

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.06.002

无人集群试验评估研究现状分析及理论方法

梁晓龙^{1,2}, 侯岳奇^{1,2}, 胡利平^{1,2}, 张佳强^{1,2}, 祝捷¹

(1. 空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051;

2. 陕西省电子信息系统系统集成重点实验室, 西安, 710051)

摘要: 无人集群试验评估是促进无人集群技术从理论走向实践的重要桥梁。与传统的作战系统相比, 无人集群系统具有自主协同、能力涌现、智能对抗等特点, 这已大大超出传统作战系统试验评估的范畴。针对上述现实需求, 本文旨在综述美国和中国在推进集群试验评估方面所进行的开创性工作的基础上, 主要对无人集群试验评估的概念内涵、发展现状进行了讨论分析; 结合课题组在航空集群作战领域的研究基础, 探讨无人集群试验评估的主要内容和可行的技术路线, 为军事装备的信息化升级和智能化转型奠定基础。

关键词: 无人集群; 试验评估; 自主协同; 能力涌现; 交互网络

中图分类号: V279

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2020)06-0846-09

Review on Evaluation and Theoretical Methods of Unmanned Swarm Test

LIANG Xiaolong^{1,2}, HOU Yueqi^{1,2}, HU Liping^{1,2}, ZHANG Jiaqiang^{1,2}, ZHU Jie¹

(1. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, 710051, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Meta-Synthesis for Electronic and Information System, Xi'an, 710051, China)

Abstract: Unmanned swarm test evaluation is an important bridge that promotes unmanned swarm technology from theory to practice. Compared with traditional combat systems, unmanned swarm systems have the characteristics of autonomous coordination, emergence of capabilities, and intelligent countermeasures. These have greatly exceeded the scope of traditional combat system test evaluation. In response to the above-mentioned practical needs, this paper summarizes the groundbreaking work of advancing swarm test evaluation in the United States and China, and discusses the concept and development status of unmanned swarm test evaluation. Based on our previous research on aviation swarm operations, we also explore the main content and feasible technical route of unmanned swarm test evaluation, which will lay the foundation for the information upgrade and intelligent transformation of military equipment.

Key words: unmanned swarm; test evaluation; autonomous collaboration; ability emergence; sympathetic network

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、算法战等理论与技术的不断发

展与突破, 未来战争已呈现出无人化、智能化、集群化等特征。为抢占未来军事科技制高点, 世界各主

基金项目: 国家自然科学基金(61703427)资助项目。

收稿日期: 2020-05-21; **修订日期:** 2020-11-18

作者简介: 梁晓龙, 男, 教授, 博士生导师。长期从事航空集群理论与技术、空管装备智能化等领域教学和科研工作。承担各类科研项目 20 余项, 出版专著 1 部, 发表论文 70 余篇, 申请及获批国家/国防专利 20 余项, 入选空军高层次科技人才。

通信作者: 梁晓龙, E-mail: afeu_lxl@sina.com。

引用格式: 梁晓龙, 侯岳奇, 胡利平, 等. 无人集群试验评估研究现状分析及理论方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(6): 846-854. LIANG Xiaolong, HOU Yueqi, HU Liping, et al. Review on evaluation and theoretical methods of unmanned swarm test[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(6): 846-854.

要军事强国逐步开展无人集群作战的理论研究和关键技术探索。无人集群作为群体智能与无人系统相结合的产物,融合了智能化、无人化、集群化多重优势,在军事领域具有广泛的应用前景。在人工智能技术飞速发展的推动下,无人集群系统形成作战能力指日可待。但是行百里者半九十,目前无人集群面临着野蛮发展、缺乏标准的艰难困境,亟需一套科学方法将集群技术推向应用,而集群试验评估正是牵引无人集群系统最终形成战斗力的最佳途径^[1]。与传统武器装备系统相比,无人集群系统具有自主协同、能力涌现、智能对抗等特点。这些特性已大大超出传统武器装备试验评估的范畴和模式,迫切需要针对无人集群系统的基本特征与作战运用新要求,超前布局和谋划集群试验评估技术发展,以应对自主性技术融入武器装备后带来的挑战。

无人集群试验评估是促进无人集群技术从理论走向实践的重要桥梁。国内外对无人集群作战的研究多集中于自主协同控制算法、集群分布式交互技术以及相关演示验证等方面,而对于集群试验评估方面的研究,在世界范围内都处于起步阶段,尚未达到为集群应用提供有力支撑的标准。美军近年来支持了一系列相关领域理论方法及环境构建研究,虽然在公开层面上尚未形成可供借鉴的成熟成果,但其经验认识到具体做法均具有相当积累。为此,本文通过系统梳理与总结美军和中国在推进集群试验评估方面所进行的开创性工作,理清无人集群试验评估的发展脉络,重点对无人集群试验评估基本概念与内涵、发展现状以及无人集群试验评估主要内容和方法进行了探讨。结合课题组在航空集群作战领域的研究基础,将集群试验评估分为交感网络、算法、能力3个方面,探索发展无人集群试验评估的可鉴之策,为军事装备的信息化升级和智能化转型奠定基础。

1 无人集群试验评估概念内涵

无人集群是由一定的数量的单功能和多功能、智能和非智能无人装备共同组成,以交感网络为基础,整体具有能力涌现和行为可测、可控以及可用特点的无人系统^[2]。需要指出的是:无人集群并不是多无人平台的简单编队,集群能力也不是单一平台能力的简单叠加。无人集群技术的根本目标是实现无人集群作战能力的涌现,即:由多无人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。无人集群作为群体智能与无人系统相结合的产物,具有无中心、自主协同、能力涌现等特性。这些特性已大大超出传统试验评估的范畴,必然导致其在概念界定方面具有其特殊性。因此,结合本团队在航空集群作战领域的研究基础以及美国在无人集群自主试验与评估方面所做的开创性研究工作,将无人集群试验评估定义如下:

无人集群试验评估是在无人集群试验理论与框架的指导下,依据集群试验的需求,在试验环境下,为无人集群自主协同评估制定科学、规范、有效的评估过程和评估方法,提供具有广泛适应性和较高置信度的无人集群自适应评估模型。无人集群试验评估的目的是对无人集群自主协同能力、系统健壮性、作战效能等进行的量化评价;途径是依据无人集群自主能力和协同能力等级划分方法,合理设计试验科目,同时通过量测手段有效采集试验数据以支撑能力等级的量化;要求是从战争设计的角度出发,立足于设定的战争场景,综合运用各种评估方法和优化重组评估流程,实现灵活的、可重用的和易扩展的效能评估,以满足多样化的评估任务需求。

2 无人集群试验评估研究现状与分析

2.1 美军研究现状

美军是无人集群自主性试验鉴定与评估研究领域的领先者,从经验认识到具体做法均具有相当积累。美国国防部把自主性研究作为2013—2017财年7个优先投资的科学技术领域之一,并将自主性的试验鉴定作为该领域的4个挑战性子领域之一,并且重点开展了面向无人集群平台、载荷、算法等3个方面工作^[1]。例如,2017年国防高级研究计划局(Defense advanced research projects agency, DARPA)的进攻性蜂群使能战术(OFFSET)项目^[3],其重要目标就是发展无人自主集群集成试验床。同年4月,美军提出了“算法战”的概念,旨在通过智能化转型,抵消中俄等潜在对手在装备规模和硬件技术等“显性”特征上日益缩小的差距,拉开装备在“聪明”程度等“隐性”特征上的代差,谋求和维持未来军事优势^[4]。美军认为自主性技术对传统的试验鉴定与评估带来以下3个方面的挑战^[1]:(1)“自动化—智能化—自主化—集群化”的发展趋势,带来面向认知、决策和涌现性等全新试验鉴定问题。集群化是异构多自主系统通过自组织和自同步,实现协同作业。因此美军认为面向模糊不确

定威胁的自主认知态势、复杂动态对抗环境的自适应决策以及多自主系统的集群作战样式,都与传统装备之间存在较大的差异,缺乏相应的试验评估方法。(2)人工智能的算法空间规模巨大和不确定黑箱推理模型,造成自主系统作战行为和交战结果难以预测。作为自主性基础的人工智能,无法遍历搜索人工智能输入-输出之间的清晰因果关系,难以准确预测人工智能会输出何种结果以及解释为什么会输出如此结果。(3)群体智能涌现出的社会行为,带来面向复杂性科学的试验鉴定问题。当无人自主系统发展到异构无人自主集群阶段时,个体间为了实现自组织和自同步,将会涌现出大量合作、竞争、相互学习等社会行为。而这些社会行为又会深刻影响自主集群的作战效能和作战生存力,以及整个作战力量能否达到战略目的。现有试验鉴定与评估技术均是建立在信息论、控制论、计算机等技术上,难以有效对基于社会学、复杂网络、混沌动力学等复杂性科学的群体智能社会行为及其衍生的作战能力进行评估。上述3个方面的挑战也是无人集群试验评估的面临的现实挑战。

美军率先制定了无人自主系统试验鉴定框架。2011年,美军试验资源管理中心制定了无人自主系统试验鉴定的体系结构框架,其主要目的就是推动相关技术体系化发展,所投资项目有明确的研究范围,所研究成果也有清晰的试验能力转化方向。该体系结构框架主要内容包括各类作战空间的自主系统、自主性支撑技术、自主系统试验类型、自主系统评价指标和基于LVC的混合试验环境^[1]。同时美国为使无人自主系统试验鉴定能力体系布局科学完整、不重不漏,美军从试验规划设计、建模仿真、测量控制、分析评估等方面投资相关项目,并注重构建软科学和硬科学相关技术项目齐头并进、共同研发的格局。其中,软科学技术项目包括无人自主系统试验鉴定路线图项目、无人自主系统试验鉴定自适应决策支持框架和大规模多自主主体试验想定生成项目;硬科学技术项目包括面向无人自主系统的嵌入式远程测控系统、非侵入式无线测量系统、高保真通信与数据捕获系统和有人/无人混合的LVC试验床项目等^[1]。2017年DARPA启动了“可靠自主性”项目,并于2020年2月完成了项目第一阶段。该项目第一阶段对保证方法、工具和“机器学习使能能力”进行了探索性研究开发,为自主系统开发了多种安全保证方法进行了测试,取得了初步进展。第二阶段将聚焦于技术成熟化和可扩展性,覆盖更多危险场景,增强对环境变化的稳

健性,并优化对突发事件的缓解能力^[5]。

美军率先提出了无人机自主控制等级划分标准。在无人机集群高风险/高回报概念验证研究方面,于2005年8月由美国国防部发布了《无人机系统路线图2005—2030》^[6],将无人机自主控制等级分为1至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。

2.2 国内研究现状

国内在无人集群军事应用方面研究多而分散,缺乏顶层统筹。在军事应用方面,长期以来一直处于模仿与跟跑阶段,主要侧重于平台的研究与仿制。在无人集群作战方面,起步也比美国略晚一些,在军方和工业部门的努力下,已在编队飞行、任务控制等技术方面取得单点突破,具备了跟跑乃至某些领域领跑的态势。中国电子科技集团有限公司开展了集群飞行试验,演示了密集弹射起飞、空中集结、多目标分组、编队合围、集群行动等任务^[7]。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,并取得了丰硕的成果^[8-9]。

中国在无人集群作战能力试验评估方面初步建立单项指标、性能指标的验证环境,但缺少自主协同作战等体系能力的验证方法和环境。在仿真验证平台、自主协同机理、效能评估方法方面有一些独立的研究,但面向自主协同作战的无人集群试验评估方面的研究基本处于空白状态。清华大学提出了一种在实验室环境下低成本的人工智能集群控制演示验证系统,该系统以机动自组织探测集群为验证对象,对基于人工势场法的自组织控制策略进行了演示验证^[10]。国防大学针对武器装备体系评估的现实需求,围绕体系仿真试验床,提出了基于复杂体系的体系理解、面向整个武器装备体系等8条新理念,并探讨了多重循环实验、体系指标挖掘等12项关键技术^[11]。中国电子科学研究院提出一种无人集群系统仿真平台设计方案,聚焦于无人集群系统的任务属性和群控属性,主要用于验证无人集群系统的任务执行能力和集群控制能力^[12]。空军工程大学针对目前有人机/无人机协同效果评估缺乏科学方法的现状,在确定了有人机/无人机

指控体系结构的基础上,给出了一种新的基于复杂网络的有人机/无人机协同作战网络模型描述方法和作战协同效果评估模型,并运用该模型对有人机/无人机协同作战网络拓扑模型进行了协同效果评估^[13]。海军航空大学通过分析有人机/无人机编队的作战使用方式及影响其作战效能的主要因素,建立了协同攻击海上目标的作战效能评估指标体系^[14]。

2.3 现状分析

总体看来,美国在面向无人集群的仿真鉴定与评估领域处于领跑地位,在顶层架构、基础理论和验证平台等方面均开展了先期研究,取得了一定成效。目前,中国的无人集群研究多集中于自主协同本身的算法、控制、交互等方面的研究,而对其自主协同作战能力的仿真试验评估研究基本处于空白。中国在无人集群试验评估方面还存在着诸多挑战,与美国差距主要体现在以下4个方面。

(1)尚未提出无人集群仿真试验评估理论方法。无人集群自身智能、群体行为的特征,使得其仿真试验评估方法明显有别于传统。美军已初步梳理了仿真试验评估的系统架构、技术架构、数据架构等要素,对其内在联系及外在组织运行等开展了深入研究。国内在相关领域差距较大,无人集群试验评估机理尚未突破,自主协同试验评估理论体系和框架等重要基础问题有待解决。

(2)尚未制定无人集群仿真试验评估标准规范。标准规范是约束仿真试验评估过程的重要依据,美军重视无人装备体系试验鉴定相关标准规范的研究工作,已初步建立相关标准体系,部分重要标准规范已开展推广。国内在无人集群领域的研究重心仍在无人系统本身及应用方面,对于面向自主协同、群智汇聚、智能对抗等无人集群特征的通用性、基础性试验评估标准规范研究几近空白。

(3)尚未构建无人集群试验评估环境。美军在无人集群仿真试验环境建设方面顶层统筹较为合理,通过项目经费的合理分配导向综合仿真试验环境的建立,一定程度避免了分散建设。国内目前开展的无人集群自主协同演示验证,多基于无人机系统搭建面向特定应用场景和算法的验证环境,此类验证环境在混合作战要素方面存在欠缺,同时验证环境不具备通用性,存在大量重复建设。

(4)尚未提出无人集群自主协同作战能力评估方法。美军通过对无人自主系统试验鉴定自适应决策支持框架等项目的支持,已初步开展了自主协同作战能力评估方法的研究。国内目前对如何评价无人集群自主协同能力,对协同任务/行动和自

主对抗/愈合的内在机理和外在评价准则的研究都十分有限,同时在自主协同作战能力评估手段等方面也存在空白,无法支撑对现无人集群的深化研究。

3 无人集群试验评估的主要内容和方法

无人集群是群体智能与无人系统相结合的产物。其中,无人平台以及联结无人平台之间的交感网络是构成无人系统的两大核心要素。而群体智能的核心是算法,对智能算法的试验评估是智能军事系统试验评估的重点工作和主要内容。此外,无人集群的典型特征之一是能力涌现,即多无人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。关于单无人平台的试验评估已有相当丰厚的理论积淀和技术储备,在此不再赘述。无人集群试验评估主要包含3个方面的评估:交感网络、算法、能力,如图1所示。

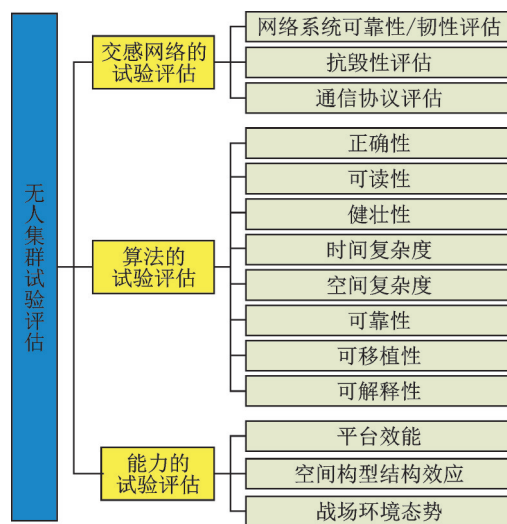


图1 无人集群试验评估主要内容

Fig.1 Main contents of unmanned swarm test and evaluation

3.1 交感网的试验评估与方法

无人集群的交感网络可以为空间上广域分布的离散作战平台提供类比单一平台内部系统级的交联信息/信号量,从而实现传感器、武器等资源的跨平台共享、柔性重组。针对无人集群系统以任务为中心、在多种复杂环境执行多样化任务的特点,进行面向任务的智能集群网络系统可靠性与韧性评估研究,能够准确、快速地预测集群在弹性结构、动态重构下完成规定任务的能力,并分析集群自组网和重组策略,为支撑复杂作战环境下的无人集群

网络拓扑控制、协议优化和网络管理具有重要意义。由于集群平台移动和环境变化具有高度动态性和不可预测性,集群内部会频繁地发生链路中断和拓扑结构变化,加之集群系统对通信时延具有高度敏感性,在评估时需要着重考虑动态性和通信延迟对集群网络的影响。此外,受限于集群平台的载荷,其通信设备和供电设备趋向小型化,节能高效的通信协议对集群网络寿命至关重要,也是集群评估中的重点内容。

在方法层面上,目前已有很多较为成熟的无线网络效能评估方法,具体可分为3类。(1)定性知识评估法:通过分析集群网络系统的工作过程,提取影响可靠性的指标,采用如层次分析^[15]、模糊逻辑^[16]等方法计算可靠性评估值。(2)数据驱动评估法:基于对集群网络系统大量历史数据的分析,发现存在于数据中的特征信息,从而实现可靠性评估。常用的数据驱动评估法包括神经网络^[17]、蒙特卡罗法^[18]、马尔可夫分析法^[19]、聚类分析法^[20]等。基于数据驱动的可靠性评估研究是当前的热点问题,但其难点在于数据难以获取。(3)混合评估法:采用新的技术将定量数据和定性知识进行结合,实现对集群网络系统的可靠性评估,如模糊神经网络^[21]。这种方法综合了定性分析方法和定量分析方法的优点,降低了对数据量的要求。

集群在对抗的环境中执行任务时,不可避免地会出现节点损毁、通信失联等情况,高抗毁性网络能够更大程度保持网络连通,从而支撑集群完成规定任务。网络抗毁性评估是交感网络评估的一个重要分支。在网络抗毁性方面,本研究团队针对交感网络的特点,提出了一种基于节点影响力的网络抗毁熵综合评估方法,下面以该方法为例进行实例分析。通过节点连接度和节点损毁后网络性能的下降程度来度量节点影响力,建立网络抗毁熵模型来表征不同影响力的节点在网络中的显著程度和分散程度,从而度量节点攻击下的网络抗毁性。综合考虑节点连接度和节点在网络中的位置2个影响因素,评估节点影响力

$$S_i = \frac{k_1 d_i + k_2 e_i}{\sum_{i=1}^N (k_1 d_i + k_2 e_i)} \quad (1)$$

式中: k_1 、 k_2 为专家赋权法给出的权值; d_i 为节点 i 的节点度; e_i 为节点 i 的网络效率影响力。通过删除节点后网络效率下降率来计算网络效率影响力,用于表征节点在网络中的位置。通过节点影响力评估后,影响力高的节点可以视为网络中的关键节点,对网络的全局效率和连通性具有较高的影响程

度。网络抗毁性与节点影响力密切相关,网络中影响力高的节点在网络中越突出,该节点损失后对网络破坏性越强,则网络抗毁性越低。用所有节点影响力的显著程度和分散程度来刻画这种特性,定义网络抗毁熵为

$$D(G) = - \sum_{i=1}^N S_i \ln S_i \quad (2)$$

$D(G)$ 反映了节点影响力在整个网络中分布的均匀程度,其值越大,则网络中不同节点之间影响力的差异越小,网络在遭受蓄意攻击时的抗毁性越强。式(2)从网络拓扑结构和节点的角度给出网络抗毁熵的算法,下面通过实例仿真对该方法进行验证。

采用单位圆盘图模型建立无人集群通信网络模型,随机生成2组由100架位置随机的无人机组成的无人机集群,将每个无人机视为节点,连边由节点距离是否小于通信距离来确定,生成的无向无权网络 G_1 、 G_2 。通过式(2)计算得 G_1 和 G_2 的网络抗毁熵分别为4.409 4和4.486 3, G_2 的抗毁性高于 G_1 。图2给出了随机攻击和蓄意攻击下最大连通子图节点数随攻击节点数变化曲线。

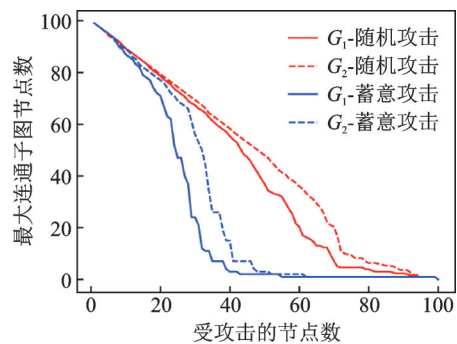


图2 最大连通子图节点数变化曲线

Fig.2 Curves of the largest number of connected subgraph nodes

从图2可以看出,无论 G_1 还是 G_2 ,在面对蓄意攻击时,最大连通子图节点数下降较为剧烈,而面对随机攻击时则较为平缓。对比图中虚线和实线可以看出,在随机攻击或蓄意攻击下, G_2 的最大连通子图节点数始终高于 G_1 ,网络 G_2 在攻击下的连通性保持能力要更强。统计仿真数据可以得到, G_2 的网络抗毁性高于 G_1 ,这与网络抗毁熵计算结果一致,也验证了该方法的可行性。除网络抗毁性外,交感网络还可以从网络速率、通信协议和功率消耗等方面进行评估。

3.2 算法的试验评估与方法

无人集群的“智能”主要在于算法,对智能算法的测试评估是无人集群试验评估的重要内容。传

统的算法评估主要从正确性、可读性、健壮性、时间复杂度以及空间复杂度5个层面进行衡量。其中,时间复杂度和空间复杂度是评估算法效率的核心指标。对于无人集群算法评估而言,其除了传统的5项衡量指标外,更关注算法的可靠性、可移植性以及可解释性指标。其中,可靠性指在规定的条件下和规定的时间内,算法正确完成预期功能,且不引起系统失效或异常的能力;可移植性指算法可以在多个运行环境中正常运行;可解释性是指输入与输出之间的因果关系是可回溯,可理解的。此外,如何提高智能算法的抗干扰能力,防止系统被敌方侵入、利用和控制也是在算法评估中需要重点考虑的。无人集群算法的试验评估主要目的是定量分析算法性能,摸清算法底数,明确算法在什么情况下好用,在什么情况下不好用,什么样本能够让算法失灵,以便为算法优化提供依据。

针对业界缺乏对深度学习算法可靠性、可移植性、效率等的系统性评估方法的现实难题,国内人工智能开源软件发展联盟联合国防科技大学等15家产学研单位共同编制了中国首个人工智能深度学习算法团体标准《人工智能深度学习算法评估规范》(T/CESA 1026—2018)^[22]。该标准提出了人工智能深度学习算法的评估指标体系、评估流程,以及需求阶段评估、设计阶段评估、实现阶段评估和运行阶段评估等内容,为无人集群算法可靠性评估提供了很好的参考依据。在群体智能算法性能评估方面,可借鉴最优化理论,将群体智能算法视为一个寻找全局最优解的最优化问题,综合考虑各方面因素来对其性能进行整体评估^[23]。鉴于上述所提的群体智能算法的评估系统本身是一个通用的评估平台,适用于各种不同的问题场景。为了便于描述本文以无人集群搜索敌方目标为例,对群体智能算法寻优过程进行模拟,从而构建其评估模型。

令 $E_1 = |p_i - p_{\text{target}_j}|$ 。其中, p_i 表示无人机 i 当前所在的位置, p_{target_j} 表示无人机 i 的一个局部最优点,即下一个目标的坐标点。要评价其局部寻优性能,引入搜索时间的因素,得到 $E_2 = \int_{t=0}^T |p_i(t) - p_{\text{target}_j}(t)| dt$, 表示无人机 i 在 p_{target_j} 附近运动的描述。 T 为无人机搜索的总时间, T 越大, E_2 的值越大,表示局部搜索性能越差。考虑到集群不止一架无人机,还需要考虑其他无人机搜索的情况。此外,每架无人机完成某个目标搜索后,会继续搜索下一个目标,直到区域全部搜索完毕或者满足一定的约束条件才终止。为此,进一步修改

E_2 得到 $E_3 = \int_{i=1}^M \int_{t=0}^T |p_i(t) - p_{\text{target}_{i(k)}}(t)| dt di$, 其中, M 表示无人机集群规模。显然,无人机规模越大,则 E_3 值越大,意味着评价越低。更进一步考虑到,当无人机与其局部最优点很近的时候,可以很快地完成;距离较远时,搜索时间越长,效能越低。为此,以最优化理论为指导,在 E_3 的基础上,引入起始位置因子 $p_i(0)$, 得到 $E_4 = \int_{i=1}^M \int_{t=0}^T |p_i(t) - p_{\text{target}_j}(t)|^2 / |p_i(0) - p_{\text{target}_j}(t)|^2 dt di$ 。至此,对群体智能算法的局部扰动函数部分就全部生成了。在此基础上,还要考虑加入时间收敛性 Q 和全局相对误差指标 R 。其中, $Q = P \cdot t$ ($P = \frac{m}{T \cdot S \cdot N}$ 表示环境因子, m 为参与搜索的无人机数量, S 为搜索区域范围, N 为区域目标数量; t 为时间因子), $R = \frac{C_{\text{Cur}}}{C_{\text{Best}}}$ (C_{Cur} 为当前搜索任务分配策略,即当前运行时所有的无人机搜索路径之和; C_{Best} 是理论上的全局最优解,可视为在最优搜索策略下无人机搜索的路径之和)。最终得到

$$E_5 = \int_{i=1}^M \int_{t=0}^T |p_i(t) - p_{\text{target}_j}(t)|^2 / |p_i(0) - p_{\text{target}_j}(t)|^2 \cdot \frac{m \cdot t}{T \cdot S \cdot N} \cdot \frac{C_{\text{Cur}}}{C_{\text{Best}}} dt di \quad (3)$$

该式可以用来量化的评估一个群体智能算法的优劣。其中,时间因子 t 的引入,不仅是加强收敛时间对整体性能评估的影响,同时也是使得同样的扰动下,算法越早结束,评价越高,因为 t 会慢慢增大。这样就可以从两个方面确保时间收敛性的评估更加合理。该评估模型将局部鲁棒性、时间收敛性、全局可行解相对误差以及环境因子综合成一个全面的评估公式,为从整体上衡量一个群体智能算法成为了可能。

在理论模型构建的同时,基础平台的建设也是必不可少的。在研究算法战的基础上,本研究团队探索搭建集群算法对抗评估演示验证平台,平台的核心架构如图3所示。该平台的核心架构主要由推演引擎环境辅以对抗调度模块,对抗场景库构成,与航空集群对抗算法代码相结合,实现集群算法训练与对抗以及评估,图中带箭头的不同颜色直线分别表示各个部分的信息流向。因此,结合无人集群军事应用领域特性,无人集群算法试验评估至少包含以下4个环节:(1)针对特定的作战背景,设计算法指标体系;(2)数据集构建,包括人工标注真实场景数据以及仿真生成并自动标注虚拟场景数据;(3)算法仿真评估,扩大试验条件,在各种极

限条件下评估算法的性能;(4)算法的实战评估,通过作战试验,摸出算法底数,评估算法在不同情况下的表现,为提升算法性能和合理使用现有算法提供真实可信的试验结果依据。

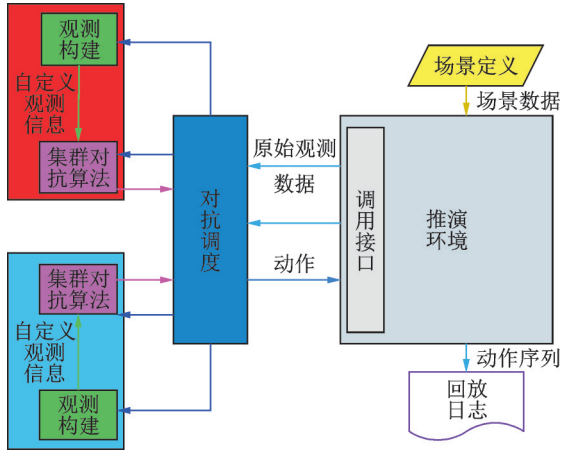


图3 集群算法对抗评估演示验证平台示意图

Fig.3 Diagram of demonstration and verification platform for swarm algorithm confrontation evaluation

3.3 能力的试验评估与方法

基于交感网络的能力涌现度量是无人集群智能涌现可控性、可用性的重要基础。对于无人集群系统而言,其能力涌现性是由不同无人平台的功能耦合、不同构型的结构效应以及不同战场态势下的环境因素3方共同造就的^[24]。其中,功能耦合和环境因素是产生无人集群能力涌现的基础,空间构型效应决定了其能力涌现的类型和层次。此外,无人集群能力的产生是基于特定的作战任务背景的,能力涌现的过程是一个高度动态的对抗过程。因此,无人集群能力的试验评估必须基于“整体、动态、对抗”的方式才能评估^[11],具体可从无人平台体系效能评估、平台之间的空间构型效应评估以及战场环境的态势评估3个层面综合进行评估。

无人平台体系效能评估与传统的武器装备效能评估最大的不同之处,就在于体系才是主角,必须从整体上进行评估,而不能采用先拆成局部再汇总的方式进行评估。同时,体系效能的衡量重在个体对体系的贡献率上。体系贡献评价可通过体系作战综合效能和费效变化来表达体现。另外,整个评估过程不是静止的,而是动态的,其评估也不是一蹴而就,而是循环往复的。上述特性与文献[11]提出的体系仿真试验床设计理念十分契合,非常值得借鉴。空间构型的结构效应是指无人集群的规模大小以及各个平台之间需要满足的空间约束,其评估可按照“任务—能力—构型”的逻辑,建立无人集群作战能力与空间构型之间的映射关系,从而得

到评估模型。例如,本团队在研究航空集群协同反隐身能力涌现度量时,通过构建目标函数,建立反隐身能力指标与发射机-接收机之间的基线距离、方位角的映射关系发现:通过发射机和接收机之间的空间构型优化可以大幅度提升反隐身探测能力;发射机数量一定时,与之协同的接收机数量也应有所限制,一般“1发4收”可以获得较好的协同反隐身探测效果^[25]。该结论在一定程度上实现了集群空间构型的有效度量,量化了不同情景下的空间构型优劣。随着未来战争形态的演变,战场环境越来越复杂,传统的模糊效能评估方法已无法满足其实时性、准确性的评估需求。为此,大数据以及数据挖掘技术开始崭露头角。从大数据分析角度出发,利用深度学习来处理海量的战场大数据,充分挖掘大数据的整体信息,全面探索大数据中的多样性及相关性,对大数据战场态势进行科学、合理的特征表示,从而实现战场环境态势大数据到态势特征的有效映射,并进一步深入分析态势特征之间的关联关系。通常,可从空间、时间分布角度来研究大数据战场态势特征表示及其关联关系。在此基础上,利用所得分析结果来构建基于深度学习的战场环境态势评估模型,以给出有效的评估结论。

4 结 论

本文从无人机集群概念内涵入手,首先,界定了无人集群试验评估的概念与内涵;然后,重点对美国与中国在无人集群试验评估方面所做的探索性工作进行了总结梳理,并提出了4个方面的现状差异;最后,结合团队在航空集群作战领域的研究基础,从网络、算法以及能力3个方面探讨了无人集群试验评估的主要内容以及可行的方法路径。后续工作将面向4个方面挑战展开研究,下一步重点在方法层面上对无人集群试验评估进行研究,探索无人集群试验评估从理论走向实践的可行之路。

参考文献:

- [1] 周宇,杨俊岭.美军无人自主系统试验鉴定挑战、做法及启示[EB/OL].(2017-04-08)[2020-01-08].
<https://mp.weixin.qq.com/s/Lb7KlaihHQdFgMSIJEfjew>.
ZHOU Yu, YANG Junling. Challenges, practices and enlightenment of test and identification of U.S. army unmanned autonomous system[EB/OL].(2017-04-08)[2020-01-08].
<https://mp.weixin.qq.com/s/Lb7KlaihHQdFgMSIJEfjew>.
- [2] 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.
BAI Peng, LIANG Xiaolong, WANG Peng, et al. Research on new air combat system of aircraft swarms [J]. Journal of Air Force Engineering University (Military Science Edition), 2016, 16(2):1-4.
- [3] DARPA Public Affairs. OFFSET envisions swarm capabilities for small urban ground units [EB/OL]. (2016-12-07) [2019-10-17]. <http://www.darpa.mil/news-events/2016-12-07>.
- [4] 胡利平,梁晓龙,柏鹏,等. “算法战”及其在空战领域中的应用研究[J]. 国防科技, 2020, 41(1):57-62.
HU Liping, LIANG Xiaolong, BAI Peng, et al. Research on algorithmic warfare and its application in air combat [J]. National Defense Technology, 2020, 41(1):57-62.
- [5] 冯云皓. DARPA“可靠自主性”项目测试自主系统安全保证技术[EB/OL]. (2020-02-07) [2020-02-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/VtzWsR-s1zL2d2tKzJlHw>.
FENG Yunhao. DARPA “Reliable Autonomy” project tests the security assurance technology of autonomous systems [EB/OL]. (2020-02-07) [2020-02-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/VtzWsR-s1zL2d2tKzJlHw>.
- [6] Office of the Secretary of Defense. Unmanned aircraft system roadmap 2005—2030 [R]. Washington DC: Office of the Secretary of Defense, 2005.
- [7] 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.
YI Ming. China electronics technology group successfully completed the UAV swarm flight test [J]. Robot Technique and Application, 2017, 1(4):11.
- [8] 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.
- [9] LUO Qinan, DUAN Haibin. Distributed UAV flocking control based on homing pigeon hierarchical strategies [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 70:257-264.
- [10] 安梅岩,兆魁,张育林. 人工智能集群控制演示验证系统[J]. 机器人, 2016, 38(3):265-275.
AN Meiyang, ZHAO Kui, ZHANG Yulin. Demonstration and verification system for artificial intelligent swarm control [J]. Robot, 2016, 38(3):265-275.
- [11] 胡晓峰,杨镜宇,张昱. 武器装备体系评估理论与方法的探索与实践[J]. 宇航总体技术, 2018, 2(1):1-11.
HU Xiaofeng, YANG Jingyu, ZHANG Yu. Exploration and practice to the theory and method of evaluating weapon system of systems [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(1):1-11.
- [12] 刘立辉,赵彦杰,赵小虎,等. 一种无人集群系统仿真平台设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017, 12(5):506-512.
LIU Lihui, ZHAO Yanjie, ZHAO Xiaohu, et al. Design of a simulation platform of unmanned swarm system [J]. Journal of CAEIT, 2017, 12(5):506-512.
- [13] 周义蛟. 有人机/无人机协同作战超网络社团化算法设计[C]//中国航空学会2017年(第三届)中国航空科学技术大会论文集(上册). 北京:中国航空学会, 2017:392-397.
ZHOU Yijiao. Design of association algorithm for the manned/unmanned air vehicle cooperative combat [C]// Proceedings of the 3rd China Aeronautical Science and Technology Conference. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2017:392-397.
- [14] 王光源,孙涛,毛世超,等. 基于任务协同的有人机/无人机对海攻击作战效能评估研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(5):491-495.
WANG Guangyuan, SUN Tao, MAO Shichao, et al. Research on effectiveness assessment for attack against maritime targets of manned/unmanned vehicles based on mission cooperative [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2017, 32(5):491-495.
- [15] 赵锋,郭爱煌. 基于网络层次分析法的无线自组网性能评估指标研究[J]. 传感技术学报, 2011(1):115-119.
ZHAO Feng, GUO Aihuang. The research of wireless ad hoc networks evaluation index system based on ANP [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011(1):115-119.
- [16] SIVAKUMAR R, DURAISAMY S. A novel improved hybrid authenticated trust systems with fuzzy logic for trust evaluation in military wireless sensor networks [J]. Middle-East Journal of Scientific Research, 2016, 24(3):705-711.
- [17] WANG G, WEI J. Design and implementation of wireless sensor network nodes based on BP neural network [J]. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 2014, 6(6):965-969.
- [18] AHMED M R, HUANG Xu, CUI Hongyan. Markov chain monte carlo based internal attack evaluation for wireless sensor network [J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2013, 13(3):23-31.
- [19] YIN Rongrong, LIU Bin, LIU Haoran, et al. A quantitative fault tolerance evaluation model for topology in wireless sensor networks based on the semi-Markov

- process[J]. Neurocomputing, 2015, 149: 1014-1020.
- [20] 文志诚, 陈志刚, 唐军. 基于聚类分析的网络安全态势评估方法[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(9): 1407-1414.
- WEN Zhicheng, CHEN Zhigang, TANG Jun. Network security assessment method based on cluster analysis[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(9): 1407-1414.
- [21] 李建平, 王晓凯. 基于模糊神经网络的无线传感器网络可靠性评估[J]. 计算机应用, 2016, 36(2): 69-72.
- LI Jianping, WANG Xiaokai. WSN reliability evaluation based on fuzzy neural network[J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(2): 69-72.
- [22] 中国电子技术标准化研究院. 人工智能深度学习算法评估规范: T/CESA 1026—2018[S]. 北京: 中国电子工业标准化技术协会, 2018.
- China Electronics Standardization Institute. Artificial intelligence: Assessment specification for deep learning algorithms: T/CESA 1026—2018 [S]. Beijing: China Electronics Standardization Association, 2018.
- [23] 甘旭东. 群体智能算法的评估与分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- GAN Xudong. Evaluation and analysis of swarm intelligence algorithms[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [24] 梁晓龙, 何吕龙, 张佳强, 等. 航空集群构型控制及其演化方法[J]. 中国科学: 技术科学 2019, 49(3): 277-287.
- LIANG Xiaolong, HE Lyulong, ZHANG Jiaqiang, et al. Configuration control and evolutionary mechanism of aircraft swarm[J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(3): 277-287.
- [25] HU Liping, BAI Peng, LIANG Xiaolong, et al. Solution and optimization of aircraft swarm cooperating anti-stealth formation configuration[J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 71485-71496.

(编辑: 张蓓)