

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0543

# 基于博弈论的 GRA-TOPSIS 辐射源威胁评估方法

董鹏宇, 王红卫\*, 陈游

(空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

**摘 要:** 将辐射源威胁评估作为多属性决策问题进行处理时, 侦察方无法获取敌方辐射源的所有信息, 而逼近理想解排序(TOPSIS)法在处理“贫信息”问题时很难得到完美结果, 而且其仅仅考虑指标之间的欧氏距离, 无法反映各指标间的关联性。针对 TOPSIS 法存在的问题, 将灰色关联分析(GRA)和 TOPSIS 法结合, 提出一种基于博弈论的 GRA-TOPSIS 辐射源威胁评估模型。在构建辐射源目标综合评价指标体系的基础上, 运用博弈论(GT)思想将区间层次分析法(IAHP)所得主观权重和信息熵所得客观权重进行组合得到综合权重, 能够较大程度减少单独赋权带来的信息损失。在基于 GRA-TOPSIS 辐射源威胁评估模型下, 构建了关于战场态势的决策信息系统, 通过与传统 TOPSIS 法进行对比仿真, 验证了所提方法的有效性, 有助于对辐射源进行更精细准确地排序。

**关键词:** 逼近理想解排序(TOPSIS); 灰色关联分析(GRA); 博弈论(GT); 辐射源威胁评估; 区间层次分析法(IAHP); 信息熵; 综合权重

中图分类号: TN974

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2020)10-1973-09

辐射源威胁评估是现代电子战的关键一环, 准确有效的辐射源威胁评估不仅能大幅度提高自身安全系数, 并且影响着后续的干扰资源分配、作战决策等环节, 甚至影响到整个电子战系统的作战效能<sup>[1-2]</sup>。

辐射源威胁评估是根据接收到的敌方各类平台属性并结合作战意图, 估计敌方平台对我方是否构成威胁, 因此, 可将辐射源威胁评估作为多属性决策问题来进行研究。针对此问题, 学者们从不同角度出发, 构建不同的模型来解决威胁评估中的问题, 并取得了丰硕的研究成果。文献[3-4]运用云模型的思想解决了评估过程中的模糊不确定问题; 文献[5-6]将广义直觉模糊软集应用到多属性决策的问题中, 充分发挥直觉模糊软集处理多目标情形的优势; 文献[7]通过直觉模糊熵计算属性权重, 构建了改进的多准则妥协解排序

(Intuitionistic Fuzzy Entropy and Dynamic VIKOR, IFE-VIKOR) 的模型, 实现了动态威胁评估; 文献[8-9]引入智能算法提高了辐射源威胁评估模型的评估效率。以上文献虽然在一定程度上解决了辐射源威胁评估中的模糊性和不确定性问题, 并实现有效的辐射源威胁评估, 但以上模型的主观性强, 对专家系统依赖大, 不适用于辐射源威胁评估的所有情形。

逼近理想解排序(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)法作为一种处理多属性条件下多设计方案比较、排序和选择的有效方法, 能够综合考虑和处理多个相互制约的决策准则。文献[10-14]借鉴 TOPSIS 法在旅游、投资、地热资源评估等方面均取得了良好的效果。针对现在威胁评估中存在的问题。文献[15-16]引入 TOPSIS, 统一规范辐射源属性, 引

收稿日期: 2019-10-14; 录用日期: 2020-01-03; 网络出版时间: 2020-02-04 16:10

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200204.1603.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200204.1603.002.html)

\* 通信作者: E-mail: hww0818@163.com

引用格式: 董鹏宇, 王红卫, 陈游. 基于博弈论的 GRA-TOPSIS 辐射源威胁评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(10): 1973-1981. DONG P Y, WANG H W, CHEN Y. GRA-TOPSIS emitter threat assessment method based on game theory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(10): 1973-1981 (in Chinese).

入正、负理想解和贴近度的概念,有效实现了辐射源威胁评估。但是 TOPSIS 法并不是完美的,一方面当评价过程中指标数据有限时,便难以求得完美结果;另一方面 TOPSIS 法仅仅考虑指标之间的欧氏距离,不能直接反映评价指标序列的变化趋势。

针对上述 TOPSIS 法存在的问题,本文借鉴灰色关联分析(Grey Relational Analysis, GRA)<sup>[17-18]</sup>思想对传统 TOPSIS 法进行改进,提出 GRA 和 TOPSIS 法结合的辐射源威胁评估模型, GRA 是一种从系统角度分析“贫信息”的决策方法,正好克服了 TOPSIS 法决策时存在的问题。因此, GRA 和 TOPSIS 的联合评估模型不仅能考虑评估对象在多维空间中的实际距离,而且充分考虑了各指标间的关联度。

## 1 辐射源威胁评估评价体系

影响辐射源威胁评估的因素有很多,本文基于威胁的目的以及科学性、系统性和合理性的原则选取了 5 个子模型作为评估准则,各个子模型下有相应的评估指标,具体如图 1 所示。

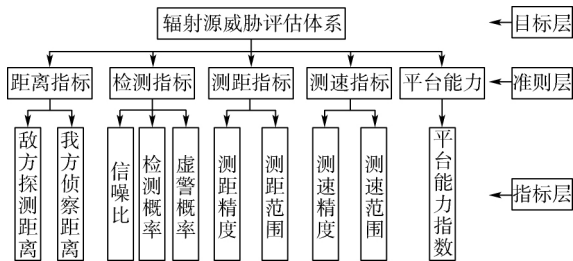


图1 辐射源威胁评估体系

Fig.1 Emitter threat assessment system

针对威胁评估模型中的威胁评估指标,接下来分别介绍每个指标的概念并确定其计算公式<sup>[19-20]</sup>。

### 1) 敌方探测距离

探测距离与雷达体制有关,回波信号功率的大小直接决定了雷达的探测距离。简单脉冲多普勒雷达探测距离为

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_{\text{av}}}{B} \cdot \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 F_n(S/N)_{\min} L} \right]^{1/4} \quad (1)$$

脉冲多普勒雷达平均探测距离为

$$\bar{R}_{\max} = \left[ \frac{P_t d D_a}{B_d(N_{\text{RG}} + 1)} \cdot \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 F_n(S/N)_{\min} L} \right]^{1/4} \quad (2)$$

式(1)、式(2)中各参数含义具体见文献[19]。

### 2) 我方侦察距离

我方侦察距离指的是机载雷达告警接收机/电子支援侦察系统(RWR/ESM)设备对敌方辐射源的告警距离为

$$R_r = \left[ \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{\min} L_e} \right]^{1/2} \quad (3)$$

### 3) 信噪比

对于不同重频信号,雷达采用不同的信号处理方式,因此得到的信噪比也不同。中、高重频下信噪比为

$$\text{SNR}_{\text{MH}} = N^2 \frac{P_r}{P_n} = \frac{N^2 P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 B} \quad (4)$$

低重频下信噪比为

$$\text{SNR}_L = \frac{P_r}{P_n} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 B} \quad (5)$$

### 4) 检测概率

单次检测概率为

$$P_d \approx 0.5 \text{erfc}(\sqrt{-\ln P_{fa}} - \sqrt{\text{SNR} + 0.5}) \quad (6)$$

### 5) 虚警概率

中、高重频下虚警概率为

$$P_{fa} = \frac{t_{\text{int}}}{t_{fa} N_{\text{RG}} N} \quad (7)$$

式中:  $t_{\text{int}}$  为信号积累时间;  $t_{fa}$  为雷达虚警时间。

低重频下虚警概率为

$$P_{fa} = \frac{1}{t_{fa} B} \quad (8)$$

### 6) 测距精度

脉冲延迟测距测量精度高,因此在脉冲雷达中广泛使用。脉冲延迟测距精度为

$$\Delta R = \frac{c \cdot \text{PW}}{2} \quad (9)$$

式中: PW 为脉冲宽度。

### 7) 测距范围

单重频和多重频下最大可测距离分别为

$$R_{\max} = \frac{c \cdot \text{PRI}}{2} \quad (10)$$

$$R_{\max} = R_{\max(i)} \prod_{i=2}^k \frac{R_{\max(i)}}{\Delta R_{\max(i)}} \quad (11)$$

式中: PRI 为脉冲重复周期。

### 8) 测速精度

测速精度由多普勒滤波器决定:

$$\Delta v = \frac{\lambda}{2} \Delta f = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\text{PRF}}{N} \quad (12)$$

式中: PRF 为脉冲重复频率。

### 9) 测速范围

测速范围可表示为

$$v_{\max} = \frac{\lambda}{2} \text{PRF} \quad (13)$$

### 10) 平台能力指数

平台能力指数计算公式为

$$C = \ln A_1 + \ln(\sum A_2) + \ln A_3 \quad (14)$$

式中:  $A_1$  为平台类型,主要有预警雷达、火控雷达等;  $A_2$  为平台运动参数,主要包含速度、高度、距离等;  $A_3$  表示抗干扰能力。

## 2 组合赋权法

确定评估指标权重是多属性决策中的关键步骤,可靠的评估结果与准确的指标权重密不可分。目前,国内外文献中提及的赋权方法主要分为3类:主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法<sup>[21-23]</sup>。主观赋权法依据的是主观的专家知识和工作经验进行赋权,比如层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP);客观赋权法依据的是客观数据本身蕴含的信息进行赋权,比如熵权法;组合赋权法是将主观知识和客观信息合理组合进行赋权。对于实际的评估问题,单一地运用主观赋权法或者客观赋权法,会因为忽略某一方面的信息造成赋权不准确,进而影响评估排序结果。组合赋权法综合了主、客观赋权优点,运用博弈论(Game Theory, GT)集化模型对指标进行组合赋权,能够较大地减少单独赋权带来的信息损失,所以采用组合赋权法确定评估指标权重。

### 2.1 区间 AHP 法

参考文献[22]画出区间 AHP 法求解主权重流程框图见图2,对应式(15)~式(20)。

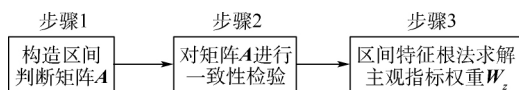


图2 区间 AHP 法确定权重

Fig.2 Interval AHP method to determine weight

#### 步骤1 构造区间判断矩阵A:

$$A = \begin{bmatrix} [1, 1] & [a_{12}^l, a_{12}^u] & \cdots & [a_{1n}^l, a_{1n}^u] \\ [a_{21}^l, a_{21}^u] & [1, 1] & \cdots & [a_{2n}^l, a_{2n}^u] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [a_{n1}^l, a_{n1}^u] & [a_{n2}^l, a_{n2}^u] & \cdots & [1, 1] \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $A = (a_{ij})_{n \times n} = [A^l, A^u]$ ,  $a_{ij} = [a_{ij}^l, a_{ij}^u]$ ,  $A^l = (a_{ij}^l)_{n \times n}$ ,  $A^u = (a_{ij}^u)_{n \times n}$ 。

步骤2 对区间判断矩阵进行一致性检验,计算公式为

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^u}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^u}} \quad (16)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^l}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^l}} \quad (17)$$

当  $\alpha \leq 1$  且  $\beta \geq 1$  时,认为区间判断矩阵具有

较好的一致性;当  $\alpha > 1$  或  $\beta < 1$  时,认为区间判断矩阵一致性较差,需要重新构造区间判断矩阵。

步骤3 采用区间特征根法求解主观指标权重  $W_s$ ,此时确定的主观指标权重  $W_s$  为

$$W_s = (w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n) \quad (18)$$

$$w_j = \sigma_j / \sum_{j=1}^n \sigma_j \quad (19)$$

$$\sigma_j = (\alpha x_j^l + \beta x_j^u) / 2 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

### 2.2 熵权法

本文利用信息熵的概念来衡量辐射源的威胁程度,步骤如下:

步骤1 根据规范化决策矩阵,计算第  $j$  个指标的信息熵为

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (\bar{y}_{ij} \ln \bar{y}_{ij}) \quad (21)$$

式中:  $\bar{y}_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij}$ , 并设定  $\bar{y}_{ij} = 0$  时  $E_j = 0$ 。

步骤2 计算各指标的熵权值  $w_j$ :

$$w_j = 1 - E_j / \left( n - \sum_{j=1}^n E_j \right) \quad (22)$$

步骤3 确定客观指标权重  $W_k$ :

$$W_k = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (23)$$

### 2.3 博弈论组合赋权

博弈论组合赋权的步骤如下:

步骤1 用  $L$  种不同赋权法对指标分别赋权,构造出基础权重向量集。

令  $u_k = \{u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kn}\}$  ( $k = 1, 2, \dots, L$ ), 记这  $L$  个不同向量的任意线性组合为

$$u = \sum_{k=1}^L \alpha_k u_k^T \quad \alpha_k > 0, \sum_{k=1}^L \alpha_k = 1 \quad (24)$$

式中:  $u$  为权重集中的一种可能权重向量;  $\alpha_k$  为线性组合系数。

步骤2 运用博弈论思想优化  $L$  个线性组合系数  $\alpha_k$ ,使得  $u$  与各个  $u_{kn}$  的离差最小,即

$$\min \left| \sum_{j=1}^L \alpha_j u_j^T - u_i \right|_2 \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (25)$$

式(25)的最优化一阶导数条件可转换为

$$\begin{bmatrix} u_1 \cdot u_1^T & u_1 \cdot u_2^T & \cdots & u_1 \cdot u_L^T \\ u_2 \cdot u_1^T & u_2 \cdot u_2^T & \cdots & u_2 \cdot u_L^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_L \cdot u_1^T & u_L \cdot u_2^T & \cdots & u_L \cdot u_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \cdot u_1^T \\ u_2 \cdot u_2^T \\ \vdots \\ u_L \cdot u_L^T \end{bmatrix} \quad (26)$$

步骤3 根据式(26)求得  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L)$  后进行归一化处理,即

$$\alpha_k^* = \frac{|\alpha_k|}{\sum_{k=1}^L |\alpha_k|} \quad (27)$$

最后得到最满意的综合权重向量为

$$\mathbf{u}^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* \mathbf{u}_k^T \quad (28)$$

### 3 威胁评估方法及处理流程

#### 3.1 逼近理想解决策法

TOPSIS 法作为解决多属性决策问题的一种常用方法,其具体步骤如下:

步骤 1 建立原始决策矩阵  $R$ :

$$R = \{ [x_{ij}^l, x_{ij}^u] \}_{m \times n} = \begin{bmatrix} [x_{11}^l, x_{11}^u] & [x_{12}^l, x_{12}^u] & \cdots & [x_{1n}^l, x_{1n}^u] \\ [x_{21}^l, x_{21}^u] & [x_{22}^l, x_{22}^u] & \cdots & [x_{2n}^l, x_{2n}^u] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ [x_{m1}^l, x_{m1}^u] & [x_{m2}^l, x_{m2}^u] & \cdots & [x_{mn}^l, x_{mn}^u] \end{bmatrix} \quad (29)$$

式中:  $x_{ij}^l$  和  $x_{ij}^u$  分别为属性值的最小值和最大值。

步骤 2 确定规范化决策矩阵  $\hat{R}$ , 并对其进行无量纲化处理。

步骤 3 确定加权规范化决策矩阵  $\tilde{R}$ , 得到加权规范化决策矩阵为

$$\tilde{R} = \{ [z_{ij}^l, z_{ij}^u] \} = w_j [y_{ij}^l, y_{ij}^u] \quad (30)$$

步骤 4 确定正理想解  $S^+$  与负理想解  $S^-$ :

$$S^+ = \{ s_j^{l+}, s_j^{u+} \} = \begin{cases} \max_{1 \leq i \leq m} [z_{ij}^l, z_{ij}^u] & j \in J^+ \\ \min_{1 \leq i \leq m} [z_{ij}^l, z_{ij}^u] & j \in J^- \end{cases} \quad (31)$$

$$S^- = \{ s_j^{l-}, s_j^{u-} \} = \begin{cases} \max_{1 \leq i \leq m} [z_{ij}^l, z_{ij}^u] & j \in J^- \\ \min_{1 \leq i \leq m} [z_{ij}^l, z_{ij}^u] & j \in J^+ \end{cases} \quad (32)$$

式中:  $J^+$  为效益型指标集;  $J^-$  为成本型指标集。

步骤 5 确定各评估对象到正、负理想解的欧氏距离  $d_i^+$ 、 $d_i^-$ :

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [(z_{ij}^l - s_j^{l+})^2 + (z_{ij}^u - s_j^{u+})^2]} \quad (33)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [(z_{ij}^l - s_j^{l-})^2 + (z_{ij}^u - s_j^{u-})^2]} \quad (34)$$

步骤 6 确定各评估对象的相对贴近度  $C_i$ :

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (35)$$

相对贴近度  $C_i$  值越大,说明评估对象离正理想解越近,离负理想解越远,性能越好。

#### 3.2 灰色关联分析

灰色系统理论提出了对各子系统进行灰色关联度分析的概念,意图透过一定的方法,去寻求系统中各子系统(或因素)之间的数值关系。因此,灰色关联度分析对于一个系统发展变化态势提供了量化的度量,非常适合动态历程分析。GRA 处理步骤如下所示:

步骤 1 ~ 步骤 4 和 TOPSIS 法是一样的。

步骤 5 确定出正理想解集  $\hat{r}_0^-$ 。选择矩阵

$\tilde{R}$  中各指标的最优值组成正理想解集,并将其作为 GRA 模型中的参考数列:

$$\hat{r}_0^+ = \max_{1 \leq i \leq m} \hat{r}_{ij}^* = (\hat{r}_0^+(1), \hat{r}_0^+(2), \cdots, \hat{r}_0^+(n)) \quad (36)$$

步骤 6 求各评估对象与正理想解集的灰色关联系数  $\bar{r}_{ij}^+$ :

$$\bar{r}_{ij}^+ = \frac{\min_n \min_m |\hat{r}_0^+(j) - \hat{r}_{ij}^*| + \eta \max_n \max_m |\hat{r}_0^+(j) - \hat{r}_{ij}^*|}{|\hat{r}_0^+(j) - \hat{r}_{ij}^*| + \eta \max_n \max_m |\hat{r}_0^+(j) - \hat{r}_{ij}^*|} = \left( \min_n \min_m \left| \frac{\hat{r}_0^+(j)^L + \hat{r}_0^+(j)^U}{2} - \frac{\hat{r}_{ij}^{*L} + \hat{r}_{ij}^{*U}}{2} \right| + \eta \max_n \max_m \left| \frac{\hat{r}_0^+(j)^L + \hat{r}_0^+(j)^U}{2} - \frac{\hat{r}_{ij}^{*L} + \hat{r}_{ij}^{*U}}{2} \right| \right) / \left( \left| \frac{\hat{r}_0^+(j)^L + \hat{r}_0^+(j)^U}{2} - \frac{\hat{r}_{ij}^{*L} + \hat{r}_{ij}^{*U}}{2} \right| + \eta \max_n \max_m \left| \frac{\hat{r}_0^+(j)^L + \hat{r}_0^+(j)^U}{2} - \frac{\hat{r}_{ij}^{*L} + \hat{r}_{ij}^{*U}}{2} \right| \right) \quad (37)$$

式中:  $\eta$  为分辨系数,本文取值 0.3。

则比较序列与参考序列的灰色关联度为

$$\gamma_i^+ = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \bar{r}_{ij}^+ \quad (38)$$

步骤 7 同理求出各评估对象与负理想解集的灰色关联度  $\gamma_i^-$ 。

步骤 8 计算基于灰色关联度的相对贴近度,并按照  $C_i^G$  计算结果进行排序,输出评估结果。

$$C_i^G = \frac{\gamma_i^-}{\gamma_i^+ + \gamma_i^-} \quad (39)$$

#### 3.3 基于博弈论的 GRA-TOPSIS 法

本文综合考虑 TOPSIS 法和 GRA 法,并借助博弈论的思想,构建基于博弈论的 GRA-TOPSIS 决策模型。采用基于博弈论的 GRA-TOPSIS 法进行辐射源威胁评估排序的步骤如下:

步骤 1 建立决策矩阵  $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

步骤 2 采用向量规范法求解规范化决策矩阵  $\hat{R} = (\hat{r}_{ij})_{m \times n}$ 。

步骤 3 运用博弈论求解加权规范化决策矩阵:

$$\tilde{R} = (\hat{r}_{ij}^*)_{m \times n} = (w_j \hat{r}_{ij})_{m \times n} \quad (40)$$

步骤 4 按照式(36)确定出正理想解集  $\hat{r}_0^+$ 。

步骤 5 求各指标与正理想解集的灰色关联系数  $\bar{r}_{ij}^+$ :

$$\bar{r}_{ij}^+ = \frac{\min_n \min_m |\hat{r}_0^+(j) - \hat{r}_{ij}^*| + \eta \max_n \max_m |\hat{r}_0^+(j) - \hat{r}_{ij}^*|}{|\hat{r}_0^+(j) - \hat{r}_{ij}^*| + \eta \max_n \max_m |\hat{r}_0^+(j) - \hat{r}_{ij}^*|} \quad (41)$$

式中:  $\eta$  为分辨系数,本文取值 0.3。

步骤6 确定正理想解  $S^+$  与负理想解  $S^-$ :

$$S^+ = \begin{cases} \{\max_{1 \leq i \leq m} \bar{r}_{ij}\} & j \in J^+ \\ \{\min_{1 \leq i \leq m} \bar{r}_{ij}\} & j \in J^- \end{cases} \quad (42)$$

$$S^- = \begin{cases} \{\min_{1 \leq i \leq m} \bar{r}_{ij}\} & j \in J^+ \\ \{\max_{1 \leq i \leq m} \bar{r}_{ij}\} & j \in J^- \end{cases} \quad (43)$$

式中:  $J^+$  和  $J^-$  分别为效益型指标集和成本型指标集。效益型指标属性值越大,目标函数值越大;成本型指标则正好相反。

步骤7 计算各评估对象与正、负理想解的欧氏距离  $D_i^+$  与  $D_i^-$ :

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\bar{r}_{ij}^+ - \bar{r}_{ij})^2} \quad (44)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\bar{r}_{ij} - \bar{r}_{ij}^-)^2} \quad (45)$$

步骤8 计算各评估指标的灰色相对贴近度  $C_i^*$  并按照  $C_i^*$  计算结果进行排序,输出评估结果。

$$C_i^* = \frac{C_i^-}{C_i^+ + C_i^-} \quad (46)$$

### 3.4 威胁评估处理流程

将机载电子对抗设备测得的辐射源信号进行分选识别并提取有用的参数构建目标属性矩阵,通过本文构建的基于博弈论的GRA-TOPSIS辐射源威胁评估模型进行威胁排序,具体处理过程为:通过博弈论方法对目标属性进行组合赋权并且与求得的规范化决策矩阵进行相乘,在此基础上通过新的GRA-TOPSIS法求取各评估对象的相对贴近度,此即为辐射源威胁程度的量化指标,对其进行排序,即为威胁源排序的结果。威胁评估处理流程如图3所示。

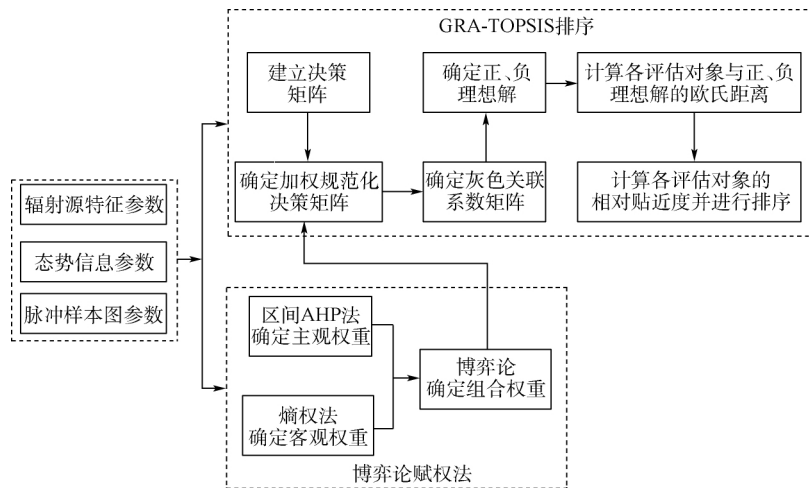


图3 威胁评估流程

Fig. 3 Flowchart of threat assessment

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真场景设置

参考文献[20],仿真场景设置如下:我方战机以300 m/s的速度执行任务,区域内存在5个敌方未知辐射源,记为  $X_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 。我机RWR/ESM设备参数为:天线增益  $G_r = 35$  dB;最小可检测信号  $P_{\min}$  处于  $[-60, -50]$  dBW之间;接收机损耗为6 dB;本机雷达散射面积(RCS)值

约为  $5 \text{ m}^2$ 。雷达告警接收机/电子支援侦察系统(RWR/ESM)设备侦收信号并进行记录存储,对卸载雷达数据经过特征提取、分选和识别后,得到了脉冲样本图参数和辐射源特征参数分别如表1和表2所示,表中:RF为射频,AOA为到达角,PA为脉冲幅度,  $T_e - T_s$  为积累时间,  $N$  为脉冲个数;通过机载自卫电子对抗设备和技侦情报获得的目标平台态势参数如表3所示,表中:  $A_1$  为平台类型,  $A_2$  为平台运动参数,主要包含速度、高度、距离等,  $A_3$  表示抗干扰能力。

表1 脉冲样本图参数

Table 1 Parameters of pulse sequence pattern

目标	RF/MHz	PRI/ $\mu\text{s}$	PW/ $\mu\text{s}$	AOA/( $^\circ$ )	PA/dB	$T_s/\mu\text{s}$	$T_e/\mu\text{s}$	$N$
$X_1$	9500	3	1.2	11	10	1.00	3072.00	1024
$X_2$	9800	11.4	0.29	2	12	1340.20	2799.40	128
$X_3$	9000	3.1	1.1	30	6	4510.00	6097.20	512
$X_4$	1500	100	1.1	15	11	4670.00	11070.00	64
$X_5$	10000	3	0.5	45	5	7910.00	9446.00	512

表2 辐射源特征参数

Table 2 Character parameters of emitter

目标	$P_t/\text{kW}$	$\frac{G}{G_t}/\text{dB}$	$F_n/\text{dB}$	$L/\text{dB}$	$(S/N)_{\min}/\text{dB}$	$t_{\text{fa}}/\text{s}$
$X_1$	12	40	4	6	[12 20]	[60 90]
$X_2$	12	40	4	6	[12 20]	[60 90]
$X_3$	13.5	45	3	4	[10 20]	[60 90]
$X_4$	50	48	2	7	[8 16]	[90 120]
$X_5$	15	50	3	6	[10 18]	[50 80]

表3中 $A_1$ 和 $A_3$ 采用定性指标描述方法。机载火控雷达 $l=3$ 机载预警雷达 $l=4$ 地面远程警戒雷达 $l=2$ 地面制导雷达 $l=6$ 抗干扰处理 $k=5$ 空域对抗 $k=2$ 综合对抗 $k=8$ 。

表3 目标平台态势参数

Table 3 Situation parameters of target platform

目标	$A_1(l)$	$A_2$			$A_3(k)$
		$R/\text{km}$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$h/\text{m}$	
$X_1$	3	80	285	6000	5
$X_2$	3	50	290	5500	5
$X_3$	4	120	250	7000	5
$X_4$	2	400	0	0	2
$X_5$	6	150	0	0	8

#### 4.2 威胁评估实验

在威胁评估模型的基础上,根据表1、表2和表3提供的参数,可得辐射源目标属性决策矩阵 $R=(r_{ij})_{5 \times 10}$ ,如表4所示。

表4 规范化决策矩阵

Table 4 Normalization decision matrix

目标	$R$	$R_t$	$R_{S/N}$	$P_d$	$P_{fa}/10^{-9}$	$\Delta R$	$R_{\max}$	$\Delta v$	$v_{\max}$	$C$
$X_1$	0.3036	0.0305	0.2785	0.3777	0.6683	0.5965	0.0069	0.2157	0.5690	0.4951
$X_2$	0.8712	0.1026	0.6823	0.4811	0.3342	0.2485	0.0069	0.4103	0.5405	0.3836
$X_3$	0.2236	0.0608	0.3523	0.4806	0.6115	0.5302	0.0070	0.4414	0.5812	0.5141
$X_4$	0.2760	0.9920	0.4837	0.4071	0.2042	0.5320	0.2285	0.6566	0.1081	0.3188
$X_5$	0.1452	0.0296	0.3143	0.4787	0.1614	0.1425	0.9735	0.3989	0.1859	0.4916

首先,依据本文2.1节区间AHP法确定主观权重的步骤,构造出区间判断矩阵为

$A =$

$$\begin{bmatrix} [1, 1] & [1/2, 1] & [1/3, 1] & [1/3, 1] & [1, 1] \\ [1, 2] & [1, 1] & [1/2, 2/3] & [1/2, 2/3] & [1, 2] \\ [1, 3] & [3/2, 2] & [1, 1] & [1, 1] & [1, 3] \\ [1, 3] & [3/2, 2] & [1, 1] & [1, 1] & [1, 3] \\ [1, 1] & [1/2, 1] & [1/3, 1] & [1/3, 1] & [1, 1] \end{bmatrix} \quad (47)$$

对准则层区间判断矩阵进行一致性检验,计算可得 $\alpha=0.8783 < 1$ , $\beta=1.1276 > 1$ ,因此具有良好的-致性,进一步可求得准则层权重向量 $W_{z-M}=[0.1441, 0.1744, 0.2687, 0.2687, 0.1441]$ 。

经检验,所有指标层区间判断矩阵满足一致性要求,获得相应权重为 $W_{z-M1}=[0.5, 0.5]$ , $W_{z-M2}=[0.2680, 0.3660, 0.3660]$ , $W_{z-M3}=[0.5, 0.5]$ , $W_{z-M4}=[0.5, 0.5]$ , $W_{z-M5}=[1]$ 。最终确定的主观指标权重为

$$W_z=[0.0713, 0.0713, 0.0829, 0.1179, 0.1179, 0.0862, 0.0862, 0.1328, 0.1328, 0.1008]$$

然后,依据本文2.2节熵权法确定客观权重的步骤,通过式(21)求得信息熵为 $E=[0.8652,$

$0.4395, 0.9645, 0.9145, 0.9969, 0.9322, 0.3622, 0.9653, 0.9024, 0.9903]$ ,进一步通过式(22)和式(23)最终确定的客观权重为

$$W_k=[0.0809, 0.3362, 0.0213, 0.0019, 0.0513, 0.0407, 0.3826, 0.0208, 0.0585, 0.0058]$$

最后,运用博弈论思想将区间AHP法所得主观权重与熵权法所得客观权重综合集成并对各指标进行组合赋权,结果如表5所示。进一步求得加权规范化决策矩阵和灰色关联系数矩阵分别如表6和表7所示。

表5 博弈论所赋各指标集化权重

Table 5 Combinational index weights obtained by using game theory

指标层	区间AHP法权重	熵权法权重	GT权重
$C_1$	0.0713	0.0809	0.0748
$C_2$	0.0713	0.3362	0.1685
$C_3$	0.0829	0.0212	0.0603
$C_4$	0.1179	0.0019	0.0754
$C_5$	0.1179	0.0513	0.0935
$C_6$	0.0862	0.0407	0.0695
$C_7$	0.0862	0.3826	0.1949
$C_8$	0.1328	0.0208	0.0917
$C_9$	0.1328	0.0585	0.1055
$C_{10}$	0.1008	0.0058	0.0660

表 6 加权规范化决策矩阵

Table 6 Weighted normalization decision matrix

目标	$R$	$R_r$	$R_{S,N}$	$P_d$	$P_{fa}/10^{-9}$	$\Delta R$	$R_{\max}$	$\Delta v$	$v_{\max}$	$C$
$X_1$	0.022 9	0.005 1	0.016 8	0.028 5	0.062 5	0.041 5	0.001 3	0.019 8	0.060 0	0.032 7
$X_2$	0.065 3	0.017 3	0.041 1	0.036 3	0.031 2	0.017 3	0.001 3	0.037 6	0.057 0	0.025 3
$X_3$	0.016 7	0.010 2	0.021 2	0.036 2	0.057 2	0.036 8	0.001 4	0.040 5	0.061 3	0.033 9
$X_4$	0.020 6	0.167 2	0.029 2	0.030 7	0.019 1	0.037 0	0.044 5	0.060 2	0.011 4	0.021 0
$X_5$	0.010 9	0.005 0	0.019 0	0.036 1	0.015 1	0.009 9	0.189 7	0.036 6	0.019 6	0.032 4

表 7 灰色关联系数矩阵

Table 7 Grey relational coefficient matrix

目标	$R$	$R_r$	$R_{S,N}$	$P_d$	$P_{fa}/10^{-9}$	$\Delta R$	$R_{\max}$	$\Delta v$	$v_{\max}$	$C$
$X_1$	0.571 9	0.998 2	0.699 3	0.979 2	1	0.641 4	1	1	0.537 7	0.979 2
$X_2$	0.996 4	0.821 2	1	0.877 3	0.630 6	0.884 2	1	0.760 4	0.553 4	0.867 9
$X_3$	0.529 1	0.915 7	0.739 5	0.882 8	0.915 7	0.677 5	0.998 2	0.731 9	0.531 1	1
$X_4$	0.558 9	0.258 5	0.826 1	0.929 2	0.579 5	0.675 9	0.566 7	0.583 1	1	0.814 1
$X_5$	0.509 6	1	0.718 9	0.892 6	0.543 8	1	0.230 7	0.770 8	0.873 3	0.974 1

根据本文改进的 GRA-TOPSIS 模型求得  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$  5 个辐射源目标的欧氏距离与灰色相对贴适度,并与传统 TOPSIS 法进行对比,结果如图 4 所示。

由图 4 可以得到,本文改进的 GRA-TOPSIS 模型得出的辐射源最终威胁排序为  $X_2 > X_1 > X_3 > X_5 > X_4$ ,传统 TOPSIS 法得到的辐射源最终威胁排序为  $X_2 > X_5 > X_1 > X_3 > X_4$ ,可以看到 2 种方法在进行辐射源威胁排序时出现了不同结果。根据原始数据进行分析,可以得到  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  的威胁程度要高于  $X_4$  和  $X_5$ ,进一步相比其他目标的态势信息,  $X_2$  离我机距离最近,速度最高,因此对我机威胁程度最大。同样可以分析出  $X_1$  威胁程度次之,  $X_3$  居中;对于  $X_4$  和  $X_5$  来说,  $X_5$  为制导雷达,且态势信息中距离更近,所以  $X_5$  对我方威胁程度要高于  $X_4$ 。

同时,为了验证不同赋权方法获得的权重对威胁排序的影响,采用不同权重确定加权规范化决策矩阵,然后进行威胁评估,结果如表 8 所示。

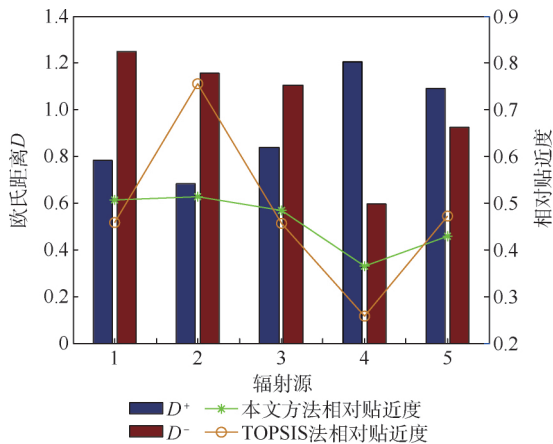


图 4 威胁评估结果

Fig. 4 Threat assessment results

表 8 不同赋权方法的威胁评估结果

Table 8 Threat assessment results of different weighting methods

目标	主观赋权法		客观赋权法		组合赋权法	
	相对贴适度	排序结果	相对贴适度	排序结果	相对贴适度	排序结果
$X_1$	0.353 2	3	0.365 2	2	0.614 8	2
$X_2$	0.681 4	1	0.930 5	1	0.628 7	1
$X_3$	0.331 5	4	0.304 0	3	0.568 0	3
$X_4$	0.317 5	5	0.133 5	5	0.331 3	5
$X_5$	0.365 4	2	0.267 7	4	0.458 8	4

由表 8 可知,权重的不同可以影响到排序结果,进一步分析,传统的 TOPSIS 法进行排序时过度依靠专家赋权,而权重的不同直接影响到排序结果,实验结果一方面可以说明本文所提模型的仿真结果更加贴近战场态势,验证了本文方法的正确性;另一方面也说明了博弈论组合赋权相比传统方法赋权具有更高的容错性,组合权重能够最大程度上保持正确性。

## 5 结 论

针对传统 TOPSIS 法在进行辐射源威胁排序时存在的缺点,使得评价结果与客观事实存在一定偏差的问题,本文借助博弈论和 GRA 对传统 TOPSIS 法进行改进,构建了关于战场态势的决策信息系统。主要完成了以下工作:

1) 本文针对 TOPSIS 法在处理“贫信息”问题时很难得到完美结果,而且其仅仅考虑指标之间的欧氏距离,无法反映各指标间的关联性的缺陷,将 GRA 和 TOPSIS 法结合,提出一种新的 GRA-TOPSIS 决策方法。

2) 将辐射源威胁评估作为多属性决策问题

进行处理时,侦察方无法获取敌方辐射源的所有信息,因而本文在构建辐射源目标综合评价指标体系的基础上,运用博弈论思想将区间 AHP 法所得主观权重和信息熵所得客观权重进行组合得到综合权重,较大程度减少了单独赋权带来的信息损失,提高了方法的适用性与准确性。

3) 在基于 GRA-TOPSIS 辐射源威胁评估模型下,构建了关于战场态势的决策信息系统,通过与传统 TOPSIS 法进行对比仿真,验证了所提方法的有效性,有助于对辐射源进行更精细准确地排序。另外,在确定指标权重方面,仿真结果验证了组合权重相比单一权重具有更高的容错性,采用组合权重的相对熵排序法进行威胁评估能够最大程度上规避不确定因素,取得最准确的评估结果。

4) 本文所提决策方法具有一定的普适性,对于其他领域的决策也具有相当程度的借鉴意义。

### 参考文献 (References)

- [1] 范翔宇,王红卫,索中英,等.基于粗糙集-信息熵的辐射源威胁评估方法[J].北京航空航天大学学报,2016,42(8):1755-1761.  
FAN X Y, WANG H W, SUO Z Y, et al. Radiator threat evaluation method based on rough set and information entropy [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(8): 1755-1761 (in Chinese).
- [2] 杨远志,王红卫,索中英,等.基于粗糙集-逼近理想解排序的辐射源威胁排序方法[J].兵工学报,2016,37(5):945-952.  
YANG Y Z, WANG H W, SUO Z Y, et al. An emitter threat evaluation method based on rough set and TOPSIS [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(5): 945-952 (in Chinese).
- [3] MA S D, ZHANG H Z, YANG G Q. Target threat level assessment based on cloud model under fuzzy and uncertain conditions in air combat simulation [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 67: 49-53.
- [4] 韩其松,余敏建,高阳阳,等.云模型和距离熵的 TOPSIS 法空战多目标威胁评估[J].火力与指挥控制,2019,44(4):136-141.  
HAN Q S, YU M J, GAO Y Y, et al. TOPSIS method based on cloud model and distance entropy in evaluating the air multi-target threat [J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(4): 136-141 (in Chinese).
- [5] AGARWAL M, BISWAS K K, HANMANDLU M. Generalized intuitionistic fuzzy soft sets with applications in decision making [J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(8): 3552-3566.
- [6] ZHANG Q, HU J H, FENG J F, et al. Air multi-target threat assessment method based on improved GGIFSS [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 36(5): 4127-4139.
- [7] ZHANG K, KONG W R, LIU P P, et al. Assessment and sequencing of target threat based on intuitionistic fuzzy entropy and dynamic VIKOR [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(2): 305-310.
- [8] 陈侠,刘子龙,梁红利.基于 GA-SLFRWNN 的空中目标威胁评估[J].西北工业大学学报,2019,37(2):424-432.  
CHEN X, LIU Z L, LIANG H L. Assessment of aerial target based on genetic algorithm optimizing fuzzy recurrent wavelet neural network [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(2): 424-432 (in Chinese).
- [9] 公洪飞,王宏健,王莹,等.基于遗传算法 DDBN 参数学习的 UAV 威胁评估[J].哈尔滨工程大学学报,2018,39(12):1972-1978.  
YAO H F, WANG H J, WANG Y, et al. Threat assessment of UAV based on genetic algorithm DDBN parameter learning [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(12): 1972-1978 (in Chinese).
- [10] ZENG S Z, XIAO Y. TOPSIS method for intuitionistic fuzzy multiple-criteria decision making and its application to investment selection [J]. Kybernetes, 2016, 45(2): 282-296.
- [11] GU T, REN P Y, JIN M Z, et al. Tourism destination competitiveness evaluation in Sichuan province using TOPSIS model based on information entropy weight [J]. Discrete and Continuous Dynamical Systems-Series S, 2019, 12(4-5): 771-782.
- [12] CAMBAZOGLU S, YAL G P, EKER A M, et al. Geothermal resource assessment of the Gediz Graben utilizing TOPSIS methodology [J]. Geothermics, 2019, 80: 92-102.
- [13] WU J, SUN J S, ZHA Y, et al. Ranking approach of cross-efficiency based on improved TOPSIS technique [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(4): 604-609.
- [14] KHALKHALI A. Best compromising crashworthiness design of automotive S-rail using TOPSIS and modified NSGA II [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(1): 121-133.
- [15] 杨远志,于雷,周中良,等.基于 RS-TOPSIS 的空中目标威胁评估[J].北京航空航天大学学报,2018,44(5):1001-1007.  
YANG Y Z, YU L, ZHOU Z L, et al. Air target threat evaluation based on RS-TOPSIS [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(5): 1001-1007 (in Chinese).
- [16] 张浩,谢军伟,葛佳昂,等.改进 TOPSIS 的多时刻融合直觉模糊威胁评估[J].控制与决策,2019,34(4):811-815.  
ZHANG H W, XIE J W, GE J A, et al. Intuitionistic fuzzy set threat assessment based on improved TOPSIS and multiple times fusion [J]. Control and Decision, 2019, 34(4): 811-815 (in Chinese).
- [17] DENG J L. Introduction to grey system [J]. The Journal of Grey System, 1989, 1(1): 1-24.
- [18] ZHANG M, LI G X. Combining TOPSIS and GRA for supplier selection problem with interval numbers [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(5): 1116-1128.
- [19] 康长青,郭立红,罗艳春,等.基于模糊贝叶斯网络的态势威胁评估模型[J].光电工程,2008,35(5):1-5.  
KANG C Q, GUO L H, LUO Y C, et al. Model of situation and threat assessment based on fuzzy Bayesian network [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(5): 1-5 (in Chinese).
- [20] 王睿甲,王星,程嗣怡,等.基于脉冲样本图的机载 RWR/ESM 辐射源威胁评估[J].电光与控制,2015,22(5):19-24.



- WANG R J ,WANG X ,CHENG S Y ,et al. Airborne RWR/ESM threat assessment of radiation source based on pulse sequence pattern [J]. Electronics Optics & Control ,2008 ,22 ( 5 ) : 19-24( in Chinese ) .
- [21] KAHRAMAN C ,ERTAY T. A fuzzy optimization model for QFD planning process using analytic network approach [J]. European Journal of Operational Research 2006 ,171( 2 ) : 390-411.
- [22] LUO Z ZHOU J ZHANG L ,et al. A TFN-ANP based approach to evaluate virtual research center comprehensive performance [J]. Expert Systems with Applications ,2010 ,37( 12 ) : 8379-8386.
- [23] 张莹 ,王红卫 ,陈游. 基于 ICW-RCM 的辐射源组合威胁评估 [J]. 系统工程与电子技术 2018 ,40( 3 ) : 557-562.
- ZHANG Y ,WANG H W ,CHEN Y. Combined emitter threat assessment based on ICW-RCM [J]. Systems Engineering and Electronics 2018 ,40( 3 ) : 557-562( in Chinese ) .
- 作者简介:  
董鹏宇 男,硕士研究生。主要研究方向: 信息对抗理论与技术。  
王红卫 男,博士,副教授。主要研究方向: 电子对抗理论与技术、电子信息工程。

## GRA-TOPSIS emitter threat assessment method based on game theory

DONG Pengyu , WANG Hongwei\* , CHEN You

( Aeronautics Engineering College , Air Force Engineering University , Xi' an 710038 , China)

**Abstract:** When the radiation source threat assessment is handled as a multi-attribute decision problem , the scouting party cannot obtain all the information of the enemy radiation source , the method of Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution ( TOPSIS) is hard to get perfect results in dealing with “poor information” , and it only considers the Euclidean distance between the indicators and cannot reflect the correlation between different indicators. Aimed at the problems of TOPSIS method , a radiation source threat assessment model based on game theory is proposed by combining Grey Relational Analysis ( GRA) and TOPSIS method. On the basis of constructing the comprehensive evaluation index system of radiation source targets , Game Theory ( GT) idea is used to combine the subjective weights of Interval Analytic Hierarchy Process ( IAHP) and the objective weights obtained by information entropy to obtain comprehensive weights , which can greatly reduce the information loss caused by the weight alone. Based on the GRA-TOPSIS radiation source threat assessment model , a decision information system for battlefield situation is constructed. By comparing with the traditional TOPSIS method , the effectiveness of the proposed method is verified , which is helpful for sorting radiation sources more precisely and accurately.

**Keywords:** Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution ( TOPSIS) ; Grey Relational Analysis ( GRA) ; Game Theory ( GT) ; emitter threat evaluation; Interval Analytic Hierarchy Process ( IAHP) ; information entropy; comprehensive weights

Received: 2019-10-14; Accepted: 2020-01-03; Published online: 2020-02-04 16:10

URL: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200204.1603.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200204.1603.002.html)

\* Corresponding author. E-mail: [hww0818@163.com](mailto:hww0818@163.com)