

巡飞弹蜂群关键技术与战术构想研究

李 辉, 方 丹, 高伟伟, 陶贵明

(陆军工程大学石家庄校区导弹工程系, 石家庄 050003)

[摘 要] 针对国内蜂群研究中忽视军事应用背景,或忽视系统性研究等问题,剖析了巡飞弹蜂群概念,以巡飞弹蜂群支援坦克分队进攻作战为背景,揭示了蜂群研究“能力、技术和战术”循环三角关系,并以此为指引,综合研究了巡飞弹蜂群的作战能力、关键技术和战术构想。研究表明,巡飞弹蜂群具备多方面革命性作战能力;其技术体系应包括巡飞弹、单体人工智能、群智能等三个方面,其部分关键技术尚处于起步阶段,但前景广阔;其战术运用场景和样式丰富,亟待更深入的探索研究。

[关键词] 蜂群; 巡飞弹; 无人机; 群智能; 人工智能; 战术

[中图分类号] E927

[文献标识码] A

Research on Key Technology and Tactical Conception of Loitering Munitions Swarm

Li Hui, Fang Dan, Gao Weiwei, Tao Guiming

(Department of Missile Engineering, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Because military application background or systematic research is ignored in swarm operational research, the concept of loitering munitions swarm is analyzed. In the context of the loitering munitions swarm supporting the tank element in offensive campaign, the circular triangle of capabilities, technologies and tactics in swarm research is revealed. The combat capabilities, key technologies and tactical conception of the loitering munitions swarm are studied. The results show that the loitering munitions swarm possesses multiple revolutionary combat capabilities; its technology system include loitering munitions, single artificial intelligence, and swarm intelligence, then some key technologies still in the initial stage but with broad prospects; its tactical application is rich in scenario and style, which is a pressing issue that more thorough exploration and research is demanded.

Keywords: swarm; loitering munitions; unmanned aerial vehicle; swarming intelligence; artificial intelligence; tactics

1 引 言

近年来,部分国家的军事装备发展迅速,使得

美军的技术和质量优势正加速消减。美军认为,在未来的反介入/区域拒止(A2/AD)作战环境下,昂贵、多任务的大型作战平台面临严峻的生存考验。2014年11月15日,时任美国国防部长查克黑格尔

[作者简介] 李 辉,副教授。

[收稿日期] 2020-05-18

正式对外宣布了“第三次抵消战略”，核心目标是大力发展以蜂群为代表的无人智能化装备。一方面，将大型平台的复杂任务分解，改由任务相对简单、无人员伤亡、群生存能力强、高智能的多种蜂群系统承担，引领未来战争形态向无人化、智能化方向发展，使美军重新获得技术和质量优势；另一方面，相比现役高科技装备，蜂群成本低廉，可望打破诺姆·奥古斯丁定律^[1]的束缚。真如此，则美军还能额外获得装备数量上的优势。由此可见，大力开展蜂群研究具有重大的军事意义。国内的蜂群研究中，有的脱离军事应用背景单纯研究群智能算法^[2-3]，有的只单纯翻译或介绍国外研究项目情况^[4-7]，有的只局限于蜂群战术的研究^[8-9]，少见关键技术研究，少见紧扣军事应用背景、综合研究能力、技术和战术的文献。

本文紧扣军事应用背景，采用能力、技术和战术一体化研究方法，重点研究巡飞弹蜂群的技术体系和关键技术，以及可能的战术构想，可为国内相关研究提供借鉴和参考。

2 蜂群与巡飞弹蜂群

自然界的蜂群只有三类蜜蜂：蜂王、雄蜂和工蜂，它们分工明确，各司其职，如蜂王只负责交配和产卵；雄蜂只负责与蜂王交配；工蜂则负责采集花粉、喂养幼虫、打扫巢穴等。研究发现，单只蜜蜂的智能很有限，蜜蜂与蜜蜂之间的信息交互也是局部的、简单的，但是整个蜂群的行为却体现出了高度的协同性、自主性和自适应性，即具有很高的智能。

很多的群居动物都有这样的群智能特性，如蚁群、鱼群、鸟群等。现在比较公认的群智能(Swarming Intelligence, SI) 定义^[10]是：无智能或简单智能的生物个体通过某种形式的信息共享和相互协调而体现出的智能行为。这种高的群体智能特性常被称作“涌现性”。通过研究自然界的群智能，产生了多智能体系统理论，开发了蜂群算法、蚁群算法等群智能算法，并广泛应用于各类工程问题研究中。

通常以及本文所说的蜂群，是指群智能体系统(Multi-agent Systems, MAS) 在军事领域的具体应用，因此既具有分布式、感知并利用局部信息、可

扩展性强和自组织性等群智能体系统的共性^[11]，又必然具有个体特点和一定的单体智能。因此，研究蜂群应包含三个视角——“群智能”视角、个体视角和单体智能视角。同时也说明，从分类看，太空卫星群、空中无人机群或巡飞弹群、地面机器人群、水面无人艇群、水下无人潜航器群等等，只要不是数量的简单叠加，而是具有群智能，都是蜂群家族的一员。本文聚焦巡飞弹蜂群，研究巡飞弹前需先从无人机谈起。无人机群应用于军事，首见于 20 世纪 80 年代中东战争时期：以色列发射 Delilah 无人机群，作为诱饵引诱叙利亚地空导弹雷达开机，再发射反辐射导弹摧毁之。在无人机上加装战斗部和制导系统，就变成了巡飞弹(Loitering Munitions)，以色列的 Harpy 被认为是第一代，它集成了无人机和导弹的优点，比无人机作战响应更快、精度更高、成本更低、功能更全、操作更简便，因而获得了快速发展。

无论是无人机、导弹，还是巡飞弹，目标自动识别(Automatic Target Recognition, ATR) 技术都是关键但至今尚未成熟的技术，这也是巡飞弹难以脱离人工操控的主要原因。人工智能(Artificial Intelligence, AI) 的发展方兴未艾，为 ATR 技术的成熟提供了良好前景，因此也是研究巡飞弹蜂群的重要视角。

3 巡飞弹蜂群的作战能力分析

新概念武器的研究重点必然包括作战能力、关键技术和战术运用三方面，且三者构成循环三角关系(如图 1 所示)，其中战术应用牵引作战能力需求，作战能力依靠关键技术去实现，关键技术决定了合适的战术运用。

依据图 1 所示，研究作战能力首先需设定战术

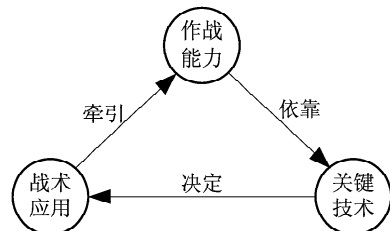


图 1 能力、技术和战术的循环三角关系图

应用背景: 设想巡飞弹蜂群担任情报侦察和火力支援任务, 协同坦克分队进攻作战。在此战术牵引下, 可从巡飞弹、单体智能和群智能三个视角, 综合分析巡飞弹蜂群的作战能力。

(1) 智能和无人作战能力

智能是蜂群系统最本质的特征。首先单体必须具备一定的智能, 否则大规模蜂群完全由人工有效操控是难以想象的。另外群智能更重要, 如单体之间能够实现协同飞行、协同态势感知、协同攻击等; 蜂群与蜂群、蜂群与有人平台之间实现协同等。只有实现智能, 蜂群作为支援力量为作战体系赋能时, 对体系、平台和人员的依赖才能较低, 才能实现高对抗复杂环境下的自主作战。无人化作战能力则将大大降低蜂群运用的限制, 提高其任务能力, 例如高风险任务(甚至自杀式任务) 能力。

(2) 突防和生存能力

突防和生存是完成任务的前提, 巡飞弹蜂群飞行高度较低, 速度较慢, 体积小, 是典型的“低小慢”目标, 现有的防空系统难发现、难摧毁, 因此具有极强的突防能力。即便对手不惜代价打掉一部分, 但因蜂群分布式的结构特点和群生存的生存特点, 仍能继续执行任务, 表现出极强的生存能力。

(3) 任务能力

配备模块化载荷, 蜂群具备多样化任务能力。从巡飞弹蜂群主要的情报侦察和火力支援任务来看, 其单项任务能力同样强大: 巡飞弹蜂群采用协同侦察的方式, 侦察范围广, 情报信息丰富; 其飞行可分巡飞段和制导段两个阶段, 因巡飞阶段时间长, 弹道灵活, 在攻击目标前, 能够选择最合适的高度和角度, 因此特别适合精确打击那些目前较难对付的目标, 如运动目标、时敏目标、反斜面目标、隐蔽目标等等。

(4) 射程、持续、区域覆盖能力

以火箭炮射巡飞弹蜂群为例, 其射程可以轻松达到数百公里。因其数量多、巡飞时间长, 可实现长时间巡飞封控和宽广区域覆盖, 从而大幅提升其任务能力。

(5) 快速反应、精确打击和低成本能力

以火箭炮发射平台为例, 其发射准备时间仅需

几分钟; 当发现和识别目标后, 其反应时间短, 可以做到“发现即摧毁”, 因此巡飞弹蜂群被认为是各种火力中, 反应速度最快的装备类型。

巡飞弹采用精确制导技术, 对各类目标有很高的命中概率, 这将大幅提高作战效能, 同时减少附带损伤。

即便以目前技术水平, 蜂群的成本也是相对低廉的。例如较大的无人机单机在数万美元量级, 微型的甚至只几百美元, 低成本能力突出。

总之, 巡飞弹蜂群具备极强的多方面作战能力, 其中有些能力是目前装备体系所欠缺的, 将对军事体系作战能力的提升有很高的贡献度。

4 巡飞弹蜂群关键技术分析

多方面的作战能力, 需要依靠技术体系去实现。巡飞弹蜂群涉及的技术体系, 大致可以分为三部分: 巡飞弹技术体系、单体人工智能技术体系、群智能技术体系。显然, 技术体系中的关键技术也可以如此分类。

(1) 巡飞弹关键技术

巡飞弹已发展多年, 技术已较为成熟, 主要有: 发射/投放技术、动力系统技术、飞行器设计技术、巡飞与制导控制技术、传感器技术、战斗部技术等。近年来几个典型蜂群无人机研究项目, 可为蜂群巡飞弹关键技术的研究提供借鉴: 小精灵 (Gremlins)^[4] 无人机, 执行空军侦察和电子战任务, 质量为数百千克; 低成本无人机蜂群技术 (LO-CUST)^[5] 无人机, 执行侦察任务, 质量为 5.9 kg; 微型无人机高速发射演示 (Perdix)^[6] 无人机, 执行侦察任务, 质量 300 g 左右; 近战隐蔽一次性自主无人机 (CICADA)^[7], 执行落地静默侦察任务, 质量为 65 g, 如图 2 所示。

陆军巡飞弹蜂群最具参考意义的是 LOCUST 和 Perdix, 它们的共同特点是体积小、质量轻、成本低, 可以大规模发射; 可探测性低, 便于隐蔽和突防; 载荷能力、机动能力有限。因此蜂群中的巡飞弹应至少包括以下几方面的关键技术: 高效发射/投放技术、长航时动力技术、巡飞与制导控制技术、微型载荷技术。

高效发射/投放技术方面, 主要有现役平台兼

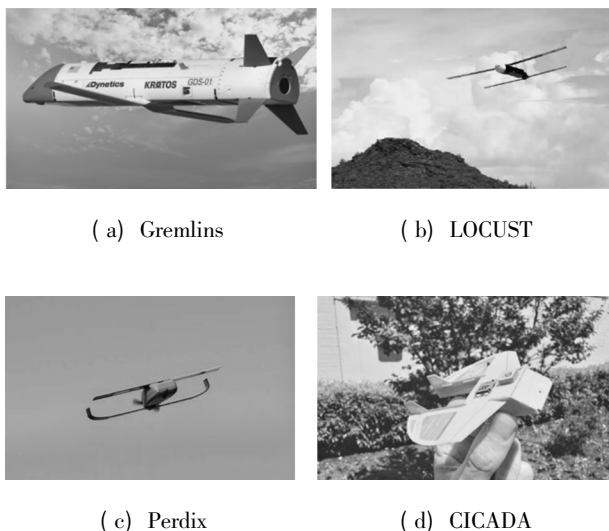


图2 美军近年典型蜂群无人机项目

容发射、专用平台发射和飞行器投放三种方式。以兼容火箭炮发射为例,通常采用火箭助推的方式以节省蜂群能源;为提高发射效率常设计成子母弹式,发射后还必须解决母子分离、子弹抛撒、子弹改飞行等问题。

应选用比能量大、效率高的动力系统,例如燃油发动机系统,以支持尽可能长时间的巡飞。近年随着动力电池比能量快速增加和成本的快速下降,应用前景广阔,例如 LOCUST 项目和 Perdix 项目无人机均为电驱动,前者巡飞时间长达 1 h。

控制技术方面,需提高巡飞的效率,保证良好的续航能力;同时因蜂群巡飞弹的载荷能力有限,必须采用精确制导技术,以保证对目标的毁伤效果。

载荷技术方面,受巡飞弹体积质量限制,载荷能力有限(如 LOCUST 无人机只有 0.9 kg),必须发展微型载荷技术。侦察载荷一般搭载微型光电探测器,以及搭载微型战斗部载荷,适合对付轻型目标或特种目标。

(2) 单体人工智能关键技术

虽然蜂群强调群智能的重要性,但个体智能也很关键。如果个体缺乏智能,例如不能实现目标自动识别和自主决策,则蜂群在攻击目标时就必须依赖操作人员的智能、接受其控制,这对数量庞大的蜂群将是致命的缺陷。

单体人工智能关键技术可分为底层支撑技术和

上层应用技术,目前虽发展迅猛,但仍任重道远。底层支撑技术主要包括算力技术(如 AI 芯片等)、算法技术(如机器学习算法等)和开发平台技术(如 Google 的 TensorFlow,百度的 PaddlePaddle 等);应用技术包括语音识别、自然语言处理、计算机视觉等技术。在应用方面,计算机视觉技术为巡飞弹的三维立体移动目标识别^[12]提供了新的可能,尤为值得关注。

(3) 群智能关键技术

群智能关键技术是蜂群最重要的技术,大致有以下几个方面:①网络拓扑结构与通信技术。在智能体系统理论中,数学上一般使用图论来描述网络拓扑结构。可选结构有四种^[13],如图 3 所示。

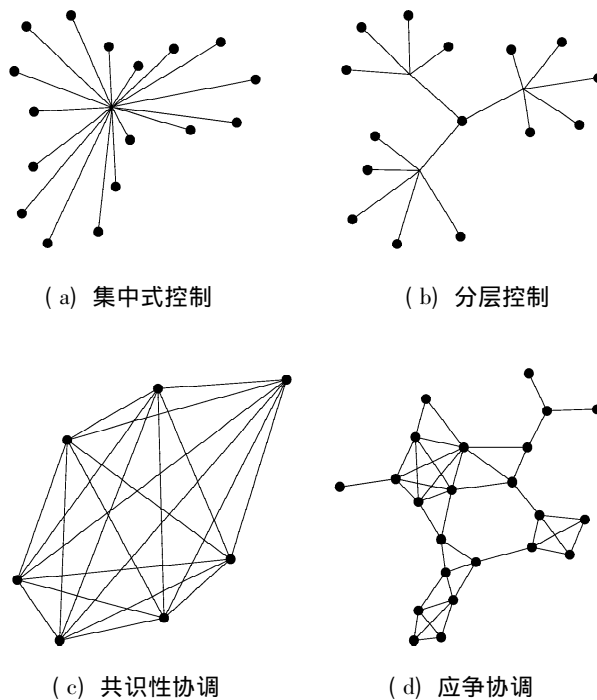


图3 蜂群网络拓扑结构图

集中式(Centralized)结构有一个控制核心,所有成员向其反馈信息,并一一接受其控制实现协同。分层式(Hierarchical)则是底层成员分别由若若干上级“组长”控制,所有“组长”又由若若干更上一级的“班长”控制,以此类推至最高层控制者。共识性协同(Coordination by consensus)则没有中心控制者,所有成员相互保持通信,通过投票表决机制或

竞拍的方法解决协同问题。应急性协同(Emergent coordination)的通信和协同只发生在个体周围的局部范围,但期望能实现整个蜂群的高度协同。

蜂群采用哪种结构,需要综合考虑任务复杂性、蜂群智能水平等因素,但显然,集中式和分层式存在控制中心,使得蜂群不够强健(当然可以用备份的方式一定程度解决这个问题);共识性协同虽没有中心控制者,但通信量过大、决策效率过低,尤其当群体数量增加的情况下;应急性协同是唯一符合自然界蜂群的通信拓扑结构,通信量小、决策效率高、网络强健。综上,应急协同,或以其为基础的混合式结构是蜂群网络拓扑结构的优选项。

①就通信技术而言,核心要解决现有无人机通信的安全问题和高伸缩性问题,前者能保证在强电子对抗环境下的可靠通信,后者能保证蜂群具有很强的自适应能力。

②大数据和云计算技术。巡飞弹蜂群具有分布式的结构特点,其传感器会产生海量的数据,要处理、传输和存储这些数据,使数据价值最大化,必须借助大数据和云计算技术。

③协同任务技术。协同是蜂群智能的本质体现,从蜂群任务流程角度,协同任务技术包括协同任务规划、协同编队飞行、协同态势感知、协同攻击目标等技术;从研究步骤角度,一般从明确规则开始,通过构建模型、开发算法、仿真分析,最后用试验进行验证。其中协同算法无疑是研究的核心,目前的蜂群算法、蚁群算法、神经网络算法等均是重要的研究基础。

5 巡飞弹蜂群战术构想

“技术决定战术”,由于技术水平的不同,人类战争的战术样式经历了群殴作战(Melee)阶段和聚合作战(Massing)阶段,目前则为信息化时代的机动作战(Maneuver)阶段,未来将是智能化时代的蜂群作战(Swarming)阶段^[14]。基于现阶段巡飞弹蜂群技术尚处于起步阶段,将蜂群视为支援力量,融入现有作战体系,发挥其独特作战能力,无疑是合理的战术应用。下文以巡飞弹蜂群协同陆军坦克分队机动进攻作战为例,探讨具体战术构想。

坦克因有很强的机动力、火力、防护力和信息

力,被视为“陆战之王”。有矛必有盾,随着各类反坦克火力发展,坦克受到的致命威胁越来越多,如武装直升机载反坦克导弹、便携反坦克导弹等。为应对此类威胁,坦克分队在机动进攻作战中,必须有步兵的密切协同。新的“蜂群+坦克”组合,将比步坦协同有更强的机动、更立体的攻防、更少的伤亡、更高的效能。

根据美陆军野战手册3-90《战术》,进攻作战有五种机动作战形式,分别是:渗透、突破、正面进攻、包围和迂回。基于坦克和蜂群的作战能力和技术特点,只分析突破、包围和迂回的具体协同方法,其它战术应用可同理分析。

(1) 突破

突破是指采取沿较窄正面轴线实施攻击,迅速穿透敌方防线的方式。当坦克分队选择突破进攻时,蜂群可充分发挥情报支援和火力支援的作用。首先,由炮兵发射蜂群,利用其隐蔽和机动优势,对敌防御阵地进行抵近侦察,重点探测敌前沿部署的薄弱环节,以及敌反坦克火力的部署,并利用蜂群的群智能形成实时态势,大幅度增强坦克分队的情报信息能力。其次,在坦克分队突击过程中,蜂群一方面可重点攻击敌各类反坦克火力,为坦克分队突破解除致命威胁;另一方面利用空中和机动优势,攻击传统火力较难对付的时敏目标、反斜面目标、隐蔽目标等,支援坦克分队快速突破。一旦达成突破,己方部队既可继续前进攻占防线后方目标,也可利用割裂敌防御体系的效果,攻击敌翼侧,迅速瓦解敌防御体系。

(2) 包围

包围是使用坦克分队从各个方向对坚守防御之敌实施进攻的方式。包围有多种形式:单面、双面、环型和垂直包围等,所有形式都试图避开敌部署有较强火力的正面。成功的包围战术需要满足三个条件:比对手强的机动优势、获取关键情报的优势(必须确定敌防御薄弱之侧翼位置)和各部队之间的信息沟通能力。显然,蜂群正是能提供这三方面优势的全新武器,从而为坦克分队实施有效包围,获得巨大的战术突然性创造条件。当敌军被我坦克分队从薄弱侧翼突破,被迫撤退时,蜂群还能快速机动、垂直包围,对撤退中的敌军进行分割歼灭。

(3) 迂回

迂回是指坦克分队避开敌人的主要防御,绕到敌人后方夺占目标,目的是迫使敌人以全部或局部力量从目前的阵地上转移应对。在迂回作战中,蜂群特别适合担任侧翼保护任务:发挥覆盖区域广、巡飞时间长、机动能力强等优势,配置于敌方和我坦克分队之间,起到有效保护我坦克分队侧翼安全的作用。

可见,若将巡飞弹蜂群作为支援力量融入现作战体系,将发挥巨大的军事价值,从而大幅提升现作战体系的作战能力。随着蜂群技术的不断进步,未来巡飞弹蜂群将由支援力量向主战力量演变,将使得作战过程有更快的反应速度、更大的无人群体数量、更立体的呈现形式、更强的机动与火力协同能力。但最关键的革命性变化,一定是群智能的涌现和作战的高度自主,人类战争将进入智能化时代。

6 结束语

人工智能被认为是未来大国竞争的制高点,相对于民用领域,当前巡飞弹蜂群研究仍需付出更多的努力。巡飞弹蜂群具备多方面革命性作战能力,单体人工智能技术和群智能技术才刚刚起步,战术应用更处于构想阶段。但若加大多方面投入,在不远的将来,巡飞弹蜂群技术完全有可能取得更为显著的进步。

任何新概念武器都不可能是完美的,目前阶段蜂群的载荷能力、巡飞能力、机动能力等都较为有限,因此更要注重能力、技术和战术的一体化研究,互为驱动。最后,还要重视智能武器可能的伦理、反常识、超人类智能等挑战,并妥善研究解决。

[参 考 文 献]

- [1] 柯江宁. “蜂群”攻击——美国获取战场优势的秘密武器[J]. 现代军事, 2015, 2(5): 102-107.
- [2] 王水花, 张煜东, 吉根林. 群智能算法的理论及应用综述[J]. 南京师范大学学报, 2014, 14(4): 31-38.
- [3] 何尧, 刘建华, 杨荣华. 人工蜂群算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(5): 7-12.
- [4] 袁成. 美国国防高级研究计划局“小精灵”项目[J]. 兵器知识, 2016, (9): 37-39.
- [5] 陈晶. 解析美海军低成本无人机蜂群技术[J]. 飞航导弹, 2016, (1): 24-26.
- [6] 李洪兴. 美国防部秘密开发下一代集群无人机技术[J]. 现代军事, 2016, 477(10): 15.
- [7] 宫朝霞, 晗旭. 美国海军正研究 Cicada 无人机[J]. 飞航导弹, 2008, (1): 15.
- [8] 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): 12-14.
- [9] 李军, 李敏勇, 刘国林. 海上蜂群战探析[J]. 海军大连舰艇学院, 2010, 33(1): 15-17.
- [10] Rubio-Largo A, Vega-Rodriguez M A, Gomez-Pulido J A, et al. A comparative study on multi-objective swarm intelligence for the routing and wavelength assignment problem[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, 2012, 42(6): 1644-1655.
- [11] Hinchey M G, Sterritt R, Rouff C. Swarms and swarm intelligence[J]. Computer, 2007, 40(4): 111-113.
- [12] 顾泽苍. 人工智能技术深度剖析[J]. 机器人技术与应用, 2017, (1): 23-28.
- [13] Scharre P. Robotics on the battlefield part II: the coming swarm[R]. Center for a New American Security, 2014.
- [14] Sean J A. Swarming and the future of warfare[D]. https://www.rand.org/pubs/rgs_dissertations/RGSD189.html, 2005.