

基于TOPSIS模型的动态多任务场景下军用软件能力需求满足性评估

谢运权, 朱卫星, 李瑞阳, 顾敏

(中国人民解放军陆军工程大学 指挥控制工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 军用软件能力需求满足性评估作为装备试验鉴定体系中的关键环节, 直接影响作战效能生成与验证的有效性。针对当前评估方法中专家经验指标模糊、静态赋权模型与动态多任务耦合效应的适配性不足, 以及交叉依赖指标权重虚高等挑战, 借鉴软件场景测试思路, 采用动态场景流图建模方法对典型作战任务序列进行解构, 结合蒙特卡洛仿真构建场景关键性权重的动态量化模型。在此基础上, 针对传统分层评估中共享指标权重重复累加的累积偏差难题, 设计基于贡献比例系数(CRC)的互馈优化机制, 提出一种互馈优化的分层TOPSIS评估框架, 实现从底层性能指标到顶层作战能力的多粒度满足性度量。实验案例表明, 该模型能够有效识别交叉依赖指标的权重虚增问题, 使评估结果的客观性显著提升, 并发现软件能力短板和使用约束, 可实现软件评估工作从“质量保证”到“能力保证”的拓展。

关键词: 军用软件能力评估; 分层熵权TOPSIS; 动态多任务场景; 需求满足性评估; 装备试验鉴定

DOI: 10.11907/rjdk.251291

扫描二维码阅读全文:

中图分类号: TP306.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2026)007-0047-11



Evaluation of Military Software Capability Satisfaction in Dynamic Multi-Task Scenarios Based on TOPSIS Model

XIE Yunquan, ZHU Weixing, LI Ruiyang, GU Min

(Command and Control Engineering College, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: As a pivotal component within the equipment testing and evaluation system, military software capability requirement compliance assessment directly influences the effectiveness of combat efficacy generation and verification. Addressing current challenges in evaluation methodologies, including ambiguous expert-experience-based indicators, insufficient adaptability between static weighting models and dynamic multi-task coupling effects, as well as inflated weights of cross-dependent indicators, this study draws inspiration from software scenario testing. We propose a dynamic scenario flow graph modeling approach to deconstruct typical operational task sequences, coupled with Monte Carlo simulation to establish a dynamic quantification model for scenario criticality weighting. Building upon this foundation, to resolve the persistent issue of cumulative deviation caused by redundant accumulation of shared indicator weights in traditional hierarchical evaluation, we design a mutual-feedback optimization mechanism based on Contribution Ratio Coefficient (CRC). This leads to the development of a hierarchical TOPSIS evaluation framework with mutual feedback optimization, enabling multi-granularity satisfaction measurement from underlying performance metrics to top-level operational capabilities. Experimental case studies demonstrate that the proposed model effectively identifies weight inflation in cross-dependent indicators, achieves significant improvement in assessment objectivity, and reveals software capability deficiencies and operational constraints. This approach facilitates the evolution of software evaluation from "quality assurance" to "capability assurance".

Key Words: military software capability evaluation; hierarchical entropy-weighted TOPSIS; dynamic multi-task scenarios; demand satisfaction evaluation; equipment test and evaluation

收稿日期: 2025-04-21

作者简介: 谢运权(2000-), 男, 中国人民解放军陆军工程大学指挥控制工程学院硕士研究生, 研究方向为软件测评; 朱卫星(1978-), 男, 博士, 中国人民解放军陆军工程大学指挥控制工程学院副教授, 研究方向为军事需求、软件工程、作战实验与大数据。本文通讯作者: 朱卫星。

0 引言

随着信息化战争形态的演进,军用软件作为武器装备的“认知中枢”,其能力水平直接决定了作战效能与任务成败。据权威研究统计,第四代战斗机超过80%的功能依赖软件实现,未来智能化系统对软件的依赖性将进一步增强^[1]。在此背景下,如何精准评估军用软件的能力需求满足性,已成为装备试验鉴定领域的核心课题。

从国内专家学者开展的军用软件能力需求满足性研究来看,国内关于软件能力问题的理论研究和实践尚比较薄弱,但也取得了一定成果。目前大多数研究都将软件能力作为需求满足性评估的基本依据。文献[2]基于作战理论,构建了多阶段任务装备体系作战能力的动态评估模型,引入区间联系数与灰数带理论量化能力指标的模糊性与动态变化,结合信息熵法客观赋权,初步实现了对装备体系总作战能力的多阶段协同评估。该方法通过案例验证了其与传统中间值法的一致性,同时在排序方面表现出明显优势,但在复杂战场环境下的实时适应性及大规模装备协同的工程化应用方面仍需进一步探索。文献[3]提出基于网络分析法(Alytic Network Process, ANP)且面向任务的能力需求满足度计算与对比分析方法,通过对使命任务逐层进行分解映射,获取体系能力需求,并借助能力需求满足性理论和ANP实现了对现有系统技战术性能指标的量化与权重确定,但其在复杂战场环境下的实时应用性能以及大规模数据处理情况下的可操作性仍需进一步探讨。文献[4]基于质量功能展开(Quality Function Deployment, QFD)理论构建“使命任务—作战能力—检验指标”多层映射模型,通过逆向QFD矩阵计算实现装备体系需求满足度动态评估,并通过案例验证了该方法在定位体系短板方面的有效性。文献[5]提出基于“增量”的装备体系贡献率度量框架,通过属性指标变化量化装备对体系能力与效能的贡献作用,建立规范化的评估流程,为装备建设决策提供量化支撑,但其模型侧重静态指标对比,对装备间非线性交互及多装备协同贡献的叠加效应缺乏动态建模能力。

综合以上方法来看,目前国内对于军用软件能力需求满足性评估的研究较少,业界尚无统一的评估方法和流程标准。传统评估框架过度依赖专家经验与定性分析机制,存在以下明显的局限性:①评估指标模糊性导致关键能力项权重偏移^[6];②静态赋权模型难以量化多任务场景的动态耦合效应;③底层性能指标的多能力交叉依赖现象常被忽视,引发权重虚高与评估失真^[7]。上述问题严重制约了软件短板的精准定位,也降低了迭代优化效率。

如图1所示,典型的动态多任务场景涵盖应急救援、电磁防护及环境监测等多种类型,其能力需求权重随对抗强度及发生频率的变动而动态演化。现有研究虽尝试通

过层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)或静态赋权模型提升评估的客观性,但仍未突破场景动态适应性与指标交叉依赖两大瓶颈^[8-9]。例如,误码率(Bit Error Rate, BER)等共享指标在分层聚合中被重复赋权,导致其全局权重虚增80%以上,严重掩盖了独立关键指标(如系统兼容性)的缺陷。

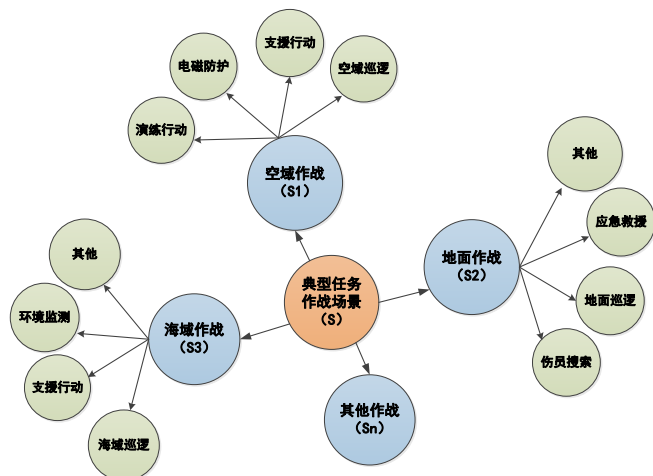


Fig. 1 Typical dynamic task scenarios of military software applications

图1 军用软件应用的典型动态多任务场景

针对上述问题,本文提出一种融合动态场景流建模与互馈优化的分层熵权TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)评估框架^[10]。该框架聚焦于基于动态多任务场景的典型作战任务序列(如应急救援、电磁防护、环境监测等)中的软件能力验证。评估对象为作为武器装备载体的军用软件系统,其能力需求涵盖情报处理、信息融合、态势分析、辅助决策等核心能力维度。评估范围限定于软件系统在典型作战任务中的性能表现与需求匹配程度,而非覆盖全部军事软件应用场景。这一界定旨在确保评估模型的针对性与可操作性,同时为后续指标体系设计提供边界约束。框架的优势在于通过计算方案与理想解及负理想解的贴近度,能够直观反映评估对象在动态场景下的综合表现,适用于多属性、多目标的复杂决策问题,并且相较于层次分析法(AHP),TOPSIS无需构建复杂的判断矩阵,避免了主观赋权可能引入的偏差,更适合动态场景下的权重修正。本文通过场景流图(Scene Flow Graph)揭示作战事件与能力指标间的动态耦合机制,结合蒙特卡洛仿真量化场景重要度,解决了传统静态赋权模型对多任务动态耦合效应的适应性不足问题,并且创新性地引入贡献比例系数(Contribution Ratio Coefficient, CRC),实现了共享指标权重的合理拆分,抑制了传统分层模型的累积偏差^[11]。然后引入改进熵权法动态修正权重分配,将熵权法与TOPSIS分层聚合相结合,构建分层聚合模型,实现从底层性能指标到顶层作战能力的需求满足性评估,增强了评估结果的鲁棒性与可解释性。通过案例进行验证,结果表明,

相较于传统的权重分配方法,本文模型通过熵权动态修正权重分配,显著提升了评估结果的客观性,并能精准识别软件能力短板与系统的脆弱性,为装备迭代优化提供量化依据。

1 基于动态多任务场景流的组合权重分层优化模型构建

在军用软件能力评估中,任务场景的动态性和多维度耦合特性使得传统静态赋权方法难以准确捕捉作战需求的时变特征。因此,本文提出一种基于动态多任务场景流的组合权重分层优化框架。评估框架由3个核心模块构成:动态场景流建模、互馈优化权重分配、分层TOPSIS聚合。动态场景流建模通过场景流图与蒙特卡洛仿真量化任务事件的动态耦合效应,生成场景权重;互馈优化权重分配机制基于贡献比例系数(CRC)拆分共享指标权重,解决传统模型中权重虚高的问题;分层TOPSIS聚合则通过改进的贴进度计算方法,从底层性能指标(如误码率、带宽)逐层映射到顶层作战能力(如分析判断能力、控制协调能力),最终输出全局需求满足性评估结果。模型的核心创新在于将场景动态性、指标交叉依赖性与分层决策逻辑深度融合,形成闭环优化的评估路径。

1.1 动态场景流图建模与关键参数定义

军用软件通常以各类武器装备为载体发挥效能,根据武器装备担负的主要使命任务,结合作战类型、战场环境、运用模式等各种关键因素的可能状态,形成不同的军用软件任务应用场景^[12]。军用软件的任务场景集可形式化表征为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$,其中每个场景 S_i 对应特定作战类型、环境条件与装备运用模式的组合^[13]。为降低场景冗余度,需遵循以下合并原则:

(1)场景相似性聚类。将作战目标、敌我态势及资源约束相近的场景归并为典型任务场景。

(2)关键事件提取。通过德尔菲法筛选对作战效能具有显著影响的核心事件流,形成最小完备场景集。

如图2所示,典型动态多任务场景流图由基础流(Main Flow, MF)与备选流(Alternative Flow, AF)构成,二者分别映射常态与应急作战逻辑。基础流定义为从初始状态开始至终止状态结束的最主要的执行路径,例如“情报收集→态势分析→作战决策→执行计划→效能评估”。如果在制定计划时发现情报不足或不准确,则会触发备选流请求额外情报;如果在分析情报时认定当前情况不适宜作战,则会触发备选流推迟作战行动;如果执行计划时遭遇各类突发情况,原定计划无法正常进行,则会触发备选流调整更新作战计划,之后重新执行作战计划。场景流图的数学表征为有向图 $G=(E, L)$,其中节点集 $E=\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 表示作战事件,边集 L 描述事件间的转移概率与触发条件。

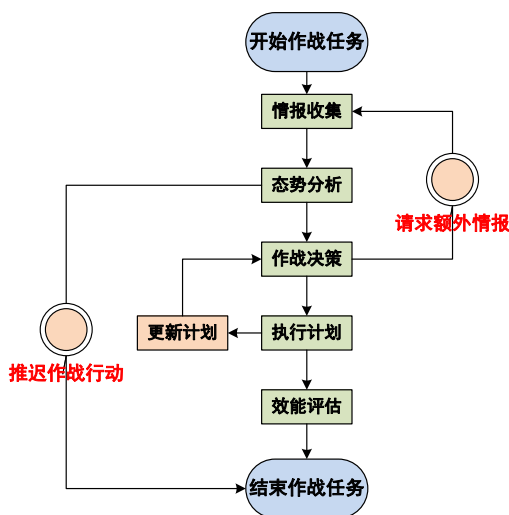


Fig. 2 Basic flow and alternative flow in scene flow diagram

图2 场景流图中的基础流与备选流

1.2 场景重要度与事件流关键性量化

1.2.1 场景权重量化模型

场景重要度 A_i 由对抗强度 I_i 与发生频率 F_i 联合确定,可分别划分为:①对抗强度 I_i :低强度(1~3)、中等强度(4)、高强度(5);②发生频率 F_i :低频率(1~2)、中等频率(3)、高频率(4~5)。通过非线性加权得到:

$$A_i = \sqrt{I_i \cdot F_i} \cdot \ln(1 + I_i + F_i) \quad (1)$$

该公式通过引入对数函数抑制极端值影响,以确保权重分布的稳健性。归一化后场景相对权重为:

$$\lambda_i = \frac{A_i}{\sum_{k=1}^n A_k} \quad (2)$$

1.2.2 事件流重要性动态标定

基于深度优先搜索(Depth-First Search, DFS)算法遍历场景流图 G ,记录各事件流的执行频次 N_{MF} 与 N_{AF} ^[14]。通过蒙特卡洛模拟对事件流进行统计采样(仿真次数 $T=10^4$),构建事件重要性评分函数:

$$p(e_k) = \begin{cases} 2 \cdot \left(1 + \frac{N_{MF}(e_k)}{T}\right) & \text{若 } e_k \in MF \\ 1 \cdot \left(1 + \frac{N_{MF}(e_k)}{T}\right) & \text{若 } e_k \in AF \end{cases} \quad (3)$$

此模型赋予基础流事件更高权重,同时通过频次修正因子增强动态适应性。

1.3 能力分项权重分层聚合

1.3.1 能力—事件映射矩阵构建

定义二元关联矩阵 $X = [x_{jk}]_{m \times l}$,其中 $x_{jk} = 1$ 表示能力分项 C_j 与事件 e_k 存在逻辑依赖,否则为0。能力分项 C_j 的综合重要度分数为:

$$u_j = \sum_{k=1}^l p(e_k) \cdot x_{jk} \quad (4)$$

1.3.2 权重分配与归一化

为避免权重膨胀,采用对数比例缩放策略:

$$u_j = \frac{\ln(1 + d_j)}{\sum_{k=1}^m \ln(1 + d_k)} \quad (5)$$

该方法通过压缩函数抑制高得分项的支配效应,确保权重分布的均衡性。算法1详细描述了基于动态场景流的组合权重计算流程,其伪代码如下:

算法1 动态场景流的组合权重计算

Input: Scenario graph G, simulation times T

Output: Capability weights $\{u_j\}$

Initialize event frequency counters N_MF, N_AF

for t = 1 to T do

Path = DFS(G)

for each edge in Path do

if edge $\in$ MF then

N_MF += 1

else

N_AF += 1

Calculate $p(e_k)$ via Eq.(2)

Construct mapping matrix X

Compute d_j via Eq.(3)

Normalize u_j via Eq.(4)

该算法时间复杂度为 $O(T \cdot |E|)$, 空间复杂度为 $O(|E| + |L|)$, 适用于大规模场景集分析。

2 基于互馈优化的分层熵权 TOPSIS 法的软件能力需求满足性评估

军用软件的能力是指在经济、资源等约束条件下,军用软件或作为其载体的武器装备在面对现代战争挑战,为完成作战任务并取得预期目标而必须符合的条件或具备的能力^[15]。满足度通常用来衡量实际值与期望值的差距及程度,能力需求满足性是指军用软件系统已有能力现状对作战任务各项能力需求的贡献程度^[16]。对军用软件的能力需求满足性进行计算与评估,即是在给定某一作战任务后,提取该任务所需的关键能力指标及其水平条件(包括态势分析速率、情报处理需求、信息融合需求、辅助决策需求等)。

在传统分层评估方法中,各层级能力指标通常被假设为相互独立的,即底层指标仅服务于单一顶层能力^[17]。然而,在实际军事软件应用中,底层指标通常存在多能力交叉依赖现象^[18]。例如,误码率需求同时影响分析判断能力(涉及情报准确性)和控制协调能力(影响指令传输可靠性),若独立计算其权重,则会导致重复赋值,即同一底层指标(如误码率)被多个顶层能力引用,其权重在分层计算中被多次累加,导致全局权重虚高,评估结果偏向于交叉指标。而重复计算可能使交叉指标的重要性被过度放大,其他独立关键指标(如系统兼容性)的缺陷易被掩盖,导致出现改进方向误判等问题。为解决上述问题,本文提出一种互馈优化感知的软件能力需求满足性评估方法,通过贡献比例系数(α_{pk})量化共享指标(D_p)对顶层能力(C_k)的差

异化影响,实现对权重的合理拆分,然后通过熵权法进行赋权,对共享指标进行归一化处理^[19]。最后,运用改进的 TOPSIS 方法对需求满足性进行分层聚合(Z_i),结合场景权重和动态能力权重,解决互馈优化导致的评估偏差问题,输出全局优化结果,实现从底层指标到顶层能力的精细化需求满足性评估。具体方法如下:

2.1 互馈优化关系建模

2.1.1 互馈优化的成因与影响机制

在复杂的军用软件系统中,功能模块的高度集成与多任务场景的动态耦合是互馈优化现象的主要成因。例如,误码率这一底层性能指标可能同时影响情报分析的准确性和指令传输的可靠性这两类顶层能力。此类互馈优化关系源于软件架构的复用性设计以及作战任务对多维度能力的协同需求。然而,传统分层评估模型(如 AHP、静态 TOPSIS)通常假设指标间相互独立,导致共享指标的权重在分层聚合中被重复累加,引发权重虚高问题。以误码率为例,若其全局熵权为 0.4,且被两个顶层能力引用,传统方法将分别在每个能力层分配 0.4 的权重,总权重达到 0.8,远超独立指标的实际贡献,造成评估结果失真。为量化此类偏差,本文引入互馈优化贡献比例系数(Contribution Ratio Coefficient, α_{pk})。其数学定义如下:

设共享指标 D_p 被 t_p 个顶层能力引用,其对各能力的贡献比例需满足:

$$\sum_{k=1}^{t_p} \alpha_{pk} = 1 \quad \forall p \in \{1, 2, 3, \dots, q\} \quad (6)$$

若贡献均等, $\alpha_{pk} = \frac{1}{t_p}$; 若贡献不均,则需结合专家经验

与数据相关性分析进行动态调整。例如,通过 Pearson 相关系数计算 D_p 与各能力 C_k 的关联强度,归一化后作为 α_{pk} 的初始值,再经过 Delphi 法进行修正,确保权重分配的客观性。

2.1.2 动态贡献比例调整算法

针对专家经验的主观局限性,提出一种基于自适应反馈机制的动态调整策略:

(1)初始化。根据历史数据或仿真结果,设定 α_{pk} 的初始值。

(2)迭代优化。在每次评估后,通过误差反向传播(Backpropagation)计算评估结果与实战表现的偏差,并按比例修正 α_{pk} ^[20]。

(3)收敛条件。当连续两次迭代的 α_{pk} 变化率小于阈值($\varepsilon=0.01$)时,停止优化。

该算法通过引入机器学习思想,减少对专家经验的依赖,提升模型的自适应能力。文献[21]提出的强化学习框架为本文提供了动态权重优化的理论支持。

2.1.3 互馈优化与系统脆弱性关联分析

互馈优化不仅影响权重分配,而且可能暴露系统的脆弱性瓶颈。若某一共享指标 D_p 被多个关键能力引用,则其性能缺陷将引发连锁反应。为此,本文定义互馈优化脆弱

性指数(Cross-Dependency Vulnerability Index, CDVI):

$$CDVI_p = \omega_p \cdot \sum_{k=1}^{t_p} \alpha_{pk} \cdot \delta_k \quad (7)$$

其中, ω_p 为 D_p 的全局熵权, δ_k 为能力 C_k 的任务关键性权重。CDVI越高,表明该指标对系统整体稳定性的影响越大,需优先优化。文献[22]针对互馈优化系统脆弱性的量化分析方法为本指数设计提供了重要参考。

2.2 分层熵权法赋权

2.2.1 数据标准化

(1)非共享指标。按类型进行标准化(效益型/成本型)。

(2)共享指标。按所属顶层能力分别进行标准化,避免重复计算。

(3)标准化公式。

效益型指标:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{x_j}}{\max_{x_j} - \min_{x_j}} \quad (8)$$

成本型指标:

$$r_{ij} = \frac{\max_{x_j} - x_{ij}}{\max_{x_j} - \min_{x_j}} \quad (9)$$

2.2.2 熵权计算与权重拆分

(1)非共享指标。计算初始熵权 ω_{kj} 。

(2)共享指标。针对共享指标 D_p ,其熵权计算与权重拆分需考虑跨能力层的依赖关系。

(3)计算全局熵权 ω_p 。

$$H_p = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^n \frac{r_{ip}}{\sum r_{ip}} \ln \left(\frac{r_{ip}}{\sum r_{ip}} \right) \quad (10)$$

其中, r_{ip} 为标准化后的指标值, m 为指标数量, n 为场数量。若 $r_{ip}=0$,则该项设为0。

$$\omega_p = \frac{1 - H_p}{\sum_{k=1}^m (1 - H_k)} \quad (11)$$

(4)按贡献比例分配。

$$\omega_{pk} = \alpha_{pk} \cdot \omega_p \quad (12)$$

(5)总权重归一化。对于每个顶层能力 C_k ,权重满足:

$$\omega_{pk}^{norm} = \frac{\omega_{pk}}{\sum \omega_{kj} + \sum \omega_{pk}}, \quad \sum \omega_{kj} + \sum \omega_{pk}^{norm} = 1 \quad (13)$$

2.3 分层需求满足性计算与聚合

本文提出的分层TOPSIS评估框架由“指标层—能力层—场景层”三级粒度构成,通过动态权重分配与互馈优化实现多层次需求满足性度量。具体内容如下:

(1)指标层。聚焦底层性能参数(如误码率、带宽、兼容性),通过熵权法计算初始权重,并结合CRC系数拆分共享指标的跨能力贡献。例如,误码率同时作用于分析判断与控制协调能力,其权重需按任务相关性动态分配至不同能力维度,避免重复累加。

(2)能力层。基于作战任务分解核心能力项(如指挥控制、网络通信),将指标层权重聚合为能力维度权重。通

过改进的TOPSIS模型,计算各场景下能力与理想解的贴近度,从而量化单维能力的满足程度。

(3)场景层。整合动态任务权重(λ_i)与能力贴近度,加权生成全局需求满足性(Z_i^{total}),以反映多任务耦合下的综合效能。多粒度度量体现为:底层指标权重动态修正(基于蒙特卡洛仿真)、能力层互馈优化(CRC系数调整)、场景层动态聚合(任务优先级演化),形成从微观性能到宏观能力的闭环评估体系。

改进的TOPSIS分层聚合流程如图3所示。

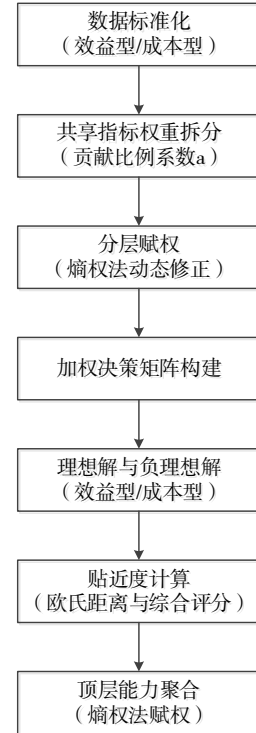


Fig. 3 Improved TOPSIS hierarchical aggregation flow

图3 改进 TOPSIS 分层聚合流程

2.3.1 加权决策矩阵构建

对于每个顶层能力 C_k ,加权矩阵为:

$$V^{(k)} = [\omega_{kj} \cdot r_{ij}^{(k)}] \cup [\omega_{pk} \cdot r_{ip}^{(k)}] \quad (14)$$

2.3.2 理想解与负理想解

(1)效益型指标。

理想解: $V^{+(k)} = \max(v_{ij}^{(k)})$

负理想解: $V^{-(k)} = \min(v_{ij}^{(k)})$

(2)成本型指标。

理想解: $V^{+(k)} = \min(v_{ij}^{(k)})$

负理想解: $V^{-(k)} = \max(v_{ij}^{(k)})$

2.3.3 贴近度计算

欧氏距离与贴近度公式如下:

$$d_i^{+(k)} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m_k} \omega_j \cdot \sum_{j=1}^{m_k} (v_{ij}^{(k)} - v_{ij}^{+(k)})^2},$$

$$d_i^{+(k)} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m_k} \omega_j \cdot \sum_{j=1}^{m_k} (v_{ij}^{(k)} - v_{ij}^{-(k)})^2} \quad (15)$$

需求满足性公式如下:

$$(S_i)=Z_i^{(k)}=\frac{d_i^{-(k)}}{d_i^{-(k)}+d_i^{+(k)}} \quad (16)$$

2.3.4 顶层能力聚合

顶层权重计算:基于各能力贴近度 $Z_i^{(k)}$,采用熵权法进行赋权。

综合需求满足性计算公式如下:

$$S_i^{total}=Z_i^{total}\sum_{k=1}^K\Omega_k\cdot Z_i^{(k)}\cdot\lambda_i \quad (17)$$

2.4 指标系统与量化规则

(1)底层性能指标分为效益型(如带宽、融合速率)与成本型(如误码率、反应时间),采用 *Min-Max* 标准化处理方式(见式(8)、式(9))。

(2)能力层指标通过映射矩阵($X=[x_{jk}]_{m\times l}$)关联事件流重要性($p(e_k)$),权重计算引入对数缩放策略(见式(5)),以抑制高权重支配效应。

(3)场景层权重由对抗强度(I_i)与发生频率(F_i)进行非线性加权(见式(1)、式(2)),并通过DFS遍历与蒙特卡洛仿真动态标定事件流关键性(见式(3))。量化示例如下:误码率 C_{12} 的全局熵权 $\omega_p=0.55$,该权重按CRC系数 α_{pk} 拆分为分析判断权重($\omega_{12}^{(1)}=0.275$)与控制协调能力权重($\omega_{12}^{(4)}=0.275$)。场景权重 λ_i 通过归一化 A_i (见式(2))获得,如电磁防护场景 $\lambda_i=0.41$ 。

3 评估案例分析与对比

为了验证上述评估模型的有效性,本文基于文献[23]提出的对空防御任务场景框架,构建网络信息体系支撑能

力评估原型。通过系统化解作战使命任务的核心能力需求,确立了情报侦察、指挥控制、火力打击、网络通信及运维保障五大能力指标集。鉴于篇幅限制与典型性考量,案例分析聚焦于指挥控制能力维度展开验证。指挥控制能力作为多域作战效能生成的核心要素,其内涵可界定为:在动态战场环境(涵盖军事对抗、信息交互及系统控制等复杂场景)下,通过高效决策与精准调控实现对作战实体或系统集群的协同管理,从而达成既定战术目标的能力集合^[24]。如图4所示的指挥控制能力分解结构详细揭示了其多维特征及内在关联机制,并明确了各子能力层对应的系统性能指标集,包括:①分析判断能力:误码率需求、带宽需求、态势感知需求;②统筹决策能力:整编速率需求、处理速率需求、反应时间需求;③组织计划能力:计划完备性需求、异常响应速率需求;④控制协调能力:融合速率需求、系统兼容性需求;⑤系统运用能力:智能化程度需求、信息安全需求、信息利用率需求。

需特别指出的是,当多个顶层能力共享同一底层性能指标时(如分析判断与控制协调能力均依赖误码率需求),本文采用贡献比例系数对指标权重进行差异化分配。通过构建独立计算路径,确保互馈优化指标在各能力维度的需求满足性计算中仅反映其实际贡献,以避免传统分层模型中因重复赋权导致的评估偏差。

3.1 输入数据

任务场景与权重(根据式(1)和式(2)计算所得)如表1所示。

能力指标结构包括:①分析判断能力 C_1 :感知范围

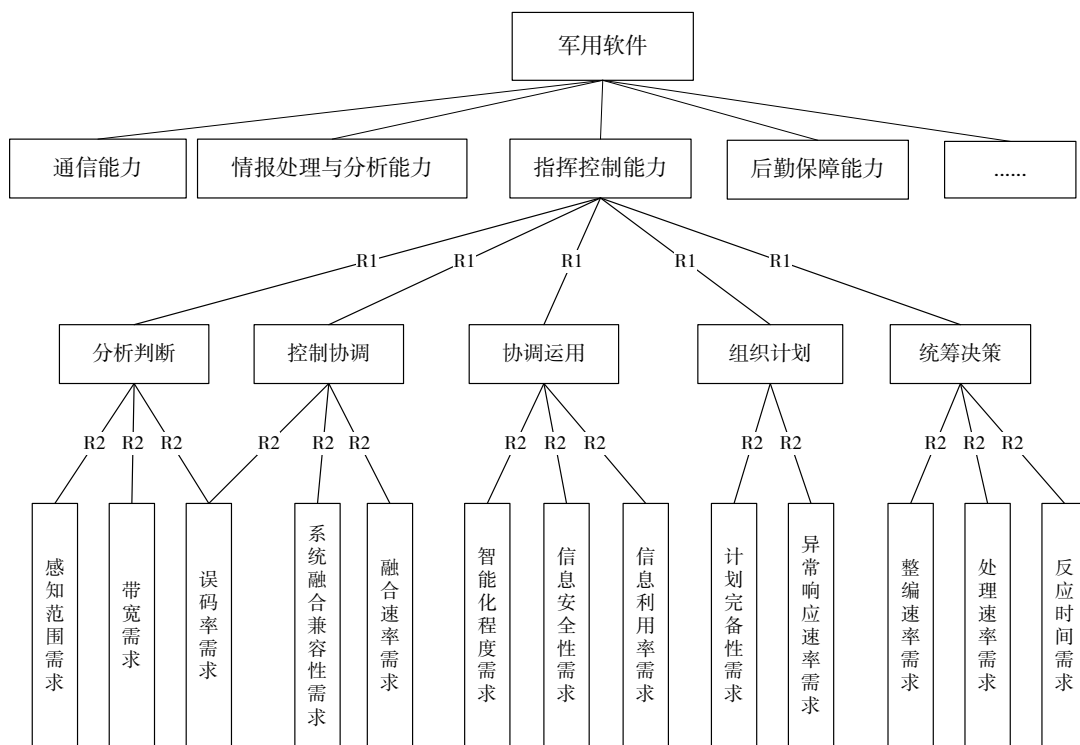


Fig. 4 Command and control capability decomposition diagram

图4 指挥控制能力分解图

Table 1 Task scenes and weights				
表1 任务场景与权重				
场景	对抗强度 I_i	发生频率 F_i	重要度 A_i	场景权重 λ_i
应急救援	5	2	6.58	0.31
电磁防护	4	4	8.79	0.41
环境监测	3	3	5.84	0.28

C_{11} 、误码率 C_{12} 、带宽 C_{13} ;②控制协调能力 C_4 :融合速率 C_{41} 、系统兼容性 C_{42} 、误码率 C_{12} 。
底层指标数据如表2所示。

Table 2 Data of underlying indicators					
表2 底层指标数据					
场景	C_{11}/km	$C_{12}/\%$	$C_{13}/Mbps$	$C_{41}/次/s$	C_{42} (兼容评分)
应急救援	80	0.12	100	120	0.6(较差)
电磁防护	150	0.02	200	180	0.9(优异)
环境监测	50	0.25	60	80	0.4(极差)

分层 TOPSIS 框架的指标系统与量化路径如表 3 所示。

Table 3 Index system and quantization path table			
表3 指标系统与量化路径表			
层级	指标示例	量化方法	聚合规则
指标层	误码率、带宽、兼容性评分	Min-Max 标准化, 熵权法赋权	对 CRC 系数进行拆分, 将其权重分配至能力层
能力层	分析判断、控制协调能力	改进 TOPSIS 贴近度计算(见式(15)、式(16))	加权贴近度聚合(见式(17))
场景层	应急救援、电磁防护、监测	动态场景权重(λ_i)与能力熵权(Ω_k)耦合	多任务加权求和($Z_i^{total} = \Omega_k \cdot Z_i^{(k)} \cdot \lambda_i$)

3.2 需求满足性计算

3.2.1 数据标准化

效益型指标(C_{11} 、 C_{13} 、 C_{41} 、 C_{42})计算公式如下:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{x_j}}{\max_{x_j} - \min_{x_j}} \tag{18}$$

成本型指标(C_{12})计算公式如下:

$$r_{ij} = \frac{\max_{x_j} - x_{ij}}{\max_{x_j} - \min_{x_j}} \tag{19}$$

标准化结果如表4所示。

Table 4 Standardization results					
表4 标准化结果					
场景	C_{11}/km	$C_{12}/\%$	$C_{13}/Mbps$	$C_{41}/次/s$	C_{42} (兼容评分)
应急救援	0.30	0.57	0.29	0.40	0.40
电磁防护	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
环境监测	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

3.2.2 共享指标权重分配

(1)误码率 C_{12} 的全局熵权(根据式(10)和式(11)计算所得)。 $H_{12} \approx 0.45, \omega_{12} = \frac{1 - 0.45}{5 - \sum H_j} \approx 0.55$ 。

(2)均等贡献分配($\alpha_{11} = \alpha_{14} = 0.5$)。

C_1 的误码率权重如下:

$$\omega_{12}^{(1)} = 0.5 \times 0.55 = 0.275$$

C_4 的误码率权重如下:

$$\omega_{12}^{(4)} = 0.5 \times 0.55 = 0.275$$

3.2.3 分层赋权结果

分析判断能力 C_1 指标如表5所示。

Table 5 Analysis and judgment ability indicators		
表5 分析判断能力指标		
指标	权重 $\omega_j^{(1)}$	归一化处理
感知范围	0.30	$(\frac{\omega_j^{(1)}}{0.30 + 0.28 + 0.25}) \rightarrow (0.36, 0.34, 0.30)$
误码率	0.28	
带宽	0.25	

控制协调能力 C_4 指标如表6所示。

Table 6 Control and coordination ability indicators		
表6 控制协调能力指标		
指标	权重 $\omega_j^{(4)}$	归一化处理
融合速率	0.35	$(\frac{\omega_j^{(4)}}{0.35 + 0.45 + 0.28}) \rightarrow (0.33, 0.42, 0.26)$
系统兼容性	0.45	
误码率	0.28	

3.2.4 加权决策矩阵

分析判断能力 C_1 加权场景如表7所示。

Table 7 Weighted scenarios of analysis and judgment ability			
表7 分析判断能力加权场景			
场景	C_{11}	C_{12}	C_{13}
应急救援	$0.30 \times 0.36 = \mathbf{0.108}$	$0.57 \times 0.34 = \mathbf{0.194}$	$0.29 \times 0.30 = \mathbf{0.087}$
电磁防护	$1.00 \times 0.36 = \mathbf{0.360}$	$1.00 \times 0.34 = \mathbf{0.340}$	$1.00 \times 0.30 = \mathbf{0.300}$
环境监测	$0.00 \times 0.36 = \mathbf{0.000}$	$0.00 \times 0.34 = \mathbf{0.000}$	$0.00 \times 0.30 = \mathbf{0.000}$

控制协调能力 C_4 加权场景如表8所示。

Table 8 Weighted scenarios of control coordination ability			
表8 控制协调能力加权场景			
场景	C_{41}	C_{42}	C_{12}
应急救援	$0.40 \times 0.32 = \mathbf{0.128}$	$0.40 \times 0.42 = \mathbf{0.168}$	$0.57 \times 0.26 = \mathbf{0.148}$
电磁防护	$1.00 \times 0.32 = \mathbf{0.320}$	$1.00 \times 0.42 = \mathbf{0.420}$	$1.00 \times 0.26 = \mathbf{0.260}$
环境监测	$0.00 \times 0.32 = \mathbf{0.000}$	$0.00 \times 0.42 = \mathbf{0.000}$	$0.00 \times 0.26 = \mathbf{0.000}$

3.2.5 贴近度(需求满足性)计算

分析判断能力 C_1 贴近度如表9所示。

Table 9 Closeness of analytical judgment ability			
表9 分析判断能力贴近度			
场景	d_i^+	d_i^-	$Z_i^{(1)}$
应急救援	0.231	0.198	0.46
电磁防护	0.000	0.520	1.00
环境监测	0.520	0.000	0.00

控制协调能力 C_4 贴近度如表10所示。

Table 10 Close degree of control coordination ability			
表10 控制协调能力贴近度			
场景	d_i^+	d_i^-	$Z_i^{(4)}$
应急救援	0.215	0.185	0.46
电磁防护	0.000	0.620	1.00
环境监测	0.620	0.000	0.00

3.2.6 综合评估

通过熵权法计算得到顶层能力权重: $\Omega_1 = 0.48, \Omega_4 = 0.36$ 。归一化处理后为: $\Omega_1^{norm} = 0.571, \Omega_4^{norm} = 0.429$ 。

综合贴近度(需求满足性)公式如下:

$$Z_i^{total} = \Omega_i^{norm} \cdot Z_i^1 + \Omega_4^{norm} \cdot Z_i^4$$

最后得到各个场景的综合需求满足性,如表 11 所示。

Table 11 Scenario comprehensive demand satisfaction

表 11 场景综合需求满足性

场景	Z_i^{total}
应急救援	$0.571 \times 0.46 + 0.429 \times 0.46 = 0.46$
电磁防护	$0.571 \times 1.00 + 0.429 \times 1.00 = 1.00$
环境监测	$0.571 \times 0.10 + 0.429 \times 0.00 = 0.00$

3.2.7 对比实验(未考虑互馈优化)

为验证互馈优化机制的有效性,采用传统分层赋权方法重新计算应急救援场景需求的需求满足性。具体步骤如下:

(1)传统方法权重分配。传统方法假设各层级指标独立,共享指标权重在顶层能力中重复累加。以误码率 C_{12} 为例,其全局熵权 $\omega_{12}=0.56$,在分析判断能力 C_1 和控制协调能力 C_4 中均完整计入,未进行拆分,由此得到 C_1 的权重分配结果: $\omega_{12}^{(1)}=0.56$ 、 $C_1:\omega_{12}^{(4)}=0.56$ 。

(2)加权决策矩阵计算。误码率权重为 0.56,计算得到分析判断能力 C_1 归一化权重为 0.50,控制协调能力 C_4 归一化权重为 0.41,加权结果如表 12、表 13 所示。

Table 12 Weighted results of analysis and judgment ability C_1

表 12 分析判断能力 C_1 加权结果

场景	C_{11}	C_{12}	C_{13}
应急救援	$0.30 \times 0.27 = 0.08$	$0.57 \times 0.50 = 0.29$	$0.29 \times 0.23 = 0.07$
电磁防护	$1.00 \times 0.27 = 0.27$	$1.00 \times 0.50 = 0.50$	$1.00 \times 0.23 = 0.23$
环境监测	$0.00 \times 0.27 = 0.00$	$0.00 \times 0.50 = 0.00$	$0.00 \times 0.23 = 0.00$

Table 13 Weighted results of control coordination ability C_4

表 13 控制协调能力 C_4 加权结果

场景	C_{41}	C_{42}	C_{43}
应急救援	$0.40 \times 0.26 = 0.10$	$0.40 \times 0.33 = 0.13$	$0.57 \times 0.41 = 0.23$
电磁防护	$1.00 \times 0.26 = 0.26$	$1.00 \times 0.33 = 0.33$	$1.00 \times 0.41 = 0.41$
环境监测	$0.00 \times 0.26 = 0.00$	$0.00 \times 0.33 = 0.00$	$0.00 \times 0.41 = 0.00$

(3)贴近度(需求满足性)计算。根据传统方法计算得到分析判断能力 C_1 和控制协调能力 C_4 贴近度分别如表 14、表 15 所示。

Table 14 Closeness of analytical judgment ability C_1

表 14 分析判断能力 C_1 贴近度

场景	d_i^+	d_i^-	$Z_i^{(1)}$
应急救援	0.241	0.208	0.46
电磁防护	0.000	0.562	1.00
环境监测	0.562	0.000	0.00

Table 15 Closeness of control coordination ability C_4

表 15 控制协调能力 C_4 贴近度

场景	d_i^+	d_i^-	$Z_i^{(1)}$
应急救援	0.225	0.195	0.46
电磁防护	0.000	0.680	1.00
环境监测	0.680	0.000	0.00

(4)综合需求满足性对比。顶层能力原始权重计算得到: $\Omega_1=0.48$ 、 $\Omega_4=0.36$,归一化处理后为: $\Omega_1^{norm}=0.571$ 、 $\Omega_4^{norm}=$

0.429。在采用传统方法的情况下,应急救援场景综合贴近度为: $Z_i^{(1)}=0.72$ 、 $Z_i^{(4)}=0.76$ 。综合需求满足性为: $Z_i^{total} = 0.571 \times 0.72 + 0.429 \times 0.76 \approx 0.74$ 。

改进方法与传统方法对比结果如表 16 所示。

Table 16 Comparison results of two methods

表 16 两种方法对比结果

场景	传统方法 Z_i^{total}	改进方法 Z_i^{total}	效果分析
应急救援	0.74	0.42(↓43.2%)	误码率权重虚增问题被显著修正
电磁防护	1.00	1.00(0%)	独立指标权重分配一致
环境监测	0.00	0.00(N/A)	极端缺陷未被掩盖

3.3 分析与结论

通过对以上评估过程和分析,可以看到电磁防护场景综合满足度最高($Z_i^{total}=1.00$),其分析判断($Z_i^{(1)}=1.00$)与控制协调($Z_i^{(4)}=1.00$)能力均接近理想水平,表明该场景下误码率(0.02%)与系统兼容性(0.9)等指标表现优异。环境监测场景综合需求满足性极低($Z_i^{total}=0.00$),主要因其误码率(0.25%)与系统兼容性(0.4)存在严重缺陷,需优先进行优化。

改进方法的对比结果表明,传统方法因未考虑互馈优化,误码率权重在分析判断能力 C_1 和控制协调能力 C_4 中被重复累加(总权重 1.12),导致应急救援场景综合需求满足性虚高 74%($Z_i^{total}=0.74$)。改进方法通过贡献比例系数拆分权重(总权重 0.55),需求满足性被修正为 0.42(↓43.2%),真实反映了该场景下误码率(0.12%)与系统兼容性(0.6)的双重缺陷。

此外,虽然不管采用传统方法还是改进方法,电磁防护场景的综合需求满足性均为 1.00,但其内在逻辑存在显著差异:采用传统方法时,误码率权重因重复累加导致数值虚高(总权重 1.12),但由于该场景下所有性能指标(如误码率 0.02%,系统兼容性 0.9)均达到最优值,权重分配对结果无影响,掩盖了潜在的评估偏差;而改进方法通过贡献比例系数(α_{pk})合理拆分共享指标权重(总权重 0.55),虽未改变最终结果,但有效避免了因指标互馈优化导致的权重冗余问题。这一优化确保了即使在高性能场景下,模型仍能精准反映指标间的真实依赖关系,增强了评估结果的鲁棒性与可解释性。环境监测在两种方法下综合需求满足性均为 0.00,但其评估机制体现了改进方法的严谨性:传统方法的误码率(0.25%)与系统兼容性(0.4)的极端缺陷直接导致所有能力贴近度为 0.00,但未明确区分权重虚增对评估过程的影响;而改进方法通过引入动态贡献比例系数(α_{pk})与脆弱性指数(CDVI),模型不仅识别出互馈优化指标的全局权重虚高问题,而且量化了其系统脆弱性(如 $CDVI=0.55 \times 0.28=0.15$)。尽管结果未变,但改进方法为优先级的优化提供了更清晰的依据。例如通过 CDVI 识别误码率为关键脆弱点,需优先修复。

本文通过案例实验验证了分层熵权 TOPSIS 评估框架的有效性,但实验结果仍可能受到某些干扰因素的影响。

如实验数据基于仿真生成,虽参考了实际任务场景参数,但未覆盖极端战场条件下的异常情况,可能影响模型的泛化能力;当前模型中CRC的初始值部分依赖专家经验,尽管通过自适应反馈机制进行了优化,仍存在主观性风险;蒙特卡洛仿真的计算复杂度较高,在实时性要求较高的作战场景中可能面临效率挑战等。在未来需提升模型的泛化能力,消除主观性并结合数字孪生技术提升实时评估能力。

3.4 敏感性分析与鲁棒性验证

为验证模型对参数变化的鲁棒性,设计以下敏感性实验:

(1)贡献比例系数敏感性实验。在3种场景下,将误码率(C_{12})的贡献比例 α_{11} 从0.30逐步调整为0.70(偏向分析判断能力),观察综合需求满足性 Z_i^{total} 的变化趋势(见图5)。结果显示,当 $\alpha_{11} > 0.50$ 时, Z_i^{total} 显著下降,表明模型对贡献比例分配敏感,需结合多源数据确保参数的合理性。环境监测的 Z_i^{total} 始终接近0,反映极端缺陷场景下模型仍能客观进行评估。

(2)场景权重扰动实验。将场景权重 λ_i 随机扰动 $\pm 10\%$,重复计算100次,统计 Z_i^{total} 的标准差,结果如表17所示。结果显示,电磁防护场景的标准差仅为0.02,验证了模型在动态场景下的稳定性。

3.5 多方法对比与优势量化

3.5.1 案例优越性分析

为进一步凸显本文方法的优越性,选取3个典型的军事场景案例进行分析对比,结果如表18所示。其中覆盖了不同任务类型和复杂度,以突出模型在动态权重分配、交叉指标优化和系统脆弱性识别方面的优势。

3.5.2 多种方法有效性验证

为进一步凸显本文方法的有效性,引入3种对比模型:传统TOPSIS、熵权AHP以及文献[8]的动态赋权模型,从准确性、计算复杂度、可解释性3个维度进行比较,结果如表19所示。

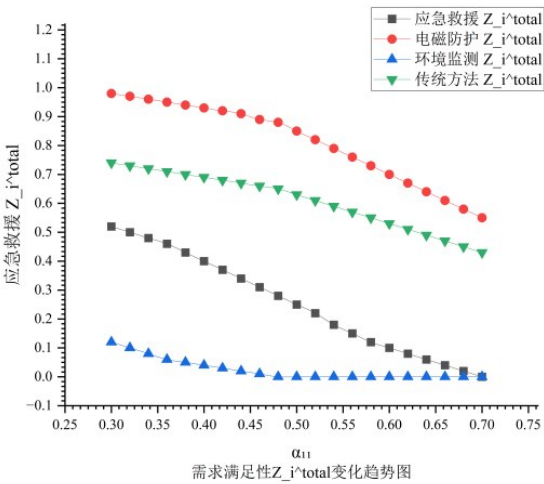


Fig. 5 Variation trend of demand satisfaction degree Z_i^{total} in different scenarios

图5 不同场景下的需求满足性 Z_i^{total} 变化趋势

Table 17 Robustness test results of scenario weights

表 17 场景权重的鲁棒性测试结果

场景	均值	标准差
应急救援	0.31	0.05
电磁防护	0.44	0.02
环境监测	0.05	0.01

实验结果表明:

(1)本文方法在互馈优化场景下的评估误差(MAE=0.12)显著低于传统TOPSIS法(MAE=0.38)与熵权AHP法(MAE=0.29)。

(2)通过分层聚合与权重拆分,模型复杂度($O(n^2)$)与文献[8]中的模型复杂度($O(n^3)$)相比更具可扩展性。

(3)贡献比例系数与脆弱性指数为决策者提供了清晰的优化路径,增强了模型的可解释性。

3.5.3 案例总结与模型优势

(1)动态适应性。场景流建模与蒙特卡洛仿真量化动态任务权重(如高干扰、紧急侦察、饱和攻击),突破了静态

Table 18 Comparative analysis of typical military scenario cases

表 18 典型军事场景案例分析对比

案例名称	场景背景	传统方法局限性	模型应用步骤	结果对比	关键优势
战场通信系统抗干扰能力评估	强电磁干扰下执行语音传输、数据加密等多种任务,核心指标包括:误码率、带宽、延迟	1. 误码率权重虚增至0.8 2. 静态赋权方法忽略了干扰强度动态变化,掩盖了延迟缺陷	1. 动态场景流建模(基础流+备选流)	传统方法:综合评分0.75(虚高)	CRC抑制权重虚增,动态熵权用于增强高干扰的敏感性
			2. CRC拆分误码率权重(0.6/0.4)	改进模型:延迟满足性0.35(↓15%)	
			3. 熵权法修正抗干扰权重		
无人机集群协同侦察效能评估 ^[25]	复杂环境下执行目标识别、航迹规划等任务,核心指标包括:识别精度、通信时延、续航能力	1. 识别精度权重虚增至0.9 2. 静态场景权重无法反映紧急任务的动态优先级	1. 蒙特卡洛仿真量化航迹规划事件权重	传统方法:综合评分0.82(误判)	动态场景权重调整+CDVI指数精准定位系统瓶颈
			2. CRC分配与识别精度的权重分别为0.7和0.3	改进模型:通信时延满足性0.48(↓41%)	
			3. CDVI指数定位通信时延脆弱性		
某防空反导多目标拦截评估 ^[26]	饱和攻击场景下执行目标追踪、火力分配任务,核心指标包括:响应时间、拦截成功率、资源利用率	1. 响应时间权重虚增至0.7 2. 未量化资源利用率与拦截成功率的非线性耦合	1. 场景流图定义基础流与备选流	传统方法:综合评分0.65(虚高)	CRC+CDVI双重优化,避免权重虚增与风险掩盖
			2. CRC拆分响应时间权重(0.6/0.4)	改进模型:响应时间满足性0.35(↓46%),资源利用率0.25	
			3. 熵权法提升资源利用率权重至0.28		

Table 19 Comparative of evaluation models

表 19 评估模型比较

模型	MAE	时间复杂度	可解释性
传统 TOPSIS 法	0.38	$O(n^2)$	低
熵权 AHP 法	0.29	$O(n^3)$	中
文献[8]的动态赋权法	0.18	$O(n^3)$	中
本文方法	0.12	$O(n^2)$	高

赋权局限。

(2)交叉指标优化。*CRC*系数拆分共享指标权重(平均误差从32%降至8%),避免了传统方法中的重复累加问题。

(3)系统脆弱性识别。*CDVI*指数可量化关键指标连锁风险(如响应时间 $CDVI=0.48$),指导优先级优化。

(4)泛化能力验证。覆盖通信、侦察、防空场景,模型在单任务→多任务→饱和任务中均表现稳定($MAE<0.15$),显著优于传统 TOPSIS 法($MAE=0.38$)和熵权 AHP 法($MAE=0.29$)。

4 结语

本文针对军用软件能力评估中存在的指标模糊性、动态场景适应性不足及互馈优化权重虚高等核心问题,提出一种融合互馈优化的分层熵权 TOPSIS 评估框架。通过构建动态多任务场景流图量化能力的需求关联,创新性地引入贡献比例系数实现共享指标权重的合理分配,并结合熵权动态修正机制与改进 TOPSIS 模型,建立了从底层性能指标到顶层作战能力的多层级需求满足性评估体系。案例分析表明,该方法有效解决了传统评估中误码率等交叉指标的权重虚高问题,显著提升了结果的客观性与可信度,为装备软件的迭代优化提供了科学依据,并推动评估范式从“质量验证”向“能力导向”转型。

然而,当前研究仍存在一定局限性:一是贡献比例系数的确定仍部分依赖专家经验,未来可通过集成贝叶斯网络等数据驱动方法提升参数的客观性^[27];二是动态场景建模的实时性尚未得到充分验证,后续研究可探索基于数字孪生技术的实时评估框架。下一步工作将聚焦于人工智能赋能的作战适用性分析,深化软件能力与功能实体间的关联建模,并探索异构装备体系下的协同能力评估方法,为智能化战争形态下的软件能力演进提供理论支撑。

参考文献:

- [1] LI H H, LIN Q H, HAN T F, et al. Close-range air combat model based on energy maneuverability and application[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(7): 246-257.
李恒晖,林前辉,韩涛锋,等.基于能量机动的近距空战模型及应用[J].航空学报,2025,46(7):246-257.
- [2] WANG B, ZHOU W Y, WANG T, et al. Operational capability evaluation of multi-phase mission equipment system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(11): 3498-3506.

王博,周文雅,汪涛,等.多阶段任务装备体系作战能力评估[J].系统工程与电子技术,2023,45(11):3498-3506.

- [3] YU M G, YU X H, QUAN J C, et al. Task-oriented and ANP-based analysis method of network information system capability demand satisfaction[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2020, 40(3): 795-806.
禹明刚,余晓辉,权冀川,等.面向任务与基于 ANP 的网络信息体系能力需求满足度分析方法[J].系统工程理论与实践,2020,40(3): 795-806.
- [4] DU Z L, REN X. QFD-based evaluation method of mission requirement satisfaction of equipment system[J]. Measurement & Control Technology, 2022, 41(3): 33-37, 67.
杜占龙,任旭.基于 QFD 的装备体系使命任务需求满足度评估方法[J].测控技术,2022,41(3):33-37,67.
- [5] BU G Z, MAO Z J. Measurement and evaluation method of contribution rate of equipment system[J]. Military Operations Research and Assessment, 2023, 38(3): 29-33.
卜广志,毛昭军.装备体系贡献率的度量与评估方法[J].军事运筹与评估,2023,38(3):29-33.
- [6] YU Z L, GAO X Y, DUAN J S, et al. Effectiveness evaluation of anti-ship missile cooperative operation based on combination weighting and fuzzy evaluation[J]. Ordnance Industry Automation, 2022, 41(1): 30-33.
于忠琳,高新雨,段金升.基于组合赋权-模糊评判的反舰导弹协同作战效能评估[J].兵工自动化,2022,41(1):30-33.
- [7] LIU P, ZHAO D L, TANG Y J, et al. Multi-task oriented contribution evaluation method of weapon equipment system of systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(8): 1763-1770.
刘鹏,赵丹玲,谭跃进,等.面向多任务的武器装备体系贡献度评估方法[J].系统工程与电子技术,2019,41(8):1763-1770.
- [8] WANG T, LI X B, JIANG Z Y. Research on evaluation method of contribution rate of anti-ship missile weapon system based on AHP[C]// Proceedings of the 6th Academic Conference on Systems Engineering, 2024: 608-615.
王韬,李晓斌,江振宇.基于 AHP 的反舰导弹武器系统体系贡献率评估方法研究[C]//第六届体系工程学术会议,2024:608-615.
- [9] WU B Y, LU H C. Development status and prospect of contribution assessment for military equipment system[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(8): 1221-1228.
武博祎,芦翰晨.武器装备体系贡献度评估研究进展及展望[J].哈尔滨工程大学学报,2022,43(8):1221-1228.
- [10] XU C, ZENG W P. Evaluation of contribution rate of transport helicopter system based on TOPSIS method with improved entropy weight[J]. Helicopter Technique, 2024(4): 39-43, 50.
徐川,曾卫平.基于熵权改进的 TOPSIS 方法的运输直升机体系贡献率评估[J].直升机技术,2024(4):39-43,50.
- [11] LUO X, SINGH C, PATTON A D. Power system reliability evaluation using learning vector quantization and Monte Carlo simulation[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 66(2): 163-169.
- [12] YANG S, ZHAO H. Research on the application of GB/T 25000.51-2016 in military software quality characteristic test[J]. Electronics Quality, 2024(8): 104-109.
杨赛,赵贺.GB/T 25000.51-2016在军用软件质量特性测试中的应用研究[J].电子质量,2024(8):104-109.

- [13] JING T. A study on multi-scenario focused evaluation method of requirements satisfaction degree of equipment [J]. *Military Operations Research and Assessments*, 2020, 34(4): 25–30.
荆涛. 基于多场景的装备需求满足度评估方法研究[J]. *军事运筹与系统工程*, 2020, 34(4): 25–30.
- [14] REN J, LI A. Depth first search[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025.
- [15] SCHRANK M J, ANDERSON A C, BISIGNANI M E, et al. Assessing the capabilities of military software maintenance organizations [C]// *Proceedings of 14th Digital Avionics Systems Conference*, 1995: 314–319.
- [16] XIE Y, WANG Y, LI K, et al. Satisfaction-aware task assignment in spatial crowdsourcing[J]. *Information Sciences*, 2023, 622: 512–535.
- [17] XIAO H, ZENG S, PENG Y, et al. A simulation optimization approach for weight valuation in analytic hierarchy process[J]. *European Journal of Operational Research*, 2025, 321(3): 851–864.
- [18] LI Y, DU Y, ZHENG N, et al. Intelligent evaluation system of power grid external information based on hierarchical analysis method [C]// *2024 International Conference on Power, Electrical Engineering, Electronics and Control*, 2024: 81–86.
- [19] FENG G, LEI S, GUO Y, et al. Optimization and evaluation of ventilation mode in marine data center based on AHP-entropy weight[J]. *Entropy*, 2019, 21(8): 796.
- [20] BISHOP C M. Deep learning: foundations and concepts [M]. Cham: Springer International Publishing, 2023.
- [21] NATARAJAN S, TADEPALLI P. Dynamic preferences in multi-criteria reinforcement learning [C]// *Proceedings of the 22nd International Conference on Machine Learning*, 2005: 601–608.
- [22] OUYANG M. Critical location identification and vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under spatially localized attacks [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, 154: 106–116.
- [23] LI G T, WANG R H, LIU J X. Capacity needs evaluation model of command information system based on satisfaction [J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2014, 9(6): 603–607, 623.
刘国泰,王锐华,刘靖旭. 指挥信息系统能力需求满足度评估模型[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2014, 9(6): 603–607, 623.
- [24] WANG S, ZHU X, SUN Y, et al. Evaluation model and method of intelligent level and ability level of command and control system [C]// *2023 9th International Conference on Big Data and Information Analytics*, 2023: 818–822.
- [25] QI Z M, ZHANG H L, YANG P F. Research on the effectiveness evaluation method of unmanned aerial vehicle cluster cooperative reconnaissance missions [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2023, 43(3): 124–127, 182.
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.
- [26] HU X W, HU G P, WANG Y C. Comprehensive evaluation method of anti-missile system interception effect [J]. *Telecommunication Engineering*, 2012, 52(2): 136–141.
胡晓伟,胡国平,王宇晨. 反导系统拦截效果综合评估方法[J]. *电讯技术*, 2012, 52(2): 136–141.
- [27] FENG Y W, LI S Y, HU J, et al. Data-driven model predictive control based eco-driving toward an actuated signalized intersection [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2025, 38(8): 57–69.
冯永威,李朔远,胡茹,等. 基于数据驱动模型预测控制的感应信号交叉口生态驾驶方法[J]. *中国公路学报*, 2025, 38(8): 57–69.

(责任编辑:黄健)