

2019年无人机热点回眸

段海滨¹, 申燕凯¹, 赵彦杰², 范彦铭³, 王寅⁴, 牛轶峰⁵, 魏晨¹, 罗德林⁶

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100083
2. 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041
3. 中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035
4. 南京航空航天大学航天学院, 南京 210016
5. 国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073
6. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361102

摘要 在科技创新牵引和管控政策的推动下, 无人机产业焕发出新的活力。2019年, 无人机自主控制及应用技术又取得长足发展, 呈现出一些新的发展态势。从无人机新战略、无人机赛事、技术革新、实战化等多个角度, 对2019年无人机的科技热点及发展趋势进行了总结。分析表明, 无人机集群智能作为一项颠覆性技术和作战理念, 将成为未来无人机研究发展的重要方向。

关键词 无人机; 自主控制; 集群智能; 科技热点

随着信息技术特别是人工智能技术的快速发展, 无人机在诸多领域正发挥着重要作用。在军事领域, 作为“平台无人、系统有人、自主运行”的无人机使现代战争模式正发生着重大变革; 在民用领域, 种类繁多、功能齐全的无人机产品层出不穷, 已催生出庞大的产业链^[1]。如今无人机在农业植物保护、电力巡检、警用执法、地质勘探、环境监测、森林防火以及影视航拍等方面发挥着重要的作用, 已然成为科技进步、社会经济发展的新动力^[2]。随着无人机的自主能力和智能化水平不断提高, 以及复杂

跨域协同任务需求的不断增长, 决定了无人机势必朝着集群化、自主化和智能化的方向发展。

2019年, 借助于人工智能技术, 无人机行业爆发出更加强劲的活力, 市场推新、标准制定、行业竞赛等各种各样的活动与成果层出不穷, 无人机集群自主控制成为了新的研究热点和关键技术难点。美国、中国等纷纷制定无人机发展新思路、新战略。从无人机前沿理论, 到无人机型号装备和工程创新; 从加紧完成对现役和在研无人机性能的综合测试, 到无人机集群研究和实现均被提到了新的高

收稿日期: 2019-12-21; 修回日期: 2020-01-02

基金项目: 科技创新2030-“新一代人工智能”重大项目(2018AAA0102403); 国家自然科学基金项目(91948204, U19B2029, 91648205)

作者简介: 段海滨, 教授, 研究方向为无人机集群仿生自主控制、计算机仿生视觉和仿生智能计算, 电子邮箱: hbduan@buaa.edu.cn

引用格式: 段海滨, 申燕凯, 赵彦杰, 等. 2019年无人机热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 170-187; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.01.015

度^[9]。一方面,涉及无人机续航能力、机身材料、感知认知、导航控制、规划决策等多个方面的创新科技和研究层出不穷;另一方面,在应对无人机的快速发展带来的负面影响,规范化无人机产业有序健康发展,以及开展反无人机技术研究和相关法律法规的制定、监管和实施方面所做的努力,都有力地推动无人机技术和产业的跨越式发展。

1 布局无人机新战略

数据和人工智能已成为第4次工业革命时代重要的生产要素,是否拥有大数据、人工智能水平的高低将成为未来国家竞争的核心,而人工智能技术的应用将为无人机自主能力提升提供无限可能。2019年2月11日,美国国家科技政策办公室发布了一项由特朗普总统签署的《美国人工智能倡议》行政令,正式启动了美国人工智能计划。美国作为人工智能研发和部署的全球领先者,从投资人工智能研发、释放人工智能资源、制定人工智能治理标准、构建人工智能劳动力、国际参与和保护美国的人工智能优势5个重点领域入手,以谋求维持和加强美国在人工智能研发和部署方面的科学、技术和经济领先地位^[4]。在中国和俄罗斯军队开始装备一体化防空系统、远程导弹、反卫星系统等武器,战场的对抗性和复杂性日益加剧的背景下,2019年4月17日,美国空军公布《美国空军科技战略:为2030年及之后加强美国空军科技》(以下简称《战略》),如图1(a)。新版的《战略》描述了美国空军维持科技优势面临的挑战,提出了2030年及以后的科技发展愿景、主要目标和关键举措^[5]。以“发展并形成战略转型能力”为目标,提出发展高水平人工智能,拥有理解复杂、不确定环境,分辨多源零散数据的能力,突破低成本航空航天平台、合作式自主和蜂群等关键技术。为提高杀伤速度和破坏范围,提出了“速度更快、射程更远”的目标,大力发展多域指挥与控制、对抗环境中的感知、微波和定向能、智能决策、高超声速和无人集群等领域技术,提升平台能力的同时,寻求在体系层面将信息、网络、智能能力及优势与平台优势融合,大幅放大自身优势。除美

国外,韩国科学技术信息通信部于2019年1月16日出台了《数据和人工智能经济发展计划(2019—2023)》(以下简称《计划》),旨在将韩国建设成为数据和人工智能强国。该《计划》包括促进数据价值链的全周期发展,营造世界一流的人工智能创新环境,推动数据和人工智能融合发展3大战略^[6]。

从2017年到2018年,人工智能已连续2年被写入政府工作报告,《新一代人工智能发展规划》的印发标志着人工智能已上升至国家战略层面^[7]。由科技部新一代人工智能发展研究中心、中国科学技术发展战略研究院联合国内外10余家机构编写的《中国新一代人工智能发展报告2019》(中英文版)于2019年5月24日在上海发布。该报告从全球形势、创新环境、科研突破、经济发展、社会应用、人才支撑和区域格局等视角,肯定中国在人工智能领域取得的成绩,反映了《新一代人工智能发展规划》启动实施以来的落实推进情况,为未来加速推进人工智能产业快速、良性发展指明了方向。由中国信息通信研究院政策与经济研究所和数据研究中心研究团队共同编写的《全球人工智能战略与政策观察(2019)》于2019年8月“第二届工业互联网高峰论坛”上发布。该报告将有助于更好地了解全球人工智能战略与政策情况,共同推动人工智能领域的健康发展^[8]。深圳于2019年5月30日出台了《深圳市新一代人工智能发展行动计划(2019—2023年)》,着力构建全国领先的人工智能技术创新体系,推动新一代人工智能与实体经济深度融合,致力于将深圳发展成为中国人工智能技术创新策源地和全球领先的人工智能产业高地^[9]。在国务院颁布的《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》中明确提出,推进民用飞机产业化,大力开发市场需求大的民用直升机、多用途飞机、特种飞机和工业级无人机。随着监管政策完善,工业级无人机的市场潜力将不断释放^[10]。为加快推动四川省通用航空产业发展,2019年7月19日,四川省政府办公厅印发的《四川省通用航空产业发展规划(2019—2025年)》指出重点发展大中型通用航空飞机、工业级无人机和航空发动机研发制造等^[11]。2019年9月,由中国投资有限责任公司研究院和赛迪顾问股份有限公司联合撰写了《工业级无人机投

资白皮书》(图1(b)),结合各自在国际与国内、投资与产业方面的经验和优势,确定了商业战略上“农村包围城市”,投资可关注美国、西欧和东亚3大市场,聚焦农业、建筑业和实物资产检查、物流运输、安防等4大行业的应用主线^[12]。



(a) 美国空军科技战略

(b) 工业级无人机投资白皮书

图1 无人机战略新布局

(图片来源: Air Force Material Command 和赛迪顾问网站)

2 强化无人机管控政策

“低、慢、小”各类航空器存在探测难度大、监管困难等问题,导致威胁机场、政府要地、军事设施、大型活动场馆和工业设施等重要区域安全的案例层出不穷。因此,美国、英国、法国和中国等加紧计划或推行无人机管控政策。

拥有众多反无人机技术的美国,在广泛部署反无人机装备的问题上仍然面临一些阻碍。为了保护个人隐私信息,阻止无人机非法拍摄别人的照片或录像,宾夕法尼亚州制定了《非法使用无人驾驶飞行器法》,并于2019年1月12日正式生效实施。2019年2月,全球领先无人机空域管理平台 AirMap 联合 Alphabet 公开演示 InterUSS 平台对无人机进行网络远程身份识别的解决方案。2019年12月,国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)宣布世界上第一个ISO批准的无人机标准,新标准有助于制定未来的法规和法规,标志着全球无人机行业标准化的巨大进步,将对未来无人机行业发展产生深远影响。自伦敦希斯罗与盖维克机场发生多起无人机干扰事件后,英

国政府于2019年2月20日规定机场5 km范围内,禁止无人机飞行,以免受无人机使用产生不当的影响。英国于2019年11月9日启动了新的《无人机和模型飞机注册与教育计划》,规定操纵重量在250 g~20 kg之间的无人机的驾驶员或操作员都需要通过在线教育课程学习和注册。

近年来,中国无人机市场呈现井喷式发展,但相关的具体政策和措施还相对缺乏,强化无人机监管势在必行,2019年中国各地陆续出台了办法条例和法律法规。如:2019年1月2日,深圳市人民政府审议通过了《深圳市民用微轻型无人机管理暂行办法》,从生产和销售管理、飞行管理及法律责任3方面,明确了企业与飞手责任、禁飞区域、飞行审批管理以及法律责任等^[13]。2019年3月28日,浙江省人大常委会审议通过了《浙江省无人驾驶航空器公共安全管理规定》。该规定从实名、设限和严管3个角度出发,首次从法律层面对无人机安全问题做出了规定^[14]。为了维护西安地区的公共安全和航空安全,保护公民人身、财产合法权益,杜绝“低、小、慢”各类航空器违法违规飞行活动,西安于2019年4月12日发布了关于“低、慢、小”航空器飞行管理的公告。2019年2月,中国民用航空局飞行标准司、航空器适航审定司和空管行业管理办公室联合发布了《特定类无人机试运行管理规程》(AC-92-01),针对特定类行业级无人机应用启动无人机空中交通空域管理、流量管理、飞行管制与风险评估等研究与试点^[15]。为了推动反无人机技术的创新和机场的安全及正常的运输生产秩序,在第三届世界无人机大会期间,国内外参会专家就反无人机技术的改进、创新低空管理、应对无人机的违规乱飞、无人机行业及应用标准化问题展开讨论交流。将提升中国无人机管理模式创新和技术发展,提升行业竞争力和产品质量,推动无人机产业健康有序发展。2019年8月,中国民用机场协会发布了《民用机场无人驾驶航空器系统监测系统通用技术要求》^[16]。明确规范了民用机场无人驾驶航空器监测系统通用技术的适用范围、术语定义、通用技术要求及安装部署条件,填补了国内标准空白。为了实现轻、小型民用无人机及植物保护无人机飞行动

态实时监控,逐步简化轻、小型民用无人机及植物保护无人机的飞行空域、飞行计划、飞行活动管理,实施民用无人机空中交通管理。2019年11月19日,中国民用航空局下发了关于印发《轻小型民用无人机飞行动态数据管理规定》的通知(图2)^[7]。此外,2019年12月5日,工业和信息化部公开征集对《民用无人机地理围栏数据技术规范》等2项强制性国家标准计划项目的意见并予以公示。



图2 轻小型民用无人机飞行动态数据管理规定

3 推动无人机相关赛事

无人机赛事是近年来在欧美等国兴起的新型体育赛事,国际航空联合会已于2016年将其纳入管辖范围。在低空空域管理改革持续推进、航空运动产业规范化发展以及建设航空强国、科技强国和体育强国上升为国家战略的大背景下,中国在无人机相关赛事上开展积极探索。

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)一直致力于为现有和新兴航空运营活动提供方便、经济、安全、高效的空域。借助行业、政府和学术界之间的合作,NASA于2019年8月推出自动导航演示挑战赛。通过众多小型企业集思广益,将帮助NASA解决国家空域中无人机的关键安全风险问题,提高公众对日益自主化的商业无人机运营能力的信心。

2019年9月28—29日韩国无人机冠军赛在韩国果川市圆满举行,来自全球各地的46位竞速飞手对冠军进行了激烈角逐。本次赛事由韩国果川市政府主办,KDRA韩国无人机竞速协会和X-FLY无人机竞速联盟承办,也是首次由中韩两国顶尖无人机竞速赛事协会共同举办的国际无人机竞速赛事。2019年10月下旬至11月上旬举办了日本首届无人机比赛。该项比赛经过空中运动国际组织、国际航空联合会的公认,比赛形式为无人机穿点竞速穿越。2019年6月20日,由中部战区联合参谋部等协办,中国航空工业发展研究中心等单位联合承办的“无形截击-2019”反无人机对抗挑战赛,在位于内蒙古自治区阿拉善左旗的中国兵器工业试验测试研究院试验区拉开序幕(图3(a))。针对重点区域反“低、小、慢”无人机需求,比赛设置了贴近实际攻防的对抗环境,充分发挥了挑战赛的指向性和试探作用,有效地检验了无人机侦测反制装备和技术的能力。由军事科学院系统工程研究院、中国航天科工集团有限公司联合举办的“畅联智能”无人蜂群联合行动挑战赛于2019年7月在重庆举行,该赛有效地推动了无人蜂群技术军民协同创新及无人蜂群系统装备发展,发掘优秀创新团队及成果,推进创新成果转化应用。“智胜空天-2019”无人机挑战赛于2019年12月6—8日在陕西西安在空军工程大学三原校区举行,来自全国院校和科研院所的112支队伍500名选手齐集一堂。有效考察智能无人机集群系统的技术性能,快速牵引智能无人集群领域新技术发展与转化应用,探索未来智能无人集群作战概念。首届“无人争锋”挑战赛由中国电子科技集团电子科学研究院等单位承办,于2018年6月28日至7月6日在河北涿水中国电子科技集团电子科技园成功举办。挑战赛设置了三项公开赛科目,重点考核无人机集群密集编队、高速精确避障、协同搜索识别与定位,集群协同策略与动态任务规划,空中精确定位与空中预对接等技术的发展水平,具有“强协同、全自主、群智能”的特点,为实现体系智能的发展进行了有益探索与实践。2019年11月公布了由空军研究院和电子科技集团电子科学研究院联合承办,中国航空研究院和北京理工

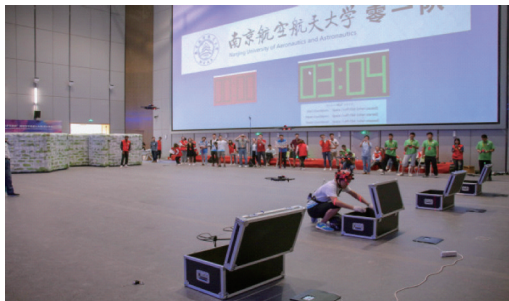
大学协办的第二届“无人争锋”挑战赛,计划于2020年6—8月择期举办。在首届赛事的成功基础上,做出了多项针对性的改进和提高。考核内容更贴近需求,增加了拒止环境、分布侦察、抵近跟踪等代表性科目,并首次增加虚拟竞赛,进一步聚焦智能无人机集群系统的主要科学问题,设置了拒止环境穿越竞速、分布侦察信息融合、目标跟踪集群围捕、空中回收自主对接、红蓝多机空中对抗5个比赛科目。截至2019年12月10日,共有来自62家单位的92只参赛队报名。

随着中国在无人机产业迅速发展以及消费级无人机产量逐年攀升,中国也开始了对无人机赛事发展模式的探索。2019年6月2—3日,第四届“全丰杯”无人机应用大赛在安阳市航空运动学校成功举办,大赛围绕植保无人机作业效率、飞行避障、精准降落等性能展开,吸引了涵盖国内无人机重量级企业的28支参赛队伍。2019年7月20日,由国家国防教育办公室指导,中国人工智能学会主办,中国人工智能学会智能系统工程专业委员会会同部分省份国防教育办公室承办的“2019全国无人机智能战术对抗大赛”在上海启动。大赛按大型、中

型、小型、微型无人机及其运用领域、特点设置比赛科目,分组、分域、分阶段进行比赛。2019年8月24—25日,2019年国际空中机器人大赛(亚太赛区)在昆明举行(图3(b))。来自宾夕法尼亚大学、密歇根大学、清华大学、浙江大学、北京航空航天大学 and 西北工业大学等在内的5个国家23所高校的27支代表队参赛。通过比赛培养了学生严谨的科学态度和团队合作精神,增强了学生创新意识、创新思维,以及运用知识、解决实际问题的能力。2019年11月16日至18日,“无微不至2019”全国微型智能无人机挑战赛在北京通用航空产业基地成功举办,来自全国高校、科研单位和无人机企业的近30家代表队踊跃参赛。该挑战赛以“微型、智能、创新”为主题,希望通过赛事高效推进微型无人机智能化发展水平,激发社会主体开展前沿关键技术研究的热情。2019年12月12日,2019世界无人机锦标赛在宁波象山开幕,来自全球31个国家和地区的112名运动员参赛。该赛事是国际航联官方的最权威、最专业、最高级别的无人机赛事,也是一个融合竞赛、展示、娱乐和尖端科技等内容的新型赛事。



(a) “无形截击-2019”比赛现场



(b) 空中机器人大赛现场

图3 无人机赛事

(图片来源:航天科工二院和南京航空航天大学新闻网)

4 促进无人机技术革新

随着新材料、新能源、智能制造以及人工智能技术的发展,无人机的性能不断提升与扩展,应用前景也将更为广阔。无人机在长航时、隐身性和垂直起降等方面将成为未来的发展趋势。

众所周知,动力系统是商业无人机最大的问题,传统电池极大地限制了无人机的飞行时间。因此,提高无人机续航能力是科学界在努力突破的课题,而燃料电池因能够显著提高续航时间,成为了商用和军用无人机的理想动力选择。英国燃料电池公司 Intelligent Energy 与韩国 MetaVista Inc 公司

共同宣布推出了全球首款使用液态氢为燃料的 MetaVista 无人机飞行器(图4(a))。装备有超轻量液态储氢罐的多旋翼无人机连续飞行时间延长至 10 h 50 min,打破此前续航飞行记录的同时,证明了液化氢比压缩氢拥有更强的续航能力。2019年6月22日,在第四届深圳国际无人机展览会上,韩国斗山摩拜创新公司正式推出了集成燃料电池、控制器和氢供应系统的燃料电池系统。此外,该公司研发的燃料电池系统荣获2020国际消费类电子产品展览会两项设计大奖。2019年9月,伦敦的 H2GO 动力公司成功完成了世界上首次氢动力3D打印无人机的飞行测试。该无人机利用3D打印轻质金属的先进设计技术,可使无人机总重量最高减少15%,大幅度提高了无人机的续航时间。中国已将氢能发展与燃料电池技术创新提升到国家战略高度,列为重点发展方向,这将进一步推动氢燃料与无人机技术和产业的发展。2019年12月举办了中国国际氢燃料电池无人机大会,通过促进氢燃料电池、无人机领域的国际交流、展示与合作,实现产业共赢。

近年来,仿生科技正在快速发展,尤其是在机器人行业,从蜘蛛到鸟类,从章鱼到蟑螂,各种生物为技术进步提供了源源不断的灵感,仿生科技也成为机器人技术发展最快的领域之一。2019年3月,耶鲁大学研究人员通过观察鸟类和蝙蝠,发现其在起飞和着陆时可利用自身结构来保存能量,据此研发出一款模仿蝙蝠爪子的新型无人机(图4(b)),其相关研究成果发表在《Science Robotics》期刊^[18]。研究者希望通过更好地了解蝙蝠的飞行机制,未来制造出能够在空中移动更快、风阻更小的无人机。2019年6月,在第五届俄罗斯军队装备与技术军需物资展览会上,俄罗斯推出了一款外形酷似猫头鹰的无人机。这款无人机不仅在机身设计方面尽可能地降低了雷达的反射面积,而且安装有摄影机与激光指示器,可用于火炮引导与航空侦察。针对无人机大载荷起飞距离长、小范围内快速起降难的问题,2019年2月一家南非初创公司 Passerine 设计出一款名为“麻雀”的货运无人机。该无

人机采用吹气襟翼技术,将引擎安装在机翼上部,并模仿鸟类用腿来实现起降。印第安纳州普渡大学的一个团队受昆虫在飞行中调整翅膀角度的启发,开发一种具有折叠臂的无人机,可帮助其在飞行中获得更好的性能,相关研究成果发表在《Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control》期刊上^[19]。

除了以上方式延长飞行时间和提高飞行性能外,通过研制新材料或对飞机构型加以特殊设计同样可以满足特殊情况下对无人机的需求。2019年4月9日,来自美国国家航空航天局(NASA)艾姆斯研究中心和麻省理工学院的工程师团队共同开发、测试了一种由数百个相同的微小聚合物点阵晶格组成的飞机机翼。这款机翼系统能够通过结构中的刚性和柔性部件改变整个或部分翼形,自动响应空气动力学负载条件的变化。2019年4月,美国贝尔公司开发出可扩展的模块化垂直起降无人机,能够运输医疗设备、弹药和水等有效载荷。同时可实现多旋翼飞行模式和固定翼飞行模式之间的灵活切换,提供比旋翼系统飞行时更有效的飞行性能。2019年7月,来自瑞士洛桑联邦理工学院的 Flybotix 团队研发出了一种利用先进稳定系统控制的双旋翼无人机构形。在同等条件下其续航时间比传统四旋翼无人机翻倍,并适用于诸如封闭管道等特殊使用场景。在 IROS 2019 大会上,加州理工学院和 NASA 喷气推进实验室的研究人员展示了一种名为 SQUID 的弹道无人机的原型。这是一种形似橄榄球的可折叠四旋翼无人机,可在海浪上波动的船只或是其他正在飞行的飞机上射出,并自行展开飞走,将在处理紧急事件中发挥重大作用。机艇协同自主起降是海空跨域无人系统的使能技术与前沿热点,如何实现准确、全自主、稳定可靠地完成无人机在无人艇上的自主起降极具挑战性。2019年1月14日,华中科技大学自动化学院在华中科技大学工业技术研究院组建的全自主无人艇创新团队,在广东东莞松山湖采用自主研发的 HUSTER-68 无人艇和无人机,成功完成了颠簸水面平台的机艇协同起降,如图4(c)所示。



(a) 液态氢无人机

(b) 仿蝙蝠无人机

(c) 机艇协同

图4 无人机新技术

(图片来源:Google网站、《Science Robotics》期刊和华中科技大学新闻网)

5 发展反无人机产业

近年来,随着无人机行业的迅猛发展以及逐步开放低空空域的政策影响,这类飞行器在给社会发展带来便利的同时,暴露出了严重的安全隐患,催生出反无人机产业,尤其是沙特石油设施被袭之后,各种反无人机技术手段愈发受到关注。

一项名为“可扩展效应网子弹头”的发明于2019年2月5日成功取得专利,这个弹头可由使用推进剂或压缩气体的枪口发射,在接近目标时对准无人机张开网子进行拦截。相比于其他拖网截取的反无人机技术,网子弹头的表现更好。2019年6月19日,美国国防部批准了第一款供地面作战人员使用的陆基激光器“利爪”原型机交付美国海军陆战队(图5(a)),用于反无人机任务测试。2019年10月3日,名为安德里尔工业公司的无人机企业公布了一款新式无人机“拦截者”。相较于多数采用“软杀伤”方式的反无人机系统,这种无人机利用先进机载传感器和地面监控系统,通过物理撞击的方式击落类似大小的无人机。2019年9月底,五角大楼告知美国国会,已采购一款使用能量脉冲击落无人机群的微波武器系统。在经过为期一年的评估后,该系统将有望成为有史以来美军列装的首款定向能防御武器。2019年10月14日,美国Cobham公司推出一款针对反无人机防空作战使用的下一代传感器定位系统SPS-1000。该系统可在恶劣陆空环境中精确截获、跟踪和定位各种传感器。此外,该定位系统最大

限度地利用了军用货架产品组件,降低了成本,缩小了交付周期,并实现了电子控制设备一体化。

为应对敌方巡航导弹和无人机,俄罗斯军方于2019年2月新组建了反无人机雷达“游击队”,配备了用于搜索低空和超低空飞行的战机、直升机、无人机和巡航导弹的“帮会2-2”低空雷达及防空武器自动化控制系统,可及时有效地采取必要措施击退巡航导弹和无人飞行器的攻击(图5(b))。2019年2月,德国最大的武器制造商DFS和Rheinmetall公司宣布,已完成一种高度自动化的反无人机解决方案的测试,验证了利用无人机来反无人机的可行性。在整个测试期间,利用现有的空中交通数据与先进的雷达系统、声学 and 红外传感器以及光学设备对可能的入侵者进行探测,随后利用其他无人机对其实施拦截或捕获,保障民用航空的空域安全性。2019年3月,韩国韩华系统公司研发一种包含双面板雷达的反无人机系统,并正在对第一个原型系统进行综合测试。该反无人机系统具有重量轻、耗电量低的特点,可检测距离为3 km范围内的苹果大小的物体,并能与韩华系统公司的Quantum Eye光电系统实现交互。2019年5月,加拿大AerialX公司正在研制一种名为“无人机子弹”的反无人机解决方案。该方案是一种微型导弹和四旋翼飞行器的结合体,其配备地摄像头和基于神经网络的组件,能够计算出打击敌方无人机所需的最佳飞行路径。与传统的武器不同,“无人机子弹”没有搭载任何爆炸物品,仅依赖动能杀伤无人机。



(a) “利爪”激光武器系统



(b) “帮会 2-2”低空雷达系统

图5 反无人机技术装备

(图片来源:Boeing 和 Google 网站)

6 加速无人机实战化

自 2001 年阿富汗战争以来,美国军方通过无人机多次完成战场侦察和目标打击任务。由于极高的性价比,无人机成为美国军方反恐战争的重要工具。然而,美国军方近年来逐渐丧失在军用无人机作战运用方面的垄断地位,俄罗斯、中国等国在军用无人机研发和实战化应用方面取得了令人瞩目的成就。

2019 年 2 月 15 日,美国通用原子公司完成了 MQ-9B“天空守护者”察打一体无人机一次演示验证。此次演示验证没有使用外场地面控制站,仅依靠卫星通信和该公司具有远程指挥控制的便携式笔记本电脑,在有效的减少系统占用空间的同时支持多任务控制。2019 年 3 月,美国空军宣布,其空军研究实验室的战略发展规划和实验办公室计划开发一款人工智能自主作战无人原型机,目前已向业界发出信息征询书,开展市场研究和作战概念分析,预计在 2023 年达到初始作战能力。2019 年 3 月 5 日,美国空军实验室宣布,由美国空军实验室和克瑞托斯无人机系统公司联合研发的远程、高亚音速无人机 XQ-58A“瓦尔基里”首飞成功^[20],并在 2019 年 6 月 11 日的第二次试飞中完成了所有测试目标^[21]。2019 年 9 月 19 日,美国波音公司宣布,美海军首架 MQ-25“黄貂鱼”隐身无人加油机在位于伊利诺伊州的圣路易斯试飞场成功完成首飞(图 6(a))^[22],此举意味着搭载有人战机的航母可从距

离假想敌海岸更远的区域起飞,躲避敌方陆基反航母弹道导弹等远程反舰武器,有效提高战场生存力。美国空军研究实验室的快速创新中心 12 月 9—11 日在犹他州的达格威试验场,在没有空中加油情况下完成了“超长航时无人机平台”约 2.5 d 的持续飞行试验。该平台由高性能、较经济、运动型商业机身组成,集成了自主起降系统,可搭载抗干扰 GPS 导航系统及其他任务载荷。作为军事实力与美国比肩的俄罗斯近年来也加快无人机的研发和试验工作,2019 年 2 月 17 日,俄罗斯著名武器制造商卡拉什尼科夫集团在阿布扎比国际防务展期间展示了一款用于打击地面目标的新型高精度“自爆式”无人机 KUB-BLA。这款无人机具有发射隐蔽、打击精度高、无噪音和便于使用等特点,可能将成为无人机领域“最有前景的方向”。2019 年 3 月 28 日,在俄罗斯东南部地区举行的大规模演习中,首次使用 2018 年底服役的“海雕-10”无人机提供的数据进行目标校准和毁伤评估。2019 年 8 月,俄罗斯第一款重型攻击型无人机“猎人 B”成功完成首飞。作为俄罗斯国防工业实体快速发展的成果,这款无人机采用飞翼布局,配备了多用途主动相控阵雷达,并应用特殊材料和涂层减少雷达探测。2019 年 9 月 27 日,“猎人 B”无人机还首次完成了与苏-57 战机进行编队联合飞行(图 6(b))。在未来作战模式中,有/无人机协同在弥补无人机执行特定任务时指挥决策能力不足的短板同时,提升整体集群的智能化水平和提高信息体系对抗的作战效

能^[23]。

随着强军兴军改革的不断深入,关键技术为牵引、科技创新为导向成为中国军队迈向世界一流军队的强大引擎,目前中国在无人机研发领域已逐渐走在世界前列。2019年4月7日,中国自主研发的彩虹-4无人机在西北某地完成了航空物探试验飞行,试验飞行结果表明,该无人机速度快、效率高,可在短期内获得大面积区域的探测资料。继FT-8D导弹靶试成功后,2019年9月23日航空工业集团研制的AV500BW无人直升机挂载两枚天雷II号激光制导导弹空中靶试取得圆满成功,进一步验证了该平台对各型武器载荷的良好适配性与作战能力。在庆祝中华人民共和国成立70周年国庆阅兵上首度公开亮相的攻击-11型无人隐身攻击机(图

6(c))和无侦-8型高空高速无人侦察机(图6(d))最为引世人瞩目。其中,攻击-11无人机采用飞翼式布局,可携带各类导弹对敌人纵深目标实施精确打击,执行制空突击、压制防空等作战任务,未来将可能与有人机在协同编队作战中发挥重要作用。无侦-8作为一款唯一黑色涂装的高空高速无人侦察机,主要是利用自身的超声速、隐身特点,对敌防护严密的战略、战役目标实施有效突防。同时利用配装的多种侦察设备获取高分辨率目标图像,为各级作战部队提供侦察和打击效果评估情报。在美国、欧洲、俄罗斯等都瞄准发展隐身高速无人机的背景下,这两款先进无人机作为中国制造和创新的代表,证明了中国无人机发展速度,其作战能力已走在世界前列。



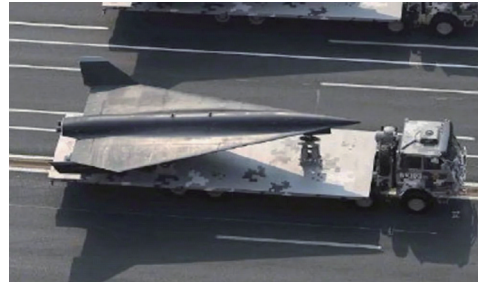
(a) “黄貂鱼”隐身无人加油机



(b) “猎人B”无人机与苏-57协同



(c) 攻击-11型无人隐身攻击机



(d) 无侦-8型高空高速无人侦察机

图6 新型无人机

(图片来源:Naval Technology、Jane's Website 和Google网站)

7 深化无人机集群作战

随着无人自主技术的应用,开发无人机自主集群系统已成为无人机的一个重要研究方向。通过紧密协作,无人机自主集群系统可以体现比人工系统更卓越的协调性、智能型和自主能力^[24]。因此,各国着手研究未来无人机集群作战的新思路,

力争在无人机作战领域抢占时代先机。

近年来,美军着眼于在复杂战场环境下执行作战任务的新需求及新特点,以全面应对多元化、多维度、多层面现实安全威胁为导向,以有效制衡潜在作战对象反介入/区域拒止能力为牵引,积极推进无人机集群技术研究^[25-26]。由美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects

Agency, DARPA)主导的“拒止环境中协同作战”(Collaborative Operations in Denied Environment, CODE)项目在完成前2个项目阶段的基础上,于2019年2月在Yuma基地使用6架装备有CODE兼容传感器的RQ-2“虎鲨”无人机和24架虚拟仿真无人机,对拒止环境中协同作战技术进行了演示验证。同时,该演示整合了雷神公司的软件、自主算法及约翰霍普金斯大学应用物理实验室的抗干扰网络,创建逼真虚实结合的测试环境(图7(a))。针对城市地区高层建筑、狭小空间和有限的视线造成的通信、传感和机动性受限等问题,旨在开发、演示验证100多个作战相关的集群战术,应用于无人机/车集群的“进攻蜂群战术”(offensive swarm-enabled tactics, OFFSET)项目,于2019年3月26日征集第4次“蜂群冲刺”方案,主要包括在OFFSET虚拟环境中开发合成技术和应用人工智能以发现并学习新的蜂群战术两个领域。DARPA在2019年5月6日发布了“空战进化”(Air Combat Evolution, ACE)项目公告,旨在研究在激烈的空中格斗情况下人-机协同作战效能。该项目将在模拟环境中验证飞行员可指挥多架无人机进行协同编队的能力(图7(b))。2019年8月,美国空军已正式将编号“X-61A”指定给“小精灵”(Gremlins)计划中的无人机,并在太空与导弹防御专题讨论会还展出了这款无人机的风洞模型。

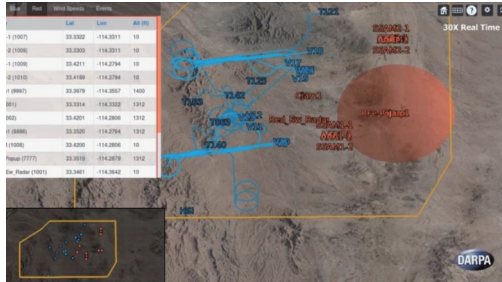
无人机集群作为一直是中国和美国两军备受关注的竞争项目之一,这些年中美两国在该领域你来我往,彼此交错领先。中国分别于2016年10月、2017年5月、2017年11月实现了67架、119架、200架固定翼无人机集群飞行试验。中国电子科技集团有限公司无人机集群创下的历史纪录使其成为中国“无人系统和智能装备”的典型代表。2019年10月20日,在第六届世界互联网大会上,中国电子科技集团有限公司发布了全球首个用于无人机集群系统的智能单元(图7(c))。该智能单元依托“网络+节点”的工作模式,可搭载电磁、光学、声学等多类型传感器,具备飞行控制、任务规划、智能决策、动态组网4大功能,充分发挥化整为零、聚零为整的优势特点,实现分布式监测、搜索、跟踪、指引

等功能,可应用于自然灾害治理、国土资源管理、生态环境保护、应急事件响应等领域。无人集群智能单元作为现代智能无人集群的“核心”,已装备于部分无人机集群系统,将改变传统无人机只有测控、无法组网的现状,是无人平台向智能化、网络化迈进的重要里程碑。除此之外,中国在无人机集群技术商业领域的探索和应用中有着不俗的表现。如:2019年7月18日,高巨创新和零度智控公司使用2100架无人机编队盛大演出献礼祖国70华诞,再次挑战世界纪录。2019年11月20日,世界5G大会在北京亦庄国际会展中心举行,首次基于5G网络的无人机编队飞行表演在会场上空绽放,庆祝5G大会顺利召开。除了中美之间的军事较量外,欧洲一些国家也陆续推出无人机群作战相关的计划或项目,加快在该领域的布局。据Air Force Technology网站2019年2月11日报道,英国计划部署具有网络能力的蜂群无人机中队,用于“迷惑”敌人和“击溃”敌方防空系统,英国蜂群无人机中队计划在2019年年底前完成部署^[27]。据Defense News网站2019年10月22日报道,在欧盟理事会轮值主席国芬兰的推动下,欧盟正推动实施旨在压制敌方防空系统的“自主学习无人机群”(SEAD Swarm)项目。该项目依赖于人工智能相关算法,以便让一群无人机可以识别防空系统的特征,在蜂群内部分享信息并制定一套打击敌方防御弱点的规划方案^[28]。

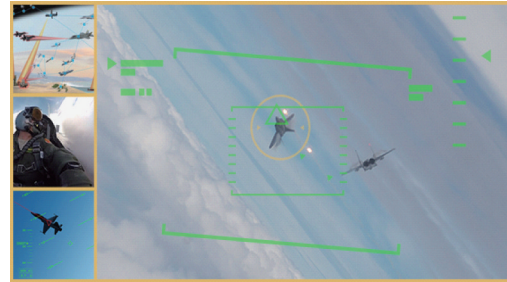
无人机集群作战这一改变传统作战方式的颠覆性作战理念,为战场设施防护带来了全新挑战。继2018年1月,俄军成功拦截了攻击叙利亚塔尔图斯海军基地和赫迈米姆空军基地的13架无人机集群攻击驻地后。2019年9月14日凌晨,沙特东部的一座油田和一家炼油厂遭到胡塞武装组织的18架无人机和7枚导弹的突然袭击(图7(d))。从单打独斗到协同攻击,此次袭击很好地诠释了现代战争中无人机集群作战运用,有两大点值得思考和借鉴。其一是无人机群协同作战,各型无人机围绕共同的作战目的,以目标为中心,自主适应、整体协同、联合行动,最终实现对打击目标的高度毁伤,有效地克服单个无人作战平台作战功能和作战能力有限的问题,使作战能力倍增;其二是无人机与巡

航导弹协同作战,在对方全方位、多层次的防御体系时,要实现对方关键目标的精确打击,需利用无人机与巡航导弹集群自主协同作战,充分发

挥无人机自主灵活和巡航导弹生存能力强等特点,实现武器平台的优势互补,极大提高巡航导弹饱和攻击的作战效能。



(a) CODE 仿真测试环境



(b) AEC 人-机协同作战虚拟环境



(c) 无人集群智能单元



(d) 沙特油田遇袭

图7 无人机集群作战

(图片来源: DARPA、中国电子科技集团有限公司和 Google 网站)

8 无人机关键技术不断突破

美国在已发布的《2005—2030 无人机系统路线图》中曾指出无人机自主控制能力的最高等级为集群自主控制,要求智能无人机集群系统可实现复杂环境下的多任务目标全自主规划。目前,中国和美国在智能无人机集群领域处于领先地位,要实现集群的完全自主控制还需要解决的关键技术主要包括:环境感知与认识、多机协同任务规划与决策、信息交互与自主控制、人机智能融合与自适应学习技术。

1) 环境感知与认知。

在复杂作战环境下执行多重任务时,要求智能无人机集群系统能够全面感知和了解复杂环境。同时在集群内部进行信息共享与交互以及辅助其他无人机进行任务决策,这是智能集群系统实现高等级自主控制的基础。环境感知的任务是利用集群中光电、雷达等任务载荷收集飞机所处环境信息

数据,从数据中发现规律和挖掘目标,进而识别目标、引导攻击,提高集群系统对目标环境态势的认识与理解,增强系统任务实现可靠性。环境感知与认识的关键技术包括数据采集、数学建模、信息融合与共享等方面,国内外相关领域专家正通过基于生物视觉认知机理的目标识别与环境建模、复杂环境感知与认识算法、非结构化感知方法等手段,实现能够适应智能无人机集群的环境感知与认识技术。

随着图像处理技术以及图像获取硬件的发展,计算机视觉技术逐渐引入到无人机的导航与控制中来,越来越多的无人机搭载视觉系统以利用其提供的导航信息。相较于传统的无人机自主飞行,在仅依赖于惯性导航系统、GPS 等提供的信息的前提下,其精度往往满足不了无人机导航的需要^[29]。美国麻省理工学院 How 团队^[30]抛出了多智能体的主动感知问题,描述了一个自主智能体主动地与另一个具有潜在敌对行为的智能体交互,同时考虑到其他智能体意图的不确定性,提出了一种结合置信空

间规划、生成对手模型和最大熵强化学习的随机置信空间策略。针对基于多视角观测数据融合的全局环境建模, Fathian 等提出了一种 CLEAR (consistent lifting, embedding, and alignment rectification) 算法保证数据一致性和提高融合精度^[31]。美国宾夕法尼亚大学 Taylor 团队阐述了一种开放式视觉计算机, 该计算机综合考虑了尺寸、重量、功耗和计算性能等重要因素, 支持 Falcon 250 四旋翼平台在室内和室外进行完全自主的高速视觉导航^[32], 如图 8 所示。瑞士洛桑联邦理工学院 Floreano 团队通过分析有限感知对群体行为的影响, 引入了不同的度量标准, 量化有限视觉感知的影响, 提出了一种减小视觉传感器有限视场对集群行为影响的方法^[33]。此外, 北京航空航天大学仿生自主飞行系统研究组关于基于视觉感知的理论方法和应用进行了研究, 如: 设计了一种基于无人机平台的双目视觉导航系统, 用于解决自主空中加油问题。该视觉算法包括目标跟踪、特征提取和姿态估计, 用于测量两架无人机之间的相对位置关系, 同时考虑了长距离和短距离两种情况。通过与其他姿态估计算法的比较实验, 验证了该算法应用于无人机空中加油的可行性和有效性^[34]。借鉴生物头眼协调运动灵活改变视线的神经控制机理, 构建智能仿生眼成为视觉控制研究的新热点, 提出了一种仿鹰眼对比度机制的合作目标检测方法, 用于纹理边缘抑制和目标显著轮廓提取。该方法在有效减少计算量的同时提高了特征提取的准确性, 并通过外场飞行测试验证了该视觉测量算法的可行性和有效性^[35]。视觉注意是视觉系统能够在复杂环境中检测潜在



图8 开放式视觉计算机^[32]

重要对象的一种机制, 但大多数计算视觉注意模型都是受哺乳动物视觉系统的启发而设计的。该研究组还在研究鸟类视觉系统基础上, 提出了一种用于视觉显着性检测的分层视觉注意模型。通过对比实验表明所提出的模型性能优于几种最新模型, 同时为无人机智能感知技术的突破提供了一条新的技术途径^[36]。

2) 多机协同任务规划与决策。

在应对未来强耦合、高动态的战场态势时, 要求智能无人机集群可以同时完成情报收集、监视、侦察以及多目标攻击等任务, 合理高效的任务规划方案可以充分发挥单机作战功效, 体现集群资源的智能化作战优势, 极大提高任务执行成功率和效率, 降低风险和成本。无人机集群任务分配一般按照保证最大益损比和任务均衡的原则进行, 综合考虑任务空间聚集性、单机运动有序性以及目标环境适应性, 避免单机资源利用冲突的同时以集群编队整体最优效率完成最大任务数量, 体现集群协同作战优势, 协同任务分配的关键技术在于其自主任务分配算法的研究。

来自美国麻省理工学院的 How 团队^[37]针对任务规划和决策问题展开了深入的研究, 提出了一系列相关的模型和方法, 如: 针对不确定环境下的分布式多智能体决策问题, 提出了一种基于宏观行为的分布式可观马尔可夫链决策算法, 与大多数专门针对特定问题方法不同, 所提算法可以综合控制策略, 探索协调可能性, 平衡不确定性、传感器信息和其他个体信息。针对局部环境可观和通信有限条件下的多智能体协调问题, 提出了一种基于强化学习的多智能体协调算法。研究了递归对多智能体性能和通信的影响, 证明了提出的算法框架不仅可以全局环境共享, 而且还可以处理资源限制的情况^[38]。瑞士洛桑联邦理工学院 Martinoli 团队提出了一种局部感知和不确定环境下的任务分配策略^[39]。与此同时, 其他研究者针对任务分配的算法开展了大量研究, 如: 斯洛文尼亚卢布尔雅那大学的 Guna 团队提出了一种基于强化学习的任务调度算法, 通过增强学习和环境信息, 使无人机具有实时学习和决策的能力, 可生成动态环境下的任务调

整策略,是一种适合无人机集群任务调度的可行方法^[40]。西北工业大学符小卫等提出了一种基于任务序列机制的多无人机任务和资源动态分配算法。通过建立任务序列,为每个无人机分割必要的任务时间和同步等待时间;对于新目标,每个无人机都会快速确定其可用时间段。该算法可以在资源有限的情况下,实现分布式无人机实时无冲突的任务分配^[41]。此外,基于多无人机协同的海上溢油点检测、灾害的搜索与救援、逃犯的搜索等问题在实际生活中有着广泛的应用价值。美国纽约州立大学的 Philip 等提出了一种分布式多无人机协同海上溢油测绘的方法。通过获取海上异常检测的图像组合提取知识,并在 10 个真实的漏油图像进行验证^[42]。近年来,复杂环境下的无人机协同目标搜索的研究已有很多,但关于有人与无人机协同搜索的研究相对很少。针对搜索逃脱罪犯的问题,浙江工业大学/杭州师范大学智能优化计算团队提出了一种基于混合进化算法的人与无人机协同搜索算法,可最大程度地减少抓捕罪犯的时间。该方法在测试中的表现优于其他主流的无人机搜索方法,为推动进化算法在人机协作调度问题中的应用提供良好的研究基础^[43]。

3) 信息交互与自主控制。

在复杂目标环境中,大规模智能无人机集群通过单机情报信息的实时共享与交互进行任务执行的调整、自主控制的迭代,以快速适应新环境、合理规划路径、高效完成任务。信息的交互可以辅助单机自主选择接受有用信息实现自主控制与任务调整,更是大规模集群避免碰撞以及合理规划任务的基础。集群无人机存在如何保持编队飞行、快速适应目标环境、系统故障“自愈”等问题,其涉及的关键技术包括:多机协调与交互技术、不确定环境下的实时航迹规划技术、编队运动协调规划与控制以及基于故障预测的任务规划技术等。

紫外线波长在 200~280 nm 之间,具有全天候运行、超视距通信、传播范围广、抗干扰能力强等优点,可以作为通信载体使用。西安理工大学赵太飞等提出了一种基于紫外线无线通信的三维定位算法,以保证其在复杂的大气环境中飞行或执行任务

中安全飞行,该算法具有定位精度高的优点,满足无人机集群编队避障的要求^[44]。对于无人机集群网络,需要及时通信以准确有效地完成一系列任务。中继技术将在无人机集群内部通信网络中发挥重要作用,可解决了无人机发射功率受限的问题,不同于与地面通信的中继模型,无人机机间通信网络中的中继选择面临诸如异构、动态等新的挑战。解放军理工大学的沈良团队提出了一种基于配对博弈的复杂中继模型,讨论分析了该模型在自组织无人机集群通信中的优势^[45]。意大利都灵理工大学 Primatesta 提出了一种基于城市环境的无人机风险感知的路径规划策略,目的是计算一条有效的路径,以最大程度地降低对人口的危害,加强在居民区飞行的安全性。所提出的方法使用了风险图量化风险,建立离散空间位置与合适的风险成本相关联,应用 Borderland 的算法来快速识别和调整仅由风险因素相关动态变化路径^[46]。针对多无人机、多个目标的跟踪、对峙协同航路规划问题, Babel 等提出了无人机与目标之间的最短飞行路径的规划算法。通过为无人机分配需要跟踪的目标,计算出相应的最短路径的同时,考虑了飞行器的运动学约束、禁飞区、威胁区以及无人机之间避撞等多种约束条件^[47]。研究者提出了一种基于多智能体系统框架下的分布式多无人机路径规划策略,利用粒子群优化算法,将路径规划问题视为在线优化问题处理。同时考虑了固定目标、移动目标、外部干扰等不同情况,在保证代价函数最小的同时,获得满足无人机集群编队控制、目标跟踪和避免碰撞的最佳路径^[48]。针对异构领导-追随者型系统,厦门大学罗德林团队设计了分布式自适应仿射编队协议。相较于现有的控制方法,在任意维空间中,该方法在处理运动约束问题时有明显优势^[49]。生物群体在分布式、自适应、鲁棒性等方面与无人机集群协调自主控制的要求相契合^[50],通过借鉴狼群觅食行为和严格的等级制度中蕴含的集群智慧,采用分布式策略,北京航空航天大学段海滨等设计了基于狼群行为机制的无人机协同任务分配方法,并利用多旋翼平台进行了飞行验证^[51]。

4) 人机智能融合与自适应学习。

集群无人机受机体性能限制,不具备远距离的高效作战任务能力。无人机系统的典型特征就是“平台无人,系统有人”,随着单机系统自主控制能力和智能化水平的提高,通过人机系统智能融合和集群自适应学习,可以实现智能集群和有人系统的高效协同作战,极大增强集群无人机作战能力,其中涵盖的关键技术包括:人机交互、人机功能动态分配、人机综合显控技术、无人机自主学习能力/推理能力提升、平台状态/战术态势/任务协同综合显示等。

大多数人机界面都需要努力的训练和持续的认知,获取对机器人的状态及其环境的有限程感知。来自瑞士洛桑联邦理工学院的 Floreano 团队使用一个商用飞行模拟器,通过将人类动作映射到非拟人化的机器人上,使其可以跟踪人手的运动并提供触觉和视觉反馈^[52]。人机智能融合与认知学、人机工程学、心理学等诸多学科领域有密切的联系。Floreano 开发了一款飞行夹克,通过将一组封闭的压在皮肤上气袋,提供躯干的触觉反馈,以产生驾驶无人机时的气压感,从而增强虚拟现实或远程操作中用户的状态感知,实现让双手自由操作和通信^[53-54],如图9所示。类似通过硬件来提高人机交互体验的方式还有很多,如:Zhang等^[55]提出了一种基于射频技术的人与无人机交互的系统,依靠无源射频识别技术来精确跟踪手持式控制器的姿态,并将姿态信息传输无人机完成导航。该系统具有操作简便、使用方便等特点,可快速、精准地实现无人机室内的导航。除了人机交互方面,无人机自主学习、推理能力提升十分重要。如:为了有效解决日益增长的人与多无人机互动问题, Singh等^[56]回顾了提高无人机集群系统可靠性的方法,主要分为两大类,即:提高无人机的自主控制和集群协调能力的方法和以人为中心的无人机集群行为监控的方法。还分析了人-无人机互动问题的现状、发展以及如何从飞行员的生理状况的角度改善交互作用。考虑到无人机在与人类互动的应用中显示出潜力, Treurniet等^[57]提出了一种学习方法,用于在人与无人机之间的自动交互、上下文关联进行情感识别和表达,并演示了如何应用情感计算来实现更

自然的人机交互,即:无人机执行面部情感估计,使用小型显示器显示情感表达。通过进一步的测试完善交互作用,可建立长期交互作用中情绪交互的演变方式。美国佐治亚理工学院陶秋阳团队^[58]利用微型自主飞艇平台在室内空间人机交互实验,通过搭载的摄像头实时收集视频流,利用设计的人机交互程序和学习算法训练深度神经网络,完成人类用户的面部、手部动作的检测和跟随。在互动过程中,人类用户不需要佩戴任何其他跟踪设备,同时飞艇通过显示视觉符号将其意图传达给人类用户,该方式将有效改善飞艇与人之间的交互体验。作为无人机领域挑战之一的单用户同时监督多架无人机问题, Ilbeygi等^[59]提出了一种新的智能自适应接口。该接口不仅拥有全面的体系架构,而且还具有一些显著功能。例如:提供用于控制多无人机的用户界面;利用用户认知模型适时传递正确的信息,以及通过系统行为指导和帮助用户选择正确的决定等。随着无人工监控的智能系统执行复杂任务的能力越来越强,新的人机交互概念也应运而生。Van Diggelen等构想了一种新颖的交互形式,即:人与机器表现为地位平等的合作伙伴,共同完成某项任务^[60]。

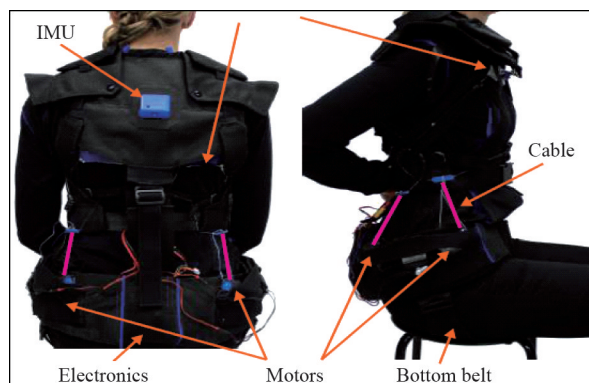


图9 人机交互飞行夹克^[56]

9 结论

从布局无人机新战略、强化无人机管控政策、推动无人机相关赛事、促进无人机技术革新、发展反无人机产业、加速无人机实战化、深化无人机集群智能、无人机关键技术不断突破多个角度,系统

分析总结了2019年无人机热点及发展新态势。随着无线充电、视觉避障、手势控制、5G通信、集成芯片等关键技术的不断突破,无人机性能将实现大幅提升,随身携带、简易操作、长续航能力、自主反应将成为主要特点。5G技术的发展将大大改进无人机的连接速度,集无线通信、传感器集成和空间定位等功能于一体的高性能芯片,能够使无人机获得和个人电脑一样的处理能力。

中国作为无人机快速发展的后起之秀,在国家科技部、国家发展和改革委员会、国家自然科学基金委员会等支持下,中国学者和广大科研人员稳扎稳打取得了令人瞩目的成绩,目前正瞄准颠覆性技术和重大型号应用开展攻关^[3]。中国正逐步形成一条新的产业链条,从研究、制造、材料、信息、电子等无人机技术领域延伸到触及社会生产、生活等更广更深的层面。正如飞行力学与控制专家、中国工程院院士赵煦曾所言,“通过理论和方法上研究的突破,为无人机系统的自主化、综合化和智能化提供了重要技术支撑,也推动了无人机应用的蓬勃发展”^[61]。

根据2019年无人机技术的发展态势,无人机自主集群智能仍然是无人机的一个重要研究发展方向,涉及集群密集编队和精确避障、协同搜索识别和定位、集群协同策略和动态任务规划、空中精确定位和空中预对接等方面,而人工智能与无人机的结合将成为提升无人机自主能力和作战效能的重要手段和必经之路。未来的智能无人机将具备态势感知、信息融合、自主决策、自主控制和组网协同能力,进而实现自主、高动态与分布协同作战。智能态势感知、智能决策、智能控制和人机交互与通信等关键核心技术的不断成熟进步,将使无人机的自主性能和作战效能进一步实现质的飞跃。

参考文献(References)

- [1] 段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] 段海滨, 李沛. 基于生物群集行为的无人机集群控制[J]. 科技导报, 2017, 35(7): 17-25.
- [3] 段海滨, 申燕凯, 王寅, 等. 2018无人机领域热点评述[J]. 科技导报, 2019, 37(3): 82-90.
- [4] Trump D. Executive Order on Maintaining American Leadership in Artificial Intelligence[J]. Executive Order, 2019(5): 11.
- [5] US air force science and technology strategy[EB/OL]. (2019-04-17)[2019-12-12]. <https://www.af.mil/Portals/1/documents/2019%20SAF%20story%20attachments/Air%20Force%20Science%20and%20Technology%20Strategy.pdf>.
- [6] 《数据和人工智能经济发展计划》[EB/OL]. (2019-02-15)[2019-12-12]. <https://www.chinainfo.org.cn/article/detail?id=230194>.
- [7] 《新一代人工智能发展规划》[EB/OL]. (2017-07-20)[2019-12-12]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-07/20/content_5212064.htm.
- [8] 全球人工智能战略与政策观察(2019)[EB/OL]. (2019-9)[2019-12-12]. <http://aiaa.org.cn/uploadfile/2019/0829/20190829102318489.pdf>.
- [9] 深圳市新一代人工智能发展行动计划[EB/OL]. (2017-07-20)[2019-12-12]. http://www.sz.gov.cn/zfgb/zcjd/2019-09/t20190918_18215925.htm.
- [10] “十三五”国家战略性新兴产业发展规划[EB/OL]. (2016-11-09)[2019-12-12]. http://www.moe.gov.cn/jyb_sy/sy_gwywj/201612/t20161220_292496.html.
- [11] 四川省通用航空产业发展规划(2019—2025年)[EB/OL]. (2019-07-19)[2019-12-12]. http://fgw.sc.gov.cn/sf-gw/gjscopydt/2019-07/19/content_6d4f831931bc465db5f0-1ec89c0f5a1a.shtml.
- [12] 工业级无人机投资白皮书(2019)[EB/OL]. (2019-11-18)[2019-12-12]. <http://www.dooland.com/magazine/128688>.
- [13] 深圳市民用微轻型无人机管理暂行办法[EB/OL]. (2019-01-03)[2019-12-12]. http://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxgj/zwdt/201901/t20190103_15219394.htm.
- [14] 浙江省无人驾驶航空器公共安全管理规定[EB/OL]. (2019-04-04)[2019-12-12]. http://www.zj.gov.cn/art/2019/4/4/art_1554467_32409199.html.
- [15] 特定类无人机试运行管理规程(暂行)[EB/OL]. (2019-06-25)[2019-12-12]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/JYTNDf/201910/t20191028_199137.html.
- [16] 民用机场无人驾驶航空器系统监测系统通用技术要求[EB/OL]. (2019-08-05)[2019-12-12]. <http://www.chinaairports.org.cn/>.
- [17] 轻小型民用无人机飞行动态数据管理规定[EB/OL]. (2019-11-05)[2019-12-12]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/201911/P020191120352957148255>.

- pdf.
- [18] Hang K Y, Lyu X M, et al. Perching and resting—A paradigm for UAV maneuvering with modularized landing gears[J]. *Science Robotics*. 2019, 4(28): 15–23.
- [19] Xiong H, Hu J, Diao X M. Optimize energy efficiency of quadrotors via arm rotation[J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 2019, 141(9): 12–21.
- [20] US air force ‘s unmanned XQ–58A valkyrie performs first flight[EB/OL]. (2019–3–8)[2019–12–12]. [https://www.janes.com/article/87107/us-air-force-s-unmanned-xq-58a-Valkyrie-performs-first-flight](https://www.janes.com/article/87107/us-air-force-s-unmanned-xq-58a- Valkyrie-performs-first-flight).
- [21] US air force XQ–58A valkyrie completes second flight [EB/OL]. (2019–6–17)[2019–12–12]. <https://www.janes.com/article/89318/us-air-force-xq-58a-Valkyrie-completes-second-flight>.
- [22] Stingray unmanned tanker flies for first time[EB/OL]. (2019–9–19)[2019–12–12]. <https://www.janes.com/article/91420/stingray-unmanned-tanker-flies-for-first-time>.
- [23] 牛轱峰, 沈林成, 李杰, 等. 无人–有人机协同控制关键问题[J]. *中国科学(信息科学)*, 2019, 49(5): 538–554.
- [24] 申燕凯, 段海滨, 邓亦敏, 等. 仿鸽群被动式惯性应急避障的无人机集群飞行验证[J]. *中国科学(信息科学)*, 2019, 49(10): 1343–1352.
- [25] 党爱国, 王坤, 王延密, 等. 无人机集群作战概念发展对未来战场攻防影响[J]. *战术导弹技术*, 2019, 5(1): 37–41.
- [26] 段海滨, 邱华鑫, 陈琳, 等. 无人机自主集群技术研究展望[J]. *科技导报*, 2018, 36(21): 90–98.
- [27] UK announces plans to develop swarm squadrons of drones[EB/OL]. (2019–2–12)[2019–12–12]. <https://www.airforce-technology.com/news/uk-swarm-squadrons-drones/>.
- [28] Europeans propose siccing self–learning drone swarms on air defenses[EB/OL]. (2019–10–22)[2019–12–12]. <https://www.defensenews.com/global/europe/2019/10/22/europeans-propose-siccing-self-learning-drone-swarms-on-air-defenses/>.
- [29] Sun Y B, Deng Y M, Duan H B. Bionic visual close–range navigation control system for the docking stage of probe–and–drogue autonomous aerial refueling[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019(9): 136–149.
- [30] Shen M C, How J P. Active Perception in adversarial scenarios using maximum entropy deep reinforcement learning[J]. *arXiv*, 2019(1902): 05644.
- [31] Fathian K, Khosoussi K, Tian Y L, et al. CLEAR: A consistent lifting, embedding, and alignment rectification algorithm for multi–view data association[J]. *arXiv*, 2019 (1902): 02256.
- [32] Quigley M, Mohta K, Shivakumar S S, et al. The open vision computer: An integrated sensing and compute system for mobile robots[C]//International Conference on Robotics and Automation 2019, Montreal, Canada: IEEE, 2019: 1834–1840.
- [33] The influence of limited visual sensing on the reynolds flocking algorithm[C]//Third IEEE International Conference on Robotic Computing 2019, Naples, Italy: IEEE, 2019: 138–145.
- [34] Xu Y, Duan H B. On–board visual navigation system for unmanned aerial vehicles autonomous aerial refueling[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 233(4): 1193–1203.
- [35] Duan H B, Xin L, Chen S J. Robust cooperative target detection for a vision based UAVs autonomous aerial refueling platform via the contrast sensitivity mechanism of eagle’s eye[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2019, 33(3): 18–30.
- [36] Wang X H, Duan H B. Hierarchical visual attention model for saliency detection inspired by avian visual pathways[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, 6(2): 540–552.
- [37] Amato C, Konidaris G, Kaelbling L P, et al. Modeling and planning with macro–actions in decentralized POMDPs[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2019 (64): 817–859.
- [38] R–MADDPG for partially observable environments and limited communication [EB/OL]. (2019–5–5)[2019–12–12]. https://openreview.net/pdf?id=Ske_NJK2s4.
- [39] Talebpour Z, Martinoli A. Adaptive risk–based replanning For human–aware multi–robot task allocation with local perception[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(4): 3790–3797.
- [40] Yang J Y, You X H, Wu G X, et al. Application of reinforcement learning in UAV cluster task scheduling[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2019(95): 140–148.
- [41] Fu X W, Feng P, Gao X G. Swarm UAVs task and resource dynamic assignment algorithm based on task sequence mechanism[J]. *IEEE Access*, 2019(7): 41090–41100.
- [42] Philip O, Zachary B, Souma C. Distributed operation of

- collaborating unmanned aerial vehicles for time-sensitive oil spill mapping[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019(46): 52–68.
- [43] Zhang Y J, Du Y C, Ling H F, Sheng W G, et al. Evolutionary collaborative human-UAV search for escaped criminals[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2019(6): 1.
- [44] Zhao T F, Yu X X, Liu P, et al. Ultraviolet anti-collision and localization algorithm in UAV formation network[J]. *Optik*, 2019, 192: 162919.
- [45] Liu D X, Xu Y H, Wang J L, et al. Self-organizing relay selection in UAV communication networks: a matching game perspective[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(6): 102–110.
- [46] Primatesta S, Guglieri G, Rizzo A. Risk-aware path planning strategy for UAVs in urban environments[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019, 95(2): 629–643.
- [47] Babel L. Coordinated target assignment and UAV path planning with timing constraints[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019, 94(3–4): 857–869.
- [48] Belkadi A, Abaunza H, Ciarletta L, et al. Design and implementation of distributed path planning algorithm for a fleet of UAVs[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(6): 2647–2657.
- [49] Xu Y, Luo D L, You Y C, et al. Distributed adaptive affine formation control for heterogeneous linear networked systems[J]. *IEEE Access*, 2019(7): 23354–23364.
- [50] 段海滨, 张岱峰, 范彦铭, 等. 从狼群智能到无人机集群协同决策[J]. *中国科学(信息科学)*, 2019, 49(2): 1–8.
- [51] Duan H B, Yang Q, Deng Y M, et al. Unmanned aerial systems coordinate target allocation based on wolf behaviors[J]. *Science China Information Sciences*, 2019, 62(1): 1–3.
- [52] Cherpillod A, Floreano D, Mintchev S. Embodied flight with a drone[C]//Third IEEE International Conference on Robotic Computing 2019. Naples, Italy. IEEE, 2019: 386–390.
- [53] Rognon C, Koehler M, Duriez C, et al. Soft haptic device to render the sensation of flying like a drone[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(3): 2524–2531.
- [54] Rognon C, Koehler M, Floreano D. Perception of a wearable haptic feedback device to render the sensation of flight[C]//IEEE World Haptics Conference 2019, Tokyo, Japan: IEEE, 2019: 1–6.
- [55] Zhang J, Yu Z T, Wang X Y, et al. Rfhui An Rfid based human-unmanned aerial vehicle interaction system in an indoor environment[J]. *Digital Communications and Networks*, 2019, In press.
- [56] Singh G, Roy R N, Chanel C P C. Towards multi-UAV and human interaction driving system exploiting human mental state estimation[EB/OL]. (2019-03-20) [2019-12-12]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02042960/document>.
- [57] Treurniet T, Bai L, Campo S À, et al. Drones with eyes: expressive Human-Drone Interaction[EB/OL]. (2019-05-14)[2019-12-12]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02128380/document>.
- [58] Yao N S, Tao Q Y, Liu W Y, et al. Autonomous flying blimp interaction with human in an indoor space[J]. *Front Inform Technol Electron Eng*, 2019, 20(1): 45–59.
- [59] Ilbeygi M, Kangavari M R. A new single-display intelligent adaptive interface for controlling a group of UAVs[J]. *Journal of AI and Data Mining*, 2019, 7(2): 341–353.
- [60] Van Diggelen J, Barnhoorn J S, Peeters M M M, et al. Pluggable social artificial intelligence for enabling human-agent teaming[J]. *arXiv preprint arXiv*, 2019, 1909.04492, 2019.
- [61] 赵煦. 走向智能自主的无人机控制技术[J]. *科技导报*, 2017, 35(7): 1.

Review of technological hotspots of unmanned aerial vehicle in 2019

DUAN Haibin¹, SHEN Yankai¹, ZHAO Yanjie², FAN Yanming³, WANG Yin⁴, NIU Yifeng⁵,
WEI Chen¹, LUO Delin⁶

1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 10083, China
2. China Academy of Electronics and Information Technology, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100041, China
3. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110035, China
4. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 21006, China
5. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China
6. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China

Abstract Under the promotion of science and technology innovation and relevant policies, the UAV industry will gain new vigor and vitality. In 2019, unmanned aerial vehicle (UAV) autonomous control and application technology has achieved great progress and presents some new trends in the meantime. This paper summarizes and analyzes the hot topics and the new development trends of UAV in 2019 from the viewpoints including UAV new strategies, UAV competition events, technological innovations and practical applications. As a subversive technology and combat operational concept, UAV swarm intelligence will become an important research direction for future UAV development.

Keywords unmanned aerial vehicle; autonomous control; swarm intelligence; technological hotspots ●



(责任编辑 徐丽娇)