

9-23-2022

Unmanned Air Vehicles Launching Aircraft Combat System and Key Technologies for Penetrating Counterair

Minghao Li

School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
liminghao@mail.nwpu.edu.cn

Wenhao Bi

School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

An Zhang

School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

Wenxuan Sun

School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Overview is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Unmanned Air Vehicles Launching Aircraft Combat System and Key Technologies for Penetrating Counterair

Abstract

Abstract: Penetrating counterair is an important countermeasure to the anti-access/area denial environment. Under this operational requirement, the unmanned air vehicles launching aircraft (UAVLA) has received much attention due to the advantages of load quantity and variety, operational range and duration, and development time and cost. Based on the review of the concept development and supporting research related to the UAVLA, the top-level concepts of operations such as the component systems, operational process, operational events tracking, and information interaction of the UAVLA combat system (UAVLACS) are designed. The key technologies of the system are prospected from four aspects: intelligent cognition of battlefield situation under complex environment, trusted and reliable long-range resilient communication, multi-UAVs bionic autonomous decision making and coordination, and universal UAVs launch control in the cargo bay, to promote the development of UAVLACS and technology reserve, and provide a theoretical basis and modeling framework for the simulation and evaluation of UAVLACS operation process and functions.

Keywords

penetrating counterair, unmanned air vehicles launching aircraft (UAVLA), combat system, anti-access/area denial, concept of operation

Recommended Citation

Minghao Li, Wenhao Bi, An Zhang, Wenxuan Sun. Unmanned Air Vehicles Launching Aircraft Combat System and Key Technologies for Penetrating Counterair[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(09): 1920-1932.

穿透性制空下无人飞行器发射母机作战体系及关键技术

李铭浩, 毕文豪, 张安*, 孙文轩

(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 穿透性制空是应对反介入/区域拒止环境的一种重要手段。在该作战需求下, 无人飞行器发射母机因载荷数量和种类优势、作战距离和时间优势、研制周期和成本优势受到广泛关注。在梳理无人飞行器发射母机相关概念发展和支撑研究的基础上, 设计了无人飞行器发射母机作战体系的组成系统、作战过程、作战事件追踪、信息交互等顶层作战概念。从复杂环境下战场态势智能认知、可信可靠远距离弹性通信、多无人飞行器仿生自主决策与协同、无人飞行器货仓内通用发射控制四个方面展望了体系关键技术, 以期推动无人飞行器发射母机作战体系开发研制与技术储备, 为体系流程和功能的仿真与评估提供理论基础和建模框架。

关键词: 穿透性制空; 无人飞行器发射母机; 作战体系; 反介入/区域拒止; 作战概念

中图分类号: TP302.1;TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2022) 09-1920-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0403

Unmanned Air Vehicles Launching Aircraft Combat System and Key Technologies for Penetrating Counterair

Li Minghao, Bi Wenhao, Zhang An*, Sun Wenxuan

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Penetrating counterair is an important countermeasure to the anti-access/area denial environment. Under this operational requirement, the unmanned air vehicles launching aircraft (UAVLA) has received much attention due to the advantages of load quantity and variety, operational range and duration, and development time and cost. Based on the review of the concept development and supporting research related to the UAVLA, the top-level concepts of operations such as the component systems, operational process, operational events tracking, and information interaction of the UAVLA combat system (UAVLACS) are designed. The key technologies of the system are prospected from four aspects: intelligent cognition of battlefield situation under complex environment, trusted and reliable long-range resilient communication, multi-UAVs bionic autonomous decision making and coordination, and universal UAVs launch control in the cargo bay, to promote the development of UAVLACS and technology reserve, and provide a theoretical basis and modeling framework for the simulation and evaluation of UAVLACS operation process and functions.

Keywords: penetrating counterair; unmanned air vehicles launching aircraft (UAVLA); combat system; anti-access/area denial; concept of operation

收稿日期: 2021-05-07 修回日期: 2021-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(62073267, 61903305); 航空科学基金(201905053001)

第一作者: 李铭浩(1997-), 男, 博士生, 研究方向为无人机集群编队控制、飞行器总体设计。E-mail: liminghao@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者: 张安(1962-), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为复杂系统建模、仿真与效能评估, 航空电子综合系统及仿真技术, 智能化指挥与控制工程, 先进控制理论及应用。E-mail: zhangnan@nwpu.edu.cn

引言

目前,一些地区军事强国在依靠自身地域优势的同时借助外部海空力量,形成海上拒止、空中拒止、信息拒止等反介入/区域拒止(anti-access/area denial, A2/AD)能力,促使未来战争形态从集中式、平台为主转为分布式、体系为主^[1-3],对火力载运与投放平台提出了全新需求。A2/AD 环境下,区域拒止兵力构成规模庞大^[4],为夺回制空优势需要大量精确打击武器^[5],复杂威胁和干扰手段要求火力载运与投放平台具备防区外作战能力^[6]。此外,体系对抗理念下有人机/无人机协同作战模式需要大型运输平台将无人机集群携带至空中拒止火力范围外发射,在有人机控制下拓展体系作战能力,切断拒止兵力体系信息互联^[7]。同时,A2/AD 环境使得装备代差不明显,需要通过分布式、模块化的武器装备组合提高体系对抗能力,并在研制中充分考虑开发周期和经济可承受性^[8]。

针对上述 A2/AD 环境下空战体系对抗需求,美国空军在《2030 年空中优势飞行规划》中提出“穿透性制空(penetrating counterair, PCA)”作为解决方案,将穿透性传感器作为网络节点,依靠作战编队内部协同应对通信拒止,并向防区外兵力提供目标指示,共同决策目标分配,通过火力后援打击时敏目标,寻求射程、载荷、生存力、杀伤力、经济可承受性和保障性之间的平衡^[9-10]。然而,以第五代战斗机为代表的强穿透平台,内埋弹仓空间有限^[11],所携带空空导弹数量难以满足制空需求;现有战斗机仅能投放微型无人机,在活动范围、作战效果上无法支撑 PCA 需求^[12];传统轰炸机、运输机等大型载运发射平台,不具备空空导弹发射能力,无法直接承担火力后援任务;下一代隐身战略轰炸机尽管同时具备网络协同、隐身突防等特点^[13],但其研制周期长、技术难点多、经济成本高,面对日益增长的空中威胁难于快速开发可部署原型、满足夺取未来空中优势的时间节点要求^[10]。

为配合现有第五代战斗机快速形成 PCA 作战能力,无人飞行器发射母机(unmanned air vehicles launching aircraft, UAVLA)受到军方及相关研究人员的广泛关注。2016 年 2 月,时任美国国防部长的阿什顿·卡特在一次讲话中介绍,将把美国一种最“古老”的飞机转化为搭载不同常规载荷的飞行发射平台,作为大型空中弹药库,与充当前沿探测和瞄准节点的第五代战斗机组网作战^[14]。作为一种由传统载运发射平台改造而来,能够发射大量空空导弹、小型无人机等无人飞行器,并与其他作战单元组网作战的空中载运发射平台,UAVLA 是 PCA 场景下理想的火力支援单元,一些资料也称其为“武库机”“空中航母”。UAVLA 作为火力系统核心组成部分,与不同类型无人飞行器、侦察探测系统和信息支援系统等,在第五代战斗机指挥控制下形成无人飞行器发射母机作战体系(UAVLA combat system, UAVLACS),通过平台间分布式协同作战产生 PCA 能力。

相较于传统载运发射平台担当火力核心的体系对抗模式,UAVLACS 具有诸多优势:在载荷数量上,充分利用 UAVLA 内部空间,配套搭载大量小型中远程精确打击武器^[5],弥补第五代战斗机载弹量少的不足;在载荷种类上,UAVLA 能够投放航程较远、任务能力多样的小型无人机集群^[12],异构无人机在有人机指挥控制下,协同完成对目标的侦察监视、压制干扰乃至火力打击任务^[6];在作战距离上,发挥第五代战斗机的“穿透”能力,将其作为体系“触角”深入战场前沿,确保战场信息持续穿透 A2/AD 环境^[15],UAVLA 则在拒止火力范围外提供空中支援,避免体系作战单元集中暴露于高度威胁区域,同时,UAVLA 利用货仓载运、发射无人飞行器,能够有效减少装备外挂导致的空气阻力^[16],从而提高燃油效率,增加航程和滞空时间;在研制周期和成本上,UAVLACS 整合现有系统,利用技术成熟、改造经验丰富的轰炸机、运输机等老旧装备,减少全新研制^[17],体系中各类关键技术可化整为零,循序渐进地完成研发、应用和集成,

分散开发风险和成本,符合实现穿透性制空的敏捷采办需求^[8]。

在 PCA 概念下, UAVLACS 是穿透 A2/AD 环境、破击制空体系的重要手段。从公开资料来看, 尽管相关支撑技术已具备部分基础, 但 UAVLA 及 UAVLACS 尚处于概念探索阶段, 距离形成 PCA 能力还存在一定差距。本文在梳理 UAVLA 概念发展历程与相关支撑研究的基础上, 在 PCA 场景下设计 UAVLACS 作战概念、系统组成和作战过程, 展望体系未来发展中的关键技术, 探索下一代制空体系构成, 牵引 UAVLACS 能力需求分析、总体设计、体系集成等系统工程活动, 提供装备贡献度评估、任务规划、集群协同控制等体系指挥控制过程的仿真理论基础和流程建模框架, 为 UAVLA 及其他作战系统装备研制、技术攻关提供支撑, 提升未来应对 A2/AD 环境的分布式作战能力。

1 无人飞行器发射母机概念发展与支撑研究

1.1 无人飞行器发射母机概念发展

作为 PCA 概念的提出者, 美军在应对 A2/AD 环境上需求迫切, 针对 UAVLA 相关概念研究与技术验证开展了大量工作。2011 年, 美国兰德公司就曾在一份报告中建议国防部改进 B-1 轰炸机以携带 20 枚大型空空导弹^[18]。2015 年, 美国战略与预算评估中心在报告中建议, 下一代战斗机应具有与轰炸机相近的尺寸, 并能在携带 24 枚超远程空空导弹的同时控制载有导弹的无人机^[19]。同年, 美国国防部高级研究计划局公布了“体系综合技术和试验(system of systems integration technology and experimentation, SoSITE)”项目, 由战斗机担任指挥控制平台, 后方跟随一架 C-130 运输机改装而来的任务运载平台, 运载平台发射无人机进行侦察、监视和干扰, 战斗机根据无人机传来的情报, 命令运载平台发射导弹打击目标^[20]。2016 年 5 月, 美空军公布了《2030 年空中优势飞行规划》, 除了提

出 PCA 概念, 还在“瞄准与交战”一节中明确要求将防区外武器平台作为遏制 A2/AD 战略的平衡手段, 并将与国防部战略能力办公室(strategic capabilities office, SCO)就开发远程任务效果链的概念进行合作^[9]。在具体平台选型上, 美军内部还存在多种声音。2018 年, 美军提出改装 B-52 轰炸机, 使其有能力携带大量空空导弹与小型无人机。2020 年 1 月, 美空军研究实验室在 MC-130J 货机上完成了首次 UAVLA 概念演示实验^[21]。2020 年 1 月和 2 月期间, 美空军就 UAVLA 概念进行了另外 5 次实验, 其中一次使用的是 C-17A 运输机^[22]。2020 年 6 月, 美空军联合 SCO 面向工业界和学术界发布了信息征询, 寻求“从非传统运载平台大量发射防区内和防区外武器”, 并将综合载弹量、发射距离、成本等因素, 研判各个候选方案的技术成熟度和可行性, 针对特别感兴趣的平台快速进行试验和原型化^[23]。

1.2 无人飞行器发射母机作战体系支撑研究

UAVLACS 并不是不同能力平台的简单编队, 而是 UAVLA、武器、第五代战斗机、侦察探测装备、信息支援装备等通过网络协同、共同决策耦合成的有机整体, 在各系统火力支持、指挥控制、隐蔽突防、侦察探测、信息支援等能力基础上, 涌现产生 PCA 这一体系能力。相应地, UAVLACS 更依赖分布式系统的整合互联和平台演进, 包括战场态势感知与共享、有人机/多无人飞行器协同作战、无人飞行器发射控制等支撑研究。

1.2.1 战场态势感知与共享

(1) 战场信息融合

在 UAVLACS 这一分布式系统中, 体系探测能力集中于第五代战斗机、侦察无人机集群等前沿作战单元, UAVLA 则依赖上述穿透性“瞄准”节点提供的前方战场融合信息完成火力支援。美国国防部实验室联合理事会(joint directors of laboratories, JDL)所提出的信息融合模型将信息融合划分为 5 个部分, 分别为数据预处理、目标区分、状态估计、

态势评估和过程优化^[24]。在作战体系这一层次, 研究者们更关注后 4 个部分。在特征级别上, 针对目标区分中的多源信息下航迹关联, 孙璐等^[25]在时间和空间约束下提出一种适用于多源异步航迹的相似性度量模型, Yang 等^[26]考虑未知测量噪声设计了 D-S 航迹融合算法; 而针对多传感器目标识别, Aldhubaib^[27]基于不同目标高频段下形状特征提出了一种通用识别方法, Li 等^[28]将改进 D-S 证据理论应用于红外/毫米波结合的目标识别问题; 在状态估计方面, 李洪瑞^[29]采取优化神经网络算法以估计目标位置和速度, Huang 等^[30]利用改进的目的点约束卡尔曼滤波器解决反辐射导弹目标轨迹估计问题。而在决策级别上, 目前空战态势评估侧重于对目标的威胁评估, 王昱等^[31]在不确定态势信息下基于证据网络构建了威胁评估模型; 在过程优化上, Yan 等^[32]结合克拉美-罗下界与二分粒子群算法以优化多目标跟踪精度和探测概率, 李宝鹏等^[33]提出一种舰载机多雷达任务分配和采样间隔调度算法。但是, 现有的信息融合研究主要针对已知战场态势, 对动态未知环境下的态势预测还处于探索之中。

(2) 数据链

UAVLACS 作战过程中, 数据链是各个作战单元收发信息、遂行作战任务的基础。第五代战斗机需要通过机载数据链传输战场态势、制导指令等, 以实现“瞄准”信息穿透拒止环境。为保证隐身性能, 第五代战斗机通常使用专门设计的低截获概率数据链, 如 F-22 战斗机使用的“飞行平台间数据链(intra-flight data link, IFDL)”^[34]。但 IFDL 仅适用于 F-22 编队内部通信, 无法与外部指挥控制系统交换信息^[35], 大大限制了体系作战能力。从美军实践来看, 目前主要通过在同一平台集成多个数据链系统、不同数据链之间搭建网关或中继等手段来实现第五代战斗机与其他作战平台的信息互通。例如, 在 F-22 上应用“战术目标瞄准网络技术(tactical targeting network technologies, TTNT)”从而与其他空中平台交换共享指控、图像、自由电文等信息^[36];

在 F-15C 战斗机上配备装有网络通信网关的“Talon HATE”吊舱, 实现与 F-22 战斗机的数据共享^[37]。

由于不同无人飞行器在作战模式和自主能力上存在差异, 其数据链运用方式也不尽相同。对空空导弹而言, 弹载数据链提供了中制导过程中目标方位、速度等信息的传输链路, 针对复杂电磁环境, 吕卫华等^[38]评估了常见干扰对空空导弹数据链接收信号的影响, 邵莛等^[39]提出了武器制导数据链典型干扰场景的建模方法。对无人机集群而言, 数据链则是集群协同、网络化作战的内部基础, 对集群数据链研究集中于组网架构设计, 如刘宏波等^[40]设计了蜂群无人机的数据链自组网协议。

1.2.2 有人机/多无人飞行器协同作战

(1) 导弹协同火力控制

导弹协同火力控制是 UAVLACS 打击目标的重要前提, 包括协同目标瞄准和协同导弹发射与制导 2 个阶段^[41]。

在协同目标瞄准阶段, 第五代战斗机提供目标运动信息, UAVLA 进行任务规划、火力控制解算并完成发射点占位。傅莉等^[42]基于遗传算法实现了多机空战的目标与火力资源分配; Zhao 等^[43]利用混合遗传算法解决了不确定环境下多目标多武器分配问题; 刁兴华等^[44]定义了协同发射区并分析了多种约束条件对其影响; Shi 等^[45]建模分析了双机三维协同攻击区。尽管上述理论分析及实验验证为协同目标瞄准阶段中目标分配、攻击区解算提供了良好研究基础, 但相关研究主要考虑的是战场位置较近的多战斗机同构编队, PCA 下大空间尺度、平台异构的影响仍有待发掘。

在协同导弹发射与制导阶段, UAVLA 负责导弹发射, 第五代战斗机为导弹提供无线电指令以修正中制导。李波等^[46]提出了接力制导的遗传粒子群混合优化方法; Wang 等^[47]将随机行走策略引入到分布式高斯估计算法中, 并将其应用于导弹制导交接问题的求解。目前研究主要针对中制导权交接决策及移交过程, 对该过程中干扰或信息缺失的情况

考虑较少。

(2) 有人机/多无人机协同控制

无人机集群技术大大拓展了 UAVLACS 侦察探测、全域攻击、信息支援等能力,如何利用多无人机联合有人机作战一直是热点问题。美国军方研究机构领导、资助了一系列有人机/无人机协同技术验证项目,如“拒止环境中协同作战(collaborative operations in denied environments, CODE)”项目、“分布式作战管理(distributed battle management, DBM)”项目等。我国也组织了“无人争锋”挑战赛,考察无人机群拒止环境下编队飞行、自主协同空战等能力^[48]。在理论方面,研究者们也取得了一系列丰硕成果,Liu等^[49]设计了固定翼无人机集群协同架构,Jasim等^[50]基于领航-跟随结构设计了无人机编队飞行的迭代线性二次调节控制器,Kurdi等^[51]仿照细菌觅食行为设计了无人机集群自适应任务分配算法,但现有研究大多简化了作战场景,如何在 A2/AD 环境下保持集群自主完成任务能力是未来需要重点考虑的问题。

1.2.3 无人飞行器发射控制

(1) 无人飞行器发射技术验证

货仓内装载多种无人飞行器并完成发射控制是 UAVLA 区别于轰炸机、运输机等的关键特征。在首次货仓内武器投放演示实验中,美空军共测试投放了5种战斗消耗性平台及在其上放置的6种弹药模型^[21]。2020年9月,美空军研究实验室在 C-17 运输机上空投了类似的托盘式弹药^[52]。但上述空投的无人飞行器模型模拟的是发射阶段比较简单的空面导弹,暂未涉及空空导弹的发射过程模拟。在小型无人机方面,美国“小精灵(gremlins)”项目使用 C-130 运输机作为无人机集群发射平台^[53],已经完成了 X-61A 无人飞行器的投放测试。国内一公司通过无人母机主体腔内搭载任务子机的方式,验证了蜂群无人机的投放^[54]。

(2) 无人飞行器发射分离安全性

母机在空中发射无人飞行器时,分离过程中存

在的气动力干扰、飞行器启控过程出现的异常等可能会导致相互碰撞,进而影响飞行安全^[55]。目前发射分离安全性研究、气流场研究等主要面向战斗机外挂武器和内埋武器,Kozak等^[56]对外挂武器的弹射发射过程进行了建模计算,Hetreed等^[57]对 F-35 战斗机武器分离过程进行了建模、仿真和测试验证,艾邦成等^[58]总结了内埋武器分离相容性的研究进展。对于大型飞机的载荷分离安全则关注其货物空投过程,张喆等^[59]建立了重装货物空投的动力学模型并分析了空投任务影响因素,Ning等^[60]建立了运输机空投过程的高保真度模型,Ghoreyshi等^[61]通过数值仿真分析了 C-130 运输机尾舱门开启后的气流场特性,高静等^[62]仿真了尾流场对空投货物轨迹的影响。但上述研究主要针对战斗机挂载武器或运输机搭载货物,对无人飞行器发射分离过程的理论研究相对较少。

2 无人飞行器发射母机作战体系作战概念设计

UAVLACS 主要面向局部军事冲突中多方海空兵力构成的 A2/AD 环境,在 PCA 场景下对抗执行空中拒止任务的多批次、多编队空中目标,夺取制空优势,掩护后续联合立体作战。

2.1 体系组成系统及组织关系

UAVLACS 由指挥控制系统、侦察探测系统、火力系统和信息支援系统组成。其中,指挥控制系统包括地面指控中心和空中指控中心;侦察探测系统包括五代机机载传感器系统、侦察无人机集群等;火力系统包括 UAVLA、远程空空导弹、攻击无人机集群等;信息支援系统包括导航卫星、电子战无人机集群、通信中继无人机集群等。为直观描述 PCA 场景下 UAVLACS 作战过程,明确作战环境,形式化表征各方兵力构成,突出组成系统互联关系,给出 PCA 下 UAVLACS 作战顶层示意图,如图 1 所示。

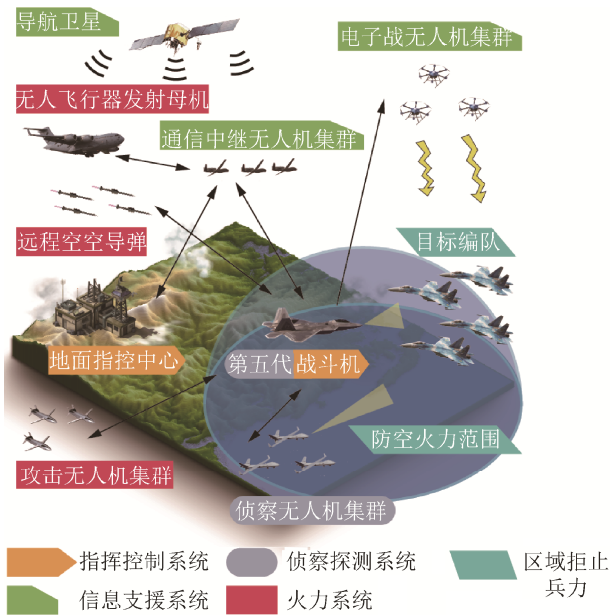


图 1 PCA 下 UAVLACS 作战顶层示意图
Fig. 1 Top-level schematic diagram of UAVLACS operation under PCA

UAVLACS 中, 各组成系统主要通过数据链进行通信。从整体来看, 系统间组织关系包括指挥控

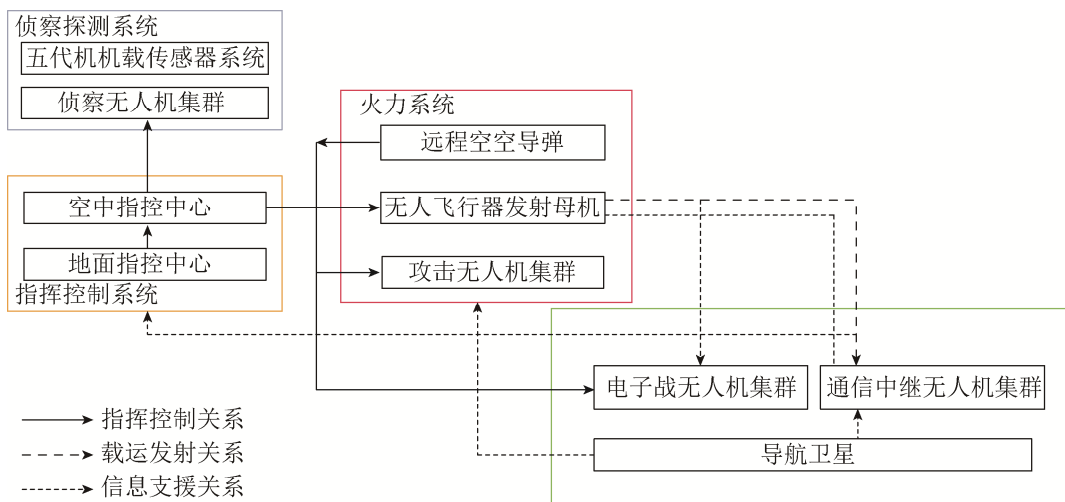


图 2 UAVLACS 组成系统组织关系图
Fig. 2 Diagram of component systems relationship of UAVLACS

2.2 基于 OODA 作战环的 UAVLACS 作战过程描述

一般空战过程可以通过“观察-分析-决策-行动(observe-orient-decide-act, OODA)”作战环来描述。基于 OODA 作战环理论, PCA 场景下 UAVLACS 作战过程可以分解为目标探测、战场态

制、载运发射、信息支援等, 如图 2 所示。

在 PCA 作战场景下, 火力系统是实现制空火力优势的关键, 而 UAVLA 作为火力系统主要组成部分, 承担任务规划、火控解算、发射点占位、远程空空导弹及小型无人机集群发射等火力后援任务, 是 UAVLACS 核心中的核心。指挥控制系统则是 UAVLACS 的“大脑”, 第五代战斗机作为空中指控中心, 从地面指控中心受领作战使命, 承担战术决策、信息融合及空中指挥控制任务, 作为 UAVLACS 信息枢纽, 调度、控制其他作战单元, 为 UAVLA 和无人飞行器指示前沿目标。侦察探测系统作为 UAVLACS 的“感官”, 依靠强穿透能力深入 A2/AD 环境, 识别、探测、定位各目标, 评估武器打击后目标毁伤效果, 为空中指控中心进行战场态势融合、判断是否达成作战目标提供情报基础。信息支援系统为 UAVLA 以及其余作战单元提供卫星导航、A2/AD 环境下通信中继、电子对抗等服务, 是 UAVLACS 的支持“脉络”。

势融合、任务规划及火控解算、无人飞行器发射、无人飞行器制导和战效评估共 6 个作战行动。为梳理各作战行动及其输入输出之间的关系, 采用层次结构对无人 UAVLACS 作战过程进行分解, 得到作战行动分解树如图 3 所示。

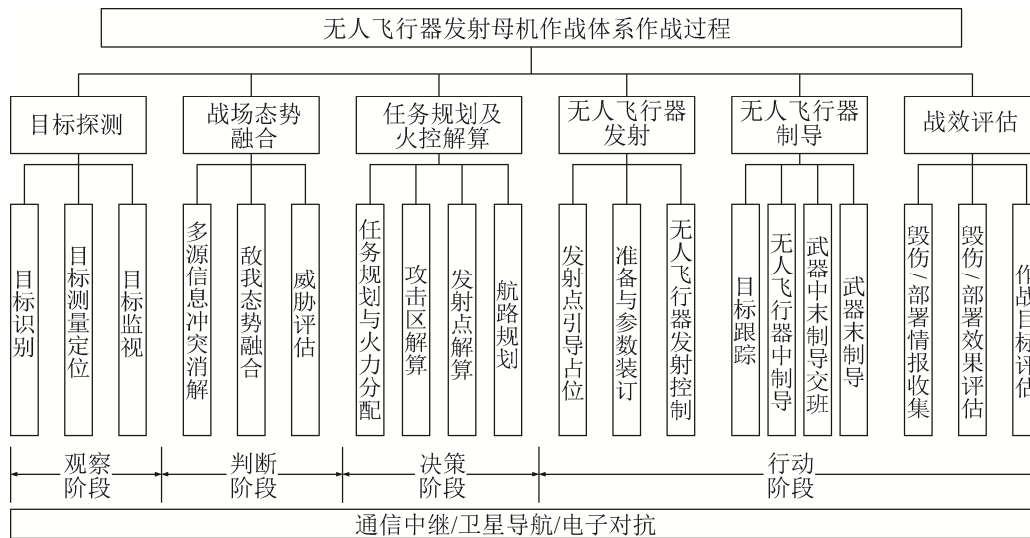


图3 UAVLACS 作战行动分解树

Fig. 3 Combat operation decomposition tree of UAVLACS

(1) 观察阶段：侦察探测系统中各个侦察探测单元进入 A2/AD 环境，利用雷达、光电、敌我识别器等传感器探测目标特征信号，完成目标识别，测量各个目标距离、方位、速度等状态信息，并保持对目标的监视，将探测到的目标信息发送给空中指控中心。

(2) 判断阶段：空中指控中心综合多个侦察探测单元汇报的目标信息，消解多情报来源下可能出现的冲突，同时融合己方各作战单元位置、状态等信息，评估各个目标的威胁程度并排序，形成统一战场态势，结合地面指控中心制定的作战使命，确定当前需要的支援类别。之后将统一战场态势发送给 UAVLA，请求火力支援。

(3) 决策阶段：UAVLA 根据统一战场态势中各单位状态信息和目标威胁排序，结合支援需求，为各目标规划武器资源，或为不同类型无人机集群规划任务序列。完成任务规划和火力分配后，解算不同目标的攻击区和无人飞行器发射点，规划 UAVLA 完成发射点占位的飞行航路。同时，根据无人飞行器发射点和目标信息，预先规划无人飞行器从发射点到作战区域的飞行航路。

(4) 行动阶段：UAVLA 按照规划的飞行航路，引导占位无人飞行器发射点。期间完成发射前准备

与参数装订。满足发射条件后，进行无人飞行器发射控制，依次发射所规划无人飞行器。第五代战斗机火控系统在无人飞行器离机后提供协同中制导或修正指令，直至导弹、攻击无人机集群等武器到达预计截获区域，或其他无人飞行器到达任务区域。常规武器如远程空空导弹引爆后，由侦察探测系统收集图像、红外等毁伤情报，并评估毁伤效果，空中指控中心根据毁伤效果评估作战目标是否达成；无人机集群到达预定区域后，执行各自攻击、通信中继、电子战等计划作战任务，空中指控中心根据不同任务下集群部署效果评估作战目标是否达成。若预期作战目标未达成，则进入重新开展火力支援的作战环。信息支援系统提供上述作战过程中通信中继、卫星导航、电子对抗等信息支援服务。

2.3 作战事件追踪与信息交互

为充分描述 UAVLACS 各组成系统任务特点和行为时序，按照上述作战行动，考虑目标、侦察探测系统、空中指控中心、无人飞行器发射母机、远程空空导弹、小型无人机集群等主要节点，依时间顺序在不同组成系统及作战单元之间追踪作战事件，梳理各节点对外部事件的响应，建立

UAVLACS 主要组成系统之间的动态逻辑和行为交互关系, 如图 4 所示。

在上述作战过程中, UAVLACS 主要组成系统之间的资源流动主要表现为信息的流动, 如图 5 所

示。图 5 中, 各节点之间的连线既表示信息交互需求, 也表明信息资源流向, 展示了 UAVLACS 主要组成系统间信息流逻辑。

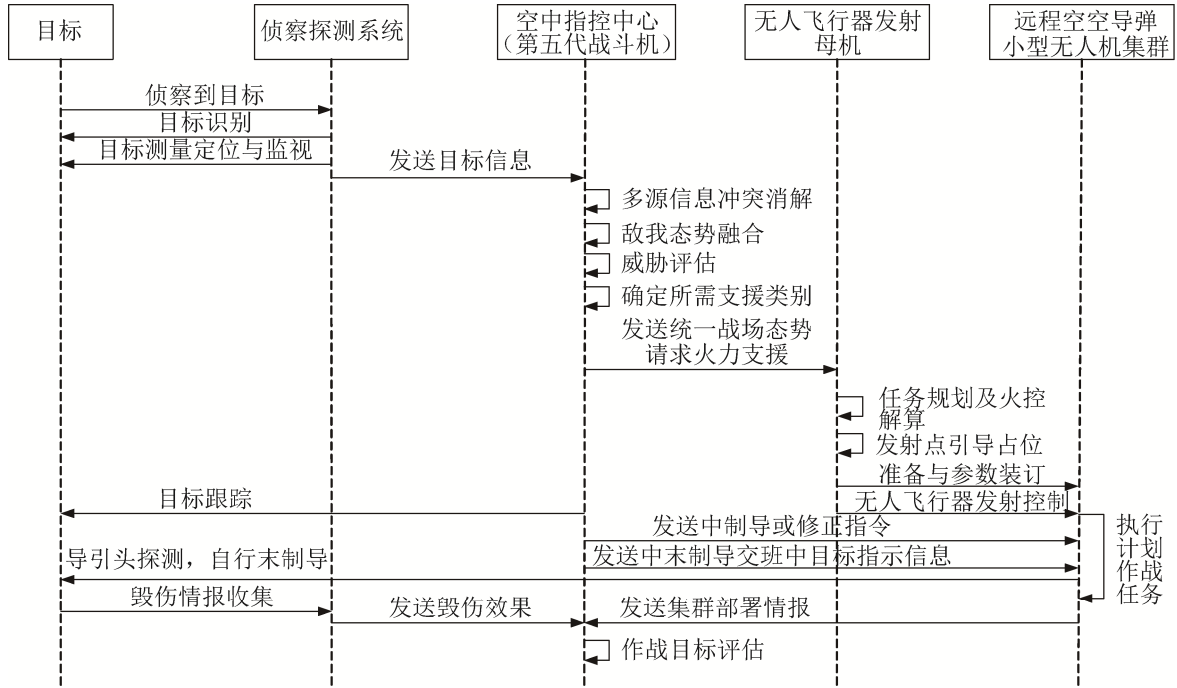


图 4 UAVLACS 作战事件追踪
Fig. 4 Operational events tracking of UAVLACS

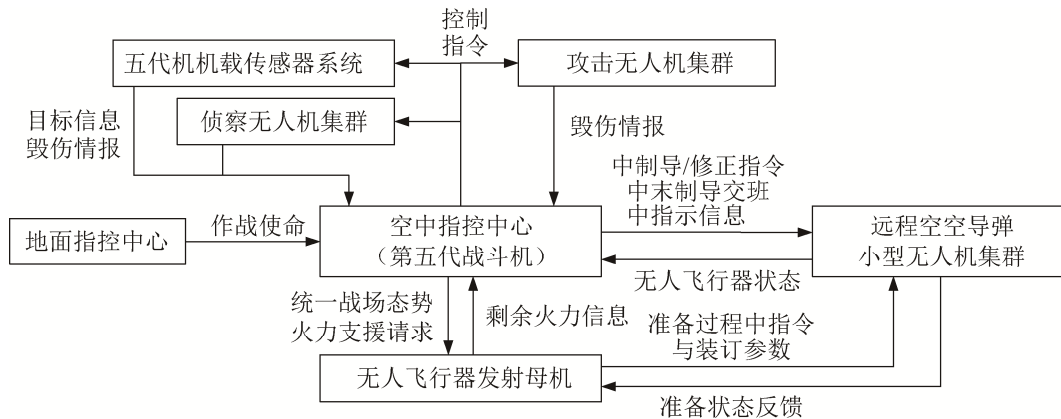


图 5 UAVLACS 组成系统间信息流
Fig. 5 Information flow between the component systems of UAVLACS

3 无人飞行器发射母机作战体系关键技术

3.1 复杂环境下战场态势智能认知

战场态势认知是在多传感器信息融合的基础

上, 对战场中兵力部署进行的理解、分析和预测。在 UAVLACS 面临的 A2/AD 作战环境中, 威胁信息来源多, 体系演进变化快, 远程侦察探测装备应用受到极大限制。为在动态多变的对抗环境下提供后续作战决策的情报支撑, 缩短 OODA 作战环运

行时间, 实现先敌占位、先敌打击和先敌脱离, 需要实现智能化的战场态势认知。为此, 需提取目标多维度立体特征, 并考虑指战员兴趣偏好、历史经验、训练表现等主观因素估计当前战场态势, 形成结构化、知识化的统一态势表示, 在感知域上消解不同来源态势元素冲突。之后在认知域上借助深度学习等智能算法, 基于真实战例、仿真推演等建立的样本库, 识别空中时敏目标行为模式, 挖掘作战意图, 在时空尺度上预测态势变化, 完成战场态势认知从机械式综合到智能化预测的跨越。

3.2 可信可靠远距离弹性通信

在 UAVLACS 内, 可信可靠远距离弹性通信的本质是建立有人与无人飞行器通用、安全可靠、抗干扰能力强的数据链网络, 从而在体系内实现信息互联互通, 建立态势共享、制导指令传输、无人飞行器状态反馈的通信桥梁。为突破该关键技术, 首先应统一网络顶层设计与接口标准, 融合异构数据链, 兼容不同体制载波。其次综合运用波束控制、功率控制、扩频跳频、时隙调配等加密手段, 结合图像、视频信息高效压缩编码, 实现 A2/AD 环境下高密度信息隐蔽穿透。同时, 基于战场通信大数据资源和智能决策技术, 动态估计干扰特征, 调整数据链工作参数, 自主配置和重构传输链路, 增强网络弹性。此外, 还需在无人飞行器间实现数据链高动态灵活组网, 强化目标协同指示及末端突防能力。

3.3 多无人飞行器仿生自主决策与协同

不同于传统载运发射平台, UAVLA 携带的飞行器载荷种类繁多, 运用场景也不尽相同。多无人飞行器离机后, 需要通过仿生自主决策与协同形成群集智能涌现, 提升任务完成能力, 减轻有人机飞行员负担。为此, 需要构建敏捷、开放的仿生控制机制, 面向任务环境映射自然集群交互模态, 根据需求自发调控编队行为, 强化故障容错。同时, 在任务设备控制与飞行控制一体化前提下, 分布式地

完成作战使命有机分解、作战任务有序分配, 动态规划多无人飞行器任务轨迹, 并引入智能博弈策略提升无人飞行器截击、对抗、追逃等群集对抗能力。

3.4 无人飞行器货仓内通用发射控制

无人飞行器货仓内通用发射控制技术旨在解决 UAVLA 如何载运和投放无人飞行器的问题, 是 UAVLA 实现无人飞行器多类型、多数量、通用化发射控制的必要途径。从发射分离过程整体来看, 需要综合数值仿真模拟、缩比模型试验等手段, 研究母机不同运动状态下无人飞行器分离相容性, 预测评估正常发射、应急投放过程中的安全风险。具体到各分系统工程实际, 在发射装置设计中需要采用标准化的发射模块、通用化的电气及机械接口, 从而对外适配不同空间尺寸货仓、对内适配不同型号种类飞行器, 同时从动力学角度优化结构设计, 应用新型材料, 确保发射装置能承受载运、分离过程中的振动、冲击和烧蚀; 发射控制系统需采用柔性软件架构, 兼容不同无人飞行器发射方式和发射程序, 同时满足多批次大量发射时故障快速处置需求; 导弹、无人机等飞行器也需要采用小型化设计, 满足高密度内装要求。

4 结论

一些地区军事强国所具备的 A2/AD 能力对制空作战中武器数量、武器种类、作战范围、装备研制等提出了全新需求。UAVLACS 整合现有装备系统, 提供了一种 PCA 应对手段, 在载荷数量、载荷类型、作战距离、作战时间、研制周期和开发成本上具有明显优势。一些研究机构已经开展了一系列工程项目, 实践了 UAVLA 概念, 相关支撑研究也为 UAVLACS 整合开发打下了良好基础。本文从体系视角下顶层作战概念切入, 设计了 UAVLACS 系统组成及组织关系, 直观描述了作战过程及其中的作战事件追踪、信息资源交互等, 为后续体系流程设计和功能开发提供仿真实论基础和评估建模框架。展望未来, 需要攻克复杂环境下战场态势智

能认知、可信可靠远距离弹性通信、多无人飞行器仿生自主决策与协同、无人飞行器货仓内通用发射控制等关键技术, 解决 UAVLACS 开发面临的主要挑战, 提升 A2/AD 环境下网络化、体系化作战能力。

参考文献:

- [1] 陈军, 王兴, 李德超. 从美国智库战略与预算评估中心报告看美国 A2/AD 作战变化及应对措施[J]. 飞航导弹, 2020(5): 10-13.
Chen Jun, Wang Xing, Li Dechao. U.S. A2/AD Operation Changes and Counter Measures from CSBA Reports, a U.S. Think Tank[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(5): 10-13.
- [2] 宋琛, 张蓬蓬. 分布式协同对未来制空作战的影响[J]. 飞航导弹, 2019(11): 8-11.
Song Chen, Zhang Pengpeng. The Impact of Distributed Coordination on the Future of Aerospace Control Operations[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(11): 8-11.
- [3] 刘敏华, 俞启东, 陈升泽, 等. 关于未来导弹战形态及创新设计的研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2018, 4(1): 1-6.
Liu Minhua, Yu Qidong, Chen Shengze, et al. Study on Future War Morphology and Warfare Innovative Design[J]. Missiles and Space Vehicles, 2018, 4(1): 1-6.
- [4] 阳东升, 姜军, 王飞跃. 从平台到体系: 指挥对抗活动机理的演变及其 PREA 环对策[J]. 指挥与控制学报, 2018, 4(4): 263-271.
Yang Dongsheng, Jiang Jun, Wang Feiyue. From Platforms to Systems of Systems: on Mechanism Evolution of Command Confrontation and its PREA Loop[J]. Journal of Command and Control, 2018, 4(4): 263-271.
- [5] 宋怡然, 林旭斌, 武坤琳, 等. 大国竞争战略下美国精确打击武器发展分析[J]. 战术导弹技术, 2020(2): 105-109.
Song Yiran, Lin Xubin, Wu Kunlin, et al. Analysis of the Development of American Precision Strike Weapons under the Strategy of Great Power Competition[J]. Tactical Missile Technology, 2020(2): 105-109.
- [6] 刘莉, 董欣心, 葛佳昊, 等. 拒止环境下无人系统作战模式及关键技术[J]. 战术导弹技术, 2020(4): 167-174.
Liu Li, Dong Xinxin, Ge Jiahao, et al. Operation Mode and Key Technologies of Unmanned System in Denied Environment[J]. Tactical Missile Technology, 2020(4): 167-174.
- [7] 申超, 李磊, 吴洋, 等. 美国空中有人/无人自主协同作战能力发展研究[J]. 战术导弹技术, 2018(1): 16-21.
Shen Chao, Li Lei, Wu Yang, et al. Research on the Capability of the U.S. Manned /Unmanned Autonomous Collaborative Operations[J]. Tactical Missile Technology, 2018(1): 16-21.
- [8] 段鹏飞, 樊会涛. 从穿透性制空(PCA)看美军《2030 年空中优势飞行规划》[J]. 航空兵器, 2017(3): 20-25.
Duan Pengfei, Fan Huitao. Discussion on US Forces Air Superiority 2030 Flight Plan from Penetrating Counterair (PCA)[J]. Aero Weaponry, 2017(3): 20-25.
- [9] Air Superiority (AS 2030) Enterprise Capability Collaboration Team (ECCT). Air Superiority 2030 Flight Plan[R/OL]. USA, 2016. <http://www.af.mil/Portals/1/documents/airpower/Air%20Superiority%202030%20Flight%20Plan.pdf>.
- [10] 杨伟. 关于未来战斗机发展的若干讨论[J]. 航空学报, 2020, 41(6): 524377.
Yang Wei. Development of Future Fighters[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(6): 524377.
- [11] 李波, 崔四杰, 高晓光. 空地一体化多任务导弹攻击模式研究[J]. 电光与控制, 2014, 21(12): 5-9.
Li Bo, Cui Sijie, Gao Xiaoguang. Research on Attack Mode of Air-ground Integrated Multi-tasking Missile[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(12): 5-9.
- [12] 杨小川, 毛仲君, 汪华松, 等. 下一代大型军用运输类飞机气动布局及作战应用趋势分析[J]. 航空工程进展, 2019, 10(4): 436-444.
Yang Xiaochuan, Mao Zhongjun, Wang Huasong, et al. Analysis of Aerodynamic Layout and Operation Application Trends of Next Generation Large Transportation Aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(4): 436-444.
- [13] 许云峰, 郭圣洪. 美俄下一代战略轰炸机技术方案分析[J]. 航空科学技术, 2015, 26(4): 1-6.
Xu Yunfeng, Guo Shenghong. The Technical Conceptions of Next Generation Strategic Bombers of United States and Russia[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(4): 1-6.
- [14] Gady Franz-Stefan. Pentagon Wants 'Arsenal Planes' to Beat China's Air Defenses[EB/OL]. (2016-02-16) [2020-09-25]. <https://thediplomat.com/2016/02/pentagon-wants-arsenal-planes-to-beat-chinas-air-defenses/>.
- [15] 苑桂萍, 张绍芳. 美军穿透性制空概念及相关导弹武器发展[J]. 战术导弹技术, 2018(1): 37-41.
Yuan Guiping, Zhang Shaofang. Penetrating Counter Air

- Concept of USAF and Its Missile Weapon Development[J]. Tactical Missile Technology, 2018(1): 37-41.
- [16] 祁武超, 刘恒, 金德玉. 内埋弹舱弹射冲击载荷特性研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(4): 889-896.
Qi Wuchao, Liu Heng, Jin Deyu. Research on the Impact Load Characteristics of Embedded Missile Bay[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(4): 889-896.
- [17] 朱莹, 高其娜, 邹平. 浅析美军武库机[C]// 探索 创新交流(第7集)——第七届中国航空学会青年科技论坛文集(上册). 北京: 中国航空学会, 2016: 288-291.
Zhu Ying, Gao Qina, Zou Ping. U.S. Military Use Arsenal Aircraft[C]// Exploration, Innovation, Communication (Episode 7), 7th CSAA Youth Science and Technology Forum. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2016: 288-291.
- [18] Cliff Roger, Fei John, Hagen Jeff, et al. Shaking the Heavens and Splitting the Earth: Chinese Air Force Employment Concepts in the 21st Century[R]. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2011.
- [19] Stillion John. Trends in Air-to-air Combat: Implications for Future Air Superiority[R]. Washington, DC: Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2015.
- [20] Liu D W, Sun J, Huang D G, et al. Research on Development Status and Technology Trend of Intelligent Autonomous Ammunition[J]. Journal of Physics Conference Series, 2021, 1721: 012032.
- [21] Wetsig Whitney. AFRL, AFSOC Launch Palletized Weapons from Cargo Plane[EB/OL]. (2020-05-27) [2020-09-21]. <https://www.wpafb.af.mil/News/Article-Display/Article/2198566/afrl-afsoc-launch-palletized-weapons-from-cargo-plane/>.
- [22] Trevithick Joseph. Air Force Unveils First Test of Arsenal Plane Concept and New CLEAVER Munition[EB/OL]. (2020-05-28) [2020-09-21]. <https://www.thedrive.com/the-war-zone/33716/air-force-unveils-first-test-of-arsenal-plane-concept-and-new-cleaver-munition>.
- [23] Department of Defense. Request for Information: OSD SCO EnMasse[EB/OL]. (2020-06-25) [2021-04-15]. <https://beta.sam.gov/opp/cd8eed2257d64b5b83c7c9f4865481b8/view>.
- [24] Castanedo Federico. A Review of Data Fusion Techniques[J]. The Scientific World Journal (S1537-744X), 2013, 2013: 704504.
- [25] 孙璐, 周伟, 姜佰辰, 等. 一种时空联合约束的多源航迹相似性度量模型[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(11): 2405-2413.
Sun Lu, Zhou Wei, Jiang Baichen, et al. Multi-source Trajectories Similarity Measure Model with Spatial and Temporal Constraints[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(11): 2405-2413.
- [26] Yang Dan, Ji Hongbing, Gao Yongchan. A robust D-S Fusion Algorithm for Multi-target Multi-sensor with Higher Reliability[J]. Information Fusion (S1566-2535), 2019, 47: 32-44.
- [27] Aldhubaib Faisal. Generic Aircraft Model Recognition by Two Shape Factors: in the Resonance Region[J]. IET Radar, Sonar & Navigation (S1751-8792), 2020, 14(1): 81-88.
- [28] Li Yibing, Chen Jie, Ye Fang, et al. The Improvement of DS Evidence Theory and Its Application in IR/MMW Target Recognition[J]. Journal of Sensors (S1687-725X), 2016(6): 1-15.
- [29] 李洪瑞. 基于神经网络的分布式被动传感器信息融合技术[J]. 兵工学报, 2020, 41(1): 95-101.
Li Hongrui. Neural Network-based Information Fusion Technique for Distributed Passive Sensor[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(1): 95-101.
- [30] Huang Yuan, Wang Xueying, Guo Yulan, et al. State Estimation with Incomplete Linear Constraint[C]// 20th International Conference on Information Fusion. Xi'an, China: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [31] 王昱, 章卫国, 傅莉, 等. 基于不确定性信息的空战威胁评估方法[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(2): 299-305.
Wang Yu, Zhang Weiguo, Fu Li, et al. A Method of Threat Assessment for Aerial Combat Using Uncertain Information[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(2): 299-305.
- [32] Yan Tao, Han Chongzhao. Sensor Management for Multi-target Detection and Tracking Based on PCRLB[C]// 20th International Conference on Information Fusion. Xi'an, China: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [33] 李宝鹏, 高伟亮, 王守权, 等. 舰载机多雷达传感器任务分配与采样间隔融合优化算法[J]. 控制与决策. 2022, 37(3): 565-573.
Li Baopeng, Gao Weiliang, Wang Shouquan, et al. Optimization Algorithm of Task Allocation and Sampling Interval Fusion for Multi Radar Sensors of Carrier Based Aircraft[J]. Control and Decision, 2022, 37(3): 565-573.
- [34] 王谦喆, 何召阳, 宋博文, 等. 射频隐身技术研究综述[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(6): 1505-1514.
Wang Qianzhe, He Zhaoyang, Song Bowen, et al. Overview on RF Stealth Technology Research[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(6):

- 1505-1514.
- [35] 陈峭东, 邹杰, 刘波, 等. 从航空火力控制系统的发展看信息时代的火力控制[J]. 电光与控制, 2015, 22(2): 1-6.
Chen Shaodong, Zou Jie, Liu Bo, et al. Fire Control in the Age of Information: from Perspective of Aviation Fire Control System Development[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(2): 1-6.
- [36] 叶礼邦, 付海波. 美军战术目标瞄准网络技术分析与启示[J]. 飞航导弹, 2014(8): 30-34.
Ye Libang, Fu Haibo. U.S. Military Tactics Targeting Network Technology Analysis and Enlightenment[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(8): 30-34.
- [37] 胡悦. 美国空军“作战云”发展现状与展望[J]. 现代导航, 2017, 8(1): 74-78.
Hu Yue. Air Force "Combat Cloud" Development and Prospect[J]. Modern Navigation, 2017, 8(1): 74-78.
- [38] 吕卫华, 徐大专. 弹载数据链抗干扰性能分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(3): 392-396.
Lü Weihua, Xu Dazhuan. Analysis on Anti-jamming Performance of Missile-borne Data-link[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(3): 392-396.
- [39] 邵堃, 雷迎科, 罗路为. 针对武器制导数据链的典型干扰场景建模方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(7): 182-187.
Shao Kun, Lei Yingke, Luo Luwei. Modeling Method of Typical Jamming Scene for Weapon Guidance Data Link[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(7): 182-187.
- [40] 刘宏波, 孟进, 赵奎. 蜂群无人机数据链自组网协议设计[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(9): 163-168.
Liu Hongbo, Meng Jin, Zhao Kui. Design of Adhoc Protocol for Forswarm Unmanned Aerial Vehicle Data[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(9): 163-168.
- [41] 付昭旺, 寇英信, 黄文卿, 等. 多机协同空战火力控制研究[J]. 电光与控制, 2010, 17(9): 5-8.
Fu Zhaowang, Kou Yingxin, Huang Wenqing, et al. On Fire Control Theory of Multi-fighter Cooperated Air Combat[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(9): 5-8.
- [42] 傅莉, 刘骏驰. 多机协同目标与火力资源分配[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(3): 67-70.
Fu Li, Liu Junchi. Resource Allocation of Target and Fire of Manned/unmanned Cooperative Air Combat[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(3): 67-70.
- [43] Zhao Yang, Chen Yifei, Zhen Ziyang, et al. Multi-weapon Multi-target Assignment Based on Hybrid Genetic Algorithm in Uncertain Environment[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems (S1729-8814), 2020, 17(2): 1-16.
- [44] 刁兴华, 方洋旺, 伍友利, 等. 双机编队空空导弹协同发射区模拟仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(3): 370-376.
Diao Xinghua, Fang Yangwang, Wu Youli, et al. Simulation Analysis on Air-to-air Missile Allowable Launch Envelope About Cooperative Air Combat of Multi-fighter Formation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(3): 370-376.
- [45] Shi Zhenqing, Liang Xiaolong, Zhang Jiaqiang, et al. Modeling and Simulation Analysis on Three-dimensional Air-to-air Missile Attack Zone of Two Aircrafts[C]// 2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference. Xiamen, China: IEEE, 2018: 1-5.
- [46] 李波, 范盘龙, 李卿莹, 等. 一种综合优势下的空空导弹接力制导混合优化方法[J]. 宇航学报, 2019, 40(2): 191-198.
Li Bo, Fan Panlong, Li Qingying, et al. A Hybrid Optimization Method of Air-to-air Missile Relay Guidance Based on Integrated Superiority[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(2): 191-198.
- [47] Wang Xiaofei, Zhao Hui, Han Tong, et al. A Gaussian Estimation of Distribution Algorithm with Random Walk Strategies and its Application in Optimal Missile Guidance Handover for Multi-UCAV in Over-the-horizon Air Combat[J]. IEEE Access (S2169-3536), 2019, 7: 43298-43317.
- [48] 郭继峰, 郑红星, 贾涛, 等. 异构无人系统协同作战关键技术综述[J]. 宇航学报, 2020, 41(6): 686-696.
Guo Jifeng, Zheng Hongxing, Jia Tao, et al. Summary of Key Technologies for Heterogeneous Unmanned System Cooperative Operations[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(6): 686-696.
- [49] Liu Zhihong, Wang Xiangke, Shen Lincheng, et al. Mission-oriented Miniature Fixed-wing UAV Swarms: A Multilayered and Distributed Architecture[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems (S2168-2216), 2020, 52(3): 1588-1602.
- [50] Jasim Wesam, Gu Dongbing. Iterative Linear Quadratic Regulator Control for Quadrotors Leader-follower Formation Flight[J]. International Journal of Modelling, Identification and Control (S1746-6172), 2019, 31(2): 152.
- [51] Kurdi Heba, AlDaood Munirah F, Al-Megren Shiroq,

- et al. Adaptive Task Allocation for Multi-UAV Systems Based on Bacteria Foraging Behaviour[J]. Applied Soft Computing (S1568-4946), 2019, 83: 105643.
- [52] Hitchens Theresa. AFRL Moves to Equip Cargo Planes with Bombs in a Box[EB/OL]. (2020-10-29)[2021-04-01]. <https://breakingdefense.com/2020/10/afrl-moves-to-equip-cargo-planes-with-bombs-in-a-box/>.
- [53] 张邦楚, 廖剑, 匡宇, 等. 美国无人机集群作战的研究现状与发展趋势[J]. 航空兵器, 2020, 27(6): 7-12.
Zhang Bangchu, Liao Jian, Kuang Yu, et al. Research Status and Development Trend of UAV Swarm Battlefield for the United States[J]. Aero Weaponry, 2020, 27(6): 7-12.
- [54] 中海创科技. 中海创科技旗下子公司海创飞龙圆满完成“无人机子母系统”中试验收[EB/OL]. (2021-04-01)[2021-04-15]. <https://www.histron.cn/cms/page/visualangle/func/news.func?newsId=1fa006e6-9905-11ec-84eb-005056ba54a4&ftime=2021-04-01%2014:07:51.0>.
HISTRON Technology. Haichuang Feilong, a Subsidiary of HISTRON Technology, Successfully Completed the Pilot Test of "UAV Sub Parent System"[EB/OL]. (2021-04-01) [2021-04-15]. <https://www.histron.cn/cms/page/visualangle/func/news.func?newsId=1fa006e6-9905-11ec-84eb-005056ba54a4&ftime=2021-04-01%2014:07:51.0>.
- [55] 李向阳. 武器试验机建设关键技术研究[J]. 飞行力学, 2016, 34(3): 13-16.
Li Xiangyang. Research on Key Technology of Weapon Test Aircraft[J]. Flight Dynamics, 2016, 34(3): 13-16.
- [56] Kozak Mustafa Tugrul, Yildiz Erdinc Nuri, Yazicioglu Yigit, et al. Modeling of Aircraft Effects on External Store Ejection[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering (S0954-4100), 2019, 233(10): 3612-3626.
- [57] Hetreed Christopher, Carroll Matthew, Collard Joe, et al. F-35 Weapons Separation Test and Verification[C]// 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta, Georgia: AIAA, 2018: 1-40.
- [58] 艾邦成, 宋威, 董垒, 等. 内埋武器机弹分离相容性研究进展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 22-41.
Ai Bangcheng, Song Wei, Dong Lei, et al. Review of Aircraft-store Separation Compatibility of Internal Weapons[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(10): 22-41.
- [59] 张喆, 刘亚辉, 刘智汉, 等. 运输机空投货物建模与任务性能影响因素研究[J]. 飞行力学, 2017, 35(3): 6-10.
Zhang Zhe, Liu Yahui, Liu Zhihan, et al. Study of Transport Aircraft Cargo Airdrop Modeling and Mission Performance Influence Factors[J]. Flight Dynamics, 2017, 35(3): 6-10.
- [60] Ning Leiming, Chen Jichang, Tong Mingbo. Development of an Efficient Contact-Friction Model for High-fidelity Cargo Airdrop Simulation[J]. Chinese Journal of Aeronautics (S1000-9361), 2019, 32(5): 1145-1155.
- [61] Ghoreyshi Mehdi, Bergeron Keith, Lofthouse Andrew. Numerical Simulation of Wake Flowfield Behind the C-130 with Cargo Ramp Open[J]. Journal of Aircraft (S0021-8669), 2018, 55(3): 1103-1121.
- [62] 高静, 洪冠新. 运输机尾流场的小型空投物资下落轨迹仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(2): 273-278.
Gao Jing, Hong Guanxin. The Research on the Track of Light Cargo Airdrop under the Influence of the Wake Flow Field[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(2): 273-278.