

doi: 10.7690/bgzdh.2024.10.008

基于 ANP-GR 的远火打击系统作战效能评估方法

白逸凡, 黄炎焱, 张 寒

(南京理工大学自动化学院, 南京 210094)

摘要: 为改善远火打击系统作战效能评估面临的问题, 结合远火打击系统开展仿真分析。采集基于多方案仿真数据, 提出基于网络层次分析-灰色关联分析(analytic network process-grey relational analysis, ANP-GR)的远火打击系统作战效能组合评估模型, 进行作战效能评估。评估结果表明: 该方法能够基于仿真数据选出合理的评估方案, 具有良好的参考意义。

关键词: 远火打击系统; 作战效能; 网络层次分析; 灰色关联分析

中图分类号: TJ393 **文献标志码:** A

Operational Effectiveness Evaluation Method of Remote Fire Strike System Based on ANP-GR

Bai Yifan, Huang Yanyan, Zhang Han

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the operational effectiveness evaluation of far-fire strike system, simulation analysis is carried out based on far-fire strike system. Based on the multi-scheme simulation data, the combined evaluation model of far-fire strike system combat effectiveness based on analytic network process-grey relational analysis (ANP-GR) is proposed to evaluate the combat effectiveness. The evaluation results show that the method can select a reasonable evaluation scheme based on the simulation data, which has a good reference significance.

Keywords: remote fire strike system; operational effectiveness; ANP; GR

0 引言

随着现代高科技武器装备技术的不断发展以及作战难度的上升, 尤其是中远程火箭炮的复杂程度不断提高, 使得装备的研制周期越来越长、寿命周期费用越来越高, 装备发展的风险也随之上升。对其进行作战效能评估有利于远火打击装备的体系优化和体系战斗力提升, 对实现资源合理配置具有一定的研究意义。

关于火力系统作战效能评估, 通常采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)权衡效能指标的权重分析, 再对该系统下的效能指标进行综合解算。在评估方法上, 相关学者采用模糊综合评判法^[1]、TOPSIS 法^[2]以及 ADC 法等^[3], 其中前两者主观性信息量较多, 而 ADC 法能对远火打击系统的性能质量过程进行分析, 采用可用性、可信性、固有能力和相乘的 ADC 法进行评估, 但评估结果往往涉及连乘操作而变得太小, 难以区分。

基于任务-能力作战适宜性需求匹配框架分析, 远火打击系统作战效能主要涉及侦察预警、指挥控

制、火力打击、毁伤评估和作战保障 5 大方面的要素^[4]。在实际作战中, 上述指标往往有着复杂的内在关联关系, 故基于网络层次分析(ANP)法对作战效能指标体系进行定权分析, 使其相对于 AHP 更具有一般性。同时采用灰色关联分析(GRA)法分析远火打击系统仿真数据, 进而计算灰色关联系数, 通过与 ANP 权重进行结合, 最终得到一个客观的评估结果^[5]。

1 基于 ANP-GR 的作战效能评估模型

1.1 装备体系作战效能评估总体框架

不失一般性, 对于装备体系作战效能评估模型总体构成可分为典型场景设计模型、仿真推演模型以及装备作战效能量化评估模型 3 部分。依据各个模型的特点, 建立如图 1 所示的装备体系作战效能评估总体框架。

1.1.1 典型场景设计模型

将评估对象置于联合作战背景下, 进行作战需求分析以及对评估对象进行匹配性分析。主要工作

收稿日期: 2024-06-21; 修回日期: 2024-07-26

基金项目: 信息系统需求重点实验室开放基金自主课题(LHZZ2021-M05); 装备预研重点实验室基金(JZX7Y202001SY000901); 2020 年度国防科技重点实验室基金(JZX7Y202001SY000901)

第一作者: 白逸凡(1997—), 男, 河北人, 硕士。

包括作战适宜性需求匹配分析、基于 DoDAF 可视化的作战体系构建^[6-7]、作战场景设置、体系作战过

程机理分析。主要目的是为仿真推演设定行动构想，提供对抗方案。

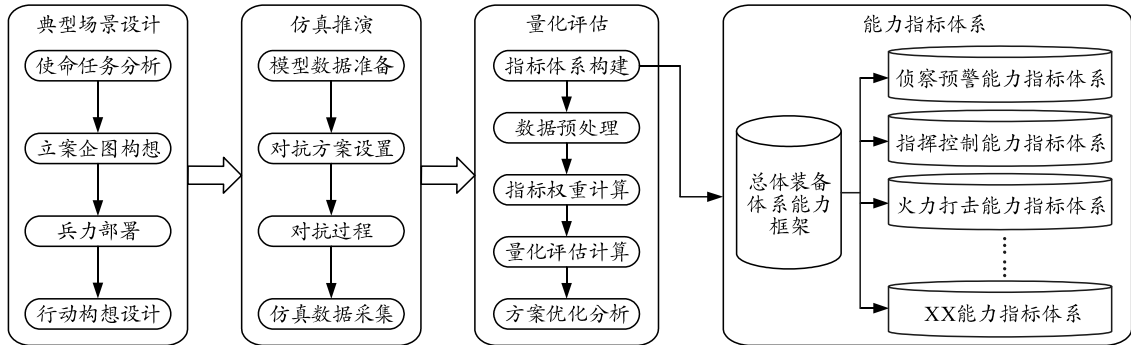


图 1 装备体系作战效能评估总体框架

1.1.2 仿真推演模型

在仿真推演模型中，主要工作为确定仿真引擎、部署对抗方案以及收集仿真信息，为量化评估提供了数据基础。

1.1.3 装备作战效能量化评估模型

在量化评估模型中，主要工作包括根据使命任务构建评估指标、对驱动生成的指标进行权重计算、对仿真数据的预处理、结合相关评估方法进行评估分析，以及对方案评估结果进行论证和优化。

在装备体系作战效能评估总体框架中，笔者着重对装备作战效能量化评估模型展开讨论。

1.2 算法介绍

1.2.1 基于 ANP 建立网络层次分析结构

网络层析分析法由美国学者 Thomas.I.Saaty 在 1996 年提出^[8-9]。该方法在基于 AHP 的基础上加以改进，将指标之间的反馈与联系纳入考虑的范畴中，相比于 AHP 来说，在面对处理复杂决策问题时，更加科学合理，典型的网络层次结构模型如图 2 所示^[10]。

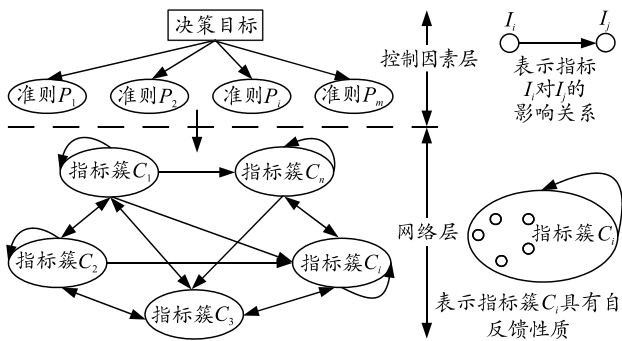


图 2 典型的网络层次结构模型

1.2.1.1 指标簇权重构建算法

按照 ANP 的原理。假设以某准则 $P_s(s=1, 2, \dots,$

$m)$ 作为主准则，以一级能力指标簇 $C_j(j=1, 2, \dots, N)$ 作为次准则，对 P_s 下各组元素对准则 $C_j(j=1, 2, \dots, N)$ 的重要性进行比较，构造判断列向量 a_j ，将 N 个判断列向量经归一化处理，得到 $(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{Nj})^T$ 。

由此得在某准则 P_s 下，指标簇间相互影响的权重矩阵 A_s 。

$$A_s = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.2.1.2 构建无权重超矩阵

在 ANP 结构控制因素层对应的某一个准则 $P_s(s=1, 2, \dots, m)$ 下，以网络层中指标簇 C_j 中的某一个指标 $e_{jl}(l=1, 2, \dots)$ 为次准则，考虑专家意见构造判断矩阵，将指标簇 C_i 中元素 $e_{m_1}, e_{m_2}, \dots, e_{m_i}$ ，按其对于 e_{jl} 的影响力大小进行优势度比较，经归一化处理，得排序向量 $(\omega_{i1}^{(j)}, \omega_{i2}^{(j)}, \dots, \omega_{in}^{(j)})^T$ 。

同理可得，以指标簇 C_j 中的所有指标作为标准，依次进行两两优势度比较，得到 ANP 网络层次结构模型中的反应指标簇 C_i 与指标簇 C_j 之间的影响矩阵 W_{ij} 。特别是，如果指标簇 C_i 与指标簇 C_j 没有关联关系时，这时 $W_{ij}=0$ 。

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} \omega_{i1}^{(j)} & \omega_{i1}^{(j2)} & \dots & \omega_{i1}^{(jn_j)} \\ \omega_{i2}^{(j)} & \omega_{i2}^{(j2)} & \dots & \omega_{i2}^{(jn_j)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \omega_{in_i}^{(j)} & \omega_{in_i}^{(j2)} & \dots & \omega_{in_i}^{(jn_j)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由此可以构建 ANP 结构的无权重超矩阵 W_s ，但是综合起来 W_s 不是列归一化的，这时需要求解赋权的超矩阵 \overline{W}_s 。

$$W_s = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_{M1} & W_{N2} & \cdots & W_{NN} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

1.2.1.3 赋权超矩阵的求解算法

在某准则 P_s 下, 依据式(4)可对指标簇间相互影响的权重矩阵 A_s 以及无权重超矩阵 W_s 的元素进行加权。

$$\overline{W}_s = A_s W_s. \quad (4)$$

这样可计算出带赋权超矩阵 \overline{W}_s , 此时 \overline{W}_s 的每一列均是归一化的。

1.2.1.4 极限超矩阵的求解算法

依据 ANP 原理, 首先对极限超矩阵 \overline{W}_s^∞ 进行存在性判断, 当式(5)成立时, 则证明极限超矩阵 \overline{W}_s^∞ 存在, 并且 \overline{W}_s^∞ 的第 j 列为在准则 P_s 下的网络层中各元素对于元素 j 的相对排序向量。

$$\overline{W}_s^\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} \overline{W}_s^k. \quad (5)$$

1.2.2 采用 GRA 处理数据序列

GRA 作为灰色系统理论领域中的重要分支, 是一种对某系统发展变化态势的定量描述和比较的方法^[11]。GRA 经常适用于在“小样本、贫信息”的不确定性系统中进行方案和现状的评价选取工作^[8-9], 其基本思想是通过计算参考数据序列和若干个比较数据序列的几何形状相似程度, 并能根据其相似程度分析不同比较序列与参考序列之间联系的紧密程度。

1.2.2.1 确定分析数列, 提取参考因素

参考序列的定义是指在系统中最能反映此系统所有行为特征的最优序列。系统的参考序列 X_0 的表达式为:

$$X_0 = \{x_0(k) | k \in N, k \neq 0\}. \quad (6)$$

式中 n 为某系统中指标因素的个数, 并且存在 m 个方案, 即比较序列, 每一个方案都需要与参考序列中的 n 个指标因素进行灰色关联比较, m 个方案可表示为:

$$X_i = \{x_i(k) | k \in N, k \neq 0\}, (i \in N, i \neq 0). \quad (7)$$

确定评价比较方案的分析矩阵为:

$$M = [X_0, X_1, X_2, X, \dots, X_m]^T. \quad (8)$$

1.2.2.2 无量纲化处理数据

由于远火打击系统涉及到的指标量纲各异, 只有把参考序列与比较序列中的数据进行无量纲化之后, 这一序列才具有可比性。笔者采用基于区间变换的思想来处理远火打击系统序列中的指标数据, 得到的无量纲化数据记为 $y_i(k)$ 。

当指标为成本型指标时, 无量纲化处理公式为:

$$y_i(k) = \frac{\max_i x_i(k) - x_i(k)}{\max_i x_i(k) - \min_i x_i(k)} (i \in N, k \in N). \quad (9)$$

当指标为效益型指标时, 无量纲化处理公式为:

$$y_i(k) = \frac{x_i(k) - \min_i x_i(k)}{\max_i x_i(k) - \min_i x_i(k)} (i \in N, k \in N). \quad (10)$$

1.2.2.3 计算灰色关联度系数与灰色关联度

定义点关联系数 $\xi_i(k) = (y_0(k), y_i(k))$, $\xi_i(k)$ 是第 k 个时刻比较曲线 y_i 与参考曲线 y_0 的相对差值, 它称为 y_i 对 y_0 在 k 时刻的关联系数。

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i (\min_k |y_0(k) - y_i(k)|) + \rho \max_i (\max_k |y_0(k) - y_i(k)|)}{|y_0(k) - y_i(k)| + \rho \max_i (\max_k |y_0(k) - y_i(k)|)}. \quad (11)$$

式中 ρ 为分辨系数, 取值范围为 $[0, 1]$, 一般情况下 ρ 取值为 0.5。将所有 m 个方案的灰关联度 $\xi_i(k) = (y_0(k), y_i(k))$ 。最后, 定义 y_i 与 y_0 的灰色关联度 $\gamma(Y_i, Y_0)$ 如式(12)。如果各个指标在综合评价中所起到的作用是不同的, 那么可以对关联系数求加权平均值进而求解灰色关联度:

$$\gamma(Y_i, Y_0) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \omega_k \times \xi_i(k), (k \in N, k \neq 0). \quad (12)$$

则 $\gamma(Y_i, Y_0)$ 满足灰色关联分析, 其中 ω_k 为簇内底层指标权重。

1.2.2.4 关联度排序

在上述步骤中得到所有影响因素的关联度数值, 即灰色关联度矩阵。按照大小对关联度进行排序, 即可得到影响因素的排序情况。

假设进行排序的方案有 x_1 、 x_2 、 x_3 3 个。灰色关联分析后, 方案的关联度大小关系为 $r_2 > r_1 > r_3$, 表明方案 x_2 与标准序列的接近程度更高, 即 x_2 为择优方案。

1.3 远火打击系统作战效能评估流程

首先进行体系使命任务分析, 构建远火打击装

备评估指标体系，根据专家库分析指标间相互关系以及指标两两间重要程度，依据 ANP 原理构建指标簇间判断矩阵以及能力指标超矩阵，最终完成对远火体系的指标权重求解。

依托仿真系统，基于仿真数据拟定远火打击系

统参考序列，将参考序列以及不同编配方案的仿真数据序列进行灰色关联分析，最终输出基于不同能力的灰色关联系数矩阵；结合基于 ANP 处理得到的指标权重，最终输出远火打击系统的作战效能。具体流程如图 3 所示。

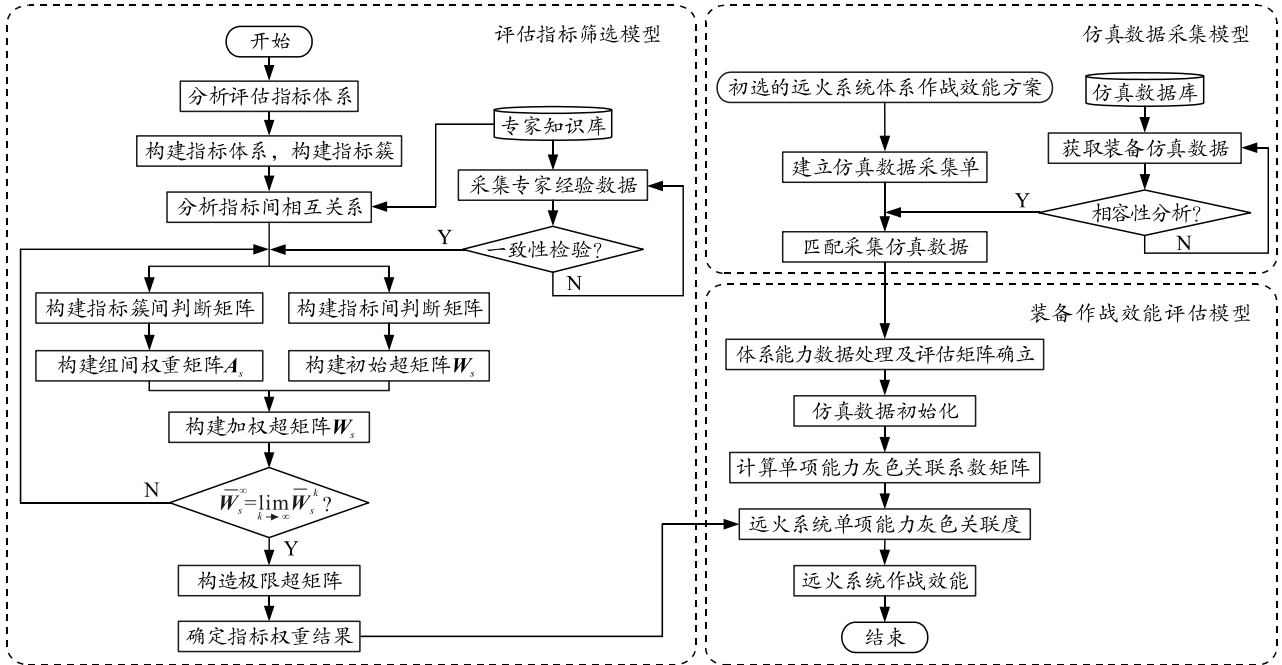


图 3 基于 ANP-GRAYA 的远火打击系统作战效能评估模型

2 案例分析

2.1 指标体系构建

首先建立远火打击系统作战效能评估指标体系，介于远火打击系统作战主要涉及侦察预警、指挥控制、火力打击、毁伤评估、作战保障 5 方面功能。侦察预警主要涉及对敌方的重要军事目标实施侦察、识别和跟踪，为作战提供必要的情报支持。指挥控制主要作战任务是分析侦察节点所提供的信息和数据，产生有效的决策方案，并对相应的执行节点下达决策指令。火力打击涉及对敌方军事目标实施打击毁伤或干扰敌方作战行动的武器装备平台或系统。毁伤评估能够在对敌方进行军事打击之后，对敌方目标进行快速评估，以达到是否对敌方进行二次打击的目的。综合保障为整个作战过程的行动提供通信、装备补给维修以及装备转移等各类保障。

在某远火打击系统作战效能评估体系中，目标层为远火打击系统作战效能，准则层划分为侦察预警、指挥控制、火力打击、毁伤评估、作战保障 5 方面的单项能力，指标层为在各个能力中衡量要素的各种标准。依据远火打击系统的作战特点，建立某远火打击系统作战效能评估指标体系，如图 4

所示^[4]。

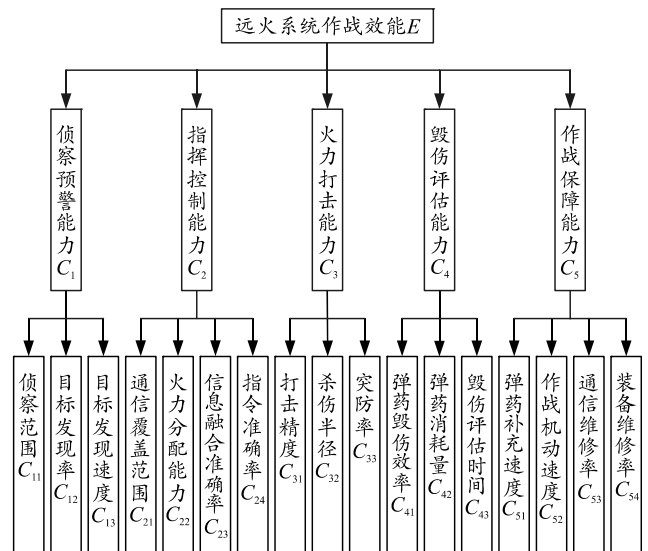


图 4 某远火打击系统作战效能评估指标体系

2.2 指标体系权重计算

某远火打击系统指标的网络层次结构影响关系如表 1 所示。为实现该关系，笔者采用 Super-Decision 对上述指标体系进行网络层次分析建模，以描述某远火打击系统作战效能评估指标之间的相互关系。

表 1 某远火打击系统网络层次结构影响关系

指标体系	指标编号	侦察预警能力 C ₁			指挥控制能力 C ₂				火力打击能力 C ₃			毁伤评估能力 C ₄			作战保障能力 C ₅			
		C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄
侦察预警能力 C ₁	C ₁₁		√															
	C ₁₂	√			√	√	√	√	√		√	√				√	√	√
	C ₁₃	√	√		√	√	√	√	√		√	√			√			
指挥控制能力 C ₂	C ₂₁	√	√															
	C ₂₂	√	√	√	√					√	√	√						
	C ₂₃	√	√	√	√					√	√	√						
	C ₂₄	√	√	√	√					√	√	√						
火力打击能力 C ₃	C ₃₁	√	√	√	√	√	√	√								√	√	
	C ₃₂	√	√	√	√	√	√	√	√							√	√	
	C ₃₃	√	√	√	√	√	√	√	√							√	√	
毁伤评估能力 C ₄	C ₄₁	√	√	√	√	√	√	√										
	C ₄₂	√	√	√	√	√	√	√										
	C ₄₃	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√						√	√
作战保障能力 C ₅	C ₅₁	√	√	√					√	√	√							
	C ₅₂	√	√										√				√	√
	C ₅₃	√	√										√	√				√
	C ₅₄	√	√										√	√				√

基于上述网络层次结构影响关系，以某远火打击系统作战效能为准则，对侦察预警、指挥控制、火力打击、毁伤评估、作战保障 5 个指标集进行两两比较，求得指标集间权矩阵，如表 2 所示。

以某远火打击系统作战效能为准则，构造各个指标未赋权超矩阵，如表 3 所示。这样根据指标集权矩阵以及指标未赋权超矩阵可以求得指标赋权超矩阵，如表 4 所示。根据式(5)合成求解极

限超矩阵，以此获取各个指标的权重，如表 5 所示。

表 2 指标集间权矩阵

指标编号	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁	0.06	0.20	0.18	0.03	0.11
C ₂	0.19	0.18	0.13	0.04	0.00
C ₃	0.41	0.39	0.39	0.34	0.64
C ₄	0.24	0.23	0.19	0.29	0.25
C ₅	0.10	0.00	0.21	0.30	0.00

表 3 指标未赋权超矩阵

指标编号	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄
C ₁₁	0	0.33	0.83	0	0	0.17	0	0	0	0.33	0.38	0	0.33	0.33	0	0.20	0.83
C ₁₂	0.25	0	0.17	0	0	0.83	0	0	0	0.33	0.26	0	0.33	0.29	0	0.80	0.17
C ₁₃	0.75	0.67	0	0	0	0	0	0	0	0.33	0.36	0	0.33	0.38	0	0	0
C ₂₁	0.08	0.37	0	0	0	0	0	0	0.16	0.12	0.33	0	0.37	0	0	0	0
C ₂₂	0.17	0.22	0.37	0	0	0.65	0	0	0.17	0.30	0.48	0.33	0.16	0	0	0	0
C ₂₃	0.53	0.19	0.33	0	0	0.25	0	0	0.52	0.36	0.13	0.53	0.26	0	0	0	0
C ₂₄	0.22	0.23	0.30	0	0	0.10	0	0	0.16	0.22	0.06	0.14	0.21	0	0	0	0
C ₃₁	0.50	0.50	0.50	0	0	0.33	0	0	1.00	1.00	0.33	0	0.33	0.33	0.75	0	0
C ₃₂	0	0	0	0	0	0.33	0	0	0	0	0.33	0	0.33	0.37	0	0	0
C ₃₃	0.50	0.50	0.50	0	0	0.33	0	0	0	0.33	1.00	0.33	0.30	0.25	0	0	0
C ₄₁	0.50	0.50	0.50	0	0	0.50	0	0	0.50	0.33	0	1.00	1.00	0	0	0	0
C ₄₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	0.50	0	0	0	0	0	0
C ₄₃	0.50	0.50	0.50	0	0	0.50	0	0	0.50	0.33	0.50	0	1.00	0	1.00	1.00	1.00
C ₅₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.86	0	0	0	0	0	0.20	0.83
C ₅₂	0.36	0.30	1.00	0	0	0	0	0	1.00	0.14	0	0	0.33	0	0	0	0
C ₅₃	0.36	0.29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	0.33	0	0	0.17
C ₅₄	0.28	0.41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	0.67	0	0.80	0

表 4 指标赋权超矩阵

指标编号	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄
C ₁₁	0	0.02	0.05	0	0	0.03	0	0	0	0.06	0.02	0	0.01	0.01	0	0.02	0.09
C ₁₂	0.02	0	0.01	0	0	0.17	0	0	0	0.06	0.02	0	0.01	0.01	0	0.09	0.02
C ₁₃	0.05	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0.02	0	0.01	0.02	0	0	0
C ₂₁	0.01	0.07	0	0	0	0	0	0	0.02	0.01	0.01	0	0.01	0	0	0	0
C ₂₂	0.03	0.04	0.07	0	0	0.12	0	0	0.02	0.03	0.01	0.01	0	0	0	0	0
C ₂₃	0.09	0.03	0.06	0	0	0.05	0	0	0.07	0.04	0	0.01	0	0	0	0	0
C ₂₄	0.04	0.04	0.05	0	0	0.02	0	0	0.02	0.03	0	0	0	0	0	0	0
C ₃₁	0.22	0.22	0.22	0	0	0.13	0	0	0.47	0.38	0.16	0	0.11	0.21	0.75	0	0
C ₃₂	0	0	0	0	0	0.13	0	0	0	0	0.16	0	0.11	0.23	0	0	0
C ₃₃	0.22	0.22	0.22	0	0	0.13	0	0	0	0	0.16	0.52	0.11	0.19	0.25	0	0
C ₄₁	0.12	0.12	0.12	0	0	0.10	0	0	0.09	0.05	0	0.45	0.29	0	0	0	0
C ₄₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0.21	0	0	0	0	0	0
C ₄₃	0.12	0.12	0.12	0	0	0.10	0	0	0.09	0.05	0.21	0	0	0.23	0	0.63	0.63
C ₅₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0	0	0	0	0	0.05	0.21
C ₅₂	0.03	0.03	0.10	0	0	0	0	0	0.21	0.02	0	0	0.10	0	0	0	0
C ₅₃	0.04	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.10	0.03	0	0	0.04
C ₅₄	0.03	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.10	0.06	0	0.21	0

表 5 极限超矩阵

指标编号	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄
\bar{w}_s^∞	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.24	0.06	0.13	0.11	0.04	0.13	0.04	0.05	0.02	0.03

基于上述分析,某远火打击系统作战效能指标权重如表 6 所示,可见专家更看重火力打击能力以及毁伤评估能力,符合远火打击系统作战基本的客观需要。

表 6 某远火打击系统作战效能指标权重

指标簇名称	指标簇权重	节点底层指标	底层指标权重
侦察预警能力	0.08	侦察范围	0.03
		目标发现率	0.03
		目标发现时间	0.02
指挥控制能力	0.07	通信覆盖范围	0.01
		火力分配能力	0.02
		融合准确率	0.02
		指令准确率	0.02
火力打击能力	0.43	弹药打击精度	0.24
		弹药杀伤半径	0.06
		弹药突防率	0.13
毁伤评估能力	0.28	弹药毁伤效率	0.11
		弹药消耗量	0.04
		毁伤评估时间	0.13
作战保障能力	0.14	弹药补充速度	0.04
		作战机动时间	0.05
		通信维修率	0.02
		装备维修率	0.03

2.3 评估数据处理

依托仿真采集单以及仿真引擎,在仿真推演系统中输入不同的编配方案,进行仿真推演^[10]。根据各个指标类型情况,效益性指标越大越优,成本型指标越小越优,最终确定参考序列与 3 种方案的仿真采集数据如表 7 所示。

表 7 远火体系数据采集情况

节点底层指标	最优值	方案		
		1	2	3
侦察范围/km ²	10	3.55	7.72	5.74
目标发现率/%	100	85.30	71.20	78.30
目标发现时间/min	3	5.52	3.56	3.71
通信覆盖范围率/%	100	91.50	87.20	92.50
火力分配时间/s	15	13.50	10.30	11.20
融合准确率/%	100	75.30	78.40	77.60
指令准确率/%	100	80.00	92.00	85.00
弹药打击精度率/%	100	95.00	90.00	90.00
弹药杀伤半径/m	5	3.12	2.64	2.83
弹药突防率/%	100	80.00	83.00	78.00
弹药毁伤效率/%	100	91.30	83.50	86.70
弹药消耗发数	60	42.50	38.30	32.40
毁伤评估时间/min	1	1.60	2.10	1.80
弹药补充速度/(发/min)	6	5.30	4.80	5.20
作战机动时间/min	2	2.50	3.10	2.40
通信维修率/%	100	75.00	75.00	75.00
装备维修率/%	100	72.50	85.10	83.70

依据灰色关联分析法进行处理,将 3 种编配方案的仿真数据与理想序列 X₀ 进行比对,进而得到 3 种不同编配方案与理想序列的灰色关联系数,最终与 ANP 计算的权重结果结合,计算单项作战能力的得分。

以侦察预警能力为例进行计算:

1) 根据表 4 标准序列数据与 3 种方案的仿真数据,构造判断矩阵 X₁。

$$X_1 = \begin{bmatrix} 10.00 & 100.0 & 3.00 \\ 3.55 & 85.3 & 5.52 \\ 7.72 & 71.2 & 3.56 \\ 5.74 & 78.3 & 3.71 \end{bmatrix} \quad (13)$$

2) 对判断矩阵进行去量纲化处理,以侦察预警能力为例,侦察范围以及目标发现率是效益性指标,目标发现时间是成本性指标,由式(9)和(10)进行去量纲化处理后得到的初始化矩阵 Y₁。

$$Y_1 = \begin{bmatrix} 0.928 & 0 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.024 \\ 0.938 & 0 & 0 \\ 0.972 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

3) 计算各方案与理想序列的差值 Δ₁:

$$\Delta_1 = \begin{bmatrix} 0.072 & 0 & 0.024 \\ 0.011 & 0 & 0 \\ 0.045 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

4) 计算灰色关联系数矩阵 ξ₁:

$$\xi_1 = \begin{bmatrix} 0.3333 & 1 & 0.5996 \\ 0.7719 & 1 & 1.0000 \\ 0.4453 & 1 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (16)$$

5) 由式计算侦察预警能力指标簇中 3 种方案的灰色关联度,即在侦察预警能力中 3 种方案的灰色关联度(单项评分) R₁:

$$R_1 = \omega_1 \times \xi_1 = \begin{bmatrix} 0.6499 \\ 0.9145 \\ 0.7920 \end{bmatrix} \quad (17)$$

同理可得在远火打击系统指挥控制能力、火力打击能力、毁伤评估能力以及作战保障能力中 3 种方案的关联系数矩阵以及能力评估值,如表 8 所示。

通过 GRA 计算出 3 种不同方案的各项能力单项能力评价价值,与基于 ANP 模型的指标簇权重进行矩阵乘法运算,得到远火打击系统的作战效能值,如表 9 所示。

3 种远火打击系统编配方案体系效能分别为 0.826 4, 0.867 2, 0.836 5。通过对比各个编配方案的作战效能评估值, 不难看出, 方案 2 的作战效能优于方案 1 与 3。首先从权重的比重来看, 火力打击能力和毁伤评估能力对整体作战效能的影响相比其他较大, 方案 2 在这 2 项能力中均比较突出, 最终得以评为优选方案, 这与评估模型的特征相符。

表 8 某远火打击系统灰色关联系数

节点底层指标	簇内权重	方案		
		1	2	3
侦察范围	0.38	0.333 3	0.771 9	0.445 3
目标发现率	0.38	1.000 0	1.000 0	1.000 0
目标发现时间	0.25	0.599 6	1.000 0	1.000 0
侦察预警能力评价		0.649 9	0.914 5	0.792 0
通信覆盖范围	0.14	1.000 0	0.638 7	1.000 0
火力分配能力	0.29	1.000 0	1.000 0	1.000 0
融合准确率	0.29	0.333 3	0.384 2	0.361 7
指令准确率	0.29	0.413 3	1.000 0	0.529 6
指挥控制能力评价		0.641 9	0.772 4	0.683 2
弹药打击精度	0.56	1.000 0	1.000 0	1.000 0
弹药杀伤半径	0.14	1.000 0	1.000 0	1.000 0
弹药突防率	0.30	0.333 3	0.504 6	0.372 2
火力打击能力评价		0.798 4	0.850 2	0.810 2
弹药毁伤效率	0.39	1.000 0	1.000 0	1.000 0
弹药消耗量	0.14	0.456 9	0.437 8	0.333 3
毁伤评估时间	0.46	1.000 0	1.000 0	1.000 0
毁伤评估能力评价		0.922 4	0.919 7	0.904 8
弹药补充速度	0.29	0.965 6	0.754 1	0.906 2
作战机动时间	0.36	1.000 0	1.000 0	1.000 0
通信维修率	0.14	1.000 0	0.333 3	0.365 3
装备维修率	0.21	0.641 1	1.000 0	1.000 0
作战保障能力评价		0.913 3	0.834 5	0.882 5

表 9 装备体系作战效能

效能指标	指标簇权重	方案		
		1	2	3
侦察预警能力	0.08	0.649 9	0.914 5	0.792 0
指挥控制能力	0.07	0.641 9	0.772 4	0.683 2
火力打击能力	0.43	0.798 4	0.850 2	0.810 2
毁伤评估能力	0.28	0.922 4	0.919 7	0.904 8
作战保障能力	0.14	0.913 3	0.834 5	0.882 5
作战效能 (ANP+GRA)		0.826 4	0.867 2	0.836 5

3 结论

基于某远火打击系统展开作战效能评估, 通过分析远火打击系统的构成, 建立作战方案评估指标体系, 并采用基于 ANP-GRA 的方法加以评估, 有效兼顾远火打击系统在实际作战中对复杂作战指标体系的定权分析及对仿真数据的处理。但由于评估指标体系建立不够完善、评估数据获取不够准确等因素依然存在, 评估结果的可靠性还有待提高。

参考文献:

- [1] 黄炎炎, 刘明. 面向军民领域的效能评估与决策分析技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 86-101.
- [2] 江静婷, 黄炎炎. 海战场环境对两栖舰艇兵力投送影响分析[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(3): 275-279.
- [3] 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.
- [4] 罗鹏程, 傅攀峰, 周经伦. 武器装备体系作战能力评估框架[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(1): 72-75.
- [5] 李际超. 基于作战网络模型的装备体系贡献度研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- [6] 金丛镇. 基于 MMF-OODA 的海军装备体系贡献度评估方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [7] 王立达, 王磊. 基于仿真推演的反导武器作战方案评估方法研究[J]. 信息系统工程, 2022(8): 137-142.
- [8] 王涛, 汪刘应, 刘顾. 武器装备体系贡献率评估方法综述[J]. 兵工自动化, 2019, 38(3): 10-15.
- [9] 秦园丽, 张训立, 高桂清, 等. 基于 ANP-熵权法的反舰导弹作战体系效能评估[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(5): 48-53.
- [10] 沈墩彪, 张静, 黎锐. 基于 ANP 的作战部队实战化训练评估[J]. 指挥控制与仿真, 2017, 39(2): 95-104.
- [11] 刘海燕, 史志富. 导弹武器系统作战效能的灰色评估[J]. 航空兵器, 2005(3): 11-14.