

美军主要无人机集群项目发展浅析

刘 丽 王 森 胡 然

摘 要 美国国防部及各军种联合国防工业界相关部门大力推动各类无人机集群项目的研发测试工作。探究了美军发展无人机集群项目的主要动因,梳理了主要无人机集群研究项目,总结了无人机集群项目的优势,并剖析了其面临的关键技术挑战。

关键词 无人机 集群作战 自主协同

引 言

近年来,美军着眼在复杂战场环境下遂行作战任务的新需求及新特点,以全面应对多元化、多维度、多层面现实安全威胁为导向,以有效制衡潜在作战对象反介入/区域拒止(A2/AD)能力为牵引,以进一步强化态势感知、自主协同、体系效能和成本控制为重点,积极推进无人机集群颠覆性技术研究。在此背景下,美国国防部及各军种联合国防工业界相关部门,重点依托以机器学习、自主作战等为代表的人工智能技术,着力推动各类无人机集群项目的研究、试验和演示验证工作。目前,美军无人机集群项目的研发进展已引起外界高度关注,而无人机集群作战也正在由概念变成现实,从理论走向实践。

1 美军发展无人机集群项目的主要动因

在美军看来,传统的无人机战法因受制于无人机性能指标、操控模式、战术特点等一系列因素,

已不可避免地影响到了未来美军的作战效能,并且高端战机的研发成本不断增加,研制周期不断延长,再加上无人机产业的蓬勃发展,因此,美军已经开始着手研究未来无人机集群作战的新思路,力争在无人机作战领域抢占时代的先机。

1.1 第三次抵消战略的现实需要

近年来,随着竞争对手军事实力不断提升,美国认为其军事优势有逐步削弱之势。为确保自身在大国军事竞争中的绝对优势地位,美国于2014年推出了以创新驱动为核心,以全面破解对手反介入/区域拒止能力为着眼点,以发展能够改变未来战局的颠覆性技术群优势为重点的第三次抵消战略。在此背景下,美方认为假想敌的综合一体化防空系统对其现役空中装备的威胁极大,2020年左右B-2轰炸机将在反介入/区域拒止环境中面临生存威胁。经过长研制周期推出的高成本现役装备如果被大量击落,必将严重削弱美空中作战能力。因此,美国国防部正尝试以全新作战概念牵引出更低成本、更高战力的作战装备,以维持对主要假想敌压倒性的军事优势。

为了实现第三次抵消战略,美军将利用人工智能及自主技术领域的快速发展,进一步提高武器系统自主化水平,发展人机协作及集群编队作战能力。无人机的集群作战模式无论在美军的反介入/区域拒止战略,还是在第三次抵消战略中都占有重

本文 2018-02-02 收到,刘丽、王森均系中国洛阳电子装备试验中心助理研究员

要位置。对于前者而言,蜂拥而至的各型无人机能够瞬间使对方防空能力饱和,并通过综合配置探测、干扰、自杀性攻击无人机,持续压制打击敌方的各类目标。而在第三次抵消战略中,具备人工智能的无人机能够相互配合,实现大批无人机的自主协同行动,可以更为高效地完成各项任务。

1.2 分布式作战概念的有力推动

美军认为,随着信息技术的迅速发展与作战理念的不断演变,未来空战将在对抗领域、对抗手段、对抗技术、对抗模式等方面呈现出重大变化。在此背景下,美军提出了分布式作战概念。分布式作战是美军着眼未来强对抗环境而提出的新型作战理念,其核心思想是将昂贵的大型装备的功能分解到大量小型平台上,通过自主、协同等技术达到相同或更高的作战能力,其具有成本低、灵活性强、对抗性强等优势。

近年来,美军积极探索分布式作战相关概念与技术,在海上、空中与空间领域均开展了相关研究与实践,取得了诸多开创性成果。分布式空中作战概念的核心思想是不再由当前的高价值多用途平台独立完成作战任务,而是将能力分散部署到多种平台上,由多个平台联合形成作战体系共同完成任务。这一作战体系将包括少量有人平台和大量无人平台。其中,有人平台的驾驶员作为战斗管理员和决策者,负责任务的分配和实施;无人平台则用于执行相对危险或相对简单的单项任务(如投送武器、电子战或侦察等)^[1]。根据分布式空中作战要求,需要部署大量具备协同、分布式作战能力的小型无人机,且这些无人机还可回收和重复使用,这样美军就能以较低成本实现更高的作战灵活性。分布式作战概念已成为指导美军装备发展的重要思想,而无人机集群作战正是美军分布式作战思路的典型代表。

1.3 国防预算紧缩的客观要求

长期以来,美军依赖高投入研制成功了精确制导武器、高密度通信网络、远程传感器等高技术武器装备,在以海湾战争为代表的现代战争中展现出了空前的威力。然而,随着军事高技术在世界范围内的传播与扩散,美军的传统军力投射模式受到威胁,要继续确保技术优势,就不得不持续大幅度提

高国防开支。但在经历了旷日持久的阿富汗战争和伊拉克战争之后,国防预算紧缩已经成为美国的国防新常态^[2]。总体上看,美国国防支出所占联邦支出比重在未来10年仍将缓慢下降,甚至跌破二战以来最低水平。

因此,在国防预算持续紧缩的前提下,以技术突破促进战法更新,以理念调整驱动装备升级就成为美军继续保持其作战优势的有效路径。就无人机而言,美军如能充分利用既有的无人机技术来创新构建系统族群,并适度融入自主感知、智能控制、动态规划、隐身对抗等技术的最新研究成果,真正实现由单一系统合力完成复杂作战任务,就将有效实现低开支、高产出、低风险、高效能的远景目标,从而凭借技术创新在无人机集群作战领域占得先机。

2 美军主要无人机集群研发项目

在美军看来,所谓无人机集群是指多架具有自主能力的无人机,参照自然界中蜂群、鱼群等的行为方式,通过相互间信息交换和有限的人员干预,完成预期任务的一种模式。目前,美国国防部及各军种结合自身需求,均在积极推动不同类型的无人机集群项目,并已开展了大量的研究、试验与演示验证工作。

2.1 低成本无人机集群技术项目

2015年4月,美国海军公布了低成本无人机集群技术(LOCUST)项目进行的一系列集群无人机技术验证工作。LOCUST项目由美国海军研究局(ONR)领导,乔治亚理工大学参与,旨在研制可快速连续发射的高自主性无人机,通过集群战术对敌方进行压制。LOCUST项目将研制一种管式发射装置将大量无人机快速连续发射至空中,无人机之间可进行信息共享,在进攻或防御任务中实现自主协同工作。这种发射装置和紧凑型无人机体积较小,因此,可在舰船、战术车辆、飞机或其它无人平台上发射。

LOCUST项目使用的是雷锡恩公司的郊狼(Coyote)无人机,如图1所示。该无人机以电池为动力,机长0.91 m,翼展1.47 m,起飞质量约为5.4~6.3 kg,载荷质量0.91 kg,巡航速度约为

飞航导弹 2018年第7期



图1 采用管式发射的郊狼无人机

111 km/h, 最大飞行速度为 157 km/h, 最大续航时间为 90 min(通常为 60 min), 最大飞行高度约 6 km。无人机可携带可见光/红外相机, 配备 2 W S波段发射机时, 全动视频传输距离为 37 km。该无人机为管式发射, 容纳无人机发射管与标准的机载声纳浮标一致, 可由海上巡逻机、直升机的声纳浮标发射装置投放。

2015 年 3 月, 美海军研究局对单架郊狼无人机样机携带不同载荷执行任务, 以及 9 架无人机的编队飞行进行了试验。9 架无人机依次被气动弹射升空, 无人机一离开发射管, 即展开机翼, 启动螺旋桨。9 架无人机全部升空后, 通过低功率射频网络进行通信, 共享位置和其它信息, 最终自主执行编组编队飞行^[3]。

2016 年 4 月, LOCUST 项目完成了 30 架郊狼无人机连续发射并编组飞行的试验。试验中, 30 架无人机被相继发射, 每架飞机都在发射后成功展开机翼飞行。美海军研究局表示, 之前从未有过这种自主等级的无人机集群飞行试验, 无人机可消耗和可配多种有效载荷的特点, 可以让有人机和传统的武器系统执行其它任务, 这是降低作战人员风险的战斗力倍增器^[4]。

2.2 山鹑无人机项目

美国国防部战略能力办公室(SCO)目前正在积极研发可快速交付美空军的蜂群微型无人机技术, 旨在通过 F-46 等有人机释放山鹑(Perdix)微型无人飞航导弹 2018 年第 7 期

人机群以执行态势感知、情报侦察和电子干扰等任务。山鹑无人机采用 3D 打印技术制造, 机翼宽度不到 3 cm, 全质量仅 0.45 kg, 如图 2 所示。该机可以扰乱对手的防空系统, 也可用于执行侦察任务。每架山鹑无人机都被装在胶囊型容器中, 尾部带有减速伞, 在高速发射时, 减速伞自动打开帮助稳定姿态, 随后无人机实施脱离, 借助人工智能自主寻找队友组成蜂群。该机可与战斗机的红外诱饵弹实施混装, 进一步保证载机安全。一旦将其载荷换成微型战斗部, 将迅速变为轻型巡飞弹, 可大规模杀伤人员和装备。



图2 山鹑微型无人机

2016 年 10 月, 美国国防部战略能力办公室在美国海军的中国湖靶场成功完成了一次大规模的微型无人机蜂群演示。在演示中, 美国海军 3 架 F/A-18F 超级大黄蜂战斗机一共投放了 103 架由战略能力办公室资助发展的山鹑微型无人机。这群微型无人机演示了集体决策、自修正和自适应编队飞行。美国国防部宣称, 这群无人机并未进行预编程, 而是共享一个分布式大脑, 这使得它们能够适应编队, 无人机在蜂群内部传递信息, 同时也与多个指挥站通信^[5]。尽管无人机可能自己改变飞行方向, 但是山鹑的操作人员能够指挥无人机执行某项任务并能预测蜂群的行为。

山鹑无人机项目耗资 2 000 万美元, 目前已经进行超过 150 次试飞, 其中 72 次为战斗机发射, 最大发射速度达马赫数 0.9。除可使用 F/A-18、F-46 等战斗机进行空中发射外, 该无人机还可由地面人员投掷升空, 或由类似弹弓的弹射装置发射。目

前,山鹑无人机已获得美国防部的订单,计划于2017年开始服役。

2.3 小精灵项目

2015年9月,美国国防预先研究计划局(DARPA)发布小精灵(Gremlins)项目公告,提出通过载机在防区外发射携带有侦察或电子战载荷、具备组网与协同功能的无人机集群用于离岸侦察与电子攻击任务,并在任务完成后对幸存无人机进行回收的技术。这些无人机将配备多种不同载荷,采用齐射方式,具有数量大、尺寸小、廉价、可重复使用等特点,其关键技术包括:空中发射与回收技术、设备载荷与机体一体化概念设计、低成本结构设计、有限寿命设计、自动复飞策略、精确数字飞控与导航、小型高效涡轮发动机、发动机自动关机技术、小型分布式载荷集成技术、精确位置保持技术等。

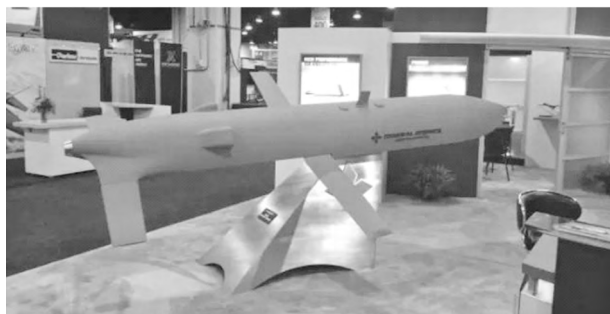


图3 通用原子航空系统公司展示的小精灵无人机全尺寸模型

小精灵项目的最优性能指标为:在小精灵无人机方面,作战半径926 km;作战半径处的巡航时间3 h,设计载荷54.5 kg;最大航速不小于马赫数0.8;最大发射高度超过12 192 m,推进系统可在当前技术基础上设计全新型号,也可以使用现役发动机或其改型;载荷所需功率1 200 W;载荷类型为模块化设计的射频和光电/红外系统,并可实施基地级更换;设计寿命为使用20次,出厂单价(不包括载荷)小于70万美元。在小精灵作战系统方面,大型平台具备发射超过20架无人机的能力;在小于30 min时间内回收大于4架无人机,最终目标是回收8架或更多,回收成功的概率大于95%;发射或回收平台由于挂载小精灵无人机实施分布式空中

作战而坠毁的概率每飞行小时低于10~7次;无人机回收后再次发射的时间不超过24 h;无人机发射或回收平台的改装成本(不包括指挥和控制系统)不应超过200万美元。

小精灵项目的研究周期设定为4年左右,并分成3个研究阶段。第1阶段计划从2016财年第2季度持续至2017财年第1季度。2016年3月,DARPA将小精灵项目第一阶段合同授予4家承包商,用于开展小精灵作战系统的概念化权衡研究、设计小精灵演示验证系统、发展技术成熟计划。第2阶段将从2017财年第2季度持续至2018财年第3季度,经过竞争胜出的2家承包商将进一步成熟第1阶段发展的技术,并开展系统初步设计和风险降低验证。第3阶段将从2018财年第3季度持续至2020财年第2季度,DARPA将最终选出1家承包商开展小精灵作战系统的详细设计和制造,并将在2020财年第1季度进行首次飞行验证试验^[6]。2017年3月15日,DARPA宣布,已完成小精灵项目第1阶段的工作,并从该阶段的4个团队中,选择动力系统公司团队和通用原子航空系统公司团队进入第2阶段,且合同已授出。通用原子航空系统公司展示的小精灵无人机全尺寸模型见图3。

2.4 蝉微型无人机项目

2015年5月,在美国国防部举办的国防部实验室日上,美海军研究实验室展示了其研发的一种可用于集群作战的微型无人机,即近战隐蔽一次性自主无人机(CICADA,缩写意为蝉)^[7]。相比其它的无人机,蝉微型无人机不仅坚固耐用,而且尺寸更小、成本更低、结构更简单、飞行更安静,可装备多种轻型传感器,执行多种任务。

微型无人机蝉形状类似于带翅膀的手机,可置于手掌上,如图4所示。其样机成本仅为1 000美元/架,预计未来每架无人机的成本可降至250美元。该微型无人机不装备发动机,由10个组件组成,其组装类似于带有电路板的纸飞机。蝉微型无人机可通过飞机、气球或大型无人机释放,并能在释放后利用已编程的GPS坐标滑翔至目标地点。该微型无人机因为不装备动力推进系统,能够像鸟一样几乎无声地滑翔,因而不易被敌方觉察,并且该微型无人机适合以集群方式执行任务。

飞航导弹 2018年第7期

表 1 OFFSET 项目衡量标准

集群自主性: 生成及评估 100 ⁺ 集群战术		
在基于游戏的环境中设计作战相关的集群战术	每季度产生的数量	大于 10 种战术
在基于游戏的集群任务中评估集群战术	评估新战术的时间	小于 15 min
将集群战术架构集成到物理集群平台	每 100 个平台的集成时间	小于 24 h
人与集群编队: 验证与 100 ⁺ 集群的动态、实时交互		
对部署集群实施安全的空中“战术更新”	部署新战术的时间	小于 1 min
1 min 内构建基于集群战术的可行行动方案(COA)	备选行动方案的数量	大于 3
可增减规模的集群行动	集群规模的偏差率	+ / - 50%

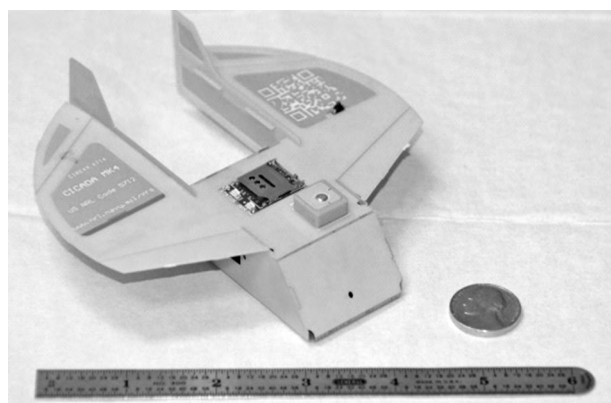


图 4 蜂微型无人机

2017 年 4 月,美海军研究实验室计划进行蜂微型无人机集群测试,此次测试美海军将从 P-3 猎户座侦察机上一次性释放 32 架蜂微型无人机。迄今为止,美海军研究实验室已向 NASA 兰利研究中心交付了 150 架该型无人机。目前该研究项目已过渡到验证阶段。

2.5 进攻性集群使能战术项目

城市内作战因城市结构、空间和视线问题,限制了作战最佳的通信、机动和战术发挥。为了克服这些挑战,显著提高小规模作战部队在城市环境下作战的有效性,DARPA 于 2016 年 12 月发布了进攻性集群使能战术(OFFSET) 项目,旨在开发并演示验证 100 多个作战相关的集群战术,应用于无人机和/或地面无人车辆集群。这些针对无人系统的集群战术有助于提高部队防护、火力、精确打击效果以及情报、监视与侦察(ISR) 能力。

飞航导弹 2018 年第 7 期

OFFSET 项目将加速美军对无人集群战术关键使能技术的理解,搭建开放式系统架构和测试平台,以实现以下几个目标:一是通过发展网络游戏环境,生成有活力的集群战术生态系统。使用现实虚拟游戏架构快速生成和评估集群战术;二是通过设计易于理解的人机操作界面集成集群战术,这将涉及多种模式的沉浸式交互技术^[8]。

OFFSET 项目重点关注集群战术及其在推进集群自主性、人与集群编队等集群使能能力方面发挥的作用。项目衡量标准见表 1。

OFFSET 项目将使用空中和地面无人集群平台通过多种基于能力的试验验证关键技术。在项目进行过程中,作战场景的复杂程度将通过调整大量技术和作战试验变量而逐渐提升,以挑战集群架构和集群战术。其中的变量为集群尺寸、集群平台混合(例如空中和地面混合编队)、任务执行时间和其它与集群系统相关的特征。

OFFSET 项目期限 42 个月,包含 6 个 1 年 2 次的能力实验。项目第 1 阶段为期 18 个月,第 2、3 阶段分别为期 12 个月。

3 美军无人机集群项目的主要优势

2014 年 10 月,美国智库新美国安全中心发布的《战场上的机器人:即将到来的机器人集群》研究报告称,在无人自主系统高速发展的今天,美国亟需直面挑战,制定明智的政策方针以促进该项技术在军事领域的发展。未来的战场属于机器人,未来的作战模式将演变成机器人集群作战。^[9]

美军无人机集群项目同时整合了无人技术以及系统族群技术的独到特点,主要具有以下优势。

3.1 有效提升作战效能

美军无人机集群技术的出现从根本上改变了无人机战斗力的提升方式。各无人机平台可以通过集群技术进行科学的组合,形成不同的体系,遂行不同的作战任务。集群中无人机庞大的数量急剧扩大了敌方需打击的目标,不仅更难以被敌方锁定,而且在战斗中拥有更强的适应性。由于无人机集群拥有灵活的网络拓扑结构,一旦被敌防空系统锁定为目标,无人机集群就可解散,从而降低任务风险。如果无人机集群中的部分无人机在作战中损毁,集群中的其它无人机仍能重新组合形成新的集群,继续执行任务。集群技术消除了单一无人机作战力量的脆弱性,减小了任务损失,提高了可靠性。

3.2 显著增强态势感知能力

美军认为,无人机作为网络中心战中的重要节点和关键要素,既是信息的探测者、接收者,也是信息的传输者和中继者。一旦多架无人机形成集群,它们将不仅具有外部态势感知能力,并且在集群成员内部也能够实现互联互通,既可自主编队飞行,又能协同配合完成任务。而在执行任务的过程中,集群中的每架无人机又可根据任务分工灵活搭载不同类型的传感器,各无人机平台之间还可通过集群技术紧密相连,优势互补,共享情报,互相配合,不仅能够实现无人机之间信息资源的实时共享,也使得无人机能够获得战场上的绝对信息优势,显著增强美军的战场态势感知能力。

3.3 充分实现作战成本的非对称效益

美国海军低成本无人机集群技术项目经理 Lee Mastroianni 博士曾表示,无人机集群的成本理应比导弹更低。例如,目前用于模拟作战的郊狼无人机单价仅为 1.5 万美元,而一枚捕鲸叉导弹的成本则高达 120 万美元。虽然可供这些无人机携带的弹头要比寻常导弹小得多,但其命中精度却要比一般导弹高得多。此外,这些无人机在穿透攻击目标的雷达系统及拦截装置方面也会享有更大的优势。^[10]与现有的导弹和传统飞机相比,集群化无人机在设计及使用方面均具有明显优势:它既无需像导弹一样

执行完一次任务就抛弃整个弹体(发动机、航电设备和有效载荷),也无需像服役数十年仍可重复使用的飞机那样要承担高额的维修和任务成本。凭借无人机集群技术,无人机系统可以快速消耗对方的地空导弹等高价值攻击武器,以其规模优势给对手造成惨重的损失。

4 美军无人机集群项目面临的关键技术挑战

美军无人机集群项目在其未来研发过程中需要着重解决的关键技术主要包括:主动感知技术、集群控制技术、自主协同任务规划技术等。

4.1 主动感知技术

感知是无人机集群协同行为的前提,在复杂的战场环境下,面对地理、电磁、威胁、气象等实时自主感知需求,需要处理来自多架无人机以及其它信息系统提供的多源异类信息,解决数据的传输、实时处理、信息可视化以及数据共享问题,实现战场多维、全域、实时、精确的感知。因此,美军无人机集群项目需要开展的重点研究包括密集编队感知-规避技术、多源异质传感器分布式信息融合、集群态势共享与通用作战视图、目标协同检测-识别-跟踪技术、突发威胁协同探测与定位技术等。

4.2 集群控制技术

集群控制是指大量无人机在无集中控制和全局模型的情况下,通过个体的局部感知和反应行为,聚集形成预定几何形态,同时又适应环境约束(例如避开障碍、队形切换)的控制问题。虽然目前美军的一些无人机已经开始具备一定程序控制模式下自主飞行的能力,但是在遭遇到非预见的威胁或者任务变更时,只有具备了实时任务重新规划能力才能完成高威胁环境下的任务。美军无人机集群控制的技术挑战在于集群中无人机数量越多难度越大、集群间的避碰控制、队形自组织和拆分/重组等。

4.3 自主协同任务规划技术

近年来,随着自主能力的提升,无人机逐渐具备了自主规划,甚至自主协同规划的能力。规划的实质就是一个大规模的协同控制问题。随着战场环境复杂程度的日益提升,以及对无人机性能和任务要求的不断提高,控制问题难度和控制效果之间的矛盾更加突出。在无人机集群组网的作战环境下,

飞航导弹 2018 年第 7 期

无人机需要根据来自其它无人机探测到的信息进行态势感知,实时动态规划、修改系统的任务路径,实现威胁的有效规避和作战任务的完成。因此,自主协同任务规划技术是美军无人机集群项目研究中亟待解决的问题。

5 结束语

随着无人机集群项目研发进程的不断深入,美军在无人机集群作战研究与运用等领域已走在了世界前列。正如美海军陆战队副司令罗伯特·沃尔什将军在美军无人系统防御会议上所指出的那样,未来,海军陆战队员将不再是第一批冲上去的战斗员,取而代之的将会是无人机群,它们可以感知、定位,甚至歼灭它们面前的所有敌人。可以预见的是,无人机集群作为一种看似随机、实则有序的协同作战技术,不但很有可能成为无人机作战运用中新战斗力的重要增长点,而且势将改变未来作战的游戏规则,在美军的作战理念、作战方式、作战想定、作战效能等诸多层面同时引发一系列深远的影响与变革,其发展演进动态值得密切关注。

参考文献

- [1] 吴勤. 美军分布式作战概念发展分析. 军事文摘, 2016(7)
- [2] 王亚林, 张洋. 第三次抵消战略: 美国恢复全球力量投送能力之策. 国际航空, 2015(1)
- [3] Kevin M. Day of the LOCUST: Navy demonstrates swarming UAVs. <https://defensesystems.com/articles/2015/04/15/onr-locust-swarming-autonomous-uavs.aspx>, 2015-04-15
- [4] William M. Navy researchers to test UAV swarming technology this summer. <http://seapowermagazine.org/stories/20160517-onr.html>, 2016-05-17
- [5] KRIS O. Pentagon tests fighter jet-launched "Perdix" mini-drone swarms. <https://defensesystems.com/articles/2016/10/24/perdix.aspx>, 2016-10-24
- [6] 袁成. 美国国防高级研究计划局“小精灵”项目. 兵器知识, 2016(9)
- [7] Daniel P. NRL-developed micro-UAV named popular science' best of what's New'. <https://www.nrl.navy.mil/media/news-releases/2015/nrl-developed-micro-uav-named-popular-science-best-of-whats-new>, 2015-12-18
- [8] DARPA. OFFSET envisions swarm capabilities for small urban ground units. <http://www.darpa.mil/news-events/2016-12-07>
- [9] Paul Scharre. Robotics on the battlefield part II: the coming swarm. <https://www.cnas.org/publications/reports/robotics-on-the-battlefield-part-ii-the-coming-swarm>, 2014-10-15
- [10] David Hambling. U. S. Navy plans to fly first drone swarm this summer. <https://www.defensetech.org/2016/01/04/u-s-navy-plans-to-fly-first-drone-swarm-this-summer/>, 2016-01-04

(上接第 32 页)

载空地导弹在外形上要向小型化与大型化并行发展,制导更加精确,发展多模复合制导、多模战斗部以适应长航时飞行和时敏打击,更加通用化,并适应隐身内埋高空高速作战。

参考文献

- [1] 唐鑫, 杨建军, 冯松, 等. 无人机机载武器发展分析. 飞航导弹, 2015(8)
- [2] 张翼麟, 蒋琪, 文苏丽, 等. 国外无人机机载空地导弹发展现状及性能分析. 战术导弹技术, 2013(5)
- [3] 张翼麟, 蒋琪, 宋怡然. Vigilus 无人机概念武器系统及其性能. 飞航导弹, 2012(9)
- [4] 张宏飞, 周旭宜. 多模复合制导武器现状与分析. 航空兵器, 2012(6)
- [5] 陈勇. 美国小型精确制导武器的研制进展. 飞航导弹, 2013(10)
- [6] 王少锋. 从美国 JAGM 导弹看空地导弹制导技术发展趋势. 中国航空报, 2015-12-1
- [7] 杨环亮, 张伟杰, 张弓胤. 美军通用空地导弹作战使用研究. 国防科技, 2015(36)