

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0110

基于改进直觉模糊熵与 Dice 测度的 VIKOR 应急决策

谢加良^{1,2}, 陈云超¹, 林 玲^{1,2*}

(1.集美大学 理学院, 福建 厦门 361021; 2.集美大学 数字福建大数据建模与智能计算研究所, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对不确定信息环境下决策属性权重未知的应急决策问题, 提出一种改进直觉模糊熵权与 Dice 距离测度的 VIKOR 决策模型. 首先, 分析现有直觉模糊熵存在的不足, 提出一种考虑隶属度、非隶属度以及犹豫度综合影响的改进直觉模糊熵; 其次, 引入 Dice 系数, 结合犹豫度的特点构建直觉模糊 Dice 距离测度; 然后, 将直觉模糊熵权与直觉模糊 Dice 距离测度运用到基于直觉模糊的 VIKOR 方法中, 并定义了群体贴近度公式, 进而构建契合现实环境的应急决策模型; 最后通过地震灾害后的应急决策算例, 验证了该模型的合理性和有效性.

关键词: 应急决策; 直觉模糊熵权; Dice 系数; VIKOR 方法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 05-0083-08

突发事件的应急决策通常涉及到人民群众生命财产安全重大风险问题, 其决策环境具有信息不确定、模糊性, 且决策属性权重难以确定等特点, 构建科学合理的决策模型对应急决策至关重要. 现有应急决策方法众多, 主要有基于前景理论^[1]、DEA^[2]、TOPSIS^[3]、TODIM^[4]、VIKOR^[5]等一些经典多属性决策方法. 由于决策环境的模糊不确定性, 学者们引入模糊集相关理论刻画决策属性和权重信息^[6-8]. 其中, Atanassov^[9]的直觉模糊集从隶属度、非隶属度和犹豫度综合考虑决策信息的模糊性, 更契合应急决策过程所面临的现实情境, 已在多属性决策问题中得到广泛应用^[10]. 决策属性权重值确定和距离测度的计算方法直接关系到应急决策结果的质量, 学界也提出了不同的属性权重确定方案. 如梁薇等^[11]提出基于可信度的专家权重调整方法和属性权重确定方法; 鄢书良等^[12]利用未知测度的单指标测度函数, 综合主客观赋权法, 构建多源权重的直觉模糊集权重向量; 张洋铭等^[13]提出直觉模糊物元的属性权重确定方法. 其中, 熵权法具有精度较高、客观性更强的特点, 能较好地解释所得结果. 因此, 直觉模糊熵被广泛运

用于决策属性权重的确定. 如任红岗等^[14]提出区间直觉模糊熵-集对分析-理想解耦合的综合评价模型; 罗承昆等^[15]引入前景理论转化决策信息, 提出基于直觉模糊熵与相似度的属性可靠性评估方法; 白永强等^[16]考虑犹豫信息和目标属性动态变化等因素, 提出基于直觉模糊证据合成的动态威胁评估方法. 同时, 针对经典直觉模糊熵存在的不足, 学界分别从模糊数、语言变量等角度提出了不同的改进方案^[17-18]. 现有直觉模糊熵应用依旧在某些情况下存在问题. 对于直觉模糊的距离测度, 学者们从不同角度给出了各自定义. 如汪汝根等^[19]考虑直觉模糊环境下信息波动性与不具体性, 提出一种直觉模糊距离测度新方法, 并将其运用于 VOKOR 多属性决策; 罗骁等^[20]综合了经典距离和犹豫指数特点, 提出了一种新的直觉模糊距离测度, 并给出相应证明; 刘勇等^[21]定义了直觉模糊优势距离指数, 并利用其确定对象的优劣关系, 进而以优势距离指数构建变精度直觉模糊粗糙集模型. 但这些距离测度都没有对犹豫度做深入研究, 忽视了犹豫度的未知性.

综上所述, 针对现有确定属性权重的直觉模

收稿日期: 2023-01-28.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 福建省社科基金(FJ2022BF035); 集美大学科研启动基金(ZQ2022015); 数字福建大数据建模与智能计算研究所开放基金.

第一作者: 谢加良(1981-), 男, 福建莆田人, 博士/教授, 主要研究方向: 计算智能与不确定信息决策. E-mail: xiejialiag@jmu.edu.cn

*通信作者: 林玲(1978-), 男, 福建平潭人, 博士/讲师, 主要研究方向: 网络舆情、不确定信息决策. E-mail: 35226938@qq.com

糊熵定义依然存在不足的特点. 为了得到科学的属性权重值与规范准确的计算方式, 针对上述问题, 在保证充分利用已知直觉模糊属性值信息前提下, 本文提出另一种改进的直觉模糊熵方法; 同时, 针对犹豫度高度未知的特殊性, 在考虑犹豫度平均分配情况下, 定义了基于Dice系数的直觉模糊距离测度, 进而构建基于改进直觉模糊熵与Dice测度的VIKOR应急决策模型, 使决策结果更为客观合理.

1 相关理论基础

直觉模糊集在经典模糊集基础上, 增加了非隶属度和犹豫度信息, 使直觉模糊集对客观事物有了更加细致全面的描述.

定义 1^[9] 设 X 是一个论域. 若 X 上存在两个映射 $\mu_A: X \rightarrow [0, 1]$ 和 $\nu_A: X \rightarrow [0, 1]$, 使得 $x \in X \mapsto \mu_A(x) \in [0, 1]$ 和 $x \in X \mapsto \nu_A(x) \in [0, 1]$, 且满足 $0 \leq (\mu_A(x) + \nu_A(x)) \leq 1$, 则称 μ_A 和 ν_A 确定了论域 X 上的一个直觉模糊集 $A = \{ \langle x, \mu_A, \nu_A \rangle | x \in X \}$, 可记为 $A = (u_A, v_A)$. 其中, u_A 和 v_A 分别为直觉模糊集 A 的隶属函数和非隶属函数, $u_A(x)$ 和 $v_A(x)$ 表示为元素 x 属于 A 的隶属度和非隶属度, 并将论域 X 上所有直觉模糊集组成的集合记为 $\text{IFS}(X)$.

对于论域 X 上的直觉模糊集 A , 称 $\pi_A(x) = 1 - u_A(x) - v_A(x)$ 为 A 中元素 x 的犹豫度, 表示 x 是否属于直觉模糊集 A 的一种犹豫程度的度量. 显然, 对于 $\forall x \in X$, 都有 $0 \leq \pi_A(x) \leq 1$ 成立.

定义 2^[22] 设 $\forall A, B \in \text{IFS}(X)$, $E: \text{IFS}(X) \rightarrow R^+$ 是一个映射, 称为直觉模糊熵, 并有如下性质:

- (1) $E(A) = 0$ 当且仅当 A 为分明集;
- (2) $E(A) = 1$ 当且仅当 $\forall x \in X$, $u_A(x) = v_A(x)$;
- (3) $\forall x \in X$, 当 $u_B(x) \leq v_B(x)$ 时, 有 $u_A(x) \leq u_B(x)$ 且 $v_A(x) \geq v_B(x)$, 当 $u_B(x) \geq v_B(x)$ 时, 有 $u_A(x) \geq u_B(x)$ 且 $v_A(x) \leq v_B(x)$, 则 $E(A) \leq E(B)$;
- (4) $E(A) = E(A^C)$.

定义 3^[23] $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 为任意两个所有元素为正的向量, 则这两个向量之间的Dice系数定义如下:

$$D(X, Y) = \frac{2 \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2}. \quad (1)$$

2 改进直觉模糊熵与Dice距离测度

2.1 现有直觉模糊熵定义的不足

直觉模糊熵可有效度量直觉模糊集的模糊程度, 并应用于不明确的数据, 使之能较为完善地表达模糊对象, 相关文献中定义的模糊熵不足主要体现在以下两点:

(1) 未充分体现犹豫度对直觉模糊熵值的影响. 分析如下:

对任意的直觉模糊集 $A = (u_A(x_i), v_A(x_i))$, 文献[24]提出的直觉模糊熵如下:

$$E_S(A) = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n |u_A(x_i) - v_A(x_i)|. \quad (2)$$

式(2)虽然考虑到隶属度与非隶属度的差异程度, 但却未考虑到犹豫度的影响. 例如当直觉模糊数 $A_1 = (0.2, 0.5)$ 与 $B_1 = (0.3, 0.6)$ 时, 由式(2)可计算得到 $E_S(A_1) = E_S(B_1) = -0.85$, 而实际上这两个直觉模糊集的犹豫度并不相同. 因此, 由上述定义得到的 $E_S(A_1) = E_S(B_1)$ 不合理.

文献[25]所定义的直觉模糊熵如下:

$$E_Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left(\sin \frac{u_A(x_i) + 1 - v_A(x_i)}{4} \pi + \frac{v_A(x_i) + 1 - u_A(x_i)}{4} \pi - 1 \right) \times \frac{1}{\sqrt{2} - 1} \right). \quad (3)$$

同样地, 当存在直觉模糊数 $A_1 = (0.2, 0.5)$ 与 $B_1 = (0.3, 0.6)$ 时, 由式(3)可得 $E_Y(A_1) = E_Y(B_1) = 0.906$, 同样与现实情景不符, 即未考虑犹豫度对直觉模糊熵值的影响. 因此, 当隶属度和非隶属度差值相等的情况下, 上述两个直觉模糊熵不能有效区分直觉模糊集的模糊性.

(2) 考虑了犹豫度对直觉模糊熵的影响, 却在某些情景不适用. 分析如下:

文献[26]定义的直觉模糊熵如下:

$$E_G(A) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\min(u_A(x_i), v_i(x_i) + \pi_i(x_i))}{\max(u_A(x_i), v_i(x_i) + \pi_i(x_i))}. \quad (4)$$

文献[17]提出的直觉模糊熵如下:

$$E_W(A) = \frac{1 - |u_A(x_i) - v_A(x_i)|^2 + \pi_A(x_i)^2}{2}. \quad (5)$$

上述式(4)、(5)的两种直觉模糊熵定义虽然引入了犹豫度, 但是对于某些特殊情形却不能有效区分, 例如对于式(4), 当存在 $A_2 = (0.1, 0.7)$ 和 $B_2 =$

(0.1,0.6)时,依据式(4)可得 $E_G(A_2) = E_G(B_2) = 0.11$, 但根据直觉模糊熵性质可知,当 $|u_A(x) - v_A(x)| \neq |u_B(x) - v_B(x)|$ 时,隶属度与非隶属度越接近,其模糊程度越高,熵值应该越大,即 $|u_A - v_A| \geq |u_B - v_B|$, $E(A) \leq E(B)$. 因此,式(4)与直觉模糊熵的性质也不符合,即不能区分直觉模糊集隶属度相等的情况.

式(5)虽综合考虑了犹豫度的影响,但却忽略了直觉模糊熵的性质.例如设 $A_3 = (0.5, 0.5)$, $B_3 = (0.4, 0.6)$, 由式(5)得到 $E_W(A_3) = 0.5$, 这与定义2的性质(2)不符,其熵值应当为1,即 $E_W(A_3) = 1$.

2.2 直觉模糊熵的改进

基于上述分析,本文提出改进思路如下:对于任意的两个直觉模糊数 $A = (u_A, v_A)$ 和 $B = (u_B, v_B)$, 当 $|u_A - v_A| = |u_B - v_B|$ 时,若 $\pi_A \geq \pi_B$, 则表明直觉模糊数 A 的模糊程度比 B 更高,其对应的直觉模糊熵值也应该更大,有 $E(A) \geq E(B)$, 反之亦然;若 $|u_A - v_A| \neq |u_B - v_B|$ 时,有 $|u_A - v_A| \geq |u_B - v_B|$, 直觉模糊数 B 的不确定性比 A 更强,其对应的直觉模糊熵值应该更大,所以 $E(A) \geq E(B)$, 反之亦然. 为更直观地判定直觉模糊熵值大小,并充分体现隶属度、非隶属度及犹豫度对直觉模糊熵值的贡献,本文给出一种新的直觉模糊熵的公理化定理.

定义4 设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是论域,对于任意的直觉模糊集 $A = (u_A(x_i), v_A(x_i))$, $B = (u_B(x_i), v_B(x_i))$, $\pi_A(x_i)$ 和 $\pi_B(x_i)$ 分别是 A 和 B 的犹豫度,称映射 $E: IFS(X) \rightarrow R^+$ 为 $IFS(X)$ 的熵,并满足以下4个性质:

- (1) $E(A) = 0$ 当且仅当 A 是分明集;
- (2) $E(A) = 1$ 当且仅当 $\pi_A(x_i) = 1$;
- (3) $E(A)$ 随着 $|u_A(x_i) - v_A(x_i)|$ 的值增大而减小;

当 $|u_A(x_i) - v_A(x_i)| = |u_B(x_i) - v_B(x_i)|$ 时,且 $\pi_A(x_i) \geq \pi_B(x_i)$, 有 $E(A) \geq E(B)$; 当 $|u_A(x_i) - v_A(x_i)| = |u_B(x_i) - v_B(x_i)|$ 时,且 $\pi_A(x_i) < \pi_B(x_i)$, 有 $E(A) < E(B)$;

- (4) 若 $A^C = (v_A(x_i), u_A(x_i))$, 则 $E(A) = E(A^C)$.

定义5 设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是论域,对于任意的直觉模糊集 $A = (u_A(x_i), v_A(x_i))$, 定义直觉模糊熵公式为:

$$E(A) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - \pi_A(x_i)) \times$$

$$\frac{1 + |u_A(x_i) - v_A(x_i)|}{2}. \quad (6)$$

在式(6)中,突出了隶属度与非隶属度之间偏差导致的直觉模糊集不确定性,也体现了犹豫度对直觉模糊集未知性的贡献,有效地弥补了已有直觉模糊熵定义存在的不足.对于式(6),需要满足定义4中直觉模糊熵的4个性质.

证明 (1)若 A 是分明集,对任意的 x_i 都有

$$u_A(x_i) = 1, v_A(x_i) = 0,$$

或者

$$u_A(x_i) = 0, v_A(x_i) = 1.$$

$$\text{若 } u_A(x_i) = 1, v_A(x_i) = 0,$$

$$(1 - \pi_A(x_i)) \frac{1 + |u_A(x_i) - v_A(x_i)|}{2} = 1,$$

则 $E(A) = 0$;

$$\text{若 } u_A(x_i) = 0, v_A(x_i) = 1,$$

同理可得, $E(A) = 0$.

$$\text{若 } E(A) = 0,$$

即

$$(1 - \pi_A(x_i)) \frac{1 + |u_A(x_i) - v_A(x_i)|}{2} = 1.$$

解得

$$u_A(x_i) = 1, v_A(x_i) = 0,$$

或者

$$u_A(x_i) = 0, v_A(x_i) = 1.$$

因此, A 是分明集.

(2)如果 $E(A) = 1$, 有

$$(1 - \pi_A(x_i)) \frac{1 + |u_A(x_i) - v_A(x_i)|}{2} = 0,$$

则

$$(1 - \pi_A(x_i)) = 0,$$

解得

$$\pi_A(x_i) = 1.$$

当 $\pi_A(x_i) = 1$ 时,

$$(1 - \pi_A(x_i)) \frac{1 + |u_A(x_i) - v_A(x_i)|}{2} = 0,$$

则

$$E(A) = 1.$$

(3)当 $|u_A(x_i) - v_A(x_i)|$ 的值增大时,

$$1 - (1 - \pi_A(x_i)) \frac{1 + |u_A(x_i) - v_A(x_i)|}{2}$$

对

$$|u_A(x_i) - v_A(x_i)|$$

求偏导, 可得

$$-\frac{1 - \pi_A(x_i)}{2} < 0,$$

$$1 - (1 - \pi_A(x_i)) \frac{1 + |u_A(x_i) - v_A(x_i)|}{2}$$

是减函数. 所以 $E(A)$ 随着 $|u_A(x_i) - v_A(x_i)|$ 的值增大而减小. 当 $|u_A(x_i) - v_A(x_i)| = |u_B(x_i) - v_B(x_i)|$ 时, 且 $\pi_A(x_i) \geq \pi_B(x_i)$, 则

$$1 - (1 - \pi_A(x_i)) \frac{(1 + |u_A(x_i) - v_A(x_i)|)}{2} \leq 1 - (1 - \pi_B(x_i)) \frac{(1 + |u_B(x_i) - v_B(x_i)|)}{2},$$

$$E(A) \geq E(B).$$

同理可得, 当 $|u_A(x_i) - v_A(x_i)| = |u_B(x_i) - v_B(x_i)|$ 时, 且 $\pi_A(x_i) < \pi_B(x_i)$, 有 $E(A) < E(B)$.

(4)由式(6)可得,

$$E(A^C) = 1 - (1 - \pi_A(x_i)) \frac{1 + |v_A(x_i) - u_A(x_i)|}{2} = (1 - \pi_A(x_i)) \frac{1 + |u_A(x_i) - v_A(x_i)|}{2},$$

则

$$E(A) = E(A^C).$$

证毕, 符合定义 4.

为了验证所提公式的正确性与合理性, 依据上文章节给出的 6 个直觉模糊数 $\{A_1, B_1, A_2, B_2, A_3, B_3\}$, 利用式(2)~式(6)分别计算直觉模糊熵, 具体结果见表 1.

表 1 不同直觉模糊熵的计算结果

直觉模糊熵	A_1	B_1	A_2	B_2	A_3	B_3
E_S	0.85	0.85	0.70	0.75	1.00	0.90
E_Y	0.91	0.91	0.63	0.74	1.00	0.54
E_G	0.25	0.38	0.11	0.11	1.00	0.66
E_W	0.50	0.46	0.34	0.46	0.50	0.48
E	0.55	0.42	0.36	0.48	0.50	0.40

由表 1 可见, 通过计算不同熵公式, 所得结果证明本文提出的公式合理有效. 表现为当直觉模糊数 A_i 和 B_i 隶属度与非隶属度的差值相等时, 式(2)、(3)不能分辨该种情况下熵的大小; 当直觉模糊数 A_2 和 B_2 的隶属度相等, 非隶属度不等时, 式(4)不能判定这类熵的大小; 当直觉模糊数 A_3 的隶属度与非隶属度相等, 依据式(5), 其直觉模糊熵值

与直觉模糊数 A_i 的熵值一样, 显然不符合常理. 因此, 本文提出的直觉模糊熵公式更具合理性和有效性.

2.3 指标权重的确定

在应急决策中, 属性权重值 w_j 的大小表达了不同指标在应急方案中的相对重要程度, 可区别不同指标在决策中所起作用. 假设 $Q = [a_{ij}]_{mn}$ 为直觉模糊矩阵, 其中 a_{ij} 是直觉模糊数, 可由式(6)计算 a_{ij} 对应的直觉模糊熵, 记作 e_{ij} . 直觉模糊熵刻画了直觉模糊集的模糊程度, 即直觉模糊集的模糊性越大, 由式(6)得到的直觉模糊熵值就越大, 进而所对应的指标权重越小. 令

$$E_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m e_{ij},$$

指标权重为

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)}, j = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

则关于指标集 $\{p_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 的指标权重矩阵是 $\omega_j = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$.

2.4 基于 Dice 系数的直觉模糊距离测度

直觉模糊距离测度是影响决策结果的另一关键因素, 文献[27]给出了直觉模糊距离度量的定义.

定义 6^[27] 模糊距离是度量模糊集合之间的亲密关系, 距离越大, 关系越疏远; 距离越小, 就越密切. 直觉模糊数 A 、 B 之间的模糊距离:

$$d(A, B) = \frac{1}{2} (|u_A(x) - u_B(x)| + |v_A(x) - v_B(x)| + |\pi_A(x) - \pi_B(x)|). \quad (8)$$

然而, 式(8)的直觉模糊距离在一些场景下却不能被有效识别. 例如, $P = (0.54, 0.17)$, $p_1 = (0.40, 0.02)$ 和 $p_2 = (0.67, 0.01)$. 但依据定义可知, $d(p, p_1) = 0.1587$, $d(p, p_2) = 0.1578$.

距离度量需同时考虑隶属度之差、非隶属度之差和犹豫度之差这 3 个要素, 由于犹豫度在直觉模糊集距离中的特殊地位, 即犹豫度可能是倾向隶属度, 也有可能倾向非隶属度, 所以不宜将犹豫度之差直接引入到距离度量中. 文献[28]则考虑了犹豫度对隶属度和非隶属度的分配.

定义 7^[28] 设 $A = (u_A, v_A)$ 是直觉模糊数, 犹豫度对隶属度和非隶属度的分配分别为:

$$Su_A = \frac{\pi_A + 2u_A}{2}, \quad (9)$$

$$Sv_A = \frac{\pi_A + 2v_A}{2}. \quad (10)$$

式(9)和式(10)的意义在于犹豫度反映信息的未知程度,而这种未知程度可解释为决策者对某不确定对象肯定或否定的一种模棱两可的程度.犹豫度中既可能存在部分肯定的程度,也可能存在部分否定的程度,因此需要将犹豫度平分给隶属度和非隶属度.

本文将 Dice 系数引入直觉模糊集,结合犹豫度分配公式得到基于 Dice 系数的直觉模糊距离测度如下.

定义 8 $A = (u_1, v_1)$ 和 $B = (u_2, v_2)$ 是直觉模糊数,两个直觉模糊数的基于 Dice 系数直觉模糊距离测度的定义:

$$D_{\text{NIFS}}(A, B) = 1 - \left(2(u_1u_2 + v_1v_2 + Su_A Su_B + Sv_A Sv_B) \right) / \left(u_1^2 + u_2^2 + v_1^2 + v_2^2 + Su_A^2 + Su_B^2 + Sv_A^2 + Sv_B^2 \right). \quad (11)$$

定义 9 设 $A = (u_A, v_A)$ 和 $B = (u_B, v_B)$ 是直觉模糊数,那么 A 和 B 之间的距离度量满足:

- (1) $D_{\text{NIFS}}(A, B) = D_{\text{NIFS}}(B, A)$;
- (2) $0 \leq D_{\text{NIFS}}(A, B) \leq 1$;
- (3) 若 $A = B$, 则 $D_{\text{NIFS}}(A, B) = 0$.

证明 (1) $D_{\text{NIFS}}(A, B) =$

$$1 - \left(2(u_A u_B + v_A v_B + Su_A Su_B + Sv_A Sv_B) \right) / \left(u_A^2 + u_B^2 + v_A^2 + v_B^2 + Su_A^2 + Su_B^2 + Sv_A^2 + Sv_B^2 \right) = 1 - \left(2(u_B u_A + v_B v_A + Su_B Su_A + Sv_B Sv_A) \right) / \left(u_B^2 + u_A^2 + v_B^2 + v_A^2 + Su_B^2 + Su_A^2 + Sv_B^2 + Sv_A^2 \right) = D_{\text{NIFS}}(B, A).$$

(2) 由 $a^2 + b^2 \geq 2ab$, 可得

$$u_A^2 + u_B^2 + v_A^2 + v_B^2 + Su_A^2 + Su_B^2 + Sv_A^2 + Sv_B^2 \geq 2(u_A u_B + v_A v_B + Su_A Su_B + Sv_A Sv_B),$$

则

$$0 \leq \frac{2(u_A u_B + v_A v_B + Su_A Su_B + Sv_A Sv_B)}{u_A^2 + u_B^2 + v_A^2 + v_B^2 + Su_A^2 + Su_B^2 + Sv_A^2 + Sv_B^2} \leq 1.$$

得证 $0 \leq D_{\text{NIFS}}(A, B) \leq 1$.

(3) 若 $A = B$, 则 $u_A = u_B$, $v_A = v_B$. 有

$$u_A^2 + u_B^2 + v_A^2 + v_B^2 + Su_A^2 + Su_B^2 + Sv_A^2 + Sv_B^2 = 2(u_A u_B + v_A v_B + Su_A Su_B + Sv_A Sv_B),$$

得

$$\frac{2(u_1 u_2 + v_1 v_2 + Su_A Su_B + Sv_A Sv_B)}{u_1^2 + u_2^2 + v_1^2 + v_2^2 + Su_A^2 + Su_B^2 + Sv_A^2 + Sv_B^2} = 1.$$

得证 $D_{\text{NIFS}}(A, B) = 0$.

3 基于改进直觉模糊熵与 Dice 测度的 VIKOR 应急决策

多准则妥协解排序(VIKOR)方法^[29]是 Opricovi 于 1998 年所提出的基于正理想解和负理想解决策理论,并通过比较备选方案到正理想解的不同接近程度,对方案进行优劣排序.其中,正理想解是各评价指标中的最佳值,而负理想解则是各评价指标中的最差值.该方法综合考虑了群体和个体的妥协关系,能从一组备选方案中确定折中方案,帮助决策者作出最后的决定.本文基于改进直觉模糊熵与 Dice 测度的直觉模糊 VIKOR 应急决策方法步骤如下:

步骤 1 建立直觉模糊评价矩阵.在应急决策中,有方案集 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 指标集 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 决策者对方案的准则以语言变量形式给出评价,将语言变量转化为直觉模糊数,或者直接以直觉模糊数的形式评价,形成直觉模糊决策矩阵 $Q = [a_{ij}]_{mn}$, 其中, a_{ij} 是直觉模糊数.

步骤 2 计算指标的权重.根据直觉模糊评价矩阵,利用式(6)计算直觉模糊熵,依据式(7)得到各指标的权重为 $\omega_j = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$.

步骤 3 确定正负理想解.其中,指标对应的直觉模糊正理想解为 $A^+ = (1, 0)$, 负理想解定义为 $A^- = (0, 1)$.

步骤 4 计算各方案的个体遗憾值 R_j 和群体效用值 S_j .

$$R_j = \max_{1 \leq i \leq m} \omega_i \frac{D_{\text{NIFS}}(A^+, p_{ij})}{D_{\text{NIFS}}(A^+, A^-)}. \quad (12)$$

$$S_j = \sum_{i=1}^m \omega_i \frac{D_{\text{NIFS}}(A^+, p_{ij})}{D_{\text{NIFS}}(A^+, A^-)}. \quad (13)$$

步骤 5 引进贴近度思想的群体贴近度值 T_j 和改进折中评价价值 Q_j .

$$T_j = \sum_{i=1}^m \omega_i \frac{D_{\text{NIFS}}(A^+, p_{ij})}{D_{\text{NIFS}}(A^+, p_{ij}) + D_{\text{NIFS}}(A^-, p_{ij})}. \quad (14)$$

$$Q_j = \alpha \left(\frac{S_j - S_-}{S_+ - S_-} \right) + \beta \left(\frac{R_j - R_-}{R_+ - R_-} \right) +$$

$$\gamma \left(\frac{T_j - T_-}{T_+ - T_-} \right), \quad (15)$$

式中: $S_+ = \max_j S_j$; $S_- = \min_j S_j$; 同理, R_+ 、 R_- 、 T_+ 、 T_- 亦是如此定义. α 、 β 、 γ 分别为决策机制系数, 当 $\alpha > 1/3$ 时, 表示最大化群体效益在决策机制占主导地位; 同理, 当 $\beta > 1/3$ 和 $\gamma > 1/3$ 时, 也是如此; 当 $\alpha = \beta = \gamma$ 时, 表示在决策机制中平等考虑群体效益、最小化个体遗憾和群体贴近度的重要性.

步骤 6 备选方案进行排序并得到最终决策方案. 对 R_j 、 S_j 、 T_j 和 Q_j 值从小到大升序排序, 排序为 $x_1, x_2, \dots, x_m$, 即值越小排名越靠前. 关于 Q_j 值排序第一的方案需要满足两个判断条件, 称为最佳折中方案:

条件(1) $Q(x_2) - Q(x_1) \geq 1/(m-1)$;

条件(2) 方案 x_1 在 R_j 、 S_j 、 T_j 的排序结果仍然是最佳方案.

若条件(1)、(2)不能同时满足, 则得到一组妥协解方案. 如果条件(1)不满足, $x_1, x_2, \dots, x_m$ 则为妥协解方案, x_m 由 $Q(x_2) - Q(x_1) < (1/(m-1))$ 所决定. 若条件(2)不满足, x_1 、 x_2 将是妥协解方案.

4 案例分析

某处发生地震灾害后, 为保护人民利益及安全, 除对灾区人民进行精神安抚之外, 应尽快为他们建设自己的家园, 决策者需在有限时间内尽快作出应急决策. 对于居民区灾后处置, 设有 4 个备选方案 $A_i = \{\text{修缮 } A_1, \text{重建 } A_2, \text{修缮+重建 } A_3, \text{搬迁 } A_4\}$. 共采用 6 个评价指标 $P_j (j=1, \dots, 6)$ 对方案进行评价, 指标集 $P = \{\text{成本 } P_1, \text{可行性 } P_2, \text{安全性}$

表 2 各应急决策方案的直觉模糊评价价值

方案	P_1	P_2	P_3
A_1	(0.6,0.3)	(0.4,0.2)	(0.6,0.2)
A_2	(0.7,0.2)	(0.6,0.1)	(0.7,0.2)
A_3	(0.6,0.2)	(0.5,0.2)	(0.6,0.1)
A_4	(0.5,0.1)	(0.5,0.1)	(0.5,0.3)
方案	P_4	P_5	P_6
A_1	(0.6,0.2)	(0.4,0.2)	(0.3,0.4)
A_2	(0.4,0.3)	(0.7,0.2)	(0.6,0.2)
A_3	(0.2,0.5)	(0.6,0.1)	(0.5,0.3)
A_4	(0.4,0.1)	(0.4,0.5)	(0.4,0.2)

P_3 , 后期保养 P_4 , 恢复生产 P_5 , 动员力度 P_6 . 数据详情见表 2.

步骤 1 依据各应急决策方案的直觉模糊评价价值, 生成直觉模糊决策矩阵 Q .

$$Q = \begin{bmatrix} (0.6,0.3) & (0.4,0.2) & (0.6,0.2) \\ (0.7,0.2) & (0.6,0.1) & (0.7,0.2) \\ (0.6,0.2) & (0.5,0.2) & (0.6,0.1) \\ (0.5,0.1) & (0.5,0.1) & (0.5,0.3) \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} (0.6,0.2) & (0.4,0.2) & (0.3,0.4) \\ (0.4,0.3) & (0.7,0.2) & (0.6,0.2) \\ (0.2,0.5) & (0.6,0.1) & (0.5,0.3) \\ (0.4,0.1) & (0.4,0.5) & (0.4,0.2) \end{bmatrix} \leftarrow$$

步骤 2 由式(6)计算矩阵 Q 中直觉模糊数对应的直觉模糊熵, 结果见表 3.

表 3 决策矩阵直觉模糊熵计算结果

方案	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
A_1	0.73	0.88	0.68	0.68	0.88	0.93
A_2	0.55	0.65	0.55	0.93	0.55	0.68
A_3	0.68	0.79	0.65	0.79	0.65	0.84
A_4	0.76	0.76	0.84	0.85	0.91	0.88

利用式(7)计算所有的指标权重:

$$\omega_j = [0.2162, 0.1554, 0.2162, 0.1284, \rightarrow \leftarrow 0.1689, 0.1148]^T.$$

步骤 3 如上文所述, 正理想解为 $A^+ = (1, 0)$, 负理想解为 $A^- = (0, 1)$.

步骤 4、步骤 5 根据直觉模糊距离测度公式, 计算群体效用值、个体遗憾值、群体贴近值和折中评价价值结果, 并对相关方案进行排序(表 4).

表 4 方案的 R_j 、 S_j 、 T_j 、 Q_j 值与方案排序

方案	群体效用值	排序	个体遗憾值	排序
A_1	0.501 3	3	0.102 5	3
A_2	0.365 1	1	0.076 1	1
A_3	0.485 4	2	0.101 5	2
A_4	0.541 4	4	0.108 3	4
方案	群体贴近值	排序	折中评价价值	排序
A_1	0.400 1	3	0.730 6	3
A_2	0.308 5	1	0	1
A_3	0.374 8	2	0.612 2	2
A_4	0.415 9	4	1	4

步骤 6 由表 4 可得, 根据折中评价价值的大小

对各方案进行降序排序: $A_2 > A_3 > A_1 > A_4$. 其中, $Q(A_2) - Q(A_3) = 0.6122 > 0.25$, 满足前文第3节步骤6中的条件(1), 同样, 由于 A_2 在 R_j 、 S_j 、 T_j 值均是最小值, 所以也满足第3节步骤6的条件(2). 因此, 方案 A_2 为备选方案中的最优折中方案. 最终结果也与文献[30]的方案排序结果一致, 表明方法有效. 同时表明本文提出的方法充分利用了已有的决策属性值信息, 在考虑评价信息中隶属度、非隶属度以及犹豫度影响因素情况下, 合理地定义了直觉模糊熵和直觉模糊距离度量, 更加贴近应急决策的现实情境.

5 结论

本文分析例证了现有直觉模糊熵定义存在的不足, 提出一种充分利用原始评价信息、考虑决策者犹豫信息的改进直觉模糊熵, 并进行了相关证明; 同时, 针对直觉模糊距离测度的普适性问题, 考虑了犹豫度的合理分配, 提出基于Dice系数的直觉模糊距离测度, 并在此基础上构建了基于直觉模糊环境的VIKOR方法应急决策模型. 文中分别通过举例分析和推导论证阐明了所提出的改进直觉模糊熵和基于Dice系数直觉模糊距离测度的合理性, 并通过现实应急决策案例对比分析, 验证了该模型的有效性, 可为应急决策提供参考.

参考文献:

- [1] 莫国莉, 张卫国, 刘芳, 等. 基于四参照点前景理论的股市投资应急决策方法[J]. 控制与决策, 2018, 33(10): 1851-1860.
- [2] 吴澎, 丁毅, 周礼刚, 等. 基于DEA交叉效率与冗余信息识别的大群体应急决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(10): 2840-2852.
- [3] 徐选华, 杨欣, 陈晓红. 基于UGC大数据挖掘的大群体两阶段风险性应急决策方法[J]. 运筹与管理, 2019, 28(12): 35-45.
- [4] Wu W S, Xu Z S. Hybrid TODIM method with crisp number and probability linguistic term set for urban epidemic situation evaluation[J]. Complexity, 2020, 2020: 1-11.
- [5] Shen K W, Wang J Q. Z-VIKOR method based on a new comprehensive weighted distance measure of Z-number and its application[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(6): 3232-3245.
- [6] 胡晓元, 孙秉珍. 基于双论域量化模糊粗糙集的公共卫生应急决策模型[J]. 系统科学与数学, 2019, 39(3): 409-424.
- [7] 夏登友, 高平, 任少云, 等. 突发灾害事故应急决策冲突协调模型[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(3): 174-179.
- [8] 丁雪枫, 朱丽霞. 基于密度峰值聚类理念的大群体应急模糊决策模型[J]. 控制与决策, 2022, 37(12): 3307-3313.
- [9] Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96.
- [10] 王治莹, 聂慧芳, 赵宏丽. 考虑决策者情绪更新机制的多阶段应急决策方法[J]. 控制与决策, 2020, 35(2): 436-444.
- [11] 梁薇, 王应明. 基于可信度的基本不确定区间犹豫模糊广义TODIM应急群决策方法[J]. 控制与决策, 2022(4): 1-10.
- [12] 郭书良, 杨珊, 霍亮. 基于未确知测度-直觉模糊集的岩爆烈度预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S1): 2930-2939.
- [13] 张洋铭, 陈云翔, 项华春, 等. 直觉模糊物元及其在权重信息未知多属性群决策中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(5): 150-156.
- [14] 任红岗, 谭卓英. 区间直觉模糊熵-集对分析-理想解耦合的多属性决策模型[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(1): 176-186.
- [15] 罗承昆, 陈云翔, 顾天一, 等. 基于前景理论和证据推理的混合型多属性决策方法[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(5): 49-55.
- [16] 白永强, 杨风暴, 吉琳娜, 等. 基于直觉模糊证据合成的动态威胁评估[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(5): 113-118.
- [17] 汪凌. 基于改进直觉模糊熵和信息集成算子的多准则群决策方法[J]. 信息与控制, 2020, 49(2): 219-224; 232.
- [18] 尹胜, 杨桢, 陈思翼. 基于改进模糊熵的区间直觉模糊多属性决策[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(5): 1079-1084.
- [19] 汪汝根, 李为民, 罗骁, 等. 基于新距离测度的直觉模糊VIKOR多属性决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(11): 2524-2532.
- [20] 罗骁, 李为民. 一种新的直觉模糊距离测度[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(10): 2360-2372.
- [21] 刘勇, 钱吴永. 基于优势距离指数的变精度直觉模糊粗糙集模型及应用[J]. 管理工程学报, 2017, 31(3): 134-141.
- [22] Szmidt E, Kacprzyk J. Entropy for intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 118(3): 467-477.

- [23] Dice L R. Measures of the amount of ecologic association between species[J]. Ecology, 1945, 26(3):297-302.
- [24] Szmidt E, Baldwin J. New similarity measure for intuitionistic fuzzy set theory and mass assignment theory [J]. Notes on IFSS, 2003, 9(3):60-76.
- [25] Ye J. Two effective measures of intuitionistic fuzzy entropy[J]. Computing, 2010, 87(1):55-62.
- [26] 高明美, 孙涛, 朱建军, 等. 基于改进熵和新得分函数的区间直觉模糊多属性决策[J]. 控制与决策, 2016, 31(10):1757-1764.
- [27] Zhang X L, Xu Z S. Extension of TOPSIS to multiple criteria decision making with Pythagorean fuzzy sets[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2014, 29(12): 1061-1078.
- [28] 许昌林, 沈菊红. 一种新的直觉模糊集距离及其在决策中的应用[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(12):3627-3634.
- [29] Opricovic S. Multi-criteria optimization of civil engineering system[D]. Belgrade: University of Belgrade, 1998.
- [30] 陈业华, 黄璐. 直觉模糊熵的改进及其在应急决策中的应用[J]. 统计与决策, 2018, 34(22):86-91.

VIKOR method for emergency decision making based on improved intuitionistic fuzzy entropy with Dice measure

XIE Jialiang^{1,2}, CHEN Yunchao¹, LIN Ling^{1,2*}

(1.College of Science, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2.Digital Fujian Institute of Big Data Modeling and Intelligent Computing, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Aiming at tackling the problem of emergency decision making with unknown attribute weights in uncertain information environment, a VIKOR decision model with improved intuitionistic fuzzy entropy weight and Dice distance measure is proposed. Firstly, we analyze the flaws of the existing intuitionistic fuzzy entropy, and then propose an improved intuitionistic fuzzy entropy that takes into account the combined effects of affiliation, non-affiliation and hesitation; Secondly, we adopt the Dice coefficient and construct the intuitionistic fuzzy Dice distance measure by combining the characteristics of hesitation; Lastly, we apply the intuitionistic fuzzy entropy weight and intuitionistic fuzzy Dice distance measure to the intuitionistic fuzzy VIKOR method. Following the preprocessing as described afore, the group proximity formula is defined, and the emergency decision model is constructed to fit the real-time environment. In the end, an example of emergency decision making after earthquake disaster is given to verify the rationality and effectiveness of the model.

Key words: emergency decision making; intuitionistic fuzzy entropy weight; Dice coefficient; VIKOR method

(责任编辑 章践立)