

网络层次分析法在光电防护战斗效能评估中的应用*

王宇, 欧宗伟, 程立

(国防科技大学电子对抗学院, 安徽合肥 230037)

摘要:针对层次分析法在光电防护战斗效能评估中的不足,提出运用网络层次分析法实施评估,以分析判断元素层次内部的独立性、相关性和反馈性为切入点,建立影响光电防护战斗效能的主要指标组和评估模型,按照构建矩阵、实施计算、得出权重的步骤完成评估。通过实例对模型进行验证,得出了具有较高可信度的评估结果,为光电防护战斗效能评估提供参考。

关键词:网络层次分析法;光电防护战斗;效能评估

中图分类号:E919 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)06-048-08



听语音
与作者互动
聊科研

Application of analytic network process in evaluating the electro-optical protection combat effectiveness

WANG Yu, OU Zongwei, CHENG Li

(College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: Considering the deficiency of analytic hierarchy process in evaluation of electro-optical protection combat effectiveness, analytic network process was proposed to evaluate, to analyze the independence, correlation and feedback of the interior of the element hierarchy as entry point, put forward the main index dictionary of electro-optical protection combat effectiveness, set up the evaluation model, according to setting up the matrix, calculating, obtaining the weights, complete the evaluation. Validate the model by an example obtains evaluation results with high reliability, which provide theory-reference for evaluation of electro-optical protection combat effectiveness.

Keywords: analytic network process; electro-optical protection combat; evaluation of effectiveness

光电防护战斗是指使用光电对抗手段,保护己方重要目标的作战行动。对其效能的评估是组织重要目标防护指挥决策的基础和依据^[1-2]。传统的层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是一种定性和定量相结合的多指标评估分析方法,认为上层指标对下层指标存在着支配关系,要求同级指标之间是彼此独立的^[3-5]。而实际问题中,各层之间的指标往往是相互依存的,因此该方法并不能很好地反应各指标之间的相互影响关系和影响程度。Saaty教授于1996年提出网络层次分析法(analytic network process, ANP),很好地解决了决策问题的结构具有依赖性和反馈性的情况。其过程主要分为3个步骤:①分析问题,判断元素层次内部的独立性、相关性和反馈性,以此建立指标体系;②构造ANP结构,包括控制层和网络层;③构建ANP形成的超矩阵,并计算出各指标的权重值^[6-8]。

本文针对光电防护战斗效能评估的问题进行研究,采用ANP的方法,考虑到各指标间的关联性,建立评估指标组并计算权重,克服了传统主观赋值法的劣势,较为科学地解决了评估时主观因素占比较大的问题,为指挥员对光电防护战斗效能评估提供依据。

1 建立光电防护战斗效能指标体系

1.1 确定指标体系

科学合理地建立指标体系,是完成效能评估的前提和基础。通过对中外历次光电防护战斗实践进行梳理总结,其战斗效能主要取决于光电防护系统的指挥控制能力、侦察告警能力、光电干扰能力和战场环境等因素^[9-11],各指标组包含的指标见表1。

通过对表1内各指标(组)进行分析,发现该指标体系内各指标(组)并不完全独立,而是存在

* 收稿日期:2021-09-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907198)

作者简介:王宇(1987—),男,山西运城人,硕士,E-mail: howwy@163.com;

欧宗伟(通信作者),男,安徽全椒人,教授,博士,硕士生导师,E-mail: ouzongwei17@nudt.edu.cn

相互影响、相互反馈的关系。

表 1 光电防护战斗效能评估指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of electro-optical protection combat effectiveness

指标组	指标
指挥控制能力 C_1	指挥员指挥决策能力 C_{11}
	指挥机构辅助决策能力 C_{12}
	指挥信息系统性能 C_{13}
	操装人员训练水平 C_{14}
侦察告警能力 C_2	红外侦察告警距离 C_{21}
	激光散射截获半径 C_{22}
	告警覆盖率 C_{23}
光电干扰能力 C_3	干扰波段 C_{31}
	干扰功率 C_{32}
	干扰反应时间 C_{33}
	跟踪干扰精度 C_{34}
	过顶区角度 C_{35}
	有效烟幕形成时间 C_{36}
战场环境 C_4	大气能见度 C_{41}
	风速风向 C_{42}
	地形的干扰遮蔽情况 C_{43}

各指标组之间,以指挥控制能力 C_1 、侦察告警能力 C_2 和光电干扰能力 C_3 为例,当 C_1 能力较强时,通过合理配置侦察告警装备,提升了 C_2 水平,基于良好的侦察告警能力,为 C_3 的发挥奠定了基础。

各指标之间,以操装人员训练水平 C_{14} 、红外侦察告警距离 C_{21} 和过顶区角度 C_{35} 为例,当 C_{14} 数值较低时,不能很好地发挥装备的正常性能水平,导致 C_{21} 数值降低、 C_{35} 数值升高。

其他指标(组)之间也有类似的关系。因此,光电防护战斗效能指标体系呈现出相互关联、相互影响的网络关系。AHP 不能很好地反应网络内部的关系,而采用 ANP 更加合理、更加科学。

1.2 规范指标量纲

光电防护战斗效能评估指标分为两类:一类是能够量化的指标,即具有明确的数值,如红外侦察告警距离、激光散射截获半径、干扰反应时间、过顶区角度、大气能见度等;另一类是只能定性的指标,如指挥员指挥决策能力、操装人员训练水平等,可用优秀、良好、及格、不及格等表示。对于定性和定量的指标,需要分别进行

无量纲化处理。

1.2.1 定量指标的无量纲化处理

比值模型:

$$F = \begin{cases} \frac{X_i}{X_0} & X_i < X_0 \quad \text{效益型} \\ \frac{X_0}{X_i} & X_i < X_0 \quad \text{成本型} \\ 1 & X_i \geq X_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, X_i 为指标的实际数值, X_0 为指标能够完成任务的理想值。方程组中第 1 个方程为当指标为效益型时采用,如激光散射截获半径 C_{22} ,期望值是该指标越大越好;第 2 个方程为当指标为成本型时采用,如干扰反应时间 C_{33} ,期望值是该指标越小越好。

1.2.2 定性指标的无量纲化处理

将定性指标按照优秀、良好、及格、不及格划分成 4 个评语等级,通常采取专家打分的方法,按照 1~9 级标度方法(见表 2)量化两两评语等级间的相对重要性,构建判断矩阵,然后求出不同的权重。下面以指挥员指挥决策能力 C_{11} 为例,引入示例数据进行说明,如表 3 所示。

表 2 重要性标度

Tab. 2 Importance scale

标度	含义
1	同等重要
3	稍微重要
5	明显重要
7	重要得多
9	绝对重要
2,4,6,8	两组相邻判断的中值

表 3 定性指标无量纲化处理

Tab. 3 Dimensionless treatment of qualitative index

评语等级	优秀	良好	及格	不及格	权重	量化取值
优秀	1	3	5	7	0.523 8	1.000 0
良好	1/3	1	2	3	0.270 8	0.517 0
及格	1/5	1/2	1	2	0.135 4	0.258 5
不及格	1/7	1/3	1/2	1	0.070 0	0.133 6

2 构建光电防护战斗效能评估模型

2.1 确定指标权重

ANP 是一种多准则测度理论,是通过个人判

断(或者是将实际测量结果归一化为一种相对形式)获取指标的相对优先权即权重的一种方法^[12-13]。其中,包含两种方法:

1)直接优势度:指给定一个准则,对两元素对于该准则的重要程度进行比较,适用于元素间相互独立的情形。

2)间接优势度:指给出一个准则,对两元素在准则下对第三个元素的影响程度进行比较,适用于指标间存在相互影响关系的情形。

2.2 建立 ANP 模型

由 1.1 节的指标分析可得,在光电防护战斗中,其防护效能可分别从侦察告警效果和光电干扰效果等方面评估,因此,建立的 ANP 模型的目标和准则如下:

1)模型目标:以光电防护战斗效能为总目标层,是评估的顶层准则。

2)判断准则:以 $P_m (m = 1, 2)$ 作为效能评估

的一级准则,即侦察告警效果(P_1)和光电干扰效果(P_2),其各自对总目标 A 的贡献度(即权重)分别为 σ_1, σ_2 ,其中 $\sum_{s=1}^2 \sigma_s = 1, \sigma_s$ 可通过直接优势度两两比较得出。

光电防护战斗效能的 ANP 网络层次结构为:以 ANP 的层次区分思想,参照系统效能评估的“一般性 4 层结构”^[13-14],构建光电防护战斗效能的 ANP 网络层次结构图,如图 1 所示。其中:第一层为目标层,是 ANP 评估的总目标;第二层是准则层,与第一层共同构成控制层;第三层是功能层;第四层是性能指标层,涵盖 ANP 网络层中的所有元素,与第三层共同构成网络层。

通过图 1 可知,控制层各作战能力的实现,由网络层中各指标决定,所有元素所在的元素组又通过控制层形成了相互依存和反馈的关系。根据上述分析,可建立网络内部具有依存关系的 ANP 模型,如图 2 所示。

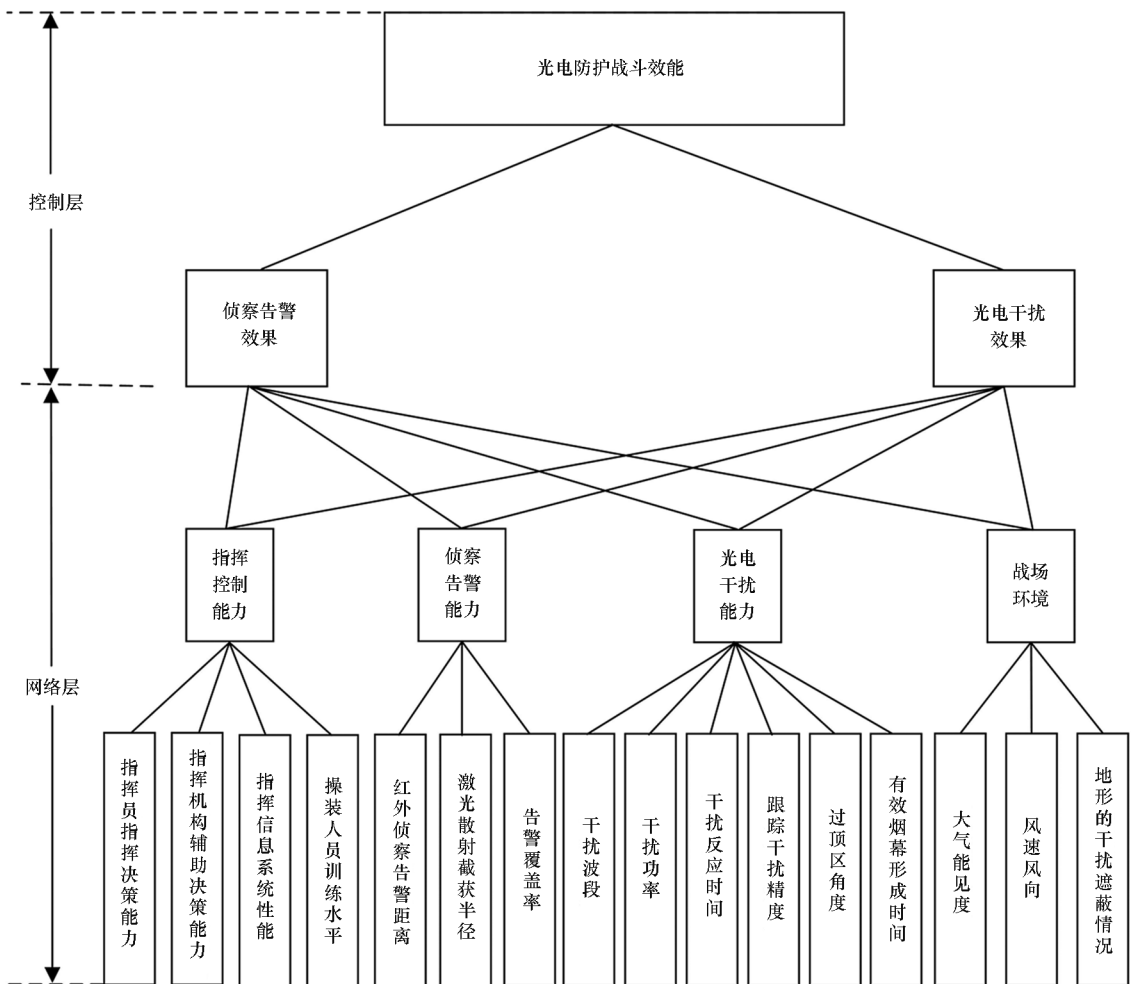


图 1 光电防护战斗效能的 ANP 层次结构

Fig. 1 ANP hierarchical structure of electro-optical protection combat effectiveness

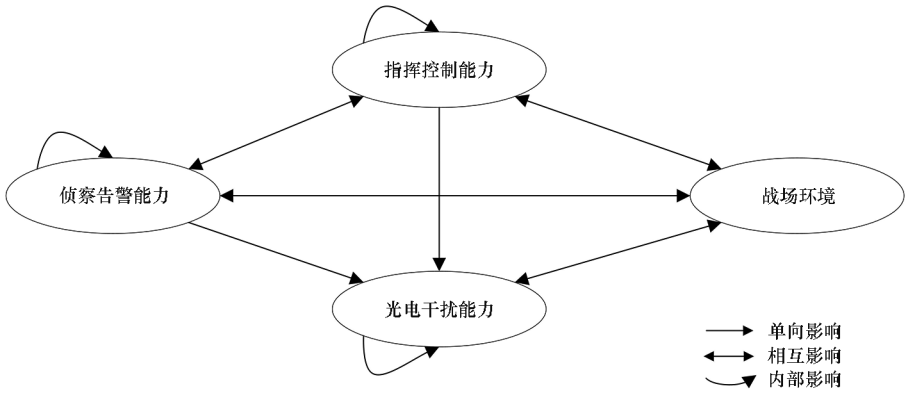


图 2 光电防护战斗效能 ANP 模型

Fig. 2 ANP model of electro-optical protection combat effectiveness

3 构造并计算 ANP 极限加权超矩阵

ANP 指标的计算,主要通过构建判断矩阵和未加权超矩阵,在此基础上计算加权超矩阵,采取极限法获得极限加权超矩阵,最后通过相对排序向量得出各个评估指标的权重^[15-16]。

3.1 构造评估判断矩阵

构建判断矩阵的方法与 AHP 类似,以控制层中准则 P_m 为一级准则,以网络层中某个元素组中的元素为次准则,对另一个元素组中各元素的影响进行两两比较,用排序向量表示影响程度,最终把所有元素组之间的相互影响排序向量构成未加权超矩阵,通常用间接优势度比较获得。

例如,以侦察告警效果 P_1 为主准则,以侦察告警能力 C_2 中的红外侦察告警距离 C_{21} 为次准则,对战场环境 C_4 中的各指标按其受 C_{21} 的影响大小进行间接优势度比较,列出在 P_1/C_{21} 双层准则下的评估判断矩阵,如表 4 所示,由特征值法求出对应的排序向量 $(\omega_{41}^{(21)}, \omega_{42}^{(21)}, \omega_{43}^{(21)})^T$ 。

表 4 P_1/C_{21} 准则下各元素组对 C_4 的重要性比较

Tab. 4 Comparison of the importance of each element group to C_4 under the P_1/C_{21} criterion

C_4	C_{41}	C_{42}	C_{43}	特征向量	判断矩阵最大特征值	判断矩阵一致性比率
C_{41}	1	3	5	0.647 9	$\lambda_{\max} = 3.004$	$CR = 0.002 1$
C_{42}	1/3	1	2	0.229 9		
C_{43}	1/5	1/2	1	0.122 2		

同理,可得出在 P_1/C_{22} 双层准则下的评估判断矩阵,其排序向量为 $(\omega_{41}^{(22)}, \omega_{42}^{(22)}, \omega_{43}^{(22)})^T$; 在 P_1/C_{23} 双层准则下的评估判断矩阵,其排序向量为 $(\omega_{41}^{(23)}, \omega_{42}^{(23)}, \omega_{43}^{(23)})^T$ 。则在一级准则 $P_m (m =$

1, 2) 下分别对指标组 $C_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 中元素的影响程度进行间接优势度比较,得出相应的评估矩阵,求出排序向量。

3.2 构造未加权超矩阵

由 3.1 节可得:

$$W_{42}^m = \begin{bmatrix} \omega_{41}^{(21)} & \omega_{41}^{(22)} & \omega_{41}^{(23)} \\ \omega_{42}^{(21)} & \omega_{42}^{(22)} & \omega_{42}^{(23)} \\ \omega_{43}^{(21)} & \omega_{43}^{(22)} & \omega_{43}^{(23)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, W_{42}^m 表示以一级准则 $P_m (m = 1, 2)$ 为主准则,以 C_2 中各元素分别为次准则,对 C_4 中各元素进行间接优势度比较,其中每个列向量就是 C_4 中元素 C_{41}, C_{42}, C_{43} 对 C_2 中各元素的影响程度排列向量。若 C_4 中各元素不受 C_2 元素组的影响,则 $W_{42}^m = \mathbf{0}$ 。同理可得 $W_{ij}^m (m = 1, 2; i, j = 1, 2, 3, 4)$ 。按照 ANP 对超矩阵的定义,可得在一级准则 P_m 下的未加权超矩阵:

$$W_m = \begin{bmatrix} W_{11}^m & W_{12}^m & W_{13}^m & W_{14}^m \\ W_{21}^m & W_{22}^m & W_{23}^m & W_{24}^m \\ W_{31}^m & W_{32}^m & W_{33}^m & W_{34}^m \\ W_{41}^m & W_{42}^m & W_{43}^m & W_{44}^m \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.3 构造加权超矩阵

对于 W_{ij}^m , 其列向量是归一化的,但 W_m 的列向量并不是归一化的,所以要对其加权做进一步处理。在准则 $P_m (m = 1, 2)$ 下,将各组元素对准则 $C_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 的重要性进行比较,得出相应的排序向量,得出如表 5 所示的比较矩阵。

由此得到加权矩阵:

$$A^{(m)} = \begin{bmatrix} a_{11}^m & a_{12}^m & a_{13}^m & a_{14}^m \\ a_{21}^m & a_{22}^m & a_{23}^m & a_{24}^m \\ a_{31}^m & a_{32}^m & a_{33}^m & a_{34}^m \\ a_{41}^m & a_{42}^m & a_{43}^m & a_{44}^m \end{bmatrix}$$

表 5 P_m/C_i 准则下网络层指标相对重要性比较

Tab.5 Comparison of relative importance of network layer index under P_m/C_i criterion

C_i	C_1	C_2	C_3	C_4	排序向量
C_1					a_{1j}^m
C_2					a_{2j}^m
C_3					a_{3j}^m
C_4					a_{4j}^m

$$\bar{W}_m^\infty = \begin{bmatrix} \bar{W}_{11}^{m\infty} & \bar{W}_{12}^{m\infty} & \bar{W}_{13}^{m\infty} & \bar{W}_{14}^{m\infty} \\ \bar{W}_{21}^{m\infty} & \bar{W}_{22}^{m\infty} & \bar{W}_{23}^{m\infty} & \bar{W}_{24}^{m\infty} \\ \bar{W}_{31}^{m\infty} & \bar{W}_{32}^{m\infty} & \bar{W}_{33}^{m\infty} & \bar{W}_{34}^{m\infty} \\ \bar{W}_{41}^{m\infty} & \bar{W}_{42}^{m\infty} & \bar{W}_{43}^{m\infty} & \bar{W}_{44}^{m\infty} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： \bar{W}_m^∞ 为极限加权超矩阵，第 j 列就是 P_m 下网络层中各元素对于元素 C_j 的极限排序向量； $\bar{W}_{ij}^{m\infty}$ 是稳定的各指标权重。

4 评估实例

本节以典型光电防护战斗为例，经过无量纲化后，给出规范化后的指标值，如表 6 所示。

表 6 典型光电防护战斗指标值 (无量纲)

Tab.6 Typical electro-optical protection combat index values (dimensionless)

指标	指标值	指标	指标值
C_{11}	0.517 0	C_{32}	0.822 4
C_{12}	0.671 4	C_{33}	0.746 1
C_{13}	0.819 2	C_{34}	0.527 3
C_{14}	0.728 5	C_{35}	0.683 3
C_{21}	0.813 7	C_{36}	0.865 7
C_{22}	0.625 0	C_{41}	0.824 3
C_{23}	0.800 0	C_{42}	0.774 8
C_{31}	0.845 3	C_{43}	0.892 4

对未加权矩阵 W_m 进行加权，完成归一化。

令 $\bar{W}_m = a_{ij}^m W_{ij}^m$ 可得：

$$\bar{W}_m = \begin{bmatrix} \bar{W}_{11}^m & \bar{W}_{12}^m & \bar{W}_{13}^m & \bar{W}_{14}^m \\ \bar{W}_{21}^m & \bar{W}_{22}^m & \bar{W}_{23}^m & \bar{W}_{24}^m \\ \bar{W}_{31}^m & \bar{W}_{32}^m & \bar{W}_{33}^m & \bar{W}_{34}^m \\ \bar{W}_{41}^m & \bar{W}_{42}^m & \bar{W}_{43}^m & \bar{W}_{44}^m \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中， \bar{W}_m 为加权超矩阵，各列的元素之和为 1，称为列随机矩阵。

3.4 计算极限加权超矩阵

在 ANP 方法中，因为引入了反馈、相互依赖关系使得元素优先权的确定过程变得复杂，两个元素之间既能直接比较，也能间接比较，如在超矩阵中 W_m 的元素为 W_{ij}^m ，则其大小反映了元素 C_i 对元素 C_j 的一步优势度，但同时元素 C_i 对元素 C_j 的优势度还可以用 $\sum_{i=1}^4 W_{ik} W_{kj}$ 得到，称为二步优势度，它是 W_m^2 的元素，且其列向量仍是归一化的。当 $W_m^\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} W_m^n$ 存在时，

4.1 计算未加权超矩阵

首先，按照 ANP 方法对超矩阵的定义建立如式(3)所示的未加权超矩阵。其次，求出式(3)中的各元素。在侦察告警效果准则 P_1 下，指标组 C_1 内部之间的评估判断矩阵如表 7 所示。

表 7 P_1 准则下 C_1 内部的评估判断矩阵表

Tab.7 Evaluation and judgment matrix table for C_1 internal under P_1 criterion

评判准则	C_{ij}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	特征向量	最大特征值及一致性比率
P_1/C_{11}	C_{11}	1	4	6	5	$\omega_{11}^{(11)} = 0.598 4$	$\lambda_{\max} = 4.252 9$ $CR = 0.093 7$
	C_{12}	1/4	1	2	3	$\omega_{12}^{(11)} = 0.260 9$	
	C_{13}	1/6	1/2	1	1/3	$\omega_{13}^{(11)} = 0.082 4$	
	C_{14}	1/5	1/3	3	1	$\omega_{14}^{(11)} = 0.112 3$	
P_1/C_{12}	C_{11}	1	4	6	5	$\omega_{11}^{(12)} = 0.599 0$	$\lambda_{\max} = 4.127 7$ $CR = 0.047 3$
	C_{12}	1/4	1	3	2	$\omega_{12}^{(12)} = 0.198 8$	
	C_{13}	1/5	1/3	1	1/3	$\omega_{13}^{(12)} = 0.067 5$	
	C_{14}	1/5	1/2	3	1	$\omega_{14}^{(12)} = 0.134 8$	
P_1/C_{13}	C_{11}	1	4	6	5	$\omega_{11}^{(13)} = 0.691 0$	$\lambda_{\max} = 3.053 6$ $CR = 0.046 2$
	C_{12}	1/4	1	3	2	$\omega_{12}^{(13)} = 0.217 6$	
	C_{13}	1/6	1/3	1	1	$\omega_{13}^{(13)} = 0.091 4$	
	C_{14}	1/5	1/2	3	1	$\omega_{14}^{(13)} = 0$	
P_1/C_{14}	C_{11}	1	3	5	5	$\omega_{11}^{(14)} = 0.648 3$	$\lambda_{\max} = 3.003 7$ $CR = 0.003 2$
	C_{12}	1/3	1	2	2	$\omega_{12}^{(14)} = 0.229 7$	
	C_{13}	1/6	1/3	1	1	$\omega_{13}^{(14)} = 0$	
	C_{14}	1/5	1/2	1	1	$\omega_{14}^{(14)} = 0.122 0$	

则:

$$W_{11}^1 = \begin{bmatrix} 0.5984 & 0.5990 & 0.6910 & 0.6483 \\ 0.2609 & 0.1988 & 0.2176 & 0.2297 \\ 0.0824 & 0.0675 & 0.0914 & 0 \\ 0.1123 & 0.1348 & 0 & 0.1220 \end{bmatrix}$$

同理,可得 $W_{ij}^1(i, j = 1, 2, 3, 4)$ 。

根据 ANP 方法,由式(3)可得 16×16 未加权超矩阵:

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0.5984 & 0.5990 & 0.6910 & 0.6483 & \dots & 0.5584 \\ 0.2609 & 0.1988 & 0.2716 & 0.2297 & \dots & 0.3196 \\ 0.0824 & 0.0675 & 0.0914 & 0 & \dots & 0 \\ 0.1123 & 0.1348 & 0 & 0.1220 & \dots & 0.1220 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.1220 & 0.0914 & 0 & 0.1047 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

4.2 计算加权超矩阵

按照 ANP 计算方法,求出指挥控制能力、侦

察告警能力、光电干扰能力和战场环境 4 个因素集的权重,判断矩阵如表 8 所示。

得出加权矩阵:

$$A^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.0854 & 0.0758 & 0.1365 & 0.1047 \\ 0.5424 & 0.5409 & 0 & 0.6370 \\ 0.2133 & 0.2298 & 0.6250 & 0.2583 \\ 0.1589 & 0.1535 & 0.2385 & 0 \end{bmatrix}$$

由式(2)~(5),得出 16×16 加权超矩阵为:

$$\bar{W}_1 = \begin{bmatrix} 0.0511 & 0.0512 & 0.0702 & 0.0554 & \dots & 0.0585 \\ 0.0177 & 0.0170 & 0.0221 & 0.0196 & \dots & 0.0335 \\ 0.0070 & 0.0058 & 0.0093 & 0 & \dots & 0 \\ 0.0096 & 0.0115 & 0 & 0.0104 & \dots & 0.0128 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.0194 & 0.0145 & 0 & 0.0166 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

表 8 P_1 准则下各因素集的评估判断矩阵表

Tab. 8 Evaluation and judgment matrix table for each factor set under the P_1 criterion

评判准则	C_i	C_1	C_2	C_3	C_4	a_{ij}^1	最大特征值及一致性比率
P_1/C_1	C_1	1	1/5	1/2		0.1169	$\lambda_{\max} = 3.0246$ $CR = 0.0212$
	C_2	5	1	4		0.6833	
	C_3	2	1/4	1		0.1998	
	C_4					0	
P_1/C_2	C_1	1		1/3		0.2500	$\lambda_{\max} = 2$ $CR = 0$
	C_2					0	
	C_3	3		1		0.7500	
	C_4					0	
P_1/C_3	C_1	1		1/4		0.2000	$\lambda_{\max} = 2$ $CR = 0$
	C_2		1			0	
	C_3	4		1		0.8000	
	C_4					0	
P_1/C_4	C_1	1	1/5	1/3		0.1047	$\lambda_{\max} = 3.0389$ $CR = 0.0332$
	C_2	5	1	3		0.6370	
	C_3	3	1/3	1		0.2583	
	C_4					0	

从式(6)中可知,加权超矩阵 \bar{W}_1 是一个列随机矩阵,其列的和为 1,为使其每一列能够达到稳定,将 \bar{W}_1 自相乘,直至积收敛为止,则每列的数值即为最后的排序向量。在 ANP 中,采用 Super Decisions 软件计算^[17-21],其结果为 16×16 矩阵:

$$\bar{W}_1^\infty = \begin{bmatrix} 0.0850 & 0.0850 & 0.0850 & 0.0850 & \dots & 0.0850 \\ 0.0325 & 0.0325 & 0.0325 & 0.0325 & \dots & 0.0325 \\ 0.0025 & 0.0025 & 0.0025 & 0.0025 & \dots & 0.0025 \\ 0.0047 & 0.0047 & 0.0047 & 0.0047 & \dots & 0.0047 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.0208 & 0.0208 & 0.0208 & 0.0208 & \dots & 0.0208 \end{bmatrix}$$

同理在光电干扰效果 P_2 准则下, 可得:

$$\bar{W}_2^\infty = \begin{bmatrix} 0.082\ 6 & 0.082\ 6 & 0.082\ 6 & 0.082\ 6 & \cdots & 0.082\ 6 \\ 0.020\ 9 & 0.020\ 9 & 0.020\ 9 & 0.020\ 9 & \cdots & 0.020\ 9 \\ 0.002\ 3 & 0.002\ 3 & 0.002\ 3 & 0.002\ 3 & \cdots & 0.002\ 3 \\ 0.006\ 4 & 0.006\ 4 & 0.006\ 4 & 0.006\ 4 & \cdots & 0.006\ 4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.022\ 4 & 0.022\ 4 & 0.022\ 4 & 0.022\ 4 & \cdots & 0.022\ 4 \end{bmatrix}$$

4.3 光电防护战斗效能计算

通过以上两个极限加权超矩阵, 可得出在 P_1 、 P_2 准则下光电防护各指标的最终权重排序, 如表 9 和表 10 所示。

表 9 P_1 准则下光电防护战斗效能的性能指标权重表

Tab.9 Performance index weighting table for electro-optical protection combat effectiveness under P_1 criterion

指标	权重	指标	权重
C_{11}	0.085 0	C_{32}	0.044 6
C_{12}	0.032 5	C_{33}	0.169 2
C_{13}	0.002 5	C_{34}	0.011 6
C_{14}	0.004 7	C_{35}	0.027 1
C_{21}	0.149 5	C_{36}	0.042 2
C_{22}	0.133 3	C_{41}	0.110 2
C_{23}	0.072 2	C_{42}	0.012 5
C_{31}	0.082 1	C_{43}	0.020 8

表 10 P_2 准则下光电防护战斗效能的性能指标权重表

Tab.10 Performance index weighting table for electro-optical protection combat effectiveness under P_2 criterion

指标	权重	指标	权重
C_{11}	0.082 6	C_{32}	0.045 0
C_{12}	0.020 9	C_{33}	0.198 5
C_{13}	0.002 3	C_{34}	0.008 4
C_{14}	0.006 4	C_{35}	0.025 7
C_{21}	0.147 8	C_{36}	0.041 7
C_{22}	0.121 5	C_{41}	0.091 8
C_{23}	0.071 6	C_{42}	0.011 6
C_{31}	0.101 8	C_{43}	0.022 4

通过表 9 和表 10 可知, 在 P_1 准则下, 权重排序在前 6 位的分别是干扰反应时间 C_{33} 、红外侦察告警距离 C_{21} 、激光散射截获半径 C_{22} 、大气能见度 C_{41} 、指挥员指挥决策能力 C_{11} 和干扰波段 C_{31} ; 在 P_2 准则下, 权重排序在前 6 位的分别是干扰反应时间 C_{33} 、红外侦察告警距离 C_{21} 、激光散射截获半

径 C_{22} 、干扰波段 C_{31} 、大气能见度 C_{41} 和指挥员指挥决策能力 C_{11} , 结果符合人们对光电防护效能的认识。将表 6 与表 9 ~ 10 中对应的权重做加权求和, 可得出在准则 P_1 和 P_2 下的光电防护效能:

$$E_{P_1} = \sum_{i=1}^{16} r_i \bar{W}_{ij}^{1\infty} = 0.746\ 5, E_{P_2} = \sum_{i=1}^{16} r_i \bar{W}_{ij}^{2\infty} = 0.750\ 7,$$

其中, r_i 是典型光电防护战斗指标值。通过对光电防护战斗的分析, 取 $a_1 = 0.58, a_2 = 0.42$, 则该

系统的光电防护战斗效能为 $E_p = \sum_{i=1}^2 a_i E_{P_i} \approx 0.748\ 3$ 。根据上级作战要求和作战对手光电进攻能力, 当 $E_p \in [0.9, 1]$ 表示光电防护战斗效能为优秀, 当 $E_p \in [0.7, 0.9]$ 表示光电防护战斗效能为良好, 当 $E_p \in [0.5, 0.7]$ 表示光电防护战斗效能为一般, 当 $E_p \in [0, 0.5]$ 表示光电防护战斗效能为差, 因此该光电防护战斗效能评估结果为良好。

5 结论

本文以多属性评估为目标, 以 AHP 在处理多指标相互关联时的不足为切入点, 引入 ANP, 建立光电防护战斗效能的评估模型, 有效地解决了指标之间相互影响的问题, 保持了比较完整的系统特性, 并通过实例进行了模型的可行性分析和有效性验证, 得出符合一般认识的结论。但其主要存在的问题还是在构建判断矩阵时, 未能完全脱离评判专家、个人经验等主观因素的影响, 得出的评估结果在客观性上仍有欠缺, 在今后的研究中还需进一步改善。

参考文献 (References)

[1] 高卫, 黄惠明, 李军. 光电干扰效果评估方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
GAO W, HUANG H M, LI J. Evaluation methods for electro-optical jamming effectiveness[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)

[2] 王博阳, 甘荣兵, 张京瑞. 电子对抗作战效能评估技术综述[J]. 电子信息对抗技术, 2017, 32(4): 54-60.
WANG B Y, GAN R B, ZHANG J R. Overview of electronic countermeasure operational effectiveness evaluation [J]. Electronic Warfare Technology, 2017, 32(4): 54-60. (in Chinese)

[3] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.
WANG L F, XU S B. Introduction to analytic hierarchy process[M]. Beijing: China Renmin University Press, 1990. (in Chinese)

[4] 贺纯纯, 王应明. 网络层次分析法研究述评[J]. 科技管理研究, 2014, 34(3): 204-208, 213.
HE C C, WANG Y M. A review of the analytic network process[J]. Science and Technology Management Research,

- 2014, 34(3): 204-208, 213. (in Chinese)
- [5] 郑剑云. 模糊 AHP 法及其在电子战系统效能评估中的应用[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(6): 70-74.
ZHENG J Y. The application of fuzzy AHP method in the efficiency evaluation of the electronic war system [J]. Ship Science and Technology, 2005, 27(6): 70-74. (in Chinese)
- [6] 周华任, 张晟, 穆松, 等. 综合评价方法及其军事应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
ZHOU H R, ZHANG S, MU S, et al. Comprehensive evaluation method and its military application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. (in Chinese)
- [7] 张杰, 唐宏, 苏凯, 等. 效能评估方法研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
ZHANG J, TANG H, SU K, et al. Research on effectiveness evaluation method [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [8] HUANG J J, CHEN C Y. Generalized analytic network process with path restriction by the distance matrix and transition functions [J/OL]. International Journal of Information Technology & Decision Making, 2023; 1-20 [2021-09-01]. <https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/S0219622023500177>.
- [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.
QIN Y L, ZHANG X L, GAO G Q, et al. Effectiveness evaluation of anti-ship missile combat system based on ANP-entropy method [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(5): 48-53. (in Chinese)
- [10] 蔡啸, 谷晓鹏, 周应芳, 等. 基于 ANP 的电子对抗作战能力评估方法研究[J]. 通信技术, 2013, 46(10): 45-49.
CAI X, GU X P, ZHOU Y F, et al. ECM operational capability assessment based on ANP [J]. Communications Technology, 2013, 46(10): 45-49. (in Chinese)
- [11] 李滨辉, 陈明珣, 钱建刚. 基于灰色 AHP 的海军要地防空预警效能评估[J]. 海军航空工程学院学报, 2011, 26(1): 101-104.
LI B H, CHEN M X, QIAN J G. Effectiveness evaluation of the naval point air defense early warning based on grey analytic hierarchy process [J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2011, 26(1): 101-104. (in Chinese)
- [12] 黄武超, 陈小银. 基于 ANP 的舰空导弹作战效能指标权重确定方法研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(1): 27-31.
HUANG W C, CHEN X Y. A method based on ANP to evaluate the combat effectiveness index weight of air defense missile [J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(1): 27-31. (in Chinese)
- [13] 段继琨. 基于网络层次分析法的舰艇反导作战效能评估[J]. 海军航空工程学院学报, 2016, 31(4): 489-494.
DUAN J K. Antimissile operational effectiveness evaluation of naval ships based on analysis network process [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2016, 31(4): 489-494. (in Chinese)
- [14] 杜兆阳, 李艳玲, 李海龙, 等. 基于 ANP 对装备网络体系中作战环节节点效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(1): 128-133, 138.
DU Z Y, LI Y L, LI H L, et al. Node effectiveness evaluation in equipment network system based on ANP [J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(1): 128-133, 138. (in Chinese)
- [15] 靳欣, 杨都, 张欢. ANP 理论与算法研究[J]. 商业时代, 2012(2): 30-31.
JIN X, YANG D, ZHANG H. Research on ANP theory and algorithms [J]. Commercial Times, 2012(2): 30-31. (in Chinese)
- [16] 施云聪, 程建, 钟慧. 基于 ANP 和群决策的指挥信息系统作战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(9): 112-119.
SHI Y C, CHENG J, ZHONG H. Operational effectiveness evaluation of command information system based on ANP and group decision making [J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(9): 112-119. (in Chinese)
- [17] 刘睿, 余建星, 孙宏才, 等. 基于 ANP 的超级决策软件介绍及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(8): 141-143.
LIU R, YU J X, SUN H C, et al. Introduction to the ANP super decisions software and its application [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2003, 23(8): 141-143. (in Chinese)
- [18] 胡琦, 严建钢, 陈琪, 等. 基于 ANP 和 Super Decision 的通信链路威胁评估排序[J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(2): 233-236.
HU Q, YAN J G, CHEN Q, et al. Threat evaluation of communication link based on ANP and super decision [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2009, 24(2): 233-236. (in Chinese)
- [19] 张小玲, 吴文雅, 黄婷. 基于网络层次分析法(ANP)的高职业院校顶岗实习绩效评价研究[J]. 职业教育, 2021, 20(6): 24-29.
ZHANG X L, WU W Y, HUANG T. Research on performance evaluation of internship in higher vocational colleges based on analytic hierarchy process (ANP) [J]. Vocational Education, 2021, 20(6): 24-29. (in Chinese)
- [20] 丁泽坚, 孙松涛, 何志文, 等. 基于区间直觉模糊数 ANP 的体系贡献率计算方法[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(11): 2386-2395.
DING Z J, SUN S T, HE Z W, et al. Contribution rate calculation method to system-of-systems based on interval-valued intuitionistic fuzzy number ANP [J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(11): 2386-2395. (in Chinese)
- [21] 李炳蔚, 刘宝平, 张侃, 等. 基于 ANP-物元可拓模型的舰艇编队防空体系作战能力评估[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(11): 123-127.
LI B W, LIU B P, ZHANG K, et al. Combat capability evaluation of naval fleet air defense system based on ANP and matter-element extension method [J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(11): 123-127. (in Chinese)