

引文: 马英涵, 赵弘. 基于知识图谱的无人机管道检测研究现状与创新分析[J]. 油气储运, 2024, 43(9): 973-984, 994.

MA Yinghan, ZHAO Hong. Research review and innovative analysis of UAV pipeline inspection based on knowledge graphs[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(9): 973-984, 994.

基于知识图谱的无人机管道检测研究现状与创新分析

马英涵 赵弘

中国石油大学(北京)机械与储运工程学院·机电北京市重点学科实验室·高端油气装备智能设计与制造研究中心

摘要:【目的】在能源领域,管道检测及监测可以及早发现和解决能源管道输送中出现的问题,确保管道系统的安全运行和可持续发展。由于传统管道检测在精度、效率、安全性等方面仍存在局限,研究无人机管道检测技术具有重要的现实意义和广阔的发展前景。【方法】结合行业标准以及无人机技术发展现状,使用 CiteSpace 文献分析软件,对相关文献的发表时间、关键词共现、聚类、频次、时间线图、作者等多维度进行知识图谱分析,在此基础上追踪溯源热点会议与期刊,分析相关领域实验室与学者之间的关联,对无人机的特点进行分析,提出无人机在管道巡检上的应用策略,并对中国无人机管道检测发展的趋势进行预测及创新性分析。【结果】无人机管道检测相关领域是无人机的一个应用场景,为新兴领域,从 2015 年后逐渐成为热点研究方向,且部分科技公司已经在实际油田中使用无人机进行智能检测。但当前学者间合作较少,且国家标准与行业标准均未对无人机管道检测的技术指标作出明确规定。【结论】无人机管道检测技术属于跨学科领域,该技术的发展可以提高管道检测效率、降低成本、保障安全,并为无人机相关产业的发展提供新的动力。(图 10,表 4,参 44)

关键词: 无人机; 管道检测; 知识图谱; 关键词; 可视化; 预测分析

中图分类号: TE973

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)09-0973-12

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.09.002

Research review and innovative analysis of UAV pipeline inspection based on knowledge graphs

MA Yinghan, ZHAO Hong

College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing)//Beijing Key Discipline Laboratory of Mechanical and Electrical Engineering//Center of Advanced Oil and Gas Equipment

Abstract: 【Objective】 In the energy sector, pipeline inspection and monitoring provide an efficient method for detecting and addressing defects in energy pipeline transportation at an early stage, thereby ensuring the safe operation and sustainable development of pipeline systems. Considering the constraints of traditional pipeline inspection methods concerning accuracy, efficiency, and safety, research into unmanned aerial vehicle (UAV) pipeline inspection technology holds significant practical importance and promising development prospects.

【Methods】 Considering industry standards and the current development status of UAV technology, CiteSpace literature analysis software was utilized to perform a knowledge graph analysis across various dimensions, including publication years, co-occurrences, clustering, and frequencies of key words, as well as timelines, and authors of relevant literature. Building upon this analysis, this study investigated the relationships between research laboratories and scholars in related domains by tracking prominent conferences and journals. Additional research was conducted to uncover the characteristics of UAVs. Consequently, this paper outlines application strategies for UAVs in pipeline inspection and provides predictions and innovative analysis of the potential development trends in UAV pipeline inspection within China. 【Results】 UAV pipeline inspection represents an emerging application area for UAVs. Since 2015, this domain has increasingly garnered research attention. Several technology firms have integrated UAVs for intelligent inspections in actual oilfields. Nonetheless, current collaboration among scholars remains limited, and existing national and industry standards do not provide definitive specifications on the technical indicators for UAV pipeline inspection. 【Conclusion】 The UAV pipeline inspection technology constitutes an interdisciplinary field. The advancement of this technology profoundly enhances pipeline inspection processes by enhancing efficiency, cutting costs, and

guaranteeing safety. These improvements generate new impetuses for the growth of industries associated with UAVs. (10 Figures, 4 Tables, 44 References)

Key words: UAV, pipeline inspection, knowledge graph, key words, visualization, predictive analysis

传统的油气管道检测方法主要包括人工检测和仪器检测,这些方法在一定程度上可以满足常规管道检测的需求^[1-2],但对于特殊管道,如山区管道、城市上空管道、输送易燃易爆介质的高压管道^[3]等,使用传统检测手段将难以检测^[4],其在精度、效率、安全性等方面仍存在局限性。因此,研究无人机管道检测技术具有重要的现实意义和广阔的发展前景^[5-6]。

《全球及中国管道检测无人机行业“十四五”规划与未来需求预测报告 2022—2028 年》中指出:无人机管道检测行业的发展将带动无人机制造、传感器技术、计算机视觉、大数据分析等相关产业的技术创新和市场拓展,为整个社会的经济发展提供新动力^[7]。因此,系统全面地了解中国在无人机管道检测相关领域的研究现状、把握和指导该领域的研究态势和方向至关重要。

科学知识图谱 (Mapping Knowledge Domains, MKD) 分析是一种借助现代计算信息技术开展的信息文本挖掘分析手段,已广泛应用于文献信息收集与分析^[8]。利用知识图谱通过聚类、共现等方式可具体形象地展示出某个科学研究领域的核心结构、研究热点及作者机构等关键信息和隐含关系。为此,使用成熟的信息可视化软件 CiteSpace,对国内外无人机管道检测领域开展知识图谱可视化分析,认识和把握国内外在该领域的研究现状和动态趋势,并分析国内外研究发展的差异与特色,在此基础上进行中国未来该领域发展的预测和创新性研究分析,以期为无人机管道检测相关领域的研究提供参考。

1 数据来源

国内研究中的文献数据来源于中国知网 (China National Knowledge Infrastructure, CNKI), 国外研究中的文献数据来源于 Web of Science。为了保证数据的全面性,除同时添加“无人机”与“管道”作为关键检索信息之外,为把握无人机行业整体进展,还检索了与无人机相关的热点会议及期刊,进行更细致的单独分析。为了保证研究的前沿性,检索时间设置为 2003 年 1 月至 2023 年 12 月。为了使研究更具代表性和准确

性,在文献选取方面,中文文献选择中文核心、EI 期刊,外文文献选择 Web of Science 核心期刊,另外还选择性地保留了研究方向完全吻合的部分普刊,并剔除了无关文献。经过优化、去重后,最终得到中文文献 251 篇、外文文献 152 篇,其中中文核心、EI 期刊 28 篇, Web of Science 核心期刊 55 篇。由于中国西气东输与“一带一路”的战略不同于国外^[2,9-11],因此,在宏观层面以国内研究为主,在微观技术层面则对国内外进行综合研究。

为了更加直观地了解相关文献产出和发展情况,检索得到 2003—2023 年国内外关于无人机管道检测的相关文献发文量时序分布图 (图 1)。可见,根据发文量可大致划分为 4 个阶段:2005 年前、2005—2009 年、2010—2015 年、2015 年后。在 2003、2004 这两年,国内外均没有高水平文献发表;2005—2009 年期间,国内仍然没有高水平文献发表,国外每年只有个位数文献发表;2010—2015 年,由于无人机在国内有所发展,中国开始产出相关文章,并与国外高水平文献数量基本持平;2015 年后,国内外发文量迎来激增,尽管在个别年份,发文量有一定回落,但总体仍呈增强态势,说明该领域已逐渐成为研究热点。

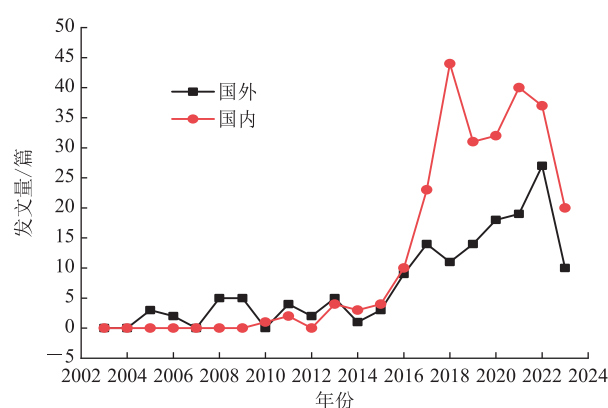


图 1 2003—2023 年国内外关于无人机管道检测的相关文献发文量时序分布图

Fig. 1 Literature counts in temporal distribution of UAV pipeline inspection-related literature published in China and abroad from 2003 to 2023

单一检索无人机这一大方向,可得到 2003—2023 年中国关于无人机的相关文献发文量时序分布图 (图 2)。可见,中国在 2010 年总发文量为 638 篇,

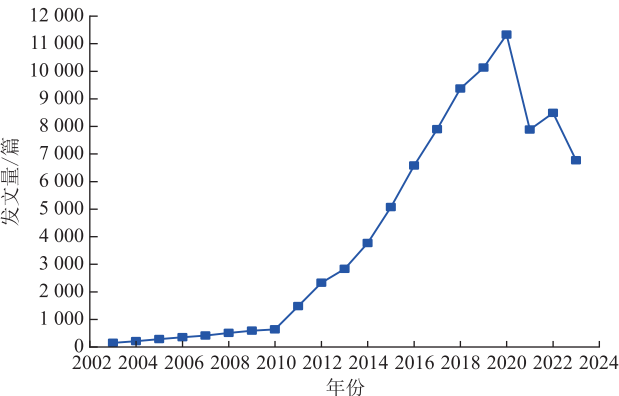


图2 2003—2023年中国关于无人机的相关文献发文量时序分布图

Fig. 2 Literature counts in temporal distribution of UAV-related literature published in China from 2003 to 2023

2011年为1 482篇,此后开始逐年激增,并于2020年达到 1.13×10^4 篇的峰值。随后几年有一定的下滑,2022年、2023年总发文量分别为8 492篇、6 771篇。由于检索时间只到2023年12月,部分半年刊与年刊的数据未更新,因此,2023年的发文量预计会与2022年近似持平。中国近几年无人机领域文章减少的原因与实验条件息息相关,受禁飞政策影响,无人机的实验变得愈发困难,这种现象有望在2024年无人机新规出台后得到改善。对比图1、图2可知,无人机管道检测技术作为无人机技术的一个子领域是随着无人机技术的发展而不断发展的,并在时间上具有一定的滞后性。

调研相关热点会议期刊可得到图1所检索文章的产出机构分布^[12-24]。国内有港科空中机器人研究组、浙江大学无人系统与自主计算实验室、北京航空

航天大学可靠飞行控制研究组。国外有宾西法尼亚大学 GRASP 实验室、苏黎世联邦理工大学自主系统实验室、苏黎世大学机器人与感知研究组、麻省理工大学空间控制实验室、多伦多大学飞行系统与控制实验室。其中,宾西法尼亚大学 GRASP 实验室为四旋翼自主飞行的开拓鼻祖,港科空中机器人研究组的沈劭劼副教授与浙江大学无人系统与自主计算实验室的高飞副教授为师生关系,港科空中机器人研究组又与深圳市大疆创新科技有限公司(DJ-Innovations, DJI)设有联合实验室。由此可见,国内关于无人机管道检测的相关研究得以突飞猛进并非偶然,加之中国西气东输^[25]与“一带一路”^[26]的建设、石油行业相关企业及高等院校的支持,该领域逐步实现了跨越式发展。

2 管道巡检策略

根据不同种类无人机的特点(表1)可以制定不同的管道巡检策略:固定翼无人机主要为大中型无人机以及部分航模飞机,其飞行速度快、巡航效率高,但无法实现悬停,且起落均对地面有较高要求;多旋翼无人机至少有两组旋翼,且目前的旋翼数均为偶数,若仅有两组旋翼,则需保证旋翼倾角可控,为矢量飞行器,其中穿越机在多旋翼无人机中飞行速度较快,但续航时间较短,主要应用于无人机竞速运动领域;无人直升机的续航时间较长,其主旋翼若为2个,通常共轴反向用以保持平衡^[27];若为1个,则需要尾桨以保持平衡。

表1 各类无人机的特点列表
Table 1 Characteristics of UAVs

类别	原理	优点	缺点	续航时间/min
固定翼无人机	形状固定,主要通过流体作用与机翼提供升力,通过控制导流板调整升降并实现转向	飞行速度快,巡航效率高	无法悬停,起落过程对地面要求高	120~240
多旋翼无人机	以2个或更多平行布置的旋翼为主要升力	可悬停,机动灵活,价格低廉	性能不稳定,控制难度大,续航时间短,受不良天气影响大	20~30
无人直升机	以1~2个主旋翼为主要升力	可悬停,姿态调整自由,升降灵活	控制难度大,遥控电子信号容易受干扰	120~240

无人机管道巡检方式的选择取决于多种因素,其中不同的信息获取需求是关键因素。常规油气管道巡检所需无人机的飞行高度低(5~10 m)、距离短,需要实现较为细致的观察,因此,可选择搭载视觉传感器的微型多旋翼无人机。中短距离(10~100 km)管道的泄漏检测需要无人机拥有更长的续航能力,飞行高度约100 m,且航道与巡检周期较为

固定,因此选择能量利用率高的固定翼无人机较为合理,同时,由于传统视觉检测精度不高,搭载使用红外、热成像等技术是中短距离无人机管道巡检的主流方法。偏远地区长距离(数百千米)巡检往往由受控空域中的大型无人机执行,由于飞行高度高(大于1 000 m)、图像处理难度更大,雷达技术成为其主要检测手段^[28]。

关度, 连接线密度越大, 则说明此关键词与其他关键词的关系越紧密, 连接线密度大的关键词则为核心或对信息的流动起控制作用^[31-32]。由此可见, 无人机、油气管道、巡检、应用、系统、设计等为高频关键词, 在无人机管道检测研究领域占主导地位, 视为该研究领域的重点、热点。其中, 无人机出现频次最高, 占据主导地位, 油气管道、巡检、应用这 3 个关键词的频次也较高。在国外关键词共现图谱中, uav(无人机)、pipe(管道)、systems(系统)、design(设计)这 4 个关键词的频次较高, 其中 uav、unmanned aerial vehicle(uav)、unmanned aerial vehicles(uavs)、manned aerial vehicles 均指无人机。

3.2 作者共现

作者共现水平可以体现该研究领域的学术影响力和学术氛围,为该领域的发展提供指导。良好的作者共现表明中国相关研究交流频繁,相互之间合作紧密。由2003—2023年无人机管道检测相关文献国内外作者共现图谱(图5、图6,选取作者出现频次不低于2次为阈值,其中节点大小代表学者发表文献数量的多少,节点之间的连线表示作者之间的合作程度,不同颜色代表不同所属单位/机构)统计得到该领域国内外代表作者发文情况(表2)。可见,在所调研期刊范围中,国内外鲜有机构与机构间的合作现象,说明在该细分领域还未建

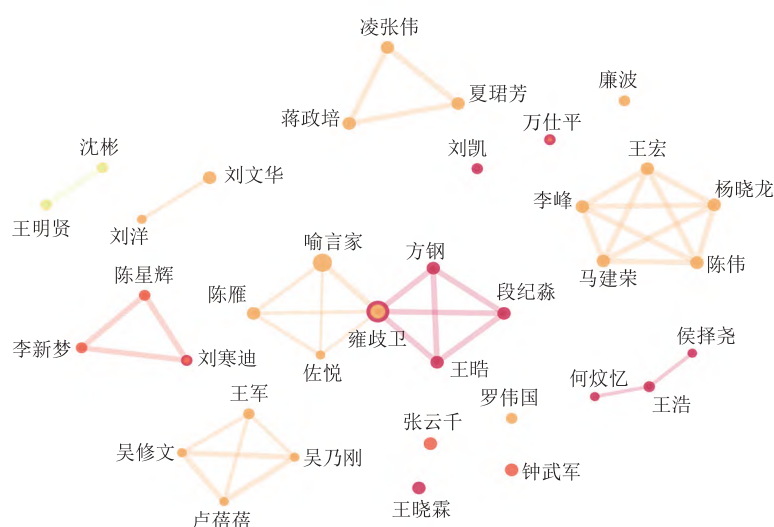


图 5 2003—2023 年无人机管道检测相关文献国内作者共现图谱

Fig. 5 Author co-occurrence graph of UAV pipeline inspection-related literature published in China from 2003 to 2023

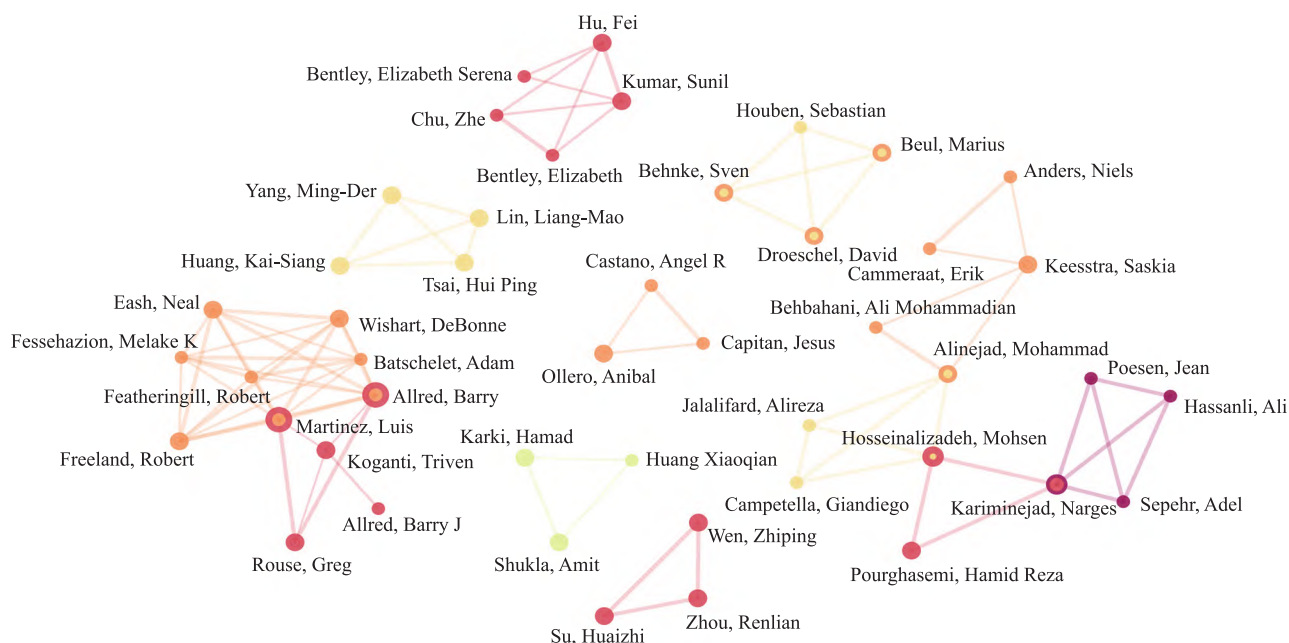


图 6 2003—2023 年无人机管道检测相关文献国外作者共现图谱

Fig. 6 Author co-occurrence graph of UAV pipeline inspection-related literature published abroad from 2003 to 2023

表 2 2003—2023 年无人机管道检测相关文献国内外代表作者
发文量及年份表

Table 2 Literature counts and years of publication for UAV pipeline inspection-related literature by representative authors in China and abroad from 2003 to 2023

作者	发文量	首发年份
雍歧卫	6	2017
Kariminejad, Narges	5	2018
喻言家	4	2017
Hosseinalizadeh, Mohsen	4	2018
Allred, Barry	4	2019
Koganti, Triven	3	2020
Freeland, Robert	3	2019
Eash, Neal	3	2019

立成熟的合作机制。该领域发文量不低于 2 的作者仅有 10 人,其中国内 2 人,且首发年份均在 2017 年,说明该领域仍然是小众领域,但热度呈上升趋势。

4 聚类分析

聚类分析是通过对共现图谱的研究,根据数据之间的密切程度和关联程度,对其进行划分归类,形成一个一个的聚类群体,并通过知识图谱的形式进行展现。

4.1 关键词聚类

为了更好地探索不同关键词之间的联系,在图 3、图 4 的基础上对关键词进行聚类,得到 2003—2023 年国内外无人机管道检测相关文献的关键词聚类图谱(图 7、图 8)。可见,国内无人机管道检测领域关键词聚类图谱中共 210 个关键词,形成了无人机、巡检、油气管道、管道巡护、无人机航空摄影测量、复杂地形 6 个

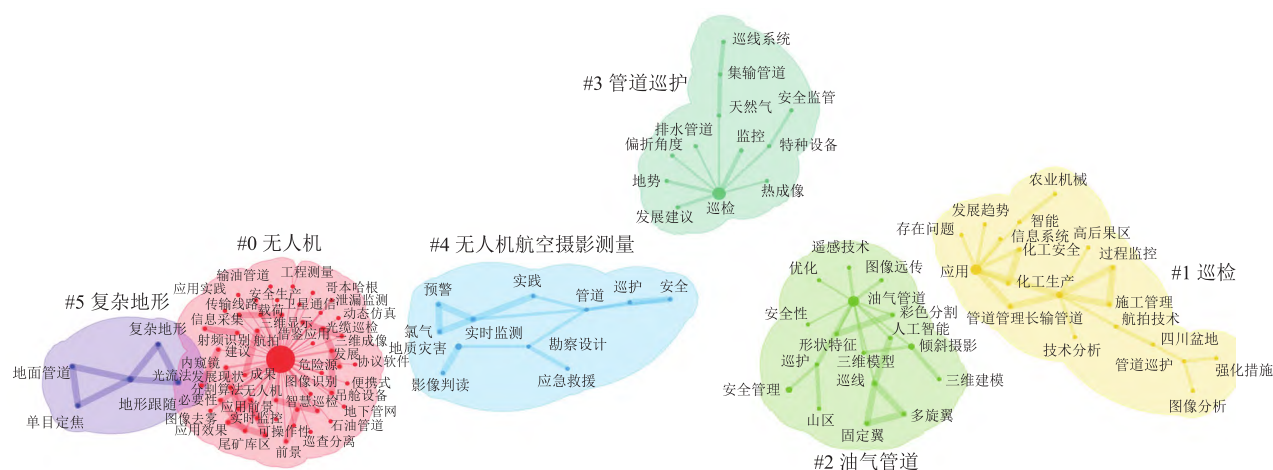


图 7 2003—2023 年国内无人机管道检测相关文献的关键词聚类图谱

Fig. 7 Key word clustering graph of UAV pipeline inspection-related literature published in China from 2003 to 2023

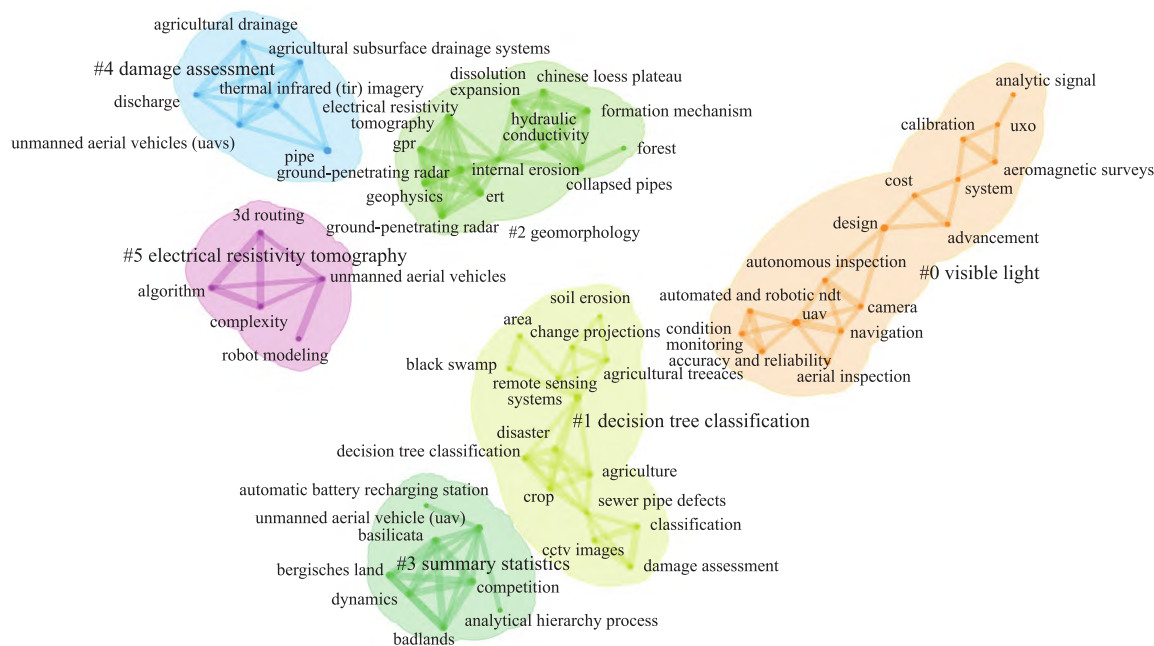


图 8 2003—2023 年国外无人机管道检测相关文献的关键词聚类图谱

Fig. 8 Key word clustering graph of UAV pipeline inspection-related literature published abroad from 2003 to 2023

聚类,214 个连接关系,网络密度为 0.009 8,网络模块化程度为 0.790 3;国外无人机管道检测领域关键词聚类图谱中共 145 个关键词,形成了 visible light(可见光)、geomorphology(地貌学)、decision tree classification(决策树分类)、summary statistics(概括统计)、damage assessment(损伤评估)、electrical resistivity tomography(电阻率成像)6 个聚类,276 个连接关系,网络密度为 0.026 4,网络模块化程度为 0.832 4。综上,国内在无人机管道检测领域的研究是以无人机为核心逐渐渗透到油气管道巡检巡护行业应用,无人机航空摄影测量与面对复杂地形的策略作为支撑技术在未来也具有一定的研究意义,而在国外关键词聚类图谱中却未发现无人机这一关键词。

为了对国内外无人机管道检测领域进行更加具

体、细致的分析,在上述关键词聚类分析的基础上,选取出现频次大于 3 的高频关键词,统计得到 2003—2023 年国内外无人机管道检测领域关键词的频次、中心度及首现年份的共现指标表(表 3)。可见,国内外研究中心均在无人机、管道等热点方面,但也具备不同之处。国内人工智能的研究频次较高,国外对无人机系统与遥感的研究频次较高。尽管文章选取量不同,但是在阈值频次设置相同的情况下,仍能看出国内外无人机管道检测领域的细微差异。受中心度的影响,尽管 unmanned aerial vehicle、unmanned aerial vehicle (uav)、unmanned aerial vehicles 属于同义词,均表征无人机,但为了不对结果造成影响,展示的是真实数据,并未进行人工处理^[33],此即为无人机这一关键词未出现在国外关键词聚类图谱中的原因。

表 3 2003—2023 年国内外无人机管道检测领域关键词的频次、中心度及首现年份的共现指标表
Table 3 Co-occurrence indicators of frequencies, centralities and first appearance years of key words in UAV pipeline inspection-related literature published in China and abroad from 2003 to 2023

范围	关键词	频次	中心度	首现年份	范围	关键词	频次	中心度	首现年份
中国	无人机	158	0.73	2010	国外	unmanned aerial vehicle (无人机)	5	0.01	2009
	巡检	28	0.03	2013		design(设计)	4	0.04	2017
	油气管道	22	0.05	2013		unmanned aerial vehicle (uav)(无人机)	4	0.12	2017
	应用	16	0.02	2013		systems(系统)	4	0.28	2017
	长输管道	7	0.01	2013		unmanned aerial vehicles (无人机)	3	0.03	2009
	地质灾害	6	0	2010		ground penetrating radar (探地雷达)	3	0.08	2021
	安全管理	6	0	2017		pipe(管道)	3	0.04	2021
	倾斜摄影	5	0	2017		forest(森林)	3	0.02	2018
	路径规划	4	0.01	2021		remote sensing(遥感)	3	0.04	2017
	管道巡检	4	0	2016					
	管道巡护	3	0.01	2018					
	巡线	3	0	2018					
	巡护	3	0	2017					
	管道巡线	3	0.01	2011					
	管道	3	0.01	2021					
	像控点	3	0	2016					
	应用研究	3	0	2021					
	石油管道	3	0	2014					
	人工智能	3	0	2018					
	特种设备	3	0.01	2018					
	实时监测	3	0.01	2014					

4.2 聚类时间线

为了进一步对无人机管道检测领域发展趋势进行分析,对该领域关键词聚类的时间线进行分析,即将关键词以时间轴的方式呈现,清晰地展示该领域研究的演进过程,并预测未来该领域的发展趋势。对图 7、图 8 进行时间线分析即可形成 2003—2023 年国内外无人机管道检测相关文献关键词聚类的时间线(图 9、图 10)。可见,无人机在发展初期是通过影像判断管

道泄漏对地质造成的影响,随着遥感技术发展,随后几年逐渐应用在油气管道的巡检与监控。尽管国外起步更早,但在 2015 年后,随着航拍技术的成熟,国内外无人机均广泛应用于油气管道的巡护、测量。这一时期,图像处理技术、人工智能技术也在迅速发展,具体体现在图像分割算法、光流法、地形跟随等。当无人机实现卫星通信后,巡检与巡查可以实现分离。2020—2023 年,无人机技术愈发成熟,多旋翼与固定翼无人机成为研

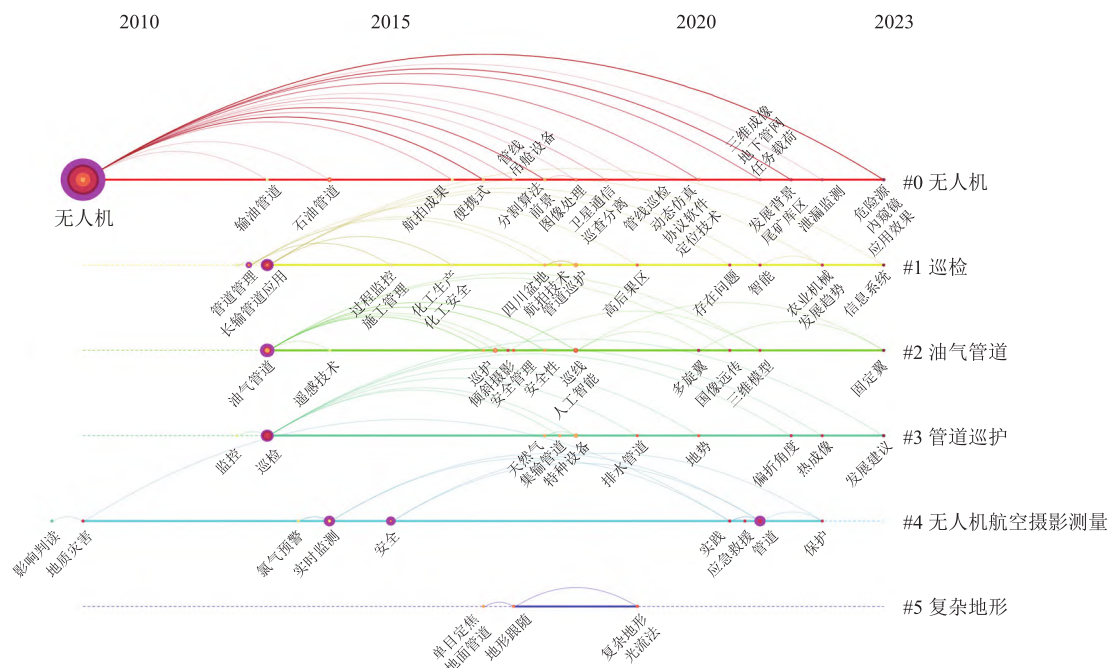


图 9 2003—2023 年国内无人机管道检测相关文献关键词聚类的时间线图
Fig. 9 Timeline graph of key word clustering in UAV pipeline inspection-related literature published in China from 2003 to 2023

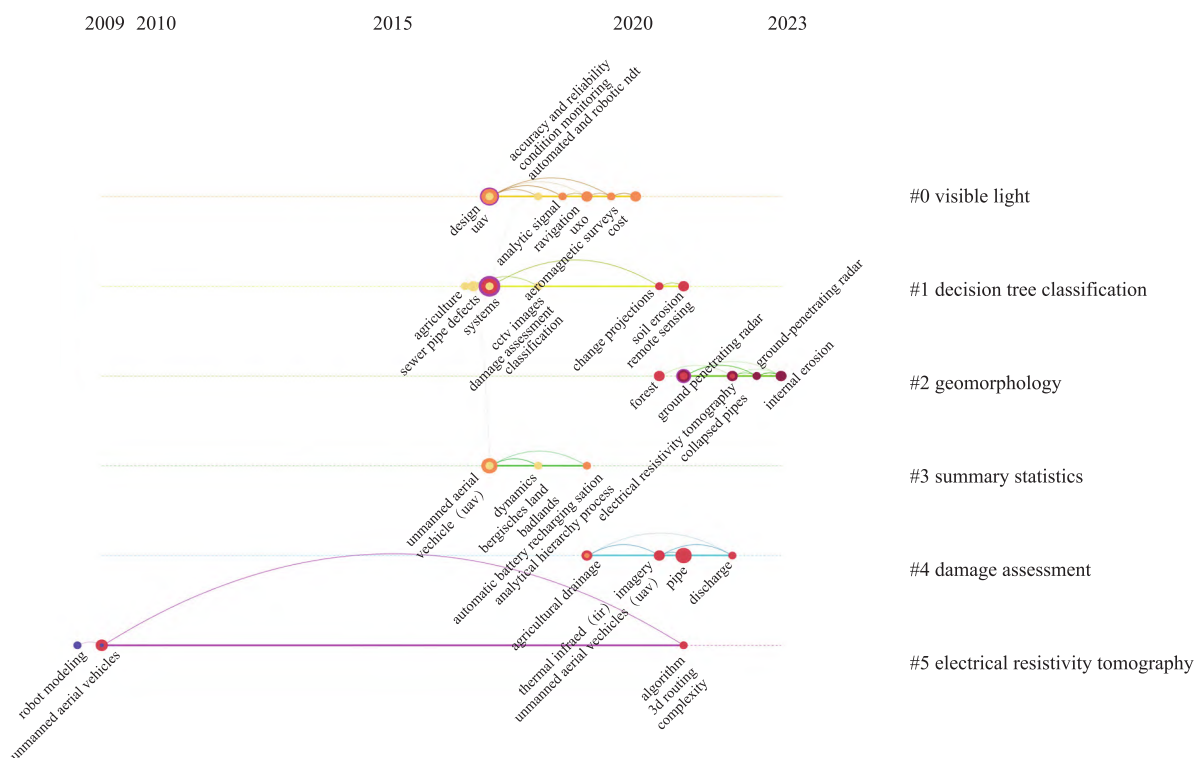


图 10 2003—2023 年国外无人机管道检测相关文献关键词聚类的时间线图
Fig. 10 Timeline graph of key word clustering in UAV pipeline inspection-related literature published abroad from 2003 to 2023

究热点,动态仿真、定位技术、串口协议等逐渐规范化,无人机作为底层空中平台的属性逐步凸显,在无人机上搭载热成像仪、气体传感器等检测装置使其更广泛地应用于地下综合管廊巡检、埋地管道检测等领域。

通过调研无人机技术在管道检测中的具体应用

(表 4) 可知,无人机在 2015 年开始投入应用,与图 9 的表征是一致的,未来该领域研究的发展热度会继续上升,结合实际工程需求与阅读当前文献时发现以下 3 个问题:①尽管早在 2016 年就有学者提出了无人机管道巡检的数学概率模型^[34],但长输管道经过的地形

表 4 无人机技术在管道检测中的发展及应用表
Table 4 Development and applications of UAV technology in pipeline inspection

年份	主体	无人机种类	检测方法	平台环境	应用场景	性能
2015	华北石油 ^[37]	—	热成像系统	实机飞行测试	管道附近居民房检测	可夜间打击偷盗,完全隐蔽安全
2016	华北石油 ^[37]	复合式无人机	实时图传	实机飞行测试	长输管道检测	图传距离 20 km,可控制变焦
2017	后勤工程学院 ^[4]	—	彩色分割及形状检测识别油气管道	Matlab	无人机巡线条件下的地面管线识别跟踪	准确率 80.3%
2017	后勤工程学院 ^[38]	—	HOG (Histogram of Oriented Gradients) 特征与滑动搜索框	航拍图片	—	准确率 84.7%,检测时间 2.1 s
2017	山西煤层气安泽项目部 ^[37]	—	3S 技术	实机飞行测试	煤层气巡检	雨中飞行 30 min,巡检效率高,无死角
2017	华北石油采油一厂 ^[37]	—	高空拍摄实时图传	实机飞行测试	水上应急救援	飞行高度 40 m
2018	安徽工程大学 ^[39]	多旋翼无人机	红外热成像检测技术	实机飞行测试	管外探测	续航时间短,市场的红外检测仪体积质量大,难以负载,红外实时传输问题
2018	信息工程大学 ^[40]	多旋翼无人机	卷积神经网络	实机飞行测试	油气管道巡查	准确率 96.6%,误检率 0.8%
2019	上海市城市排水有限公司管线管理分公司 ^[41]	多旋翼无人机	历史数据对比	实机飞行测试	污水管道巡检	每隔 50 m 悬停 5 s 拍照采集图像,共采集 20 处,整个任务完成时间约为 190 s,一键自主完成
2020	中国石化集团 ^[42]	—	多数据融合与小波分解	红外相机采集	油气管道泄漏区域与缺陷区域的定位	准确率最高 97.8%
2015	University Complutense of Madrid ^[43]	UAV	无人机平台与多遥感领域的协作	—	遥感协作方案	提出了几个领域的应用集合,具体包含无人机平台和传感器的组合方法,算法和程序
2020	University of Aberdeen ^[44]	UAV	—	—	管道监测	固定翼平台和自动飞行设计,可以更好地完成广泛区域的系统调查,而多旋翼平台则可以在较短的本地化视察任务中提供灵活性

错综复杂,并不能简单归一化处理,且无人机的续航能力有限,如何有针对性地调度、巡检始终是困扰该领域的重大问题。②目前,以 DJI 为代表的无人机头部企业已经在油田实际作业中使用无人机进行智能检测^[35-36],但是现行国家标准和行业标准并未对无人机管道检测的技术指标作出明确规定。③现有无人机以图像相关检测方式为主,其原因是图像本身具备一定的三维表征能力,通过图像能够得到被检目标与无人机之间的相对位置,而超声、电磁等检测手段会由于无人机自身的位置波动对检测结果造成影响。尽管飞行控制系统不断升级,但在没有视觉耦合的情况下,基于陀螺仪和空速计的反馈会由于积分效应累积偏差,而 GPS 系统定位精度低,无法满足需求。为实现较为微观、定量的检测,多传感器耦合或提高检测装置自身的定位精度是将来的一个研究方向。

5 结论

通过 Citespace 将 CNKI、Web of Science 中有关无人机管道检测的相关文献进行调研和知识图谱分析,并调研了无人机相关热点会议及期刊,查询了国内管道检测行业标准,得到主要结论如下:

- 1)从文献检索的结果来看,无人机的总发文量丰富,相比之下,无人机与管道检测结合的文献数量不多,且各单位研究较为分散,说明无人机管道检测相关领域是无人机的一个应用场景,为新兴领域,2015 年前国内外均鲜有研究,后来逐渐成为热点研究方向,未来中国在该领域的研究具有很大的发掘空间。
- 2)目前,无人机管道检测是新兴领域,并未有对应的国家标准或行业标准对其进行具体规定,未来还需要在此方面进行深入探索,完善该领域的行业标准。

3) 无人机管道检测技术属于跨学科领域, 涉及到结构设计、仿真、嵌入式系统、控制、检测等多学科交叉, 但当前学者间合作较少, 未来应加大合作力度, 提早促成技术落地。

4) 知识图谱目前只能查询到机构, 对具体实验室、学者间关系溯源的查询还不够完善。对于关键词的处理仍不完善, 如 UAV、unmanned aerial vehicle、unmanned aerial vehicle (uav)、unmanned aerial vehicles 等均指代无人机, 不应进行关键词区分。

参考文献:

- [1] 郑洪龙, 黄维和. 油气管道及储运设施安全保障技术发展现状及展望[J]. 油气储运, 2017, 36(1): 1-7. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.01.001.
- ZHENG H L, HUANG W H. Development status and prospect of safety insurance technologies for oil & gas pipelines and storage and transportation facilities[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1): 1-7.
- [2] 董绍华, 袁士义, 张来斌, 胡瑾秋, 陈怡玥. 长输油气管道安全与完整性管理技术发展战略研究[J]. 石油科学通报, 2022, 7(3): 435-446. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.038.
- DONG S H, YUAN S Y, ZHANG L B, HU J Q, CHEN Y Y. Research on integrity development strategy for long-distance oil and gas pipeline[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(3): 435-446.
- [3] 赵一国, 刘喜平. 新型无损检测技术在压力管道在线检测中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(19): 175-177, 180. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4076.2023.19.056.
- ZHAO Y G, LIU X P. Application of new non-destructive testing technology in online testing of pressure pipelines[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2023, 43(19): 175-177, 180.
- [4] 雍歧卫, 喻言家, 陈雁, 李赞, 佐悦. 地面管道无人机巡查起伏地形跟随方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(8): 158-162. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2017.08.026.
- YONG Q W, YU Y J, CHEN Y, LI Y, ZUO Y. Research on unmanned aerial vehicle pipeline tracking method in undulating terrain[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31(8): 158-162.
- [5] 温凯, 王伟, 谢宜峰, 韩旭. 基于气体扩散模型的天然气泄漏场景下无人机自主飞行控制算法研究[J]. 石油科学通报, 2021, 6(4): 614-625. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.04.043.
- WEN K, WANG W, XIE Y F, HAN X. UAV autonomous flight control in natural gas leakage scenarios based on a gas diffusion model[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(4): 614-625.
- [6] 黄维和, 郑洪龙, 李明菲. 中国油气储运行业发展历程及展望[J]. 油气储运, 2019, 38(1): 1-11. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2019.01.001.
- HUANG W H, ZHENG H L, LI M F. Development history and prospect of oil & gas storage and transportation industry in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(1): 1-11.
- [7] 张琛, 金伟, 郭佳. 我国民用无人机产业发展与展望[J]. 中国安防, 2022(3): 52-56. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7873.2022.03.011.
- ZHANG C, JIN W, GUO J. Development and prospects of China's civil unmanned aerial vehicle industry[J]. China Security & Protection, 2022(3): 52-56.
- [8] 吴越, 孙海春. 基于图神经网络的知识图谱补全研究综述[J]. 数据分析与知识发现, 2024, 8(3): 10-28. DOI: 10.11925/infotech.2096-3467.2023.0753.
- WU Y, SUN H C. An overview of research on knowledge graph completion based on graph neural network[J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2024, 8(3): 10-28.
- [9] 冯耀荣, 李鹤林, 韩礼红, 张忠铎, 张传友, 成海涛, 等. 我国油井管国产化技术进展及展望[J]. 石油科学通报, 2022, 7(2): 229-241. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.02.021.
- FENG Y R, LI H L, HAN L H, ZHANG Z H, ZHANG C Y, CHENG H T, et al. Progress and prospects of manufacturing technology for oil country tubular goods in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(2): 229-241.
- [10] 杨梓诚, 高俊莲, 唐旭, 仲冰, 张博. 中国油气行业甲烷逃逸排放核算与时空特征研究[J]. 石油科学通报, 2021, 6(2): 302-314. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.02.024.
- YANG Z C, GAO J L, TANG X, ZHONG B, ZHANG B. Accounting and spatial-temporal characteristics of fugitive methane emissions from the oil and natural gas industry in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(2): 302-314.
- [11] 薛庆, 刘明明, 程承, 李展. 中国天然气进口规模与结构仿真研究[J]. 石油科学通报, 2021, 6(2): 315-328. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.02.025.
- XUE Q, LIU M M, CHENG C, LI Z. Simulation study on the scale and structure of China's natural gas import[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(2): 315-328.
- [12] ZHOU X, ZHU J C, ZHOU H Y, XU C, GAO F. EGO-

- swarm: a fully autonomous and decentralized quadrotor swarm system in cluttered environments[C]. Xi'an: 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2021: 4101-4107.
- [13] GAO F, WANG L Q, ZHOU B Y, ZHOU X, PAN J, SHEN S J. Teach-repeat-replan: a complete and robust system for aggressive flight in complex environments[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2020, 36(5): 1526-1545. DOI: 10.1109/TRO.2020.2993215.
- [14] LI H J, WANG H K, FENG C, GAO F, ZHOU B Y, SHEN S J. AutoTrans: a complete planning and control framework for autonomous UAV payload transportation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(10): 6859-6866. DOI: 10.1109/LRA.2023.3313010.
- [15] ZHANG H T, TAN S C, SONG Z M, QUAN Q. Performance evaluation and design method of lifting-wing multicopters[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(3): 1606-1616. DOI: 10.1109/TMECH.2021.3090667.
- [16] OK K, LIU K, FREY K, HOW J P, ROY N. Robust object-based SLAM for high-speed autonomous navigation[C]. Montreal: 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2019: 669-675.
- [17] LIU W X, LOIANNO G, MOHTA K, DANIILIDISK, KUMAR V. Semi-dense visual-inertial odometry and mapping for quadrotors with SWAP constraints[C]. Brisbane: 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2018: 3904-3909.
- [18] FORSTER C, PIZZOLI M, SCARAMUZZA D. SVO: fast semi-direct monocular visual odometry[C]. Hong Kong: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2014: 15-22.
- [19] MILLANE A, TAYLOR Z, OLEYNIKOVA H, NIETO J, SIEGWART R, CADENA C. C-blox: a scalable and consistent TSDF-based dense mapping approach[C]. Madrid: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018: 995-1002.
- [20] SCHMUCK P, CHLI M. Multi-UAV collaborative monocular SLAM[C]. Singapore: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2017: 3863-3870.
- [21] NING J Q, ZHANG H T, QUAN Q. Dynamic obstacle avoidance of quadcopters with monocular camera based on image-based visual servo[C]. Dubrovnik: 2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2022: 150-156.
- [22] SCHNEIDER T, DYMZYK M, FEHR M, EGGER K, LYNEN S, GILITSCHENSKI I, et al. Maplab: an open framework for research in visual-inertial mapping and localization[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 1418-1425. DOI: 10.1109/LRA.2018.2800113.
- [23] LIU X, CHEN S W, LIU C H, SHIVAKUMAR S S, DAS J, TAYLOR C J, et al. Monocular camera based fruit counting and mapping with semantic data association[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(3): 2296-2303. DOI: 10.1109/LRA.2019.2901987.
- [24] FORSTER C, CARLONE L, DELLAERT F, SCARAMUZZA D. On-manifold preintegration for real-time visual: inertial odometry[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(1): 1-21. DOI: 10.1109/TRO.2016.2597321.
- [25] 李彪. 西气东输管道系统的自动控制技术[J]. 化工管理, 2019(12): 137-138. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2019.12.090.
- LI B. Automatic control technology for the west east gas pipeline system[J]. Chemical Enterprise Management, 2019(12): 137-138.
- [26] 张珺, 梁天丽. “一带一路”天然气贸易复杂网络演化特征及影响因素研究[J]. 世界石油工业, 2023, 30(5): 11-18, 25. DOI: 10.20114/j.issn.1006-0030.20230622001.
- ZHANG J, LIANG T L. Evolution characteristics and influencing factors of natural gas trade complex network under the Belt and Road Initiative[J]. World Petroleum Industry, 2023, 30(5): 11-18, 25.
- [27] 邓志强, 阙颖, 陈远鹏. 无人机技术在油气长输管道巡检应用研究进展[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(22): 182-183. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4076.2021.22.087.
- DENG Z Q, QUE H, CHEN Y P. Research progress of unmanned aerial vehicle technology in oil and gas pipeline patrol inspection[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2021, 41(22): 182-183.
- [28] 马晓涛. 无人机油气管道巡线系统发展和应用策略研究[J]. 石化技术, 2023, 30(11): 230-232. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0235.2023.11.077.
- MA X T. Research on development and application strategy of UAV oil and gas pipeline patrol system[J]. Petrochemical Industry Technology, 2023, 30(11): 230-232.

- [29] 田峻仁, 朱子朋, 陈冬雷, 龙志宏, 许刚, 程伟平. 基于聚类分析的管网分区及水量调配能力研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(15): 51-57. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.15.007.
- TIAN J R, ZHU Z P, CHEN D L, LONG Z H, XU G, CHENG W P. District-dividing and water dispatch capacity of water supply network based on cluster analysis[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(15): 51-57.
- [30] 梁晓斌. 天然气管道缺陷的智能诊断与风险评估方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- LIANG X B. Research on intelligent diagnosis and risk assessment methods of natural gas pipeline defects[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [31] 金国清. 油气管道完整性管理的知识图谱研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- JIN G Q. Research on knowledge graph of oil and gas pipeline integrity management[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [32] 淳明浩, 崔文勤, 杨肖迪, 罗小桥, 徐爽, 顾红兵. 海底管道风险评估方法研究与应用[J]. 石油工程建设, 2020, 46(增刊 1): 120-125. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2206.2020.S.024.
- CHUN M H, CUI W Q, YANG X D, LUO X Q, XU S, GU H B. Research and application of risk assessment methods for submarine pipelines[J]. Petroleum Engineering Construction, 2020, 46(S1): 120-125.
- [33] 邱锦安, 杨林, 童纪伟, 张杰, 邓志德. 基于 CiteSpace 的地质灾害应急研究可视化分析[J]. 城市地质, 2022, 17(4): 417-425. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1903.2022.04.005.
- QIU J A, YANG L, TONG J W, ZHANG J, DENG Z D. Visualization analysis of geological disaster emergency research based on CiteSpace[J]. Urban Geology, 2022, 17(4): 417-425.
- [34] 王翔宇, 王跃, 鲍蕊, 蒋崇文, 万志强. 基于巡检方案事件检出概率的长距管线无人机总体设计[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 193-206. DOI: 10.7527/S1000-6893.2015.0286.
- WANG X Y, WANG Y, BAO R, JIANG C W, WAN Z Q. Conceptual design for long-distance pipeline patrolling UAV based on detection probability of patrolling scheme[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 193-206.
- [35] 大疆创新. 守护长庆油田, 无人值守智能化巡检这样干![EB/OL]. [2022-12-20]. <https://enterprise.dji.com/cn/news/detail/changqing-oilfield>.
- DJI Innovations. Guarding Changqing Oilfield, unmanned intelligent inspection is done like this![EB/OL]. [2022-12-20]. <https://enterprise.dji.com/cn/news/detail/changqing-oilfield>.
- [36] 大疆创新. 空地一体智能巡检 | 大疆机场巡护油气长输管道[EB/OL]. [2023-04-01]. <https://enterprise.dji.com/cn/news/detail/dji-dock-patrols-oil-and-gas-pipelines>.
- DJI Innovations. Integrated intelligent inspection of air and ground | DJI Airport patrol oil and gas long-distance pipelines[EB/OL]. [2023-04-01]. <https://enterprise.dji.com/cn/news/detail/dji-dock-patrols-oil-and-gas-pipelines>.
- [37] 钟武军. 基于 3S 技术的无人机油气管道巡检研究与应用[J]. 信息系统工程, 2020(12): 37-38. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2362.2020.12.016.
- ZHONG W J. Research and application of unmanned aerial vehicle oil and gas pipeline patrol inspection based on 3S technology[J]. China CIO News, 2020(12): 37-38.
- [38] 雍歧卫, 喻言家, 陈雁. 基于 HOG 特征和滑动框搜索的地面油气管道检测方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2017, 31(11): 192-197. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2017.11.029.
- YONG Q W, YU Y J, CHEN Y. Ground oil and gas pipeline detection method based on hog characteristic and sliding box search[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31(11): 192-197.
- [39] 陈露, 王冠凌, 郁书好, 毛赫. 无人机载红外管道检测的研究与设计[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2018, 34(6): 83-85. DOI: 10.3969/j.issn.1673-260X.2018.06.029.
- CHEN L, WANG G L, YU S H, MAO H. Research and design of unmanned airborne infrared pipeline detection[J]. Journal of Chifeng University, 2018, 34(6): 83-85.
- [40] 刘松林, 朱永丰, 张哲, 牛俊伟. 基于卷积神经网络的无人机油气管线巡检监控系统[J]. 计算机系统应用, 2018, 27(12): 40-46. DOI: 10.15888/j.cnki.csa.006668.
- LIU S L, ZHU Y F, ZHANG Z, NIU J W. UAV oil/gas pipeline inspection system based on convolutional neural network[J]. Computer Systems & Applications, 2018, 27(12): 40-46.
- [41] 张云千, 王璐璐. 多旋翼无人机在排水监护中的应用[J]. 电子测试, 2019(22): 103-104. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8519.2019.22.046.

(下转第 994 页)

- [20] CAO Q, YAN X Q, YU S, YU J L, CHEN S Y, ZHANG Y C, et al. Experimental investigation of the characteristics of supercritical CO₂ during the venting process[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 110: 103424. DOI: 10.1016/j.ijggc.2021.103424.
- [21] GUO X L, YU J L, YAN X Q, XU P, XU S Q, CAO Q. Throttle and expansion characteristics of supercritical carbon dioxide during its venting[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2023, 122: 103800. DOI: 10.1016/j.ijggc.2022.103800.
- [22] LI H L, WILHELMSEN Ø, LV Y X, WANG W L, YAN J Y. Viscosities, thermal conductivities and diffusion coefficients of CO₂ mixtures: review of experimental data and theoretical models[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(5): 1119–1139. DOI: 10.1016/j.ijggc.2011.07.009.
- [23] 赵青. 含杂质 CO₂ 不同相态管输节流及减压特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- ZHAO Q. Throttling process and decompression property for pipeline transportation of anthropogenic CO₂ in different phase[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [24] 顾帅威, 滕霖, 李玉星, 胡其会, 张大同, 王财林. 含杂质气态

CO₂ 管道减压波传播特性[J]. 石油化工, 2018, 47(7): 689–695. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8144.2018.07.008.

GU S W, TENG L, LI Y X, HU Q H, ZHANG D T, WANG C L. Propagation characteristics of decompression wave for gaseous CO₂ in pipeline containing impurities[J]. Petrochemical Technology, 2018, 47(7): 689–695.

(编辑: 张雪琴)

基金项目: 国家重点研发计划“战略性科技创新合作”专项“区域二氧化碳捕集与封存关键技术研发与示范”, 2022YFE0206800; 国家石油天然气管网集团有限公司重大科技攻关课题“超临界 CO₂ 管道输送工艺与安全技术研究”, GWHT20220011708.

作者简介: 胡其会, 男, 1981 年生, 副教授, 2011 年博士毕业于西安交通大学动力工程及工程热物理专业, 现主要从事 CO₂ 管道输送与安全控制技术方面的研究工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号, 266580。电话: 18366269061。Email: huqihui@upc.edu.cn

- Received: 2023-11-29
- Revised: 2023-12-11
- Online: 2024-03-26



(上接第 984 页)

- ZHANG Y Q, WANG L L. Application of multi-rotor UAV in drainage monitoring[J]. Electronic Test, 2019(22): 103–104.
- [42] 姚建军. 基于多数据融合和小波分解的油气管道缺陷检测方法研究[J]. 石油化工自动化, 2020, 56(2): 28–32. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7324.2020.02.008.
- YAO J J. Research on oil and gas pipeline defect detection based on multi-data fusion and wavelet decomposition[J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2020, 56(2): 28–32.
- [43] TAYLOR O R, Jr. A mating tube for studying attractiveness of queen honeybees and mating behaviour of drones[J]. Journal of Apicultural Research, 1984, 23(1): 21–24. DOI: 10.1080/00218839.1984.111100604.
- [44] LYU B C, SMITH S D, XUE Y X, RAINEY K M, CHERKAUER K. An efficient pipeline for crop image extraction and vegetation index derivation using unmanned aerial systems[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(4): 1133–1146. DOI: 10.13031/trans.13661.

(编辑: 张雪琴)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“海底油气管道封堵致振机理及气动减振控制方法研究”, 51575528; 中国石油大学(北京)前瞻导向及培育项目“油气管道及站场关键检测技术与实验方法研究”, 2462022QEDX011。

作者简介: 马英涵, 男, 1998 年生, 在读博士生, 2020 年毕业于中国石油大学(北京)机械设计制造及其自动化专业, 现主要从事无人机管道检测方面的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京), 102249。电话: 18801330876。Email: 1171532991@qq.com

通信作者: 赵弘, 女, 1974 年生, 教授, 博士生导师, 2003 年博士毕业于西安交通大学机械电子工程专业, 现主要从事机械结构设计及优化、机电系统设计与控制等工作。地址: 北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京), 102249。电话: 13522390529。Email: hzhao_cn@163.com

- Received: 2024-01-25
- Revised: 2024-03-15
- Online: 2024-07-12

