

中图分类号: V279

文献标志码: A

文章编号: 1674-2230(2018)03-0030-07

# 无人集群作战建模与仿真综述

张 阳<sup>1,2</sup>, 司光亚<sup>1</sup>, 王艳正<sup>1</sup>

(1. 国防大学, 北京 100091; 2. 中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 在分析无人集群发展沿革的基础上, 对无人集群的定义进行了分析, 总结了无人集群作战理论的研究现状, 重点分析了其在网电空间作战中的优势, 总结了作战实验与实践开展的情况。对无人集群作战的建模仿真框架、指控架构、任务规划的国内外研究情况进行了总结与分析, 在此基础上立足于体系对抗层次, 分析了无人集群作战建模与仿真的问题与挑战。

**关键词:** 无人集群; 作战建模与仿真; 作战实验

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2230.2018.03.007

## Review on Modeling and Simulation of Unmanned Swarm Operation

ZHANG Yang<sup>1,2</sup>, SI Guang-ya<sup>1</sup>, WANG Yan-zheng<sup>1</sup>

(1. National Defence University, Beijing 100091, China; 2. LEETC, Luoyang, Henan 471003, China)

**Abstract:** On the basis of analyzing the history of the unmanned swarm, the definition of the unmanned swarm is given, the research status of the unmanned swarm operation theory is summarized, the advantages in cyberspace operations are analyzed, and the situations of the combat experiments and practices are summed up. Then, the M&S framework, the Command and Control (C<sup>2</sup>) architecture and the mission plan are summarized. Be established in the view of system-of-system (SoS) combat, the problems and challenges of the unmanned swarm operation M&S are analyzed.

**Key words:** unmanned swarm; operation modeling and simulation; combat experiment

## 1 引言

随着智能技术、大数据技术、增材技术等高新技术的迅猛发展, 未来以无人化装备作为战场主力的无人化、智能化战争新形态逐渐浮出水面。无人集群相比于只能执行单一任务、鲁棒性差、造价高昂的单个平台, 具有无中心、自主协同等特点, 在未来战争中将具备情报优势、速度优势、协同优势、数量优势以及成本优势<sup>[1-2]</sup>。各主要军事强国将无人集群作战视为未来信息化战争的重要作战样式, 纷纷投入了大量人力物力, 研究无人

集群作战的军事理论, 谋划无人集群装备的发展蓝图, 研发无人集群装备并进行实践检验。

对于无人集群装备的作战运用研究、发展论证与作战试验鉴定而言, 建模与仿真是具有天然优势的有效手段。通过对于无人集群装备以及作战行动的建模与仿真, 可以在虚拟的环境中测试装备的技战术性能, 验证与改进集群协同行动的相关算法, 并通过“虚拟实践”<sup>[3-4]</sup>的方式探索面向不同使命任务的无人集群的最佳作战运用方式, 为无人集群的作战概念与作战条令的形成提

收稿日期: 2017-11-14; 修回日期: 2017-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(U1435218)

作者简介: 张阳(1986—), 男, 河南洛阳人, 博士研究生, 主要研究信息对抗仿真与计算机战争模拟; 司光亚(1967—), 男, 河南柘城人, 博士, 教授, 研究方向为战争模拟; 王艳正(1976—), 男, 河北东光人, 博士, 博士后, 研究方向为武器装备体系对抗仿真。

供数据与模型的支撑,并指导无人集群技术的发展方向。

本文将从无人集群作战理论与应用,以及无人集群作战建模与仿真两方面对国内外相关研究情况进行综述,并对建模与仿真存在的问题与面临的挑战进行分析。

## 2 无人集群的基本概念分析

无人集群最初是由无人机发展起来的。无人机全称是无人驾驶飞行器(Unmanned Aerial Vehicle, UAV),一般定义为<sup>[5]</sup>:“无人驾驶、自行推进、利用空气动力承载飞行并可重复使用的飞行器”。随着飞行器技术、信息技术等技术的进步,以及无人机在军事上运用范围的不断扩大,无人机逐渐由单机形成具有地面控制站、测控系统、通信系统等组成的无人机系统(Unmanned Aircraft Systems, UAS)<sup>[6]</sup>。近年来智能技术以及自组网技术的飞速发展,使得众多无人机可以聚合起来形成共同完成作战使命的整体,成为“无人机集群”。目前,智能技术不仅可以应用于无人机,还可以应用于无人地面车辆、无人水面舰艇、无人潜航器等,美国DOD等已经将“无人机集群”已经扩展为“无人集群”(Unmanned Swarm)<sup>[7-8]</sup>,使得该概念能够涵盖陆、海、空、天等各作战域。无人集群”装备研发与军事运用研究的重点是“无人机集群”<sup>[9]</sup>。

目前,对于“无人集群”并没有权威的定义,由于研究人员具体研究领域不同,存在着多种内涵相同或相近的描述,如“无人机集群”、“无人机群组”、“无人蜂群”、“群机器人”等<sup>[1,10-15]</sup>。这些表述本质都是相同的:大量相对简单的个体通过合作在整体层面涌现出集群智能,从而完成复杂任务,是集群智能的一个具体应用领域。

通过对这些文献进行对比分析,本文认为“无人集群”、“无人机集群”与“无人蜂群”不同之处主要包括四点:一是个体的智能程度不同;二是个体的作战领域不同;三是个体的采办成本不同;四是群体的构成组分不同。本文的研究主体为“无人集群”,是相关概念中覆盖面最广、通用性最高的概念。

## 3 无人集群作战理论与实践现状

### 3.1 无人集群作战理论研究现状

作战理论是装备设计与研制的指导,特别是对于颠覆性装备,必须运用战争工程理念的思维方式指导装备需求论证与开发,从而实现“打什么仗用什么装备”。

作战构想理念方面,2016年6月,美空军发布了《小型无人机系统路线图2016-2036》<sup>[16]</sup>,计划通过短期与长远规划,协调各部门的研究与论证工作,成体系地发展无人集群,并使得“无人集群”等作战概念从研发过渡到实战,获得对对手的“不对称优势”,从而“填补战略与战术之间的空白”。同年9月,美国陆军着眼于未来对抗“反介入/区域拒止”(A2/AD)体系的复杂战争局势,提出了“多域战”概念<sup>[17]</sup>,突出多种作战域能力的联合互补运用,希望通过无人集群的研制与应用,有效应对中俄两军日益增长的电子战、网络战等威胁。此外,美国国防部每两年发布一版针对未来25年的无人路线图<sup>[7-8]</sup>,旨在阐明美军联合作战层面将无人集群融入兵力结构的构想,并明确具体措施步骤。美国各军兵种也纷纷推出各自的无人集群发展规划与作战构想。

在作战构想的指导下,近几年来美国围绕无人集群作战启动多个演示验证项目,典型项目包括美国国防部战略能力办公室和空军“微型无人机高速发射项目”、海军“低成本无人机蜂群技术项目”、DAPRA“小精灵项目”与“进攻性蜂群使能战术项目”等<sup>[18-19]</sup>。

### 3.2 无人集群的作战实验与实践

无人集群的作战实验是验证无人集群作战理念,检验集群装备设计的有效手段。目前,美军已经开展了多次无人集群作战概念的仿真演示与测试,并以此来提高无人集群的作战效能,引领无人集群装备的发展。早在2002年,美军联合部队司令部“阿尔法计划”实验室对无人集群的效能进行了研究<sup>[1]</sup>,结果初步表明无人机集群作战具有较高的效能优势。2012年,美国海军研究生院进行了无人集群与“伯克”级驱逐舰的攻防仿真实验<sup>[19]</sup>。实验结果表明,当由8架无人机组成的无人集群进行攻击时,平均有2.8架能够避开“宙斯盾”系统与“密集阵”系统的跟踪与拦截。目

前,美军推进“阿凡达”项目<sup>[20]</sup>,计划使用有人版 F-35 战机与无人版 F-16 战机协同编组,由高度自主的 F-16 战机接收 F-35 的指令对目标实施打击。

目前各国真正入役的无人集群装备还比较少,因此无人集群投入实战的机会并不多。俄军率先将无人集群投入到反恐实战。2015 年 12 月,俄军由 6 台履带式“平台-M”无人战车、4 台轮式“阿尔戈”无人战车组成的无人战车集群对伊斯兰极端势力进行攻坚作战并创造辉煌战绩,开创了无人集群实战应用的先例。

## 4 无人集群作战建模与仿真现状

目前对无人集群建模与仿真的研究工作主要集中在技术层面,包括航路规划、任务分配、自组网通信等实现方法,以及 PSO 算法、蚁群算法、合同网等关键算法。研究人员希望突破无人集群相关的关键技术,研制出无人集群产品。国内外对于无人集群作战运用相关领域的建模与仿真研究都较少。美国海军认为<sup>[21]</sup>：“在无人集群技术不断发展的今天,关于无人集群作战的条令与规定反而被忽略了。必须依赖于建模与仿真技术,设计合适的测试想定,从而引领无人集群装备的发展需求。”本文从作战运用的角度进行总结与分析,研究当前国内外针对无人集群作战建模与仿真的现状。

### 4.1 作战建模仿真框架研究现状

在无人集群作战建模与仿真框架研究方面,国内外关于无人集群军事概念建模的研究均较少,尚未形成统一的标准框架与规范,通用性不强,难以指导无人集群的军事实践。美国国防部概括并抽象出了无人集群作战行动建模与仿真问题域框架“思考—观察—移动—会话—工作”,并给出解决这些问题需要做的工作<sup>[7]</sup>。该框架指明了无人集群作战行动建模与仿真中需要解决的若干重要问题以及难点。美国海军研究生院<sup>[21-22]</sup>提出了一种无人集群作战条令与体系设计一体化框架。该框架认为未来无人集群作战条令必须体现集群去中心化、自组网、扁平化结构等特征,研究了无人集群的指控架构,并建了无人集群作战行动“使命—战术—行动—算法—数据”

五层任务框架,分析了每层任务中指挥员与无人集群的具体任务,并以无人集群 ISR 以及空战任务为例给出了其作战行动军事概念模型示例。此外,在美国飞行与导弹研究发展与工程中心的支持下,Dabkowski<sup>[23]</sup>开展了针对无人集群行动控制的相关研究,包括目标探测、对敌攻击等,并进行了仿真验证。北京理工大学王玥教授<sup>[24]</sup>针对微小型无人飞行器(MAV)建立了 MAV 集群作战过程模型,包括信息收集、信息融合、态势评估、战术决策、制定计划、指挥引导与执行命令等阶段。

目前,国内外大多数文献都是针对无人集群作战中的某具体行动或具体阶段的建模与仿真活动开展研究,其中最主要的是指挥控制行动与任务规划行动。其中,指挥控制行动的研究重点是无人集群指控架构的设计与分析;任务规划行动的研究重点是无人集群的任务分配与航迹规划方法。

### 4.2 无人集群指控架构研究现状

将多平台协同控制延伸至大规模集群指挥控制时,需要从指控架构、指控流程等指控机制上进行更多本质上的改变。如何高效地指挥控制无人集群,如何设计并构建鲁棒性强、运行效率高的无人集群指控架构,如何快速构建适应性好、扩展性佳的无人集群编队队形、如何分析无人集群指控架构面对不同环境不同任务的动态演化机理,已经成为集群智能相关的新兴研究领域。

一些文献参考了作战体系指挥控制架构与 MAS 系统架构,将无人集群指控架构分为集中式、分布式与集散式等,并认为为了提高集群的自主能力,降低指挥员的认知压力,指挥员应对无人集群中发挥任务级的监督作用,并将任务的自主权分散到集群中的众多个体中。美国海军研究生院 Giles<sup>[21]</sup>定性地分析了集中式架构与分布式架构各自的优势与劣势,认为集中式将限制无人集群中个体之间的交互,而分布式架构将可能会导致通信阻塞。Giles 提出了一种面向作战使命的混合式指控架构,如进行态势感知时采用分布式架构,进行目标分配时采用集中式架构等,并运用有限状态机方法自动地进行集群指控架构的动态调整。这种设计可以有效将集中式与分布式架构的优势相结合,具体的动态调整方法尚有待深入研究。在美国海军研究办公室的资助下,Ti-

wari<sup>[25]</sup>提出了引导效率与能量消耗两个衡量指标,通过探索性仿真分析的方式,研究了领队位置与数量对于无人集群控制能力的影响。仿真结果表明领队位置对于无人集群转向能力具有决定性影响,并且领队处于集群中心或者外围将会使得集群转向能力更好。国内海军工程大学石章松教授研究团队<sup>[26]</sup>针对无人作战系统的特点和任务需求,研究了层阶结构的指挥控制模型,阐述了任务实现的逻辑结构,分析了协调解决任务执行过程中各平台计划和行动之间的层次化逻辑及相互影响问题。

无人集群的指控架构不是一成不变的,实战中指挥员需要针对所执行的任务选取合适的指控架构模型。在这方面关于指控架构模型选取的标准问题,相关研究的工作还比较少。文献<sup>[27]</sup>认为,指控架构模型的选取需要权衡打击目标的反击速度、性能最优、可预测性、组织结构稳定性以及通信弱点等多种因素。空军工程大学郭基联教授团队<sup>[28]</sup>运用协同OODA环模型,利用复杂网络理论,运用连接概率的网络生成模式,并结合有人/无人协同作战的实际情况,生成了有人/无人协同作战随机网络拓扑模型,分析了有人/无人协同效果的影响因素。

#### 4.3 无人集群任务规划研究现状

无人集群任务规划是指根据地理信息系统和卫星侦察设备提供的战区地图信息、敌方防空系统部署情况以及无人飞行器的飞行性能参数等信息,为无人集群分配任务并规划出一条或多跳安全系数大、突防概率高、飞行距离短的飞行路线,以满足战场侦察、攻击、电子干扰、通信中继等不同作战任务类型对无人集群的战术使用要求<sup>[29]</sup>。无人集群任务规划从功能上包括无人集群任务分配与无人集群航路规划。任务分配是指为无人集群协调一致完成任务,考虑各种约束条件,为集群分配攻击目标,并设计粗略航路。航路规划是指根据集群任务的约束条件、集群性能以及战场环境等因素同时为多个个体设计完成任务的飞行航路,并满足集群在空间与时间上的协调一致关系<sup>[30]</sup>。

目前,国内外针对任务规划的研究集中在技术层面,开发了大量的飞行器任务规划系统,并研究了多种任务分配与航路规划方法,在体系对抗

层面从作战角度关于任务规划模型的研究成果并不多。Yi教授<sup>[31]</sup>分析了无人集群在线任务规划难点,提出了一种基于Agent理论的分层任务规划模型,采用一个控制Agent进行全局任务分配,集群中的其他个体进行局部任务安排,给出了具体算法步骤,并进行了仿真验证。该研究成果条理清晰,能够相对容易的转化为规则,适用于体系对抗建模与仿真环境。

##### (1) 无人集群任务分配方法

无人集群任务分配实质是多目标多约束的最优化问题。针对无人集群集中式与分布式指控架构,无人集群任务分配方法可以分为集中式任务分配方法与分布式任务分配方法两大类。

集中式任务分配方法<sup>[24,30,32]</sup>主要包括整数规划算法、搜索算法、群智能优化算法以及基于图论的算法等,其中运用较多的是整数规划算法<sup>[33-34]</sup>与群智能优化算法<sup>[35-36]</sup>。集中式任务分配方法优点是实现简单,并具备产生全局最优解的潜力;缺点是通信集中、容易阻塞,个体添加或删除将影响分配,并且分配算法复杂度难以满足实时性要求。因此,集中式任务分配方法一般用于已知且确定的环境并且系统的规模较小。

分布式任务分配方法<sup>[29-30]</sup>包括基于行为激励的算法、基于市场机制的算法、基于空闲链的算法以及基于群智能的算法等,其中运用较多的是基于市场机制的合同网协议算法<sup>[14,37]</sup>与拍卖算法<sup>[38-40]</sup>,以及群智能优化算法<sup>[41-43]</sup>。分布式任务分配方法优点是可并行计算、能快速调整分配方案,通信较分散,个体可动态添加或退出,容错性、扩展性与鲁棒性较好;缺点是容易陷入局部最优解,并且个体之间任务调整时会增加通信负担。分布式任务分配方法是任务规划方法重点研究领域,适用于动态环境并且系统中至大规模。文献<sup>[38]</sup>研究了异构无人机对不同类型目标执行侦察、打击和评估的任务分配问题,采用了信息论中熵的变化量来表征无人机侦察与评估的收益,建立了协同任务分配的优化模型,设计了基于相邻局部通信的分布式拍卖算法,并进行了仿真验证。

##### (2) 无人集群航迹规划方法

航迹规划是任务分配的基础,其实质也是多目标多约束的最优化问题。为了满足无人集群自

主运动的要求,提高无人集群生存能力,无人集群必须具有近实时的导航与定位能力,以及自适应的在线航迹规划能力,对于航迹规划算法的实时性要求非常高,国内外的相关研究成果还很不成熟。在线航迹规划算法不仅要约减搜索空间,降低问题求解的复杂性,还需要考虑集群个体之间的协同约束,保证个体与集群的安全。无人集群的在线航迹规划求解过程是寻找多个目标的 Pareto 非劣解,结果更注重可行性而不是最优性。目前,常用的在线航迹规划算法可以分为基于数学模型的航迹规划方法与基于学习的航迹规划方法两种类型。

基于数学模型的航迹规划方法包括环境建模与基于代价函数的最小代价航迹搜索两部分组成,常用算法包括启发式  $D^*$  搜索算法<sup>[44-45]</sup>、图搜索算法<sup>[46]</sup>、群体智能算法<sup>[47-48]</sup>和混合式算法<sup>[49]</sup>等。其中,  $D^*$  算法的实时性能较好,遗传算法的全局性能较好。

基于学习的航迹规划方法主要包括基于强化学习的航迹规划与基于经验学习的航迹规划两种。基于经验知识学习的航迹规划算法<sup>[50-51]</sup>主要利用习得的经验知识指导复杂战场环境下的最优航迹规划。基于强化学习的航迹规划算法<sup>[52-53]</sup>需要基于预先定义的代价函数,无需获取环境模型,通过不断尝试不同的行为策略,并对所希望的行为进行正反馈,逐渐形成趋向目标的最优行为策略,被广泛应用于实时性的在线重规划。空军工程大学吴德伟教授团队<sup>[54-55]</sup>提出了认知导航的概念,将自主导航技术与人工智能、认知科学的办法学科跨界结合起来。

## 5 建模与仿真存在的问题与挑战

无人集群作战作为未来战争中一种颠覆性的作战样式,对于其开展预先军事理论研究与装备体系顶层设计,具有非常紧迫的现实性需求。建模与仿真作为研究无人集群作战不可或缺的支撑手段与基础工具,尚面临着诸多挑战。

(1) 集群个体的作战行动模型与仿真过于简化

无人集群未来的发展趋势不仅是通过智能技术、自组网技术等高新技术的进步,构建具备高度

集群智能的无人集群;同时个体作为无人集群的基本构成组分也需具备较强的个体智能。以网电对抗行动为例,随着认知电子战技术<sup>[56-57]</sup>的发展,个体将具备对于复杂电磁环境的自主态势感知与处理能力、自主学习与经验积累能力、自主决策与自主行动能力,以及自适应电子防护能力,个体将成为“人工智能与电子战应用相结合的产物”。面向未来的实际战场环境,个体作战行动的刻画与建模不能仿照自然界生物群中个体的简单而缺乏智能、分布式无中心的行动模型<sup>[14]</sup>,过于简化的模型将无法刻画个体的智能性行动。

(2) 群体作战行动的建模与仿真技术有待整合

目前,国内外针对集群群体作战行动建模多是针对其中某些关键技术进行研究,如自组网技术、编队控制技术、任务分配方法与航迹规划方法等。从作战层面上看,无人集群涉及的关键技术往往又是紧耦合的,互相之间有很强的相关性。目前,国内外将群体作战行动的整体过程进行深入分析与整理的相关研究成果并不多,这就导致了再先进的技术无人集群实际作战运用时也可能完全无法发挥效能。

(3) 无人集群体系对抗的建模与仿真尚属空白

无人集群作为一种颠覆性的武器装备,由于其具备自主性、涌现性、鲁棒性等特点,既自成体系,又是体系对抗的重要组成部分。当前国内外关于无人集群研究大多基于还原论的思想,将无人集群与装备体系割裂开来,将无人集群作战与体系对抗割裂开来,重技术轻作战,重细节轻宏观,这种研究思路将有碍于无人集群在未来全域多维联合作战中的军事运用,难以充分发挥无人集群的作战潜力。

## 6 结束语

无人集群装备建设与作战概念正处于快速发展阶段,对于无人集群装备以及作战建模与仿真进行研究是开展无人集群作战实验、创新无人集群作战理念以及制订无人集群作战条令的前提支撑。本文从作战层面对无人集群建模与仿真的研究现状进行了总结与综述,分析了无人集群作战

建模与仿真存在的问题与挑战。

## 参考文献:

- [1] 牛轶峰,肖湘江,柯冠岩. 无人机集群作战概念及关键技术分析[J]. 国防科技 2013, 34(5):7.
- [2] HAHN J, PETERSON C, DOWNEY R, et al. UAV Swarm[J]. Applied Intelligence 2017, 42(3):8-9.
- [3] 胡晓峰. 战争工程: 信息时代的战争方法学[J]. 军事运筹与系统工程 2004, 18(2):1-3.
- [4] 杨镜宇, 胡晓峰. 外军战争工程方法的实践[J]. 国防科技 2007(11):16-19.
- [5] 黄长强, 翁兴伟, 王勇, 等. 多无人机协同作战技术[M]. 北京: 国防工业出版社 2012.
- [6] FRIEDMAN N, 杨晓波. 无人空中作战系统[M]. 北京: 中国市场出版社 2011.
- [7] DOD. Unmanned Systems Integrated Roadmap, FY2013-2038[R]. Washington DC: DOD 2013.
- [8] DEFENSE O O T S O. Unmanned System Roadmap 2007-2047[R]. Washington DC: DOD 2007.
- [9] USAF. Air Force Future Operating Concept: A View of Air Force in 2035[R]. Washington DC: USAF 2015.
- [10] 安梅岩, 王兆魁, 张育林. 人工智能集群控制演示验证系统[J]. 机器人 2016, 38(3):11-13.
- [11] E B, M D, G T. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial System[M]. New York, USA: Oxford University Press, 1999.
- [12] E S. Swarm Robotics: From Sources of Inspiration to Domains of Application [M]. Berlin, Germany: Springer 2005.
- [13] C B, D M. Swarm Intelligence: Introduction and Application[M]. Berlin, Germany: Springer 2008.
- [14] 唐贤伦, 等. 群体智能与多 Agent 系统交叉结合—理论、方法与应用[M]. 北京: 科学出版社 2017.
- [15] 王玥, 关震宇, 杨东晓, 等. 微小型无人飞行器协同控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社 2014.
- [16] USAF. SUAS2016-2036[R]. Washington DC: US-AF 2016.
- [17] 马建光, 张乃千. 多域战: 美军谋划联合作战新格局[N]. 学习时报 2017.
- [18] 高晓勇, 梁敏, 李新其. 浅谈基于“蜂群”战术的未来无人作战[J]. 指挥学报 2015, 36(4):33-34.
- [19] 杨王诗剑. 引领海战革命—浅析无人机“蜂群战术”[J]. 兵器知识 2016(3):34-35.
- [20] 黄长强, 唐上钦. 从“阿法狗”到“阿法鹰”—论无人作战飞机智能自主空战技术[J]. 指挥与控制学报 2016, 2(3):1-4.
- [21] GILES C K. A Framework for Integrating the Development of Swarm Unmanned Aerial System Doctrine and Design[R]. Monterey, California: Department of Systems Engineering Naval Postgraduate School, 2017.
- [22] C W, K G, S H. An Instructional Design Reference Mission for Search and Rescue Operations [R]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2015.
- [23] DABKOWSKI M M, COOK M J, KEWLEY L R. Swarming UAS II [R]. USMA, Department of Systems Engineering 2010.
- [24] 王玥, 关震宇, 杨东晓. 微小型无人飞行器协同控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社 2014.
- [25] TIWARI R, JAIN P, BUTAIL S. Effect of Leader Placement on Robotic Swarm Control [C]//Proceedings of the 16th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2017) 2017:1387-1397.
- [26] 石章松, 左丹. 无人作战平台智能指挥控制系统结构[J]. 指挥信息系统与技术 2012, 3(4):6-9.
- [27] 叶东辉. 指挥与控制对机器人集群作战至关重要[J]. 防务视点 2015(1):3-4.
- [28] 姜禹呈, 郭基联, 沈安慰, 等. 有人机/无人机协同作战编队优化建模设计[J]. 计算机仿真 2016, 33(9):5-8.
- [29] 王玥, 张克, 孙鑫. 无人飞行器任务规划技术[M]. 北京: 国防工业出版社 2015.
- [30] 叶文, 范洪达, 朱爱红. 无人飞行器任务规划[M]. 北京: 国防工业出版社 2011.
- [31] WEI Y, BLAKE M B. Agent-Based Simulation for UAV Swarm Mission Planning and Execution [C]//2015 IEEE Industrial Informatics, IEEE 2015:5.
- [32] 陈闽. 编队协同作战目标分配建模综述[J]. 电光与控制 2013, 20(9):34-36.
- [33] S B J. Coordination and Control of UAV Fleets Using Ruxed - Integer Linear Programming [D]. Cambridge, MA: MIT 2002.
- [34] M A, P H J. Cooperative Task Assignment of Unmanned Aerial Vehicles in Adversarial Environments [C]// Proceedings of the IEEE American Control Conference 2005:4661-4666.
- [35] A A, A R. A New Heuristic Optimization Algorithm for Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Bird Mating Optimizer[J]. Int J Energy Res,

- 2015, 37(10):9-10.
- [36] J K J C. A Survey of Swarm Algorithms Applied to Discrete Optimization Problems [C]// Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation: Theory and Applications 2013:128-129.
- [37] 刘跃峰, 张安. 有人机/无人机编队协同任务分配方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(3):5-8.
- [38] 邱斌, 周锐, 丁全心. 多无人机分布式协同异构任务分配[J]. 控制与决策, 2013, 28(2):10-12.
- [39] 陈洁钰, 姚佩阳, 唐剑, 等. 多无人机分布式协同动态目标分配方法[J]. 空军工程大学学报, 2014, 15(6):16-17.
- [40] 万路军, 姚佩阳, 孙鹏. 有人/无人作战智能体分布式任务分配方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(2):7-9.
- [41] S Z, CKM L. Swarm Intelligence Applied in Green Logistics: A Literature Review[J]. Eng Appl Artif Intell Rev 2015, 37(7):16-18.
- [42] AH G, AH A. Krill Herd: A New Bio-Inspired Optimization Algorithm[J]. Commun Nonlinear Sci Numer Simul 2012, 17(12):14-15.
- [43] 王强, 张安, 宋志蛟. UAV 协同任务分配的改进 DPSO 算法仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(5):17-19.
- [44] V R, M T, G L. Comparison of Parallel Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Real-Time UAV Path Planning [J]. IEEE Industrial Informatics 2013, 9(1):10-12.
- [45] 吴剑, 张东豪. 基于卡尔曼滤波和 D\* 算法的动态目标航路规划[J]. 电光与控制, 2014, 21(8):4-5.
- [46] 聂俊岚, 张庆杰, 王艳芬. 基于加权 Voronoi 图的无人飞行器航迹规划[J]. 飞行力学, 2015, 33(4):35-37.
- [47] F H J, M S E, R G B. Neural Networkbased Trajectory Optimization for Unmanned Aerial Vehicles [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2012, 35(2):25-27.
- [48] T Z, A R. Ant Colony Optimization for Routing and Tasking Problems for Teams of UAVs [C]. IEEE: 2014 UKACC International Conference, 2014: 652-655.
- [49] 王建青, 李帆. 基于混合粒子群优化的巡航导弹低空突防航迹规划[J]. 应用科学学报, 2012, 30(3):56-57.
- [50] YANG C, DAOHUI Z, XINGANG Z. UAV 3D Path Planning Based on IHAR Autonomous - Learning - Framework [J]. Robot 2012, 34(5):26-27.
- [51] S R, P C E K. UAV Path Planning in A Dynamic Environment Via Partially Observable Markov Decision Process [J]. IEEE: Aerospace and Electronic Systems 2013, 49(4):13-14.
- [52] B Z, Z M, W L. Geometric Reinforcement Learning for Path Planning of UAVs [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems 2015, 77(2):29-31.
- [53] 郝钊钊, 方舟, 李平. 基于 Q 学习的无人机三维航迹规划算法[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(12):35-36.
- [54] 吴德伟, 杜佳, 戚君宜, 等. 向人脑学习的 UCAV 认知导航航迹规划研究[J]. 空军工程大学学报, 2014, 15(5):1-2.
- [55] 吴德伟, 邵能建, 戚君宜. 基于认知理论的 UCAV 智能导航研究新进展[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2011, 12(4):1-3.
- [56] Knowles J. Regaining the Advantage Cognitive Electronic Warfare [J]. The Journal of Electronic defense 2016(12):18-19.
- [57] 戴幻尧, 周波, 雷昊, 等. 认知电子战的关键技术发展动态与分析[J]. 飞航导弹, 2014(9):44-45.

(上接第 21 页)

#### 参考文献:

- [1] 黄永兢. 基于空间谱估计的快速测向技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [2] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [3] 季娇若. 米波雷达测高方法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
- [4] SCHMIDT R O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3):276-280.