

# 全域作战下无人机集群体系分析及典型任务构想

岳源<sup>1</sup>, 董彦非<sup>2,\*</sup>, 马尧<sup>3</sup>

(1. 中国民用航空飞行学院航空电子电气学院, 广汉 618307; 2. 西安航空学院飞行器工程学院, 西安 710000; 3. 中国民用航空飞行学院工程技术训练中心, 广汉 618307)

**摘要:** 全域作战作为一种新的作战思想, 是诸兵种协同作战的高级层次。为了研究全域作战下无人机集群的作战样式, 梳理了全域作战思想产生与发展的过程, 并结合这一过程进行了全域作战下无人机集群体系架构的分析。从体系特点、体系优势、关键能力三个方面研究了全域作战思想下的无人机集群。在此基础上, 进行了全域作战下无人机集群遂行典型任务的构想。结合全域作战的新特点, 构想了无人机集群执行空中拦截、对海反舰、对地攻击三种任务的典型作战场景, 为未来无人机集群的技术发展和作战样式提供了一定的参考。

**关键词:** 联合全域作战; 作战思想; 无人机集群; 体系架构; 典型任务; 关键能力

**中图分类号:** TJ85 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-1300(2023)01-0153-09

**DOI:** 10.16358/j.issn.1009-1300.20210162

## Analysis of system and conception of typical tasks for UAV swarm in Joint All-Domain Operation

Yue Yuan<sup>1</sup>, Dong Yanfei<sup>2,\*</sup>, Ma Yao<sup>3</sup>

(1. Institute of Electronic and Electrical Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China; 2. Aircraft Academy, Xi'an Aeronautical Institute, Xi'an 710000, China; 3. Engineering Techniques Training Center, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** Joint All-Domain Operation (JADO) is high-level coordinated operations among various arms. To study an operational model of UAV swarm under JADO, the emergence and development process of JADO is searched. Combined with the process, the system architecture of the UAV swarm under JADO is analyzed. The UAV swarm under the idea of JADO is studied from three aspects, including system characteristics, system advantages and critical capabilities. On this basis, the conception of a UAV swarm performing typical tasks

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2022-04-27

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目 (6142101200108); 中国民用航空飞行学院面上项目 (J2021-046); 中国民用航空飞行学院青年基金项目 (Q2018-169); 民航局教育人才类基金资助项目 (14002600100017J173)

作者简介: 岳源, 讲师, 主要研究方向为体系作战效能评估、无人机集群任务规划。

通讯作者: 董彦非, 教授, 主要研究方向为体系作战仿真、飞行器总体设计。

引用格式: 岳源, 董彦非, 马尧. 全域作战下无人机集群体系分析及典型任务构想[J]. 战术导弹技术, 2023 (1): 153-161. (Yue Yuan, Dong Yanfei, Ma Yao. Analysis of system and conception of typical tasks for UAV swarm in Joint All-Domain Operation [J]. Tactical Missile Technology, 2023 (1): 153-161.)

under JADO is carried out. Combined with the new characteristics and requirements of JADO, the operation scenarios of the UAV swarm are conceived, performing from three typical tasks, such as air interception, anti-ship and ground attack, which provides specific reference of future technical development and combat style for the UAV swarm.

**Key words:** Joint All-Domain Operation(JADO); operational concept; UAV swarm; system architecture; typical tasks; critical capability

## 1 引言

军事思想的变迁引导着武器平台使用方式的变化, 无人机集群作战就是这一现象的反映。当前全域作战思想的兴起, 为无人机集群的作战应用提出了新的要求。因此, 应该在理清全域作战思想发展的基础上, 研究新思想下无人机集群的作战样式。本文旨在通过对无人机集群体系进行理论分析, 以及对典型任务场景进行构想, 为后续无人机集群的作战运用、设计研发提供一定的参考。

## 2 全域作战思想的产生与发展

### 2.1 全域作战的定义

在“全域作战”概念中, “域”(Domain)是指“整体行动环境中组织与实施作战所涉及的某一领域, 包括陆域、海域、空域、太空域和网络

空间域等<sup>[1]</sup>”。它认为“为获得优势并完成任务, 联合部队在包括陆海空天电网的全域经整体筹划并协同实施的作战行动”<sup>[2-5]</sup>, 即: (1) 需要进行协同的不是一两个兵种而是被战场环境所需要的所有兵种; (2) 作战不再区分传统的前方后方, 不局限于某个战场, 不囿于某个时间段; (3) 要综合使用全域能力, 扩大对己方有利的机会窗口, 撕裂敌方的组织能力, 减少对自己的限制因素, 增加对敌人的限制因素。如图 1 所示, 这种理念是对各种作战力量的整合, 以实现从“军种联合”到“跨域协同”, 再到“全域作战”。

### 2.2 全域作战思想的发展

全域作战思想是美军为了应对越来越复杂的战场环境, 立足所有作战领域、融合所有作战领域空间、整合所有作战领域的力量, 提出的新型军种联合作战思想<sup>[5]</sup>。如图 2 所示, 作为一种作战思想, 全域作战的诞生有着深刻的演化过程。

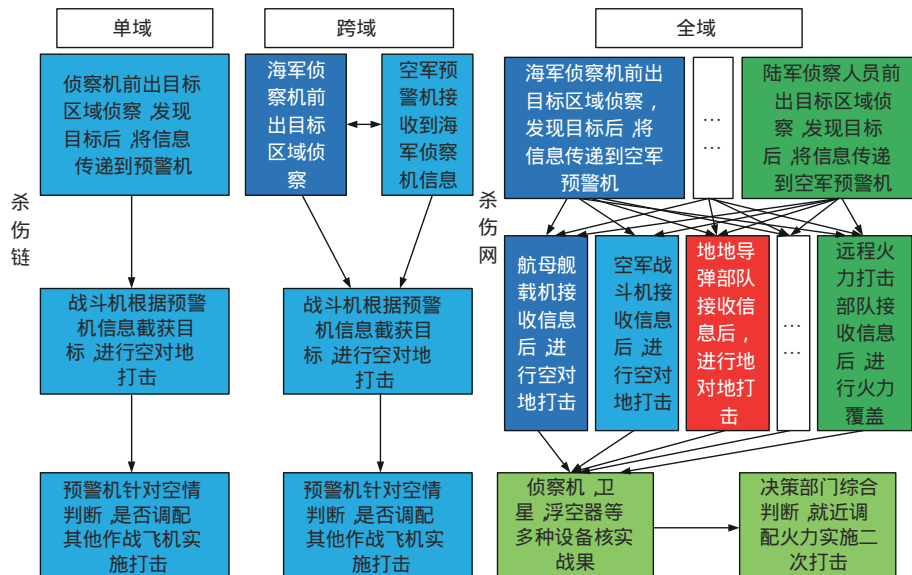


图1 “单域”“跨域”和“全域”的关系

Fig. 1 Relation of “Single Domain” “Cross Domain” and “Joint All-Domain”

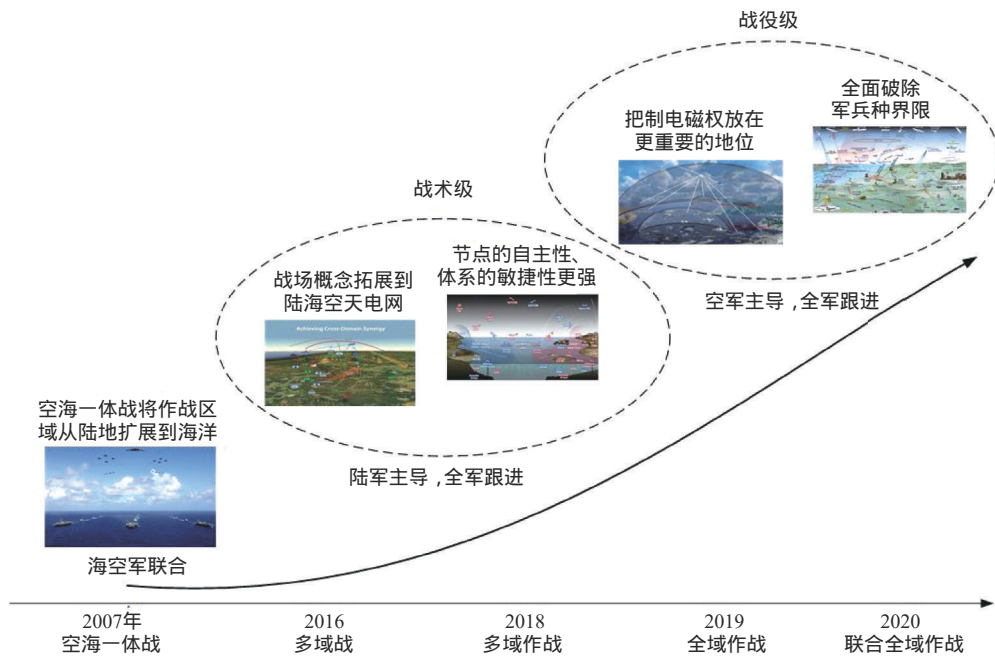


图2 全域作战思想发展过程

Fig. 2 Development process of Joint All-Domain Operation thought

2007年,美国海空军为了制衡对方的“反介入/区域拒止”能力,提出了“空海一体战”(Air/Sea Battle, ASB)的作战思想<sup>[6]</sup>,该思想意图通过海空军的联合作战实现其“以海向陆”的战略意图,以便消解中俄在部分领域的优势。

但随着对方军事力量的增长,特别是高技术武器的进步,美军认为仅两个军种的联合不足以应对未来的军事冲突。2015年,美国正式将空海一体战作战概念(ASB)更名为“全球公域介入与机动联合概念”(Joint Concept for Access and Maneuver in the Global Commons, JAM-GC)<sup>[7]</sup>。随后,2016年,美国陆军提出“多域战”(Multi-Domain Battle, MDB)作战思想,意图进一步打破军种、领域之间的界限,拓展陆、海、空、天、电、网等领域联合作战能力,以实现同步跨域火力控制和全域机动,夺取物理域、认知域和时间域等领域的优势<sup>[8-9]</sup>。美陆军2018年发布了《TP525-3-1美陆军多域作战2028》手册,进一步完善了多域战概念,将“多域战”改为“多域作战”(Multi-Domain Operations, MDO),提出了一系列解决方案,专注于挫败敌人的多层对峙能力<sup>[10-14]</sup>。2019年,美国防部提出研发基于“全域

作战”(All-Domain Operation, ADO)的联合作战概念<sup>[15]</sup>。2020年3月5日,美国空军将联合全域作战(Joint All-Domain Operation, JADO)概念写入《空军条令1-20:美空军在联合全域作战中的作用》<sup>[16-18]</sup>。该条令指出:美海军、空军联合将以联合全域指挥控制(Joint All-Domain Command and Control, JADC2)取代空军原来的多域指挥控制(Multi-Domain Command and Control, MDC2)<sup>[19]</sup>。2020年12月,美海军、海军陆战队、海岸警卫队联合发布新版海上战略——《海上优势:通过一体化全域海军力量取胜》,积极跟进联合全域作战的作战思想<sup>[20]</sup>。与此同时,美军通过举行“全球一体化演习”、“JADC2系列演习”“春季2021演习”等一系列演习对联合全域作战思想进行探索<sup>[21]</sup>。

综上,联合全域作战这一概念,本质上是对跨域协同思想和多域战等作战理论的继承、延续和升级。该概念不追求某一平台、某一系统,甚至是某一领域的优势,而是追求全领域综合能力的优势。作战力量在全领域内根据任务需要灵活调动,能够迅速地抓到敌方弱点并加以突破。突破后,美军旋即扩大优势,以压垮对手。对抗的

主体不单单是作战力量。保障力量、指控力量、信息力量等都是决定胜负的因素。指挥决策部门的输入信息来源于每个被纳入指控系统的平台，每个平台的身份都在“观察者”和“打击者”之间随时转变。

### 3 全域作战无人机集群体系分析

虽然传统的作战体系也强调不同作战平台进行协同作战，但是，一方面，传统作战体系缺乏统一的信息交互网络，不能在统一的指挥架构下协同作战；另一方面，受制于不同的隶属关系，不同领域的作战单元很难进行高效的协同作战。为了实现全领域作战，现有的作战体系需要进行重构。新的作战体系应该具备：(1) 打击力量的分散部署，信息资源的融合统一；(2) 面向任务需要，弱化隶属关系；(3) 指挥控制体系基于网状结构，而非树状结构。

在现有武器装备中，无人机具有部署灵活、机动敏捷、载荷多样、便于协同等特点，是最适应全域作战的武器平台之一。在可预见的未来，通过统一的指挥网络将无人机组成无人机集群来遂行作战任务，是贯彻全域作战思想的应有之义。

#### 3.1 全域作战下无人机集群体系架构

无人机集群中的所有作战单元被纳入统一的联合指挥中心，无人机平台可以直接和联合指挥中心构成的指挥域进行双向通信。整个无人机集群依赖决策层、通信层、作战层三个层面紧密配合。在决策层面，根据作战单元的规模可以分为战役级和战术级两个级别。战役级的决策中心由指控中心和辅助决策系统共同参与。战术级的决策中心由指挥节点和辅助参谋系统共同参与。辅助决策系统和辅助参谋系统主要由 AI 系统构成，负责预处理战场信息，负责为决策人员提供多种辅助决策方案。指控中心和指挥节点根据交战双方情报进行战役战术决策，下达指挥信息。在信息层面，通信卫星、通信中继无人机、通信基站等单元组成统一的通信网络。通过统一的通信接口，所有领域的平台都可以实现信息的交互。无人机集群依托这两个层面展开作战任务。无人机

集群可执行侦察、干扰、打击任务。一般来说，执行侦察的无人机可以凭借规模优势对敌方信息展开多领域的侦察，获取信息后在通信网络的保障下，实现与其他平台信息的实时共享。决策中心综合战场信息，向无人机集群下达任务。无人机集群根据任务，自行判断打击的方式、顺序、时间、位置。无人机集群在全域作战背景下的体系架构如图 3 所示。

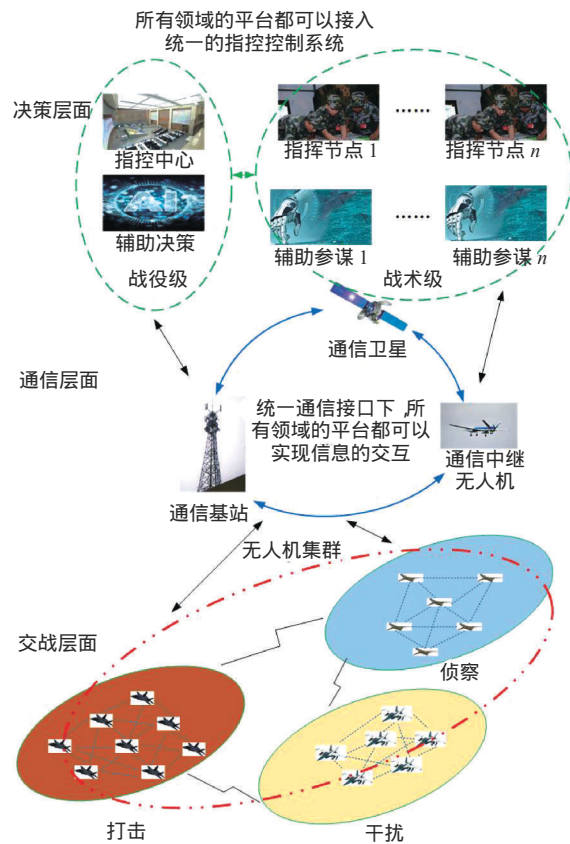


图 3 全域作战下无人机集群体系架构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of UAV swarm system architecture under Joint All-Domain Operation

#### 3.2 全域作战下无人机集群体系特点

##### 3.2.1 精干的指挥架构

无人机集群体系缩短了指挥链条，减少了集结作战力量的时间。传统的指挥架构在同一领域内下达指挥命令尚需要层层传达。在面临诸兵种协同时，其效率更低。全域作战下的无人机集群架构通过统一的指挥网络可以增强指挥命令的传播效率，能够高效调动战场资源，综合使用多域

力量,从而击败敌方。

### 3.2.2 灵活的编组方式

无人机集群体系增强了体系的自组织性,更加适应复杂战场环境。由于具有统一的指挥架构、信息网络,集群中接入和剥离无人机变得更容易,使得编组更灵活。灵活的无人机集群编组对复杂的战场环境的响应速度就更快。

### 3.2.3 更高的生存能力

无人机集群体系提高了各无人机的生存力。传统的集中式无人机集群,各个无人机的行为强烈依赖于指挥中心。当指挥中心受到打击时,无人机则无法得到指令,整个作战体系面临崩溃。全域作战思想下的无人机集群是分布式架构,作战资源可以最大程度的共享,从而提高了战场信息的流通速度,加快了战场资源的流转。无论何处受到打击都可以迅速做出反应,从而提高了生存力。

## 3.3 全域作战下无人机集群体系优势

### 3.3.1 基于信息聚合的分布式优势

基于多个无人机平台协同探测、协同指控、协同制导,无人机集群能够实现信息域、打击域、认知域的多域聚合。通过融合各个无人机传感器获取的信息,构建无人机集群探测—跟踪—打击的杀伤网,延伸传统无人机的作战范围,实现跨域的打击能力。在信息聚合中,目标信息、战场信息、己方信息被有机地整合在一起,提高了整个集群的战场感知能力。具体来说,所有参加作战的无人机都是一个信息节点。只要在集群内,任意无人机都是其他无人机的传感器。对于敌方而言,无法用传统方法判断与识别攻击将从何处发起。特别是无源传感器的广泛使用,使敌方更难躲避我方的侦察攻击。同时,随着远程空空、空地武器的智能化,无人机集群的打击可以实现制导控制与打击的分离。这就体现了打击力量的分散部署、信息资源的融合统一。以对地打击为例,在进攻发起伊始,通过释放干扰无人机吸引敌方注意。然后,隐身性能强的无人机穿透敌方火力网,为防区外发射的武器提供制导。最后,对地攻击武器从防区外实施打击。这种方式提高了打击的突然性,压缩了敌方对打击的响应时间。

### 3.3.2 基于低成本的部署优势

无人机集群的构成平台都是低成本、低复杂度的无人机。相较于大型的复杂武器平台,无人机集群具有数量级上的规模优势。这种规模优势使得部署成本不再是无人机集群使用的限制。这意味着无人机平台能够活跃于战场的每一个维度。在战场上大有作为的无人机极大地扩展了己方的作战能力。以侦察任务为例,由于不受成本约束,无人机集群可以侵入到敌方火力网内进行抵近侦察。相比有人驾驶的侦察机,无人机集群覆盖了更广阔的探测区域,带来了更丰富的战场信息。

同时,通过异构平台的组合,无人机集群可以基于较简单的平台获得较复杂的任务能力。这意味着,低成本无人机的个体通过规模优势获取更广泛的部署场景。以侦察任务为例,为了获取更准确的战场信息,战略战役级别的侦察平台都会搭载复杂的侦察载荷,这使得其成本急剧增加。因此,只能在重要的几个方向部署这种侦察平台。但是无人机集群可以让无人机携带不同的单一侦察载荷,在更广阔的领域进行侦察任务,实现多个方向的部署。最后,通过通信网络进行多个方向上信息的共享和融合,从而在更多的作战方向上获得了不低于战略战役级别侦察平台的侦察能力。

### 3.3.3 基于自组织能力的自适应优势

一方面,受益于全域作战下的联合指挥控制系统,无人机集群将有更好的组织能力。另一方面,随着未来无人机智能水平的提高,将赋予无人机集群更强的作战体系弹性,也就拥有更好的跨域适应能力。

从外部影响来看:当作战域发生变化后,必然带来战场环境和任务目标的变化。面对这一问题时,传统作战系统需要漫长的调度流程。在调度过程中,作战体系要么丧失完成任务的能力,要么丧失自己的组织架构。然而,具有自组织能力的无人机集群可以在统一的数据链基础上通过自主决策对执行任务的无人机进行目标重分配。

从内部影响来看:缺乏自组织能力的作战系统很容易在内部作战单元受损的情况下陷入崩溃。但是,全域作战中无人机集群在面临内部无人机损失或故障的情况时,其他无人机可以及时补位,

从而维持作战体系的稳定性。这使得无人机集群能够在复杂作战域中执行复杂任务。

### 3.4 全域作战下无人机集群体系关键能力需求

无人机集群对于实现全域作战至关重要，其在组织重构、快速反应和高烈度冲突中都为己方部队提供了跨域战胜对手的能力。为了达到这一能力，无人机集群还需重点发展以下三个方面的关键能力。

#### 3.4.1 基于人工智能的任务规划能力

无人机集群要达到集群高效能的优势需要具有极强的任务规划能力。如果缺乏这一能力，无人机集群中无人机数量的大规模反而会带来极大的危害。在任务规划求解中，无人机的数量会带来“维数爆炸”的难题。现有方法难以解决这个问题，因此，需要借助人工智能技术来提高无人机集群的任务规划能力。通过对集群中无人机的训练，无人机集群可以更快速地响应战场要求，可以更准确地处理战场变化。另一方面，基于人工智能技术，无人机集群可以对敌方行为进行预测，以便进行超前决策。

#### 3.4.2 基于作战云的数据处理能力

全域作战依赖于海量的数据传输。只有快速准确地筛选出有用的数据，才能发挥全域作战信息的优势。然而，这意味着在全域作战背景下执行任务的无人机集群其数据交互量将呈现指数式增长。这对无人机集群的信息处理能力提出了较高的要求。借助作战云的构建，实现对数据进行高质量的存储和处理，进一步提高无人机集群对复杂作战环境的适应能力。

#### 3.4.3 基于联合网络协议的通信能力

全域作战中信息是第一要素。这需要构建支持全域作战的联合网络协议来保障无人机集群中的无人机能够互联互通，也将赋予无人机集群可靠的信息传输能力。同时，无人机集群需要加大高可靠性数据链的建设，保障未来作战环境中信息传输不被窃取、篡改。

这就要求所有的数据接收发送应用统一的联合网络协议。不同类型、不同任务、不同作战域中的无人机需要依赖统一的网络协议来实现信息共享，从而达到无人机集群的最优作战效能。

## 4 全域作战下无人机集群典型任务构想

### 4.1 无人机集群执行空中截击任务

空中截击任务是我方预警雷达或预警机发现了入侵的敌方目标后，指挥无人机集群前往敌机来袭的方向进行截击的任务。其作战目标主要是挂载了各类对地/对海弹药的轰炸机或战斗轰炸机。这些目标对我方地面/水面目标的威胁度极高，因此，需要截击机在尽可能远的地方将其驱离或击落。全域作战中无人机集群执行空中截击任务场景如图4所示。

在决策层面，无人预警机在指控中心的支援保障下，为无人机集群提供战术决策。在信息层面，通信中继无人机的集群中战斗无人机提供实时战场信息保障。网络战无人机侵入来袭敌机通信网络对其实施监视。在作战层面，无人机集群中携带中远程空空导弹的战斗无人机对来袭敌机展开猎杀。

### 4.2 无人机集群执行对海反舰任务

对海反舰是指无人机集群对敌海上舰艇执行的打击任务。对海作战是敌我双方争夺制海权的关键战斗，无人机集群要在作战过程中承担驱逐、击沉敌方水面舰艇的任务。其作战目标主要是敌方水面舰艇，这些目标具有较强的机动能力和完善的防空火力，因此，对海反舰任务具有极强的对抗性。无人机集群需要分成若干任务子群才能对敌方舰艇实施有效打击，具体任务场景如图5所示。

在决策层面，指控中心通过数据链为集群规划突防航路、制定打击次序，保障攻击在多领域同时开展。在信息层面，通信卫星为己方无人机集群的作战任务提供通信保障。侦察无人机子群凭借良好的隐身性能穿透敌防空网络抵近侦察，为整个集群提供信息。在作战层面，无人机攻击编队携带超声速、亚声速反舰导弹组成反舰打击子群，主要承担反舰攻击任务。无人战斗机编队携带中远距空空导弹组成制空作战子群，主要承担为反舰打击子群争夺制空权的任务。电子干扰无人机编队组成制电磁子群，主要承担欺骗、干扰、压制任务。

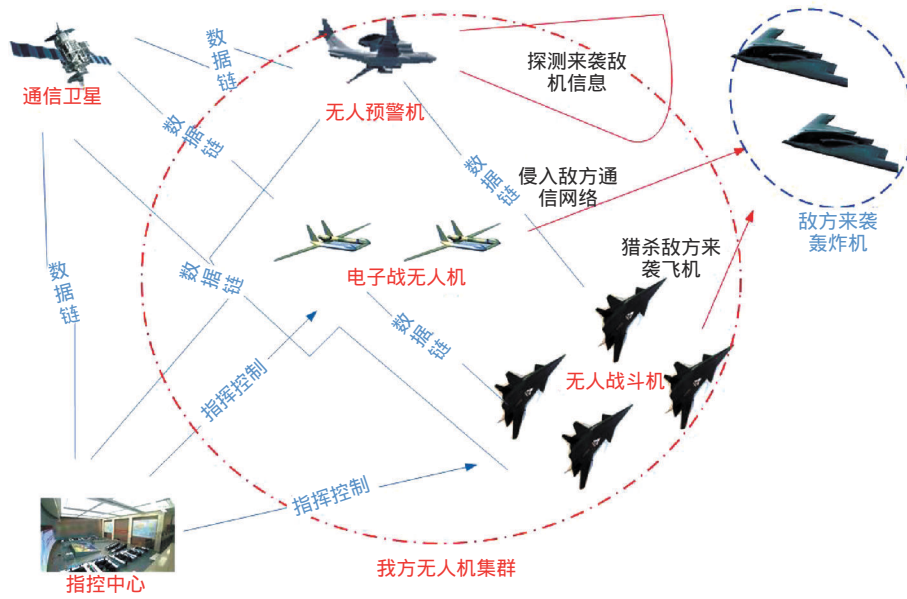


图4 无人机集群执行空中截击任务示意图

Fig. 4 Schematic diagram of UAV swarm executing air interception mission

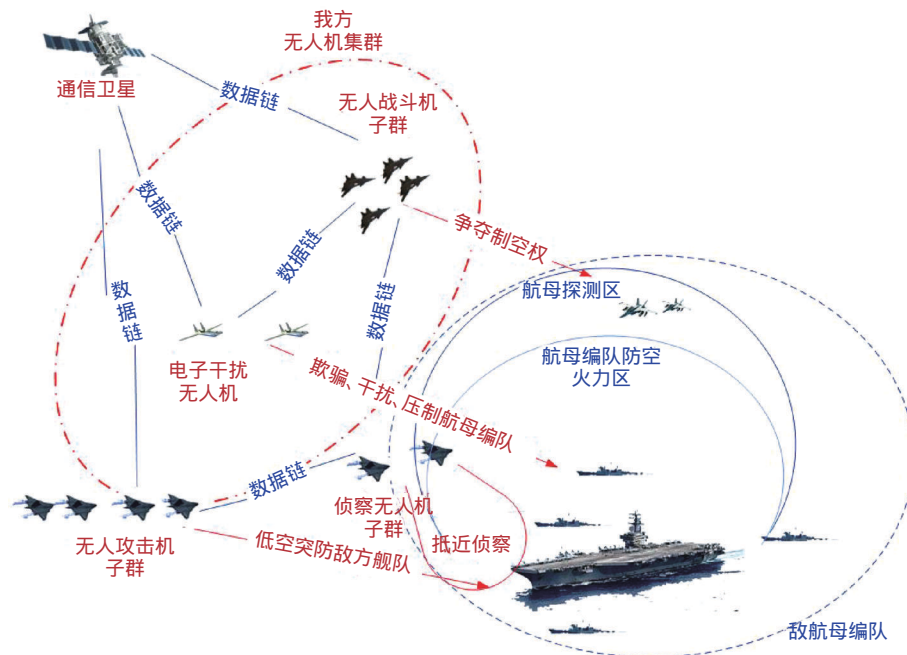


图5 无人机集群执行对海反舰任务示意图

Fig. 5 Schematic diagram of UAV swarm executing anti-ship mission

### 4.3 无人机集群执行对地攻击任务

对地攻击任务是我方突破敌防空火力后对敌方目标实施打击的任务。其作战目标主要是挂载了各类高价值的战术战役目标。这些目标受到敌方防空火力网的保护，因此需要开辟出空中作战

通道。全域作战中无人机集群执行空中截击任务场景如图6所示。

在信息层面，无人机集群中执行网络战任务的无人机需要在打击任务发起之前，侵入敌方防空指挥网络，窃取所有敌方火力点位置。在决策

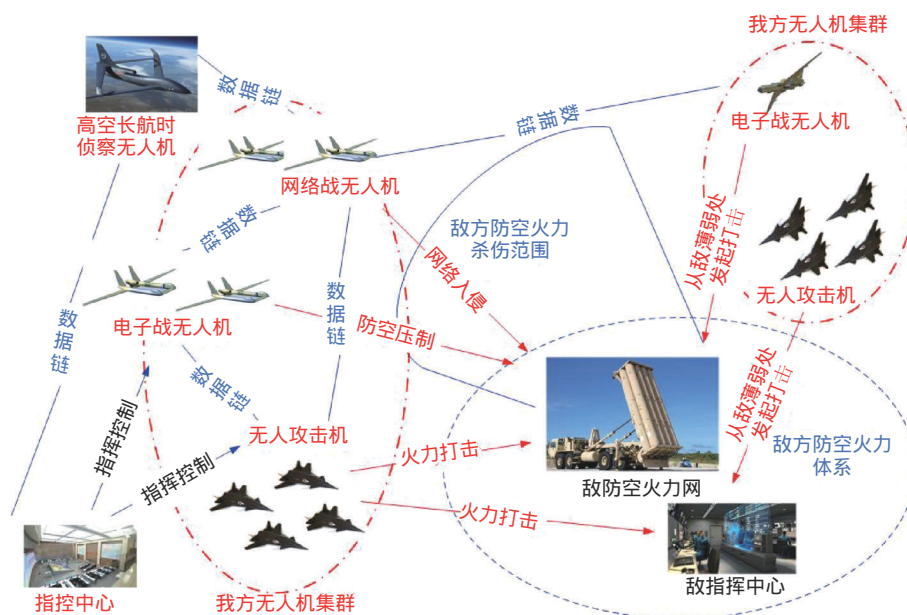


图6 无人机集群执行对地攻击任务示意图

Fig. 6 Schematic diagram of UAV swarm executing ground attack mission

层面，指控中心根据战场信息向无人攻击机下达作战命令，然后无人攻击机自主进行航路规划、打击次数等战场决策。在作战层面，无人电子战飞机执行防空压制，无人攻击机对敌火力点或诸如指挥中心的目標执行打击任务。

## 5 结束语

全域作战是未来各国军事斗争中的重要军事指导思想，需要改变军兵种的隶属关系、武器平台的使用方式、人与武器装备的关系。因此，本文针对无人机集群在全域作战思想下的体系构成和未来任务进行了分析。

本文对全域作战下的无人机集群体系进行了分析，并在此基础上研究了其特点和关键能力。最后，针对空中截击、对海反舰、对地攻击这三种无人机集群的典型任务场景进行了研究。这些工作为后续无人机集群的作战应用进行了有益的探索。

本文的工作仅限于定性研究，下一步需要通过作战仿真、兵棋推演等方式对无人机集群的具体运用进行验证，对不同任务场景下的兵力组成进行进一步研究。

## [参 考 文 献]

- [ 1 ] Jesse L S. Multi-domain operations at division and below [J]. Military Review, 2021, 101 (1): 68-75.
- [ 2 ] Hoehn J R. Joint all domain command and control (JADC2)[R]. Washington, D.C.: Congressional Research Service, 2020.
- [ 3 ] 李硕, 方芳, 李祯静, 等. 美军联合全域指挥控制发展浅析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16 (2): 197-202.
- [ 4 ] 潘清, 梁汝鹏, 张政伟, 等. 全域智慧行动: 作战概念与样式[J]. 指挥信息系统与技术, 2020, 11 (6): 15-19+58.
- [ 5 ] 陈彩辉, 练珊珊. 美军“联合全域作战 (JADO)”概念浅析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15 (10): 917-921.
- [ 6 ] Kearns D W. Air/sea battle about coordinated operations across domains, centralised decision making[J]. Orbis, 2014, 58 (1): 132-148.
- [ 7 ] 蔡顺才, 张绍芳, 杨磊. 从空海一体战更名看美军作战思想演变[J]. 飞航导弹, 2015 (4): 66-68.
- [ 8 ] Randy S T. Sustaining mission command capabilities for multi-domain battle [J]. Army Sustainment, 2018, 50 (1): 24-27.
- [ 9 ] 朱宁. 2025年~2030年美军在多域战框架下的空袭作战样式分析[J]. 军事文摘, 2020 (9): 62-66.

- [10] The U. S. Army in multi-domain operations 2028 [R/OL]. 2018-12-06 [2019-07-13]. <https://publicintelligence.net/usarmy-multidomain-ops-2028>.
- [11] 刘丽, 汪涛, 崔静. 近年美国陆军全域作战概念发展探究[J]. 航天电子对抗, 2019, 35 (6): 42-46.
- [12] 庞娟, 文苏丽. 美国陆军全域作战概念发展分析[J]. 飞航导弹, 2019 (12): 55-57+72.
- [13] 郭桂友, 庞娟, 文苏丽. 2017年美国陆军战略发展动向综述[J]. 飞航导弹, 2018 (12): 7-11.
- [14] 王长芝, 庞娟. 美国陆军加快推进多域战作战概念发展进程[J]. 飞航导弹, 2018 (3): 49-51+89.
- [15] Gady F S. Manoeuvre versus attrition in us military operations[J]. Survival, 2021, 63 (4): 131-148.
- [16] Deptula D A. A new battle command architecture for joint all-domain operations [J]. A Journal of Strategic Airpower & Spacepower, 2022, 1 (1): 51-56.
- [17] Voltz C, Reith M, Long D, et al. Improving Joint All Domain Operations (JADO) education [C]. ICCWS 2021 16th International Conference on Cyber Warfare and Security, Academic Conferences Limited, Islamabad, 2021: 401-408.
- [18] 刘科. 美军联合全域作战指控体系的理论思考 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16 (7): 722-727.
- [19] 高一丹, 辛昕. 美军联合全域指挥控制探析[J]. 飞航导弹, 2021, 441 (9): 84-89.
- [20] 行歌, 刘巍. 以无人作战为主要样式的联合全域作战 [J]. 军事文摘, 2021 (19): 32-36.
- [21] 杜燕波. 从“多域战”到“联合全域作战”究竟有何玄机[J]. 军事文摘, 2020 (11): 56-59.

(上接第 131 页)

- [16] Ling Yongsheng, Chai Chaojun, Zhao Dan, et al. On the source nuclide inversion approach to the unscented Kalman filter based on the BP neural network in nuclear accidents[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18 (5): 1931-1936.
- [17] Xu Daxing, Wang Hailun. State estimation algorithm based on high order cubature Kalman filter and neural network with unknown state model [J]. Computer Applications and Software, 2017, 34 (6): 257-261.
- [18] 王同, 苏林, 任群言, 等. 循环神经网络在浅海声速-声源联合反演中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42 (8): 1133-1139
- [19] 孔玉. 导弹制导系统中对天线罩误差的补偿方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 31-32.
- [20] 张立毅. 神经网络盲均衡理论、算法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.