doi: 10.7690/bgzdh.2020.12.009

基于区间对偶犹豫模糊熵的反辐射无人机目标威胁评估

杨宗华，韩　磊
（中国人民解放军 69250 部队，乌鲁木齐 830009）

摘要：针对属性权重未知且评价信息以区间对偶犹豫模糊数形式给出的反辐射无人机目标威胁评估问题，研究一种基于区间对偶犹豫模糊熵的 TOPSIS 决策方法。给出区间对偶犹豫模糊熵的公理化定义，构造区间对偶犹豫模糊熵公式求解属性权重，进一步利用 TOPSIS 法对方案进行威胁评估，并通过实例进行验证。结果表明：该方法能增加权重的科学性，提高评估的准确性，进一步丰富模糊多属性决策理论。

关键词：反辐射无人机；威胁评估；区间对偶犹豫模糊熵；TOPSIS
中图分类号：TP301.6　　**文献标志码**：A

Objective Threat Assessment of Anti-radiation UAV Based on Interval-valued Dual Hesitant Fuzzy Entropy

Yang Zonghua, Han Lei
(*No*. 69250 *Unit of PLA*, *Urumqi* 830009, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of anti-radiation UAV target threat assessment with unknown attribute weights and evaluation information in the form of interval dual hesitation fuzzy numbers, a TOPSIS decision method based on the interval dual hesitation fuzzy entropy is studied. The axiomatized definition of interval dual hesitation fuzzy entropy is given, the interval dual hesitation fuzzy entropy formula is used to solve the attribute weights, and the TOPSIS method is used to carry out the threat assessment of the scheme and verified by examples. The results show that this method can increase the scientificity of weights, improve the accuracy of evaluation, and further enrich the fuzzy multi-attribute decision-making theory.

Keywords: anti-radiation UAV; threat assessment; interval dual hesitant fuzzy entropy; TOPSIS

0　引言

目标威胁评估问题[1-2]是指通过分析目标对己方的威胁程度，判定目标威胁等级，是辅助指挥员进行目标选择和打击的重要依据。由于实际过程中威胁因素的模糊性和不确定性，作战环境下的属性值很难使用精确数值进行描述；因此，研究基于模糊集的反辐射无人机作战目标威胁评估具有十分重要的意义。

区间对偶犹豫模糊集[3]既考虑了决策者经常会在多个决策信息之间犹豫的情况，又包含隶属度、非隶属度及犹豫度的信息，能够更好地反映出信息的不确定性。传统的威胁评估问题确定[4]指标权重时多采用主观赋权法，人为因素影响较大，结果容易失真。熵理论被广泛应用于不同领域，取得了很好效果，然而有关区间对偶犹豫模糊熵的研究还十分缺乏。鉴于此，笔者研究属性值为区间对偶犹豫模糊数的反辐射无人机作战目标威胁评估问题。

1　区间对偶犹豫模糊集

鞠彦斌等[3]给出了区间对偶犹豫模糊集定义。

定义 1[3]　令 X 为一给定的论域，则称

$$\tilde{A}=\left\{\left\langle x,\tilde{h}(x),\tilde{g}(x)\right\rangle \middle| x\in X\right\} \tag{1}$$

为定义在 X 上的区间对偶犹豫模糊集(IVDHFS)。其中，$\tilde{h}(x):x\to D[0,1]$ 和 $\tilde{g}(x):x\to D[0,1]$ 分别表示隶属度和非隶属度构成的集合，并满足条件：对于 $\forall x\in X$，都有 $0\leqslant \sup(\tilde{h}(x))+\sup\left(\tilde{g}(x)\right)\leqslant 1$，$\tilde{h}(x)$ 和 $\tilde{g}(x)$ 均为若干个闭区间组成集合。

为研究区间对偶犹豫模糊熵的概念，在文献[5]对偶犹豫模糊熵研究的基础上，引入区间对偶犹豫模糊集的隶属度、非隶属度及犹豫度指标如下：

$$\phi_{\mathrm{A}}^{+}(x_i)=(1/l_1)\sum\nolimits_{i=1}^{l_1}\gamma_i^{+},$$
$$\phi_{\mathrm{A}}^{-}(x_i)=(1/l_1)\sum\nolimits_{i=1}^{l_1}\gamma_i^{-}; \tag{2}$$

$$\theta_{\mathrm{A}}^{+}(x_i)=\left(1/l_2\right)\sum\nolimits_{i=1}^{l_2}\rho_i^{+},\quad \theta_{\mathrm{A}}^{-}(x_i)=\left(1/l_2\right)\sum\nolimits_{i=1}^{l_2}\rho_i^{-}; \tag{3}$$

收稿日期：2020-07-26；**修回日期**：2020-09-29
作者简介：杨宗华(1993—)，男，湖北人，硕士，从事预测与决策分析、效能评估研究。E-mail: ZongHua_Yang@163.com。

$$\pi_{\mathrm{A}}^{-}(x_i)=1-\phi_{\mathrm{A}}^{+}-\theta_{\mathrm{A}}^{+}(x_i)= \\ 1-(1/l_1)\sum_{i=1}^{l_1}\gamma_i^{+}-(1/l_2)\sum_{i=1}^{l_2}\rho_i^{+}; \tag{4}$$

$$\pi_{\mathrm{A}}^{+}(x_i)=1-\phi_{\mathrm{A}}^{-}(x_i)-\theta_{\mathrm{A}}^{-}(x_i)= \\ 1-(1/l_1)\sum_{i=1}^{l_1}\gamma_i^{-}-(1/l_2)\sum_{i=1}^{l_2}\rho_i^{-}。 \tag{5}$$

其中：γ+和 γ−分别表示隶属度集的上下界；ρ+和 ρ−分别表示非隶属度集的上下界。

2　区间对偶犹豫模糊的熵公式

结合文献[6]给出的区间直觉模糊集熵的公理化定义，给出区间对偶犹豫模糊集熵的公理化定义。

定义 2　称映射 E:IVDHFS(X)→[0,1]为区间对偶犹豫模糊熵，如果 E 满足以下条件：对于任意的 $A,B\in \mathrm{IVDHFS}(X)$，有

1) $E(A)=0$ 当且仅当 $A=\{\{[0,0]\},\{[1,1]\}\}$或者 $A=\{\{[1,1]\},\{[0,0]\}\}$；

2) $E(A)=1$ 当且仅当 $\left[\phi_{\mathrm{A}}^{-}(x_i),\phi_{\mathrm{A}}^{+}(x_i)\right]=\left[\theta_{\mathrm{A}}^{-}(x_i),\theta_{\mathrm{A}}^{+}(x_i)\right]$；

3) $E(A)=E(A^c)$；

4) $E(A)\leqslant E(B)$对任意的 $x_i\in X$。

当 $\phi_{\mathrm{B}}^{-}(x_i)\leqslant\theta_{\mathrm{B}}^{-}(x_i)$，$\phi_{\mathrm{B}}^{+}(x_i)\leqslant\theta_{\mathrm{B}}^{+}(x_i)$时，有 $\phi_{\mathrm{A}}^{-}(x_i)\leqslant\phi_{\mathrm{B}}^{-}(x_i)$，$\phi_{\mathrm{A}}^{+}(x_i)\leqslant\phi_{\mathrm{B}}^{+}(x_i)$，$\theta_{\mathrm{A}}^{-}(x_i)\leqslant\theta_{\mathrm{B}}^{-}(x_i)$，$\theta_{\mathrm{A}}^{+}(x_i)\leqslant\theta_{\mathrm{B}}^{+}(x_i)$。

当 $\phi_{\mathrm{B}}^{-}(x_i)\geqslant\theta_{\mathrm{B}}^{-}(x_i)$，$\phi_{\mathrm{B}}^{+}(x_i)\geqslant\theta_{\mathrm{B}}^{+}(x_i)$时，有 $\phi_{\mathrm{A}}^{-}(x_i)\geqslant\phi_{\mathrm{B}}^{-}(x_i)$，$\phi_{\mathrm{A}}^{+}(x_i)\geqslant\phi_{\mathrm{B}}^{+}(x_i)$，$\theta_{\mathrm{A}}^{-}(x_i)\leqslant\theta_{\mathrm{B}}^{-}(x_i)$，$\theta_{\mathrm{A}}^{+}(x_i)\leqslant\theta_{\mathrm{B}}^{+}(x_i)$。

对于任意的区间对偶犹豫模糊集 $A=\left\{\left\langle x_i,\tilde{d}_{\mathrm{A}}(x_i)\right\rangle\middle| x_i\in X\right\}$，构造如下形式的区间对偶犹豫模糊集熵的公式：

$$E(A)= \\ \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\cos\frac{\left|\phi_{\mathrm{A}}^{-}(x_i)-\theta_{\mathrm{A}}^{-}(x_i)\right|+\left|\phi_{\mathrm{A}}^{+}(x_i)-\theta_{\mathrm{A}}^{+}(x_i)\right|}{2\left(2+\pi_{\mathrm{A}}^{-}(x_i)+\pi_{\mathrm{A}}^{+}(x_i)\right)}\pi。 \tag{6}$$

3　基于区间对偶犹豫模糊熵的 TOPSIS 方法

对于一个多属性决策问题，设有 m 个方案 $B=\{b_1,b_2,\cdots,b_m\}$，n 个属性 $C=\{c_1,c_2,\cdots,c_n\}$，属性权重未知。方案 b_i 在属性 c_j 的值采用区间对偶犹豫模糊数的形式表示，$\tilde{d}_{ij}=\left\langle h(\tilde{d}_{ij}),g(\tilde{d}_{ij})\right\rangle$，构成的决策矩阵记为 $D=\left\{\tilde{d}_{ij}\right\}_{m\times n}$。对于上述问题，笔者提出一种基于区间对偶犹豫模糊熵的 TOPSIS 方法，步骤如下：

1) 规范化决策信息，对于多属性决策问题，常见的属性类型有效益型和成本型 2 种。效益型属性，无须变动；成本型属性，需要转化，得 $\bar{\tilde{d}}_{ij}=\left\langle \bar{h}(\tilde{d}_{ij}),\bar{g}(\tilde{d}_{ij})\right\rangle$。其中，$\bar{h}(\tilde{d}_{ij})=\bigcup_{\gamma_{ij}\in h_{ij}}\{1-\gamma_{ij}\}$，$\bar{g}(\tilde{d}_{ij})=\bigcup_{\rho_{ij}\in g_{ij}}\{1-\rho_{ij}\}$。

2) 根据区间对偶犹豫模糊熵确定属性权重 $\omega=(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n)^{\mathrm{T}}$，

$$\omega_j=\frac{1-E_j}{n-\sum_{j=1}^{n}E_j}。 \tag{7}$$

3) 确定正理想方案 B^+和负理想方案 B^-：

$$B^+=\left\{\tilde{d}_1^{\,+},\tilde{d}_2^{\,+},\cdots,\tilde{d}_n^{\,+}\right\}; \tag{8}$$

$$B^-=\left\{\tilde{d}_1^{\,-},\tilde{d}_2^{\,-},\cdots,\tilde{d}_n^{\,-}\right\}。 \tag{9}$$

其中：

$$\tilde{d}_j^{\,+}=\bigcup_{i=1}^{m}\left\langle\bigcup\left\{\left[\max\gamma_{ij}^{-},\max\gamma_{ij}^{+}\right],\left[\min\rho_{ij}^{-},\min\rho_{ij}^{+}\right]\right\}\right\rangle; \tag{10}$$

$$\tilde{d}_j^{\,-}=\bigcup_{i=1}^{m}\left\langle\bigcup\left\{\left[\min\gamma_{ij}^{-},\min\gamma_{ij}^{+}\right],\left[\max\rho_{ij}^{-},\max\rho_{ij}^{+}\right]\right\}\right\rangle。 \tag{11}$$

4) 利用权重向量计算各方案与正、负理想方案的加权 Hamming 距离 D_i^+和 D_i^-。

5) 根据求得的距离计算各方案与正理想方案的相对贴近度 C_i，按照 C_i 的值对方案进行排序，C_i 值越小，方案越优[7]。

4　实例验证

假设在某次反辐射无人机作战行动前，通过多种侦察手段获取敌方地面防空雷达网情报[8]，选取了 3 个属性进行评估：c_1 为雷达技术性能威胁；c_2 为跟踪定位威胁；c_3 为探测威胁。经过分析处理后得到 3 个雷达目标的战技术参数指标，属性值以区间对偶犹豫模糊数的形式给出，属性权重未知，评价信息以矩阵形式给出：

$$\begin{bmatrix}
\{\langle[0.3,0.6],[0.4,0.7]\rangle,\langle[0.1,0.2],[0.1,0.3]\rangle\} & \{\langle[0.3,0.5],[0.4,0.6]\rangle,\langle[0.1,0.2],[0.2,0.3]\rangle\} & \{\langle[0.2,0.6],[0.5,0.6]\rangle,\langle[0.1,0.3],[0.2,0.3]\rangle\} \\
\{\langle[0.3,0.6],[0.5,0.6]\rangle,\langle[0.1,0.2],[0.2,0.3]\rangle\} & \{\langle[0.2,0.5],[0.3,0.5]\rangle,\langle[0.2,0.3],[0.3,0.4]\rangle\} & \{\langle[0.3,0.6],[0.5,0.6]\rangle,\langle[0.1,0.2],[0.1,0.3]\rangle\} \\
\{\langle[0.4,0.6],[0.5,0.6]\rangle,\langle[0.1,0.3],[0.2,0.3]\rangle\} & \{\langle[0.3,0.6],[0.4,0.6]\rangle,\langle[0.1,0.3],[0.2,0.4]\rangle\} & \{\langle[0.2,0.4],[0.3,0.6]\rangle,\langle[0.1,0.2],[0.2,0.3]\rangle\}
\end{bmatrix}。$$

1) 由于 3 个属性都是效益型，无需进行处理。

2) 根据式(6)计算区间对偶犹豫模糊熵，有：

E_1=0.930 5，E_2=0.969 6，E_3=0.954 3。

（下转第 61 页）