosensor 等)。

使用小型无人飞行器的另一限制在于并未通过法规的制定来实现独立的空域划分[29]。这一局限性与安全性有关,因为无人飞行器没有感知和躲避其他飞行器的能力。解决这一问题的关键是制定具体的空中交通管理程序,完善民用无人驾驶航空器监管体系。其他方面还有待解决的问题包括数据保护和侵犯隐私权的问题。为此,大量针对无人飞行器感知和躲避其他飞行器的相关研究工作正在进行[30-31],并且各国也在努力尝试制定明确的法规[32]。在技术方面,无人飞行器用于监测油气输送管道基础设施也有一些限制,如专业知识的需求,标准的缺乏和尚未成

熟的相关图像分析技术[33-34]。为了克服技术上局限性,大量的技术研究工作也在迅速开展。

3 无人飞行器在油气输送管道监测系统的应用展望

无人飞行器监测系统正在成为现有油气输送监测系统的有力补充,来保证其输送安全、确保相关生产的连续性。无人飞行平台可以使用多种不同配置获取监测任务所需的图像数据信息,进而满足监测任务的需求。典型的监测任务是对油气输送管道本身的监测、油气泄漏的位置以及泄漏对环境(植被或土壤)的影响的确定。例如,由于油气泄漏导致地面管道的颜色发生改变,则可以利用获取的图像或视频进行图像解译,并应用图像处理技术来提取有用信息。该方法同样可以分析污染源及污染对周边环境的影响,例如,土壤的热特性变化、植被的树冠颜色等。此外,根据飞行平台的类型,可以利用其悬停能力对管道局部进行近距离检测,利用其自主飞行能力对管道路线进行重复性检测。随着小型无人飞行器的有效载荷能力的增加,还可以搭载各种传感器进行监测,从而为整个监控任务提供补充信息。

3.1 系统配置影响因素

基于无人飞行器的油气输送管道系统的配置取决于很多因素。其中,最重要的因素包括完成监测任务所需的信息类型,如管道基础设施的视觉信息、管道周边环境的物理参数信息(温度、植被冠层颜色等)等。其次是管道周边的地形条件,如地形的可达性、地形的复杂性等。再次是到达被检测管道的飞行距离等,这些都会对无人飞行平台的选择产生影响。此外,还需考虑为执行某项特定监测任务的系统最优飞行平台与传感器配置组件的兼容性、有效载荷的承载能力、图像数据处理以及当地的无人飞行器飞行应用的相关法规等。

3.2 油气输送管道监测方案

综上所述,根据油气输送管道的监测需求和现有的无人飞行器技术,本文提出以下3种能够对整个监测系统进行补充的监测方案,如图5所示。这些监测方案基本代表了无人飞行器系统在执行油气输送管道监测任务时的典型应用场景。

方案1:油气输送管道的近距离监测

为了对管道进行近距离或某些具体位置的详细检测,需要进行短距离的飞行,小型低空无人飞行器是最适合的平台类型。这种方案非常适合对易发事故位置进行监测,比如管道连接端等。由于监测任务的重点是在距离地面约5~10 m的高度上对管道进

行检测,因此要求飞行高度要尽量低(<50 米)。在这种应用场景下,选用具有高机动性能的微型多旋翼无人飞行器作为飞行平台,如 DJI Phantom 3, Aibotix Aibot X6 等。搭载高分辨率摄像机,如 Photonis Nocturn U3, GoPro Hero4 等。通过实时传输的图像或视频对可能存在损坏的管道进行视觉识别。

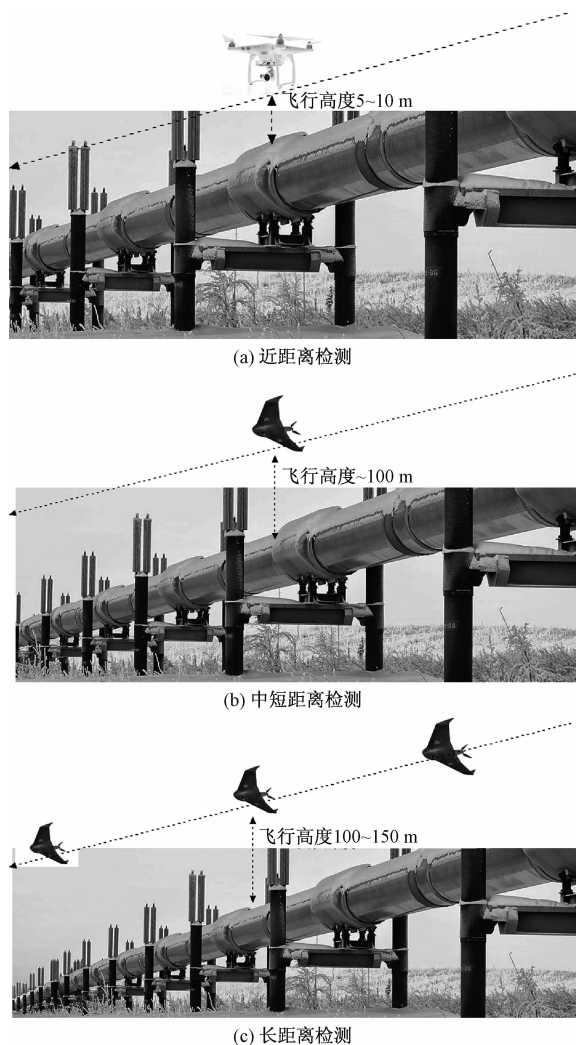


图 5 油气输送管道监测方案

方案 2: 油气输送管道的中短距离监测

对管道进行中短距离监测是一个周期性重复的监测任务,适合的飞行高度大约在 100 m 左右,具有自主巡航飞行能力的低空无人飞行器是最适合的平台类型。这种方案非常适合对油气泄漏事故的位置进行监测。在这种应用场景下,选用具有一定续航能力的固定翼无人飞行器作为飞行平台,搭载可见光和红外摄像机,实时获取图像数据并加以记录。通过将当前记录的图像数据与之前或之后获取的图像数据对比分析,实现管道泄漏的监控。同时,记录的图像数据也为开发泄漏自动检测算法提供相关数据信息。

由于通过图像数据的对比来分析泄漏前后管道周边环境的变化,这种方案还可用于监控油气泄漏对周边环境的影响。为了加强监测的力度,可选用小型旋翼式无人飞行器 Camcopter S-100 作为辅助,在保持高灵活性的同时搭载更多的传感器,如激光雷达或雷达,通过 DInSAR 技术进行管道附近的地面沉降监测。

方案 3: 油气输送管道的长距离监测

实现对管道进行长达数百公里的长距离监测是 3 种应用场景中最为困难的。利用现有的无人飞行器技术,这种应用场景下,可以选用由在管制空域的大型无人飞行平台完成监测任务。但是,最大的困难在于执行任务时,必须要有一个单独的空中交通管理环境。由于大型无人飞行器在 1 km 以上的高空飞行,所以需要搭载雷达传感器,同时还要搭载一个光学/红外传感器系统对管道进行监测,这就需要相应的载荷承受能力。此外,雷达数据需要专用的处理软件,图像处理和特征提取要比上述 2 中应用场景更为复杂。

显然,对油气输送管道的长距离监测已经超出了现有单个小型无人飞行平台的能力之外。但在不久的将来,我们可以设想通过一群小型无人飞行器以一种中继系统的形式共同来执行这一监测任务。为此,相关技术亟待进一步发展,如飞行器自主充电能力、充电基站的设置、恶劣天气条件下自主返航能力等。目前,文献[35]已经完成了一定的研究工作,并通过小型无人飞行器集群飞行进行了初步测试,试验结果表明单个无人飞行器能在相互通信的同时,收集和使用数据来共同完成一个任务。一旦技术成熟,集群作业的小型无人飞行器预计在救援行动中特别有用^[36]。

4 总结

全球范围内的石油和天然气输送管道已经构成了一个巨大的网络系统,用于安全运输越来越多的石油和天然气。输送管道的老化、环境的变化以及人为破坏等原因造成的事故危及基础设施和环境的安全,因此,油气输送管道需要持续的监控与维护。传统的基于人工巡检和直升机的监测系统可以通过小型无人飞行器来加以补充,特别是在偏远地区。它能够弥补传统监测方案中的信息缺失,并满足用户定制的需求。

监测油气输送管道是无人飞行器技术的潜在应用之一。尽管还没有完全成熟的小型无人飞行器系统来承担油气输送管道基础设施的整个监测过程,但基于无人飞行器技术监测系统有能力来补充甚至替

代传统的监测系统。通过一系列不同的飞行监测平台设计,小型无人飞行器系统正在演变为对管道基础设施进行密切检查和对环境进行重复监视的高效工具。随着用于探测、描述和跟踪油气泄漏的特定传感器的微型化,对无人飞行器相关技术的改进,预计在不久的将来无人飞行器将在油气输送管道的检查、监控和维护中发挥重要作用。

参考文献

- [1] 祝恣智,吴超,李秋扬,等. 全球油气管道发展现状及未来趋势[J]. 油气储运,2017,36(4):375—380.
- [2] 严琳,赵云峰,孙鹏,等. 全球油气管道分布现状及发展趋势[J]. 油气储运,2017,36(5):481—486.
- [3] 何昭,吴艳蕊. 我国四大跨国油气管道[J]. 地理教育,2014(6):62—62.
- [4] ELABBASY M S,SENOUCI A,ZAYED T,et al. A condition assessment model for oil and gas pipelines using integrated simulation and analytic network process[J]. Structure & Infrastructure Engineering,2015,11(3):263—281.
- [5] LIN Q,MENDELSSOHN I A. A comparative investigation of the effects of south Louisiana crude oil on the vegetation of fresh, brackish and salt marshes[J]. Marine Pollution Bulletin,1996,32(2):202—209.
- [6] MISHRA D R,CHO H J,GHOSH S,et al. Post-spill state of the marsh:remote estimation of the ecological impact of the Gulf of Mexico oil spill on Louisiana Salt Marshes[J]. Remote Sensing of Environment,2012,118(6):176—185.
- [7] BENNETT P C,SIEGEL D E,BAEDECKER M J,et al. Crude oil in a shallow sand and gravel aquifer—I. Hydrogeology and inorganic geochemistry[J]. Applied Geochemistry,1993,8(6):529—549.
- [8] HEGAZY M N,EFFAT H A. Monitoring some environmental impacts of oil industry on coastal zone using different remotely sensed data[J]. Egyptian Journal of Remote Sensing & Space Science,2010,13(1):63—74.
- [9] HEINTZ R A,RICE S D,WERTHEIMER A C,et al. Delayed effects on growth and marine survival of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* after exposure to crude oil during embryonic development[J]. Marine Ecology Progress,2000,208(1):205—216.
- [10] GAS PIPELINE INCIDENTS. 9th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970—2013)[EB/OL]. <http://www.egig.eu/uploads/bestanden/ba6dfd62-4044-4a4d-933c-07bf56b82383>, 2017—08—22.
- [11] ALAWODE A J,OGUNLEYE I O. Maintenance, security, and environmental implications of pipeline damage and ruptures in the Niger Delta region[J]. Pacific Journal of Science and Technology,2011,12(1): 565—573.
- [12] SAHIN S,KURUM E. Landscape scale ecological monitoring as part of an EIA of major construction activities, experience at the Turkish section of the BTC crude oil pipeline project[J]. Environmental Monitoring & Assessment,2009(1—4):525.
- [13] INAUDI D,GLISIC B. Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing[J]. Journal of Pressure Vessel Technology,2010,132(1):763—772.
- [14] 王钟强. 无处不在的直升机—国外民用直升机应用实例[C]// 2007 中国通用航空大会,2008:148—162.
- [15] MURVAY P S,SILEA I. A survey on gas leak detection and localization techniques[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2012,25(6):966—973.
- [16] KHALID E D,KHAN F,AHMED M H. Reliability modeling of wireless sensor network for oil and gas pipelines monitoring[J]. Sensors & Transducers,2009(7):6—26.
- [17] WAN J,YU Y,WU Y,et al. Hierarchical leak detection and localization method in natural gas pipeline monitoring sensor networks[J]. Sensors,2012,12(1):189.
- [18] OBODOEZE F C,INYIAMA H C,IDIGO V E. Wireless sensor network in Niger Delta oil and gas field monitoring: the security challenges and countermeasures [J]. International Journal of Distributed & Parallel Systems,2012,3(6):65—77.
- [19] ALMAZYAD A S,SEDDIQ Y M,ALOTAIBI A M,et al. A proposed scalable design and simulation of wireless sensor network-based long-distance water pipeline leakage monitoring system[J]. Sensors,2014,14(2):3557—3577.
- [20] 张永志,吴旦,钱贵平,等. 卫星遥感信息应用研究[J]. 计算机与数字工程,2010,38(5):57—59.
- [21] BREKKE C,SOLBERG A H S. Oil spill detection by satellite remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment,2005,95(1):1—13.
- [22] 张洁,胡光道. 基于合成孔径雷达干涉测量技术的地面沉降研究综述[J]. 地质科技情报,2005,24(3):104—108.
- [23] 毛建旭,王耀南,夏耶. 合成孔径雷达干涉成像技术及其应用[J]. 系统工程与电子技术,2003,25(1):7—10.
- [24] JHA M N,LEVY J,GAO Y. Advances in remote sensing for oil spill disaster management: state-of-the-art sensors technology for oil spill surveillance[J]. Sensors,2008,8(1):236—255.
- [25] PAJARES G. Overview and current status of remote sensing applications based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,2015,81(4):281—329.
- [26] 黄泽满,刘勇,周星,等. 民用无人机应用发展概述[J]. 赤峰学院学报:自然科学版,2014(24):30—32.
- [27] GÓMEZ C,GREEN D. Small-scale airborne platforms for oil and gas pipeline monitoring and mapping[R]. Aberdeen: University of Aberdeen,2015.
- [28] ALLEN G,J GALLAGHER M,HOLLINGSWORTH P,et al. Feasibility of aerial measurements of methane emissions from landfills [R]. Report-SC130034/R, Bristol, United Kingdom,2014.

- [29] SKRYPIETZ T. Unmanned aircraft systems for civilian operations[EB/OL]. http://www.bigs-potsdam.de/images/Policy%20Paper/BIGS_PolicyPaper-No_1_Civil-Use-of-UAS_Bildschirmversion_sec.pdf.
- [30] GÖKCE F, ÜCOLUK G, AHIN E, et al. Vision-based detection and distance estimation of micro unmanned aerial vehicles[J]. *Sensors*, 2015, 15(9): 23805—23846.
- [31] YU X, ZHANG Y. Sense and avoid technologies with applications to unmanned aircraft systems: review and prospects[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2015, 74: 152—166.
- [32] MCFADYEN A, MEJIAS L. A survey of autonomous vision-based See and Avoid for Unmanned Aircraft Systems[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2016, 80: 1—17.
- [33] KELCEY J, LUCIEER A. Sensor correction of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(5): 1462—1493.
- [34] LALIBERTE A S, GOFORTH M A, STEELE C M, et al. Multispectral remote sensing from unmanned aircraft: image processing workflows and applications for rangeland environments[J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(11): 2529—2551.
- [35] BÜRKLE A, SEGOR F, KOLLMANN M. Towards autonomous micro UAV swarms[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2011, 61(1—4): 339—353.
- [36] QI J, SONG D, SHANG H, et al. Search and rescue rotary-wing UAV and its application to the Lushan ms 7.0 earthquake[J]. *Journal of Field Robotics*, 2016, 33(3): 290—321.

Analysis on Applications of Unmanned Aerial Vehicle in Monitoring System of Oil and Gas Transmission Pipelines

WANG Ri-jun¹, BAI Yue², ZENG Zhi-qiang¹,

DUAN Neng-quan¹, DANG Chang-ying¹, DU Wen-hua¹, WANG Jun-yuan¹

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: The oil and gas pipeline is one of the important tools of energy transportation, the monitoring of oil and gas pipeline is an important link to ensure its safe transportation and ensure the continuity of related production. In the monitoring field, unmanned aerial vehicles (UAV) has very strong flexibility and adaptability, and has the ability to obtain the value of monitoring data at small to large scales. Thus, the monitoring system based on UAV has become to be a strong complement to the existing monitoring system of oil and gas pipelines. In this paper, the development process of oil and gas transmission pipeline monitoring system is reviewed. Through in-depth analysis of the existing monitoring cases of unmanned aerial vehicle in monitoring system of oil and gas pipeline transmission, the advantages and limitations of its application are pointed out. The main factors that should be considered in the application configuration of monitoring system based on UAV are put forward, three feasible scheme for UAV for oil and gas pipeline monitoring are discussed. Finally, the future application prospect of unmanned aerial vehicle monitoring system in oil and gas pipeline is prospected.

Key words: unmanned aerial vehicles; oil and gas pipeline; leakage detection; application status