

无人机自主集群技术研究展望

段海滨,邱华鑫,陈琳,魏晨

北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,飞行器控制一体化技术国防科技重点实验室,北京 100083

摘要 动态不确定环境和复杂任务决定了无人机系统势必朝着集群化、自主化和智能化方向发展,具备共识自主性的无人机集群可无需任何集中规划或直接通信完成复杂智能行为。从无人机自主性内涵出发,讨论了无人机自主集群的概念、特点、优势及可能的作战形式,从人机共融、变体设计、人工智能和集群对抗方面探讨了无人机自主集群的发展趋势及无人机集群应对反无人机技术的必要性,从军用和民用领域分析了无人机自主集群的可能应用前景,从战略规划、研发模式、系统协调、交叉学科、国防应用及市场培育等方面探讨了无人机自主集群技术的发展方向。

关键词 无人机;自主集群;共识自主性;人工智能;人机共融

从明朝万户飞天,到达·芬奇扑翼机草图,再到莱特兄弟“飞行者1号”,人类的飞天梦经过一代代人的大胆设想与不懈努力已最终实现。随着数字时代的到来,无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)应运而生,它打破了曾经仅有少数人可以征服天空的固有格局。无人机,作为一种“机上无人,系统有人”的无人驾驶飞行器^[1],在执行枯燥、恶劣和危险(the dull, the dirty and the dangerous, 3D)任务^[2]时,相比有人机具有更大的优势。

无人机的发展历史可以追溯到1914年,一项名为“AT计划”的军事绝密实验在英国悄然展开,该项计划的前期实验虽未取得成功,却掀起了航空发展史上的无人机热潮。3年后,美国成功使用自动陀螺稳定器改装Curtis N-9型教练机实现对其的无线电控制,第一架无人机就此诞生。1985年,中国第一架无人机——北京5号,历经坎坷终于问世。中国无人机发展虽然起步较晚,但发展迅速,如今中国生产的各型无人机,如被称为中国版“收割鹰”无人机的“彩虹四号”、“翼龙II”中

空长航时察打一体无人机、大疆公司推出的定位于专业级航拍的精灵(Phantom)系列无人机,在国际市场得到广泛认可,销量不断增加。

富于幻想的人类从未停止探索的脚步,今天他们又开始脑洞大开,希望无人机群可以像鸟群一样群集飞行,即开发并实现类似自然界中生物群体系统一样的无人机自主集群系统^[3-5]。法国动物学家Grassé基于白蚁筑巢行为,提出了共识自主性(stigmergy)概念^[6]:一种个体间间接协调的机制,即无需任何集中规划以及直接通信完成复杂智能活动。这是自主集群概念开始走入人类视野并逐步发展的开端。从生物延展到无人机,自主集群的概念亦在不断演化与丰富。无人机自主集群是大量自驱动系统的集体运动,集群内的无人机间通过信息的传输与合作突现出智能,具备一定程度的共识自主性。具体来说,无人机自主集群飞行,就是大量具有自主能力的无人机按照一定结构形式进行三维空间排列,且在飞行过程中可保持稳定队形,并能

收稿日期:2018-07-05;修回日期:2018-10-16

基金项目:国家自然科学基金重点项目(61333004)

作者简介:段海滨,教授,研究方向为无人机仿生集群飞行控制、计算机仿生视觉和仿生智能计算,电子信箱:hbduan@buaa.edu.cn

引用格式: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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.21.012

根据外部情况和任务需求进行队形动态调整,以体现整个机群的协调一致性。无人机自主集群的内涵在“数”“价”“质”“变”4个方面有别于传统的多架无人机协同:“数”是指二者数量规模不在一个量级,集群一般指几十架甚至上百架无人机;“价”是指二者平台造价不在一个水平,组成集群的单无人机平台价格低廉,可大量装备,使用时即使有损失,也不会过于惨重,故可大胆使用;“质”是指二者技术水平差距大,二者在智能传感、环境感知、分析判断、网络通信、自主决策等方面均不在一个层次,无人机自主集群是有很强的智能涌现的共识自主性;“变”是指二者适变和应变能力差距大,无人机自主集群可针对威胁等突发状况进行复杂协作、动态调整以及自愈组合。

1 无人机自主集群

1.1 无人机自主性

日益复杂的任务与环境决定了无人机系统必须具备很高的自主性^[7-10]。无人机的自动控制与自主控制的主要区别在于:自动控制是系统按照指令控制执行任务,而系统本身并没有决策与协调的能力;而自主控制则需要无人机自身在必要的时刻做出决策。因此,无人机自主控制应该使无人机具有自治的能力,必须能够在不确定对象和环境条件下,在无人参与的情况下,持续完成必要的控制功能。自主性、机载信息获取、传输及其应用能力将是未来无人机在动态战场环境下完成复杂任务的关键。

美国致力于打造无人机自主集群系统,力保军事技术全球领先。美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)、海军研究局等机构,在无人机集群高风险/高回报的概念验证研究方面成果显著^[11]。2005年8月,美国国防部发布的《无人机系统路线图 2005—2030》(图1)将无人机自主控制等级分为1~10级,包括单机自主(遥引导、实时故障诊断、故障自修复和环境自适应、机载航路重规划)、多机自主(多机协调、多机战术重规划、多机战术目标)、集群自主(分布式控制、群组战略目标、全自主集群)3个层面,并指出“全自主集群”是无人机自主控制的最高等级,预计2025年后无人机将具备全自主集群能力^[12,13]。2016年5月,美国空军发布了《小型无人机系统飞行规划 2016—2036》(图2),从战略层面肯定了小

型无人机系统的前景和价值^[14]。规划对“蜂群”、“编组”、“忠诚僚机”三种集群作战概念进行了阐述,其中“编组”是人对人,“忠诚僚机”是人对机,“蜂群”是机对机,从侧面印证了无人机集群发展的重要性。2018年8月,美国国防部发布了《无人系统综合路线图 2017—2042》,在新版路线图中再次强调了自主性对于加速无人系统领域进步的重要作用,即自主性技术的发展可极大提高人和无人系统的效率和效能,是重要的力量倍增器,将彻底改变作战概念^[15]。

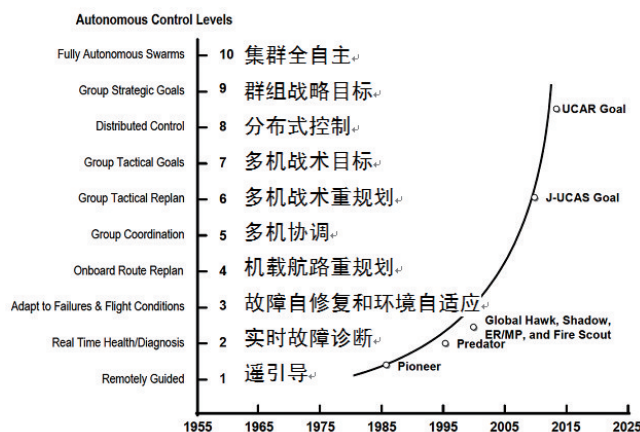


图1 无人机系统路线图(2005—2030)

Fig. 1 Unmanned aircraft system roadmap (2005—2030)

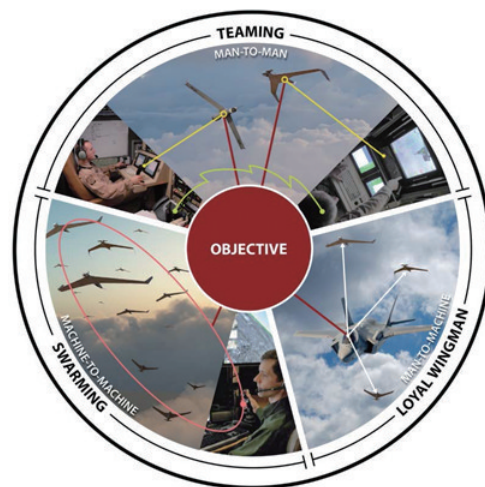


图2 小型无人机系统飞行规划(2016—2036)

Fig. 2 Small unmanned aircraft systems flight plan (2016—2036)

关于无人机自主性评价的方法除《无人机系统路线图 2005—2030》中采用的等级法外,还有双坐标轴法、三坐标轴法、查表法、公式法等。评定无人机的自主等级,实际上是评估无人机在完成特定任务过程中所呈现的自主能力^[16]。因此,可以将无人机的关键技术

作为其自主性的评价项目,构建图3所示的蛛网模型:从原点往外辐射出代表评价项目或关键技术的若干条轴,每个项目都有若干个表征技术成熟程度的等级,对于每一个无人机系统,将其在每条轴上对应的等级依次连接起来,即可用类似蛛网的纬线评价该无人机系统的自主性。

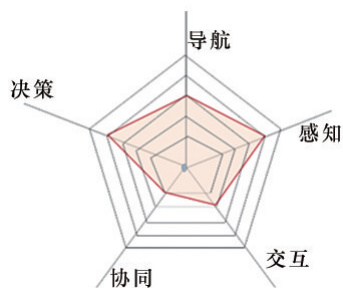


图3 自主性评价的蛛网模型

Fig. 3 Cobweb model of autonomy assessment

通过探讨无人机自主性的内涵和评价方法可知,自主表达的是行为方式,由自身决策完成某行为^[17]。自主不同于智能,智能是实施行为的能力,行为过程符合自然规律。二者间存在紧密关联:1) 自主在前,智能在后,二者相辅相成;2) 自主未必智能,但自主希望有智能;3) 智能依赖自主,智能的等级取决于自主权的高低。无人机智能水平可划分为3个层级,与美国国防部《无人机系统路线图2005—2030》中的无人机自主控制等级的对应关系如下:第1层级高可靠活着包含遥引导、实时故障诊断、故障自修复和环境自适应、机载航路重规划;第2层级高品质工作包含多机协调、多机战术重规划、多机战术目标;第3层级为集体使命高效工作包含分布式控制、群组战略目标、全自主集群。无人机自主控制技术按照人类智能的一般发展路径可从“智商”、“情商”和“逆商”3方面提出对应的发展要求^[18]:“智商”对应无人机个体能力,即计算和决策方面的无人机自主控制技术,例如航路规划、舰载起降、对地攻击、空战决策等;“情商”对应无人机群体融合能力,即高带宽互联和互操作类技术,例如无人机协同编队、有人/无人协同飞行、协同侦查/打击等;“逆商”对应无人机应对非预期状况的能力,即高容错和提高环境适应性类技术,例如健康管理、故障重构、容错控制、碰撞检测与规避等。从目前所能达到的技术水平来看,真正实现复杂动态环境下无人机的自主控制是一项具有挑战性的技术难题。

1.2 无人机自主集群内涵

随着无人自主技术的深化应用,开发无人机自主集群系统已成为无人机的一个重要发展方向,通过紧密协作,无人机集群系统可以体现出比人工系统更卓越的协调性、智能性和自主能力^[19]。无人机自主集群具有以下特点:可有效解决有限空间内多无人机之间的冲突;可以低成本、高度分散的形式满足功能需求;可形成动态自愈合网络,通过去中心化自组网实现信息高速共享、抗故障与自愈;具有分布式集群智慧,可通过分布式投票解决问题,且往往该种方式的正确率更高;可采用分布式探测方式,提高主动与被动探测的探测精度。

鉴于无人机自主集群所具备的以上特点,无人机自主集群势必成为未来作战的主流趋势(图4)。无人机自主集群作战是指一组具备部分自主能力的无人机系统通过有人或无人操作装置的辅助,在一名高级操作员监控下,完成作战任务的过程。无人机自主集群作战优势可概括为以下5点:1) 在去中心化的无人机集群作战中,不存在某一个体处于主导地位,任一个体故障均不影响群体功能;2) 集群内的所有个体仅通过观察临近个体位置,控制自身行动,即可实现实时的自主协同;3) 集群具有强大的复原能力,当集群受外力发生改变时,会快速自动形成新结构,并保持稳定;4) 集群能够克服个体能力的不足,通过协同实现整体能力放大;5) 集群作战运用具有较低决策门槛和政治风险的优势,无人机集群作战有望实现低成本低损失。

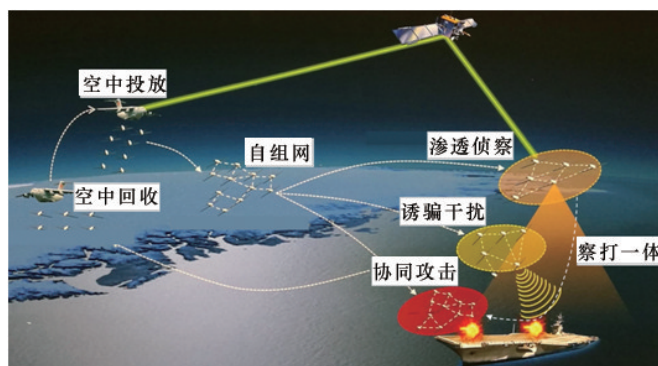


图4 无人机自主集群作战模式

Fig. 4 Unmanned aerial vehicle autonomous swarm combat form

综上所述,采用无人机自主集群作战方式,将逐步改变作战形态,其应用形式大致可以归纳为以下4点。

1) 渗透侦察:无人机集群内平台轻小,节点雷达散射截面积较小,且可任意拆分形成小的群组从多个方向渗透,隐蔽性和迷惑性较强,有利于突破敌方防空体系,可进行抵近侦察,通过集群机间链通信中继方式接力向后方控制与指挥中心传回情报。

2) 诱骗干扰:采用无人机集群充当诱饵或干扰机,替代隐身轰炸机或战斗机直接进入战场的传统作战方式,可引诱敌方防空探测设备开机工作从而暴露阵位,消耗敌方防空兵器;此外,可携带电子干扰设备,对敌方预警雷达、制导武器等进行更加抵近的电子干扰压制欺骗。

3) 察打一体:无人机集群可以根据任务需要通过灵活配置集群内平台的侦察探测、电子干扰、火力打击力模块,可形成侦察-打击编队,对关键或高危目标的薄弱部位进行实时侦察打击,以达到出其不意的作战目的。

4) 协同攻击:无人机集群可作为前沿作战编队,由有人机控制,并掩护有人机安全,为有人机发射的大吨位防区外导弹提供精确制导信息,用以目标指示,实现有人无人共融作战;此外,运用复眼战术,利用数量众多的具有自主控制能力的无人机组成集群,可进行全方位、多角度的饱和攻击,实现局部“以多打少”的对抗形式,使敌方难以应对。

2 发展趋势

在现有的多机协同基础上,无人机自主集群系统日益复杂(图5)^[20]。在成员数量方面,无人机集群系统将从传统多机协同中的数架无人机拓展至几十架甚至是成百上千架无人机。在平台自主水平方面,无人机集群系统将从仅可执行侦察监视等简单任务发展到可完成非结构化环境下的复杂对抗性任务。在平台异构性方面,无人机集群系统将从单一的平台载荷发展到多任务领域下的异构平台和载荷^[21]。在集群复杂度方面,无人机集群系统将从简单的领导者/跟随者的交互发展到自组织、分布式自主协作。在人-集群交互模式方面,无人机集群系统将从简单的遥控模式发展到人-集群智能交互模式。具体来说,无人机自主集群系统具有如下发展趋势。

2.1 无人机和有人机共融集群

由于无人机对战场态势的感知与实时决策能力还

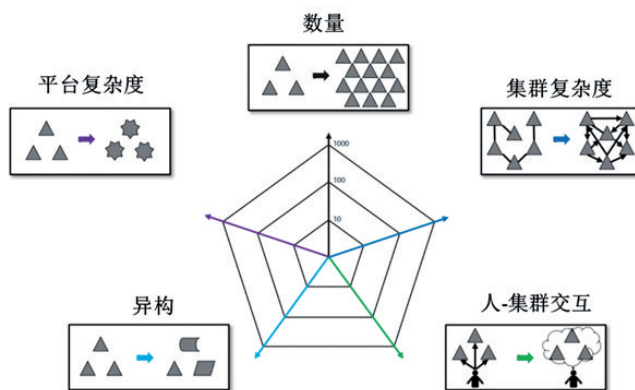


图5 无人机自主集群发展趋势

Fig. 5 Development tendency of unmanned aerial vehicle autonomous swarm

不能完全替代人的思维与判断,尚难以满足复杂战争中对无人机高层次自主和智能的要求。因此,采取无人机与有人机共融集群,实现能力互补和行动协调,已成为重要发展趋势。无人机可充分利用其机动能力强、成本低、隐身性能好的优势,在恶劣条件下执行危险任务,消除有人机执行任务的风险;有人机可充分利用人的智慧和综合判断能力,排除干扰,实现共融集群的综合决策和任务管理。2010年4月,美军发布的《美国陆军无人机系统2010—2035路线图》明确把无人机发展划分为3个关键阶段,提出通过通用互操作标准实现无人机系统的一体化,从而为实现高层次人机融合奠定基础^[22]。2016年5月,美国空军发布的《小型无人机系统飞行规划2016—2036》对“忠诚僚机”集群作战概念进行了阐述,强调无人机与有人机的共融作战,旨在通过无人机与有人机联合编队加强双方作战能力。2018年8月,美国国防部发布的《无人系统综合路线图2017—2042》强调应注重互操作性技术发展以助力有人/为无人系统的高度协同。在中国国务院2017年7月发布的《新一代人工智能发展规划》中,8次提到了“人机协同”,并把“人机协同共融”作为建立新一代人工智能关键共性技术体系的重点任务之一^[23]。在2018国家机器人发展论坛暨RoboCup机器人世界杯中国赛开幕式上,中国工程院院士王天然指出“下一代机器人将‘与人共融’,如果能抓住这个机遇,中国将在机器人创新舞台上扮演一个特殊的角色”。在2018 IEEE/CSAA 制导、导航与控制学术会议(IEEE/CSAA GNCC2018)上,中国工程院院士樊邦奎提出“无人机系统与有人系统之间的高度协同是实现无人机集群实际应用的关键”。

键”。因此,在未来信息化、网络化、体系对抗的环境下,采取无人机与有人机共融集群,通过密切协同和高度智能的人机交互来完成信息获取、任务决策、指挥引导复杂人机协同,达成操作员与无人机不同维度间的互联互通互操作,可实现跨域平台系统任务能力的倍增甚至倍增效益。

2.2 新型变体无人机

在2015年4月美国海军研究局发布的“低成本无人机集群技术”(low-cost UAV swarming technology, LO-CUST)项目中就已经出现变体无人机的踪影,在该项目中变体无人机可实现从多管发射装置中弹射起飞,并在起飞过程中自动展开机翼及推进器,变形成任务模式下的舒展形态。2015年9月,美国国防高级研究计划局在发布的“小精灵”项目中再次畅想了变体无人机,尤其是轻小型变体无人机的未来。该项目打破了传统依赖空中加油实现作战半径延展的模式,而是设想依托集群发射与回收技术,让现有大型飞机在敌方防御射程外发射成群的小型无人机,当任务结束后母机再对小型无人机进行回收。由于“小精灵”无人机无地面起落环节,其设计上更贴近于导弹的外观,当任务结束进行回收时,“小精灵”无人机将自动打开飞机顶部与母机捕获器配套的回收装置,并折叠机翼,以便带回由地面人员在24 h内完成重置并等待下次使用。2018年,美国 AeroVironment 公司计划通过集成 FlightWave 公司的 Edge 混合垂直起降技术开发一种具有垂直起降模式和固定翼飞行模式的新型变体无人机,该无人机起飞和着陆时无需使用诸如拦阻网或弹射器之类的地面设备。采用变体技术后的无人机,其不同任务状态下的飞行性能可从根本上得到改善,将同时兼顾长航时巡逻飞行、高速冲刺和高机动飞行能力,使无人机在担负传统的侦察监视任务的同时,具备有效打击各种地面、海面以及空中目标的能力。

2.3 智能集群系统

2016年8月,美国国防部国防科学委员会发布了《Autonomy》(《自主性》),指出“未来人工智能战争不可避免”。2017年7月,美国情报高级研究计划局发布了《Artificial intelligence and national security》(《人工智能与国家安全》),再次指出“人工智能技术是国家安全的颠覆性技术”。在2017年7月中国国务院发布的《新一代人工智能发展规划》中,提到“群体认知”“群体感知、协同与演化”“群体集成智能”,并21次提到“群体智

能”,11次提到“自主无人系统”。基于人工智能设计无人机集群分布式控制框架,使得系统中的无人机仅在局部感知能力下,通过集群数据链技术,同其他无人机组建自组织智能交互网络,并在外界环境触发作用下,实现复杂的行为模式,具备学习能力,在群体层面涌现出智能^[24]。大自然是人类创造力的丰富源泉。鸟类、兽类、鱼类、昆虫类等群居性生物为适应生存环境,历经长期演化后,激发涌现出高度协调一致的群集运动。将这种具有无中心、共识主动性、简单性和自组织性等特点的群体智能机制应用于无人机集群自主控制这一颠覆性技术,无论从理论框架还是应用需求都是十分契合的。在集成生物群体智能的无人机集群系统中,个体通过收集和处理信息来适应环境,进行个体知识的更新,通过与集群中其他个体的交互,进行历史经验学习和社会学习,不断进化从而获得更强的生存能力以及对环境的适应能力;当某个无人机出现故障,其他无人机会自动修复填补,在系统层面表现出自愈能力;若有新的无人机加入集群,只要与边界处的无人机建立通信,新的集群会迅速完成融合。北京航空航天大学仿生自主飞行系统研究组10余年来,通过借鉴雁群、鸽群、棕鸟群、狼群、蜂群、蚁群等生物群体的共识自主性集群智慧,采用分布式策略设计了无人机集群自主控制方法和技术,并结合这些生物群体智能进行了无人机集群编队、目标分配、目标跟踪、集群围捕等任务的飞行试验验证^[25-29],下一步将开展基于群体智能的有人/无人跨域异构集群自主控制方面的研究。

2.4 无人机集群自主对抗

随着作战环境监测技术和识别技术的不断突破,在交战双方信息比较清晰的情况下,当无人机进行集群对抗时,如何在机载设备采集的信息指引下,快速、准确地进行空战策略的选择,必将成为空战成败的决定性因素^[30-31]。2015年10月,辛辛那提大学 Psibernetix 公司研发了一款高保真的空战模拟虚拟空间,所研发的 Alpha 人工智能利用超级电脑的数据中心处理系统在模拟空战中击落了空军假想敌教官(前空军上校 Gene Lee),该系统目前主要通过模拟战机飞行,改善无人机的飞行应变能力,大大降低无人机飞行失误率,在评估、计划、应急方面均比正式飞行员更加快速有效,可同时处理多个攻击目标,调配武器实现精准打击。2017年12月,叙利亚反对派采用无人机机群重创俄罗斯在叙境内的赫梅米空军基地,无人机集群作战初具

雏形。武器系统的发展,改变了整个空战的作战环境和作战方式,使其发展成了由超视距攻击和近距格斗两个阶段组成的复杂任务。实现无人机集群自主对抗的关键是空战决策技术,即研究无人机在线感知条件下,如何与集群内的其他无人机协调,进行实时或者近实时的超视距攻击阶段的目标与武器分配以及近距格斗阶段的战略与战术选择,达到具备经验丰富的战斗机飞行员决策能力的目的。

在无人机集群技术、装备与战术快速发展的形势下,各国开始投资发展反无人机技术。根据雷声公司2018年3月发布的报告,美国陆军在俄克拉何马州西尔堡举行了“机动火力综合试验”(maneuver fires integrated experiment, MFIIX)演习,雷声公司利用其先进高功率微波武器和高能激光武器击落了45架无人机。国内外对无人机反制的手段无外乎3种模式:直接摧毁、监测控制类、干扰阻断类。对应到无人机集群,可以采用的反制措施,包含以下几种形式:捣毁蜂巢,即运用综合火力全方位打击运载平台,力争摧毁或在投放空域之外实现拦截;密集拦截,即采用弹炮融合系统和密集防空火炮对无人机集群实施拦截打击;集群对抗,以彼之道还施彼身,用集群来对抗集群;电磁摧毁,即运用定向能武器进行抗击,或进行地面大功率电子干扰;控制劫持,即通过注入控制指令或病毒,采用网络入侵的方式进行抗击。正因如此,发展应对反无人机技术的无人机集群技术在日益复杂的任务态势下显得尤为重要^[32],例如,发展应对频谱资源短缺、频谱环境复杂、环境和人为干扰严重等问题的无人机数据链抗干扰技术。

3 应用设想

在无人机集群系统中,大规模、低成本的小型无人机平台通过相互协调合作,具有资源配置机动灵活、任务执行成本低等特点,可满足未来高动态、强对抗等复杂环境下的任务需求。通过大量无人机间的相互通信和行动协调以及各无人机间的相互能力互补,可建立一种有效的协同策略,提高资源的利用效率,实现单无人机平台的任务能力拓展以及无人机集群系统的整体任务效能提升。

在军用领域,无人机集群系统必将带来作战模式的颠覆性变革。通过合理运用,无人机集群可在战争中发挥出重要价值:可在使用前更换各种传感器等有

效载荷,执行不同的任务;可进行电子干扰/赛博攻击,实施情报监视和侦察;可与战斗机和轰炸机等隐身装备配合,使敌方雷达无法区分目标;可为打击平台、已发射的反辐射反舰武器提供目标指示或辅助瞄准;可作为自杀式无人机消耗敌方的高价值攻击武器,达到系统与系统对抗的效果,提高系统的生存能力。此外,将群体与体系架构技术相融合,构建面向未来智能战争需求的无人系统集群体系框架,建立并实现基于群体智能的无人机集群系统,对于拓展作战体系的能力边界,引领武器装备的跨越式发展,应对信息化战争高成本的发展瓶颈具有重要意义。

在民用领域,无人机集群正逐步渗透到人类生活的方方面面。无人机集群灯光秀表演潮正热,例如2016年1月Intel公司的百架无人机灯光秀、2016年10月长征胜利80周年南航无人机集群献礼、2018年2月珠海春晚无人机特技飞行、2018年8月长沙橘子洲头777架无人机的灯光秀表演,以上无人机集群表演主要采用了高精度定位技术,距离复杂环境下的无人机集群全自主控制还有很大差距。在快递物流方面,无人机集群系统可通过相互协调用于调配并发大量订单,例如Amazon的Kiva仓储运用搬运机器人和快递无人机实现智能物流管理;在农业领域,无人机可与地面机器人相互协作形成异构集群系统,实现大面积区域的农业信息采集,例如在由ECHORD++资助的农用机器人集群(swarm robotics for agricultural applications)项目中,多架无人机彼此协调可实现对农田区域内杂草的精确监测;在应急救援方面,无人机集群可通过自组网技术快速建立临时通信网,以便快速掌握灾情,调配物资,例如在2015年8月的“8·12天津滨海新区爆炸事故”中,8架无人机飞入爆炸核心区测绘,为现场指挥部决策提供有力依据;2018年6月,四川绵阳市美丽岛建筑工地143名工人被困岛上,2架无人机同时作业,1 h内成功完成了救援物资输送任务。

4 建议

无人自主系统是人工智能的重要应用之一,已经成为国家重大战略^[33-34]。未来无人机自主集群技术的发展,主要聚焦在如下6个方面。

1) 依托国家大力推进的新兴技术发展规划,推进无人机集群技术发展。2016年5月18日,国家发展和

改革委员会、科学技术部、工业和信息化部、中央网信办制定了《“互联网+”人工智能三年行动实施方案》。在2017年7月国务院发布的《新一代人工智能发展规划》中,指出应借助人工智能重点突破自主无人系统相关共性技术、核心技术,支撑无人机集群应用和产业发展。由此可见,人工智能正在迎来新一轮创新发展机遇^[35],将人工智能与无人机集群紧密融合,研发实现无人机集群自主智能系统,才可能使无人机集群快速实现跨越式发展。

2) 借鉴军事强国技术研发模式,举办无人机集群大赛。从宏观层面加强无人机集群发展战略规划,并将其纳入到装备体系中进行整体规划;国外一直注重通过大型比赛进行民间科研力量的培育和挖掘,其中比较著名的无人机赛事有国际微小型飞行器赛会(International Micro Air Vehicles, IMAV)、国际空中机器人大赛(International Aerial Robotics Competition, IARC)等,国内有效借鉴该模式,为探索未来智能无人集群作战概念,快速推出了举办“无人争锋”智能无人机集群系统挑战赛、“无形截击-2018”反无人机挑战赛等,通过“亮剑”和“揭榜”的比赛模式,促进了无人机集群技术的攻关和突破。

3) 重视系统协调发展,提高无人机集群技术整体水平。无人机集群发展涉及多个领域、多个学科中的各项相关技术,其中平台、通信、载荷是发展无人机集群的关键技术。借鉴军民融合领域的先进设计思想,以任务为中心,采用先进控制理论,重视平台、通信、计算、有效载荷协调发展,各方面、各环节、各因素协调联动,拓展无人机集群的复杂任务功能,促进无人机集群自主控制整体水平的快速提升。

4) 着眼交叉学科,突破颠覆性技术。通过模拟自然界中的生物行为机制,突破基于仿生学的无人系统自主控制技术,改变智能无人机系统“有智无慧,有眼无珠,有感无情,有专无通”的尴尬格局。面向适应平台性能、战场环境、战术任务等要求,通过生物学、控制论、人工智能、机器人学等多学科交叉领域的前沿技术研究^[36],无疑会给无人机集群系统带来颠覆性的技术突破,可引领中国无人机集群自主控制技术由目前的“跟跑者”“并跑者”逐渐迈向“领跑者”。

5) 注重国防应用研究,提高无人机集群实战性。在安全局势日益复杂和国防战略更趋于积极主动的背景下,随着国防信息化装备水平的提高,多兵种协同作

战、训练推进,国防指挥调度市场规模将迎来爆发性增长,应充分利用“陆海空天电网”六位一体作战模式下的武器装备布局,研究由无人机、无人车、无人艇、无人潜航器等跨域无人平台构成的无人体系可能的应用方式,以推进无人机集群系统及其相关行业的增长。

6) 加强市场培育与军民融合转化,完善无人机标准和规范。制定促进资源共享的无人机军民融合发展机制,推动军用无人机装备和民用无人机产品有机结合,推进无人机集群在农业、交通、物流、救灾、勘测等领域应用。中国民用无人机集群的应用目前刚刚起步,主要处于项目论证和前期小规模可行性试验阶段,应及时了解用户需求,尽快研制出安全、可靠、实用、价廉的无人机自主集群系统。无人机集群系统民用市场的推广势必需要相关法律法规的支持,特别是还需要制定无人机集群方面的技术标准和法规。

5 结论

无人机自主集群以低成本、高分散的组织形式满足功能需求,以去中心化自组网提升系统高效信息共享、抗故障与自愈能力,以功能分布化提高体系生存率和效率交换比。如何建立无人机集群这一整体动态特性和物理约束的模型,如何面向更加复杂的任务环境将人工智能与无人机集群自主控制紧密结合,如何将有人与无人机、无人车、无人船等跨域融合,实现全自主群集系统广泛应用,还需要进一步研究和深入探索。具有“平台简单、高度协调、完全自主、群体智能”特点的无人机自主集群系统势必将引发新一代战争模式的颠覆性变革,不仅在渗透侦察、诱骗干扰、察打一体、协同攻击等国防科技领域大显身手,而且也将智能交通、地质勘测、灾害监测、农业植保、物流运输等国民经济发展中有着广阔的发展前景。

参考文献(References)

- [1] 邱华鑫, 段海滨. 从鸟群群集飞行到无人机自主集群编队[J]. 工程科学学报, 2017, 39(3): 317-322.
Qiu Huaxin, Duan Haibin. From collective flight in bird flocks to unmanned aerial vehicle autonomous swarm formation[J]. Journal of University of Science and Technology, 2017, 39(3): 317-322.
- [2] Lundquist E H. Drone duties: The dull, the dirty, and the dan-

- gerous[J]. *Naval Forces*, 2003, 24(3): 20.
- [3] Yong E. Autonomous drones flock like birds[EB/OL]. (2016-04-05) [2018-07-05]. <http://www.nature.com/news/autonomous-drones-flock-like-birds-1.14776>.
- [4] 段海滨. 从群体智能到多无人机自主控制[J]. *系统与控制纵横*, 2014, 1(2): 76-88.
- Duan Haibin. From swarm intelligence to multiple UAV autonomous control [J]. *All About Systems and Control*, 2014, 1(2): 76-88.
- [5] Qiu H X, Wei C, Dou R, et al. Fully autonomous flying: From collective motion in bird flocks to unmanned aerial vehicle autonomous swarms[J]. *Science China Information Sciences*, 2015, 58(12): 1-3.
- [6] Grassé P P. La reconstruction du nid et les coordinations inter-individuelles chez *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes* sp. la théorie de la stigmergie: Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs[J]. *Insectes sociaux*, 1959, 6(1): 41-80.
- [7] Floreano D, Wood R J. Science, technology and the future of small autonomous drones[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 460-466.
- [8] 李明. 无人机系统发展中的若干问题[J]. *现代军事*, 2007(6): 45-49.
- Li Ming. Issues of UAV system development[J]. *Conmilit*, 2007(6): 45-49.
- [9] 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.
- Zhao Xu. Trend of intelligent and autonomous UAV control technology[J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(7): 1.
- [10] 沈林成, 牛轶峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- Shen Lincheng, Niu Yifeng, Zhu Huayong. Theories and methods of autonomous cooperative control for multiple UAVs[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [11] 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.
- Duan Haibin, Li Pei. Autonomous control for unmanned aerial vehicle swarms based on biological collective behaviors[J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(7): 17-25.
- [12] Cambone S. Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005—2030[R]. Washington, DC: United States Department of Defense, 2005.
- [13] 陈宗基, 魏金钟, 王英勋, 等. 无人机自主控制等级及其系统结构研究[J]. *航空学报*, 2011, 32(6): 1075-1083.
- Chen Zongji, Wei Jinzhong, Wang Yingxun, et al. UAV autonomous control levels and system structure[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(6): 1075-1083.
- [14] Robert O. Small unmanned aircraft systems (SUAS) flight plan: 2016—2036[R]. Washington, DC: United States Air Force, 2016.
- [15] Fachev K M, Miller M J. Unmanned systems integrated roadmap 2017—2042[R]. Arlington County: Office of the Secretary of Defense, 2018.
- [16] 王越超, 刘金国. 无人系统的自主性评价方法[J]. *科学通报*, 2012, 57(15): 1290-1299.
- Wang YueChao, Liu Jinguo. Evaluation methods for the autonomy of unmanned systems[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(15): 1290-1299.
- [17] 范彦铭. 无人机的自主与智能控制[J]. *中国科学(技术科学)*, 2017, 47(3): 221-229.
- Fan Yanming. Autonomous and intelligent control of the unmanned aerial vehicle[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, 47(3): 221-229.
- [18] 石鹏飞. 无人机自主控制技术发展与挑战[J]. *科技导报*, 2017, 35(7): 32-38.
- Shi Pengfei. Autonomous control technology of unmanned aerial system and its challenge[J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(7): 32-38.
- [19] Hauert S, Leven S, Varga M, et al. Reynolds flocking in reality with fixed-wing robots: Communication range vs. maximum turning rate[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Francisco: IEEE, 2011: 5015-5020.
- [20] DARPA Public Affairs. OFFSET envisions swarm capabilities for small urban ground units[EB/OL]. (2016-12-07)[2018-07-05]. <http://www.darpa.mil/news-events/2016-12-07>.
- [21] Mathews N, Christensen A L, O'Grady R, et al. Mergeable nervous systems for robots[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 439(1-7).
- [22] Dempsey M E, Rasmussen S. Eyes of the army: US army roadmap for unmanned aircraft systems 2010—2035[R]. US Army UAS Center of Excellence, 2010.
- [23] 国务院印发《新一代人工智能发展规划》[N]. *人民日报*, 2017-07-21(1).
- State council notice on the issuance of the next generation artificial intelligence development plan[N]. *People's Daily*, 2017-07-21(1).
- [24] 樊邦奎, 张瑞雨. 无人机系统与人工智能[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(11): 1523-1529.
- Fan Bangkui, Zhang Ruiyu. Unmanned aircraft system and artificial intelligence[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1523-1529.
- [25] 周子为, 段海滨, 范彦铭. 仿雁群行为机制的多无人机紧密编队[J]. *中国科学(技术科学)*, 2017, 47(3): 230-238.
- Zhou Ziwei, Duan Haibin, Fan Yanming. Unmanned aerial vehicle close formation control based on the behavior mechanism in wild geese[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, 47

- (3): 230–238.
- [26] Luo Q N, Duan H B. Distributed UAV flocking control based on homing pigeon hierarchical strategies[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 70: 257–264.
- [27] Huo M Z, Duan H B, Yang Q, et al. Live-fly experimentation for pigeon-inspired obstacle flight of rotor unmanned aerial vehicles[J]. Science China Information Sciences, in press.
- [28] Duan H B, Yang Q, Zhang D F, et al. Unmanned aerial systems coordinate target allocation based on wolf behavior[J]. Science China Information Sciences, in press.
- [29] 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), 待出版.
Duan Haibin, Zhang Daifeng, Fan Yanming, et al. From wolf packs intelligence to UAV cooperative decision[J]. Scientia Sinica Informationis. 2019, in press.
- [30] 霍梦真, 段海滨, 范彦铭, 等. 仿鹰群智能的无人机集群协同对抗飞行验证[J]. 控制理论与应用, 待出版.
Huo Mengzhen, Duan Haibin, Fan Yanming, et al. Flight verification of multiple UAVs collaborative air combat based on the intelligent behavior in hawks[J]. Control Theory and Applications, in press.
- [31] 罗德林, 徐扬, 张金鹏. 无人机集群对抗技术新进展[J]. 科技导报, 2017, 35(7): 26–31.
Luo Delin, Xu Yang, Zhang Jinpeng. New progresses on UAV swarm confrontation[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(7): 26–31.
- [32] 丁文锐, 黄文乾. 无人机数据链抗干扰技术发展综述[J]. 电子技术应用, 2016, 42(10): 6–10.
Ding Wenyue, Huang Wenqian. The survey of the development of anti-jamming technology for UAV data link[J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(10): 6–10.
- [33] 薛春祥, 黄孝鹏, 朱咸军, 等. 外军无人系统现状与发展趋势[J]. 雷达与对抗, 2016(1): 1–5.
Xue Chunxiang, Huang Xiaopeng, Zhun Xianjun, et al. Status quo and development trends of foreign military's unmanned systems[J]. Radar & ECM, 2016(1): 1–5.
- [34] 陶于金, 李沛峰. 无人机系统发展与关键技术综述[J]. 航空制造技术, 2014, 464(20): 34–39.
Tao Yujin, Li Peifeng. Development and key technology of UAV[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 464(20): 34–39.
- [35] 柴天佑. 制造流程智能化对人工智能的挑战[J]. 中国科学基金, 2018(3): 251–256.
Cai Tianyou. Artificial intelligence research challenges in intelligent manufacturing processes[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2018(3): 251–256.
- [36] 王之康. 谭铁牛: 人工智能的春天刚刚开始[N]. 中国科学报, 2018-05-31(3).
Wang Zikang. Tan Siniu: The spring of artificial intelligence is only beginning[N]. China Science Daily, 2018-05-31(3).

Prospects on unmanned aerial vehicle autonomous swarm technology

DUAN Haibin, QIU Huaxin, CHEN Lin, WEI Chen

Science and Technology on Aircraft Control Laboratory; School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China

Abstract Swarm, autonomy and intelligence are the development directions of unmanned aerial vehicle (UAV) systems in dynamic and uncertain environments and for complex tasks. The UAV swarm with stigmergy can perform complex intelligent behaviors without any centralized planning or direct communication. Starting with the connotation of UAV autonomy, this paper discusses the concept, characteristic, advantage and possible combat form of UAV autonomous swarm. Then the UAV autonomous swarm development tendency is analyzed from the following aspects: manned/unmanned aerial vehicle integration, morphing aircraft design, artificial intelligence and swarm conflict. The technology development necessity of UAV swarm against anti-UAV technology is also analyzed. Next, the possible application prospect of UAV is described from military fields and civilian fields. Finally, the development direction of UAV autonomous swarm is summarized in terms of strategic planning, research mode, system coordination, interdisciplinary, defense applications and market cultivation.

Keywords unmanned aerial vehicle; autonomous cluster; stigmergy; artificial intelligence; manned/unmanned aerial vehicle integration ●



(责任编辑 刘志远)