

联合防空反导体系反无人机作战能力评估问题研究

马万斌¹, 杨清清¹, 郑桂妹²

(1. 国防科技大学系统工程学院, 长沙, 410003; 2. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 反无人机作战是防空反导作战的重要内容, 针对反无人机作战能力受联合防空反导体系的影响, 脱离联合防空反导体系难以全面评估反无人机作战能力的问题, 构建联合防空反导反无人机作战能力评估指标体系, 提出联合防空反导体系下反无人机作战能力评估模型; 运用博弈论思想, 综合 AHP-熵权法主客观权值, 优化评估指标权值, 通过示例验证了该方法的合理性和科学性, 为评估联合防空反导体系反无人机作战能力提供理论依据。

关键词 反无人机; 能力评估; 指标体系; 博弈论法

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.01.011

中图分类号 V279; E917 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)01-0086-09

A Study of Counter-Drone Combat Capability Evaluation in Joint Air and Missile Defense System

MA Wanbin¹, YANG Qingqing¹, ZHENG Guimei²

(1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410003, China; 2. Air and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract Counter-drone operation is an important part of air and missile operations. In view of the problems that the counter-drone operation capability is subject to the effect of joint air and missile defense system, and the evaluation capability is difficult to perform comprehensively with the counter-drone operation being divorced from the joint air and missile defense system, an evaluation index system of the joint air and missile defense and drone operation capability is constructed, and an evaluation model of the counter-drone operation capability is proposed under condition of joint air and missile defense system. The game theory is utilized for synthesizing the subjective and objective weights of AHP-entropy weight method, and optimizing the weights of evaluation indicators. The results show that the method is reasonable and scientific through the verified examples, providing a theoretical basis for evaluating the anti-drone combat capability of the joint air defense and missile defense system.

Key words counter-drone; capability evaluation; index system; game theory method

随着计算机技术、网络技术、人工智能技术、信息处理技术以及自主控制技术等飞速发展, 体系化、

集群化、智能化、小型化、多样化已经成为无人机的重要发展方向, 无人机的军事应用也由最初的侦察

收稿日期: 2024-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(72374209)

作者简介: 马万斌(1992—), 男, 甘肃山丹人, 硕士生, 研究方向为公共管理、防空反导作战能力评估。E-mail: 330108451@qq.com

通信作者: 郑桂妹(1987—), 男, 福建永泰人, 副教授, 博士生导师, 研究方向为制导雷达、雷达信号处理。E-mail: zheng-gm@163.com

引用格式: 马万斌, 杨清清, 郑桂妹. 联合防空反导体系反无人机作战能力评估问题研究[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(1): 86-94. MA Wanbin, YANG Qingqing, ZHENG Guimei. A Study of Counter-Drone Combat Capability Evaluation in Joint Air and Missile Defense System [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(1): 86-94.

监视向察打一体、协同作战、集群作战等领域发展。正如无人机作战不能脱离整个空中进攻体系一样,反无人机作战同样是联合防空反导作战行动的重要部分^[1-4]。未来空中战场,各种类型的无人作战飞机将是联合防空反导体系面对的重要新对手。反无人机作战的探索已经构建了基础的反无人机作战能力评估目的、标准、方法、手段等,其主要目的是挖掘发现体系结构、装备性能、指挥协同、战术运用、操作训练等方面短板和问题。当前反无人机作战能力评估相关研究成果主要聚焦于反无人机指控系统、作战方案、装备效能发挥等方面,而评估联合防空反导体系反无人机作战能力方面的研究较少^[2,5-8,9-13]。研究联合防空反导体系反无人机作战能力评估,首先要研究联合防空反导体系作战能力评估,根据当前研究情况,联合防空反导体系作战能力评估主要是从侦察预警能力、指挥控制能力、火力拦截能力、综合保障能力等方面构建评估体系^[14-18]。因此,结合反无人机作战的特点,立足于现有联合防空反导体系,从体系融入能力、跟踪发现能力、指挥控制能力、多手段拦截能力、持续作战能力4个方面构建评估指标体系,并运用层次分析法、熵权法、博弈论组合赋权法综合计算各指标权值,进而基于某样本数据进行计算验证。

1 评估指标构建

1.1 体系融入能力

联合防空反导体系已将分散部署在陆海空天电网等各作战域的作战力量、作战要素融合成为联合作战体系,形成整体优势。而反无人机作战力量能否融入联合防空反导体系是衡量其作战能力的重要指标。体系融入能力需要从融入体系是否稳定、能否满足作战需求、能否将所有力量均融入体系等方面进行衡量。因此,将体系融入能力定义为A,二级指标定义为体系融入稳定性A₁、体系融入深度A₂、体系融入广度A₃。

体系融入稳定性主要体现在各类指令信息传输是否精准、连续;体系融入深度主要体现在体系的态势能否共享、指令信息能否直达作战力量;体系融入广度主要体现在能否将所有反无人机作战力量融入体系,以及最大能够接入的反无人机作战数量。

1.2 发现跟踪能力

跟踪发现是反无人机作战行动的起始,而联合防空反导体系已经构建了大的侦察预警体系,作为反无人机行动只需融入体系,在大的侦察预警体系支撑下完成对来袭无人机的发现、跟踪及分辨等,为有效拦截提供可靠依据。因此,将发现跟踪能力定义为B,目标发现能力B₁、目标跟踪能力B₂、目标

分辨能力B₃作为二级指标。

目标发现能力主要体现在对来袭无人机的发现的空域范围,可以通过发现距离和高度进行衡量;目标跟踪能力决定了下一步拦截无人机的具体行动,其对拦截行动的影响主要体现在目标跟踪的精度与跟踪的批数等方面;目标分辨能力主要体现在对来袭无人机的属性识别、数量分辨以及类型识别方面。跟踪批数与目标数量分辨的不同之处在于前者指的是跟踪目标批数,而后者是指对每一批目标中的具体数量进行分辨,以保证能够对来袭无人机全部实施拦截。

1.3 指挥控制能力

指挥控制能力是指作战部队指挥员和各级指挥机构的作战指挥和兵力运用能力,指挥控制能力的高低直接影响到各作战效能的生成和发挥,指挥控制主要是通过对无人机作战态势的掌控研判,精准完成作战筹划,并根据作战进程做出正确的决策、控制作战力量实施有效拦截,同时对各类特殊情况能够做出正确有效的处置。因此,将指挥控制能力定义为C,二级指标分解为态势掌控能力C₁、作战筹划能力C₂、指挥决策能力C₃以及应急处置能力C₄。

1.4 多手段拦截能力

多手段拦截能力是指依托防空反导作战体系,高度融合各种软硬杀伤武器装备及新质作战力量,对敌各类进袭无人机实施快速、精确、高效的聚合式打击能力。与传统的防空作战不同,反无人机作战需要更为灵活多样的杀伤或致盲手段,实施多层次防御、联合抗击,最大程度实现对无人机的毁伤或驱离能力。因此,可将多手段拦截能力定义为D,目标选择能力D₁、力量运用能力D₂、综合费效比D₃作为二级指标。

目标选择能力主要是从拦截目标对我威胁的大小、拦截的可行性以及拦截目标本身的价值3个方面进行衡量;力量运用能力主要是能否根据来袭无人机的作战规模、作战意图正确地选择最优的拦截力量实施拦截,主要体现在力量分配与目标毁伤2个方面;综合费效比是对多手段拦截力量合理运用的综合体现。

1.5 持续作战能力

持续作战能力是联合防空反导体系在遭受无人机进袭或完成对无人机抗击之后仍具备的作战能力,既需要做好自身防护,在敌无人机攻击后保存作战能力,又需要强大的综合保障能力,在装备受损或弹药不足时能够及时维修和补充。因此,将持续作战能力定义为E,自身防护能力E₁、综合保障能力E₂作为二级指标。

自身防护主要包括防敌侦察与防敌打击2个方

面,综合保障需要从装备维修能力和武器弹药补充能力进行衡量。

构建联合防空反导体系反无人机作战能力评估指标体系如表 1 所示。

表 1 联合防空反导体系反无人机作战能力评估指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of anti-UAV combat capability of joint air defense and missile defense system

| 一级指标 | 二级指标 | 三级指标 |
|-----------|---------------|--|
| 体系融入能力 A | 体系融入稳定性 A_1 | 指令信息传输连续性 A_{11} 指令信息传输精确性 A_{12} |
| | 体系融入深度 A_2 | 态势共享能力 A_{21} 执行信息直达能力 A_{22} |
| | 体系融入广度 A_3 | 体系融入型号 A_{31} 最大接入数量 A_{32} |
| 发现跟踪能力 B | 目标发现能力 B_1 | 目标发现距离 B_{11} 目标发现高度 B_{12} |
| | 目标跟踪能力 B_2 | 目标跟踪精度 B_{21} 目标跟踪数量 B_{22} 目标数量分辨 B_{31} |
| | 目标分辨能力 B_3 | 目标类型识别 B_{32} 目标属性识别 B_{33} |
| 指挥控制能力 C | 态势掌控能力 C_1 | 敌情掌握能力 C_{11} 我情掌握能力 C_{12} |
| | 作战筹划能力 C_2 | 战场环境掌握能力 C_{13} 战前筹划能力 C_{21} 战中筹划能力 C_{22} 力量运用能力 C_{31} |
| | 指挥决策能力 C_3 | 指令下达准确性 C_{32} 指令下达时效性 C_{33} |
| | 应急处置能力 C_4 | 空中特情处置能力 C_{41} 地面特情处置能力 C_{42} |
| 多手段拦截能力 D | 目标选择能力 D_1 | 威胁大小判断 D_{11} 目标价值判断 D_{12} |
| | 力量运用能力 D_2 | 拦截可行性判断 D_{13} 力量分配能力 D_{21} 目标毁伤能力 D_{22} |
| | 综合费效比 D_3 | 费效比 D_{31} |
| 持续作战能力 E | 自身防护能力 E_1 | 防敌侦察能力 E_{11} 防敌打击能力 E_{12} |
| | 综合保障能力 E_2 | 装备维修能力 E_{21} 连续补充能力 E_{22} |

2 评估指标权值计算

评估指标权值体现的是同一层级指标在该能力中的相对重要性,或者说下一级指标对上级指标影响的重要程度以及所占比例的大小。因此,要科学合理设置评估指标体系的权值,是合理构建评估指标体系的重要因素,是科学准确评估联合防空体系反无人机作战能力的前提。为计算指标权值,主要采取层次分析法、熵权法以及博弈论组合赋权法 3 种方法进行计算。层次分析法属于主观赋权法的一

种,其缺点是受专家的专业能力、工作经验、个人喜好等因素影响较大,权值存在着较大的主观性;熵权法属于客观赋权法,是基于数据和客观事实进行权值计算,有效地避免了因主观因素产生的偏差,但是受数据波动影响较大。为了能够更加科学合理地设置指标权值,本文引入博弈论组合赋权法,综合层次分析法和熵权法所得的权值,得到最终反无人机作战能力评估指标的权值^[19-23]。

2.1 层次分析法

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是一种定性与定量相结合的计算权值的研究方法。

一般层次分析法的过程如下:

步骤1 明确评估问题,即要明确最终评估目的、判断准则以及它们之间的相互关系。

步骤2 建立层次结构,即根据对问题的明确和分析,将所涉及的指标按各自性质分层排列,形成便于问题解决的层次结构,使问题的结构特征明确化。

步骤3 建立判断矩阵,在同一层次上,运用“1-9标度法”定义两两比较的判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,其中 a_{ij} 为元素 i 与 j 之间的重要性之比。见表 2。

表 2 重要性比较尺度表

Tab. 2 Importance comparison scale table

| 标度 | 含义 |
|---------|---|
| 3 | 2个因素相比,具有同样重要性 |
| 5 | 2个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要 |
| 7 | 2个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要 |
| 9 | 2个因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要 |
| 1 | 2个因素相比,一个因素比另一个因素极端重要 |
| 2、4、6、8 | 代表上述两相邻判断的中值 |
| 倒数 | i 与 j 相比的标度为 a_{ij} ,则 j 与 i 相比为 $\frac{1}{a_{ij}}$ |

利用和积法计算得出各个指标权值向量 $\mathbf{W}_{\text{主}} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ 。

步骤4 一致性检验,为了检验各个评价指标之间重要程度的协调性,避免出现评价指标重要性出现矛盾的情况,需要进一步对判断矩阵进行一致性检验。定义判断矩阵 A 的一致性检验系数 CR (consistency ratio)。CR = $\frac{\text{CI}}{\text{RI}}$, 其中 CI 为一致性指

标,且 $\text{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$, λ_{\max} 为判断矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 的最大特征值; RI 为平均一致性指标。当 $\text{CR} \leq 0.1$ 时,一致性通过,说明判断矩阵赋值在合理范围内。随机一致性指数 RI 如表 3 所示。

表 3 随机一致性指数

Tab. 3 Random consistency index

| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RI | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 |

2.2 熵权法

熵权法(entropy weight, EW)是一种客观赋权法,可以对原始数据的内在规律和信息量进行充分挖掘,最终得出的权值不受决策者的主观经验或偏好而产生偏差,整个评价过程依据较强的数学理论支撑,最终评价结果更具有客观性。其原理是根据各评价指标的信息熵大小来确定其权值,信息熵越小,表明该指标的变异程度越大,提供的信息量越多,在综合评价中所能起到的作用也越大,其权值也就越大;相反,信息熵越大,表明该指标变异程度越

小,提供的信息量越小,在综合评价中所能起到的作用也越小,其权值也就越小。应用熵权法确定权值的一般步骤如下:

步骤1 预处理,构建样本和评价指标的判断矩阵,并进行数据标准化处理,利用各指标数据标准化后的值来对正向指标和负向指标进行归一化处理。

步骤2 求指标的比值,首先计算各项指标下的样本占该指标的比重,利用归一化思想进行计算。

步骤3 计算各项指标的信息熵,具体请参见文献[9]。

步骤4 计算信息熵冗余度。

步骤5 计算各指标权值,最终得出熵权法计算权值向量。

2.3 博弈论组合赋权法

博弈论组合赋权的基本思想为在不同方法确定的基本权值之间得到最优权值,这一目标可通过极小化组合权值与各基本权值间的偏差实现。在对联合防空反导体系反无人机作战能力评估指标进行赋权时,为解决主客观不同权值之间的矛盾关系,利用博弈论组合赋权法,实现主客观指标权值之间的平衡协调,得到最优的指标权值^[21]。

若 θ_1, θ_2 为组合系数,则综合权值 $\mathbf{W}_{\text{组}}$ 为:

$$\mathbf{W}_{\text{组}} = \theta_1 \mathbf{W}_{\text{主}}^T + \theta_2 \mathbf{W}_{\text{客}}^T \quad (1)$$

为对 θ_1, θ_2 进行优化,引入交叉规划模型:

$$\begin{cases} y_1 = \min \| \theta_1 \mathbf{W}_{\text{主}}^T + \theta_2 \mathbf{W}_{\text{客}}^T - \mathbf{W}_{\text{主}}^T \|_2 \\ y_2 = \min \| \theta_1 \mathbf{W}_{\text{主}}^T + \theta_2 \mathbf{W}_{\text{客}}^T - \mathbf{W}_{\text{客}}^T \|_2 \end{cases} \quad (2)$$

优化后的一阶导数方程为:

$$\begin{cases} \theta_1 \mathbf{W}_{\text{主}} \mathbf{W}_{\text{主}}^T + \theta_2 \mathbf{W}_{\text{主}} \mathbf{W}_{\text{客}}^T = \mathbf{W}_{\text{主}} \mathbf{W}_{\text{主}}^T \\ \theta_1 \mathbf{W}_{\text{客}} \mathbf{W}_{\text{主}}^T + \theta_2 \mathbf{W}_{\text{客}} \mathbf{W}_{\text{客}}^T = \mathbf{W}_{\text{客}} \mathbf{W}_{\text{客}}^T \end{cases} \quad (3)$$

得到组合系数,并对其进行归一化处理:

$$\theta_1^* = \frac{\theta_1}{\theta_1 + \theta_2}, \theta_2^* = \frac{\theta_2}{\theta_1 + \theta_2} \quad (4)$$

最终得到优化后的各项指标综合权值向量 $\mathbf{W}_{\text{组}} = \theta_1^* \mathbf{W}_{\text{主}}^T + \theta_2^* \mathbf{W}_{\text{客}}^T$ 。

3 评估指标量化模型

为了能够科学、直观地反映联合防空反导体系反无人机作战能力,构建了评估指标量化模型,区分各级指标进行量化处理。

3.1 一级、二级指标的计算方法

一级、二级指标均采用加权法进行计算,即上一级指标的值为其下一级指标量化值乘以权值。

$$Q_k = \sum_{i=1}^n M_{ki} W_{ki} \quad (5)$$

式中: Q_k 为指标的量化数值; M_{ki} 为第 k 个一级指标的第 i 个二级指标的量化数值; W_{ki} 为第 k 个一级指标的第 i 个二级指标的指标权值; n 为第 k 个一级指标的二级指标数量。

3.2 三级指标的计算方法

三级指标作为联合防空反导体系反无人机作战能力评估的最底层指标,其计算方法各有不同,具体量化计算方法如表 4 所示。

表 4 三级指标计算方法

Tab. 4 Calculation method of three-level indicators

| 序号 | 三级指标 | 计算方法 | 备注 |
|----|-----------|--|---|
| 1 | 指令信息传输连续性 | $A_{11} = (V_{zlzs} - V_{jdc}) / V_{zlzs}$ | V_{jdc} 指令传输间断次数 V_{zlzs} 指令传输总数 V_{esew} 指令传输错误次数 V_{zlzs} 指令传输总数 V_{kgxys} 可共享要素 V_{tssy} 态势要素 V_{zdl} 可直达指令 V_{xyzl} 应直达指令数量 V_{krxxh} 可融入型号 V_{ejrwxy} 参加任务型号 V_{ejrwxy} 参加反无装备数量 V_{zdl} 可接入反无装备最大数量 V_{fxzd} 发现最远距离 V_{fxpj} 发现平均距离 V_{fxzg} 发现最大高度 V_{fxpjg} 发现平均高度 V_{zshj} 目标真实航迹 V_{gzhl} 跟踪航迹 V_{gzsl} 跟踪数量 V_{kzzs} 空中总数量 V_{mbfb} 一批多架目标分辨数量 V_{ypdjze} 空中一批多架目标总数 V_{cwpd} 错误判断目标总数 V_{mhzs} 判断目标总数 V_{sxwpd} 错误判断目标属性总数 V_{mbsxzs} 判断目标属性总数 V_{dqzwys} 敌情掌握要素 V_{dqys} 敌情要素 V_{wqzwys} 我情掌握要素 V_{wqys} 我情要素 V_{hjzwys} 战场环境掌握要素 V_{hjys} 战场环境要素 V_{zqyxsj} 战前筹划有效应用作战实践数量 V_{zqchzs} 战前筹划方案总量 V_{zzyxsj} 战中筹划有效应用作战实践数量 V_{zzchzs} 战中筹划方案总量 V_{ljsl} 有效拦截目标数量数量 V_{ljzs} 拦截目标总数 V_{zqzl} 正确指令数量 V_{zlzs} 指令下达总数 V_{zlyc} 指令延迟数量 V_{zlzs} 指令下达总数 V_{zqkt} 正确处置空中特情数量 V_{ktzs} 空中特情总数 |
| 2 | 指令信息传输精确性 | $A_{12} = (V_{zlzs} - V_{esew}) / V_{zlzs}$ | |
| 3 | 态势共享能力 | $A_{21} = V_{kgxys} / V_{tssy}$ | |
| 4 | 执行信息直达能力 | $A_{22} = V_{zdl} / V_{xyzl}$ | |
| 5 | 体系融入型号 | $A_{31} = V_{krxxh} / V_{ejrwxy}$ | |
| 6 | 最大接入数量 | $A_{32} = (V_{zdl} - V_{cjsl}) / V_{zds}$ | |
| 7 | 目标发现距离 | $B_{11} = (V_{fxzd} - V_{fxpj}) / V_{fxzd}$ | |
| 8 | 目标发现高度 | $B_{12} = (V_{fxzg} - V_{fxpjg}) / V_{fxzg}$ | |
| 9 | 目标跟踪精度 | $B_{21} = V_{zshj} - V_{gzhl} / V_{zshj}$ | |
| 10 | 目标跟踪数量 | $B_{22} = V_{gzsl} / V_{kzzs}$ | |
| 11 | 目标数量分辨 | $B_{31} = V_{mbfb} / V_{ypdjze}$ | |
| 12 | 目标类型识别 | $B_{32} = (V_{mhzs} - V_{cwpd}) / V_{mhzs}$ | |
| 13 | 目标属性识别 | $B_{33} = (V_{mbsxzs} - V_{sxwpd}) / V_{mbsxzs}$ | |
| 14 | 敌情掌握能力 | $C_{11} = V_{dqzwys} / V_{dqys}$ | |
| 15 | 我情掌握能力 | $C_{12} = V_{wqzwys} / V_{wqys}$ | |
| 16 | 战场环境掌握能力 | $C_{11} = V_{hjzwys} / V_{hjys}$ | |
| 17 | 战前筹划能力 | $C_{21} = V_{zqyxsj} / V_{zqchzs}$ | |
| 18 | 战中筹划能力 | $C_{22} = V_{zzyxsj} / V_{zzchzs}$ | |
| 19 | 力量运用能力 | $C_{31} = V_{ljsl} / V_{ljzs}$ | |
| 20 | 指令下达准确性 | $C_{32} = V_{zqzl} / V_{zlzs}$ | |
| 21 | 指令下达时效性 | $C_{33} = (V_{zlzs} - V_{zlyc}) / V_{zlzs}$ | |
| 22 | 空中特情处置能力 | $C_{41} = V_{zqkt} / V_{ktzs}$ | |

续表

| 序号 | 三级指标 | 计算方法 | 备注 |
|----|----------|--|--|
| 23 | 地面特情处置能力 | $C_{42} = V_{zqdt}/V_{dtzs}$ | V_{zqdt} 正确处置地面特情数量 V_{dtzs} 地面特情总数 |
| 24 | 威胁大小判断 | $D_{11} = V_{zqpd}/V_{mbzs}$ | V_{zqpd} 正确判断威胁目标数量 V_{mbzs} 目标总数 |
| 25 | 目标价值判断 | $D_{12} = V_{zqpdjz}/V_{mbzs}$ | V_{zqpdjz} 正确判断价值目标数量 V_{mbzs} 目标总数 |
| 26 | 拦截可行性判断 | $D_{13} = (V_{djs} - V_{bjbyjzs})/V_{djs}$ | $V_{bjbyjzs}$ 不具备打击条件的目标 V_{djs} 打击目标总数 |
| 27 | 力量分配能力 | $D_{21} = V_{hlp}/V_{fpzs}$ | V_{hlp} 成功分配目标数量 V_{fpzs} 分配目标总数 |
| 28 | 目标毁伤能力 | $D_{22} = V_{cghs}/V_{sjmb}$ | V_{cghs} 成功毁伤目标数量 V_{sjmb} 射击目标总数 |
| 29 | 费效比 | $D_{31} = V_{dsscb}/V_{wxhcb}$ | V_{dsscb} 敌损失成本 V_{wxhcb} 我消耗成本 |
| 30 | 防敌侦察能力 | $E_{11} = V_{fxsl}/V_{zbzs}$ | V_{fxsl} 敌发现我装备数量 V_{zbzs} 装备总数 |
| 31 | 防敌打击能力 | $E_{12} = V_{djsl}/V_{zbzs}$ | V_{djsl} 敌打击我装备数量 V_{zbzs} 装备总数 |
| 32 | 装备维修能力 | $E_{21} = V_{wxsj}/V_{zzsj}$ | V_{wxsj} 装备维修用时 V_{zzsj} 作战用时 |
| 33 | 连续补充能力 | $E_{22} = V_{dybc}/V_{dyxq}$ | V_{dybc} 弹药补充数量 V_{dyxq} 弹药需求数量 |

4 作战能力评估实例研究

为验证模型算法,以反无人机蜂群样本数据为例,对防空反导体系反无人机作战能力进行评估。

4.1 确定各级指标权值

4.1.1 层次分析法计算主观权值

依据相关领域专家意见,得出反无人机作战能力评估指标判断矩阵,确定主观权值。一级指标矩阵如表5所示。

表5 判断矩阵

Tab. 5 Judgment matrix

| 能力 P | 体系融入能力 A | 发现跟踪能力 B | 指挥控制能力 C | 多手段拦截能力 D | 持续作战能力 E |
|-------------|------------|------------|------------|-------------|------------|
| 体系融入能力 A | 1 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 2 |
| 预警探测能力 B | 3 | 1 | 1/2 | 1/4 | 4 |
| 指挥控制能力 C | 4 | 2 | 1 | 1/3 | 5 |
| 多手段拦截能力 D | 5 | 4 | 3 | 1 | 6 |
| 持续作战能力 E | 1/2 | 1/4 | 1/5 | 1/6 | 1 |

分别计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max} = 5.2739$,对应的归一化特征向量 $\mathbf{W}_\text{主} = [0.076\ 4, 0.161\ 1, 0.242\ 2, 0.470\ 0, 0.050\ 3]^T$,进而可计算出一致性检验指标 CI 和随机一致性检验指标 CR,

分别为: $CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = 0.0685$; $CR = \frac{CI}{RI} = 0.0611 < 0.1$ 。判断矩阵一致性符合要求。由此得出反无人

机作战一级指标主观权值为 $\mathbf{W}_P = (0.076\ 4, 0.161\ 1, 0.242\ 2, 0.470\ 0, 0.050\ 3)$ 。采用相同方法,构造二级指标判断矩阵、三级判断矩阵。

4.1.2 熵权法计算客观权值

使用样本数据进行仿真推演,选取反无人机课题3次推演数据,运用熵权法进行评估指标客观权值计算。一级指标客观权值如表6所示。

表 6 3 次仿真推演相关数值
Tab. 6 Correlation values of the three simulations

| 指标 | 体系融入 A | 发现跟踪 B | 指挥控制 C | 多手段拦截 D | 持续作战 E |
|-------|--------|--------|--------|---------|--------|
| 第 1 次 | 76.63 | 84.35 | 93.24 | 87.38 | 82.69 |
| 第 2 次 | 69.86 | 87.69 | 91.79 | 85.34 | 84.16 |
| 第 3 次 | 71.39 | 90.21 | 92.62 | 86.40 | 82.76 |

经过标准化、信息熵计算、权值计算后得到表 7。

表 7 熵权法计算权值
Tab. 7 Weight value calculated by entropy weight method

| 指标 | 体系融入 A | 发现跟踪 B | 指挥控制 C | 多手段拦截 D | 持续作战 E |
|-----|--------|--------|--------|---------|--------|
| 信息熵 | 0.49 | 0.60 | 0.60 | 0.58 | 0.17 |
| 权重 | 0.20 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.32 |

采用相同方式,计算得到二、三级指标客观权值。

4.1.3 博弈论组合赋权法计算权值

根据层次分析法计算的主观权值与熵权法计算

的客观权值,综合运用博弈论组合赋权法计算组合系数,确定最终权值。通过博弈论原理,以离差极小化为目标,计算出配比系数 $\theta_1^* = 0.43, \theta_2^* = 0.57$ 。

计算出最终权值,如表 8 所示。

表 8 联合防空反导体系无人机作战能力评估指标体系权值

Tab. 8 Weight value of evaluation index system of UAV combat capability of joint air defense and anti-missile system

| 一级指标 | 权值 | | | 二级指标 | 权值 | | | 三级指标 | 权值 | | |
|------|---------|------|------|-------|---------|------|------|----------|---------|------|------|
| | 层次分析法权值 | 熵权法 | 组合法 | | 层次分析法权值 | 熵权法 | 组合法 | | 层次分析法权值 | 熵权法 | 组合法 |
| A | 0.076 4 | 0.2 | 0.15 | A_1 | 0.276 1 | 0.27 | 0.27 | A_{11} | 0.6 | 0.52 | 0.55 |
| | | | | | | | | A_{12} | 0.4 | 0.48 | 0.45 |
| | | | | | | | | A_{21} | 0.75 | 0.68 | 0.71 |
| | 0.161 1 | 0.16 | 0.16 | A_2 | 0.385 5 | 0.31 | 0.34 | A_{22} | 0.25 | 0.32 | 0.29 |
| | | | | | | | | A_{31} | 0.6 | 0.42 | 0.50 |
| | | | | | | | | A_{32} | 0.4 | 0.58 | 0.50 |
| | 0.242 2 | 0.16 | 0.20 | B_1 | 0.640 5 | 0.35 | 0.47 | B_{11} | 0.7 | 0.83 | 0.77 |
| | | | | | | | | B_{12} | 0.3 | 0.17 | 0.23 |
| | | | | | | | | B_{21} | 0.6 | 0.64 | 0.62 |
| B | 0.470 0 | 0.16 | 0.29 | B_2 | 0.205 9 | 0.36 | 0.29 | B_{22} | 0.4 | 0.36 | 0.38 |
| | | | | | | | | B_{31} | 0.309 7 | 0.29 | 0.30 |
| | | | | | | | | B_{32} | 0.309 0 | 0.35 | 0.33 |
| | 0.222 2 | 0.16 | 0.20 | B_3 | 0.153 7 | 0.29 | 0.23 | B_{33} | 0.381 3 | 0.36 | 0.37 |
| | | | | | | | | C_{11} | 0.542 1 | 0.52 | 0.53 |
| | | | | | | | | C_{12} | 0.254 7 | 0.26 | 0.26 |
| C | 0.222 2 | 0.16 | 0.20 | C_1 | 0.195 3 | 0.21 | 0.20 | C_{13} | 0.203 2 | 0.22 | 0.21 |
| | | | | | | | | C_{21} | 0.33 | 0.58 | 0.47 |
| | | | | | | | | C_{22} | 0.67 | 0.42 | 0.53 |
| | 0.342 2 | 0.16 | 0.20 | C_2 | 0.264 6 | 0.36 | 0.32 | C_{31} | 0.4 | 0.32 | 0.35 |
| | | | | | | | | C_{32} | 0.3 | 0.36 | 0.33 |
| | | | | | | | | C_{33} | 0.3 | 0.32 | 0.31 |
| D | 0.470 0 | 0.16 | 0.29 | C_3 | 0.215 8 | 0.19 | 0.20 | C_{41} | 0.7 | 0.51 | 0.59 |
| | | | | | | | | C_{42} | 0.3 | 0.49 | 0.41 |
| | | | | | | | | D_{11} | 0.2 | 0.38 | 0.30 |
| | 0.470 0 | 0.16 | 0.29 | D_1 | 0.594 9 | 0.48 | 0.53 | D_{12} | 0.2 | 0.27 | 0.24 |
| | | | | | | | | D_{13} | 0.6 | 0.35 | 0.46 |
| | | | | | | | | D_{21} | 0.25 | 0.68 | 0.50 |

续表

| 一级 指标 | 权值 | | | 二级 指标 | 权值 | | | 三级 指标 | 权值 | | |
|----------|-------------|------|------|----------|-------------|------|------|----------|-------------|------|------|
| | 层次分析 法权值 | 熵权法 | 组合法 | | 层次分析 法权值 | 熵权法 | 组合法 | | 层次分析 法权值 | 熵权法 | 组合法 |
| E | 0.050 3 | 0.32 | 0.20 | E_1 | 0.600 | 0.62 | 0.61 | E_{11} | 0.25 | 0.32 | 0.29 |
| | | | | E_2 | 0.400 | 0.38 | 0.39 | E_{12} | 0.75 | 0.68 | 0.71 |
| | | | | | | | | E_{21} | 0.67 | 0.56 | 0.61 |
| | | | | | | | | E_{22} | 0.33 | 0.44 | 0.39 |

4.2 联合防空反导体系反无人机作战能力评定

结合样本数据,运用层次分析法、熵权法、博弈论组合赋权法得出联合防空反导体系反无人机作战能力如表9所示。

表9 3种方法计算作战能力对比表

Tab. 9 Comparison table of anti-UAV combat capability calculated by three methods

| 方法 | 层次分析法 | 熵权法 | 博弈论组合赋权法 |
|------|-------|------|----------|
| 计算结果 | 0.59 | 0.71 | 0.66 |

根据所收集的样本数据进行细致的仿真推演,深入分析了多种可能的情景与结果。在此基础上,采用博弈论组合赋权法进行计算,该方法通过综合考虑不同因素之间的相互影响及权重分配,使得最终得出的结论不仅理论上站得住脚,而且与实际情况的契合度更高。这种方法的应用,不仅提升了分析结果的准确性和可靠性,还为我们制定更为科学合理的决策提供了有力支持。

5 结语

本文通过分析现阶段联合防空反导体系下反无人机作战需求及其特点,构建相应的作战能力评估指标体系,并基于博弈论组合赋权法计算权值,充分考虑主、客观因素对指标权值的影响,以样本数据进行计算验证,证明了该指标体系建立的合理性和博弈论组合赋权法计算权值的科学性,对联合防空反导体系下反无人机作战能力评估工作提供了一些经验参考。但咨询专家多为防空反导领域专家,未涵盖预警探测与联合作战指挥等业内专家,评估指标体系构建还有待进一步深化研究,且随装备的发展,相应评估标准也应该随之动态变化,以具备持续的有效性和适用性。

参考文献

- [1] 汪禹喆,毕凯,李龙跃.地空导弹应对无人机“穿透”入侵的拦截能力分析[J].装甲兵学报,2022,1(3): 66-71.
WANG Y Z,BI K,LI L Y. Analysis of the Ability of Surface-to-Air Defense System to Intercept the Penetrating UAV[J]. Journal of Armored Forces, 2022, 1(3): 66-71. (in Chinese)
- [2] 王远航,杨作宾,杨军佳.反无人机作战侦察情报系统作战效能评估[J].兵工自动化,2022,41(11): 63-67.
WANG Y H,YANG Z B,YANG J J. Operational Effectiveness Evaluation of Anti-UAV Operational Reconnaissance Intelligence System[J]. Ordnance Industry Automation, 2022, 41(11): 63-67. (in Chinese)
- [3] JIN W C, KIM K, CHOI J W. Adaptive Beam Control Considering Location Inaccuracy for Anti-UAV Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(2): 2320-2331.
- [4] 林晋福,朱玉,张佳强,等.基于并行作战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 J F, ZHY Y, ZHANG J Q, 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.
- [5] 杨永亮,丁天宝,赵军朝,等.弹炮结合防空武器反无人机集群作战能力研究[J].火炮发射与控制学报,2019,40(4): 47-50.
YANG Y L,DING T B,ZHAO J C,et al. Research on Anti-UAV Cluster Combat Capability of Integrated Missile and Antiaircraft Gun [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2019, 40(4): 47-50. (in Chinese)
- [6] 焦士俊,刘锐,刘剑豪,等.反无人机蜂群作战效能评估[J].舰船电子对抗,2019,42(4): 27-32.
JIAO S J,LIU R,LIU J H,et al. Efficiency Evaluation of Antagonizing UAV Swarm Operation [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2019, 42(4): 27-32. (in Chinese)
- [7] HONG B W, WANG X H, SHI X W, et al. Research and Experiments on Anti-UAV Technology[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2020, 35(5): 511-518.
- [8] 岳江锋,谢京华.反无人机作战方案评估方法研究[J].现代防御技术,2024,52(5): 9-16.
YUE J F, XIE J H. Research on Evaluation Method of Anti-UAV Schemes[J]. Modern Defence Technology, 2024, 52(5): 9-16. (in Chinese)
- [9] 卜晓东,周志超,徐振森,等.基于改进信息熵法的反集群目标作战效能评估研究[J].空天防御,2021,

- 4(1): 14-18.
- BU X D, ZHOU Z C, XU Z S, et al. Research on Combat Effectiveness Evaluation of Anti-Group Target Based on Improved Information Entropy Method [J]. Air & Space Defense, 2021, 4(1): 14-18. (in Chinese)
- [10] ZHAO J, ZHANG J S, LI D D, et al. Vision-Based Anti-UAV Detection and Tracking [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(12): 25323-25334.
- [11] 曹冠平, 轩自清, 李坎. 基于灰色层次分析法的无人机蜂群作战能力评估 [J]. 装甲兵学报, 2023, 2(4): 65-69, 88.
- CAO G P, ZHEN Z Q, LI K. Operational Capability Evaluation of UAV Swarm Based on Grey-AHP [J]. Journal of Armored Forces, 2023, 2(4): 65-69, 88. (in Chinese)
- [12] 宋彬杰, 王远航, 张琪. 基于集成堆叠神经网络的某反无人机系统作战效能评估问题研究 [J]. 舰船电子工程, 2023, 43(4): 145-149.
- SONG B J, WANG Y H, ZHANG Q. Research on Operational Efficiency Evaluation of an Anti-UAV System Based on Ensembled Stacking Neural Network [J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(4): 145-149. (in Chinese)
- [13] 李峥, 蔡译锋, 吴军. 面向作战效能优化的反辐射无人机目标分配 [J]. 无线电工程, 2019, 49(10): 849-854.
- LI Z, CAI Y F, WU J. An Anti-Radiation UAV Target Assignment Method for Optimizing Operational Effectiveness [J]. Radio Engineering, 2019, 49(10): 849-854. (in Chinese)
- [14] 张海龙, 孙世宇. 对抗条件下防空武器系统效能评估 [J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(2): 71-74.
- ZHANG H L, SUN S Y. Combat Effectiveness of Air Defense Weapon System on Antagonism Condition [J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(2): 71-74. (in Chinese)
- [15] 龚亮, 王庆权, 罗红吉. 防空导弹武器系统作战效能评估实战化改进模型 [J]. 现代防御技术, 2021, 49(6): 15-21.
- GONG L, WANG Q Q, LUO H J. Real Combat-Like Improved Model of Operational Effectiveness Evaluation of Air Defense Missile Weapon System [J]. Modern Defense Technology, 2021, 49(6): 15-21. (in Chinese)
- [16] 刘泽宇, 董晨, 师鹏, 等. 防空体系作战能力评估方法 [J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(11): 35-40.
- LIU Z Y, DONG C, SHI P, et al. Research on Evaluation Method of Air Defense System-of-System Combat Capability [J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(11): 35-40. (in Chinese)
- [17] 赵令才. 防空作战训练效能综合评估 [D]. 济南: 山东大学, 2008.
- ZHAO L C. Valuation of Air Defense Combat Training Efficiency [D]. Jinan: Shandong University, 2008. (in Chinese)
- [18] 位秀雷, 张曦. 航母编队防空作战效能指标体系构建与评估方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2019, 39(1): 14-17, 26.
- WEI X L, ZHANG X. Index System Design and Evaluation for Air Defense Capability of the Aircraft Carrier Formation [J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(1): 14-17, 26. (in Chinese)
- [19] 刘巧梅, 温海燕, 李爱春, 等. 基于博弈论组合赋权-未确知测度理论的隧道突涌水风险评价 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(7): 799-806.
- LIU Q M, WEN H Y, LI AI C, et al. Risk Assessment of Tunnel Water Inrush Based on Game Theory Combinatorial Weighting-Unascertained Measure Theory [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(7): 799-806. (in Chinese)
- [20] 李红. 防空作战中空袭目标的威胁评估方法研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
- LI H. Research on the Threat Assessment Method of Air Raid Targets in Air Defense Operations [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023. (in Chinese)
- [21] 周爱民, 马健, 张书涛, 等. 基于博弈论组合赋权法的产品形态审美评价模型 [J]. 包装工程, 2023, 44(2): 34-40.
- ZHOU A M, MA J, ZHANG S T, et al. Aesthetic Evaluation Model of Product Form Based on Combination Weighting Method of Game Theory [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(2): 34-40. (in Chinese)
- [22] 许少凡, 贺石中, 陶辉, 等. 基于层次分析和熵权法的齿轮油选型评价 [J]. 润滑与密封, 2024, 49(1): 172-178.
- XU S F, HE S Z, TAO H, et al. Evaluation of Gear Oil Selection Based on Hierarchical Analysis and Entropy Weight Method [J]. Lubrication Engineering, 2024, 49(1): 172-178. (in Chinese)
- [23] 曾小康, 冯阳, 赖文庆, 等. 基于 AHP-熵权法的城市燃气管道风险评价 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(5): 130-135.
- ZENG X K, FENG Y, LAI W Q, et al. Risk Assessment of Urban Gas Pipeline Based on AHP and Entropy Weight Method [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(5): 130-135. (in Chinese)
- [24] 杜鹤立. 基于 AHP-熵权法的风电项目后评价研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2024.
- DU H L. Post-Evaluation Research of Wind Power Projects Based on AHP-Entropy Weight Method [D]. Beijing: North China University of Technology, 2024. (in Chinese)

(编辑:刘勇)