

航空集群自主空战研究进展

梁晓龙, 胡利平, 张佳强, 柏鹏, 任宝祥, 李哲, 何吕龙

空军工程大学空管领航学院, 航空集群技术与作战运用实验室, 西安 710051

摘要 航空集群自主空战是军事智能化领域必须研究的典型难点问题。综述了智能空战相关理论与技术, 理清了智能空战发展的脉络, 分析了航空集群理论与技术以及人工智能在空战决策领域的应用现状, 探讨了我国智能军事发展的可鉴之策及实现集群自主空战的可行途径。

关键词 航空集群; 自主空战; 自主决策; 人工智能

党的十九大报告指出:“加快军事智能化发展, 提高基于网络信息体系的联合作战能力、全域作战能力, 有效塑造态势、管控危机、遏制战争、打赢战争。”把加快军事智能化发展写进党的报告, 体现了党中央、习近平总书记对发展军事高科技的高度重视, 势必推动军事智能化向更高更精更尖的方向快速前进^[1]。

从装备规模和组织结构层面看, 军事智能化可以分为个体智能化和系统智能化。系统智能主要

由智能集群构成, 智能集群组成可以是星/机/车/舰/弹同域空间平台构成的同构集群, 也可以是多域空间平台构成的星-机-车-舰-弹异构集群。从作战平台是否载人的角度, 智能集群又可以划分为有人集群、有人/无人集群和无人集群(图1)。

陆地战场、水面/水下战场、太空战场等作战大多是“规划性为主的对抗”, 作战平台的机动性、对抗态势的时变性等相对较低, 而空战对抗是“博弈性为主的对抗”, 战场弹性大、变化快, 作战平台高

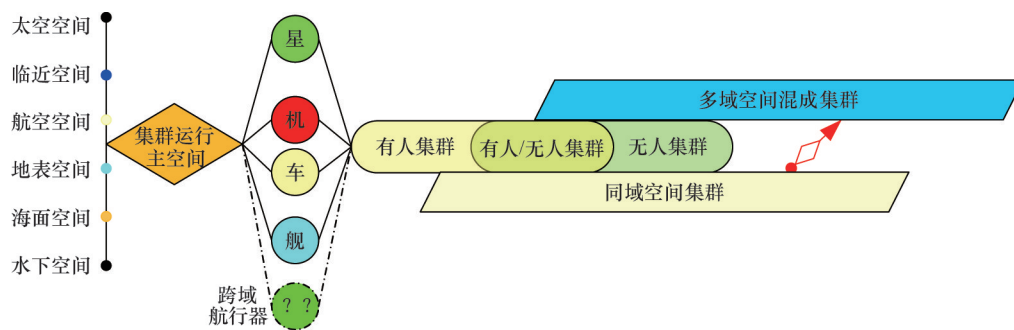


图1 智能集群组成与蓝图

收稿日期: 2019-08-26; 修回日期: 2019-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(61703427); 国防创新特区项目; “十三五”装备预研共用技术项目

作者简介: 梁晓龙, 副教授, 研究方向为航空集群理论与技术, 电子信箱: afeu_lxl@sina.com

引用格式: 梁晓龙, 胡利平, 张佳强, 等. 航空集群自主空战研究进展[J]. 科技导报, 2020, 38(15): 74-88; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.

动态,因此在集群作战中,空战对抗最具典型性,只要突破其智能化作战原理和关键技术,单兵班组、装甲车辆、舰/潜艇、战略导弹、卫星等武器系统的集群智能作战问题,将迎刃而解。自主空战决策领域,研究者尝试了矩阵对策^[2]、专家系统^[3]、强化学习^[4]、微分对策^[5]、影响图^[6]等各种方法,构建了基于知识的专家系统模型、基于Agent方法的飞机编队的决策行为模型、基于影响图的空战机动决策模型等,但数十年来,没有一种方法、一套模型能够走出实验室走进无人机的空战任务控制系统。究其根本,认知、学习能力的不足是上述方法先天性的缺陷。

2016年6月,美国辛辛那提大学研发的UCAV(unmanned combat aerial vehicle)智能空战系统“ALPHA”在模拟超视距空战中战胜了人类飞行员^[7],引起了世界轰动。这一研究成果让全世界看到了实现自主空战的曙光,引发了空战军事人工智能研究的热潮,但3年多时间过去,自主空战领域再也没有发布更优秀的成果。原因可能有两点:一是取得技术突破的国家实施了技术封锁;二是模拟器上运行的人工智能程序还有大量难题没有取得实质性突破,远没有达到实际应用要求。

战争如何设计,自主空战战术如何生成? 国外

对此问题讳莫如深,国内学术研究则多浮于任务规划、态势评估、目标分配等辅助决策问题,而应用层面侧重移植外来的经验方法。为此,本文在综述智能空战相关理论与技术的基础上,对航空集群理论与技术以及人工智能在空战决策领域的现状进行分析,探讨中国智能军事发展的可鉴之策。

1 航空集群理论与技术发展现状

航空集群的概念是由笔者所在团队率先提出的,其具体含义是:由一定数量的单功能和多功能有人或无人航空飞行器共同组成,以交感网络为基础,整体具有能力涌现特点的空中移动系统^[8]。该系统可以实现单个平台行为自主决策、平台间行为协同,最终产生能力涌现(图2)。

需要指出的是:航空集群不是多平台的简单编队,其集群能力也不是诸多平台单一能力的简单叠加。航空集群技术的根本目标是实现航空集群作战能力的涌现,即:由多航空器平台通过科学的方法聚集后,经过集群自组织机制与行为调控机制的有机耦合,产生新的能力或原有能力发生质的变化。其中,用于空中作战的航空集群是能够遂行作

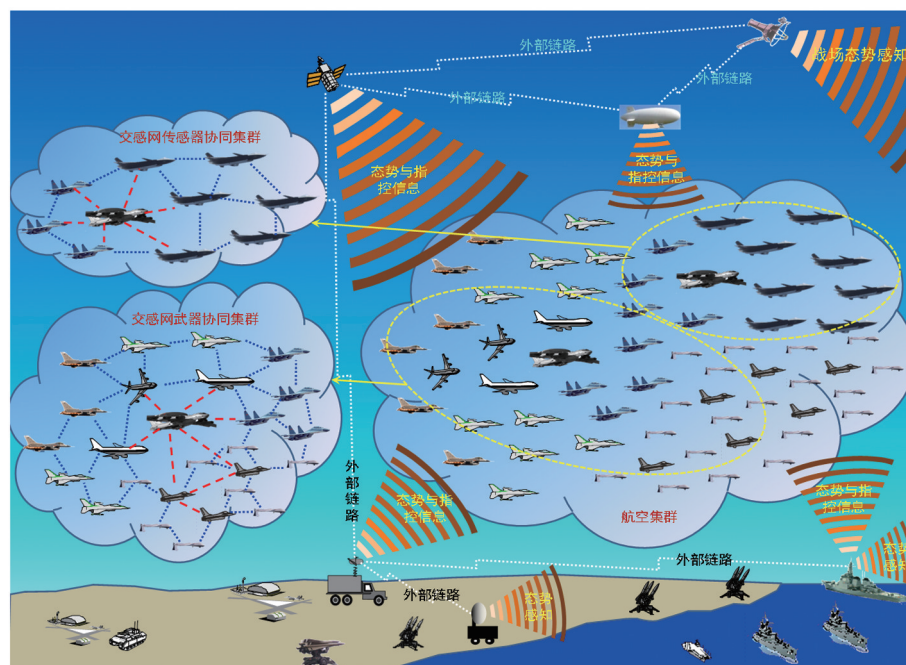


图2 航空集群示意

战任务、适应作战环境、对作战进程进行自主决策的新型空中作战体系^[9]。它作为一种新型的空中作战体系,有着区别于传统空中作战体系的概念内涵,新形态的作战编组使其具备了大大优于传统空中作战体系的新特性^[8]。

首先,航空集群在要素组成上突破了传统空中机群的编组模式。航空集群关注的不是平台要素的组成,而是系统的组成,其构成的重心不在于平台本身,而在于联结体系的信息及其链路。其次,航空集群与空中机群在组织机理上存在根本区别。从系统论的角度来看,航空集群是一种典型的亚复杂系统,必须实现可控可观,这与传统的空中机群以简单叠加的形式进行编组是完全不同的。航空集群的思想来源于生物集群,并且是以复杂适应性理论为指导来研究未来高强度大规模空中作战的力量体系构建与运用。因此,正是这种体系构建模式本质上的演进,才能够实现由传统空中机群向现

代航空集群的转变。

根据飞行器构成、智能化水平以及人-机关系,航空集群的形态可以分成有人机集群、有人机/无人机混合集群、无人机集群3种类型,其发展路线图如图3所示。

3种类型体现的是不同技术条件下航空集群的不同构成模式。其中,有人机集群和程序运行的无人机集群的飞机平台智能化水平最低,是航空集群初级形态;有人机/无人机混合集群模式下,有人机作为指挥机,无人机作为任务机,由有人机控制无人机完成各种不适合有人机自身完成的任务,特别是适用于在高危环境中的空中作战;航空集群的高级形态是能够实现完全自主智能决策的无人机集群,即具备有限自主能力的无人机集群在分布式局部指挥控制的情况下,通过集群个体行为的简单交互产生整体效应,实现较高程度的自主协同,将无人平台的作战效能发挥到最大。

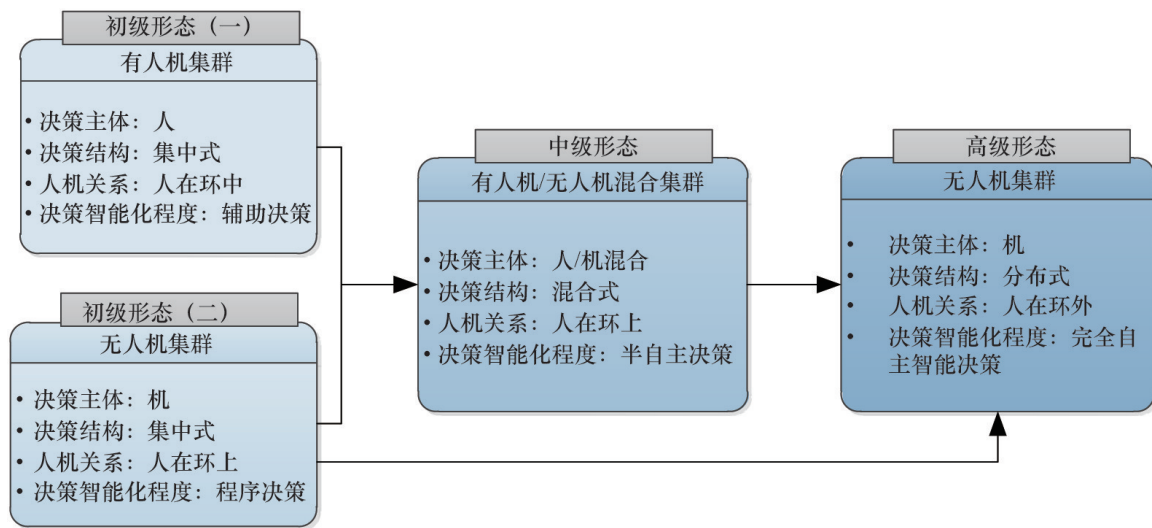


图3 航空集群作战体系形态发展路线

1.1 有人机集群

目前,航空集群发展从形态上看正处于初级形态初步形成,正向中级形态阶段演进。早期的有人机集群的智能化主要体现在飞行员空战辅助决策系统的智能化上,飞行员与辅助决策系统的认知决策过程如图4所示^[10]。辅助决策系统借助传感器

等感知设备,获取外界战场态势信息,结合预设的环境提取出有用信息,信息与真实战场环境模型和当前战场态势信息联系产生知识,即完成战场态势信息感知;而后,依据历史经验数据库对当前态势信息进行理解解释,结合目标、战场优先级设定、基本准则及约束条件等进行战场态势评估,在此基础

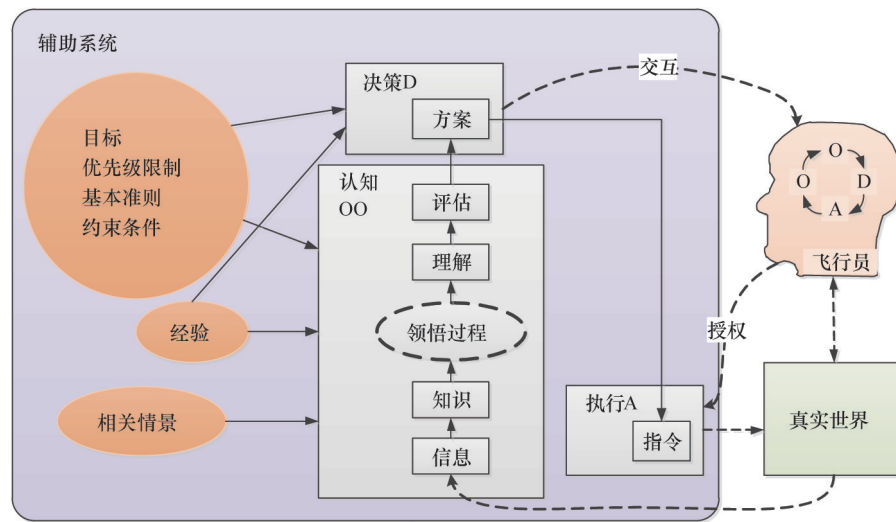


图4 飞行员与辅助决策系统的决策过程示意

上,借助推理算法确定决策方案,并根据授权执行决策方案。

在现有的空战辅助决策系统中,最为典型的是由美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)于1986年开始研发的“飞行员助手项目”(pilot's associate program, PA)^[11]。该项目旨在验证与评估AI(artificial intelligence)技术在航空集群作战领域中的应用,从而增强有人战机应对复杂对抗环境威胁的能力,提升其遂行作战任务以及战场生存能力。文献[12]系统地综述了PA的总体结构及其设计理念,给出了PA系统各分系统的实现方式,并结合中国在飞行员辅助决策系统方面研究现状,指出了需要重点突破的3个问题:一是任务模型建立不充分,主要是缺乏通用的任务描述模型;二是在飞行员的差错监控、意图推理以及工作负荷评估等方面研究不足;三是系统需求及总体结构设计研究不充分。目前,PA系统已成功应用于美军F-22、F-35战斗机上,提升了飞行员应对复杂战场态势环境的能力。与此同时,俄、英、法、德等国也针对该问题展开了研究,并取得了不错的成果:俄罗斯针对T-50战斗机研究的机载智能辅助系统、英国的“飞行管理助手”、法国的“智能座舱环境”研究计划以及德国的“飞行员IFR辅助操作系统”^[13]。

中国相关单位和科研院所也在该领域进行了

许多卓有成效的工作,最具代表性的是专家系统和多智能体系统(multi-agent system, MAS)^[14]。专家系统是一个智能计算程序系统,它能够利用人类专家的知识 and 解决问题的方法来处理该领域问题。比较典型的有:1994年由军事科学院研发的“进攻一号”军事专家支持系统^[15],该系统将AI和军事运筹学相结合,建立了一个4000多条规则的军事知识库和一个定性与定量相结合的高效推理机制,能够快速有效地生成多个决策方案,辅助指战员定下决心;2003年由解放军理工大学领衔研制的军事运筹辅助决策系统,该系统可自动生成和优选作战方案,演示对抗过程,评估作战效果^[16]。MAS是一种全新的分布式计算技术,现已发展成为一种进行复杂系统分析与模拟的思想方法与工具。文献[17]设计了一种分层的基于多智能体的作战指挥辅助决策系统,将其分为决策层、决策辅助层和数据平台层,为构建人机智能结合的作战指挥决策辅助系统奠定了一定理论基础;文献[18]在海上网络中心战的环境下,提出了基于MAS的分布式辅助决策方法,建立了MAS体系结构模型和作战效能评估模型,并给出了对应的目标分配算法。另外,在战术决策、态势感知、信息融合、多传感器管理及人机交互等领域进行了广泛而深入的研究,取得了多项关键技术的突破,设计了相应的功能模块算法,构建了对应的知识库,并进行了关键技术的仿

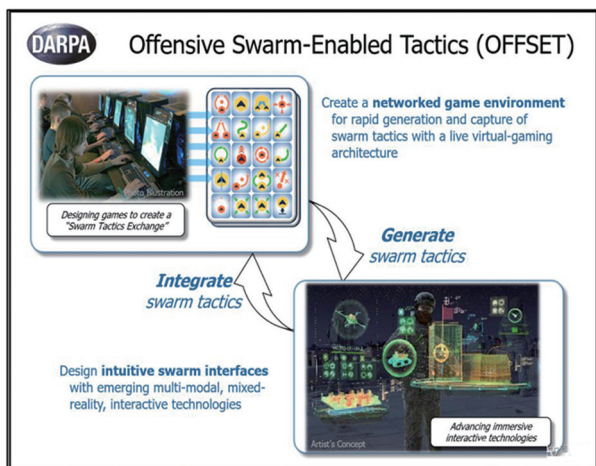
真试验与演示验证,为后续的研究奠定了丰富的理论与技术基础^[19]。

基于上述现状分析可知:国内在智能辅助决策系统方面的研究还处于单项技术研究阶段,缺乏系统性,与国外研究水平还有一定的差距。现有的空战辅助智能决策大都是基于相对固定的空战机理,采用数学建模的方法寻找相对最优的解决方案,状态相对固定,不能通过自学习与训练来提高其智能性。从智能程度来看:有人机集群智能空战的决策主体是人,其决策结构属于集中式范畴,人时刻处于观察、判断、决策、行动(OODA)环中,辅助决策系统仅作为一种辅助手段,为飞行员提供一定的决策依据,其智能化程度属于低级的辅助决策。

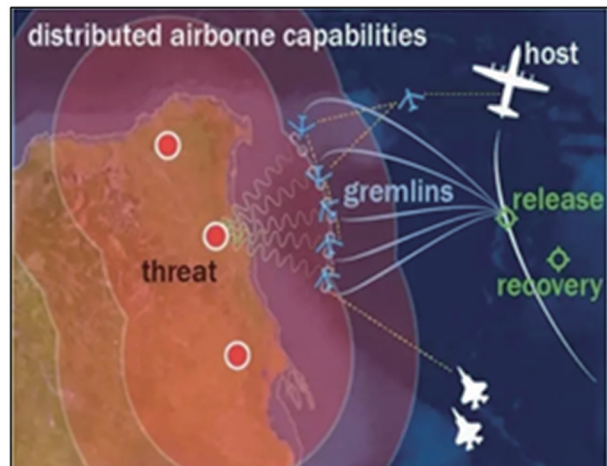
1.2 无人机集群

为了追求人员零伤亡目标,美军认为“非接触”作战是未来战场的主要作战方式,UCAV作为无人作战飞行器,是“非接触”作战装备的典型代表^[12],无人作战的集群化、智能化是近年来一个研究的热点问题,其智能化终极目标是实现侦察、干扰、探测、通信、攻击、管理、评估等多功能资源的高度共享、智能管控、有效协同。

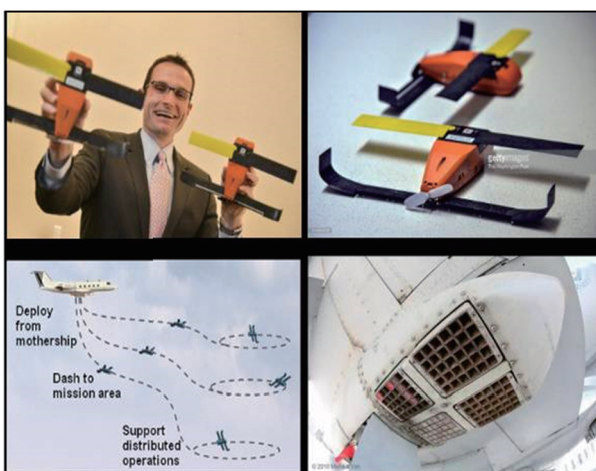
近年来,美国为支持“亚太再平衡”战略^[20]和“第三次抵消战略”^[21],通过项目、计划和作战概念驱动,将无人机集群作战以及“算法战”(Algorithmic warfare)^[22]作为一个重要发展方向,进行了大量的相关研究、试验和演示验证。部分典型项目如图5所示。



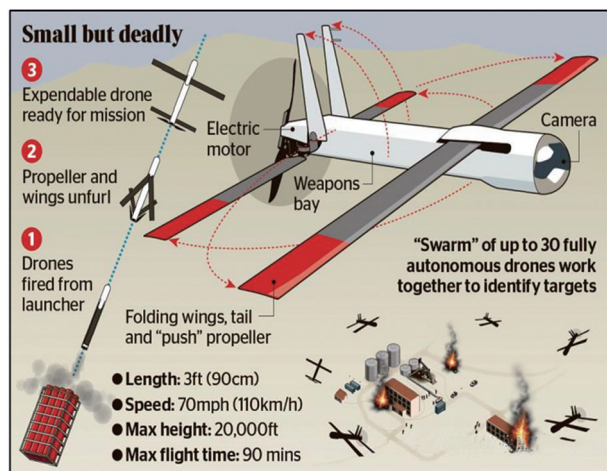
(a) OFFSET项目



(b) Gremlins项目



(c) Perdix项目



(d) LOCUST项目

图5 美军部分典型无人机集群项目

这些项目主要包括:2017年1月启动的进攻性蜂群使能战术(OFFSET)项目^[23],研发针对无人系统蜂群的更有效的规划与控制技术,以在时间紧迫、视线受限的城市作战场景中快速部署具有自适应编队能力的蜂群系统;2015年8月启动的“小精灵”(Gremlins)项目^[24],研发通过载机在防区外发射携带有效载荷、具备组网与协同功能的无人机蜂群,并在任务结束后进行回收的技术;2015年4月美国海军研究办公室(ONR)开展的低成本无人机集群技术(LOCUST)项目^[25],旨在释放大量小型无人机,通过自适应组网及自治协调,对某个区域进行全面侦察并对诸如指控系统等关键节点及目标进行攻击破坏等;2014年9月美国国防部战略能力办公室(SCO)主导的“山鹑”(Perdix)微型无人机高速发射演示项目,用来演示验证集群决策、自适应编队飞行等集群行为,并已开展超过500次飞行试验。此外,还有近战隐蔽自主无人一次性飞机(CI-CADA)项目^[26]、体系集成技术和试验(SoSITE)项目^[27]、拒止环境中协同作战(CODE)项目^[28]、对敌防空压制/摧毁蜂群作战(SEAD/DEAD)项目^[29]等,这些项目既能够反映出美军在集群技术研究上的侧重点,同时也代表了美军对集群技术未来发展的战略预判。

作为军事强国的俄罗斯也将无人机集群作战作为未来军事斗争重点发展的方向^[30]。根据俄罗斯下一代战斗机发展规划,未来俄罗斯战机飞行速度可达4~5马赫,并且能够指挥控制5~10架装备高频电磁炮的无人机集群作战^[31]。此外,2014年匈牙利罗兰大学 Vicsek 团队的一项研究被《Nature》报道,该团队在任务决策层利用生物集群行为机制,在室外环境实现了10架四旋翼的自主集群飞行,飞行过程中四旋翼通过与临近个体进行信息交互实现自主决策,不存在中心控制节点^[32]。实验利用基于自驱动粒子的运动机制,实现了四旋翼集群在GPS噪声、通信时延和故障环境下的飞行,包括一定区域内的避障和聚集,队形的保持和群集目标跟踪。

中国众多学者也在无人机集群研究领域开展了大量的研究工作,研究问题主要集中在无人机集

群编队控制、任务分配、目标搜索及指挥操作等方面,并取得了丰硕的研究成果。其中,在理论研究方面代表性的研究成果有:北京航空航天大学借鉴生物集群理论对无人机集群编队、目标分配与跟踪等集群任务进行了理论与飞行试验验证^[33-35];西北工业大学在无人机任务指派冲突消解、UCAV自主攻击决策、多无人机区域搜索^[36-38]等领域进行了大量研究;国防科技大学对多无人机编队执行各类作战任务进行了大量探索,包括无人机实时协同控制、无人机多任务规划、无人机路径跟踪控制及无人机集群与重构控制^[39-42]等;哈尔滨工业大学对无人机在线航迹规划、多无人机协同目标分配以及无人机编队导航与控制系统^[43-45]等进行了研究;空军工程大学对无人机集群、协同作战理论进行了研究^[8,46-49]。在试验探索方面代表性的研究成果有:2017年6月,中国电子科技集团联合清华大学与泊松科技成功完成了119架固定翼无人机集群飞行试验^[50];2018年7月,中国空军在河北涞水举办了首届“无人争锋”智能无人集群系统挑战赛^[51],此次竞赛探索/演示了未来智能无人集群作战概念,也预示着智能无人集群很可能成为又一种“改变战争规则”的颠覆性力量,智能无人集群突破传统的对地/对海任务,走向难度更高的自主空战应用已迫在眉睫。

从现状分析来看:中国学者在无人机集群领域的研究主要集中在理论研究方面,并逐步开始向试验验证方面倾斜;国外的研究主要依托于项目,系统性强且研究内容与国防军事密切相关,研究侧重在试验验证方面,但都还没有实现无人机集群作战由实验室走向战场的跨越。在自主决策方面,当前的无人机集群决策结构正由集中式向混合式转变,智能决策程度大部分属于程序决策,虽然智能化程度不高,但发展速度迅猛。

1.3 有人/无人集群

受制于当前技术发展水平,无人机的智能化、自主化水平仍然不高,还远不能完全替代人的思维与判断,且存在对任务控制站、卫星中继之间的可靠、高效通信依赖性过强,对战场变化临机反应能力弱等问题^[52],有人机/无人机混合集群应运而生,

也将是今后一个时期内比较现实可行的空战样式。通过构建有人/无人机协同作战体系,利用人的决策优势更好地发挥无人作战平台优势。

1996年美国陆军航空与导弹研究、研发与工程中心发布的机载有人/无人系统技术项目(AMUST)对有人/无人机编队协同作战问题进行了探索研究,旨在开发和验证作战管理所需的软件和程序,以提高有人/无人机的综合作战效率^[53]。2003—2004年,美国波音公司与麻省理工学院合作,从人机交互接口、任务执行调度及航迹规划3个方面对不确定环境下的有人/无人机作战进行了研究^[54]。2014年美国国防部常务副部长 Robert O. Work 提出了“第三次抵消战略”,旨在“改变竞技规则”,以使美军在未来几十年内保持技术优势^[21]。在“第三次抵消战略”的牵引下,2015年中旬,美军空军研究实验室(AFRL)提出了“忠诚僚机”(Loyal Wingman)项目^[55]。该项目主要验证对地攻击和对敌防空压制概念,旨在利用有人机的优势,通过有人/无人协同,最大限度地发挥无人机自主作战效能,需求自主技术的突破。目前,“忠诚僚机”关键技术已取得关键性突破,有人/无人协同作战开始迈向实战化进程。

与此同时,欧洲各军事强国也在竞相开展有人/无人集群作战研究。2014年由法国牵头,会同意大利、西班牙、希腊、瑞典和瑞士参与制造的“神经元”无人机与“阵风”战斗机、“隼”7X商业飞机进行了数百公里的编队飞行,对有人/无人编队飞行过程中应对电子干扰、大气湍流的抗干扰性能进行了验证^[56]。英国正在进行的“未来空军进攻性系统”研究计划,其中一个重要项目就是探讨由有人机、无人机机空射巡航导弹组成的混合编队体系作战能力^[57]。德国慕尼黑联邦国防军大学开展了有人机/无人机混合编队(MUM-T)项目研究,开发了一套基于认知自动化方法的辅助决策系统,用于有人机指挥控制多架无人机协同作战,并已经在仿真环境下对一架有人直升机控制引导多架旋翼无人机进行了测试^[58]。

可见,国外研究机构,尤其是美军已在有人/无人协同作战系统架构、作战管理、自主协同、感知

规避和实时通信等方面开展了大量的演示验证工作。这些工作得益于无人机自主和协同控制能力的提升,有人机指挥控制方式正逐步从“人在回路中”转变为“人在回路上”。

中国在有人/无人集群方面的研究仍处于理论探索阶段,研究问题主要集中在人机交互接口^[59]、指控系统设计^[60]、人机功能分配^[61]及任务分配与调度^[62]等方面,而在有人/无人协同作战情况下的无人作战平台自主决策方面鲜有报道,尤其是多任务耦合决策尚未有文献报道。

2 人工智能在空战决策领域的应用现状

人工智能技术作为后信息时代新技术发展的一个显著趋势,极有可能成为改写未来战争的颠覆性技术之一。近年来,美、俄等军队将目光投向了人工智能,意图利用人工智能的速度优势,缩短己方在战场上OODA环路时间,牢牢掌握行动优势^[63]。

美国安全中心研究员格富戈里·艾伦撰写的报告《人工智能与国家安全》认为:“人工智能对国家安全领域带来的影响将是革命性的,而不仅仅是与众不同的。世界各国政府将会考虑制定非凡的政策,可能会像核武器出现时一样彻底”^[64]。轰动一时的辛辛那提大学“ALPHA”智能空战系统^[7],其核心是基于遗传模糊树(genetic fuzzy tree, GFT)算法构建的人工智能学习系统EVE,其受Psibernetix公司专利保护未予公开。报道称,“ALPHA”系统当前版本在一个“2-v-4”空战场景中已使用超过150维的输入数据用于生成战斗机飞行控制和火力控制能力,未来如果考虑机载传感器的控制,数据维度还将进一步的提高。因此,高维度海量数据处理与运用是多机自主空战的最鲜明特征,也是其迫切需要突破的一大难题。

2016年10月13日,美国国家科学技术委员会(NSTC)发布了《国家人工智能研究与发展战略计划》^[65],提出了美国优先发展的人工智能七大战略方向及两方面建议,特别强调了人工智能技术在军

事作战方面的重要性。2017年4月,麻省理工学院(MIT)和DARPA联合研究团队开展EYERISS项目^[66],研究在新一代微芯片中重现人类的分析、学习和判断能力。该新型芯片基于神经系统,是一种基于典型人脑运作机制的数字存储网络,EYERISS将囊括所有的空战知识,同时还为UCAV提供实时空战学习能力并进行再现,针对威胁和战术态势做出调整。2017年11月,AWCFT负责人呼吁:今后美军采购的任何武器系统都应融入人工智能^[67]。

由此可见:人工智能正以前所未有的深度和广度影响着未来空战的不同领域,推动着新一轮军事变革,战争形态和面貌正被悄然改变^[63]。首先,人工智能技术在空战领域的成功应用颠覆了战场指控和情报处理模式;其次,人工智能技术越来越多地应用于武器装备操作,大大提升了其自主性与智能化程度;最后,新型智能空战辅助决策系统、智能机器人在空战武器装备设计、制造、维护全流程中的泛化应用,引发了军工研制生产模式深刻变革^[68]。

近年来,俄罗斯为抢占未来军事智能高地,进行了一系列谋划布局。首先,出台战略规划明确人工智能技术是军用领域的优先发展方向;其次,加大对人工智能技术的研究投入并快速形成技术储备;最后,持续推进人工智能技术在武器装备上的应用。早在2015年,普京就签署总统令,宣布成立国家机器人技术发展中心,并于2016年3月在国防部发布的白皮书《2025年前发展军事科学综合体构想》中强调,“人工智能系统不久将成为决胜未来战场的关键因素,注重武器装备的智能化改造。”^[69]普京甚至指出,“人工智能不仅是俄罗斯的未来,而且是全人类的未来”。通过制定发展规划、构建技术储备等举措,人工智能技术在俄罗斯军事领域得到飞速发展,并已应用在武器装备、无人化军用平台、仿生机器人等领域。2017年7月,俄罗斯武器制造商卡拉什尼科夫公司宣称,已研制出基于神经网络的全自动战斗模块,能做到发现即摧毁^[63]。

中国将人工智能写入《2017年国务院政府工作报告》,中央军委科学技术委员会主任刘国治认为

“人工智能必将加速军事变革进程,对部队编成、作战样式、装备体系和战斗力生成模式都会带来根本性变化,甚至会引发一场深刻的军事革命。”^[70]2018年9月,中国光学工程学会、中国兵工学会和复杂系统控制与智能协同技术重点实验室联合主办“未来空战与人工智能高端研讨会”^[71],吕跃广、包为民、樊会涛、于起峰、邱志明等众多院士专家围绕人工智能技术在航空武器的自适应规划、协同组网、态势感知、自主决策、智能识别等领域的应用展开学术交流,会议关注重点是未来空战与人工智能的深度结合,其中特别关注的领域包括智能化空战作战样式研究、人工智能技术对空空作战的影响。

国内外对空战智能决策的研究,大部分情况下是基于相对固定的空战机理,采用数学建模的方法寻找相对最优的解决方法,状态相对固定,不能通过自学习与训练来提高其智能性。人工智能应用于空战甚至战争全域全场已是大势所趋,可以预见,今后随着越来越多的智能化武器系统投入战场,空战上的作战反应时间将越来越短,交战行动将空前激烈,并最终超出人类的理解和应对能力^[63]。因此,为谋划人工智能领域的战略制高点,抢夺新一轮军事科技变革的先机,中国必须制定长远的发展计划,加快军事智能化发展。

3 航空集群自主空战研究展望

空中作战已经呈现出无人化、智能化、集群化等特征,通过全局资源动态使用、共享柔性重组、自主编队控制,实现集群侦察、集群探测、集群干扰、集群攻击等作战模式,将获得非对称的巨大能力优势。笔者所在团队近年来已在相关领域做了探索性的研究工作:承担了4项国家自然科学基金项目,主要对航空集群能力涌现的底层控制机制、航空集群作战系统攻防模型与机制、航空集群交感网络高动态复杂信道环境中基于零相关序列的精确同步方法、航空集群空空导弹群攻击区的概念建模、算法及预测方法展开了研究^[72-73]。以上述项目为牵引,团队开展了搜索模式和目标机动模式下航空集群反隐探测能力涌现行为研究,构建了航空集群反隐

身探测能力涌现度量模型,确定了目标机动条件下的集群反隐身策略^[74-76];引入事件-条件-动作(ECA)协作控制机制,研究了航空集群交感能力涌现的时序与逻辑、触发与响应的过程控制规则,初步探索了集群信息感知和传递机制,构建了航空集群局部交感通信模型,设计了局部交感通信控制策略^[77-79];探索了航空集群任务执行过程中的自组织行为,建立了航空集群个体运动模型,确定了不同运动情形下的避障控制策略,提出了自由、固定构型下的集群拆分与合并运动控制的方法^[80-82];开展了航空集群规则提取与表达研究,提出了基于运动规则以及基于交互多模型的航空集群运动控制方法,搭建了分布式控制的航空集群运动控制演示验证系统^[83-85]。

笔者团队在研究航空集群空战能力涌现机制与演化控制方法过程中发现:当上述底层关键技术取得突破的同时,必然要在上层解决航空集群对外输出作战能力的决策难题,从而实现上层战术决策与底层控制机制的有机衔接。要实现航空集群自主空战的目标,需重点突破以下4方面的问题。

3.1 航空集群协同感知

态势感知是集群空战战术决策与机动策略生成的前提。未来集群空战要求感知系统具备自主性,能够在信息复杂、高强度对抗、任务多变的战场环境中发挥重要的前端作用。涉及的关键技术主要有集群协同无源定位、协同有源探测、跨平台传感器互牵引等。在前期项目的研究过程中,对航空集群协同反隐身探测能力涌现行为、集群无源探测定位能力涌现行为及集群有源/无源协同探测行为演化的机理开展了系列研究,发现:在平台性能一定的情形下,通过各平台之间的空间优化布局以及角色的适时切换可以大大提升其作战效能的发挥。为此,可以基于信号/信息实时共享,重点研究航空集群传感器相对目标的空间构型、发射机与发射波束的选择策略,确定探测资源主体、传感器平台、任务功能随时间的演变过程。另外,为满足协同探测平台分布式线上实时性控制要求,可以基于深度神经网络方法离线学习最优探测构型隐式规则,运用学习生成的决策网络在线实现最优组合航向自主

决策方法。

3.2 航空集群协同攻击空间构型生成与演化机理

航空集群这种新型作战组织实体,将改变当前空中作战编队以几何关系作为尺度的构建逻辑,将集群侦察、探测、突防、攻击等作战能力作为构建准则,生成面向能力涌现的集群最优构建形式和针对交战对象动态的时空演化策略,从而保证集群作战最需要的任务系统/平台始终出现在最佳的空间位置,协同发挥最佳的作战效能。因此,以集群空间构型为对象,以集群能力涌现度为指标,以深度学习、强化学习等人工智能方法为手段,通过数学建模仿真,研究航空集群协同探测-攻击的理论、模型、方法,重点突破集群不同构建形式下与不同敌对飞行集群“对弈”时最优空间构型的生成方法及随时间的演化策略。涉及的核心问题是航空集群空间构型生成规律、资源聚合规律、系统逻辑关系、演进规则及时序决策方法。可采用人工智能与集群智能相结合的方法,从集群探测、软/硬杀伤及其耦合决策层面研究集群空间构型自主生成、资源聚合与决策时序生成方法。

3.3 航空集群自适应自主决策对抗行为及状态演变

在未来的集群对抗中,集群个体作为直接动作发起和执行者,将不断与环境进行交互并相互作用,促使对抗过程不断演化。核心是集群对抗规则提取与表达,构建集群对抗规则库,结合战场态势情况确定决策序列集合。规则库是基于航空集群作战需求和特点而建立的形式化的集群及平台作战规则集合,它明确地描绘了任务空间相关要素与系统状态转移之间的关联关系,使一些定性的原则具体化为定量的规则。规则库的建立来源于两方面的数据:(1)专家知识库数据(经验数据/主观数据),即领域专家的经验数据;(2)战场的一级融合数据(态势感知数据/客观数据),即根据战场事件(包括战史、演习、仿真、兵棋推演等)获取的数据^[52]。目前,有多种方法均可用于从数据中提取规则和知识,包括决策树、概念格理论、贝叶斯网络、神经网络和支持向量机等。这些方法各有优劣,需要在实现层面,综合考虑,选择合适的算法或者综合多种算法分阶段进行。由于用于提取规则的数

据的复杂性和不确定性,提取的规则可能会出现同一结果对应不同甚至冲突的属性,需要通过多属性决策来确定和区分属性的效用以便获得较合适

的决策规则。另外,为使集群作战系统具备学习的能力,可以采用如图6所示的基于离线学习和在线使用相结合的迭代学习策略。

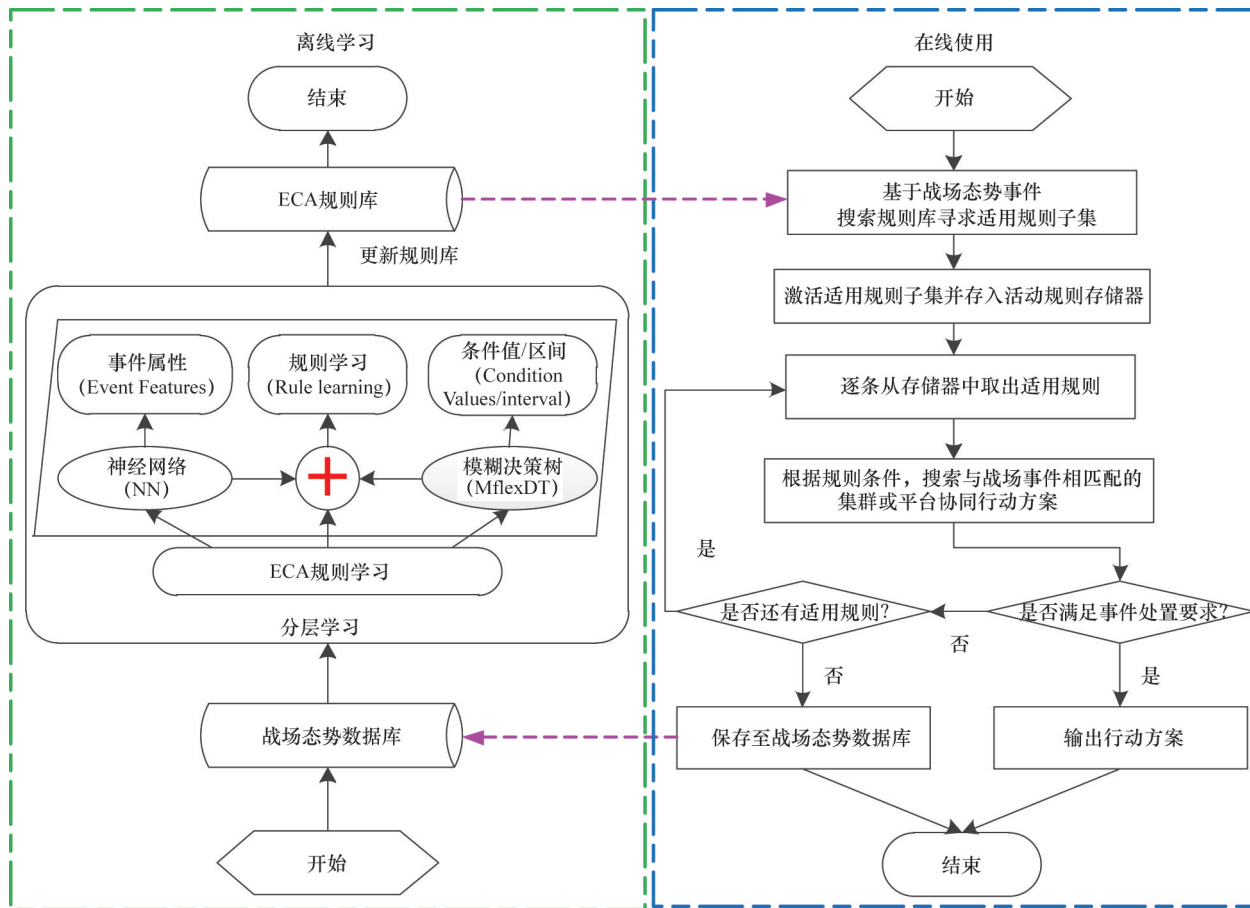


图6 离线学习-在线使用的迭代学习策略

根据学习的特点和目的,将ECA规则的提取和学习过程分为事件条件值/区间学习、事件属性学习及规则学习3层进行,分别采用不同的学习算法进行。针对事件条件值/区间的不确定性和模糊性,将模糊集合理论与决策树算法融合,多属性模糊决策树能够处理属性和分类模糊性强或者有噪音的数据集,并且可以和多条规则匹配,具有较强的规则表达能力。神经网络被广泛用于复杂多属性模糊数据分类,适合解决基于多源异构数据的分类问题,通过大量训练数据抓取更有用的属性,可以真实地反映数据的丰富内部信息。

3.4 航空集群自主控制方法

在未来的集群对抗中,集群作战效能的提升与

其空间拓扑关系紧密相关。准确、高效、稳定的航空集群运动控制是各类作战任务背景下空间构型生成、变换与重构的前提和基础。传统的集群编队控制具有集群规模小、严重依赖“人在回路”、全局通信、集中式指挥控制等特点。然而,随着任务需求变化,集群规模越来越大,其指挥控制在力量构成、组织关系、协同方式、通信传输等方面面临新特征、新挑战,加之未来空天战场作战样式日益多样、战场环境日趋复杂、作战范围日渐扩大,采用传统的集中式控制策略及全局通信机制时,系统控制复杂度及通信量均呈现指数级增长,为此,学者们提出将生物集群智能引入到集群控制系统中。项目组在前期的项目研究过程中,也对该问题进行了探

索性研究。发现将生物集群智能策略应用到集群飞行控制、任务协同中,可使集群作战系统具备分布式和集中式控制相融合、局部和全局通信模式并行、个体自治、具有良好鲁棒性和自组织性等特点。要实现生物集群智能在航空集群控制中的有效应用,需要重点突破以下两个难题:一是生物集群智能的底层自组织机制与控制机理,主要包括生物集群的典型行为模式抽象及数学建模、生物集群智能涌现方向的虚拟控制技术以及生物集群局部性社会交感机制与建模;二是基于生物集群智能的航空集群控制方法,主要包括航空集群个体典型任务分析、集群个体之间的交感机制实现、集群飞行控制策略库和规则的建立以及集群个体控制过程中的自组织、自适应控制方法。

4 结论

军事智能极具创新魅力,应用前景诱人,加之民用智能基础方法正迅猛发展,航空集群智能决策相关理论方法已出现端倪,昭示着一场新的伟大的科技革命。为加速航空集群自主空战技术突破,可以从以下两个方面努力。

1) 军地联合集智攻关是发展航空集群自主空战技术的必由之路。首先,技术融合创新是快速提高航空集群自主空战技术水平的必要条件。在商业应用方面,小型高性能无人机、人工智能、大数据、5G移动通信等技术已取得关键性突破,并在应用层面积累了许多经验。为此,军方主管部门可通过全军武器装备采购信息网发布公开需求信息,牵引上述技术“参军”,并根据技术开发进展适时纳入装备预研或研制项目中。其次,建立通用技术标准,进行标准化、模块化设计和大规模生产,可大幅度降低研发成本,提升效益,便于技术成果的迁移与推广。将航空集群作战平台、通信设备、传感器等产品实现标准化、模块化,一方面可引入地方企业参与竞争,在一定程度上克服军工企业在军事作战领域的垄断弊端;另一方面可借助地方庞大的市场需求来扩大生产规模,大幅度降低生产成本,使经济和军事效益最大化。

2) 组织开展挑战赛是加快新技术转化应用的助推剂。作为一种新型科技创新管理模式,“创新挑战赛”是适应开放创新时代发展需求,具有多重激励作用,有望深刻改变科技资源和创新思想全球配置的既有格局。近年来,中央军委科学技术委员会、中央军委装备发展部、中国空军及空军工程大学也开始通过举办系列挑战赛发掘前沿技术对接军事应用需求的潜力。例如:2016年陆军“跨越险阻-2016”地面无人系统挑战赛、2018年空军“无人争锋”智能无人机集群系统挑战赛、智胜空天-2018无人机挑战赛、2019“畅联智胜”无人蜂群联合行动挑战赛等。挑战赛可为新概念、新技术和新战术的演示验证、选拔评价提供平台,促进相关技术领域的快速突破发展,抢占高新技术制高点。

随着智能系统与复杂体系、感知与认知、分布式协同与群体智能、人机融合智能、智能机器人平台、算法战等理论与技术的不断发展与突破,航空集群将由初级形态不断向高级形态演进,最终演变成完全自主智能的无人机集群,实现较高级别的自主协同,完成复杂任务目标。

参考文献(References)

- [1] 张凤坡, 黄巍. 军事智能要突出人的作用[N]. 学习时报, 2017-11-29(6).
- [2] Tina V, Amit K. Ambika methods for solving matrix games with atanassov's intuitionistic fuzzy payoffs[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(1): 270-283.
- [3] Koiwanit J, Supap T, Chan C, et al. An expert system for monitoring and diagnosis of ammonia emissions from the post-combustion carbon dioxide capture process system [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014, 26(7): 158-168.
- [4] Challita U, Saad W, Bettstetter C. Interference management for cellular-connected UAVs: A deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(4): 2125-2140.
- [5] Xu G Y, Wei S N, Zhang H M. Application of situation function in air combat differential games[C]//Proceedings of the 36th Chinese Control Conference. Dalian, China: Shanghai Systems Science Press, 2017: 5865-5870.

- [6] Qian P, Zhou D, Huang J, et al. Maneuver decision for cooperative close-range air combat based on state predicted influence diagram[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Information & Automation. Macau, China: IEEE, 2017: 726-731.
- [7] Nicholas E, David C, Corey S, et al. Genetic fuzzy based artificial intelligence for unmanned combat aerial vehicle control in simulated air combat missions[J]. *Journal of Defense Management*, 2016, 6(1): 1-7.
- [8] 柏鹏, 梁晓龙, 王鹏, 等. 新型航空集群空中作战体系研究[J]. *空军工程大学学报(军事科学版)*, 2016, 16(2): 1-4.
- [9] 胡利平, 梁晓龙, 张佳强, 等. 航空集群系统构建机理研究[J]. *火力与指挥控制*, 2017, 42(11): 142-145.
- [10] 丁全心. 现代空战中的战术辅助决策技术[J]. *电光与控制*, 2009, 16(12): 1-4.
- [11] Lizza C, Friedlander C. The pilot's associate: A forum for the integration of knowledge-based systems and avionics[C]//Proceedings of the IEEE 1988 National. Piscataway NJ: IEEE Press, 1988: 1252-1258.
- [12] 吴文海, 张源原, 周思羽, 等. 飞行员助手项目综述[J]. *航空学报*, 2016, 37(12): 3563-3577.
- [13] 黄长强. 未来空战过程智能化关键技术研究[J]. *航空兵器*, 2019, 26(1): 11-19.
- [14] 张晓海, 操新文. 基于深度学习的军事智能决策支持系统[J]. *指挥控制与仿真*, 2018, 40(2): 1-7.
- [15] 胡桐清, 陈亮. 军事智能辅助决策的理论与实践[J]. *军事系统工程*, 1995, (1): 3-10.
- [16] 屈强. 基于MAS的作战辅助决策系统的研究与设计[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [17] 屈强, 彭军, 黎大元. 作战辅助决策多智能体系统体系结构[J]. *计算机系统应用*, 2010, 19(4): 1-4.
- [18] 陈华东, 王航宇, 王树宗, 等. 网络中心战中基于MAS的分布式辅助决策研究[J]. *火力与指挥控制*, 2010, 35(10): 11-14.
- [19] 杨晓东. 智能化战术辅助决策方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010.
- [20] Nguyen T T H. The U.S. Rebalance to the Asia-Pacific: An assessment[J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2016, 8(2): 20-39.
- [21] Luis S. The 'Third' US Offset strategy and Europe's 'Anti-access' challenge[J]. *Journal of Strategic Studies*, 2016, 39(3): 417-445.
- [22] Dustin A L, Gabriella B, Naz K M. War-algorithm accountability[R]. Cambridge: Harvard law School Program on International Law and Armed Conflict, 2016.
- [23] DARPA Public Affairs. OFFSET envisions swarm capabilities for small urban ground units [EB/OL]. (2016-12-07) [2019-06-22]. <http://www.darpa.mil/news-events/2016-12-07>.
- [24] Daniel P. Gremlins[EB/OL]. (2015-09-22) [2019-06-23]. <http://www.darpa.mil/program/gremlins>.
- [25] Office of Naval Research. LOCUST: Autonomous, swarming uavs fly into the future [EB/OL]. (2015-10-12) [2019-06-28]. <http://www.onr.navy.mil/en/Media-Center/Press-Releases/2015/LOCUST-low-cost-UAV-swarm-ONR.aspx>.
- [26] Todd H, Christopher M, Richmon T, et al. The DARPA nano air vehicle program[C]//50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Nashville, Tennessee: AIAA, 2012: 1-9.
- [27] Ledé J C. Collaborative operations in denied environment [R]. Virginia: Tactical Technology Office, 2015.
- [28] 李磊, 王彤, 蒋琪. 美国CODE项目推进分布式协同作战发展[J]. *无人机系统技术*, 2018, 1(3): 59-66.
- [29] 赵彦杰. 关于无人机蜂群系统的思考[EB/OL]. (2017-04-22)[2019-06-22]. https://www.sohu.com/a/135798486_465915.
- [30] 焦士俊, 王冰切, 刘剑豪, 等. 国内外无人机蜂群研究现状综述[J]. *航天电子对抗*, 2019, 35(1): 61-64.
- [31] Osborne T. Russia's MIG sees pilotless fighters as a focus for the future [J]. *Aviation Week and Space Technology*, 2017(12): 27-28.
- [32] Vasarhelyi G, Viragh C, Somorjai G, et al. Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago IL: IEEE, 2014: 3866-3873.
- [33] 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.
- [34] Luo Q A, Duan H B. Distributed UAV flocking control based on homing pigeon hierarchical strategies[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 70: 257-264.
- [35] 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): 205-207.
- [36] Liu Z, Gao X, Fu X. Coalition formation for multiple UAVs cooperative search and attack with communica-

- tion constraints in unknown environment[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 34(6): 688-699.
- [37] Chen J, Qiu X, Jia R, et al. Design method of organizational structure for MAVs and UAVs heterogeneous team with adjustable autonomy[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(2): 286-295.
- [38] Wan K F, Gao X G, Li B, et al. Using approximate dynamic programming for multi-ESM scheduling to track ground moving targets[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(1): 74-85.
- [39] Jian L X, Yin D, Shen L C, Niu Y F. Human machine collaborative support scheduling system of intelligence information from multiple unmanned aerial vehicles based on eye tracker[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2017, 22(3): 322-328.
- [40] Jian Y, Dong Y, Shen L C, et al. Cooperative deconflicting heading maneuvers applied to unmanned aerial vehicles in non-segregated airspace[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2018(1): 1-15.
- [41] Chen S F, Wu F, Shen L C, et al. Decentralized patrolling under constraints in dynamic environments[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 46(12): 3364-3376.
- [42] Jian L X, Yin D, Shen L C, et al. Human machine collaborative support scheduling system of intelligence information from multiple unmanned aerial vehicles based on eye tracker[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2017, 22(3): 322-328.
- [43] Wen N F, Su X H, Ma P J, et al. Online UAV path planning in uncertain and hostile environments[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2017, 8(2): 469-487.
- [44] Zhao M, Zhao L L, Su X H, et al. Improved discrete mapping differential evolution for multi-unmanned aerial vehicles cooperative multi-targets assignment under unified model[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2017, 8(3): 765-780.
- [45] Wang X G, Qin W T, Bai Y L, et al. Cooperative target localization using multiple UAVs with out-of-sequence measurements[J]. Aircraft Engineering & Aerospace Technology, 2017, 89(1): 112-119.
- [46] 侯岳奇, 梁晓龙, 何吕龙, 等. 未知环境下无人机集群协同区域搜索算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(2): 347-356.
- [47] 梁晓龙, 张佳强, 吕娜. 无人机集群[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2018: 39-46.
- [48] 梁晓龙, 何吕龙, 张佳强, 等. 航空集群构型控制及其演化方法研究[J]. 中国科学 (技术科学), 2019, 49(3): 277-287.
- [49] Xu Z F, Wei R X, Zhang Q R, et al. Obstacle avoidance algorithm for UAVs in unknown environment based on distributional perception and decision making[C]//Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation & Control Conference. Nanjing, China: IEEE, 2017: 1072-1075.
- [50] 易明. 中国电子科技集团成功完成无人机集群飞行试验[J]. 机器人技术与应用, 2017, 1(4): 11-11.
- [51] 环球网. 6月, 空军将举办“无人争锋”智能无人机集群系统挑战赛[EB/OL]. (2018-04-13)[2019-07-26]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1597615244824339785&wfr=spider&for=pc>.
- [52] 牛庆功. 有人机与无人机协同作战运用浅析[J]. 科技视界, 2013(7): 42-42.
- [53] Erwin E. Routledge hand-book of ethics and war: Just war theory in the twenty-first century[J]. Naval War College Review, 2017, 70(4): 159-161.
- [54] Mario V, Tom S, Yoshiaki K, et al. Implementation of a manned vehicle-UAV mission system[C]//IAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Rhode Island: AIAA, 2004: 1-16.
- [55] 钟赞. 有人-无人机协同作战决策问题研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2018.
- [56] 李东海, 张玉民. 未来空战的“黄金搭档”[N]. 解放军报, 2018-10-26(11).
- [57] 杨一岱, 牟婧. 有人/无人智能体协同决策技术研究现状及发展趋势研究[C]//第五届航天电子战略研究论坛论文集. 北京: 国防工业出版社, 2018: 17-20.
- [58] Liang Y, Yu S. Research on compatibility in man-machine interface design of products[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2018, 439(3): 1-6.
- [59] Moshu Q, Ke X. Fault tolerant control scheme design for formation flight control system of multiple unmanned aerial vehicles[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 35(4): 133-141.
- [60] Zhang A, Tang Z, Zhang C. Man-machine function allocation based on uncertain linguistic multiple attribute decision making[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(6): 816-822.
- [61] Eun Y, Bang H. Cooperative task assignment/path plan-

- ning of multiple unmanned aerial vehicles using genetic algorithm[J]. *Journal of Aircraft*, 2012, 46(1): 338-343.
- [62] Zhong X, Xiong P, Yan S, et al. Assessment of the feasibility of detecting concrete cracks in images acquired by unmanned aerial vehicles[J]. *Automation in Construction*, 2018, 89: 49-57.
- [63] 陈航辉. 人工智能如何颠覆未来战争[N]. *中国国防报*, 2018-01-02(4).
- [64] Gregory C A, Taniel C. Artificial intelligence and national security[R]. Philadelphia, USA: Congressional Research Services, 2018.
- [65] Networking and Information Technology Research and Development Subcommittee. National artificial intelligence research and development strategic plan[R]. Washington, USA: National Science and Technology Council, 2016.
- [66] Chen Y, Tushar K, Joel S M, et al. Eyeriss: An energy-efficient reconfigurable accelerator for deep convolutional neural networks[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2017, 52(1): 127-138.
- [67] 龙坤, 朱启超. “算法战争”的概念、特点与影响[J]. *国防科技*, 2017, 38(6): 36-42.
- [68] Krieg A, Rickli J M. Surrogate warfare: the art of war in the 21st century?[J]. *Defence Studies*, 2018, 18(2): 113-130.
- [69] 张强. 斗勇更需斗“智”军事智能化, 全新战略制高点[N]. *科技日报*, 2017-12-06(5).
- [70] 陈赤联, 王瑜, 姜希. 数据链: 破局而立者生[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2019, 14(4): 331-337, 353.
- [71] 中国航天科工三院. 三院三部复杂系统控制与智能协同技术重点实验室成功举办未来空战与人工智能高端研讨会[EB/OL]. (2018-09-27)[2019-07-27]. <http://www.casic.com.cn/n103/n135/c9381882/content.html>.
- [72] 史振庆, 梁晓龙, 张佳强, 等. 基于协同攻击区的航空集群最优空间构型研究[J]. *兵工学报*, 2019, 40(4): 788-798.
- [73] Zhang J Q, Liang X L, Shi Z Q, et al. AAM Two-on-one Cooperative Interception with Controllable Impact Time Difference[C]// 2018 IEEE/CSAA Guidance, Navigation and Control Conference. Xiamen, China: IEEE, 2018: 2286-2291.
- [74] Wang W J, Bai P, Liang X L, et al. Performance analysis and path planning for UAVs swarms based on RSS measurements[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 81: 157-166.
- [75] Hu L P, Bai P, Liang X L, et al. Solution and optimization of aircraft swarm cooperating anti-stealth formation configuration[J]. *IEEE Access*, 2018, 6(1): 71485-71496.
- [76] 张佳强, 梁晓龙, 尹忠海, 等. 航空集群协同反隐身构型与机动策略[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(11): 2518-2522.
- [77] Wang B, Liang X L, Wei L, et al. Aviation multi-station collaborative detecting based on time-frequency correlation of data-link[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 28(5): 827-840.
- [78] 朱创创. 面向任务的航空集群运动控制与演示验证研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2017.
- [79] Hu L P, Bai P, Liang X L, et al. Research on evolution method of aircraft swarms space configuration based on event-driven[C]//2018 IEEE/CSAA Guidance, Navigation and Control Conference. Xiamen, China: IEEE, 2018: 1612-1616.
- [80] He L L, Bai P, Liang X L, et al. Feedback formation control of UAV swarm with multiple implicit leaders[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 72(7): 327-334.
- [81] 景晓年. 航空集群运动一致性及其控制方法研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2016.
- [82] 梁晓龙, 刘流, 何吕龙, 等. 基于固定时间一致性的航空集群构型变换[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(7): 1506-1512.
- [83] 孙强, 梁晓龙, 尹忠海, 等. UAV集群自组织飞行建模与控制研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(7): 1649-1653.
- [84] 刘流, 梁晓龙, 张佳强, 等. 切换通信拓扑条件下的无人机集群构型变换控制[J]. *兵工学报*, 2019, 40(5): 996-1002.
- [85] 朱创创, 梁晓龙, 张佳强, 等. 无人机集群编队控制演示验证系统[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(8): 1739-1746.

Research status and prospect of aircraft swarms autonomous air combat

LIANG Xiaolong, HU Liping, ZHANG Jiaqiang, BAI Peng, REN Baoxiang, LI Zhe, HE Lulong

Air Traffic Control and Navigation College, Aircraft Swarm Technology and Operational Application Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China

Abstract Autonomous air combat of aircraft swarm is a typical difficult problem that must be studied in the field of military intelligence. On the basis of summarizing relevant theories and techniques of intelligent air combat, the paper sorts out and summarizes the research work of predecessors, clarifies the development of intelligent air combat, and focuses on analysis of aircraft swarm theory and technology as well as the application status of artificial intelligence in air combat decision-making. Its purpose is to explore possible strategies for the development of China's intelligent military and feasible ways to achieve independent air combat of the swarm.

Keywords aircraft swarms; autonomous air combat; autonomous decision-making; artificial intelligence ●



(责任编辑 刘志远)