

蜂群作战技术与反制措施跟踪与启示

罗 阳 巩轶男 黄 屹

摘 要 无人机蜂群作战作为分布式作战思路的典型代表,势将成为未来战场上具备颠覆性的作战模式。从功能、成本以及效费比三个方面,论述了蜂群作战的技术特点。归纳了国外蜂群作战系统的发展趋势,分析了推动蜂群作战系统发展的关键技术,包括分布式系统架构、空中发射与回收、低成本结构设计、功能结构一体化设计与智能化作战管理与决策辅助等技术。同时,随着无人机技术在全球扩散以及蜂群作战带来作战效能的提升,无人机及蜂群反制措施也逐渐成为关注的重点,对反无人机/蜂群技术及装备的研究情况进行了梳理与介绍。根据对国内外蜂群项目的分析,针对无人机蜂群作战技术,从使用过程与技术特点两个方面提出了相关启示。

关键词 无人机 蜂群 反制措施 分布式系统架构

引 言

无人机集群作战是未来无人机自主作战发展的重要方向,近年来,美国海军、空军、DARPA 等部门先后推出了多项无人机集群研究项目,美国在无人机集群作战技术及应用研究领域处于领跑地位。不难预测,未来无人机作战模式将向集群化、分布式、低成本、自组织方面转变,以带动整体作战效能与作战范围的提升。

同时,为应对蜂群技术带来的颠覆性作战模式,美军也在加紧研究和推动反无人机蜂群武器装备的发展,并积极开展反无人机技术验证试验,用以评估新兴反无人机技术与作战概念。

1 蜂群作战技术特点

无人机蜂群作战系统源于无人机集群作战技术,是分布式、低成本化、网络化作战模式的典型代表,通过释放大量小型、廉价的无人机,组成集群协调执行战场任务。在物理层,蜂群内无人机相互独立,分散部署在作战空域内;在逻辑层,通过自组织网络实现信息共享,形成一个可协同执行任务的整体,以提高作战效能。相比于平台中心式的大型多功能作战平台,无人机蜂群在作战时具备以下优势。

1.1 功能分布化

传统的无人机任务载荷功能集中,具有高内聚、低耦合的特点,部分受损很容易导致这个系统瘫痪。蜂群系统通过将单个任务载荷所具备的功能如侦察定位、目标指示、电子对抗、跟踪打击等功能分散到大量低成本、功能单一的任务子设备中,采用动态资源管控、协同组网、多源信息融合等技术实现原本复杂的系统功能,系统的倍增效益将使无人机蜂群具备远超单一平台的作战能力。

1.2 系统自治化

蜂群系统架构具有无中心和动态拓扑的特点,大量小型无人机通过自组织网络交互信息并形成一個稳定的集群结构。在对抗过程中,若蜂群中少数个体的损失或脱离导致拓扑结构变化,新的拓扑结构会快速收敛稳定,不会影响整个蜂群功能完整性,仍可继续执行作战任务。

本文 2018-03-16 收到,罗阳、巩轶男均系中国航天科工集团公司第三研究院 302 所工程师

1.3 效费交换比高

蜂群系统由大量结构简单、功能单一的小型无人机组成,复杂功能是通过蜂群涌现性体现出来而不依赖于单个载荷功能。因此,单架无人机无需装载昂贵的高性能载荷,可极大地降低无人机平台成本。而现代防空作战中,一枚防空导弹的价值往往高达数十万,甚至上百万美元,蜂群内大量的无人机个体将使得防守方有限的雷达和火力打击通道趋于饱和,丧失对进攻方高价值目标的跟踪和打击能力,这使得本已成本高昂的现代防空作战更加雪上加霜,在战争中为进攻方带来显著的成本优势。

2 国外蜂群作战系统发展现状

2.1 全面规划未来蜂群作战战略布局

以美国为首的相关国家已提出并部署微型无人机蜂群战术等相关项目的开展,美军正在稳步推进以小精灵、郊狼等项目为代表的蜂群作战关键技术研究,验证和评估低成本无人机蜂群技术的可行性。可以预计,以蜂群作战将会是未来空军无人机装备的重要发展趋势,为空军提供新型高效的作战模式。

在2000年美国国防部预先研究计划局(DARPA)就启动了无人机集群空中战役研究计划;2002年,美国空军研究实验室(AFRL)对多无人机集群执行搜索、攻击、压制等作战任务效能进行研究,结果表明集群可以较好执行简单反应性任务。随着拒止环境中的协同作战(CODE)、低成本无人机集群技术(LOCUST)、小精灵(Gremlins)等项目的相继发布,标志着美军对无人机集群作战技术的研究趋于白热化。

在美国国防部2017年预算中,有30亿美元投入用于人机合作及无人机蜂群执行任务的研究。对空军而言,类似蜂群的无人机集群作战方式未来非常有可能成为现实,并改变战争的游戏规则,是对抗中俄军事快速发展的有效手段。蜂群将进一步向分布式发展,采用大量的低成本、分布式、协同配合作战方式,迫使敌方消耗最具价值的防空能力用于应付廉价、可消耗的武器,从而抵消敌防御相对优势,洞穿其防空系统,为后续的武器装备进入打开飞航导弹 2018年第8期

一个通道。

2.2 积极开展未来蜂群作战模式研究

1) 攻防兼备,降本增效: 集群协同作战或成军队力量倍增器。

平台中心式的大型多功能无人机载荷能力强,但任务执行过程中载荷固定,成本高昂,攻击手段单一,平台或载荷部分受损后将丧失作战能力,而通过无人机蜂群技术将复杂的功能分解到大量功能单一、不同种类的低成本子系统中,在执行任务过程中,可根据需求变化实时调整载荷组合,提高了作战任务适应性和多样性。同时,网络少量平台的损失不影响蜂群系统的任务执行能力,可实现有助于作战系统成本直线下降,并迫使对方增加成本的潜在途径,且更加经济实惠,使美国能够大量部署这类系统,并从总体上保持质量优势。

海军研究生院在2012年发表的《无人机蜂群攻击》对蜂群作战模式进行了数百次模拟,结果表明,由8架无人机组成的集群进行攻击时,这些无人机可穿透目标的雷达和拦截系统发动攻击,仅有2.8架无人机能够避开拦截系统。即使舰艇防御系统进行了升级,仍有至少1架无人机能够避开拦截。这意味着可以使用大量廉价的无人机来攻击舰艇,而这些无人机的总成本仅与一枚导弹的成本相当,这恰恰是发展低成本无人机蜂群技术的主要目的。

2) 聚零为整,化整为零: 集中指挥,分散控制和分散执行的作战云概念逐渐形成。

无人机集群作战模式具有规模集群化、功能多元化、模块通用化、任务协同化的特点,相比传统以平台为中心的有人/无人作战系统,集群系统以通信网络为基础,以任务需求融合、传感器信息融合、载荷能力融合为核心,能够进行更密切的协作,获取/共享情报,加快作战节奏,提高作战效能。

2013年,美空军提出作战云概念,核心理念是海、空、天、网络层的跨域协同,强调多域虚拟存在、高度融合与自然聚散。作战云以松耦合方式构建探测-跟踪-决策-打击-评估的完整云杀伤链。通过战场资源的高效管控、目标数据的实时处理分发共享,在云端完成目标探测跟踪、数据融合、目标指派、火力分配、火控制导、毁伤评估等作战流,

从而实现对超视距目标的先敌发现、先敌攻击、先敌摧毁。

战略与预算评估中心(CSBA) 的报告中主张各军种采用分散式空中作战,配以能够不断进化的数据链、抗干扰通信系统和新的瞄准工具。这将有助于确保天基能力不会成为反介入/区域拒止作战的依赖,并将促使空中、地面、海上和太空领域信息共享的飞跃。与网络云相类似,德普图拉将这一概念称为战斗云。它将结合有人和无人系统,利用隐身飞机、精确武器和先进指挥控制系统的优势,确保敌人单一的点攻击不会瘫痪美国的作战行动。这种努力也意味着有机会创造出模块化、规模化的作战能力,而不是迫使某种飞机或其它设备承担越来越多的任务。

2.3 持续推动蜂群作战关键技术研究

目前,美军正在加紧推进以小精灵、郊狼、山鹑等项目为代表的无人机蜂群作战技术研究,验证和评估低成本无人机集群作战技术的可行性,不断推动无人机蜂群作战关键技术研究。

实现蜂群作战关键技术主要包括开放式系统架构设计、动态自组织通信网络技术、环境态势感知与认知、编队协同控制与任务规划、智能化作战管理和决策辅助技术、精确数字飞控与导航、分布式感知与处理技术、小型无人机快速发射与回收技术等。

2.3.1 开放式系统架构设计

相比传统平台中心式的武器系统,蜂群系统采用开放式、分布式、网络化的组织架构整合系统内无人机资源和能力协同执行任务。蜂群内部无人机之间的拓扑关系及角色可根据任务需求与战场环境变化进行自适应调整,因此,蜂群系统具有无中心和自组织的特点,即使系统中部分无人机被击毁,剩余无人机也可替代并保障任务继续执行,提高系统鲁棒性和自治性。

为构建大规模、高效、可靠的无人机蜂群系统,DARPA 在 2014 年启动体系集成技术及试验(SoSITE) 项目,着重探索开放式体系架构技术,对支持标准开放系统接口、动态拓扑通信等技术进行研究,以美军现有能力为基础,把单一装备的空战能力分布到网络中大量可互操作的有人/无人平台

上,实现各种先进机载系统和武器在体系层面的即插即用,极大提升分布式空战的灵活性,保证作战系统的多样性,避免过于单一导致体系性的脆弱、适应性不高的缺点。

2.3.2 动态自组织通信网络技术

蜂群内无人机携带多种类型任务载荷,如雷达、图像传感器、通信天线、武器等,为充分发挥蜂群系统分布式作战效能,蜂群系统需根据任务需求、各无人机位置、能力、健康度等情况综合调度与分配资源,实时、动态地剔除受损无人机,接入新补充无人机,调整某项子任务资源等。

蜂群采用分布式开放式架构的动态自组织网络具有智能性、实时性、鲁棒性等特点,然而现有单无人机作战系统主要通过机载测控链路与地面控制站之间进行通信,结点间的组网多采用以地面控制站为中心的集中式网络架构。该模式传输带宽有限,无法满足蜂群内部无人机间大规模通信需求。

2015 年,DARPA 发布 DyNAMO 项目,希望研究可在竞争性射频环境中能够使现役静态网络之间互联和能够与未来自适应网络实现互联的技术,使得自主设计的网络能够实现信息共享,并能够适应随遇干扰和任务关键性的动态网络出现。

2.3.3 环境态势感知与认知

蜂群内无人机规模庞大,携带多种传感器,可获得较为完善的战场情报。目前,基于多源信息融合的战场情报获取与处理技术正在日趋完善,但对态势认知完全依靠作战人员经验去判断,面对复杂、多变、亦真亦假的战场情报时,个人经验的不足和信息爆炸导致的关键情报遗漏往往是致命的。

集群态势感知与认知技术是实现蜂群系统自主作战与决策的关键。在对战场情报预处理的基础上,利用蜂群内无人机硬件平台、自组织通信网络、资源调度算法等构建的分布式计算环境,可为数据处理提供强大的实时数据处理能力。DARPA 在 2014 年启动分布式作战管理(DBM) 项目,通过发展先进算法和软件,提高分布式空战任务自适应规划和态势感知等能力,帮助履行战场管理任务的飞行员进行快速且合理的决策,以在强对抗环境中更好地执行复杂作战任务。

2.3.4 作战编队协同控制与任务规划

飞航导弹 2018 年第 8 期

根据作战任务需求,蜂群可由多个功能同构或异构无人机组成。此外,蜂群分布式作战的特点导致系统内无人机在空间上呈离散分布,从而不仅在数量上,而且在特性上导致了蜂群协同控制的复杂性。通过设计分层解耦的递阶控制体系结构,按功能将传感器信息的获取与共享、单机控制、子任务调度、编队控制、任务分解与规划等进行分层与解耦,设计合理的编队任务协调策略、编队稳定控制方法。

面对战场实时态势与任务目标,蜂群系统在群体层面进行任务规划,并实施对多机多战术目标的任务分配与调度。具体而言,针对态势感知与共享获取的战场动态信息,通过分析既定的协同作战任务,开展相应的规划算法研究,高效生成实时、合理的任务计划,使群体执行任务的效能与生存概率达到最佳。此外,应对突发情况,包括突发任务、突发威胁及个体毁伤,能够在对群体任务执行能力实时评估的基础上,进行任务的重分配,实施对个体的动态调度。

2.3.5 分布式感知与处理技术

蜂群内单个无人机其任务载荷受限于无人机体积无法实现与大型无人机载荷同等的技战术指标,但战场中,同一时间蜂群内有大量无人机协同飞行,可依靠数量弥补质量的不足,通过多源信息融合、任务实时调度等技术手段将分布式载荷集成使用,实现与大型载荷相等或更优的技战术指标。

分布式感知:目标感知、测量、定位与跟踪是无人机系统的一项不可或缺的基础功能,多无人机协同能够带来更大的测量范围、更高的定位精度以及更好的鲁棒性;同时,也给信息处理与融合带来挑战,即如何融合多架无人机的测量。相关内容包括数据预处理、数据融合结构和估计方法等。

分布式处理:采用无人机集群的方式运行,通过常规控制系统控制的多无人机协同交流系统构成集群,无人机通过装备具有不同处理能力、不同传感器遂行单机任务,并通过接入集群网络进行信息交流。单无人机构成系统节点,通过无人机集群自身的内置算法与机理进行系统运行管理。其最终目标是实现在任何航空平台上嵌入不同的任务模块,并使它们无缝地一起工作。

飞航导弹 2018年第8期

2.3.6 小型无人机快速发射与回收技术

受限于小型无人机续航时间因素限制,为保障蜂群在任务空域有足够的滞空时间执行任务,蜂群作战的核心在于投放平台在短时间内将大量无人机投放到空中协同执行战场任务,任务执行完毕,对幸存无人机个体进行回收再利用,可有效降低蜂群作战使用成本。单位时间内到达战场组成蜂群系统的无人机数量越多,蜂群执行任务的能力和对战场的适应能力越强,合适的发射与回收技术可使载机系统在防区外迅速、高效地投放部署蜂群与降低使用成本的要求。

美国防部战略能力办公室与 MIT 合作,在山鹑(Predix)无人机的基础上创造性地利用曳光弹投放器实现小型无人机与战斗机的集成,在2014—2017年多次开展空中投放试验。其中,2016年10月由三架有人驾驶的F/A-48F战斗机共投放了103架山鹑无人机,完成了诸如目标搜索、定点盘旋、攻击等功能,证明了这种微型无人机快速部署和集群协同能力。

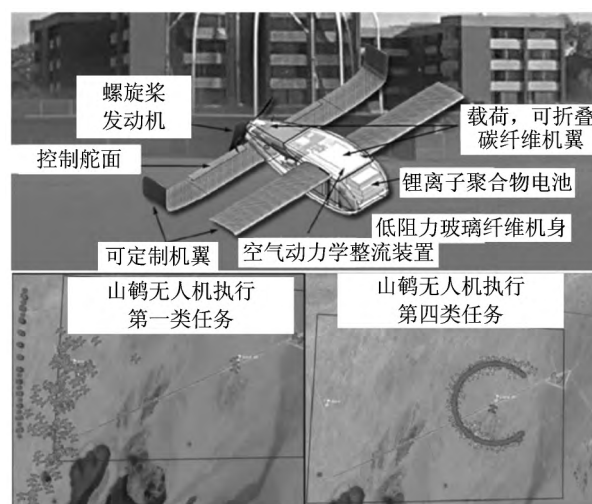


图1 山鹑无人机及任务演示飞行试验

DARPA 支持的小精灵则采用 C-130 为无人机载机,该项目旨在解决小型无人机机群的空中部署与回收问题。通过挂载在载机下方的拖曳靶标卷式拖放系统或机械手臂回收系统,完成无人机的捕捉和回收工作。

3 无人机及蜂群反制措施发展

随着自控控制、定位导航、惯性测量、遥测通信等关键技术门槛降低,无人机系统逐渐低成本化及平民化,无人机技术在全球快速扩散,极大降低了蜂群作战的技术门槛,无人机蜂群也将成为高悬于未来战场上空的达摩克里斯之剑。为应对蜂群作战模式带来的挑战,世界各国都十分关心反无人机技术及装备的研发。

目前提出的反无人机系统及方案多是在已有装备的基础上进行快速改装,通过物理摧毁、干扰压制、电子欺骗等手段直接或间接摧毁无人机关键部件使之失能,从而达到毁伤目的。

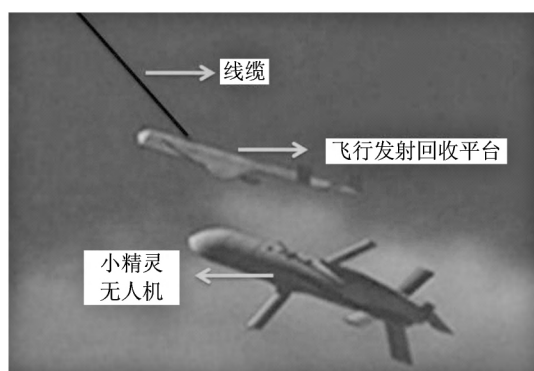


图2 小精灵拖放系统方案示意图

3.1 电子干扰及欺骗

无人机蜂群通过无线自组网实现协同信息共享,同时小型无人机成本、体积有限,难以采用高精度惯导系统,集群内部定位及导航严重依靠卫星定位系统。因此,通过电磁干扰、欺骗等手段可对蜂群实施有效的压制,达到断链阻网、欺骗致盲的效果,还可以用装有干扰设备的无人机进行抵近干扰拦截。

美国陆军于2017年4月3~13日在俄克拉荷马州希尔堡举行了MFIIX演习。演习中对包括机动高能激光器(MEHEL)、反无人机防御系统(AUDS)等33种不同反无人机系统进行广泛的测试,展示了预期的反无人机能力。其中,反无人机防御系统(AUDS)由英国Blighter公司开发,集探测、跟踪与干扰功能于一体,主要对小型固定翼和旋翼无人机等目标进行干扰,可发射大功率的定向干扰脉冲电

磁波,切断目标无人机GPS定位信号及原有的控制链路,迫使无人机降落。其干扰有效作用距离可达8 km。

3.2 密集阵速射武器

密集武器拦截采用密集的速射武器拦截无人机群是较为传统的拦截方法。2016年11月,雷锡恩公司论证了包括使用空空导弹和用火炮发射带有前向爆炸型碎片杀伤弹头且射向可修正的炮弹等方法对抗集群无人机。美国陆军的一份研究计划书称,美陆军正在考虑通过信号干扰或用旧式机枪和火炮阻止无人机——或许是可安装在悍马军车转塔上的枪炮。此外,美军也在论证采用密集阵等传统近防武器对集群无人机进行拦截。

3.3 微波武器

微波武器是目前研究较多的一种反蜂群技术手段,由于微波武器具有定向性好、杀伤范围广、功率大、成本低等特点,较为适合应对大规模无防护目标。美军拟采用微波武器作为对抗无人机集群的主要武器。采用具备区域性杀伤能力的微波武器对高密度的无人机集群进行攻击更加有效。

美国空军实验室正在试验一个名为黑色飞镖的项目,其具有侦测、追踪,甚至击落小型无人机的能力,系统核心是通过微波能量瓦解无人机的电子系统,将其击落。2013年9~10月,美国陆军成功使用雷锡恩公司研制的相位器高功率微波(HPM)武器进行了拦截小型无人机集群目标的防空测试。在测试中,HPM使用相控阵雷达与高能微波天线作为搭配,跟踪并击落小型无人机,试验验证了相位器系统向目标区域发射一次就可消灭多个目标。据称,美国陆军希望进一步降低HPM的能耗,并尽可能缩小其尺寸,使其未来可担负拦截对手蜂群式无人机攻击的任务。

3.4 激光武器

美军在原有激光反导武器的技术基础上开发高能定向激光武器用于反无人机作战,并已多次在演习中进行验收验证试验。其中,2017年在MFIIX演习中对机动高能激光器(MEHEL)反无人机系统进行测试试验。该激光器装备在斯特瑞克(Stryker)装甲车上,可实现快速展开部署和阵地转移。在2017年的MFIIX演习中,MEHEL总共摧毁了大约50架

飞航导弹 2018年第8期

无人机。除硬杀伤外,MEHEL 系统还可使用电子战能力对无人机目标进行软杀伤,通过发射大功率射频使无人机与地面控制站之间的通信链瘫痪。在对无人机进行软杀伤后可回收该无人机,从中获取情报信息。

4 无人机蜂群作战技术的启示

蜂群无人机,或微型无人机集群,从作战构想源头就将蜂群作战使用模式设定为:使用大量廉价弹药、小型无人机或诱饵,采用蜂群式、协同配合作战方式。从国外各蜂群无人机相关项目进展及实施情况看,其使用过程、技术特点可得到以下启示。

4.1 个体低成本化设计与智能制造

从作战想定出发,蜂群无人机首先具有大量、廉价的特点,其次无论是针对战损大特点,还是就航时有限而言,在实际使用过程须可快速补充。为此,在微型无人机平台设计之初,即应遵循低成本化设计的原则;在生产、制造过程中,引入 3D 打印、增材制造等智能制造技术。其中,3D 打印微型无人机专项技术已被列入美国防部 2017 财年预算提案。

4.2 群体无中心节点与动态组网

蜂群无人机在信息网络层面的重要特征是:可动态自网、网络无中心节点且各节点可快速接入与退出。也即信息网络有足够的弹性与可靠性,对高动态的集群构型变化过程提供有力的支撑。为此,须开展研究建立可无缝接入的统一化、网络化测控与信息传输系统,实现机群中各无人机单元之间的互联互通,实现各无人机单元无缝接入地面测控网络以及地面测控网络对各无人机单元接入的统一管理和指挥调度。

4.3 基于异构平台的协同控制与作战

由于蜂群无人机采用低成本设计,单一平台本身具有专一使命,各司其职负责作战过程中的侦察、打击、监视与评估等环节任务。也即蜂群必然是由种类繁多、数量庞大的异构平台构成。此外,作战过程中,个体还可因其具体任务使命在地域或空间上散布,从而不仅在数量上,而且在特性上导致了协同控制的复杂性。为此,需通过设计分层解

耦的编队体系结构,按功能将传感器信息的获取与共享、编队队形和个体任务的分解与协调、单机任务控制等进行分层与解耦,设计合理的编队成员任务协调策略及个体的连续控制方法。在任务协调策略方面着重开展编队保持、编队机动及队形变换控制策略研究。

4.4 基于虚拟计算平台的集体认知与决策

随着战场环境与任务的复杂程度不断提升,同时由于蜂群无人规模数量庞大、信息网络时变等特性,采用常规方法对无人机群体产生的实时态势数据、空域使用规划与调度、空域冲突检测与消解、任务规划与战术决策问题进行求解往往会造成组合爆炸,难以实际应用。为此,需在分布式架构上开展基于虚拟计算平台的集体认知与决策技术研究,将云计算和深度学习算法等付之应用,通过认知信息得到实时的战场态势变化,依据战场态势变化制定作战方案,自主分配任务、执行任务并反馈执行情况到控制系统。同时,在集群执行任务的过程中,系统通过学习方案选择、战斗经验的积累、新战场信息的获取,可以实现决策算法的自主进化,使得决策变的越来越智能。

4.5 探索高效、新概念反无人机途径

反无人机技术尚处于探索阶段,各型反无人机系统层出不穷,但反无人机系统实现实战化尚需一段时间。基于电子干扰技术的反无人机系统,电子干扰距离短,仅适用于低、慢、小无人机;基于微波武器的反无人机技术,体积庞大,附带伤害大,适用于陆地反无人机或大型舰船反无人机;基于激光武器的反无人机技术,体积庞大,所需功率较大,需在目标上驻留一定时间方能摧毁目标,且不能连续发射;基于导弹或常规火力毁伤的反无人机系统,存在成本高、精度低的问题。因此,亟需针对微小型无人机集群大面积、低探测、强冗余等特点,探索研制新概念的面杀伤武器,以降低防空作战成本及效能。

5 结束语

目前,以美国为主开展的蜂群作战技术研究通过集群化、多元化、通用化、协同化等模式赋予了小型无人机机群更宽泛的任务执行能力和更强大的

生存能力。不难预测,蜂群作战技术具有突防能力强、毁伤效果大、成本低廉等特点,将是未来空军无人机装备的重要发展趋势,为空军提供新型高效的作战模式,这场作战模式的变革对我军装备发展、国防实力的提升也具有重要意义。

本文通过紧跟美军蜂群无人机集群作战技术研究进展,搜集、整理、分析相关技术情报资料,对其技术特点、技术途径、作战模式等情况进行分析研究,从战略布局、作战模式与关键技术三个方面进行了梳理和总结。

同时,随着无人机技术的成熟发展,反无人机作战研究显得尤为重要和紧迫。通过对反制措施的梳理,总结反无人机作战的基本思路,利用现有武器建立反无人机作战策略,推进新式无人机对抗装备的研发。

最终,通过对蜂群作战技术的阐述和分析,得到相关蜂群发展启示。推动蜂群作战技术进入我军未来无人机作战体系,整合我军现役无人机装

备,提升我军现有作战效能,降低装备制造、使用和维护成本,对争取未来战场主动权,推动新军事变革,将具有重大意义。

参考文献

- [1] 陈晶. 解析美海军低成本无人机蜂群技术. 飞航导弹, 2016 (1)
- [2] 杨勇,王诚,吴洋. 反无人机策略及武器装备现状与发展动向. 飞航导弹, 2013 (8)
- [3] System of system integration technology and expeirmentation. <http://www.darpa.mil/program/system-of-system-integration-technology-and-expeirmentation>.
- [4] DARPA 期望通过载荷和平台分离打造分布式作战系统. <http://www.dsti.net>, 2015-05-06
- [5] 蒋琪,葛悦涛,张冬青. “动态”与“分布”——空中力量建设的“新”方向. 航天电子对抗 2015 学术年会论文集, 2015
- [6] “小精灵”项目采用侦察及电子战无人机机群压制敌防御系统. <http://www.dsti.net>, 2015-10-08

(上接第 20 页)

高品质的风洞设备只有配备先进、可靠的试验技术,才能发挥大型风洞试验满足型号精细化设计作用。从国际上型号研制数量减少以及联合研制增多的发展趋势看,风洞试验领域的竞争日益加剧,型号试验正向少数试验能力强、口碑好的风洞集中,风洞试验也将走向品牌化。

5 结束语

大型风洞试验设备和试验技术研究是提高未来航空航天飞行器性能的基础。国外航空航天大型科研机构对风洞设备和试验技术改进一直在持续发展中,在大型风洞试验飞行器研制中取得了新的进步。国外风洞领域开展的工作将为我们提供很好的学习和借鉴经验。

参考文献

- [1] Deidre O. AEDC H2 arc heater team validating new test capability after upgrade. High Mach , 2017 , 64(3)
- [2] John D. Development and implementation of a hybrid force measyrement system at AEDC tunnel 9. AIAA 2017-1593
- [3] Proffitt T H. Fy2016 facility assesement for aeronautics evaluation and test capabilities project. AIAA 2017-3142
- [4] Dale L B. Development of a model double-roll mouting system for a large transonic wind tunnel. AIAA 2017-0775
- [5] Christina L N. Inverse force determination on a small scale launch vehcile model using a dynamic balance. AIAA 2017-1405