

DOI:10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202605003

有人机/无人机协同作战效能评估综述

齐 铎,邱时代*,任晓岳,何兴宇,马嘉呈,戴江斌

(空军工程大学,西安 710051)

摘 要:有人机/无人机协同作战是未来智能化战争的核心作战样式,其效能评估已成为支撑体系作战能力建设的关键环节。基于此,从协同体系的层级特性和交互机制出发,剖析了效能评估的内在复杂性;归纳了基于国防部体系结构框架、作战任务分解以及作战环理论与“观察—判断—决策—行动”融合的指标体系构建路径,梳理了权重确定与效能聚合方法;对比分析了经验驱动、模型驱动、数据驱动及混合评估等主流方法的适用性与局限性。研究表明,当前评估工作正从静态单平台评估向动态跨域综合评估演进,但仍面临复杂环境适应性不足、人因要素难以量化、真实数据支撑薄弱等挑战。针对这些问题,提出建立一个贯穿作战全程的评估、决策、优化实时闭环,推动协同作战模式从静态加事后分析向动态加伴随式赋能转变,但仍缺乏对“人机信任校准”机制的设计与评估。未来应重点发展智能评估技术,构建跨域评估框架,突破动态实时评估瓶颈,为协同作战体系建设提供有效理论支撑。

关键词:有人机/无人机协同作战;效能评估;指标体系;评估方法

中图分类号:U8

文献标志码:A

开放科学标识码(OSID):

文章编号:2097-2741(2026)05-0025-16



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

随着战争形态向智能化、无人化持续演进,有人机/无人机协同作战已成为未来战场的重要作战样式。有人机/无人机协同作战模式以有人平台为决策核心,依托人类指挥员的决策经验和判断优势;以无人系统为执行单元,具有灵活机动、持久部署与风险突防的能力特征。两者协同不仅拓展了作战半径,提升了任务效率,更在优化资源配置的同时,显著降低了人员伤亡风险,为应对复杂战场环境下的多样化任务提供了高效且可靠的解决方案^[1-5]。

近年来,各军事强国以有人机/无人机协同系列项目为牵引,进行了大量的研究工作。美国主导的“忠诚僚机”项目发展迅速,XQ-58A 无人机已与 F-35 等战机完成多轮协同测试^[6]。同时,美国还于 2024 年启动规模化“协同作战飞机”(collaborative

combat aircraft, CCA)计划,计划在 2029 年前部署百架以上无人机支持空战任务^[7]。2021 年,俄罗斯成功进行了“猎人-B”无人机与苏-57 试验编队作战^[8],欧洲则通过“未来空中作战系统”“全球作战空中计划”等跨国项目推进下一代有人机/无人机协同系统研发,重点突破人工智能决策与跨平台协同能力。

在此背景下,如何科学、系统地评估有人机/无人机协同作战的整体效能,已成为理论创新与装备研发需要解决的核心问题。本文通过系统梳理有人机/无人机协同作战效能评估领域的研究需求和难点,全面归纳评估指标体系构建方法,对比分析不同评估模型的优缺点及适用场景,并深入探讨该领域面临的挑战与未来发展趋势,为研究人员提供清晰的技术发展脉络和理论参考,推动有人机/无

收稿日期:2026-01-06

修回日期:2026-01-19

录用日期:2026-02-03

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBMS-466)

第一作者:齐铎(1987—),男,副教授,主要从事无人作战、军事智能研究。

* 通信作者:邱时代(1993—),男,助教,主要从事空域管理研究。

引用格式:齐铎,邱时代,任晓岳,等.有人机/无人机协同作战效能评估综述[J].火箭军工程大学学报,2026,40(5):25-40. Qi Duo, Qiu Shidai, Ren Xiaoyue, et al. Overview of effectiveness evaluation for manned/unmanned aerial vehicle cooperative combat[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40(5):25-40.

人机协同作战效能评估体系向科学化、规范化、实用化方向发展。

1 有人机/无人机协同作战体系与特性

有人机/无人机协同作战是指有人驾驶的作战平台与各类无人作战飞行器,通过信息网络紧密连接,在统一的指挥控制体系下,实现功能互补、行动协调,从而达到效能倍增的作战效果。其核心在于将人的认知判断和决策优势与无人系统的持久和风险可承受等特点有机结合,形成一体化的作战体系。有人机/无人机协同作战体系并非各类作战单元的简单叠加,而是一个要素紧密耦合、能力有机融合的复杂系统。其内在的体系结构、交互机制与运行特性,从根本上决定效能评估的复杂性、特殊性与挑战性。

1.1 协同作战效能评估流程

开展有人机/无人机协同作战效能评估,需要明确研究思路和评估流程,确保从面向目标、构建指标体系,到选择方法、计算分析,直至结果验证与优化的全过程均逻辑清晰、方法统一。有人机/无人机协同作战效能评估的基本流程如图 1 所示,理论分析主要集中在建立指标体系和选择评估方法两个步骤中。

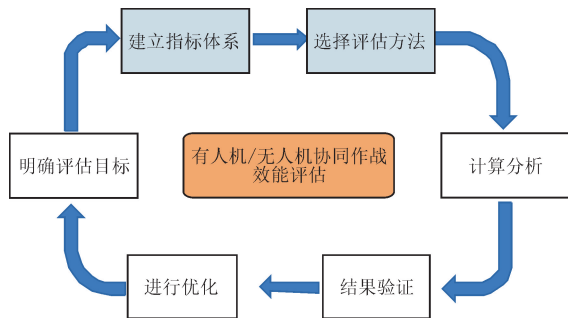


图 1 有人机/无人机协同作战效能评估的基本流程

Fig. 1 Basic process of the effectiveness evaluation of manned/unmanned aerial vehicle (MAV/UAV) cooperative combat

1.2 协同作战层级演化

根据平台间的通信控制链路、自主匹配技术状态的不同,有人机/无人机协同作战可划分为多个等级,具体可分为以下 3 类。

平台级协同:以单一有人驾驶飞机平台为核心,与少量无人机形成“主从”式编组。平台级评估侧重于战术动作层面的效能,如无人机前出侦察对有人平台态势感知范围的提升幅度,或无人诱饵对

有人平台生存概率的具体贡献,评估指标相对具体、微观。

编队级协同:由多架有人机与多架无人机组成混合编队,通过局域网状数据链共享信息,并在统一战术管理下行动。编队级评估注重任务层面的协同效率,如多目标分配算法的优劣、集群自组织与自愈合能力以及分布式杀伤链的闭合概率与速度。评估需从系统整体出发,衡量“ $1+1>2$ ”的非线性效应。

跨域级协同:在陆、海、空、天、电等多维作战域内,多个有人机/无人机混合集群通过战役级指挥信息系统实现广域协同。跨域级评估更加关注体系韧性与战略贡献度,重点是跨域信息融合效率、体系抗毁伤能力、对战役进程的综合影响等,评估的复杂性和不确定性最高。

1.3 系统组成与交互机制中的效能关键环节

有人机/无人机协同作战体系效能的产生来源于系统核心节点在高效交互机制下的有机整合。核心节点由体系内的有人机和无人机组成,交互机制高度依赖于人机交互界面、通信链路及协同控制流程。典型对地突防打击作战场景中,有人机是系统的指控中心,依托通信链路实现对整个有人机/无人机协同作战系统的状态监控和指挥控制,具体工作包括态势信息的综合处理、作战系统的任务规划、战术决策等;无人机作为执行单元,主要完成战场态势的探测感知、对目标火力打击等任务。

有人机作为指挥控制核心和复杂决策节点,其效能体现在“决策优势”上,评估时需关注指挥员在复杂态势下的决策速度与质量、对多架无人机的管理能力以及临机处置能力。无人机作为体系重要的执行节点,其效能体现在成本和风险优势上,评估时需关注其持久侦察能力、高危环境下的生存性能、精确打击能力等。

除核心节点之外,有人机与无人机之间的交互机制也对作战效能的发挥有着重要的影响。其中,人机交互界面作为信息输入输出的关键通道,直接作用于指挥员认知负荷与情境意识水平。界面低效是评估中难以量化但影响显著的人因相关因素,会延长“观察—判断—决策—行动”(observation, orientation, decision and action, OODA)循环周期。本文作者依托于某科研项目而设计的有人机/无人机人机交互界面包含了有人机状态监控、无人机态势监控、指控指令下达、基于大语言模型的决策支持等功能模块。通信链路是协同的生命线,其带

宽、时延、抗干扰与抗截获能力,决定了控制的实时性与可靠性。协同控制流程反映了 OODA 作战环的循环速度和精度对闭环速度与精度的测度。无人系统在前端“观察”阶段所获取信息的质量与时效性、有人平台在“判断—决策”阶段的处理速度与判断准确性,以及指令下达后无人系统在“行动”阶段的执行效果,共同决定了 OODA 的闭环效率。

2 效能评估指标体系

有人机/无人机协同作战效能评估指标体系的构建是量化协同作战能力、支撑作战决策优化的核心前提,需遵循科学性、可量化性、层次性 3 大核心原则,以确保指标体系兼具理论严谨性与实践适用性。

2.1 典型指标体系设计

科学合理的评估指标体系是有人机/无人机协同作战效能评估的基础。近年来,研究人员主要从体系结构框架、作战任务分解和网络中心战理论等角度出发构建评估指标体系。

2.1.1 基于 DoDAF 的指标体系

美国国防部体系结构框架(department of defense architecture framework, DoDAF)被广泛应用于描述无人协同作战体系框架,并分析作战活动与能力需求之间的关系,其分类如图 2 所示。文献[9]利用 DoDAF 构建了无人机协同作战体系架构,通过多视角建模全面描述了系统的作战视图、能力视图和技术视图,对有人机/无人机协同作战体系的系统功能、作战任务活动、各作战节点的信息交互及组织关系等建立模型,建立了涵盖侦察探测能力、指挥控制能力、协同打击能力和综合保障能力的协同作战能力指标体系。文献[10]以有人机/无人机协同作战为研究对象,借助 DoDAF 对其协同作战体系结构开展建模工作,为明确协同作战中指挥、通信、任务分配等核心环节的评估指标提供体系化基础。文献[11]基于 DoDAF 构建载人和无人系统的架构框架,通过设计系统的顶层结构,解决系统互操作性差的问题。文献[12]中空战体系涵盖有人机与无人机协同作战场景,文中借助 DoDAF 搭建指标体系,再结合综合考虑学习和专家评分数据开展效能评估的思路,可直接迁移用于有人机/无人机协同空战的评估指标设计与效能分析。文献[13]中明确 DoDAF 建模的核心思想是分

阶段构建系统模型,各阶段聚焦不同建模问题,按不同抽象层次逐步细化。同时确定作战体系架构可通过选取 DoDAF 标准作战视图产品,从作战节点、组织关系、活动流程等多维度来进行描述。

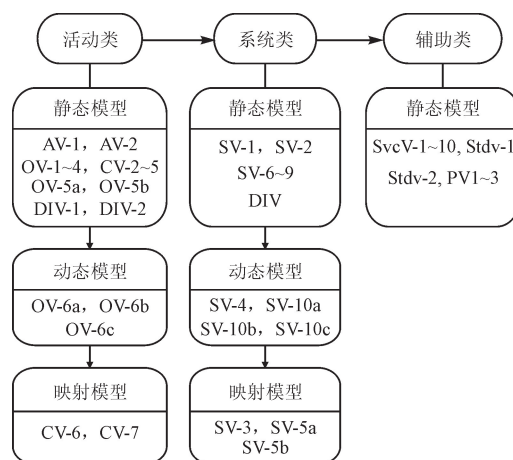


图 2 DoDAF 模型分类^[9]

Fig. 2 Classification of DoDAF models^[9]

2.1.2 基于作战任务分解的指标体系

从作战任务出发进行能力需求分解是指标体系构建的另一常用思路。当前,需求分解指标体系普遍采用多层递阶结构,将抽象的作战效能逐层分解为可量化的底层指标。一个典型的三层架构中,顶层为系统层,体现整体作战效能;中间为能力层,按照作战功能进行划分,如任务能力、生存能力、协同效率等;底层是可量化指标层,如目标识别率、通信延迟、弹药消耗等。

文献[14]围绕有人机/无人机协同作战的作战任务和能力需求,构建了包含侦察预警能力、信息处理能力、协同决策能力、精确打击能力和综合防护能力等多层级的评估指标体系。文献[15]则借鉴武器装备关键作战问题效能评估方法,构建了智能无人机集群侦察任务效能评估指标体系,建立了作战任务、预期效果、能力属性、效能指标的逻辑分析链路,形成了从效能指标到作战任务目标之间的关联关系。文献[16]通过分析攻击海上舰船目标过程中有人机/无人机编队的作战使用方式及作战效能主要因素,构建了包含任务完成效率、敌方作战威胁解决效率、战损率的三层指标体系。

2.1.3 基于作战环和 OODA 环的指标体系

随着网络化作战理念的深入,基于作战环和 OODA 环的指标体系构建方法逐渐兴起,较好地描述了协同作战过程。基于 OODA 的有人机/无人机协同作战流程如图 3 所示。文献[17]基于 OO-

DA,构建了适配有人机/无人机协同作战的综合性指标体系,涵盖任务规划、编队协同、感知通信、打击效能 4 大模块。文献[18]采用衡量信息不确定性的信息熵对网络的节点能力和作战边的权值进行量化,构建了信息流转动态评估网络,通过节点度受限最短路算法找出可能的并行作战环,实现了无人机集群协同作战行动的量化评估。文献[19]首先对有人机/无人机的定义进行明确,并描述其组成,然后介绍了基于标准框架建模和复杂网络建模方法的研究进展。文献[20]构建了贴合空战协同的多层指标体系,重点围绕作战环拆解的OODA 四层展开:感知层指标含传感器探测精度、目标识别准确率等;决策层涵盖指令生成时效、任务分配适配度等;执行层包含火力打击命中率、无人僚机任务完成率等;反馈层则有毁伤评估准确率、战场态势更新及时性等指标。文献[21]以 OODA 决策链为框架,梳理无人机协同作战从目标观察、态势判断、作战决策到任务执行的全流程,筛选出各环节中影响协同效能的关键因素,确保指标选取与作战实际流程高度契合,避免指标冗余或遗漏。

此外,指标体系构建正从单一物理参量向信息、认知多维融合演进。文献[22]关注了认知域的态势感知质量、作战意图适配性等指标,将操作员对态势的判断、作战意图的传递等核心人因元素作为衡量协同作战效能的关键维度,为后续相关评估模型的完善提供了理论支撑。文献[23]评估体系

围绕无人机地面操作员的人因因素设定,通过静态评估方法,分析地面控制站设计与人机工效的匹配度,研究操作员在操控无人机时的生理和心理状态对操作精度、任务完成效率的影响,为优化无人机操控系统、降低人为操作失误提供评估依据。

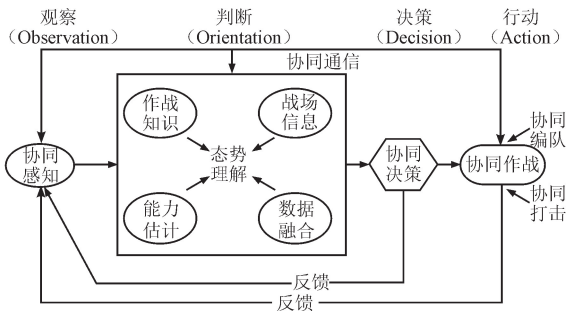


图 3 基于 OODA 的有人机/无人机协同作战流程^[17]

Fig. 3 MAV/UAV cooperative combat process based on OODA^[17]

针对不同作战任务,指标体系还呈现出差异化特征。对海突击作战中,文献[24]设计的舰载无人机编队协同能力指标包含目标捕获稳定性、火力协调精度、抗海杂波能力。文献[25]在反恐行动中增加了“目标区分度”“非致命损伤控制”“协同索敌效率”等指标内容。

不同效能评估指标体系设计方法对比如表 1 所示。从演化趋势看,未来指标体系设计趋向多维融合,即体系结构、任务分解和动态闭环相结合,以适应智能化、跨域化作战需求。

表 1 不同效能评估指标体系设计方法对比

Table 1 Comparison of design methods for different effectiveness evaluation index systems

方法	理论基础	适用场景	优势	局限
DoDAF	体系工程、架构框架理论、系统建模	适用于复杂系统顶层设计、体系结构优化、跨平台协同评估,尤其是多系统集成与接口标准化分析	结构化强,体系覆盖全面,便于多视图协同设计与分析	建模复杂,对架构师要求高,指标偏静态,动态对抗适应性较弱
作战任务分解	系统论、任务分析、能力映射	适用于具体作战任务或装备型号的效能评估,如特定场景下的侦察、打击、护航等任务	任务导向明确,指标可操作性强,便于与仿真、试验结合验证	任务分解依赖专家经验,主观性强,难以反映系统间复杂交互与涌现效应
作战环和 OODA 环	控制论、网络科学、决策理论	适用于动态对抗、网络化作战、协同决策流程评估,强调闭环反馈	突出信息流转与决策时效,强调作战过程的动态性与闭环性	可能忽略非线性和随机因素,对数据链和信息系统依赖性强

2.2 指标权重和聚合方法研究

指标权重确定与聚合方法是评估模型构建的两个关键环节,决定了评估结果的科学性和可信度。指标权重决定各评估指标的相对重要性,反映

不同作战能力在特定作战任务中的优先级;聚合方法则决定了如何将多个指标的评估值合成为整体效能值,体现了评估者对系统内在运作机理的理解。针对有人机/无人机协同作战的特点,权重确

定与聚合方法也呈现出多样化特征,这些方法经历了从单一方法到混合方法、从静态评估到动态分析、从主观经验到数据驱动的演进过程。

2.2.1 权重确定方法

指标权重确定是效能评估的核心环节,是构建评估模型的前序步骤。根据权重确定原理的不同,现有方法可分为主观赋权法、客观赋权法、主客观组合赋权法以及新型智能赋权法等。此外,权重确定是评估模型构建的基础,大部分效能评估方法均需与权重确定方法结合使用。

1) 主观赋权法

主观赋权法主要依赖领域专家的知识 and 经验,通过对指标进行两两比较或直接评分来确定权重。主观赋权法在军事领域应用较为广泛,但受专家主观偏好影响较大。

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是主观赋权法中最典型的代表,它将复杂决策问题分解为层次结构,通过构建判断矩阵计算各层元素的相对权重。文献[26]在有人机/无人机协同作战能力分析中,采用 AHP 法确定指标的主观权重,建立了包括侦察预警、指挥控制、协同打击等能力在内的参数体系。该方法结构清晰、操作简单,能够有效整合专家经验,但在指标数量过多时,难以保证判断矩阵的一致性。文献[27]将 AHP 与专家打分法结合,确定了各层级指标权重,特别是计算了指挥控制能力、装备操作能力等人因相关定性指标,使评估结果更贴合海上实战场景。

针对传统 AHP 在处理模糊信息方面的不足,文献[28]提出了三角模糊层次分析法,将判断矩阵中的精确数扩展为三角模糊数,通过构建模糊判断矩阵来计算权重,提高了权重确定的可靠性。文献[29]用指数标度改进传统 AHP,减少标度主观性对权重计算的影响,优化权重求解流程,为多无人机协同作战的兵力调配分析提供了实用的权重确定方案。

另一类主观赋权法是 G1 法(序关系分析法),该方法无需判断矩阵和一致性检验,操作更为简便。文献[30]在有人机/无人机协同作战效能的物元可拓评价中,采用 G1 法确定主观权重,通过与客观权重的博弈组合,实现了主客观信息的有效集成。文献[31]虽聚焦近距离空战态势评估,但适配有人机与无人机协同空战场景,针对传统赋权法无法实现变权重的问题,将空战数据预处理后用滑动窗口分解优势函数矩阵,在窗口内通过 G1 法融入

专家对空战指标的重要性排序意见,结合通过准则间相关性确定重要性(criteria importance through intercriteria correlation, CRITIC)方法的客观赋权优势完成权重优化。

2) 客观赋权法

客观赋权法基于实际数据的内在变异性和相关性确定权重,避免了人为因素干扰,但可能偏离实际作战需求。实际操作中,更多的是用客观赋权对主观值进行修正。

熵权法是最常用的客观赋权方法,它根据各指标值的变异程度确定权重。指标值差异越大,熵值越小,说明该指标提供的信息量越大,权重也越高。文献[32]提出一种组合赋权的方法,其核心是用熵权法修正 AHP 得到定性指标权重,以此减少主观误差。经仿真平台验证,该权重确定方式可行,为无人机集群与有人机协同作战的效能评估提供了参考。文献[33]基于组合赋权机制,融合 AHP 和博弈论,通过融合感知、决策、行为、安全和学习 5 个方面构建模糊综合评估方法。组合赋权公式为

$$\begin{cases} Q(\alpha, \beta) = \sum_j^m \omega_j \ln(\omega_j / u_j) + \sum_j^m \omega_j \ln(\omega_j / v_j) \\ \text{s. t. } \alpha + \beta = 1, \quad \omega_j = \alpha \times u_j + \beta \times v_j \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Q(\alpha, \beta)$ 为相对熵; j 为指标序号; m 为指标数量; α 和 β 分别为主、客观权重; u 和 v 为权重向量,将两者结合可获得组合权重向量 ω 。

文献[34]用熵权法确定各属性的权重。通过分析各属性数据的离散程度来判断其重要性,熵值越高意味着该属性包含的有效决策信息越多,就会被赋予更大权重。这种方式能避免人为主观赋权的偏差,让属性权重的分配更贴合实际作战决策需求。文献[35]通过熵权法确定各指标的客观权重,再搭配模糊 AHP 平衡主观经验,以此解决无人机评估中指标过多导致的权重分配不合理问题,为无人机作战效能优化提供定量依据。

决策实验与评估实验法(decision-making trial and evaluation laboratory, DEMATEL)是另一种客观赋权方法,通过分析系统中各要素之间的逻辑关系和影响强度,计算每个要素的原因度和中心度,从而确定权重。文献[36]融合 DEMATEL 和 AHP,先通过对应方法得到指标初始权值,再针对作战评估指标体系中平行指标间存在相互影响的实际情况,引入 DEMATEL 方法修正一级指标的

初始权值,最终算出各指标修正后的层次总排序权值。

3) 新型智能赋权法

随着人工智能技术的发展,一些新型智能赋权方法开始被引入作战效能评估领域。这类方法通过机器学习、深度学习等技术,自动从数据中学习指标间的关系,实现权重的动态调整和优化。

尽管使用智能赋权法在有人机/无人机协同作战效能评估中的具体应用文献较少,但相关方法已在其他军事评估领域展现出潜力。例如,基于神经网络的权重学习方法^[37]可以通过训练样本自动调整指标权重;强化学习方法^[38]则能够根据评估结果与实战效果的反馈,动态优化权重分配策略。这些智能赋权方法有望解决传统方法在动态对抗环境和不确定条件下面临的挑战,是未来研究的重要方向。

不同权重确定方法对比如表 2 所示。从方法演进方向看,早期研究多采用 AHP 等主观赋权方法,其优势在于能有效融合专家经验,适用于数据匮乏的初期论证阶段。然而,该方法主观性强,受专家偏好影响,且难以适应动态战场变化。因而引入熵权法等客观赋权方法,利用数据内在变异确定权重,提升评估的客观性。但纯客观赋权可能偏离实际作战逻辑,难以融入领域知识,尤其在数据质量不高时解释性较弱。为兼顾主客观信息,组合赋权法应运而生,实现权重稳健性提升。近年来,随着人工智能技术的快速发展,针对神经网络、强化学习等方法的研究较多,旨在实现动态权重调整,为智能化赋权方法的发展指明了方向。未来需要重点探索动态可解释赋权机制,结合注意力机制与强化学习,实现权重随态势自适应地动态演化。

表 2 不同权重确定方法对比

Table 2 Comparison of different weight determination methods

方法	理论基础	适用场景	优点	局限
主观赋权法	判断矩阵、成对比较、关系分析	专家经验丰富、指标体系稳定、数据不足	结构清晰,易于理解;能融入专家经验,贴近实战需求;适用于数据缺乏的初期研究	主观性强,受专家偏好影响;指标过多时一致性难以保证;静态权重,难以适应动态战场
客观赋权法	信息熵、影响关系分析	数据充足、指标间关系明确	能反映指标变异程度或系统内影响关系;减少人为偏差	可能偏离实际作战逻辑;难以融入领域知识
新型智能赋权法	机器学习、深度学习、强化学习	多源大量异构数据融合	能动态调整权重,适应环境变化;可处理高维非线性关系;具备在线学习能力	可解释性差;依赖大量高质量训练或实际数据

2.2.2 聚合方法

聚合方法是将多个指标评估值合成为整体效能值的关键环节,不同的聚合方法反映了对系统内在运作机理的不同理解。然而,有人机/无人机协同作战系统的非线性、涌现性等特点,对聚合方法提出了更高要求。

1) 线性加权聚合

线性加权聚合是最直观、应用最广泛的聚合方法,它通过将各指标值与对应权重相乘后求和,得到综合效能值。这种方法简单易行、透明度高,在效能评估中得到了广泛应用。

文献[39]在有人机/无人机协同空地攻击效能评估中,采用了综合指数模型,实质上是一种线性加权聚合方法。该方法根据混合编队的作战过程和特点,建立各分系统和分项能力的评估模型,

最后通过加权聚合得到整体效能值。与此类似,文献[40]在模糊综合评判框架中融入线性加权聚合逻辑,通过加权计算各指标的模糊评价值,最终得到协同作战效能综合得分。该方式降低了模糊评价中主观偏差的影响,让评估结果更贴合实际作战。

线性加权聚合的主要缺陷是假设指标间相互独立,且存在完全可补偿性,即某个指标的优异表现可以完全补偿其他指标的不足。由于在真实作战环境中,各类能力指标之间往往存在复杂的交互关系和相互依赖,这一假设与实际场景特点存在差距。

2) 非线性智能聚合

为解决线性加权聚合的局限性,学者们提出了多种非线性智能聚合方法,能够更好地描述系统内在的复杂机制和非线性特征。

物元可拓模型是一种处理不相容问题的非线性聚合方法,通过建立物元、经典域和节域,计算待评对象关于各评价等级的关联度,从而进行综合评估。文献[41]虽聚焦地面无人作战装备,但评估逻辑可直接迁移至有人机和地面无人装备协同作战场景。研究从目标侦察、火力打击、信息指挥等六个维度搭建指标体系,用层次分析法确定指标权重后,引入物元可拓法构建综合评估模型,并以察打一体无人车为例完成效能评估。

灰色理论是另一种非线性聚合方法,适用于信息不完整、不确定的小样本问题。文献[42]提出了基于多层次指标权重确定和灰色理论结合的有人机/无人机反舰作战效能评估模型,利用综合层次分析法、熵权法、聚类分析和灰色理论计算出各级指标作战效能。这种方法通过白化权函数确定灰色统计量,构建灰色评价矩阵,适合解决作战效能评估中的不确定性问题。

3) 基于体系结构的聚合

基于体系结构建模的聚合方法从系统整体架构出发,通过分析系统组件间的交互关系和依赖关系,实现效能的综合聚合。

文献[43]提出了一种网络模型描述方法,进而生成了一种有人机/无人机协同作战效果评估模型。该方法将作战单元抽象为节点,将协同关系抽象为边,通过网络整体效能指标评估协同效果,分析系统的结构特性和抗毁性。文献[44]针对无人

机蜂群评估指标复杂的问题,提出顶层体系结构设计结合云模型的评估方法。通过全局、作战、系统三类视图对蜂群作战体系建模,拆解装备系统构建指标体系,再用组合赋权法聚合各级指标,生成综合评价云模型,为蜂群作战效能等级评估提供有效支撑。文献[45-46]提出一种基于网络结构的有人机/无人机协同作战能力评估方法,基于信息熵来定量描述能力不确定性对协同作战的影响。文献[47]面向协同作战网络提出了5个脆弱性指标,同时引入网络贡献法聚合脆弱性指标,实现效果评估。文献[48]从网络拓扑角度出发,构建了3种分层指挥与控制网络模型,建立了整合网络连接性、负载状态和传输效率的无人机群体网络质量评估指标。

不同聚合方法对比如表3所示。从方法演进方向看,效能聚合方法经历了从线性加权向非线性智能聚合,再向体系结构驱动聚合的演进。线性加权法简单直观,在指标相对独立的初步评估中广泛应用,但其不符合作战非线性特征,难以刻画系统涌现性。为解决这个缺陷,物元可拓、灰色关联法等非线性聚合方法被引入,能更好地处理不确定性与系统涌现特征。进一步地,为从系统整体出发评估协同效应,网络模型法、云模型法等基于体系结构的聚合方法逐渐兴起,强调通过结构建模评估系统抗毁性与协同增益。未来需要重点发展跨层级聚合理论,建立从单平台到跨域体系的统一效能聚合模型。

表 3 不同聚合方法对比
Table. 3 Comparison of different polymerization methods

方法	聚合逻辑	使用场景	优点	局限
线性加权聚合	各指标值乘权重后求和	适用于指标相对独立、关系简单的初步评估或快速分析	简单直观,易于实现;解释性强;计算效率高	假设指标独立,忽略交互效应;不符合作战非线性特征;难以刻画系统涌现性
非线性智能聚合	基于关联度、相似度、相容性进行综合评估	适用于指标关联复杂、存在信息缺失或不确定性的评估环境	能处理不确定性、小样本问题;更贴近复杂系统非线性特征	模型参数设置依赖经验;动态适应性不足
基于体系结构的聚合	从系统结构、交互关系出发建模,评估整体涌现效能	适用于复杂系统整体效能评估、体系结构优化、网络化作战分析	强调整体性与结构性;适合分析系统抗毁性、协同效应	建模复杂,对系统理解要求高;数据需求大

3 效能评估方法

传统作战效能评估方法经过多年发展已较为

成熟,且近年来学者们通过方法融合和模型扩展,使其逐渐适应有人机/无人机协同作战的新特点。

3.1 经验驱动方法

经验驱动方法主要依赖领域专家的宝贵知识

和实战演练中积累的经验数据,在此基础上对有人机/无人机协同作战效能进行定性分析与定量评估。经验驱动方法在数据不足的初期研究阶段具有不可替代的价值。

3.1.1 专家评估法

专家评估法通过系统收集和整合领域专家的判断意见,确定评估指标权重或直接评价作战方案效能,此方法严重依赖专家的经验 and 认知。

3.1.2 实战演练分析

实战演练分析通过模拟真实作战环境,观察和记录有人机/无人机系统在近似实战条件下的表现,进而评估其作战效能。这种方法能够揭示系统在实际应用中的潜在问题和优势,为改进系统设计提供直接依据。

文献[49]针对陆—空无人集群系统的城市作战需求,基于 OODA 决策链构建了全面的作战效能评估指标体系。通过开展 3 架空中无人机与 3 辆地面无人车的编队试验,验证了所构建模型的有效性。该评估框架可有效刻画作战过程的动态性与循环特性,更契合实际作战的复杂场景。

3.2 模型驱动方法

模型驱动方法基于数学模型和理论框架描述有人机/无人机协同作战系统的内在运行机制,通过数学推导和仿真分析评估系统效能,具有理论基础扎实、可重复性高的优点。

3.2.1 ADC 模型及其改进

可用性-可靠性-能力(availability, dependability, capability, ADC)模型是武器装备效能评估的经典方法,其核心思想是通过系统的可用性、可靠性和能力 3 个维度综合评价效能。在此基础上,增加战场环境因素、人为干扰因素等,可持续对 ADC 模型进行改进,提升模型在有人机/无人机协同作战体系效能评估中的适用程度。文献[50]将 ADC 模型与神经网络结合,利用 ADC 框架计算基础效能值,再通过 BP 神经网络学习复杂战场环境中的非线性关系,增强了对不确定环境的适应性。文献[51]对经典 ADC 模型进行创新,重新构建能力矩阵以适配察打无人机对地攻击场景。将改进模型用于 MQ-9、翼龙-2 等 3 款无人机评估,通过 AHP 赋予指标权重,计算各机型作战效能值。研究结果可用于对比不同机型协同作战效能,为有人机与不同无人机搭配的作战方案优化提供理论参考。文献[52]提出一种基于吸收马尔可夫链和人因分析的 ADC 效能评估方法,在传统的 ADC 模型基础

上,新增认知和心理层面的元素,提高效能评估的准确性。

3.2.2 优化模型

随着有人机/无人机协同作战环境日益复杂化,传统的静态评估模型难以满足动态对抗环境下的评估需求,基于博弈论、马尔可夫链等理论的动态评估模型研究成果逐渐增多。

基于博弈论的评估模型将作战过程视为对抗双方的战略互动,通过分析纳什均衡等博弈解来评估系统效能。文献[53]改进博弈论评估逻辑,基于冲突分析图模型构建包含多种稳定性定义的空战博弈模型,引入“伤损比”收益函数,设计两阶段求解算法筛选最优均衡目标分配方案。文献[54]基于系统动力学模型,考虑群聚无人机特性,以无人机存活率和任务完成度为评估指标,构建作战效能评估方法。

基于马尔可夫链的动态评估模型则将作战系统建模为状态转移过程,通过分析状态间的转移概率评估系统效能。这类方法能够描述作战能力的动态演化过程,预测不同作战阶段的效能变化,为指挥决策提供时序上的参考。虽然当前文献中未明确提及马尔可夫链在有人机/无人机协同作战评估中的应用,但该方法为动态评估的典型手段之一,在有人机/无人机协同作战评估领域具有重要应用价值。

3.3 数据驱动方法

数据驱动方法利用实际观测数据、仿真数据或历史数据,通过统计分析和机器学习技术挖掘数据中隐藏的模式和关系,进而评估有人机/无人机协同作战效能。数据驱动方法能够减少主观偏见,发现人脑难以直观发现的复杂关系。

3.3.1 机器学习与神经网络

机器学习算法通过从数据中自动学习模型,为有人机/无人机协同作战效能评估提供了强大的工具。其中,神经网络因其强大的非线性拟合能力和容错性,在此领域应用尤为广泛。文献[55]从感知、决策、行为和安全 4 个维度构建评价指标体系,使用奇异值分解设计改进了 Hopfield 神经网络权重矩阵。仿真显示,改进算法能删除非关键连接权重,降低网络复杂度,更易实现无人机自主能力的量化评价,可辅助优化有人机与无人机协同作战中无人机的适配性评估。文献[56]采用了方差全局敏感性方法来评估模型指标,并找出对作战效能有重大影响的指标。同时,利用 BP 神经网络来克服传统评估方法在处理大量数据时的不足。文献

[57]将作战效能等级分为优、良、中、可、差 5 个等级,并将其作为离散型 Hopfield 神经网络的平衡

点,当网络趋于平衡时,平衡点即为分类等级。模型设计流程如图 4 所示。

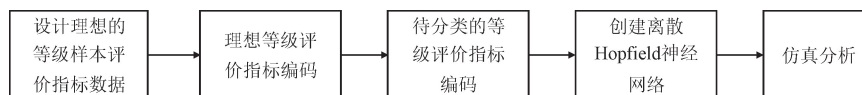


图 4 基于 Hopfield 的模型设计流程^[57]

Fig. 4 Model design process based on Hopfield^[57]

3.3.2 仿真实验与多智能体系统模拟

仿真实验通过构建有人机/无人机协同作战的虚拟环境,在受控条件下生成大量实验数据,为效能评估提供数据支持。文献[58]提出的有人机/无人机协同作战网络模型本质上是一种多智能体建模思路,通过网络拓扑结构分析评估协同效果。该方法在确定了有人机/无人机指控体系结构的基础上,生成了一种有人机/无人机协同作战协同效果评估模型,并对协同作战网络拓扑模型进行了协同效果评估。文献[59]引入交通组织与扰动分析器(traffic organization and perturbation analyzer, TOPAZ)方法,基于仿真实验,通过蒙特卡罗模拟和不确定性评估,实现效能评估。

3.4 混合评估方法

混合评估方法通过融合不同方法的优势,弥补单一方法的局限性,提高有人机/无人机协同作战效能评估的全面性和准确性,已成为当前研究的主流趋势。

3.4.1 灰色层次分析法

AHP 通过建立层次结构模型和判断矩阵,降低了多指标综合评价的主观性,而灰色系统理论则擅长处理信息不完整、不确定的小样本问题。灰色层次分析法首先利用 AHP 构建层次结构模型并确定指标权重;然后基于灰色理论建立灰色评价矩阵,计算灰色评价权向量和权矩阵;最后通过对数据进行进一步处理和预测,提高了评估结果的客观性和准确性。如文献[60]采用灰色层次分析法对侦察无人机生存能力进行评估,同时搭配了专家打分法辅助完成评估流程。相比单纯使用层次分析法,评估结果更具客观性和可行性。

灰色层次分析法的核心优势在于能够处理小样本、贫信息的不确定性问题,这与实际作战环境中数据获取困难的情况高度契合。

3.4.2 贝叶斯网络与不确定性推理

贝叶斯网络是一种将概率统计应用于复杂领域推理的图形化模型,通过有向无环图表示变量间的因果关系,通过条件概率表描述关系的强度。在

有人机/无人机协同作战效能评估中,贝叶斯网络能够有效处理不确定性推理和动态演化问题。

文献[61]以贝叶斯网络为基础构建评估模型,通过结构学习和参数学习两步完成模型搭建。通过贝叶斯网络的推理方式,分别对单个编队和整体编队的作战效能展开推理验证,为无人机编队作战的战术决策提供科学依据。将贝叶斯网络方法与其他评估方法进行融合,可以综合利用各自的优势,得到更加客观的结果。文献[62]先以 ADC 效能评估模型为基础框架,搭建适配无人机作战的效能评估指标体系,确保评估维度覆盖无人机作战的核心能力范畴。随后引入贝叶斯网络弥补传统模型的缺陷,计算得到无人机不同层级作战能力之间的相互影响逻辑。文献[63]融合灰色理论、模糊理论以及贝叶斯网络,构建出适配编队突防场景的评估模型,既能够捕捉复杂战场中的各类不确定因素,又可以通过网络推理得出效能评估结果,适配单机到编队的不同评估需求。文献[64]基于作战仿真推演和人工神经网络方法,构建作战效能评估指标体系、设计作战推演流程,最终获得评估结果。

当前公开发表的文献中还未有专门研究贝叶斯网络或其混合评估方法在有人机/无人机协同作战评估中的应用,但其在相关领域展现出的处理动态不确定性的特性,可适配作战过程中的状态转移和不确定性推理,通过引入时间维度,实现对各作战阶段效能的动态评估。

经验驱动、模型驱动、数据驱动和混合评估这 4 种效能评估方法的对比如表 4 所示。从方法演进方向看,早期经验驱动方法依赖领域专家知识和实战演练经验数据,主观性强,扩展性差。为此,引入模型驱动,从数学模型和军事理论入手,构建机理清晰的作战模型,但在动态对抗面前显得僵化。与此同时,大数据与人工智能技术催生了数据驱动评估,如神经网络等方法,能挖掘复杂战场模式,但其“黑箱”特性与军事决策所需的可解释性存在根本矛盾。因此,当前混合评估方法成为趋势,未来需要通过集成多方法优势,在可解释性与预测性之间

寻求平衡,其核心在于如何将人的认知模型与机器的计算模型有机融合,以兼顾解释性与预测性。

表 4 不同效能评估方法对比

Table 4 Comparison of different effectiveness evaluation methods

方法	理论基础	适用场景	优势	局限	代表方法
经验驱动	领域专家知识、实战演练经验数据	数据缺乏的初期研究	直观,简单有效	主观性强,扩展性差	OODA、专家评估法等
模型驱动	数学模型、军事理论	机理清晰的静态评估	可解释性强、结构严谨	对动态环境适应性弱	ADC、博弈论、马尔可夫链等
数据驱动	统计分析、机器学习技术	数据丰富,模式复杂,映射具有非线性	能挖掘隐性关系、适应性强	黑箱特性、依赖数据质量	Hopfield 神经网络等
混合评估	多方法融合	复杂动态作战环境	兼顾解释性与预测性	架构复杂、集成难度大	灰色层次分析法等

4 面向有人机/无人机协同作战的效能评估体系构建方案

基于前述有人机/无人机协同作战在虚实互驱、深度融合、动态闭环以及双向驱动上的特点,提出面向有人机/无人机协同作战的效能评估体系构建方案,如图 5 所示,可分为基础、核心与导向 3 个层次,并具备鲜明的智能化特征。

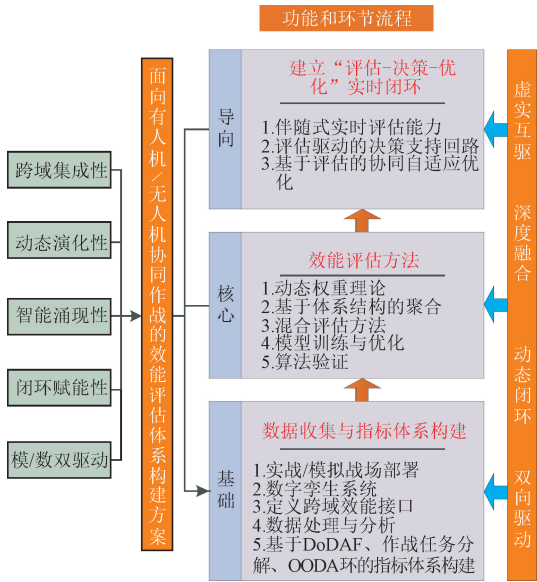


图 5 效能评估体系构建方案

Fig. 5 Construction plan for the effectiveness evaluation system

4.1 基础层

体系的构建立足于扎实的数据与指标基础。通过实战演习与数字孪生系统构成的“虚实互驱”环境获取多源数据,并依托 DoDAF、作战任务分解及 OODA 环等经典理论,构建跨域集成的指标体

系,这一层确保了评估的输入既来源于真实战场映射,又具有严谨的理论支撑。

4.2 核心层

在坚实的数据基础上,体系的核心在于一系列先进的评估方法。这些方法旨在解决传统评估的局限,包括采用动态权重理论以适应不同战场阶段,运用基于体系结构的聚合方法来衡量整体协同效能,并融合多种评估模型与智能算法。此外,该方法论强调模型的持续训练、优化与验证,体现了“模/数双驱动”的学习进化能力,使评估模型能够不断逼近复杂战场的真实情况。

4.3 导向层

所有基础工作与核心方法都服务于顶层设计的闭环赋能导向,这一导向具体体现为 3 种关键能力:一是“伴随式实时评估能力”,实现对战效能的持续监控;二是“评估驱动的决策支持回路”,直接将分析结果反馈至指挥环节;三是“基于评估的协同自适应优化”,自动调整有人机与无人机的协同策略。这 3 个环节紧密衔接,形成了一个能够动态演化、自主优化的智能闭环。

该方案将数据、模型与决策进行了关联整合,在跨域信息集成、动态过程更新和闭环反馈方面展现出一定潜力,可为评估体系从静态度量向动态支持过渡提供思路。但当前设计尚未纳入人机信任校准机制,相关评估方法也有待补充。

5 存在问题及发展趋势

本文系统梳理了有人机/无人机协同作战效能评估的体系特性、指标构建、权重确定与评估方法,

揭示了从静态单平台评估向动态跨域综合评估的演进脉络。研究表明,基于 DoDAF、任务分解、作战环和 OODA 环的指标体系构建方法日趋成熟,模型驱动、数据驱动及混合评估方法为解决协同系统的非线性、不确定性等问题提供了多样化工具。然而,随着战争形态向智能化、体系化加速演进,现有评估模式仍面临根本性挑战,未来研究需寻求突破性进展。

首先,指挥员的认知决策、人机交互信任等关键人因要素,难以转化为可量化的模型参数,成为制约评估精度的主要障碍;其次,现有模型多在理想设定下运行,对高强度动态对抗环境的适应性与鲁棒性普遍不足;再者,真实作战数据的匮乏与验证手段的缺失,使得模型的可信度与实用性大打折扣;最后,跨域作战背景下,各域作战单元效能“度量衡”不统一,导致体系级效能难以进行有机聚合与衡量。为突破以上瓶颈,未来工作可重点关注以下几个方面。

5.1 发展机理与数据混合驱动的评估新方法

单纯依赖模型或数据的路径已触及天花板,两者的深度融合是必然选择。在权重确定方面,可探索注意力机制与深度强化学习,使指标权重能根据战场情境动态演化。在效能聚合方面,应发展物理信息神经网络,将 OODA 环、作战环等军事机理以约束形式嵌入深度学习模型,增强其可解释性。同时,深化动态贝叶斯网络与模糊逻辑在处理时序与不确定性方面的应用,使评估结论更能反映战场的模糊性与动态性。

5.2 探索基于深度强化学习的自适应评估策略

传统的评估策略多为静态预设,难以适应高动态战场,而基于深度强化学习的自适应评估策略通过构建“环境—评估—反馈”的闭环交互框架,可实现评估策略的自进化。具体而言,将评估对象状态作为环境输入,将指标权重调整、聚合方法选择等作为策略动作,以逼近真实作战效果为奖励信号,通过持续试错学习最优评估策略。

5.3 发展基于大语言模型的语义鸿沟破解途径

传统评估系统依赖结构化数据输入,难以理解和响应高层级、模糊的自然语言任务描述,通过引入大语言模型,将评估结构化数据扩展到自然语言与多模态数据,直观、高效、准确实现从“意图高级指令”到“评估结果”的全评估流程,打通自然语言指令与量化评估的语义鸿沟。

5.4 构建“人在回路”的智能评估数字孪生系统

评估系统需响应并量化人的决策行为,短期内,应着力构建实时同步、高保真的分布式仿真环境,实现对物理、信息交互的精准复现。中期目标应融合神经工效学与生理传感技术,对指挥员的认知状态进行实时监测与建模,打通从物理域、信息域到认知域的评估屏障。长远目标是发展具备在线学习与前瞻预测能力的评估系统,为指挥决策提供从实时效能诊断到未来态势推演的全链条支撑。

5.5 确立模块化与可解释的跨域评估框架

为解决跨域协同的评估难题,需设计一种松耦合的体系架构。其核心是定义跨域协同的通用效能接口,允许各域封装其特有的评估模型。可借鉴基于服务的架构思想或运用知识图谱技术,实现各域评估结果的动态集成与关联分析。进一步引入博弈论与联盟形成理论,从机理上量化跨域协作带来的协同增益与代价,为体系级效能涌现提供理论依据和计算手段。

有人机/无人机协同作战效能评估需要超越“单点方法优化”的局限,转向理论、模型、数据、系统“四位一体”的体系化攻关。通过构建“人在回路”的数字孪生评估环境、确立跨域协同的评估标准,并发展机理与数据融合的智能评估内核,才能最终为构建高效、可靠、可信的下一代协同作战体系提供坚实的理论基石与决策依据。

参考文献

- [1] Huo Mengzhen, Duan Haibin. Three-dimension cluster space formation control of manned/unmanned aerial team subject to input constraint[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(6): 8596-8604.
- [2] Ribeiro M, Ellerbroek J, Hoekstra J. Review of conflict resolution methods for manned and unmanned aviation[J]. Aerospace, 2020, 7(6): 79.
- [3] Huo Mengzhen, Duan Haibin, Ding Xilun. Manned aircraft and unmanned aerial vehicle heterogeneous formation flight control via heterogeneous pigeon flock consistency[J]. Unmanned Systems, 2021, 9(3): 227-236.
- [4] Ma Ning, Cao Yunfeng. Consensus-based distributed formation control for coordinated battle system of manned/unmanned aerial vehicles[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2024, 46(1): 3-14.
- [5] Wang Xinyao, Cao Yunfeng. An optimization method

- for manned/unmanned aerial vehicle collaborative operation system architecture based on PGQNSGA-II[J]. *Aerospace*, 2024, 11(12): 1003.
- [6] 丁达理, 谢磊, 王渊. 有人机/无人机协同作战运用及对战争形态影响[J]. *无人系统技术*, 2020, 3(4): 1-9.
Ding Dali, Xie Lei, Wang Yuan. The application of manned/unmanned aerial vehicle cooperative combat and its influence on war form[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2020, 3(4): 1-9.
- [7] 赵钱, 赵伟, 王航, 等. 美军有人/无人机协同作战项目介绍及发展趋势研判[J]. *空天防御*, 2025, 8(1): 24-30.
Zhao Qian, Zhao Wei, Wang Hang, et al. The United States military's manned/unmanned aerial vehicle collaborative combat projects, tests introduction and development trends research and judgment[J]. *Air & Space Defense*, 2025, 8(1): 24-30.
- [8] 姜鹏, 王瑞, 郑力会, 等. 国外有人/无人机协同作战研究现状与发展趋势[J]. *兵工自动化*, 2023, 42(3): 84-89.
Jiang Peng, Wang Rui, Zheng Lihui, et al. Research status and development trend of manned/unmanned aerial vehicle cooperative combat in foreign countries[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2023, 42(3): 84-89.
- [9] 王瑛, 史翔宇, 李超. 基于 DoDAF 的无人机协同作战效能评估[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2020, 21(6): 66-72.
Wang Ying, Shi Xiangyu, Li Chao. Research on evaluation of UAV cooperative combat effectiveness based on DoDAF[J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2020, 21(6): 66-72.
- [10] 王新尧, 曹云峰, 孙厚俊, 等. 基于 DoDAF 的有人/无人机协同作战体系结构建模[J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(10): 2265-2274.
Wang Xinyao, Cao Yunfeng, Sun Houjun, et al. Modeling for cooperative combat system architecture of manned/unmanned aerial vehicle based on DoDAF[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(10): 2265-2274.
- [11] Xiao Jin, Chen Fengnan, Cao Siyuan, et al. Modeling and simulation of manned and unmanned cooperative reconnaissance and surveillance scenario based on DoDAF[C]//2024 IEEE 19th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 1-5.
- [12] 王浩宇, 陈灯, 李磊, 等. 基于集成学习的空战作战体系效能评估[J]. *火力与指挥控制*, 2023, 48(9): 82-91.
Wang Haoyu, Chen Deng, Li Lei, et al. Effectiveness evaluation of air combat system based on ensemble learning[J]. *Fire Control & Command Control*, 2023, 48(9): 82-91.
- [13] 刘丽君, 涂天佳. 基于 DoDAF 作战视图的无人直升机协同对海作战建模分析[J]. *电子技术与软件工程*, 2018(3): 129-131.
- [14] 马九方, 杨森, 黄欣鑫. 基于灰色层次分析法的有人/无人协同作战效能评估[J]. *电讯技术*, 2023, 63(10): 1625-1630.
Ma Jiufang, Yang Sen, Huang Xinxin. Effectiveness evaluation of manned-unmanned collaborative combat based on grey analytic hierarchy process[J]. *Telecommunication Engineering*, 2023, 63(10): 1625-1630.
- [15] 齐智敏, 张海林, 杨鹏飞. 无人机集群协同侦察任务效能评估方法研究[J]. *舰船电子工程*, 2023, 43(3): 124-127, 182.
Qi Zhimin, Zhang Hailin, Yang Pengfei. Evaluation method research on cooperative reconnaissance mission effectiveness of intelligent UAV cluster[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2023, 43(3): 124-127, 182.
- [16] 王光源, 孙涛, 毛世超, 等. 基于任务协同的有人机/无人机对海攻击作战效能评估研究[J]. *海军航空工程学院学报*, 2017, 32(5): 491-495.
Wang Guangyuan, Sun Tao, Mao Shichao, et al. Research on effectiveness assessment for attack against maritime targets of manned/unmanned vehicles based on mission cooperative[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2017, 32(5): 491-495.
- [17] 韩月明, 刘铁林, 薛辉. 基于灰色理论的有人/无人机协同作战效能评估[J]. *军事运筹与评估*, 2023, 38(1): 20-26.
- [18] 林晋福, 朱玉, 张佳强, 等. 基于并行作战环的无人机集群协同作战能力评估方法[J]. *空军工程大学学报*, 2023, 24(5): 33-40.
Lin Jinfu, Zhu Yu, Zhang Jiaqiang, et al. Evaluation method of UAV swarm cooperative operational capability based on parallel operation ring[J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2023, 24(5): 33-40.
- [19] Wang Xinyao, Cao Yunfeng, Ding Meng, et al. Research progress in modeling and evaluation of cooperative operation system-of-systems for manned-unmanned aerial vehicles[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2024, 39(4): 6-31.
- [20] 吴承运, 董彦非. 基于作战环和信息熵的有人机/无人僚机协同作战效能评估方法[J]. *火力与指挥控制*, 2025, 50(7): 104-111, 119.

- Wu Chengyun, Dong Yanfei. The evaluation method of manned/unmanned wingman coordination combat effectiveness based on operational loop and information entropy[J]. *Fire Control & Command Control*, 2025, 50(7):104-111, 119.
- [21] 黄吉传,周德云. 无人机协同作战效能评估指标体系设计与分析[J]. *西安工业大学学报*, 2020, 40(1):38-44.
- Huang Jichuan, Zhou Deyun. Design and analysis of an evaluation index system for UAV cooperative combat effectiveness[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2020, 40(1):38-44.
- [22] 张宏宏,李文华,郑家毅,等. 有人/无人机协同作战:概念、技术与挑战[J]. *航空学报*, 2024, 45(15):168-194.
- Zhang Honghong, Li Wenhua, Zheng Jiayi, et al. Manned/unmanned aerial vehicle cooperative combat system: concepts, technologies, and challenges[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(15):168-194.
- [23] 熊端琴,刘庆峰,王嫣嫣,等. 无人机地面控制站人机工效静态评估[J]. *人类工效学*, 2022, 28(2):1-4.
- Xiong Duanqin, Liu Qingfeng, Wang Yanyan, et al. Static ergonomics evaluation of UAV ground control station[J]. *Chinese Journal of Ergonomics*, 2022, 28(2):1-4.
- [24] 潘长鹏,韩玉龙,庄益夫. 舰载无人机编队协同对海突击作战效能评估指标体系研究[J]. *战术导弹技术*, 2019(2):25-32.
- Pan Changpeng, Han Yulong, Zhuang Yifu. Research on the operational effectiveness evaluation indices system of ship-based UAV formation cooperative air-to-sea attack[J]. *Tactical Missile Technology*, 2019(2):25-32.
- [25] Yin Hao, Fan Jieru, Hou Tingting, et al. Efficiency analysis of typical application based on manned/unmanned aerial vehicle cooperative combat[C]//2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 314-319.
- [26] 史国庆,武凡,张林,等. 基于组合赋权法的有人/无人机协同作战能力分析[J]. *火力与指挥控制*, 2019, 44(4):87-91.
- Shi Guoqing, Wu Fan, Zhang Lin, et al. Analysis of MAV/UAV cooperative engagement capability based on combination weight method[J]. *Fire Control & Command Control*, 2019, 44(4):87-91.
- [27] 常会振,秦大国,孙盛智,等. 基于 ADC 模型优化的海上无人机作战效能评估[J]. *兵器装备工程学报*, 2023, 44(9):58-68.
- Chang Huizhen, Qin Daguo, Sun Shengzhi, et al. Operational effectiveness evaluation of marine unmanned aerial vehicle based on ADC model optimization[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(9):58-68.
- [28] 朱学耕,刘家路,高洪龙,等. 基于 DEMATEL-TFNAHP 的合成营作战能力评估指标权重确定方法[J]. *火力与指挥控制*, 2021, 46(6):58-63.
- Zhu Xuegeng, Liu Jialu, Gao Honglong, et al. A method for determining the weight of combat capability evaluation index in synthetic battalion based on DEMATEL-TFNAHP[J]. *Fire Control & Command Control*, 2021, 46(6):58-63.
- [29] 王彪,赵建新,陈兵,等. 基于改进 AHP 的无人机作战能力量化研究[J]. *火力与指挥控制*, 2021, 46(6):115-120.
- Wang Biao, Zhao Jianxin, Chen Bing, et al. Quantitative research on UAV combat capability based on improved AHP[J]. *Fire Control & Command Control*, 2021, 46(6):115-120.
- [30] 李琦,魏潇龙,李胜厚,等. 有人机/无人机协同作战效能的物元可拓评价[J]. *火力与指挥控制*, 2024, 49(5):9-17.
- Li Qi, Wei Xiaolong, Li Shenghou, et al. Research on matter-element extension evaluation of cooperative combat effectiveness of MAV/UAV[J]. *Fire Control & Command Control*, 2024, 49(5):9-17.
- [31] 张彦斌,杨智慧,王伟,等. 基于滑动窗口 CRITIC-G1 的空战态势评估[J]. *空军工程大学学报*, 2023, 24(3):73-79.
- Zhang Yanbin, Yang Zhihui, Wang Wei, et al. An assessment of situation in air combat based on sliding window CRITIC-G1[J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2023, 24(3):73-79.
- [32] 韩月明,张红艳,姜相争. 基于组合赋权的无人机集群作战效能评估[J]. *舰船电子工程*, 2024, 44(10):119-123, 138.
- Han Yueming, Zhang Hongyan, Jiang Xiangzheng. Evaluation of unmanned aerial vehicle swarm combat effectiveness based on combination weighting[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2024, 44(10):119-123, 138.
- [33] Zou Yucan, Gou Yangming, Long Jiang. Intelligent autonomous fuzzy comprehensive evaluation of combat UAV based on combination weighting method[C]//2024 IEEE 19th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 1-6.
- [34] 钟赞,姚佩阳,孙昱. 有人机/UCAV 编队协同作战决策分配方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(11):

- 2984-2992.
- Zhong Yun, Yao Peiyang, Sun Yu. Decision-making allocation method in manned/unmanned combat aerial vehicle cooperative engagement[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2016, 36(11): 2984-2992.
- [35] 丁元明, 龙志勇, 胡瑞祥, 等. 基于模糊层次分析和偏离度的无人机作战效能评估[J]. *火力与指挥控制*, 2023, 48(7): 55-65, 73.
- Ding Yuanming, Long Zhiyong, Hu Ruixiang, et al. UAV combat effectiveness evaluation based on fuzzy analytic hierarchy process and deviation degrees[J]. *Fire Control & Command Control*, 2023, 48(7): 55-65, 73.
- [36] 杨作宾, 王远航. 基于 DEMATEL-AHP 的某系统作战效能评估指标权值问题研究[J]. *舰船电子工程*, 2022, 42(11): 140-145.
- Yang Zuobin, Wang Yuanhang. Research on the weight of operational effectiveness evaluation assessment indicators about a certain system based on DEMATEL-AHP[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2022, 42(11): 140-145.
- [37] 朱立成, 孙青, 端军红, 等. 基于机动动作类型识别的飞行员飞行训练质量自动评估方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(12): 3932-3940.
- Zhu Licheng, Sun Qing, Duan Junhong, et al. Automatic evaluation method of pilot flight training quality based on maneuver action type recognition[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(12): 3932-3940.
- [38] 安栋, 王媛媛, 宋宁宁, 等. 强化学习评估指标的系统性分析与优化研究[J]. *电子技术应用*, 2025, 51(10): 17-23.
- An Dong, Wang Yuanyuan, Song Ningning, et al. Systematic analysis and optimization research on reinforcement learning evaluation metrics[J]. *Application of Electronic Technique*, 2025, 51(10): 17-23.
- [39] 董彦非, 张旺, 崔巍. 有人机/无人机协同空地攻击效能评估的综合指数模型[J]. *火力与指挥控制*, 2015, 40(2): 58-62.
- Dong Yanfei, Zhang Wang, Cui Wei. Synthesized index model for cooperation of manned/unmanned fighters in air-to-ground attacking effectiveness assessment[J]. *Fire Control & Command Control*, 2015, 40(2): 58-62.
- [40] 张永利, 孙治水, 周荣坤. 基于 AHP-模糊综合评判法的有人机/无人机协同作战效能评估[J]. *舰船电子对抗*, 2015, 38(6): 80-84, 92.
- Zhang Yongli, Sun Zhishui, Zhou Rongkun. Efficiency evaluation of manned/unmanned aerial vehicles coordinate operation based on AHP-Fuzzy synthetic evaluation method[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2015, 38(6): 80-84, 92.
- [41] 徐达, 周诚, 曹振地, 等. 基于物元可拓法的地面无人作战装备作战效能评估[J]. *火炮发射与控制学报*, 2022, 43(5): 29-34.
- Xu Da, Zhou Cheng, Cao Zhendi, et al. Combat effectiveness evaluation of unmanned ground combat equipment based on matter element extension method[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2022, 43(5): 29-34.
- [42] 钱欢, 艾盼, 何缓. 基于灰色层次法的电子对抗侦察装备作战效能评估[J]. *舰船电子工程*, 2022, 42(10): 133-135, 150.
- Qian Huan, Ai Pan, He Huan. Combat effectiveness evaluation of electronic countermeasure reconnaissance equipment based on grey hierarchy method[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2022, 42(10): 133-135, 150.
- [43] 姜禹呈, 郭基联. 有人机/无人机协同效果评估模型设计[J]. *军事运筹与系统工程*, 2016, 30(3): 28-31.
- Jiang Yucheng, Guo Jilian. Design of a model for evaluating the collaborative effectiveness of fixed-wing aircraft and unmanned aerial vehicles[J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2016, 30(3): 28-31.
- [44] 赵子俊, 陈士涛, 李大喜, 等. 基于体系结构设计和云模型的蜂群作战效能评估[J]. *空军工程大学学报*, 2025, 26(5): 98-108.
- Zhao Zijun, Chen Shitao, Li Daxi, et al. An effective assessment of drone swarm operations based on architecture design and cloud model[J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2025, 26(5): 98-108.
- [45] Fan Jieru, Li Dongguang, Li Rupeng. Evaluation of MAV/UAV collaborative combat capability based on network structure[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 2018(1): 5301752.
- [46] Fan Jieru, Li Dongguang, Li Rupeng, et al. Analysis on MAV/UAV cooperative combat based on complex network[J]. *Defence Technology*, 2020, 16(1): 150-157.
- [47] Yang Shulan, Hou Zhiwei, Chen Hongbo. Evaluation of vulnerability of MAV/UAV collaborative combat network based on complex network[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2023, 172: 113500.
- [48] Zhao Zijun, Chen Shitao, Ru Le, et al. A quality evaluation method for drone swarm command and control networks based on complex network[J]. *Drones*, 2025, 9(12): 839.
- [49] 党晨光, 李超, 封慧勇, 等. 陆空无人集群协同作战效能评估[J]. *兵器装备工程学报*, 2025, 46(8): 53-59.
- Dang Chenguang, Li Chao, Feng Huiyong, et al. Evalu-

- ation of the effectiveness of air-ground unmanned swarm cooperative operations[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2025, 46(8): 53-59.
- [50] 孙鹏耀, 黄炎焱, 王凯生, 等. 不确定态势下无人机群协同作战效能评估[J]. *指挥控制与仿真*, 2025, 47(1): 10-22.
- Sun Pengyao, Huang Yanyan, Wang Kaisheng, et al. Evaluation of combat effectiveness of unmanned aerial vehicle group in uncertain situations [J]. *Command Control & Simulation*, 2025, 47(1): 10-22.
- [51] 何胜杰, 郭强, 王兴虎, 等. 基于 ADC 分析法优化的无人机效能评估方法[J]. *无人系统技术*, 2022, 5(2): 106-116.
- He Shengjie, Guo Qiang, Wang Xinghu, et al. UAV performance evaluation method optimized based on ADC analysis method[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2022, 5(2): 106-116.
- [52] Wang Xinyao, Cao Yunfeng, Ding Meng, et al. Evaluation of crewed/uncrewed aerial vehicle collaborative operation system effectiveness based on AMC-HFADC [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2025, 40(12): 20-35.
- [53] 黄宇铭, 葛冰峰, 侯泽强, 等. 基于冲突分析图模型的多无人机协同空战博弈[J]. *系统工程理论与实践*, 2023, 43(9): 2714-2725.
- Huang Yuming, Ge Bingfeng, Hou Zeqiang, et al. Multi-unmanned aerial vehicle cooperative air combat gaming based on graph model for conflict resolution [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2023, 43(9): 2714-2725.
- [54] Jia Niping, Yang Zhiwei, Yang Kewei. Operational effectiveness evaluation of the swarming UAVs combat system based on a system dynamics model[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 25209-25224.
- [55] 丰雨轩, 刘树光, 解武杰, 等. 基于改进 Hopfield 神经网络的对地攻击型无人机自主能力评价[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(4): 835-843.
- Feng Yuxuan, Liu Shuguang, Xie Wujie, et al. Autonomous capability evaluation of ground-attack UAV based on improved Hopfield neural network[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(4): 835-843.
- [56] Wang Jinlong, Wu Fei. A UAV combat effectiveness evaluation method based on BP neural network and variance sensitivity[C]//2024 9th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 1170-1176.
- [57] 王坦, 杨森, 齐晓慧, 等. 基于 Hopfield 网络的有人机/无人机协同作战效能评估[J]. *电光与控制*, 2021, 28(10): 80-84.
- Wang Tan, Yang Sen, Qi Xiaohui, et al. Effectiveness evaluation of MAV/UVA cooperative operations based on Hopfield neural network[J]. *Electronics Optics & Control*, 2021, 28(10): 80-84.
- [58] 姜禹呈, 郭基联, 沈安慰, 等. 有人机/无人机协同作战编队优化建模设计[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(9): 132-136.
- Jiang Yucheng, Guo Jilian, Shen Anwei, et al. Design of the optimization model about manned /unmanned aerial vehicle cooperative combat formation[J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(9): 132-136.
- [59] 张宏宏, 甘旭升, 孙静娟, 等. 基于 STPA-TOPAZ 的低空无人机冲突解脱安全性分析[J]. *航空学报*, 2022, 43(7): 262-274.
- Zhang Honghong, Gan Xusheng, Sun Jingjuan, et al. Analysis of low altitude UAV conflict resolution safety based on STPA-TOPAZ [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(7): 262-274.
- [60] 王晓红, 李龙, 王盛春, 等. 基于灰色层次分析法的侦察无人机生存能力评估[J]. *兵工自动化*, 2022, 41(2): 23-27.
- Wang Xiaohong, Li Long, Wang Shengchun, et al. Assessment of reconnaissance UAV viability based on GAHP[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2022, 41(2): 23-27.
- [61] 陈宏建. 基于贝叶斯网络的无人机编队作战效能评估方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- Chen Hongjian. Research on combat effectiveness evaluation method of UAV formation based on Bayesian network[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [62] 薛松, 高原, 张炜, 等. 基于贝叶斯网络改进 ADC 模型的无人机作战效能评估方法[J]. *火力与指挥控制*, 2025, 50(4): 49-56.
- Xue Song, Gao Yuan, Zhang Wei, et al. UAV combat effectiveness evaluation based on improved ADC model by Bayesian network[J]. *Fire Control & Command Control*, 2025, 50(4): 49-56.
- [63] 赵彬, 周中良, 阮铨巍, 等. 基于灰色模糊贝叶斯网络算法的编队突防作战效能评估方法[J]. *计算机应用*, 2017, 37(S1): 356-360, 364.
- Zhao Bin, Zhou Zhongliang, Ruan Chengwei, et al. An evaluation method for formation penetration combat effectiveness based on the grey fuzzy Bayesian network algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2017,

37(S1):356-360,364.
[64] 赵子俊,陈士涛,贺维艳,等. 有人/无人机协同作战效能智能评估方法[C/OL](2025-12-16)[2026-1-12].
<https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20251216.0900.002>.

Zhao Zijun, Chen Shitao, He Weiyan, et al. Intelligent Assessment Method for MAV/UAV Collaborative Combat Effectiveness[C/OL](2025-12-16)[2026-01-12]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20251216.0900.002>.

Overview of Effectiveness Evaluation for Manned/ Unmanned Aerial Vehicle Cooperative Combat

QI Duo, QIU Shidai*, REN Xiaoyue, HE Xingyu, MA Jiacheng, DAI Jiangbin

(Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

ABSTRACT: Manned/unmanned aerial vehicle cooperative combat is a core combat paradigm in future intelligent warfare, and its effectiveness evaluation has become a critical link in constructing system combat capabilities. This study analyzed the inherent complexity of effectiveness evaluation by examining the hierarchical characteristics and interaction mechanisms of cooperative systems. It summarized indicator system construction pathways based on department of defense architecture framework, combat mission decomposition, and integration of combat cycle theories and observation, orientation, decision and action, while reviewing weight determination and effectiveness aggregation methods. It compared the applicability and limitations of mainstream approaches, such as experience-driven, model-driven, data-driven, and hybrid evaluation methods. Research indicates that current evaluation practices are evolving from static single-platform evaluations to dynamic cross-domain comprehensive evaluations, yet still face challenges including insufficient adaptability to complex environments, difficulty in quantifying human factors, and weak support from real-world data. To address these issues, it was proposed to establish a real-time closed-loop system for evaluation, decision-making, and optimization that runs through the entire combat process, promoting the transformation of collaborative combat mode from static and post analysis to dynamic and accompanying empowerment. However, there is still a lack of design and evaluation of the “human-machine trust calibration” mechanism. Future efforts should focus on developing intelligent evaluation technologies, constructing cross-domain evaluation frameworks, and overcoming bottlenecks in dynamic real-time evaluation to provide effective theoretical support for cooperative combat system development.

KEYWORDS: manned/unmanned aerial vehicle cooperative combat; effectiveness evaluation; indicator system; evaluation methods

(编辑:夏菁)