

[引用格式] 张旭东, 吴利荣, 肖和业, 等. 由美军作战概念出发的有人机/无人机智能协同作战解析[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 91-96.

# 由美军作战概念出发的有人机/无人机 智能协同作战解析

张旭东<sup>1</sup>, 吴利荣<sup>1</sup>, 肖和业<sup>2</sup>, 郝明月<sup>3</sup>, 尹航<sup>1</sup>

(1. 空军研究院, 北京 100085; 2. 西北工业大学, 西安 710072; 3. 海鹰航空通用装备有限责任公司, 北京 100074)

**摘要:** 无人机正向着集群化、智能化、协同化不断发展, 有人机/无人机智能协同作战作为其主要作战样式之一, 推动无人机向主战装备迈进。从美军以分布式为特征的作战云、网络中心战、马赛克战、忠诚僚机、无人机蜂群等热点作战概念出发, 对有人机/无人机智能协同作战与这些热点作战概念的内在联系进行了分析。结合美军正在进行的多个热点项目, 提出了有人机/无人机智能协同作战关键技术体系, 并对该概念的本质及内涵进行了解析。最后对该概念进行了SWOT分析, 进一步明晰了该概念发展的优势、劣势、机遇和挑战, 以期为我国有人机/无人机智能协同相关的作战概念及作战行动提供参考与借鉴。

**关键词:** 无人机; 协同作战; 作战概念; 分布式作战; 马赛克战; 忠诚僚机; SWOT分析

**中图分类号:** V279 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2020)04-91-06

## Analysis on Concept of Intelligent Cooperative Combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle Evolving from the Combat Concept of American

ZHANG Xudong<sup>1</sup>, WU Lirong<sup>1</sup>, XIAO Heye<sup>2</sup>, HAO Mingyue<sup>3</sup>, YIN Hang<sup>1</sup>

(1. Air Force Academy, Beijing 100085, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
3. Hiwing aviation general equipment co. Ltd, Beijing 100074, China)

**Abstract:** With the developing of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) capability due to clustering, intelligent and cooperative technology, the intelligent cooperative combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle is becoming one of a major mode of modern combat, which driving UAV to be a kind of main combat equipment. Based on the concept of American distributed operations, such as mosaic warfare, loyal wingman, drone swarms and other hot spots, the analyzes of the internal relationship between intelligent cooperative combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle and these hot spots combat concepts is done in the paper. Combined with several hot projects of the US military, the key technology system of intelligent cooperative combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle is proposed. Then, the essence of the concept is analyzed. SWOT analysis of the concept is carried out to further clarify influences from the development of the concept, which include strength, weakness, opportunity and threat, expecting to provide a reference for the combat concept and operation relative to the intelligent cooperative combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle.

**Key words:** UAV; Cooperative Combat; Combat Concept; Distributed Operations; Mosaic Warfare; Loyal Wingman; SWOT Analysis.

## 1 引言

随着中俄军事实力的不断提高, 尤其是反介

入/区域拒止能力的不断加强, 美军认为必须通过变革, 加快军事力量转型、创新兵力设计理念、创新颠覆性技术才能保持其军事优势。在这个时代背

景和作战概念创新的传统下,美军发布了多域作战、马赛克战、忠诚僚机、无人机蜂群、作战云、网络中心战等一系列作战概念,且各具特点,在一定程度上反映了无人机作战运用的前沿水平。

无人机是军事斗争技术的前沿,是作战模式创新的着力点,是人工智能等热点技术的有力载体。随着无人机运用规模逐渐扩大,执行的任务从支援向打击拓展,能力提升迅猛。无人机蜂群、忠诚僚机、有人机/无人机智能协同作战等概念正是在无人机及相关技术发展达到一定水平后,根据当前的认知,提出的颠覆无人机传统运用的作战概念。同时,新质作战概念牵引着无人机向集群化、智能化、协同化不断发展,从而推动无人机向主战装备迈进。

## 2 美军相关热点作战概念解析

### 2.1 分布式作战

美军近年来密集提出的新质作战概念,均围绕参联会和国防部顶层作战概念中的“跨域协同”展开,与美国空中力量相应的作战云、网络中心战、系统之系统(System of System, SoS)均以“分布式作战”为核心特征,各种不同作战概念侧重点各有不同,通过“分布”将能力解耦,再通过“协同”将能力聚合,从而构建完整地作战体系。反映到具体空中装备运用上,就是少量有人飞机控制大量功能分解的无人机共同构成作战体系<sup>[1-4]</sup>。飞行员将成为无人机的管理和决策者,指挥无人机协同作战。

从以分布式为特征的作战概念内涵和特点可以看出,有人机/无人机智能协同作战是空中装备分布式作战实现的必要条件。作战云、忠诚僚机等分布式作战作为军种作战概念,更多的是侧重于作战思想和构想,而有人机/无人机智能协同作战则侧重于技术,支撑军种作战概念的实现。从某种意义上说,空中装备的分布式作战可以看成是多个有人机/无人机智能协同作战通过先进分布式作战管理的叠加。

### 2.2 马赛克战

马赛克战是美国国防预先研究计划局(DARPA)提出的基于技术的作战概念,体现出一种未来作战的兵力设计愿景。其以任务完成率为目标,以传统作战单元为基础,融合大量低成本、单功能装备,形成自适应杀伤网,实现任务手段动态多样、指挥控

制弹性抗毁、兵力体系灵活运用、战场态势复杂难测、装备组成低廉可消耗、作战能力快速形成的愿景。既能加快自身博伊德(OODA)循环,也使对手OODA环陷入困难,进而取得作战优势<sup>[5-7]</sup>。其体现了跨域、分布的特点,单在空中力量的运用上也体现出了分布式特征。

马赛克战是在“系统之系统”“适应性杀伤网”等以分布式为特征的系统架构概念基础上发展起来的,既是分布式为特征的作战实现途径,也可融合其他作战思想产生更具作战效益的新概念。有人机/无人机智能协同作战同样是马赛克战实现的必要条件,有人机和无人机作为马赛克拼图资源,按照马赛克战思想根据任务高动态灵活组建作战体系,协同对敌作战。

### 2.3 忠诚僚机

忠诚僚机是有人驾驶作战飞机与无人作战飞机形成长、僚机编组,高效协同作战。在具体装备运用上,作为僚机的无人机具有以下优势:可以携带机载武器,作为武库机充当有人机的弹药库;可以携带传感器,作为传感器飞机为有人机的协同打击提供目标指示和导引;可以携带电子战载荷,作为电子支援飞机为有人机提供电子支援<sup>[8-10]</sup>。随着概念的发展,其作战样式也不拘泥于具体形态,可以一架长机随行多架不同功能僚机协同作战。

可以说,忠诚僚机属于有人机/无人机智能协同作战范畴,是其表现形式之一。因空战的高动态特性,可以说忠诚僚机是其发展的最高水平。随着忠诚僚机作战概念的发展,二者的界限逐渐模糊,都代表了有人机/无人机智能协同作战的发展。

### 2.4 无人机蜂群

无人机蜂群是大量小型无人机,以自组织信息网络为基础,以群体智能为核心,通过分工协作以期实现群体智能涌现,实现从量变到质变的颠覆性飞跃。作为一种新兴的无人机运用形态,其特征为群智能、低成本、数量多,进而造成对抗多样性及反制的困难。蜂群强调多、小、协、智,而其相应理念技术完全可以由小型无人机应用于中大型无人机,其本质是智能协作,可以用无人机集群泛指<sup>[11-14]</sup>。

随着小精灵、小型空射干扰机等兴起,无人机集群作战的样式更加丰富,无人机集群也不仅仅是作为集群出现,其已经融入到了分布式作战、马

赛克战和有人机/无人机智能协同作战。因此,有人机/无人机智能协同作战已经不是有人机与一架或几架无人机进行协同作战,在必要时可能是一架或多架多型有人机与无人机集群进行多任务、多目标的协同作战。

### 3 有人机/无人机智能协同作战解析

#### 3.1 作战样式解析

协同作战的概念并不新颖,是多个单元在时空上达到同步,以形成1+1>2的作战效益。有人机/无人机协同作战作为一种作战样式,在无人机发展到一定阶段也随之出现,通过语音、行动前约定时间等手段,有人机与无人机定时出现在各自预定位置,对目标实施协同侦察、协同火力打击等。

有人机/无人机智能协同作战区别于以往作战样式范畴的本质在于:一是运用包含智能辅助决策的分布式作战管理技术,辅助飞行员快速决策,并能够高效的管理包括有人机、无人机在内的战场资源,快速构建作战体系;二是运用开放式系统架构技术、网络通信技术,实现了有人机与无人机的互联互通,使态势共享、互操作得以实现;三是运用智能自主与协同控制技术,使无人机及集群的自主能力极大提升,减少无人机对于人的操作依赖;四是运用先进无人机平台技术,特别是运用低成本设计技术,发展适合与有人机协同作战的无人机平台。通过以上为代表的先进技术运用,使有人机与无人机实现互联互通互享互操作协同,并根据作战任务及战场环境灵活高效的构建作战体系、制定行动计划,提升作战效能,加速OODA循环,从而形成作战优势。

#### 3.2 技术体系解析

作战云、网络中心战、马赛克战、忠诚僚机、无人机蜂群等具有代表性的新质作战概念,体现出两个特点:一是都围绕“跨域协同”展开,各种作战概念体现不同层次和程度的联合,这主要是由于美军参联会和国防部连续颁布了多版顶层作战概念,以“跨域协同”为关键词与中心思想,形成了美军所有作战概念的顶层牵引,指出了美军未来作战方式的宏观方向;二是作战概念虽然种类繁多,但各有侧重,分布式作战侧重作战思想,属于概念和理念维度,反映了军兵种的理念与诉求,马赛克战侧重于技术能力推进并兼顾作战体系设计,属于技术能力

维度,忠诚僚机、小精灵、蜂群等属于战术与物理支撑维度,侧重于物理平台研制与具体战术开发。这些作战概念形成了定位于分工有所区分、互有交差融合、互相牵引、支撑的有人机/无人机智能协同作战的创新体系。

在美军新质作战概念构想下,有人机/无人机智能协同作战颠覆了传统的杀伤链组织形式以及军事体系架构的设计方法,需要自顶层向下一直到底层工具与算法的一系列关键技术进行支撑。美军为了实现其作战概念构想,安排进行了一系列项目。这些项目包括了作战管理、网络通信、系统架构、智能自主、平台设计等方向<sup>[15]</sup>,可以对分布式作战、马赛克战、忠诚僚机、无人机蜂群以及多域作战等进行技术探索和支撑。具体项目如下。

分布式作战管理(DBM),研究控制算法和辅助决策,协助飞行员在通信受限的反介入环境下,有效的管理无人机等作战资源,持续作战。其关键技术主要包括反介入实时任务管理、分布式态势感知、人机交互等。

拒止环境中的协同作战(CODE),开发自主协同算法和软件,提高无人机在高对抗环境下的自主性和协同作战能力。其关键技术主要包括自主协同技术、开放式体系架构技术等。

体系综合技术与实验(SoSITE),研究开放式体系架构和集成工具,对分布式空战进行技术支撑,可以看做是马赛克战的前身。其关键技术主要为开放式体系架构技术<sup>[16]</sup>。

自适应杀伤网(ACK),建立杀伤网的架构方案和相关工具集,解决马赛克战中并发资源需求冲突的决策问题。其关键技术主要包括指挥控制决策辅助技术、资源调度技术、测试评估技术等。

对抗环境中的通信(C2E),发展低可探测、抗干扰的通信技术,为拒止环境下的通信提供支撑。其关键技术主要为网络通信技术。

用于任务优化的动态网络(DyNAMO),打通不同网络之间的通信,并在干扰环境下能够保持通信。其关键技术主要为网络通信技术。

女武神(XQ-58A),可作为忠诚僚机与有人机协同作战,注重低成本设计。其关键技术主要为包括低成本设计等在内的无人机平台技术。

天空博格(Skyborg),开发无人僚机智能空战系



统,可以应用于女武神等无人机。其关键技术主要为无人机智能自主技术。

小精灵(Gremlins),研制能够协同执行侦察、电子战等任务的无人机集群。其关键技术主要包括低成本设计等在内的无人机平台技术、空基发射回收技术等。

有人机/无人机智能协同作战的关键技术体系并不孤立,和其它作战概念的关键技术体系互有交叉,多个单项关键技术或项目的突破都能给其它作战概念的进展带来突破。从实现上看,有人机/无人机智能协同作战有如下关键技术。

(1)复杂系统体系工程方法与复杂战场建模、弹性作战系统设计技术

通过开发新的数学技术,对复杂系统进行通用化建模,相对于传统的链条式杀伤链设计方法,在复杂系统体系工程方法论的支撑下形成对群体智能协作能力涌现和对各个作战单元的相互作用深层次的理解,形成统一的系统描述,进一步形成统一的复杂系统设计语言与开发环境,可以从根本上改变对动态、不可预测环境的系统设计方法,以使系统具备实时弹性的能力。该方向下的关键技术,是有人机/无人机智能协同作战的理论与设计基础,特别是当体系复杂度提高到有人机与无人机集群进行智能化协同作战时,传统的方法论将无法支持指控管理人员去理解战场行为。

(2)分布式作战管理和作战控制技术

有人机/无人机智能协同作战需要新的强大的作战管理与指挥控制技术支持,这其中包括态势理解、智能辅助决策、协同任务规划、高效人机交互等技术。有人机/无人机智能协同作战条件下,复杂战场的态势理解无法直接显像的表现出来,存在多种分支、多种选择、多种可能结果,需要在新型方法论的支持下通过大规模快速运算,探索可能发生的多种可能性的未来态势,基于协同任务规划综合考虑战场所有资源的可利用程度、多任务之间的协调调度,智能化的形成建议性的多项战场理解与决策方向,辅助指控人员形成战场决策,并利用高效探测人际交互技术,由地面指挥控制人员或者辅助飞行员对战场各作战力量进行指控,在通信受限条件下保持作战能力<sup>[17-20]</sup>。

(3)开放式系统架构技术

在战场作战武器单元能力达到一定程度后,没

有实现跨代性的武器代差之前,未来战场能力将更多的体现在“软”的方面,标准化的或者通用化的开放式系统架构技术将是未来作战能力提升的基础。通过标准化接口、协议和服务,不仅可以使有人机与无人机实现互联互通互操作<sup>[21]</sup>,通过不断更新作战软件和集成新的硬件模块,还可进一步实现作战能力的快速提升。

(4)协同态势感知技术

完成作战任务的基本前提是对战场态势正确可靠的感知与理解,有人机/无人机智能协同作战情况下的战场态势将呈现出复杂化、复合化、隐蔽化的特点。所以,有人机/无人机协同作战体现出了双刃剑的两面性,使敌我双方都极大的提升了复合手段对抗能力和战场目标探测与感知的难度,基于有人机/无人机协同作战,需要攻克并开展分布式协同探测、多源信息融合、智能目标识别和跟踪技术等一系列提高战场目标感知与目指能力的关键技术<sup>[22-27]</sup>,适应有人机/无人机协同作战带来的潜在能力提升,避免被复杂战场环境迷惑。

(5)网络通信技术

网络通信技术是有人机/无人机智能协同作战实现的基础,有人机/无人机协同作战环境下,需要应对各种频谱战的威胁,适应于传统平台的异构网络联通能力,适应新型/改进型通信网络的系统架构。要求网络通信高效、安全、按需可变。

(6)智能自主与协同控制技术

在有人机/无人机智能协同作战环境下,受限于网络通信、响应速度、硬件资源等,特别受限于人对复杂战场环境和群体智能涌现能力的判断与决策,通过指控人员分别控制每一个作战单元进行作战是不现实的,必须不断提高无人机及无人机集群的自主能力和协同控制能力<sup>[28]</sup>。这其中包括基础的本体应急情况判断与处理、高危/易损区域的规避、协同飞行的安全策略等,也包括多重杀伤网络情况下群体智能协作模式的决策,单体平台对自身能力与作战角色的智能决策,以及进一步的行动决策与规划等,甚至包括伴随着任务推进过程中的自身角色、任务模式、作战行为的智能演进。

(7)无人机平台技术

有人机/无人机协同作战构想下,针对单一能力的缺失或不足研制新型平台的效率和性价比是

低下的,为了适应智能化协同作战,除了传统的无人机平台技术外,强调低成本设计技术、模块化载荷技术,使无人机平台向单平台多功能高效费比的系列化平台族方向发展将是解决作战成本与战场响应速度的方案之一。

## 4 发展有人机/无人机智能协同作战概念的SWOT分析

通过对有人机/无人机智能协同作战优势(Strength)、劣势(Weakness)、机遇(Opportunity)和威胁(Threat)进行SWOT分析、研判<sup>[29-32]</sup>,进一步对该概念的发展进行辨析。

### 4.1 优势

#### (1)推动无人机作战运用变革

有人机/无人机智能协同作战颠覆了无人机的传统作战样式,使无人机从单机作战向协同作战转变,战术战法更加多变。

#### (2)促进无人机融入作战体系

改变传统的地面站控制,使有人机与无人机的态势感知共享,有人机对无人机直接指控,减少了中间环节,使无人机更深的融入作战体系。

#### (3)发挥优势互补作用

充分利用无人机战术响应快、可消耗等自身优势和人的决策优势,互补融合产生新的作战优势。

### 4.2 劣势

(1)系统复杂带来认知困难,以及不确定性影响发展

对于有人机/无人机智能协同作战最终形态的认知尚有不不确定性,其智能自主技术发展程度也存在不确定性,相应的作战效能评估难度较大,给协同作战体系构建带来不确定性。同时,下一代战斗机的不确定性也影响智能协同作战发展。

#### (2)关键技术突破难度大

多个关键技术的攻关难度较大,且能力上相互制约,只能采用渐进式的发展模式,逐步突破关键技术,使协同作战能力逐渐提升。

### 4.3 机遇

#### (1)无人机发展带来的认知共识

有人机/无人机智能协同作战是在无人机及相关技术发展到达一定水平后提出的,是国内外公认的无人机运用和技术的明确发展方向。同时,其也

是分布式作战、马赛克战等新兴作战概念的必要基础,发展需求强烈。

#### (2)关键技术自身发展推动

人工智能技术、网络通信技术等是目前军民两用的热点技术,发展需求强烈,技术发展迅猛,给智能协同作战的实现提供了良好的技术发展环境和技术储备。

### 4.4 威胁

有人机/无人机智能协同作战灵活多样,能够改变作战模式,以智能协同空战为例,美军F-22/F-35与忠诚僚机协同空战可以进一步扩大其空中优势,形成复合手段对抗、多机联合对抗态势,给我方制空作战带来极大威胁。因此,应积极推动智能协同作战发展。

## 5 结束语

从美军正在发展的分布式作战、马赛克战、忠诚僚机等热点作战概念分析,有人机/无人机智能协同作战极其重要,既反映了无人机智能化、协同化的发展方向,也是未来作战的主要作战样式之一。

有人机/无人机智能协同作战以能力聚合,注重体系对抗,作战样式灵活高效。涉及到的关键技术种类繁多且都处在高速发展中,任意单项技术的突破均可在相关方面提升其作战能力。甚至可以说,智能协同作战已经不是未来,而是现在必须面对的作战样式,其随时可能出现作战能力的跨越式提升,必须尽早布局,促进其能力渐进跨越。

## 参考文献

- [1] 宋琛,张蓬蓬.有人/无人协同制空作战的特点及影响[J].飞航导弹,2019,49(12):78-81.
- [2] Sarkesain J F, O'Brien T W. A framework for achieving dynamic cyber effects through distributed cyber command and control/battle management (C-2/BM) [J]. Modeling and Simulation Support for System of Systems Engineering Applications, 2015, 20: 531-564.
- [3] Lummus R. Mission battle management system fighter engagement manager concept [C]. Proceedings of Symposium and Exposition Conference on AIAA International Air and Space, Ohio, USA, July 14-17, 2003.
- [4] Loe R, Maracchion C, Drozd A. Semi-autonomous management of multiple ad-hoc teams of UAVs [C]. 2015 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Applications, New York, USA, May 26-28, 2015.

- [5] 黄汉桥, 白俊强, 周欢, 等. 智能空战体系下无人协同作战发展现状及关键技术[J]. 导航与控制, 2019, 18(1): 10-18.
- [6] Zhen Z Y, Zhu P, Xue Y X, et al. Distributed intelligent self-organized mission planning of multi-UAV for dynamic targets cooperative search-attack [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(12): 2706-2716.
- [7] Li A, Wu Q Q, Zhang R. UAV-enabled cooperative jamming for improving secrecy of ground wiretap channel [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(1): 181-183.
- [8] 申超, 李磊, 吴洋, 等. 美国空中有人/无人自主协同作战能力发展研究[J]. 战术导弹技术, 2018, 39(1): 16-21.
- [9] Palacios E S, Smith H. Impact of mission requirements on the design of low observable UCAV configurations [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2019, 91(10): 1295-1307.
- [10] Sepulveda E., Smith H, Sziroczák D. Multidisciplinary analysis of subsonic stealth unmanned combat aerial vehicles [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2018, 10(2): 431-442.
- [11] 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, 40(1): 37-41.
- [12] Bai G H, Li Y J, Fang Y N, et al. Network approach for resilience evaluation of a UAV swarm by considering communication limits [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 193: 106602.
- [13] Xing D J, Zhen Z Y, Gong H J. Offense-defense confrontation decision making for dynamic UAV swarm versus UAV swarm [J]. Proceeding of The Institution of Mechanical Engineers Part G-Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(15): 5689-5702.
- [14] 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]. Sci China, 2015, 58: 128201.
- [15] 李磊, 王彤, 蒋琪. 美国 CODE 项目推进分布式协同作战发展[J]. 无人系统技术, 2018, 1(3): 59-66.
- [16] 李东兵, 申超, 蒋琪. SoSITE 等项目推动美军分布式空战体系建设和发展[J]. 飞航导弹, 2016, 46(9): 65-70.
- [17] 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.
- [18] 顾海燕, 徐弛. 有人/无人机组队协同作战技术[J]. 指挥信息系统与技术, 2017, 8(6): 33-41.
- [19] Zhong Y, Yao P Y, Wan L J, et al. Intervention decision-making in MAV/UAV cooperative engagement based on human factors engineering [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(3): 530-538.
- [20] Zhong Y, Yao P Y, Sun Y, et al. Research on command and control of MAV/UAV engagement from the cooperative perspective [C]. 2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence, Hong Kong, China, June 24-26, 2016.
- [21] 贾高伟, 侯中喜. 美军有/无人机协同作战研究现状与分析[J]. 国防科技, 2017, 38(6): 57-59.
- [22] 李文, 陈建. 有人机/无人机混合编队协同作战研究综述与展望[J]. 航天控制, 2017, 35(3): 90-96.
- [23] 樊洁茹, 李东光. 有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J]. 无人系统技术, 2018, 1(1): 39-47.
- [24] Zhao Y Y, Wang X K, Wang C, et al. Systemic design of distributed multi-UAV cooperative decision-making for multi-target tracking [J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2019, 33(1-2): 132-158.
- [25] Xu, J, Guo Q, Li Z X. Dynamic selection method for cooperative decision-making center of multi-UAV system based on cloud trust model [C]. Proceedings of 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, Chongqing, China, October 12-14, 2018.
- [26] Causa F, Vetrella A R, Fasano G, et al. Multi-UAV formation geometries for cooperative navigation in GNSS-challenging environments [C]. IEEE-ION Position Location and Navigation Symposium, Monterey, USA, April 23-26, 2018.
- [27] Sivaneri V O, Gross J N. UGV-to-UAV cooperative ranging for robust navigation in GNSS-challenged environments [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 71: 245-255.
- [28] 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.
- [29] 徐幸. 浅析 SWOT 战略分析方法在阿里巴巴中的应用[J]. 当代经济, 2017(8): 74-75.
- [30] Makhdoom I H, Yin Q S. Simultaneous arrival of multiple UAVs under imperfect communication [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2012, 84(1): 37-50.
- [31] Sun X F, Derrick W K N, Ding Z G, et al. Physical layer security in UAV systems: challenges and opportunities [J]. IEEE Wireless communications, 2019, 26(5): 40-47.
- [32] Zhao J W, Gao F F, Ding G R, et al. Integrating communications and control for UAV systems: opportunities and challenges[J]. IEEE ACCESS, 2018, 6: 67519-67527.

#### 作者简介:



张旭东(1981-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为无人机总体技术、飞行力学与控制。



吴利荣(1977-), 男, 博士, 高工, 主要研究方向为无人机总体技术。



肖和业(1985-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计、智能结构设计、缓冲减振、降噪结构设计。



郝明月(1984-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无人机总体技术。



尹航(1986-), 男, 博士, 工程师。主要研究方向为飞行器总体、飞行控制。