

doi: 10.7690/bgzdh.2024.05.012

基于组合赋权逼近理想解法的岸-海联合防空目标威胁评估

强裕功, 宋贵宝, 刘 铁, 曾 亮

(海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 为正确评估敌方来袭目标对岸海联合防空网络的整体威胁, 构建来袭目标威胁评估的指标及其隶属度表示, 基于群组 AHP 和改进熵权法给出指标的主客观组合权重。通过逼近理想解法给出来袭目标相对单防御平台和整个防御网络的威胁度。仿真结果表明, 所构建威胁评估体系具备有效性。

关键词: 防空武器; 岸海联合; 威胁评估

中图分类号: TJ394; E926.4 **文献标志码:** A

Threat Assessment of Targets in Coast-sea Joint Air Defense Based on Combined Weighting TOPSIS

Qiang Yugong, Song Guibao, Liu Tie, Zeng Liang

(College of Coast Guard, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to correctly assess the overall threat of enemy targets to the coast-sea joint air defense network, the index and its membership degree of threat assessment of incoming targets are constructed, and the subjective and objective combination weights of the index are given based on group AHP and improved entropy weight method. The threat degree of the target relative to the single defense platform and the whole defense network is given by the technique for order preference by similarity to ideal solution. The simulation results show that the threat assessment system is effective.

Keywords: air defense weapon; coast-sea joint; threat assessment

0 引言

控制技术、计算机技术等的发展使得现代空袭作战不断复杂化, 进攻方常采用多进袭方向、多进攻批次、全空域作战和饱和攻击的方式^[1]。空中目标威胁评估是在综合考虑敌我作战武器性能、作战态势等因素的影响下, 对来袭目标成功攻击防御目标的可能性和成功攻击时可能造成的毁伤程度进行评估^[2]。来袭目标威胁评估是防御方目标火力分配与目标分配的基础, 同时也是防御效能评估的重要条件。当前国内外学者对威胁评估的研究较多, 比较成熟的方法有多属性决策法、贝叶斯网络法、神经网络法和解析计算法等, 其中主要的威胁评估方法为多属性决策法, 其难点在于威胁评估指标的选取以及指标权重的确定。笔者选取目标类型、高度、速度、航路捷径、电子干扰能力作为空袭目标威胁评估指标, 采用群组 AHP 确定指标的主观权重、改进的熵权法确定指标的客观权重, 进而确定威胁评估指标的组合同权重, 在此基础上利用逼近理想解法对来袭目标进行威胁评估。

1 威胁评估指标体系构建

空战目标威胁评估是指在战场环境中, 根据实

际的战场要素、双方态势预测出敌方目标对防御方的威胁程度^[3]。根据防空作战特点, 将目标类型、高度、速度、航路捷径、电子干扰能力作为空袭目标威胁评估的指标。

1.1 目标类型

在舰艇支援岛礁防空的战场部署下, 可能的来袭目标主要有导弹、攻击机、战斗机、轰炸机及侦察机等。在目标速度、高度等因素相同的情况下, 通过分析各目标的特征, 对目标类型的威胁度量值如表 1 所示^[4]。

表 1 来袭目标分析及量化

目标类型	目标特征	威胁度
超低空、超音速对地导弹、反舰导弹	超低空、超音速飞行, 对岛礁、舰艇威胁大, 难以拦截	1.0
亚音速对地导弹、反舰导弹	杀伤能力相对较强、飞行速度相对较快	0.9
攻击机、战斗机、轰炸机	突防能力强或装备火力强, 主要的打击武器	0.7
预警机、侦察机、电子干扰机	无直接威胁, 主要执行信息支援任务	0.5

1.2 目标高度

现有防空武器、雷达均存在作用高度下限, 也即存在作用高度上的盲区, 利用这一点, 来袭目标

收稿日期: 2024-01-11; 修回日期: 2024-02-14

第一作者: 强裕功(1998—), 男, 山西人, 硕士。

多数采用低空、超低空的进攻样式以实现最大化突防概率。引入目标高度隶属函数如下^[5]：

$$\varphi(h) = \begin{cases} 1 & 0 \leq h \leq v \\ \exp(-k_h(h-v)^2) & v < h \end{cases} \quad (1)$$

式中 v 为防御武器的杀伤区下限，此处取 $v=0.02$ km, $k_h=2 \times 10^{-2}$ 。

1.3 目标距离

实际作战中，来袭目标距离越近，防御方可反应的时间越短、可进行拦截的次数越少，来袭目标的威胁度越大；若探测到的来袭目标距离较远，则可不考虑对防御方的威胁。结合上述分析，引入如下的距离隶属度函数^[6]：

$$\varphi(d) = \begin{cases} 1 & 0 \leq r \leq D_1 \\ \exp(-k_d(r-D_1)) & D_1 \leq r \leq D_2 \\ 0 & D_2 \leq r \end{cases} \quad (2)$$

式中： r 为敌我距离； D_1 、 D_2 为防御武器发射区的近界、远界； k_d 为距离计算系数，一般取 $k_d=10^{-2}$ 。

1.4 目标速度

来袭目标的速度影响防御武器杀伤区的大小、防御武器能够对其拦截的次数，进而影响成功拦截的概率。一般地，目标威胁与其速度为正相关关系，即速度越大其对舰艇及岛礁的威胁越大，反之则越小。将目标速度的隶属函数表示为^[6]：

$$\varphi(Ma) = 1 - \exp(-\alpha Ma) \quad (3)$$

式中 Ma 为来袭目标的马赫数， $\alpha=-1.02$ 。

1.5 航路捷径

航路捷径为被保卫目标与来袭目标航线水平投影的距离，目标航线在保卫目标右侧，航路捷径为正，反之为负。空中目标相对舰艇或岛礁的航路捷径越小，其威胁程度越大，即为负相关。来袭目标航路捷径对威胁度的影响与正态分布类似，故将其隶属函数表示为^[7]：

$$\varphi(p) = e^{-kp^2}, \quad -P \leq p \leq P \quad (4)$$

式中： $k=5 \times 10^{-3}$ ； $p \leq P$ ， P 为舰艇或岛礁防御武器对来袭目标的最大航路捷径。

1.6 电子干扰能力

来袭目标的电子干扰能力直接关系到其对防御体系的“软杀伤”能力，目标电子干扰能力越强，软杀伤能力越强、越难以拦截，威胁越大。将目标的电子干扰能力划分为6个等级^[2]：强、较强、

一般、较弱、弱、无，并对其进行量化，如表2所示。

表2 来袭目标电子干扰能力量化

级别	强	较强	一般	较弱	弱	无
隶属度	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0

2 威胁评估指标权重确定

2.1 基于群组 AHP 确定主权重

文献[8-9]通过基本 AHP 计算指标权重进而进行威胁评估，这种方法较为简单、易实现。由于防空作战的复杂性和不确定性，多传感器获取的目标信息存在差异，决策者构造判断矩阵时通常难以给出确定的值，文献[7]基于区间数理论改进了基本的 AHP，提出权重确定的区间层次分析法 (interval analytic hierarchy process, IAHP)，IAHP 考虑了参数的不确定性，但与基本 AHP 均考虑的是单个决策者的意见。笔者首先采用聚类分析法求得专家的个人权重，之后结合群组 AHP 法确定所考虑威胁评估指标的主权重。

2.1.1 构造判断矩阵

假设有 m 个来袭目标，所考虑的目标威胁影响因素有 n 个，各因素的量化值可通过上文计算所得。假设参与决策的专家有 k 个，第 l 个专家给出的指标判断矩阵为 $H^l = (h_{ij}^l)_{n \times n}$ ，所有判断矩阵均需进行一致性判断，若无法满足一致性，采用参考文献[10]给出的方法进行一致性修正。

2.1.2 确定专家个人权重

采用聚类分析的方法确定专家权重，其原理为^[11]：将每位专家的评判结果看作空间的向量，根据向量间的夹角大小判断专家决策的相似程度，夹角较小的向量代表的专家可归为一类。根据上述原理，专家权重的确定方法如下：

1) 初始时假设各专家的决策均不相同，各专家均为单独一类，即 $G_1 = \{E_1\}$, $G_2 = \{E_2\}$, ..., $G_k = \{E_k\}$ ，令 $q=k$ 。

2) 根据式(4)将各决策专家的判断矩阵进行归一化处理：

$$b^l = (b_i^l)_{n \times 1}, \quad b_i^l = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij}^l = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (h_{ij}^l / \sum_{i=1}^n h_{ij}^l) \quad (5)$$

3) 根据式(5)计算各类的相似程度：

$$d_{ij} = (b^i \cdot b^j) / (|b^i| \cdot |b^j|) \quad (6)$$

4) 选出夹角最小，即 d_{ij} 最大者 d_{xy} ，将对应的

类 G_x, G_y 合并为新类 $G_{q+1}=(G_x, G_y)$ 。

5) 若 $q=2(k-1)$, 则转 8), 否则转 6)。

6) 加入新类 $G_{q+1}=(G_x, G_y)$, G_{q+1} 与其他各类的相似程度为:

$$d_{i,q+1} = \max(d_{ix}, d_{iy}), i \neq x, y, i = 1, 2, \dots, k. \quad (7)$$

7) 在类的集合中删去 G_x, G_y , 同时删去 x, y 所对应的相似程度, 令 $q=q+1$, 转 4)。

8) 确定最终的类及类中元素个数。

9) 确定专家个人权重:

$$\eta^l = \phi_q^l / \sum_{l=1}^k \phi_q^l \quad (\phi_q^l \text{ 为专家 } l \text{ 所在类中的专家数})。$$

2.1.3 确定目标属性主观权重

将所求专家权重代入式(7):

$$\min f(w) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k \eta_l [\ln(h_{ij}^l) - \ln(w_j / w_i)]. \quad (8)$$

式中 $w' = (w'_1, w'_2, \dots, w'_n)$ 为各影响因素的主观权重,

满足 $\sum_{i=1}^n w'_i = 1$ 。

令 $\partial f(w) / \partial w'_j = 0$, 整理得:

$$w'_j = \left[\prod_{i=1}^n \prod_{l=1}^k (h_{ij}^l)^{\eta^l} \right]^{1/n} / \sum_{i=1}^n \left[\prod_{l=1}^k (h_{ij}^l)^{\eta^l} \right]^{1/n}. \quad (9)$$

2.2 基于改进熵权法确定客观权重

熵为信息论中对所获信息不确定性的表示方法, 反映了数据的冗杂程度。熵值大小与所获信息的不确定性表现为正相关关系, 指标的不确定性越大, 所对应的熵值越大、效用值越小, 反之亦然。根据熵的定义及特性, 可用熵值作为指标效用价值即指标权重的判断方法。

熵权法完全利用客观数据确定指标权重, 通过分析样本数据的特征信息求得各指标的权重^[12], 可信度较高, 其基本思想为: 指标的效用值越大, 其在问题评价中的影响越大, 指标权重越大。基本步骤如下:

1) 构造来袭目标属性矩阵 $R=(r_{ij})_{m \times n}$, r_{ij} 为来袭目标 i 的第 j 个属性值, 其值参照 1 章节确定。

2) 对属性矩阵进行规范化处理: 对于效益型指标, 令 $b_{ij} = r_{ij} / (\max_{1 \leq i \leq m} r_{ij})$; 对于成本型指标, 令

$b_{ij} = (\min_{1 \leq i \leq m} r_{ij}) / r_{ij}$, 记规范化后的矩阵为 $B=(b_{ij})_{m \times n}$ 。

3) 对 B 进行归一化处理, 归一化后的矩阵记为 $C=(c_{ij})_{m \times n}$, 其中:

$$c_{ij} = b_{ij} / \sum_{i=1}^m b_{ij}. \quad (10)$$

4) 将 c_{ij} 代入信息熵函数:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m c_{ij} \ln z_{ij}, \quad (j=1, 2, \dots, m), \quad k = 1 / \ln n. \quad (11)$$

5) 计算第 j 个指标效用价值:

$$g_j = 1 - e_j, \quad 1 \leq j \leq n. \quad (12)$$

6) 第 j 个指标的客观权重为:

$$\sigma_j = g_j / \sum_{j=1}^n g_j. \quad (13)$$

则指标的客观权重为 $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$ 。

需要指出的是, 威胁评估时选取的指标间不可避免会存在相互影响, 在进行主观权重确定时, 专家能够充分考虑到这一因素, 但熵权法通过独立分析各指标寻找内在的规律以确定指标权重, 并未考虑指标间的相互影响; 因此, 利用冲突系数对熵权法求出的客观权重进行修正。

设 x, y 均为目标属性矩阵的任一列数据, 则 x, y 所对应指标间的关联程度可用相关系数量化为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (14)$$

式中: r_{xy} 为 x, y 的相关系数; x_i, y_i 为 x, y 的样本值; \bar{x}, \bar{y} 为 x, y 的均值。

指标冲突性系数表示不同指标变化时所引起的信息变化差异^[13], 其计算公式为:

$$c_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

式中 r_{ij} 为第 i 个指标和第 j 个指标间的相关系数。

利用冲突性系数修正后的指标权重为:

$$w_j'' = \frac{\sigma_j \times c_j}{\sum_{j=1}^n \sigma_j \times c_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

式中 σ_j 和 w_j'' 分别为 r_{ij} 修正前后指标 j 的权重。 w_j'' 综合考虑了指标及其相互关系在评价体系中的影响, 所得客观权重更加合理, 修正后的指标客观权重为

$$w'' = (w_1'', w_2'', \dots, w_n'').$$

2.3 主客观权重组合

将 2.1 节求得的指标主观权重与 2.2 节求得的指标客观权重组合, 即有:

$$w = \alpha w' + (1 - \alpha)w'' \quad (17)$$

式中 α 为群组 AHP 所求主观权重 w' 的权重影响因子，可依据对专家的信赖程度、所获信息的完整性及准确性确定主客观权重影响因子。

3 基于组合赋权逼近理想解法的威胁评估

3.1 单防御平台威胁评估模型

逼近理想解法 (technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 为应用于有限方案多目标决策的常用算法，其基本思想为：根据归一化后的目标属性值矩阵寻找各方案中的最差方案 (也称为负理想解) 与最优方案 (也称为正理想解)，计算任一目标的属性值与负理想解、正理想解的欧氏距离对各目标的威胁值进行排序，属性值最远离负理想解的同时又最接近正理想解的目标即为威胁最大的目标^[14]。结合上文所求目标属性主客观组合权重，基于 TOPSIS 法的单防御平台威胁评估如下：

1) 构建目标属性矩阵。

针对单防御平台的来袭目标威胁评估，建立目标属性矩阵 $R=(r_{ij})_{m \times n}$ ，矩阵元素确定方法见 1 章节。

2) 对目标属性矩阵进行标准化处理得 $Y=(y_{ij})_{m \times n}$ ，满足：

$$y_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij})^2}} \quad i=1, 2, \dots, m; \quad j=1, 2, \dots, n \quad (18)$$

3) 计算加权标准化决策矩阵。

$$Z = (z_{ij})_{m \times n} = (w_j y_{ij})_{m \times n} \quad (19)$$

4) 找出正负理想解。

正理想解为威胁评估各指标中威胁最大的属性值组成的解，负理想解为威胁评估各指标中威胁最小的属性值组成的解。其具体的确定方法为：

正理想解：

$$Z^+ = \{(\max_{1 \leq i \leq m} z_{ij} | j \in J^+), (\min_{1 \leq i \leq m} z_{ij} | j \in J^-)\} = \{z_1^+, z_2^+, \dots, z_m^+\} \quad (20)$$

负理想解：

$$Z^- = \{(\min_{1 \leq i \leq m} z_{ij} | j \in J^+), (\max_{1 \leq i \leq m} z_{ij} | j \in J^-)\} = \{z_1^-, z_2^-, \dots, z_m^-\}$$

式中： J^+ 为效益型指标集合； J^- 为成本型指标集合。

5) 计算各目标属性值与正负理想解的欧氏距离。

目标属性值与正负理想解 Z^+ 、 Z^- 的距离 D_i^+ 、 D_i^- 分别为：

$$\left. \begin{aligned} D_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2} \\ D_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

6) 计算目标贴进度及威胁排序。

第 i 个目标的相对贴进度为：

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (21)$$

根据上式可得各目标的相对贴进度，相对贴进度越大的目标对防御平台的威胁越大，故可直接依据相对贴进度的值进行威胁排序并将相对贴进度作为各目标的威胁度。

3.2 岛礁岸海联合防空威胁评估

在舰艇支援岛礁防空的作战中，为完成掩护任务，需要多艘舰艇前出部署，支援舰艇与部署于岛礁的防空火力能够相互提供掩护，来袭目标的威胁评估需要在单防御平台威胁评估的基础上，考虑目标对整个防御网络的威胁。目标对整个防御网络的威胁为作战指挥的直接依据。

假设根据部署方案确定由 q 艘舰艇前出执行岛礁掩护任务，空中来袭目标数为 m ，令 $W = \{1, 2, \dots, q, q+1\}$ ， $M = \{1, 2, \dots, m\}$ ， W 中第 $q+1$ 个元素表示岛礁，设 W 中第 k 个元素的重要度即舰艇或岛礁的重要度为 $c(k)$ ，有 $\sum_{k=1}^{q+1} c(k) = 1$ 。按照 3.1 节的方法计算各目标的威胁值并表示为 $S = (s_{ij})_{(m, q+1)}$ ， s_{ij} 为目标 i 对第 j 个舰艇或者岛礁的威胁值。则目标 i 对整个防御网络的综合威胁度 F_i 为：

$$F_i = \sum_{j=1}^{q+1} c(j) s_{ij} \quad (22)$$

各目标对整个防御网络的综合威胁度为 $F = \{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ ， F_i 越大表示第 i 个目标的综合威胁值越大，决策者依据目标综合威胁值确定武器目标分配方案，对其实施火力打击、进行拦截。

结合上文所述，基于组合赋权逼近理想解法的岛礁岸海联合防空威胁评估流程如图 1 所示，图中“武器目标分配”并非笔者所述内容，但为实际作战的必要步骤，后续将开展研究。

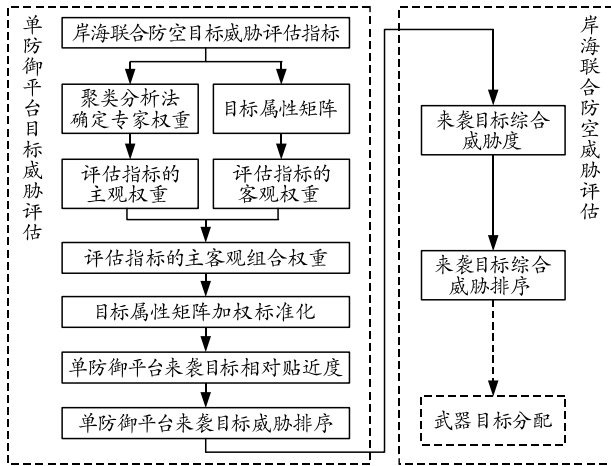


图 1 岛礁岸海联合防空威胁评估流程

4 仿真验证及分析

假设由 4 艘舰艇前出执行掩护岛礁防空任务，各防御平台的重要度分别为 $c = \{0.1, 0.15, 0.2, 0.2, 0.35\}$ ，其中第 5 项表示岛礁防御平台的重要度，来袭敌方目标为 6 批，记为 $M = \{\text{超低空反舰导弹、超音速对地导弹、亚音速反舰导弹、攻击机、轰炸机、预警机}\}$ 。针对不同防御平台，各目标的威胁度计算本质上相同，给出相对某一防御平台的各目标威胁度计算。假设防御方探测的目标属性信息如表 3 所示。

表 3 来袭目标属性值

目标类型	目标类型量化	目标 Ma 数	目标距离/km	高度/m	航路捷径	电子干扰能力
超低空反舰导弹	1.0	2.2	30	50	12	一般
超音速空地导弹	1.0	2.0	37	200	19	一般
亚音速反舰导弹	0.9	0.8	20	300	-17	一般
攻击机	0.7	0.9	25	1 800	-9	较强
攻击机	0.7	0.9	50	1 800	-9	较强
轰炸机	0.7	1.1	19	4 000	15	较弱
预警机	0.5	0.7	45	14 000	20	强

咨询 3 名专家确定指标主客观权重，其中 1 名专家给出的属性判断矩阵如表 4 所示。

表 4 专家判断矩阵

威胁度	目标类型	目标速度	目标距离	目标高度	航路捷径	电子干扰
目标类型	1	3	1	4	1	1
目标速度	1/3	1	2	1	2	1/2
目标距离	1	1/2	1	3	1	1/2
目标高度	1/4	1	1/3	1	1/2	1/5
航路捷径	1	1/2	1	2	1	1/2
电子干扰	1	2	2	5	2	1

根据专家判断矩阵运用群组 AHP 可得各威胁评价指标的主观权重为 $(0.2576, 0.1503, 0.1535, 0.0684, 0.1318, 0.2384)^T$ 。

根据目标属性信息，可得目标属性矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 1.0 & 0.8940 & 0.7788 & 1.0000 & 0.5461 & 0.6 \\ 1.0 & 0.8405 & 0.7261 & 0.9974 & 0.4296 & 0.6 \\ 0.9 & 0.5578 & 0.8607 & 0.9950 & 0.6065 & 0.6 \\ 0.7 & 0.6007 & 0.8187 & 0.9656 & 0.1979 & 0.8 \\ 0.7 & 0.6007 & 0.6376 & 0.9656 & 0.1979 & 0.8 \\ 0.7 & 0.6744 & 0.8694 & 0.9240 & 0.2357 & 0.4 \\ 0.5 & 0.5103 & 0.6703 & 0.7565 & 0.1353 & 1.0 \end{bmatrix}$$

依据 2.2 节改进熵权法可得指标客观权重为 $(0.0797, 0.0813, 0.0319, 0.0319, 0.4728, 0.3203)^T$ 。

根据对专家的信赖程度以及目标信息获取准确性的权衡，选取不同的权重影响因子并运用逼近理想解法对目标的威胁度进行排序，结果如表 5。

表 5 不同权重影响因子的来袭目标威胁评估

组合	主观权重影响因子 α	组合权重	相对贴近度	威胁排序
1	0	$(0.0797, 0.0813, 0.0319, 0.0139, 0.4728, 0.3203)^T$	$(0.7284, 0.5733, 0.7631, 0.2759, 0.2758, 0.1932, 0.3139)^T$	$M_3 > M_1 > M_2 > M_7 > M_4 > M_5 > M_6$
2	0.2	$(0.1153, 0.0951, 0.0562, 0.0248, 0.4046, 0.3040)^T$	$(0.7134, 0.5687, 0.7426, 0.2942, 0.2936, 0.1945, 0.3344)^T$	$M_3 > M_1 > M_2 > M_7 > M_4 > M_5 > M_6$
3	0.5	$(0.1686, 0.1158, 0.0927, 0.0412, 0.3023, 0.2794)^T$	$(0.6854, 0.5643, 0.7003, 0.3336, 0.3312, 0.2041, 0.3733)^T$	$M_3 > M_1 > M_2 > M_7 > M_4 > M_5 > M_6$
4	0.8	$(0.2220, 0.1365, 0.1292, 0.0575, 0.2000, 0.2548)^T$	$(0.6536, 0.5707, 0.6387, 0.3937, 0.3867, 0.2320, 0.4206)^T$	$M_1 > M_3 > M_2 > M_7 > M_4 > M_5 > M_6$
5	1.0	$(0.2576, 0.1503, 0.1535, 0.0684, 0.1318, 0.2384)^T$	$(0.6386, 0.5881, 0.5883, 0.4449, 0.4318, 0.2644, 0.4485)^T$	$M_1 > M_3 > M_2 > M_7 > M_4 > M_5 > M_6$

上表中组合 1 表示仅依据熵权法求出的客观权重进行威胁评估，组合 5 表示仅依靠群组 AHP 求出的主观权重进行威胁评估，组合 1 和 5 所得结果存

在差异，表明使用单一的指标评价方法难以保证结果的准确性和可靠性。实际作战时，若防御方信息获取较为准确、可信度高，应取较小的主观权重影

响因子；反之，取较大的主观权重影响因子。

现以主观权重影响因子 $\alpha=0.5$ 为例，假设各来

$$\begin{bmatrix} 0.6854 & 0.5643 & 0.7003 & 0.3336 & 0.3312 & 0.2041 & 0.3733 \\ 0.8087 & 0.3539 & 0.4853 & 0.2017 & 0.1999 & 0.1759 & 0.2627 \\ 0.7780 & 0.6146 & 0.8060 & 0.1913 & 0.1894 & 0.2577 & 0.2703 \\ 0.8553 & 0.5008 & 0.3678 & 0.1837 & 0.1822 & 0.0863 & 0.2024 \\ 0.6555 & 0.7790 & 0.4670 & 0.3633 & 0.3615 & 0.1218 & 0.2984 \end{bmatrix}。$$

根据式(21)可得各目标的综合威胁度为：

$$F=[0.7459, 0.6052, 0.5410, 0.2757, 0.2658, 0.2639, 0.1582]。$$

则来袭目标对整个岛礁岸海联合防空网络的威胁度排序为：

$$M_1 > M_2 > M_3 > M_7 > M_4 > M_5 > M_6。$$

5 结论

针对岛礁岸海联合防空中的威胁评估问题，笔者首先运用聚类分析法确定参与评价专家的个人权重，在此基础上确定评价专家对指标权重的主观意见；其次，运用改进的熵权法确定指标的客观权重，充分考虑指标间的相互影响；最后，将主客观权重综合得到指标的组合权重，基于逼近理想解法评估各目标相对单个防御平台和整个岛礁岸海联合防御网络的威胁度。所得结果综合考虑了决策者的主观偏好和目标客观指标值，更加准确、可信，能够为指挥员战场决策提供支持。

参考文献：

- [1] 王毅, 赵建军, 付龙文, 等. 基于区间数熵的 TOPSIS 防空作战威胁评估方法[J]. 兵器装备工程学报, 2011, 32(12): 114-116.
- [2] 马其东, 方立恭. 海上区域防空目标威胁评估模型[J]. 现代防御技术, 2009, 37(1): 15-19, 39.
- [3] 奚之飞, 徐安, 寇英信, 等. 基于灰主成分的空战目标威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1):

袭目标针对各防御平台的威胁评估结果即相对贴进度为：

- 147-155.
- [4] 孙春生, 齐新战, 鲁军. 水面舰艇编队防空目标威胁评估[J]. 系统仿真技术, 2016, 12(2): 130-133.
- [5] 陈维义, 王少蕾, 周菲. 基于加权核主成分 TOPSIS 方法的舰艇防空威胁评估[J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(1): 87-91.
- [6] 马原野. 武器-目标分配关键技术及仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [7] 杨璐, 刘付显, 张涛, 等. 基于组合赋权 TOPSIS 法的舰艇编队空中目标威胁评估模型[J]. 电光与控制, 2019, 26(8): 6-11.
- [8] 苏冠霞, 马华强, 李祥, 等. 基于层次分析法的陆基预警雷达固有威胁评估[J]. 电子信息对抗技术, 2021, 36(4): 87-91.
- [9] 汪伟, 顾竹鑫, 李海波. 基于层次分析法的低空慢速小目标威胁评估方法[J]. 信息化研究, 2019, 45(4): 20-24.
- [10] 王朗. 层次分析法中随机一致性指标的改进及应用[D]. 海口: 海南师范大学, 2017.
- [11] 袁磊. 基于 AHP 的群决策方法(GAHP)应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [12] 吴剑琳, 朱宁. 城市核心竞争力的模糊综合评价模型[J]. 统计与决策, 2006(10): 51-53.
- [13] 周琳琳. 模糊综合评判中属性权重确定方法及应用的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [14] 漆艳茹. 确定指标权重的方法及应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.