

基于 AHP-熵权法的复杂山地环境无人机作战效能评估

康 巍, 凌海风, 褚德天, 张海涛, 柏林元

(陆军工程大学 野战工程学院, 南京 210007)

摘要: 复杂山地环境对无人机协同打击地面战术目标的作战效能构成严峻挑战, 亟需建立科学且适应性强的评估体系; 基于层次分析法 (AHP) 与熵权法 (EWM) 的主客观组合赋权策略, 构建了包含信息获取、目标识别、指挥决策、打击效能、协同效率及山地适应性 6 个维度的综合评价指标体系; 赋权结果表明, 打击效能 (36.33%) 与山地适应性 (24.75%) 是决定无人机整体作战效能的主导维度, 在核心指标层面, 地形修正圆概率误差 (CEP) (权重 27.98%) 和地形匹配飞行指数 (权重 29.70%) 分别位居打击效果维度和山地适应性维度之首; 该框架为量化评估复杂山地环境下无人机协同打击效能、识别系统短板、优化资源配置与战术决策等, 提供了可操作的理论依据与实践指导。

关键词: 复杂山地环境; 作战效能评估; 层次分析法; 熵权法; 无人机协同作战; 指标体系

UAV Operational Effectiveness Evaluation in Complex Mountainous Terrains Based on AHP and EWM

KANG Wei, LING Haifeng, CHU Detian, ZHANG Haitao, BAI Linyuan

(College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: Complex mountainous terrains pose significant challenges to the operational effectiveness of UAVs in collaboratively detecting and striking ground tactical targets, it is necessary to establish a scientific and adaptive evaluation system. Based on a subjective-objective combined weighting strategy integrating the analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method (EWM), it constructs a comprehensive evaluation index system, including six dimensions: information acquisition, target recognition, command decision-making, strike effectiveness, collaboration efficiency, and mountain adaptability. Weighting results show that the strike effectiveness (36.33%) and mountain adaptability (24.75%) are the primary dimensional indicators determining the overall operational effectiveness of UAVs. In terms of core indicators, the terrain-corrected circular error probable (CEP) with a weight of 27.98% and terrain-matched flight index with a weight of 29.70% rank first in the strike effectiveness and mountain adaptability dimensions, respectively. This framework provides an actionable theoretical basis and practical guidance for the quantitative evaluation of UAV collaborative reconnaissance-strike effectiveness in complex mountainous environments, identification of system weaknesses, optimization of resource allocation, and tactical decision-making.

Keywords: complex mountainous terrains; operational effectiveness; AHP; EWM; UAV collaborative operations; indicator system

0 引言

尽管无人机作战正在向“集群化、智能化”方向发展, 但在复杂山地环境中进行协同侦察打击任务仍面临诸多严峻挑战。主要包括因地形遮蔽效应导致的雷达信

号衰减、复杂山地电磁环境产生的动态干扰威胁以及多机任务分配冲突率升高等。现有作战效能评估指标体系在复杂山地环境应用中, 还存在显著局限: 1) 环境适配性不足, 普遍缺乏对山地地形 (如坡度效应、遮蔽效应) 和特设电磁气象环境的针对性考量^[1]; 2) 动态对

收稿日期: 2025-07-08; 修回日期: 2025-08-28。

作者简介: 康 巍 (1985-), 男, 硕士研究生, 工程师。

凌海风 (1972-), 女, 博士研究生, 教授。

通讯作者: 柏林元 (1981-), 男, 博士研究生。

引用格式: 康 巍, 凌海风, 褚德天, 等. 基于 AHP-熵权法的复杂山地环境无人机作战效能评估[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(10): 320-329.

抗性弱化, 未能有效量化敌方主动干扰对侦察、通信、定位等关键环节的效能衰减^[2]; 3) 可解释性与验证性欠缺, 评估结果往往难以直接关联具体战术短板^[3]。

现有评估体系的局限性主要体现在以下方面: 关注平原/开阔地形评估多于复杂山地环境专项评估^[4]; 定性描述指标占比高, 量化、可测度指标相对薄弱^[5]; 聚焦单一平台或单项能力(侦察、打击)效能, 对多机协同下“侦—控—打”闭环综合效能评估的系统性不足^[6]。例如, 传统评估体系主要针对平原或开阔地形设计, 其核心指标如“通信链路稳定性”或“目标识别率”未充分考虑山地环境特有的遮蔽效应、电磁干扰和气象突变等因素。此外, 现有方法多采用单一赋权策略, 难以平衡专家经验与数据驱动的互补性, 导致指标权重的合理性和稳健性不足。

针对上述问题, 本研究聚焦复杂山地环境特性与无人机协同察打任务需求, 构建了一套兼具环境针对性、指标可量化性及效能综合性的评价体系, 创新性体现在以下方面:

1) 强化环境适配性。与传统评估体系相比, 本文指标体系新增了山地适应性维度(C_6), 包含地形匹配飞行指数(C_{61})、抗紊流稳定系数(C_{62})等 5 项指标, 直接量化无人机对复杂地形的适应能力。例如, 地形匹配飞行指数(C_{61})通过地形跟随控制算法的路径贴合度评估, 弥补了传统指标(如续航时间)对山地飞行安全性的忽视。

2) 进行动态对抗性建模。本文引入编队电磁生存率(C_{53})和二次打击需求率(C_{44})等指标, 量化敌方干扰对协同效能的影响。相比之下, 现有体系多依赖静态指标(如通信抗干扰成功率 C_{13}), 难以反映动态对抗环境下通信链路的实时波动特性。

3) 引入主客观组合赋权。采用 AHP-熵权法组合赋权, 既保留专家对山地作战经验的主观判断(如山地适应性权重占比 24.75%), 又通过数据驱动的熵权法(如地形修正 CEP 权重 27.98%)提升权重的客观性。而传统方法(如纯 AHP)易因专家认知偏差导致权重失真, 纯熵权法则可能低估战术关键指标的隐性价值。

综上, 本研究通过增强环境适配性、动态对抗建模和创新组合建模, 弥补了现有体系在复杂山地环境中的部分缺陷, 为无人机系统在山地战场环境下的能力优化与战术运用提供科学依据。

1 作战效能指标体系选取目标与原则

构建适用于复杂山地环境下无人机协同察打地面战术目标作战效能评估的指标体系, 全面准确地反映无人机在执行任务过程中的各项效能, 为作战方案优化、系统性能提升以及资源的合理分配提供科学依据。

1.1 选取目标

基于复杂山地环境特性和协同察打任务需求, 指标体系构建目标聚焦于: 1) 环境适配性: 提升地形跟随/穿透能力、自主避障成功率、电磁对抗能力及气象突变适应性; 2) 任务导向性: 优化任务成功率、压缩杀伤链响应时间、提高打击精度; 3) 协同优化性: 增强多机任务分配效率、通信链路可靠性、情报共享时效性与协同决策一致性^[6]。

1.2 选取原则

指标体系构建遵循以下原则: 1) 科学性: 基于层次分析法、熵权法等成熟理论方法; 2) 系统性: 覆盖“信息获取—目标识别—指挥决策—打击协同—环境适应”全链路; 3) 可操作性: 指标可量化、数据可获取; 4) 针对性: 突出山地环境制约(遮蔽、电磁、气象)和察打任务核心需求(响应、精度); 5) 适配性: 指标设计紧密契合山地环境特殊性、任务需求差异性及技术约束边界等。

2 评估维度与指标

随着现代军事技术飞速发展, 无人机在战争中的应用愈发广泛, 其察打作战效能评估也日益重要。传统作战效能评估体系在面对复杂多变的战场环境时, 显现出一定局限性, 尤其是在山地等复杂地形环境下, 如何全面、准确地评估无人机的察打作战效能, 成为了亟待解决的问题。

本文着眼无人装备作战效能评估、引入军事领域标准, 参考美军 JADC2(联合全域指挥与控制)指标体系, 构建了一套适用于无人机协同察打地面战术目标的指标体系(C), 如图 1 所示, 以期为无人机作战效能的评估提供更加科学、合理的依据。

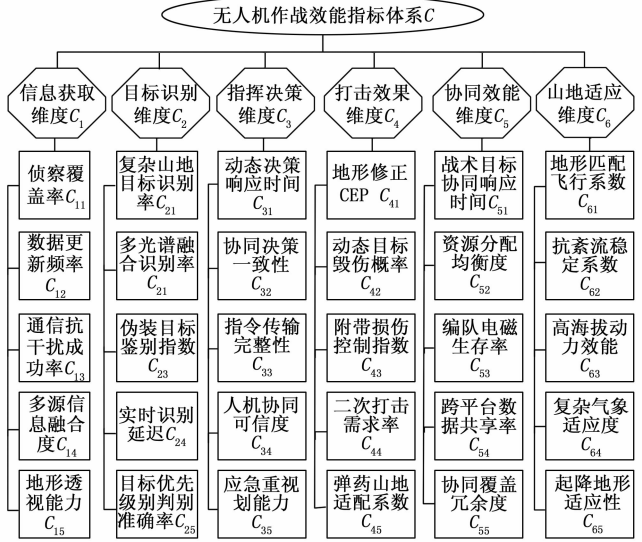


图 1 无人机作战效能指标体系

2.1 信息获取维度 C_1

信息获取是无人机作战的基础,其及时性、准确性和全面性直接关系到后续作战行动的成败。在该维度中,载荷性能指标至关重要,决定了无人机获取目标及相关环境信息的能力,包括 5 项指标:侦察覆盖率 C_{11} ,无人机编队对任务区域的实时探测面积占比;数据更新频率 C_{12} ,单机传感器数据刷新速率;通信抗干扰成功率 C_{13} ,复杂电磁环境下有效数据传输率;多源信息融合度 C_{14} ,光学/红外/雷达等多模态数据融合有效性指数^[7];地形透视能力 C_{15} ,利用合成孔径雷达(SAR, synthetic aperture radar)穿障成像技术,穿透植被/岩石遮挡的目标探测概率。

2.2 目标识别维度 C_2

识别目标精准且无误漏是衡量无人机察打作战效能的关键方面。山地环境下由于目标与背景的融合度高,识别难度大幅增加,对识别算法的效率和适应性提出了更高要求,共包括 5 项指标:复杂山地目标识别率 C_{21} ,坡度 $>25^\circ$ 场景下的正确识别率;多光谱融合识别率 C_{22} ,对抗红外/光学遮蔽伪装的分辨能力^[5];伪装目标鉴别指数 C_{23} ,对抗红外/光学伪装的识别能力;实时识别延迟 C_{24} ,从传感器获取到输出结果的延时;目标优先级判别准确率 C_{25} ,高价值目标识别排序正确率。

2.3 指挥决策维度 C_3

复杂作战环境中,指挥决策的时效性、准确性和合理性直接影响无人机作战行动成败。为更好地适应快速变化的战场形势,确保指挥决策能够及时、准确地传达并执行,该维度包括:动态决策响应时间 C_{31} ,从态势变化到生成新指令的时间;协同决策一致性 C_{32} ,多无人机任务分配冲突率;指令传输完整性 C_{33} ,山地遮挡环境下的指令丢包率;人机协同可信度 C_{34} ,自动化决策被指挥官采纳概率;应急重规划能力 C_{35} ,突发威胁下的可行方案生成概率。

2.4 打击效果维度 C_4

打击精度和毁伤效果是衡量无人机作战效能的核心指标。如在山地环境下传统圆周概率误差(CEP, Circular error probable),需考虑地形起伏和遮挡对打击精度的影响,并进行相应修正,以更精确地衡量无人机的打击效果^[8]。该维度包括以下指标:地形修正 CEPC₄₁,山地环境下圆周概率误差;动态目标毁伤概率 C_{42} ,对移动目标的命中毁伤率;附带损伤控制指数 C_{43} ,非目标区域受损面积占比;二次打击需求率 C_{44} ,首次打击后需补射的概率;弹药山地适配系数 C_{45} ,弹药类型与地形匹配度。

2.5 协同效能维度 C_5

战术目标协同响应、协同探测覆盖冗余和通信链路稳定性是协同效能评估的关键指标。该维度包括:战术

目标协同响应时间 C_{51} ,从发现到打击目标的时间;资源分配均衡度 C_{52} ,无人机负载差异系数,其效率优化可参考两阶段贪婪拍卖算法^[9-10];编队电磁生存率 C_{53} ,电子对抗环境下的存活率^[11-12];跨平台数据共享率 C_{54} ,异构无人机间情报互通比例;协同覆盖冗余度 C_{55} ,传感器重叠覆盖区域占比。

2.6 山地适应维度 C_6

山地环境适应性是无人机在山地环境下作战的基础能力,可确保无人机在复杂山地环境下的稳定飞行和作战效能,包括五项指标:地形匹配飞行指数 C_{61} ,量化无人机与地形的匹配程度^[13];抗紊流稳定系数 C_{62} ,阵风条件下姿态控制误差;高海拔动力效能 C_{63} ,海拔 4000 米以上推力保持率;复杂气象适应度 C_{64} ,衡量雨雪雾等复杂气象对无人机传感器的影响;起降地形适应性 C_{65} ,反映无人机在陡坡、乱石场地着陆情况。

3 指标体系构建与赋权

构建科学合理的无人机察打作战效能评估指标体系,能够全面准确衡量无人机在协同察打地面战术目标中的作战效能,为无人机作战应用和发展提供理论支撑。

3.1 赋权方法

无人机作战效能指标体系构建的赋权方法主要包括:1)主观赋权法,如 AHP、德尔菲法,依赖专家经验,优势在于隐性知识显性化、解释性强且适应复杂系统,但易受主观认知偏差影响;2)客观赋权法,如熵权法、主成分分析法、变异系数法,基于数据统计特征,客观性强但可解释性弱,对数据质量敏感^[14];3)组合赋权法,融合主客观信息,实现优势互补,提升权重科学性与稳健性^[15-16]。

鉴于山地作战环境的复杂性与评估需求的多维度性,本研究采用 AHP 与熵权法相结合的组合赋权策略。层次分析法用于基于专家判断确定主观权重,熵权法则通过实际数据计算得出客观权重。根据 Thomas L. Saaty 提出的九级标度法,对各因素之间的相对重要性进行两两比较,以量化其权重。将 AHP 与熵权法相结合,不仅融合了专家经验的主观判断,也充分利用了数据驱动的客观信息,从而提升了评估模型的准确性与稳健性。

3.2 AHP 确定指标权重

层次分析法是一种解决多目标复杂问题的定性和定量结合计算决策权重的研究方法,适用于结构较为复杂、决策准则较多且不易量化的决策问题,可以避免决策者在逻辑推理上的失误,其分析流程如图 2 所示。

3.2.1 构建层次结构模型

根据研究内容,确定目标层、准则层和指标层,并

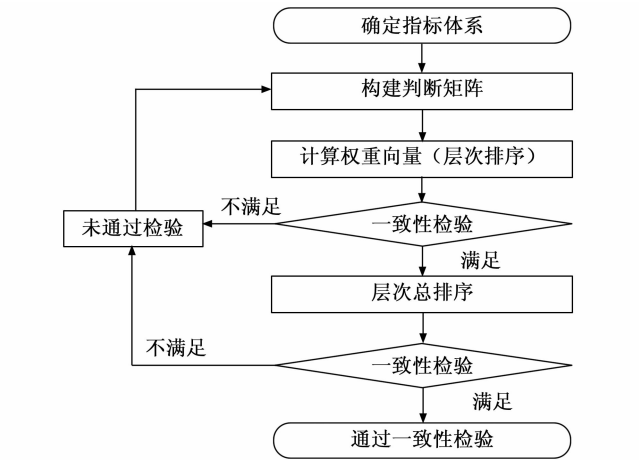


图2 层析分析法流程图

按照其相互关系分为一级指标、二级指标和三级指标,形成无人机的作战效能层次结构。

3.2.2 建立判断矩阵

根据层次结构模型,确定各种因素之间的影响程度和相互关系,通过对准则层、指标层的各项指标两两比较,量化各因素之间的相对重要性,依据 Saaty 的九级量表,依次对指标间的重要程度赋值,其取值如表 1 所示。邀请 10 位无人机作战领域的院校专家和部队指挥员,分别为复杂山地环境下无人机协同察打地面战术目标作战效能的各个指标进行评判,建立判断矩阵。

表 1 1—9 标度法取值

标度值	含义
1	同等重要
3	稍微重要
5	明显重要
7	强烈重要
9	极端重要
2,4,6,8	介于相邻标度值间的中间状态
倒数	因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 的重要性比为 <i>C_{ij}</i> ,则因素 <i>j</i> 与因素 <i>i</i> 的重要性比 <i>C_{ji}</i> =1/ <i>C_{ij}</i>

3.2.3 计算权重

1) 计算矩阵 *C* 中每行的几何平均数, *C_{ij}* 为矩阵对应元素:

$$\omega_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n C_{ij}} \tag{1}$$

2) 归一化处理:

$$W_i = \frac{\omega_i}{\sum_{k=1}^n \omega_k} \tag{2}$$

对向量 *ω_i* 做归一化处理,得到各因素权重向量 *W* = [*w₁*, *w₂*, ⋯, *w_n*]^{*T*}。

3) 求出最大特征值 λ_{max} :

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(C \cdot W)_i}{W_i} \tag{3}$$

3.2.4 一致性检验

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{4}$$

$$CR = CI / RI \tag{5}$$

当 *CR* < 0.1 通过检验;反之, *CR* ≥ 0.1,需重新调整判断矩阵。

随机一致性指标 *RI* 值主要参考一致性比例表,取值与判断矩阵阶数 *n* 相关,如表 2 所示。构造判断矩阵 *C*—*C_i* (准则层),如表 3 所示。

使用 SPSSPRO 软件,采用方根法,进行行向量归一化处理,计算特征向量和权重值,并检验一致性。

表 2 一致性指标 *RI* 取值表

阶数 <i>n</i>	1	2	3	4	5	6
<i>RI</i> 值	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24

表 3 *C*—*C_i* 判断矩阵

<i>C</i>	<i>C₁</i>	<i>C₂</i>	<i>C₃</i>	<i>C₄</i>	<i>C₅</i>	<i>C₆</i>
<i>C₁</i>	1	3	2	1/4	2	1/2
<i>C₂</i>	1/3	1	1/2	1/5	1/2	1/4
<i>C₃</i>	1/2	2	1	1/3	1	1/3
<i>C₄</i>	4	5	3	1	3	2
<i>C₅</i>	1/2	2	1	1/3	1	1/3
<i>C₆</i>	2	4	3	1/2	3	1

通过公式计算信息获取维度 *C₁*、目标识别维度 *C₂*、指挥决策维度 *C₃*、打击效果维度 *C₄*、协同效能维度 *C₅*、山地适应维度 *C₆* 的特征向量、权重值、最大特征值、*CI* 值和 *CR* 值。如表 4 所示。

表 4 *C*—*C_i* 判断矩阵一致性检验

项	特征向量	权重值/%	最大特征值	<i>CI</i> 值	<i>RI</i> 值	<i>CR</i> 值
信息获取维度 <i>C₁</i>	1.07	14.572	6.134	0.027	1.24	0.022
目标识别维度 <i>C₂</i>	0.401	5.464				
指挥决策维度 <i>C₃</i>	0.693	9.444				
打击效果维度 <i>C₄</i>	2.667	36.327				
协同效能维度 <i>C₅</i>	0.693	9.444				
山地适应维度 <i>C₆</i>	1.817	24.749				

最大特征值为 6.134、*CI* 值为 0.027, *RI* 值查表 (*n*=6) 为 1.24,一致性检验结果如表 4 所示, *CR* = 0.022 < 0.1,该矩阵通过一致性检验,作战效能各维度权重及山地环境对各维度影响分布如图 3 所示。

二级指标权重显示,打击效果维度占比最高,是作战效能的核心体现。山地环境的地形遮蔽、气象干扰对打击精度和毁伤效果提出更高要求,直接影响任务成败;山地适应维度权重次高,是确保无人机在复杂山地环境中的基础作战能力。同时,其他维度如信息获取、目标识别、指挥决策及协同效能也不容忽视,它们共同

基于AHP作战效能评估各维度权重分布图

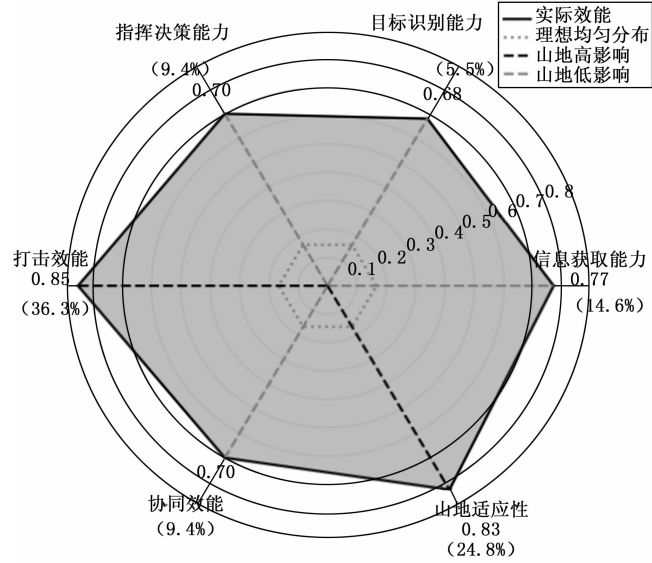


图 3 基于 AHP 作战效能评估各维度权重分布雷达图

构成了一个有机整体，互为支撑，以达到无人机最优作战效能。

共构造 6 个准则层的判断矩阵 $C_i - C_{ij}$ (指标层)。继续使用 SPSSPRO 软件，采用方根法，进行行向量归一化处理，计算特征向量和权重值，然后检验一致性。

计算出侦察覆盖率 C_{11} 、数据更新频率 C_{12} 、通信抗干扰成功率 C_{13} 、多源信息融合度 C_{14} 、地形透视能力 C_{15} 的特征向量、权重值、最大特征值、 CI 值和 CR 值，如表 5 所示。最大特征值为 5.013、 CI 值为 0.003， RI 值查表 ($n=5$) 为 1.12，一致性检验结果： $CR=0.003<0.1$ ，该矩阵通过一致性检验。信息获取维度中，地形透视能力直接影响穿透植被岩石遮挡的探测成功率，侦查覆盖率决定战场感知范围，权重最高。

表 5 $C_1 - C_{1j}$ 判断矩阵一致性检验

项	特征向量	权重值/%	最大特征值	CI 值	RI 值	CR 值
侦察覆盖率 C_{11}	1.644	29.794	5.013	0.003	1.12	0.003
数据更新频率 C_{12}	0.871	15.78				
通信抗干扰成功率 C_{13}	0.488	8.852				
多源信息融合度 C_{14}	0.871	15.78				
地形透视能力 C_{15}	1.644	29.794				

通过公式计算出复杂山地目标识别率 C_{21} 、多光谱融合识别率 C_{22} 、伪装目标鉴别指数 C_{23} 、实时识别延迟 C_{24} 、目标优先级判断准确率 C_{25} 的特征向量、权重值、最大特征值、 CI 值和 CR 值，如表 6 所示。最大特征值为 5.063、 CI 值为 0.016， RI 值查表 ($n=5$) 为 1.12，一致性检验结果： $CR=0.014<0.1$ ，矩阵通过一致性检验。坡度大于 25° 场景下，识别目标与背景相似度较

高，复杂山地目标识别率权重较为合理。

表 6 $C_2 - C_{2j}$ 判断矩阵一致性检验结果

项	特征向量	权重值/%	最大特征值	CI 值	RI 值	CR 值
复杂山地目标识别率 C_{21}	2.993	45.812	5.063	0.016	1.12	0.014
多光谱融合识别率 C_{22}	1.644	25.163				
伪装目标鉴别指数 C_{23}	0.944	14.453				
实时识别延迟 C_{24}	0.37	5.666				
目标优先级判断准确率 C_{25}	0.582	8.907				

通过公式计算出动态决策响应时间 C_{31} 、协同决策一致性 C_{32} 、指令传输完整性 C_{33} 、人机协同可信度 C_{34} 、应急重规划能力 C_{35} 的特征向量、权重值、最大特征值、 CI 值和 CR 值，如表 7 所示。最大特征值为 5.049、 CI 值为 0.012， RI 值查表 ($n=5$) 为 1.12，一致性检验结果： $CR=0.011<0.1$ ，矩阵通过一致性检验。山地环境突发威胁多，无人机需具备快速动态响应能力^[17]， C_{31} 权重值 37.897% 合理。

表 7 $C_3 - C_{3j}$ 判断矩阵一致性检验

项	特征向量	权重值/%	最大特征值	CI 值	RI 值	CR 值
动态决策响应时间 C_{31}	2.169	37.897	5.049	0.012	1.12	0.011
协同决策一致性 C_{32}	1.246	21.766				
指令传输完整性 C_{33}	0.699	12.21				
人机协同可信度 C_{34}	1.149	20.071				
应急重规划能力 C_{35}	0.461	8.056				

通过公式计算出地形修正 CEP C_{41} 、动态目标毁伤概率 C_{42} 、附带损伤控制指数 C_{43} 、二次打击需求率 C_{44} 、弹药山地适配系数 C_{45} 的特征向量、权重值、最大特征值、 CI 值和 CR 值，如表 8 所示。最大特征值为 5.196、 CI 值为 0.049， RI 值查表 ($n=5$) 为 1.12，一致性检验结果： $CR=0.044<0.1$ ，矩阵通过一致性检验。山地环境下无人机需动态适应地形，需要对地形修正， C_{41} 权重最高符合实战需求^[18]。移动目标在山地隐蔽性较强，需高动态追踪毁伤能力，动态目标毁伤概率 C_{42} 权重次高合理。

表 8 $C_4 - C_{4j}$ 判断矩阵一致性检验

项	特征向量	权重值/%	最大特征值	CI 值	RI 值	CR 值
地形修正 CEP C_{41}	2.825	44.798	5.196	0.049	1.12	0.044
动态目标毁伤概率 C_{42}	1.516	24.034				
附带损伤控制指数 C_{43}	0.66	10.461				
二次打击需求率 C_{44}	0.922	14.621				
弹药山地适配系数 C_{45}	0.384	6.086				

通过公式计算出战术目标协同响应时间 C_{51} 、资源分配均衡度 C_{52} 、编队电磁生存率 C_{53} 、跨平台数据共享率 C_{54} 、协同覆盖冗余度 C_{55} 的特征向量、权重值、最大特征值、 CI 值和 CR 值, 如表 9 所示。最大特征值为 5.237、 CI 值为 0.059, RI 值查表 ($n=5$) 为 1.12, 一致性检验结果: $CR=0.053<0.1$, 矩阵通过一致性检验。山地复杂电磁环境易导致通信中断^[19], 协同效能维度中, 编队电磁生存率 C_{53} 权重最高。

表 9 C_5-C_{5j} 判断矩阵一致性检验

项	特征向量	权重值/%	最大特征值	CI 值	RI 值	CR 值
战术目标协同响应时间 C_{51}	1	12.957	5.237	0.059	1.12	0.053
资源分配均衡度 C_{52}	0.491	6.364				
编队电磁生存率 C_{53}	3.936	51.004				
跨平台数据共享率 C_{54}	2.036	26.383				
协同覆盖冗余度 C_{55}	0.254	3.292				

通过公式计算出地形匹配飞行指数 C_{61} 、抗紊流稳

表 11 基于 AHP 的无人机协同察打地面战术目标作战效能指标权重

项	准则层	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
指标层	权重	0.145 7	0.054 6	0.094 4	0.363 3	0.094 4	0.247 5
侦察覆盖率 C_{11}	0.043 4	0.297 9	—	—	—	—	—
数据更新频率 C_{12}	0.023 0	0.157 8	—	—	—	—	—
通信抗干扰成功率 C_{13}	0.012 9	0.088 5	—	—	—	—	—
多源信息融合度 C_{14}	0.023 0	0.157 8	—	—	—	—	—
地形透视能力 C_{15}	0.043 4	0.297 9	—	—	—	—	—
复杂山地目标识别率 C_{21}	0.025 0	—	0.458 1	—	—	—	—
多光谱融合识别率 C_{22}	0.013 7	—	0.251 6	—	—	—	—
伪装目标鉴别指数 C_{23}	0.007 9	—	0.144 5	—	—	—	—
实时识别延迟 C_{24}	0.003 1	—	0.056 7	—	—	—	—
目标优先级判断准确率 C_{25}	0.004 9	—	0.089 1	—	—	—	—
动态决策响应时间 C_{31}	0.043 2	—	—	0.379 0	—	—	—
协同决策一致性 C_{32}	0.023 8	—	—	0.217 7	—	—	—
指令传输完整性 C_{33}	0.013 6	—	—	0.122 1	—	—	—
人机协同可信度 C_{34}	0.005 4	—	—	0.200 7	—	—	—
应急重规划能力 C_{35}	0.008 4	—	—	0.080 6	—	—	—
地形修正 $CEPC_{41}$	0.162 8	—	—	—	0.448 0	—	—
动态目标毁伤概率 C_{42}	0.087 3	—	—	—	0.240 3	—	—
附带损伤控制指数 C_{43}	0.038 0	—	—	—	0.104 6	—	—
二次打击需求率 C_{44}	0.053 1	—	—	—	0.146 2	—	—
弹药山地适配系数 C_{45}	0.022 1	—	—	—	0.060 9	—	—
战术目标协同响应时间 C_{51}	0.012 2	—	—	—	—	0.129 6	—
资源分配均衡度 C_{52}	0.006 0	—	—	—	—	0.063 6	—
编队电磁生存率 C_{53}	0.048 1	—	—	—	—	0.510 0	—
跨平台数据共享率 C_{54}	0.024 9	—	—	—	—	0.263 8	—
协同覆盖冗余度 C_{55}	0.003 1	—	—	—	—	0.032 9	—
地形匹配飞行指数 C_{61}	0.118 1	—	—	—	—	—	0.477 3
抗紊流稳定系数 C_{62}	0.035 6	—	—	—	—	—	0.143 8
高海拔动力效能 C_{63}	0.067 2	—	—	—	—	—	0.271 5
复杂气象适应度 C_{64}	0.017 2	—	—	—	—	—	0.069 6
起降地形适应性 C_{65}	0.009 4	—	—	—	—	—	0.037 9

定系数 C_{62} 、高海拔动力效能 C_{63} 、复杂气象适应度 C_{64} 、起降地形适应性 C_{65} 的特征向量、权重值、最大特征值、 CI 值和 CR 值, 如表 10 所示。最大特征值为 5.295、 CI 值为 0.074, RI 值查表 ($n=5$) 为 1.12, 一致性检验结果: $CR=0.066<0.1$, 矩阵通过一致性检验。山地适应维度中, 地形匹配飞行指数 C_{61} 直接影响飞行路径安全性与任务持续性, 权重最高。

表 10 C_6-C_{6j} 判断矩阵一致性检验

项	特征向量	权重值/%	最大特征值	CI 值	RI 值	CR 值
地形匹配飞行指数 C_{61}	3.471	47.726	5.295	0.074	1.12	0.066
抗紊流稳定系数 C_{62}	1.046	14.377				
高海拔动力效能 C_{63}	1.974	27.145				
复杂气象适应度 C_{64}	0.506	6.964				
起降地形适应性 C_{65}	0.276	3.788				

最后, 确定指标体系的合成权重。通过上述计算值, 得出复杂山地环境下无人机协同作战效能指标体系的权重值, 如表 11 和图 4 所示。

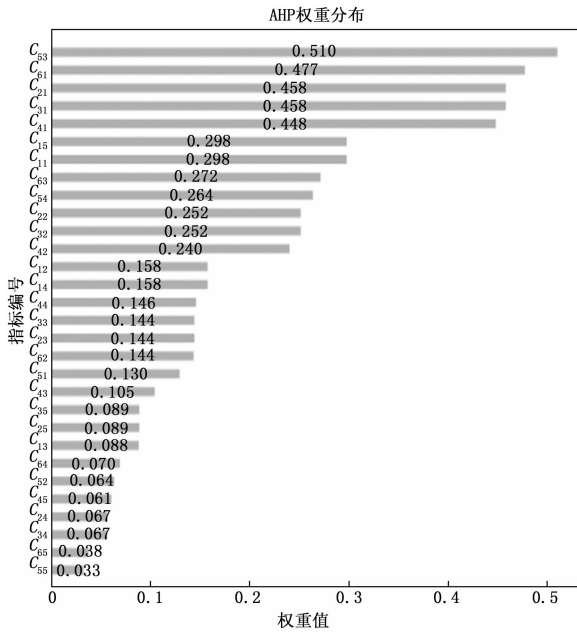


图 4 基于 AHP 权重图

3.3 熵权法确定权重

熵权法是一种客观赋权方法,通过计算各指标的信息熵来衡量其离散程度,并据此分配各指标权重。无人机作战效能指标体系包含大批可量化参数,熵权法通过计算指标数据的信息熵值,客观反映各指标在实测或仿真数据中的离散程度,避免主观赋权可能引入的认知偏差。

3.3.1 构造标准化数据矩阵

$$C = \begin{pmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1m} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ X_{n1} & \cdots & X_{nm} \end{pmatrix}_{n \times m} \quad (6)$$

其中: X_{ij} 表示第 i 个评价对象在第 j 个指标上的指标值。

为去除不同指标量纲对数据的影响,采用最大最小归一化法对原始数据进行标准化处理。

$$x'_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} & (\text{正向}) \\ \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} & (\text{负向}) \end{cases} \quad (7)$$

其中: x_{ij} 为第 i 个评价对象在第 j 个指标上的原始值, $\min(x_j)$ 和 $\max(x_j)$ 分别为该指标的最小值和最大值, x'_{ij} 是标准化后的值。

3.3.2 计算信息熵

1) 计算概率矩阵: 对于每个指标 j , 计算其对应的概率矩阵 P_j , 即:

$$p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}} \quad (8)$$

其中: m 是评价对象的数量, p_{ij} 是第 i 个评价对象在第 j 个指标上的概率值。

2) 信息熵计算: 对于每个指标 j , 计算其信息熵 e_j 。

$$e_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (9)$$

其中: $i=1, 2, 3, \dots, m, j=1, 2, 3, \dots, n$, $\ln$ 为自然对数, m 为评价对象个数, e_j 的取值在 $[0, 1]$ 。当所有 p_{ij} 相等时, e_j 达到最大值 1, 表示该指标没有提供有用信息; 当某个 p_{ij} 接近于 1 而其他接近于 0 时, e_j 接近于 0, 表示该指标提供较多有用信息。

3.3.3 计算熵权

1) 计算信息效用值 g_j : 反映指标对决策的区分能力, g_j 越大, 权重越高。

$$g_j = 1 - e_j \quad (10)$$

2) 计算熵权:

$$\omega_j^{ent} = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad (11)$$

其中: n 为指标总数, ω_j^{ent} 为第 j 个指标的权重, 满足 $\sum_{j=1}^n \omega_j^{ent} = 1$ 。

3.3.4 综合评分

对维度进行排序, 计算各维度的综合得分。

$$S_i = \sum_{j=1}^n \omega_j^{ent} \cdot x'_{ij} \quad (12)$$

S_i 值越大, 所选择维度越优。

采用多源实测与仿真数据相结合方式取得熵权法原始数据, 具体如下: 1) 飞行性能数据来自某型无人机在川西高原、滇北山地等典型复杂地形区域的飞行试验记录, 涵盖不同海拔、气象条件下飞行日志; 2) 基于某战术仿真平台运行 50 次 OODA 闭环推演, 记录各阶段耗时与通信稳定性参数。采用箱线图法与 3σ 准则和线性插值法分别对原始数据中的异常值、缺失值进行处理, 通过极差归一化消除量纲差异, 进行数据预处理。

通过 SPSSPRO 软件, 计算得出无人机协同察打地面战术目标作战效能指标的信息熵值、信息效用值和权重系数, 如图 5 和表 12 所示。

3.4 AHP-熵权法确定组合权重

通过 AHP 和熵权法分别确定无人机协同察打地面战术目标作战效能评估指标的权重, 但主客观权重的重要性存在一定差异, 故采用线性加权组合的方法计算最终的作战效能权重值。线性加权组合法公式如下:

$$\omega_j^{comb} = \alpha \omega_j^{subj} + (1 - \alpha) \omega_j^{ent} \quad (13)$$

其中: ω_j^{subj} 表示层次分析法的权重值, ω_j^{ent} 表示熵权法的权重值, 权重系数 α 赋值为 0.6, 主要基于: 1) 领域特性权衡原则, 复杂山地作战具有高度情境依赖性和战术主观性, 专家经验在指标重要性判断中具有突出作用, 设定 0.6 为合理中值; 2) 军事决策需优先保障战术意图实现, 适度侧重主观权重可降低因数据噪声或短期波动导致的战术短视风险^[20-21]; 3) 信息熵的客观约束,

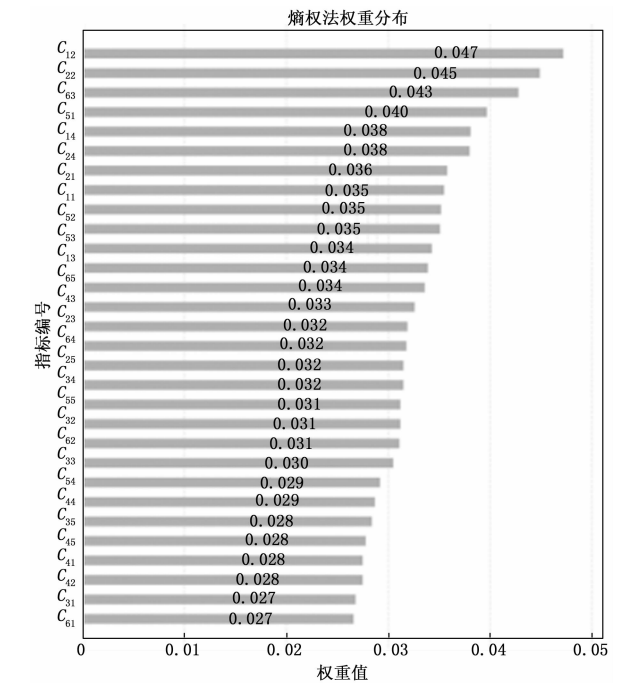


图 5 基于熵权法权重图

表 12 基于熵权法的无人机协同察打地面战术
目标作战效能指标权重

项	信息熵值	信息效值	权重系数/%
侦察覆盖率 C_{11}	0.919	0.081	3.524
数据更新频率 C_{12}	0.892	0.108	4.715
通信抗干扰成功率 C_{13}	0.922	0.078	3.393
多源信息融合度 C_{14}	0.913	0.087	3.796
地形透视能力 C_{15}	0.913	0.087	3.813
复杂山地目标识别率 C_{21}	0.919	0.081	3.55
多光谱融合识别率 C_{22}	0.897	0.103	4.492
伪装目标鉴别指数 C_{23}	0.927	0.073	3.19
实时识别延迟 C_{24}	0.939	0.061	2.661
目标优先级判断准确率 C_{25}	0.918	0.082	3.582
动态决策响应时间 C_{31}	0.929	0.071	3.114
协同决策一致性 C_{32}	0.928	0.072	3.154
指令传输完整性 C_{33}	0.939	0.061	2.682
人机协同可信度 C_{34}	0.929	0.071	3.115
应急重规划能力 C_{35}	0.93	0.07	3.05
地形修正 CEP C_{41}	0.902	0.098	4.278
动态目标毁伤概率 C_{42}	0.928	0.072	3.154
附带损伤控制指数 C_{43}	0.935	0.065	2.839
二次打击需求率 C_{44}	0.927	0.073	3.184
弹药山地适配系数 C_{45}	0.937	0.063	2.746
战术目标协同响应时间 C_{51}	0.923	0.077	3.364
资源分配均衡度 C_{52}	0.937	0.063	2.747
编队电磁生存率 C_{53}	0.925	0.075	3.262
跨平台数据共享率 C_{54}	0.934	0.066	2.869
协同覆盖冗余度 C_{55}	0.936	0.064	2.783
地形匹配飞行指数 C_{61}	0.909	0.091	3.972
抗紊流稳定系数 C_{62}	0.92	0.08	3.51
高海拔动力效能 C_{63}	0.922	0.078	3.425
复杂气象适应度 C_{64}	0.933	0.067	2.917
起降地形适应性 C_{65}	0.929	0.071	3.121

熵权法反映数据本身的变异程度，变异越大说明该指标区分能力越强，应赋予更高权重，但实际作战中部分关键指标（如 CEP）会因技术优化导致数据波动小，如完全依赖熵权可能低估其战术价值，因此，适度降低熵权值占比可有效避免数据平滑导致的权重失真问题；4）敏感性分析验证，对该赋值比例进行权重敏感性仿真，在主观权重从 0.4~0.8 之间以 0.1 为步长变化，计算综合权重排序稳定性（采用 Spearman 秩相关系数），结果显示：①主观权重在 0.5~0.7 区间时，关键指标（ C_{41} 、 C_{61} 、 C_{21} ）排名保持稳定（ $\rho>0.9$ ）；②在 0.6 时，综合权重与专家共识匹配度最高（Kendall $W=0.81$ ）；③最终选取 0.6 为帕累托最优折中点，兼顾主客观信息且排序稳健性最高。

综合得出，复杂山地环境下无人机协同察打地面战术目标作战效能指标体系的组合权重，如表 13 所示。

表 13 基于 AHP-熵权法的无人机协同察打地面战术
目标作战效能指标组合权重

指标项	层次分析法权重	熵权法权重	组合权重
侦察覆盖率 C_{11}	0.297 9	0.035 2	0.192 8
数据更新频率 C_{12}	0.157 8	0.047 2	0.113 6
通信抗干扰成功率 C_{13}	0.088 5	0.033 9	0.066 7
多源信息融合度 C_{14}	0.157 8	0.038 0	0.109 9
地形透视能力 C_{15}	0.297 9	0.038 1	0.194 0
复杂山地目标识别率 C_{21}	0.458 1	0.035 5	0.289 1
多光谱融合识别率 C_{22}	0.251 6	0.044 9	0.168 9
伪装目标鉴别指数 C_{23}	0.144 5	0.031 9	0.099 5
实时识别延迟 C_{24}	0.056 7	0.035 8	0.048 3
目标优先级判断准确率 C_{25}	0.089 1	0.031 5	0.066 1
动态决策响应时间 C_{31}	0.379 0	0.026 8	0.285 6
协同决策一致性 C_{32}	0.217 7	0.031 2	0.163 4
指令传输完整性 C_{33}	0.122 1	0.030 5	0.098 9
人机协同可信度 C_{34}	0.200 7	0.031 5	0.046 6
应急重规划能力 C_{35}	0.080 6	0.028 4	0.064 8
地形修正 CEP C_{41}	0.448 0	0.027 5	0.279 8
动态目标毁伤概率 C_{42}	0.240 3	0.027 5	0.155 2
附带损伤控制指数 C_{43}	0.104 6	0.032 6	0.075 8
二次打击需求率 C_{44}	0.146 2	0.028 7	0.099 2
弹药山地适配系数 C_{45}	0.060 9	0.027 8	0.047 7
战术目标协同响应时间 C_{51}	0.129 6	0.039 7	0.093 6
资源分配均衡度 C_{52}	0.063 6	0.035 1	0.052 2
编队电磁生存率 C_{53}	0.510 0	0.034 3	0.319 7
跨平台数据共享率 C_{54}	0.263 8	0.029 2	0.170 0
协同覆盖冗余度 C_{55}	0.032 9	0.031 2	0.032 2
地形匹配飞行指数 C_{61}	0.477 3	0.026 6	0.297 0
抗紊流稳定系数 C_{62}	0.143 8	0.031 1	0.098 7
高海拔动力效能 C_{63}	0.271 5	0.042 8	0.180 0
复杂气象适应度 C_{64}	0.069 6	0.031 8	0.054 5
起降地形适应性 C_{65}	0.037 9	0.033 6	0.036 2

组合权重如图 6 所示，打击效果维度和山地环境适

应维度占据较高比重,其中打击效果维度中的地形修正 CEP (权重 0.279 8),以及山地适应维度中的地形匹配飞行指数 (权重 0.297 0) 等指标权重突出;表明在复杂山地作战中,精确地形修正提高打击精度和无人机对山地环境的适应能力是提升作战效能的关键方向。同时,目标识别维度中复杂山地目标识别率 (权重 0.289 1),指挥决策维度中动态决策响应时间 (权重 0.285 6) 和协同效能维度中编队电磁生存率 (权重 0.319 7),也有较高权重值,表明在山地作战中,提升复杂目标识别能力、缩短决策响应时间和提升编队电磁生存同样具有重要地位。

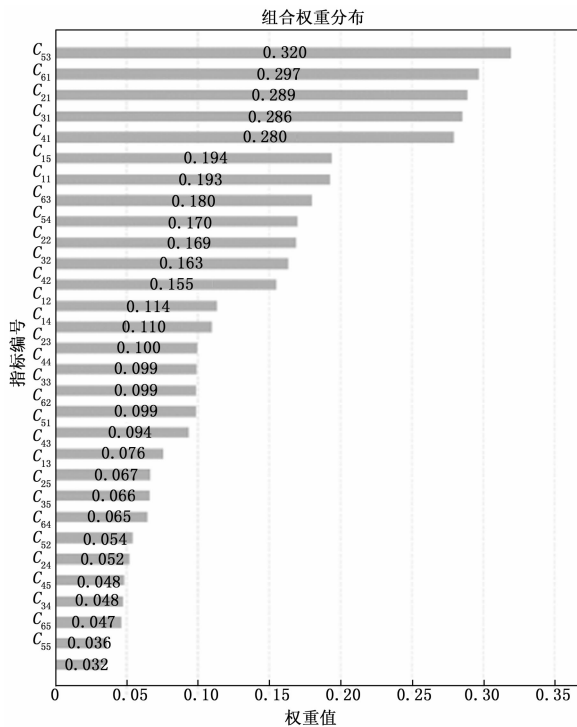


图 6 基于组合赋权权重图

4 结果分析

组合赋权结果表明,打击效果 (C_4 , 36.33%) 与山地适应性 (C_6 , 24.75%) 是影响复杂山地环境下无人机协同察打效能的最关键维度。其中,地形修正 CEP (C_{41} , 组合权重 27.98%) 作为打击精度的核心度量,其最高权重凸显了山地地形起伏,对制导武器的显著影响及进行动态地形补偿的极端重要性^[8,18]。地形匹配飞行指数 (C_{61} , 组合权重 29.7%) 在山地适应性维度中权重最高,直接反映了无人机高效贴合复杂地形飞行的能力是任务成功的基础保障^[13]。此外,目标识别维度的复杂山地目标识别率 (C_{21})、指挥决策维度的动态响应时间 (C_{31})、协同效能维度的编队电磁生存率 (C_{53}) 亦具有较高权重,表明提升复杂背景目标辨识能力、缩短 OODA (OODA, Observe-Orient-Decide-Act) 环时间、增强在强电磁对抗环境下的生存力,是优化山地作

战效能的关键环节。

基于权重分析,提升复杂山地无人机协同察打效能,需重点着力于:1) 强化打击精度^[22]: 研发智能地形修正算法,优化弹药山地适配性 (C_{41} , C_{45}); 2) 提升飞行平台适应性: 增强地形跟随控制、高海拔动力性能及抗紊流稳定性 (C_{61} , C_{62} , C_{63}); 3) 识别复杂目标: 发展多光谱/SAR 融合识别技术,提升伪装目标鉴别能力 (C_{21} , C_{22} , C_{23}); 4) 敏捷指挥决策: 压缩动态决策响应时间,提升应急重规划能力 (C_{31} , C_{35}); 5) 增强协同韧性^[23]: 重点提升编队电磁防护与生存能力,保障跨平台数据共享 (C_{53} , C_{54})。

研究仍存在以下局限: 数据依赖性: 权重计算对输入数据 (专家判断矩阵、熵权法基础数据) 的质量较为敏感,数据偏差或样本不足,会影响评估结果的准确性; 主观因素影响: 虽然采用熵权法进行平衡,但 AHP 过程仍依赖专家经验判断,存在一定主观性风险; 动态环境适应性不足: 当前指标体系及权重主要反映静态或典型场景下的效能评估,面对高度动态的山地战场环境,模型的实时响应与权重动态调整能力有待加强。

相较于平原环境,复杂山地具有显著的地理与气候特征,如地形起伏剧烈、气流紊乱、气象条件多变、起降场地受限等,这对无人机的飞行控制、任务执行及整体作战效能提出了更高要求^[24]。未来的研究将围绕以下方向展开: 1) 动态效能评估模型,探索基于实时战场数据的指标权重在线调整机制,提升模型的环境适应性; 2) 智能评估技术融合,引入深度强化学习、贝叶斯网络等人工智能方法,构建具备预测与优化能力的智能评估框架; 3) 高保真验证平台,结合虚拟仿真 (如数字孪生战场) 与实战化演习数据,对所构建指标体系及赋权结果,进行大规模验证与迭代优化,提升其泛化能力和实用价值; 4) 跨域协同评估扩展: 研究无人机与地面部队、有人机等其他作战单元在复杂山地环境下的跨域协同效能评估模型^[25]。

5 结束语

研究针对复杂山地环境下无人机协同察打地面战术目标带来的独特挑战,构建了涵盖“信息获取、目标识别、指挥决策、打击效果、协同效能及山地环境适应性”六个维度的作战效能评估指标体系,创新采用 AHP-熵权法组合赋权策略,确定了各指标的综合权重,既包含专家在复杂山地作战场景下的主观判断,有效融合专家经验与客观数据信息,又确定了各维度及指标的科学权重,提升了评估结果的科学性与可靠性。

参考文献:

- [1] ZHONG K, XIAO F, GAO X. Three-dimensional dynamic collaborative path planning for multiple UCAVs u-

- sing an improved NSGAI [J]. Cluster Computing, 2025, 28 (2): 75–101.
- [2] XU X, XIE C, MA L, et al. Multi-objective evolutionary algorithm with two balancing mechanisms for heterogeneous UAV swarm path planning [J]. Applied Soft Computing, 2025, 173: 112927–112951.
- [3] XU F, LI Y. Effectiveness evaluation of anti-terrorism operation of small unmanned aerial vehicle with integrated detection and attack [J]. Journal of Safety Science and Engineering, 2025, 2 (1): 57–74.
- [4] WANG X, YANG Z, CHAI S, et al. Tactical intent-driven autonomous air combat behavior generation method [J]. Complex & Intelligent Systems, 2025, 11 (1): 65–87.
- [5] WANG J, PAN C, ZHANG Q. Double weighted combat data quality evaluation method based on CVF optimized FAHP [J]. Scientific Reports, 2025, 15 (1): 2516–2531.
- [6] YUE W, ZHANG X, LIU Z. Distributed cooperative task allocation for heterogeneous UAV swarms under complex constraints [J]. Computer Communications, 2025, 231: 108043–108058.
- [7] RAJ A, AHUJA K, BUSNEL Y. AI algorithm for predicting and optimizing trajectory of massive UAV swarm [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2025, 186: 104910–104929.
- [8] ZHANG C, GUO J, WANG F, et al. A dynamic parameters genetic algorithm for collaborative strike task allocation of unmanned aerial vehicle clusters towards heterogeneous targets [J]. Applied Soft Computing, 2025, 175: 113075–113093.
- [9] WANG G, WANG F, WANG J, et al. Collaborative target assignment problem for large-scale UAV swarm based on two-stage greedy auction algorithm [J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 149: 109146–109157.
- [10] TAN C, LIU X. Improved two-stage task allocation of distributed UAV swarms based on an improved auction mechanism [J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2024, 15 (11): 5119–5128.
- [11] CHEN X, WAN Y, QI J, et al. A bi-subpopulation co-evolutionary immune algorithm for multi-objective combinatorial optimization in multi-UAV task allocation [J]. Complex & Intelligent Systems, 2025, 11 (2): 149–168.
- [12] SHEN Q, ZHANG D, HE Q, et al. A novel multi-objective dung beetle optimizer for multi-UAV cooperative path planning [J]. Heliyon, 2024, 10 (17): 37286–37321.
- [13] ZHANG M, HAN Y, CHEN S, et al. A multi-strategy improved differential evolution algorithm for UAV 3D trajectory planning in complex mountainous environments [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 125: 106672–106696.
- [14] SUN W, WANG J. Measuring combat effectiveness: A novel method based on two-dimensional frontline advancement rate [J]. International Politics, 2025, 12 (6): 1324–1349.
- [15] SARKAR P, GAYEN S K. Application of entropy-AHP and WASPAS methods for prioritizing the sub watersheds of teesta river basin in terms of soil erosion susceptibility [J]. Discover Environment, 2024, 2 (1): 135–147.
- [16] CUI Z, TAIWO O L, AARON P M. An application of AHP and fuzzy entropy-TOPSIS methods to optimize upstream petroleum investment in representative african basins [J]. Scientific Reports, 2024, 14 (1): 6956–6973.
- [17] ZHANG P, DONG W, CAI M, et al. Learning and fast adaptation for air combat decision with improved deep meta-reinforcement learning [J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2024, 3 (5): 1032–1049.
- [18] WANG H, WANG J. Enhancing multi-UAV air combat decision making via hierarchical reinforcement learning [J]. Scientific Reports, 2024, 14 (1): 4458.
- [19] LI Y, YUAN Y, CHENG Y, et al. Predictive air combat decision model with segmented reward allocation [J]. Complex & Intelligent Systems, 2024, 10 (6): 7513–7530.
- [20] ZHENG Y, XIN B, HE B, et al. Mean policy-based proximal policy optimization for maneuvering decision in multi-UAV air combat [J]. Neural Computing and Applications, 2024, 36 (31): 19667–19690.
- [21] ZHANG T, WANG Y, SUN M, et al. Air combat maneuver decision based on deep reinforcement learning with auxiliary reward [J]. Neural Computing and Applications, 2024, 36 (21): 13341–13356.
- [22] GAO L, JIANG J, XU J, et al. SAPFIS: A parallel fuzzy inference system for air combat situation assessment [J]. The Journal of Supercomputing, 2025, 81 (1): 73–99.
- [23] HUO L, WANG C, HAN Y. Autonomous air combat decision making via graph neural networks and reinforcement learning [J]. Scientific Reports, 2025, 15 (1): 16169–16190.
- [24] ZHENG Z, WEI C, DUAN H. UAV swarm air combat maneuver decision-making method based on multi-agent reinforcement learning and transferring [J]. Science China Information Sciences, 2024, 67 (8): 180204–180223.
- [25] WANG J J, ZHANG Y Y, MA J, et al. Operational effectiveness evaluation of UAV cluster based on bayesian networks [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2282 (1): 12001–12029.