

蜂群作战，缘何“雷声大雨点小”

■张昕宇



图①：美军“小精灵”项目使用的X-61A无人机。

图②：美军“小精灵”项目中载机投放无人机蜂群示意图。

图③：俄罗斯计划改装米-38中型运输直升机，作为无人机蜂群的指挥控制平台。



近年来，无人机蜂群作战作为军事领域的一项前沿技术，受到世界主要军事强国的高度重视。理论上讲，无人机蜂群作战将以独特的战场优势重新定义战争形态，颠覆未来作战方式。然而，自2000年美国国防高级研究计划局启动无人机蜂群作战研究以来，其真正意义上的作战效能并未得到实战验证。俄乌冲突中，双方投入大量无人机，但战场上并未出现蜂群作战样式。相反，由于电子系统、控制软件、导航和气象等原因，无人机满天乱撞的报道接连出现。事实上，无人机蜂群作战在付诸实践过程中还存在诸多难题，无人机个体技术特点成为作战使用难点。无人机蜂群的软肋在技术和战术层面兼而有之，也使得蜂群作战难以付诸实践。

技术门槛较高

作为一项前沿技术，无人机蜂群作战存在较高的技术门槛。其一是飞行控制问题，包括对多架无人机的控制和飞行中的无人机蜂群的间距控制。目前，对单一无人机的控制仍存在一定技术难度，对多架无人机的控制难度更大。无人机蜂群在空中飞行时，相当于人为制造了一种复杂的天空环境。在攻击目标时，每架小型无人机之间还需要互相规避，使得控制算法的难度加大。另外，无人机蜂群执行的作战任务具有复杂性和不确定性，导致蜂群决策的难度增大，决策过程放慢，进而影响到蜂群实时协同等关键行动。

其二是信息交互问题。蜂群内部通过信息交互方式，使所有无人机能及时共享战场态势，并对其他无人机提出请求或做出回应。这对无人机蜂群的信息交换能力提出较高要求。一是通信速率要快，二是要抗电磁干扰。目前，无人机蜂群虽然可实现成

百上千架无人机编队飞行，但这种编队飞行总体抗干扰能力较弱，经不住导航/通信链路被干扰破坏。一旦通信链路或关键节点被摧毁，无人机之间的协作将很快“崩塌”，战斗力将消失殆尽。在俄乌冲突中，双方均有大量无人机折损于电子战。

其三是人工智能问题。蜂群作战要求无人机具有较高的自主化与智能化水平，但在现阶段乃至今后很长一段时间内，无人机飞行仍需控制站的远程辅助，不仅带来信号传输处理的延迟，而且对无人机的飞行控制、编队控制、机间通信、控制站人员指挥控制能力等都提出较高要求。另外，各无人机之间必须实时交互信息，确保有序飞行，以及任务分配、目标选择等实现，这些功能都需要人工智能系统运作。而人工智能水平越高，对机载计算机的能力要求越高，所需能耗也越高，这对于无人机蜂群而言又是一大挑战。

其四是能源问题。能源直接影响无人机的机动能力，进而关系到作

战效能。受无人机蜂群低成本、轻量化和小型化等要求限制，无人机的机动性、续航能力和承载能力相对较差，从而限制了单架无人机性能。最理想的情况是无人机配备低能耗机载设备和容量的储能电池，但目前距离这一目标尚远。

其五是载荷问题。受无人机蜂群的成本限制，单架无人机的体积、重量和功耗有限，携带的载荷有限，导致机载通信、计算和存储能力相对较低。而载荷性能较低，必然影响到无人机蜂群的毁伤能力。单一的无人机很难对目标构成致命毁伤，因此需要依靠无人机蜂群实施饱和和打击，以达到击毁或重创敌方目标的目的。

战术劣势明显

在以上技术短板影响下，当前蜂群作战主要存在以下战术劣势。

速度慢、航程短，增射程与保安全存在两难。目前，绝大多数蜂群无人机采用小型机体+电驱螺旋桨设计，飞行

速度慢，且航程较短。这意味着携带无人机的发射载机必须尽可能地靠近前沿，才能让无人机有足够航程，而这势必要求载机前出至对方火力威胁范围内。例如，美军“小精灵”项目使用的是X-61A无人机，作战半径550至900千米，载机为C-130、B-1B等大型平台，因此待发射区域通常较远。而“灰山鹤”“郊狼”等小型无人机航程偏短、飞行速度慢，需要发射平台靠近目标区域投放，发射区位置距离任务目标相对较近。目前国外普遍认为，蜂群无人机的核心优势是“蜂群”，擅长以量取胜的“饱和式”作战，通过数量规模的叠加效应，形成局部压倒性优势，达到提高突防概率和摧毁目标的目的。也有观点认为，蜂群无人机的飞行速度将为敌防空系统“创造”更多拦截机会，即使拥有明显的数量优势，其突防效率也将不可避免地下降。

运行中枢“神经网络”复杂，作战控制面临重重难关。20世纪90年代末美军提出无人作战蜂群战术，历经20多年发展，直到2021年1月成功演示无

人机蜂群突破伯克级驱逐舰的“宙斯盾”防空系统，才标志着无人机蜂群作战初步成熟。在未来无人机蜂群作战中，成百上千的无人机协同作战将对决策控制系统提出更高要求。每架无人机都要通过集群算法，完成数据收集、汇总、空中编队切换与执行攻击指令等一系列任务。另外，有些国家还在尝试研制能够直接使用强电磁攻击的反无人机武器，在无人机蜂群所处空域实施磁暴，让机载电子设备陷入瘫痪，进而使无人机丧失战斗力甚至坠毁。高度复杂的控制系统和日益强大的反制武器，将给无人机作战控制带来更大挑战。

“空中大脑”突防能力弱，实战运用约束手，战场劣势明显。目前的无人机在航程超过一定距离后，受地形、磁场、信息传输等因素影响会更大，仅靠地面控制站很难完成任务。为此，科研人员提出空中指挥所模式，希望通过前移控制站强化对无人机的控制。

美军曾尝试将直升机作为空中指挥所的载机，跟随无人机协同作战，但这一设想遭到否决。因为直升机升限低、机动性差，在作战行动中无异于“活靶子”。俄罗斯提出两种方案，方案一是改装伊尔-76MD-90A大型军用运输机，用于大中型察打一体无人机及无人战斗攻击机的指挥控制，同时承担空中作战、远程空地精确打击、战略侦察监视等任务。方案二是改装米-38中型运输直升机，负责中小型无人机的指挥控制，主要面向低空、超低空的空地作战。这些方案的有效性有待验证。

难关有待打通

目前来看，无人机蜂群作战需要打通三道难关，才能完成作战任务。

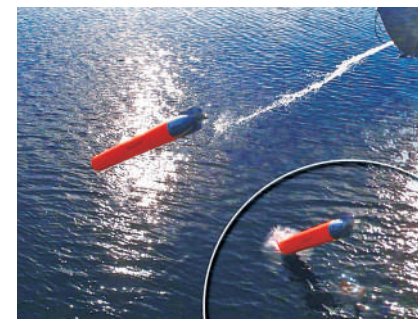
第一关，建立“控制中枢”。以母机作为“蜂窠”，投放一定规模数量的无人机蜂群，进行编队飞行。母机的集成控制中枢要将控制指令实时、并行地传输给多架无人机，指挥无人机群完成作战任务，对目标实施精确打击。目前，这一技术仍面临难题。例如，能够大规模承载无人机的平台屈指可数，一架母机可携带的无人机数量有限，而无人机数量过少，则无法对敌方进行有效打击。

第二关，打通“关键链路”。在瞬息万变的战场态势下，无人机与控制中枢能否做到紧密联通尤为重要。要完成作战控制，必须及时准确地获取有效目标信息，并通过数据链路传输到无人机上，令其作出及时应对。想要实时获取信息，并通过控制中枢传输到每一架无人机上，需要数据链路具有较强的稳定性和抗干扰能力。

第三关，实现“实时共享”。让蜂群中每架无人机更快、更全面地掌握战场态势，相当于拥有更多的“耳目”，有利于在战场上抢占先机。然而，在作战过程中，无人机绝大多数时间在进行快速移动，通信系统整体上处于实时动态、反复打破再重组的状态，通信质量也会受到影响。同时，无人机之间的频繁通信容易导致信息数据过载，超出系统处理极限，导致重要信息无法及时传达乃至延误战机。

前沿技术

德国荷兰联合研发“反鱼雷”技术

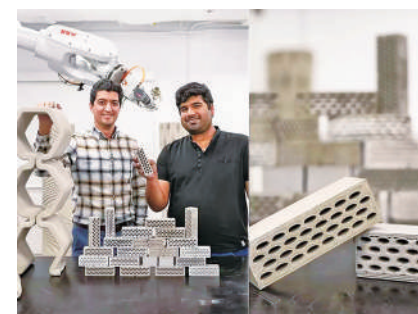


“海蜘蛛”鱼雷。

鱼雷是水面舰艇面临的主要威胁之一，且有效应对手段不多。据外媒报道，德国与荷兰海军十年来持续开发从水面舰艇上发射、追踪并拦截来袭鱼雷的硬杀伤技术。目前，这项技术的唯一成果是一款由欧洲阿特拉斯电子公司开发的“海蜘蛛”鱼雷。

据阿特拉斯电子公司介绍，“海蜘蛛”鱼雷可以拦截目前所有类型的鱼雷。它能在航行过程中接收传感器数据，计算出撞击来袭鱼雷的航行路径。由于技术成熟度不高，德国与荷兰军方目前未采购这款产品。2023年，在两国军方的支持下，阿特拉斯电子公司对“海蜘蛛”鱼雷进行升级，进一步提升其探测技术。该升级计划被称为“反鱼雷鱼雷”，预计德荷两国将投入5000万至1亿欧元。

美国开发仿骨骼结构空心混凝土砖



研究人员制造的空心混凝土砖。

据美国普林斯顿大学网站消息，受人类骨骼坚韧的外层结构启发，该校科研人员开发出一种空心混凝土砖，其抗打击能力是目前常用材料的5.6倍。

皮质骨是人类骨骼的致密外壳，由嵌入有机基质的椭圆筒状“股单位”组成，具有高强度、高刚度和高断裂韧性，可有效对抗骨组织变形和断裂。皮质骨高韧性的主要原因之一是裂纹传递到“股单位”界面时，会发生偏转和扭转，从而有效抑制裂纹的进一步扩展，防止突然脆性断裂。受此启发，研究人员利用3D打印技术和铸造工艺，制出具有中空管状结构的混凝土砖。通过精心设计空心管的形状、尺寸、数量和排列方向，使混凝土材料在保持高强度的同时，断裂韧性显著提高。其最佳设计为椭圆形空心管、孔隙率40%，同时排列具有一定无序性。这种空心混凝土砖可用于建造军事堡垒、弹药库等关键设施，提高军事设施的安全性，延长使用寿命。

法国推进有人-无人协同作战技术



法国“神经元”无人验证机。

据外媒报道，近日，法国公布新型无人机研制计划。该计划由法国达索航空公司牵头实施，在“神经元”无人机基础上进一步开发。

达索公司表示，这款新型无人机采用自主控制技术，具有多功能特征，能够根据未来作战需要进行改进，但没有提供相关性能和作战任务等更多信息。

据报道，新型无人机的主要任务包括压制和摧毁敌方防空系统。新型无人机与其协同作战，将大大提升作战效率。此外，该机还将搭载第4代高超音速对地核导弹。

目前，达索航空公司未公布该机设计，考虑到将在“神经元”无人机的基础上开发，该机将具备一定的隐身能力。（高京京 李静）

颠倒的飞机

■西南

这张照片中（左图），在一处山坡上，一架F-4“幻影II”战斗机倒置在一个高高的基座上，展示其翼下的武器系统。这并非某地的地标模型，而是一架货真价实的战斗机。此场景除了展示外还有什么作用？这还得从美国空军的一项测试说起。

20世纪70年代，随着军用飞机配备的通信和电子系统越来越复杂，美军军成立一项秘密测试项目，专门测量军用飞机天线系统的电磁辐射情况及有效性。该项目的非官方名称为“颠倒空军”。

“颠倒空军”项目在实施过程中，将测试飞机机腹朝上，用螺栓等固定在高10米左右的基座上。这样一来，测试人员能够在地面对飞机天线进行测试。这种做法具有明显优势。如果将飞机以正常状态固定在基座上，由于基座会挡住电磁波的通路，测试结果将会受到影响。而将飞机倒置在基座上，机腹朝向天空，这样可以任意旋转、倾斜飞机，不用担心电磁信号受到影响。这种测

量方法与传统飞行测试方法相比，能节省大量时间和费用。

当时，进行测试的是美国空军罗马航空发展中心，隶属于纽约的格里菲斯空军基地。20世纪90年代初，格里菲斯空军基地被关闭，但该中心得以保留，并更名为罗马实验室。如今，罗马实验室已经成为美军四大“超级实验室”之一，是美军专门从事指挥、控制、通信、情报与网络技术方面的首要研究机构。

值得一提的是，“颠倒空军”只是美国国防部为各种军用飞机进行电磁辐射测试而建设的众多基础设施之一。除了进行电磁辐射测试外，在进行雷达反射面积测试时，也需要将军用飞机倒置。因此，这种“倒置”做法至今仍在使用。

图文兵戈

