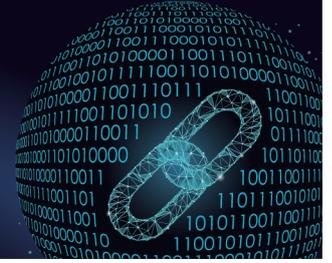




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



考虑风险态度的区间值非加性BWM共识模型

肖婧梅, 蔡玫, 高宇, 周坤

引用本文:

肖婧梅, 蔡玫, 高宇, 周坤. 考虑风险态度的区间值非加性BWM共识模型[J]. *控制与决策*, 2024, 39(6): 2097–2105.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.2099>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑个体累积共识贡献的犹豫模糊语言自适应共识模型

Adaptive consensus model with hesitant fuzzy linguistic information considering individual cumulative consensus contribution

控制与决策. 2021, 36(1): 187–195 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0556>

大群体应急决策中考虑属性关联的偏好信息融合方法

Preference information fusion method of large groups emergency decision-making based on attributes association

控制与决策. 2021, 36(10): 2537–2546 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0117>

基于语言共识模型的电子商务信用风险评价方法

An approach to E-commerce credit risk assessment based on linguistic consensus model

控制与决策. 2021, 36(6): 1465–1471 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1398>

基于群决策考虑属性效用一致性的DEA他评交叉效率公共权重排序法

A common-weight ranking method for DEA peer-efficiency based on group decision-making and considering the consistency of attribute utility

控制与决策. 2021, 36(9): 2279–2289 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1719>

考虑时间序列的动态大群体应急决策方法

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series

控制与决策. 2020, 35(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088>

考虑风险态度的区间值非加性BWM共识模型

肖婧梅, 蔡玫[†], 高宇, 周坤

(南京信息工程大学 管理工程学院, 南京 210044)

摘要: 针对属性权重未知,且考虑决策成员风险态度和属性关联关系的多属性决策问题,构建一种基于非加性最优最劣方法(BWM)的群体共识模型. 首先,为处理不确定环境中的属性关联问题,提出区间值非加性BWM方法,该方法采用区间值刻画专家关于属性重要性的成对比较结果,以获取个体偏好下的属性重要性指数(权重),扩展了Shapley值的表示形式;其次,通过构建非加性BWM共识模型将个体偏好下的属性重要性指数转化为群体共识的属性重要性指数,在共识达成的过程中,利用隶属度函数度量决策成员的风险态度效用水平,并在一定预算限制下,探索决策成员的风险态度对群体共识的属性重要性指数及共识效用水平的影响;最后,通过案例分析验证模型的可行性和有效性.

关键词: 非加性BWM; 属性关联; 风险态度; 共识模型; 共识效用水平; 区间值偏好关系

中图分类号: C934 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.2099

引用格式: 肖婧梅,蔡玫,高宇,等. 考虑风险态度的区间值非加性BWM共识模型[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 2097-2105.

Consensus model for interval-value non-additive BWM considering risk attitude

XIAO Jing-mei, CAI Mei[†], GAO Yu, ZHOU Kun

(School of Management Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In the process of determining the weight of attributes, the risk attitudes of group members may differ, and interactions may exist among attributes in multi-attribute decision-making problems. To solve these issues, a group consensus based on the non-additive best and worst method (BWM) is constructed. First, considering attribute interactions in uncertain environment, an interval-value non-additive BWM is proposed, which characterizes the uncertain preference of expert's pairwise comparison of attributes by interval numbers to obtain the individual interval-valued importance index (weight) of attributes. Then, the non-additive BWM consensus model is constructed to convert the individual importance index of attributes into the consensual importance index. In the consensus reaching process, the membership function is used to measure the utility level of their risk attitudes, so as to explore the impact of group members' risk attitudes on the attributes consensual importance index and the consensus utility level under the pre-given budget constraint. Finally, the feasibility and validity of the model are verified by a case study.

Keywords: non-additive BWM; attribute interaction; risk attitude; consensus model; consensus utility level; interval-valued preference relation

0 引言

多属性决策(MADM)是决策分析领域的重要分支. 由决策专家依据若干个属性对有限备选方案进行评估. 属性权重反映了属性的重要性,是影响备选方案评估结果的重要因素之一. 常用的属性权重确定方法有层次分析法(AHP)^[1]、网络分析法(ANP)^[2]、

swing方法^[3]等,且已在实际中得到了广泛应用^[4-5].

近期,Rezaei^[6]提出的最优最劣方法(BWM)在属性权重确定方法中显示出独特的优越性. 该方法只需专家选出最重要(最优)属性和最不重要(最劣)属性与其他属性进行两两比较,利用Saaty等级表中的数值,构造两组成对比较向量. 相较于AHP方法,

收稿日期: 2022-12-04; 录用日期: 2023-03-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71871121, 72074119); 未来网络科研基金项目(FNSRFP-2021-YB-19).

责任编辑: 徐泽水.

[†]通讯作者. E-mail: caimei@nuist.edu.cn.

该方法一方面大大减少了属性之间成对比较的次数,另一方面减少了成对比较时出现的偏差对结果的影响^[6].BWM方法自提出以来备受学者关注,现已有多种扩展形式,如三角模糊数^[7]、犹豫模糊数^[8]以及概率语言形式^[9].与此同时,BWM方法还与其他几种MADM方法融合使用,如偏好顺序结构评估法(PROMETHEE)^[9]、优劣解距离法(TOPSIS)^[10]、多准则妥协解排序法(VIKOR)^[11]等,且已被应用于多个领域^[12].

以上研究建立在属性偏好相互独立的假设基础之上,在实际决策中,属性间往往存在互补或冗余关联关系^[13].例如:客户在购买汽车时注重价格、油耗和舒适度.如果客户希望价格、油耗低且舒适度高,则说明他们看重这3方面各自的重要性.但现实中往往难以同时满足,因而需要对这3方面进行综合考虑,即客户会考虑这3者间的关联关系.基于此,学者对属性关联关系进行了广泛的研究^[14].为了使BWM方法也能处理属性关联问题,文献[15]提出了非加性BWM方法.但该方法通过精确数形式描述专家关于属性的偏好程度,未考虑专家主观判断伴随的不确定性因素.在实际决策中,由于决策环境的复杂性和不确定性,专家往往难以用精确数表示自己的偏好,而更愿意以区间值形式表达其偏好^[16-17].因此,将非加性BWM方法扩展到不确定环境中以处理属性间的关联关系是一个值得探讨和研究的重要问题.

由于单个决策专家自身的局限,现实的决策过程往往需要参考多位专家提供关于属性重要性偏好的意见,此时就需要对属性意见的群体共识问题进行研究.共识决策旨在通过偏好表达、共识建模、反馈调整以及利益补偿等方式,促使专家形成群体一致认可的结果^[18-19].文献[20]采用共识模型处理BWM群决策问题,以最小调整成本为目标,获取群体一致认可的属性重要性;文献[21]引入粒子群优化算法,提出了可以同时处理一致性与共识问题的BWM模型.然而,现有的BWM共识模型还存在一些不足:一是忽视了共识效用水平,因为最小成本目标往往过于理想,容易造成较低水平的共识满意度.而共识效用水平决定了专家对共识结果的满意程度,为提高共识满意度,往往需要适当地增加预算成本^[22].二是忽视了决策成员风险态度对属性重要性指数的影响.事实上,风险态度是人的一种心理行为,不同的风险态度会使人们对同一问题的反应有所不同^[23].例如:专家在使用区间值表示属性成对比较偏好时,风险追求

型专家更倾向于选择区间上限值,风险规避型专家则更倾向于选择区间下限值.专家的风险态度反映了专家对模糊问题的一种明确心理期望,从而对群体共识属性重要性指数的取值产生影响.因此,有必要进一步研究一定预算限制下,如何将决策成员的风险态度融入BWM共识决策模型以提高共识效用水平.

针对上述问题,本文提出预算限制下考虑决策成员风险态度的区间值非加性BWM共识模型,主要创新点包括:1)提出区间值非加性BWM方法以确定个体偏好下的属性重要性指数,该方法既能体现专家偏好表达的不确定性,还能处理属性间的关联关系;2)将风险态度融入区间值非加性BWM共识模型以获取群体共识的属性重要性指数,该模型在一定预算限制下考虑决策成员的风险态度,能最大程度保留决策者的偏好信息,提高群体共识满意度.

1 预备知识

1.1 BWM方法

BWM包括两类比较:1)参考元素的比较,即选出最重要和最不重要的属性;2)二次比较,将最重要属性与其他属性以及其他属性与最不重要属性进行两两比较形成两组偏好向量.将这两组偏好向量作为优化模型的输入条件,以求解属性的权重向量.Rezaei^[6]提出的BWM方法的主要步骤如下.

step 1: 专家确定待评估的属性集和专家从属性集,即 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, $N = \{1, 2, \dots, n\}$.

step 2: 专家从属性集 C 中确定最重要的属性 c_B 和最不重要的属性 c_W .

step 3: 专家将 c_B 、 c_W 分别与其他属性 c_i 进行比较,并依据 Satty 等级表给出比较结果,形成“最重要-其他”偏好向量 $BR = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})^T$ 以及“其他-最不重要”偏好向量 $RW = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T$.

step 4: 依据专家提供的成对比较偏好向量可以构建如下优化模型:

$$\begin{aligned} & \min \xi; \\ & \text{s.t. } \left| \frac{w_B}{w_i} - a_{Bi} \right| \leq \xi, \left| \frac{w_i}{w_W} - a_{iW} \right| \leq \xi, \\ & \sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \geq 0, i \in N. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: w_B 、 w_W 分别为 c_B 和 c_W 的权重, w_i 为属性 c_i 的权重.求解模型(1)可以获得一组最优权重向量 $W = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)^T$ 以及目标函数值 ξ^* .采用文献[6]提出的一致性检验方法检查偏好信息的可接受性.

1.2 Choquet积分与Shapley值

定义1^[24] 令 2^N 为属性集 N 的幂集, N 上的容量为单调集函数 $\mu: 2^N \rightarrow [0, 1]$,并满足性质:

- 1) 归一化: $\mu_\emptyset = 0, \mu_N = 1$;
- 2) 单调性: 当 $F \subseteq G \subseteq N$ 时, $\mu_F \leq \mu_G$.

容量 μ 与莫比乌斯容量的转换关系为 $\mu_G = \sum_{F \subseteq G} m_F, m_F = \sum_{F \subseteq G} (-1)^{g-f} \mu_G$. 符号 g, f 分别为集合 G, F 中元素的个数. 关于容量 μ 的Choquet积分为

$$C_\mu(x) = \sum_{i=1}^n (x_{(i)} - x_{(i-1)}) \mu(A_{(i)}). \quad (2)$$

其中: (\cdot) 代表属性值的一种排列关系 $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}, A_{(i)} = \{1, 2, \dots, n\}, x_{(0)} = 0$.

若考虑“2可加”的情形,则式(2)可以写为^[25]

$$C(x) = \sum_{i=1}^n m_i x_i + \sum_{\{i,j\} \subseteq N} m_{ij} (x_i \wedge x_j). \quad (3)$$

此时,属性的重要性指数以及关联指数的莫比乌斯形式为 $I_i = m_i + \sum_{j \in N \setminus i} \frac{m_{ij}}{2}, I_{ij} = m_{ij}$,且 $I_{ij} \in [-1, 1]$.

若 $I_{ij} = 0$,则属性 c_i 与 c_j 相互独立;若 $I_{ij} \in (0, 1]$,则属性 c_i 与 c_j 具有正向关联关系;若 $I_{ij} \in [-1, 0)$,则属性 c_i 与 c_j 具有负向关联关系. 属性重要性指数的归一化和单调性条件的莫比乌斯形式^[26]为: 1) 归一化: $m_\emptyset = 0, \sum_{i \in N} m_i + \sum_{ij \subseteq N} m_{ij} = 1$. 2) 单调性: $m_i \geq 0, \forall i \in N; m_i + \sum_{j \in G} m_{ij} \geq 0, \forall i \in N; \forall G \subseteq N \setminus i$.

2 模型构建

2.1 问题描述

假设 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 为方案集, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 为属性集,令 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_t\}$ 为专家集,专家权重向量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_t)^T, \sum_{s=1}^t \lambda_s = 1$. 为方便起见,令 $T = \{1, 2, \dots, t\}, M = \{1, 2, \dots, m\}, N = \{1, 2, \dots, n\}$. 评估矩阵 $X_s = (x_{hj}^s)_{m \times n}, x_{hj}^s$ 为第 s 个专家关于方案 A_h 在属性 c_j 上的评价, $s \in T, h \in M, j \in N$.

2.2 基于专家个体偏好的属性重要性指数确定方法

2.2.1 区间值属性重要性指数

针对专家关于属性偏好具有不确定性的问题,本文使用区间值刻画专家偏好意见. 在文献[27]的基础上,给出属性区间值形式的重要性指数(Shapley值)的单调性和归一化条件.

定义2 假设 I_j^{Ls}, I_j^{Us} 为专家 E_s 关于属性 c_j 重要性指数的上、下限, I_{ij}^{Ls}, I_{ij}^{Us} 分别为专家 E_s 关于属

性子集 $\{c_i, c_j\}$ 关联指数的上、下限; m_j^{Ls}, m_j^{Us} 以及 m_{ij}^{Ls}, m_{ij}^{Us} 分别对应于属性 c_j 和属性子集 $\{c_i, c_j\}$ 的莫比乌斯容量的上、下限. 那么,区间值属性重要性指数及关联指数的“2可加”莫比乌斯形式为

$$M_1 : \begin{cases} I_j^{Ls} = m_j^{Ls} + \sum_{i \in N \setminus j} \frac{m_{ij}^{Ls}}{2}, i \neq j; \\ I_j^{Us} = m_j^{Us} + \sum_{i \in N \setminus j} \frac{m_{ij}^{Us}}{2}, i \neq j; \\ I_{ij}^{Ls} = m_{ij}^{Ls}; I_{ij}^{Us} = m_{ij}^{Us}. \end{cases}$$

此时,区间值属性重要性指数的单调性条件可用莫比乌斯形式表示为

$$M_2 : \begin{cases} m_j^{Ls} + \sum_{i \in T} m_{ij}^{Ls} \geq 0, T \subseteq N \setminus j, T \neq \emptyset; \\ m_j^{Us} + \sum_{i \in T} m_{ij}^{Us} \geq 0, T \subseteq N \setminus j, T \neq \emptyset; \\ m_j^{Us} \geq m_j^{Ls} \geq 0, m_{ij}^{Us} \geq m_{ij}^{Ls}. \end{cases}$$

定义3 区间值属性重要性指数向量 $I = ([I_1^{Ls}, I_1^{Us}], [I_2^{Ls}, I_2^{Us}], \dots, [I_n^{Ls}, I_n^{Us}])^T$ 的归一化条件可用莫比乌斯形式表示为

$$M_3 : \begin{cases} \sum_{j \in N, j \neq k} m_j^{Ls} + m_k^{Us} + \sum_{\{i,j\} \subseteq N} m_{ij}^{Ls} \leq 1, \\ m_k^{Us} = \{m_j^{Us} | \max_j (m_j^{Us} - m_j^{Ls})\}; \\ \sum_{j \in N} m_j^{Ls} + \sum_{\{i,j\} \subseteq N, \{i,j\} \neq \{l,k\}} m_{ij}^{Ls} + m_{lk}^{Us} \leq 1, \\ m_{lk}^{Us} = \{m_{ij}^{Us} | \max_{ij} (m_{ij}^{Us} - m_{ij}^{Ls})\}; \\ \sum_{j \in N, j \neq k} m_j^{Us} + m_k^{Ls} + \sum_{\{i,j\} \subseteq N} m_{ij}^{Us} \geq 1, \\ m_k^{Ls} = \{m_j^{Ls} | \max_j (m_j^{Us} - m_j^{Ls})\}; \\ \sum_{j \in N} m_j^{Us} + \sum_{\{i,j\} \subseteq N, \{i,j\} \neq \{l,k\}} m_{ij}^{Us} + m_{lk}^{Ls} \geq 1, \\ m_{lk}^{Ls} = \{m_{ij}^{Ls} | \max_{ij} (m_{ij}^{Us} - m_{ij}^{Ls})\}. \end{cases}$$

通过定义3可以缩小属性重要性指数的区间范围,剔除冗余部分,使其满足归一化条件. 例如, $I = ([0.4, 0.6], [0.2, 0.3], [0.1, 0.2])^T$ 为3个属性的重要性指数向量,第1个属性重要性指数的下限值为0.4,而在另外两个区间里面找不到任何一组数能使它们的和为1. 若将0.4调高至0.5,即 $I = ([0.5, 0.6], [0.2, 0.3], [0.1, 0.2])^T$,则可以满足归一化条件. 由定义3可得以下定理.

定理1 如果区间值形式的重要性指数向量满足 M_3 ,则能找到一组重要性指数向量 $I = (I_1^s, I_2^s, \dots, I_n^s)^T$ 使得 $\sum_{j=1}^n I_j^s = 1$ 且 $I_j^{Ls} \leq I_j^s \leq I_j^{Us}$.

定理1可以由 $\sum_{j \in N} m_j^{Ls} + \sum_{\{i,j\} = N} m_{ij}^{Ls} \leq 1$ 以及

$\sum_{j \in N} m_j^{Us} + \sum_{\{i,j\}=N} m_{ij}^{Us} \geq 1$ 得到验证.

2.2.2 区间值非加性BWM方法

本节提出区间值非加性BWM方法,用以获得基于个体偏好下区间值属性重要性指数,具体步骤如下.

step 1: 确定最重要和最不重要的属性. 专家 E_s 选出最重要和最不重要的属性,记为 c_B^s 和 c_W^s .

step 2: 属性成对比较. 专家 E_s 用 c_B^s 与其他属性 c_i^s 进行成对比较,结果表示为 a_{Bi}^s ,且 $a_{Bi}^s \in [a_{Bi}^{Ls}, a_{Bi}^{Us}]$,其中 a_{Bi}^{Ls} 、 a_{Bi}^{Us} 为区间的上、下限,并用 1 ~ 9 的数值表示. 此时可形成“最重要-其他”偏好向量 $BR^s = (a_{B1}^s, a_{B2}^s, \dots, a_{Bn}^s)^T$. 同样地,专家 E_s 用其他属性 c_i^s 与 c_W^s 进行成对比较,结果表示为 a_{iW}^s ,且 $a_{iW}^s \in [a_{iW}^{Ls}, a_{iW}^{Us}]$,形成“其他-最不重要”偏好向量.

step 3: 获得属性重要性指数. 若属性 c_i^s 满足 $\frac{I_B^{Ls}}{I_i^{Ls}} = a_{Bi}^{Ls}, \frac{I_B^{Us}}{I_i^{Us}} = a_{Bi}^{Us}, \frac{I_i^{Ls}}{I_W^{Ls}} = a_{iW}^{Ls}, \frac{I_i^{Us}}{I_W^{Us}} = a_{iW}^{Us}$,则说明成对比较的一致性最好,依据这一条件,可构建如下优化模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & \xi. \\ \text{s.t.} \quad & \left| \frac{I_B^{Ls}}{I_i^{Ls}} - a_{Bi}^{Ls} \right| \leq \xi, \left| \frac{I_B^{Us}}{I_i^{Us}} - a_{Bi}^{Us} \right| \leq \xi, \\ & \left| \frac{I_i^{Ls}}{I_W^{Ls}} - a_{iW}^{Ls} \right| \leq \xi, \left| \frac{I_i^{Us}}{I_W^{Us}} - a_{iW}^{Us} \right| \leq \xi; \\ & M_1, M_2, M_3. \end{aligned} \tag{4}$$

其中:约束 M_1 为属性重要性指数的莫比乌斯形式;约束 M_2 、 M_3 为属性重要性指数的单调性条件和归一化条件. 与传统的BWM模型相似,模型(4)为非线性规划模型,可能得到一组或者多组最优解.

step 4: 通过文献[28]中提出的一致性检验方法检查专家的成对比较结果的可接受性. 当一致性比率 $CR \leq 0.15$ 时,认为专家的成对比较结果是可接受的;否则应修改 step 2 中的偏好向量. 一致性比率 CR 的表达式^[27]为

$$CR = \frac{\left(\frac{\xi^*}{\sigma^{*Us}} + \frac{\xi^*}{\sigma^{*Ls}} \right)}{2}. \tag{5}$$

其中: $\sigma^{*Us} = a_{BW}^{Us} - \sqrt{a_{BW}^{Us} + a_{BW}^{Ls} + \frac{1}{4} + \frac{1}{2}}$, $\sigma^{*Ls} = a_{BW}^{Ls} - \sqrt{2a_{BW}^{Us} + \frac{1}{4} + \frac{1}{2}}$.

由于模型(4)为非线性规划模型,可根据文献[15]将其转化为如下线性规划模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & \xi. \\ \text{s.t.} \quad & |I_B^{Ls} - a_{Bi}^{Ls} I_i^{Ls}| \leq \xi, |I_B^{Us} - a_{Bi}^{Us} I_i^{Ls}| \leq \xi, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |I_i^{Ls} - a_{iW}^{Ls} I_W^{Ls}| \leq \xi, |I_i^{Us} - a_{iW}^{Us} I_W^{Ls}| \leq \xi; \\ M_1, M_2, M_3. \end{aligned} \tag{6}$$

通过模型(6)可获得专家 E_s 关于属性的区间值重要性指数的全局最优解 $I^s = ([I_1^{Ls}, I_1^{Us}], [I_2^{Ls}, I_2^{Us}], \dots, [I_n^{Ls}, I_n^{Us}])$.

2.3 基于群体共识的属性重要性指数确定方法

本节提出预算限制下考虑风险态度的区间值非加性BWM共识模型. 模型的基本假设为: 1) 专家使用区间值表示属性的成对比较结果; 2) 预算成本可依据预算基线提前给定; 3) 决策成员在不同属性上的效用水平可以相互线性补偿; 4) 决策成员风险态度的效用水平可以用隶属度函数进行表示.

2.3.1 决策成员风险态度效用函数的构造

首先通过构造隶属度函数表示决策成员风险态度的效用水平 δ .

定义4 当决策成员为风险追求型时,代表其效用水平的隶属度函数为

$$\delta = \begin{cases} 1, & I_i^s \geq I_i^{Us}; \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{I_i^s - I_i^{Ls}}{I_i^{Us} - I_i^{Ls}}, & I_i^{Ls} < I_i^s < I_i^{Us}; \\ 0, & I_i^s \leq I_i^{Ls}. \end{cases}$$

其中: I_i^s 为基于专家 E_s 偏好下属性 c_i 的重要性指数; I_i^{Ls} 、 I_i^{Us} 分别为 I_i^s 的下限和上限.

定义5 当决策成员为风险中立型时,代表其效用水平的隶属度函数为

$$\delta = \begin{cases} 0, & I_i^s \geq I_i^{Us}, I_i^s \leq I_i^{Ls}; \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{I_i^s - I_i^{Ls}}{I_i^{Ms} - I_i^{Ls}}, & I_i^{Ls} < I_i^s < I_i^{Ms}; \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{I_i^{Us} - I_i^s}{I_i^{Us} - I_i^{Ms}}, & I_i^{Ms} < I_i^s < I_i^{Us}. \end{cases}$$

其中 I_i^{Ms} 为区间中间值.

定义6 当决策成员为风险规避型时,代表其效用水平的隶属度函数为

$$\delta = \begin{cases} 0, & I_i^s \geq I_i^{Us}; \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{I_i^{Us} - I_i^s}{I_i^{Us} - I_i^{Ls}}, & I_i^{Ls} < I_i^s < I_i^{Us}; \\ 1, & I_i^s \leq I_i^{Ls}. \end{cases}$$

显然, δ 越大,越符合决策成员的风险态度.

2.3.2 预算基线的获取

依据模型(6)可获得专家 E_s 关于属性 c_i 的重要性指数 I_i^s ,且 $I_i^s \in [I_i^{Ls}, I_i^{Us}]$. 此时,以最小调整成本为目标,构建如下不考虑风险态度的区间值非加性

BWM共识模型, 以获取预算基线:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{s=1}^t \sum_{i=1}^n w^s |I_i^* - I_i^s|. \\ \text{s.t.} & \\ & \left\{ \begin{array}{l} |I_i^* - I_i^s| \leq \varepsilon, i \in N \} M_4; \\ M_5: \left\{ \begin{array}{l} I_i^* = m_i + \sum_{j \in N \setminus i} \frac{m_{ij}}{2}, i \neq j, i, j \in N, \\ I_{ij} = m_{ij}, i \neq j, i, j \in N; \end{array} \right. \\ M_C: \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in N} m_i + \sum_{\{i,j\} \subseteq N} m_{ij} = 1, \\ M_6: \left\{ \begin{array}{l} m_i + \sum_{j \in T} m_{ij} \geq 0, i \in N, T \subseteq N \setminus i, \\ T \neq \emptyset, m_i \geq 0, i \in N; \end{array} \right. \\ M_7: I_i^* \geq 0, I_i^s \in [I_i^{Ls}, I_i^{Us}], i \in N. \end{array} \right. \end{array} \right. \end{aligned} \quad (7)$$

其中: w^s 为单位调整成本, I_i^* 为属性 c_i 群体共识的重要性指数; 约束 M_4 表示专家个体偏好与群体共识的属性重要性指数的偏差不能超过 ε , 约束 M_5 为 Shapley 值与莫比乌斯容量的转换关系, 约束 M_6 为属性重要性指数的归一化和单调性条件, 约束 M_7 为 I_i^* 和 I_i^s 的取值范围, M_C 包含以上所有约束.

2.3.3 预算限制下考虑风险态度的区间值非加性 BWM 共识模型

为了使群体共识属性重要性指数尽量符合决策成员的风险态度, 协调者须适当地增加成本预算, 以实现较高的共识效用水平. 将专家个体的风险态度分为风险追求型、风险规避型, 协调者的风险态度分为风险追求型、风险中立型、风险规避型, 有 6 种不同风险态度组合. 在一定预算限制下, 可构建以下 6 类共识模型:

1) 当专家和协调者均为风险追求型时, 以最大化 δ 为目标, 可构建如下模型:

$$\begin{aligned} \max & \delta. \\ \text{s.t.} & \\ M_{P1}: & \delta \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{I_i^* - I_i^{Ls}}{I_i^{Us} - I_i^{Ls}}, s \in T. \\ M_{P2}: & \delta \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{I_i^* - \min\{I_i^{Ls}, s \in T\}}{\max\{I_i^{Us}, s \in T\} - \min\{I_i^{Ls}, s \in T\}}. \\ M_{P3}: & \left\{ \begin{array}{l} M_8: \sum_{s=1}^t \sum_{i=1}^n c^s |I_i^* - I_i^s| \leq B; \\ M_C: \delta \in [0, 1]. \end{array} \right. \end{aligned} \quad (8)$$

模型(8)简称为“风险追求-追求”模型, B 为事先预

设的成本, 它不能低于模型(7)中获得的成本预算基线, $\min\{I_i^{Ls}, s \in T\}$ 和 $\max\{I_i^{Us}, s \in T\}$ 表示取所有专家个体关于属性 c_i 的重要性指数下限最小值与上限最大值. 约束 M_{P1} 和 M_{P2} 表示专家个体与协调者均为风险追求型, 约束 M_8 表示预算不能超过预设的成本 B , 约束 M_{P3} 包含约束 M_8 、 M_C 和 δ 的取值范围.

2) 当专家为风险追求型, 协调者为风险中立型时, 以最大化 δ 为目标, 可构建如下模型:

$$\begin{aligned} \max & \delta. \\ \text{s.t.} & \\ & M_{P1}; M_{P3}; \\ M_{P4}: & \left\{ \begin{array}{l} \delta \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{I_i^* - \min\{I_i^{Ls}, s \in T\}}{\text{mid}\{I_i^{Ms}, s \in T\} - \min\{I_i^{Ls}, s \in T\}}, \\ \delta \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\max\{I_i^{Us}, s \in T\} - I_i^*}{\max\{I_i^{Us}, s \in T\} - \text{mid}\{I_i^{Ms}, s \in T\}}. \end{array} \right. \end{aligned} \quad (9)$$

模型(9)简称为“风险追求-中立”模型, $\text{mid}\{I_i^{Ms}, s \in T\} = \frac{1}{2} \min\{I_i^{Ls}, s \in T\} + \frac{1}{2} \max\{I_i^{Us}, s \in T\}$ 为重要性指数的下限最小值与上限最大值的中间值, 约束 M_{P4} 表示协调者的风险态度为风险中立型.

3) 当专家为风险追求型, 协调者为风险规避型时, 以最大化 δ 为目标, 可构建如下模型:

$$\begin{aligned} \max & \delta. \\ \text{s.t.} & \\ & M_{P1}; M_{P3}; \\ M_{P5}: & \delta \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\max\{I_i^{Us}, s \in T\} - I_i^*}{\max\{I_i^{Us}, s \in T\} - \min\{I_i^{Ls}, s \in T\}}. \end{aligned} \quad (10)$$

模型(10)简称为“风险追求-规避”模型, 约束 M_{P5} 表示协调者的风险态度为风险规避型.

4) 当专家为风险规避型, 协调者为风险追求型时, 以最大化 δ 为目标, 可构建如下模型:

$$\begin{aligned} \max & \delta. \\ \text{s.t.} & M_{P1}; M_{P3}; \\ M_{P6}: & \delta \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{I_i^{Us} - I_i^*}{I_i^{Us} - I_i^{Ls}}. \end{aligned} \quad (11)$$

模型(11)简称为“风险规避-追求”模型, 约束 M_{P6} 表示专家个体的风险态度为风险规避型.

5) 当专家为风险规避型, 协调者为风险中立型时, 以最大化 δ 为目标, 可构建如下模型:

$$\begin{aligned} \max & \delta; \\ \text{s.t.} & M_{P3}, M_{P4}, M_{P6}. \end{aligned} \quad (12)$$

模型(12)简称为“风险规避-中立”模型.

6) 一定预算限制下,专家和协调者均为风险规避型,以最大化 δ 为目标,可构建如下模型:

$$\begin{aligned} \max \delta; \\ \text{s.t. } M_{P3}, M_{P5}, M_{P6}. \end{aligned} \quad (13)$$

模型(13)简称为“风险规避-规避”模型. 求解上述6个模型可以获得最优群体共识属性重要性指数和共识效用水平. 从以上模型可以看出:当专家的风

险态度类型为风险追求型时,最优群体共识属性重要性指数更接近专家个体偏好下属性重要性指数的上限值;当专家风险态度为风险规避型时,最优群体共识属性重要性指数更接近专家个体偏好下属性重要性指数的下限值. 当增加考虑协调者的风险态度时,同样会影响群体共识属性重要性指数和共识效用水平,这里不再赘述. 本文所提方法的整体框架及流程如图1所示.

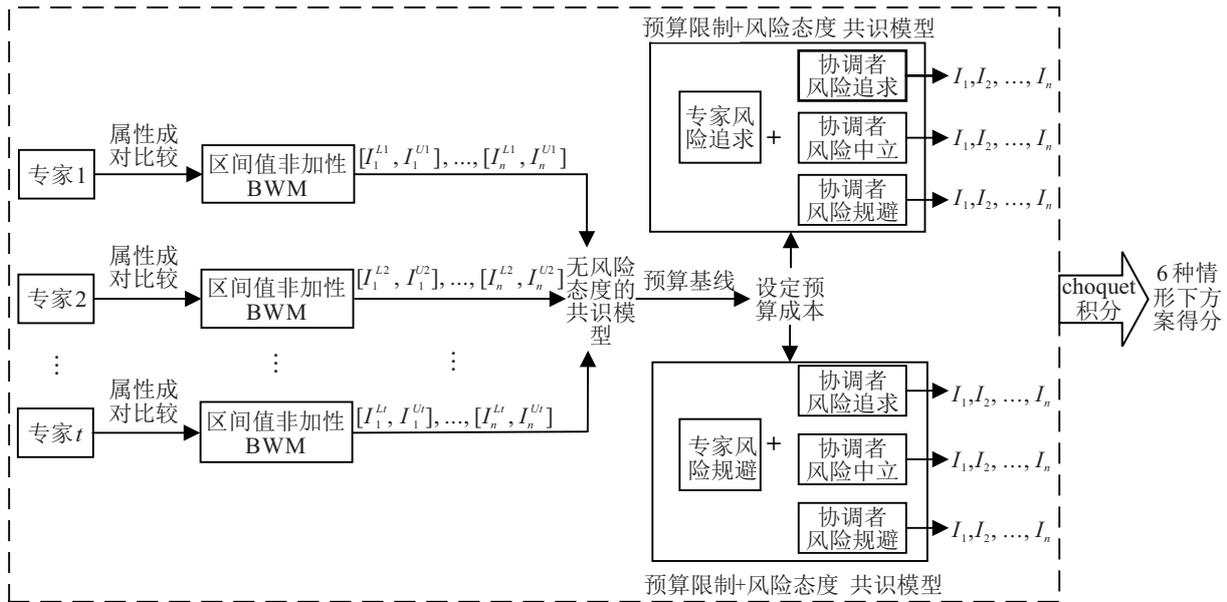


图1 本文所提方法流程

3 案例研究

3.1 案例描述

本节以文献[29]中“某电厂蒸汽阀系统中失效模式的风险评估”案例来说明所提模型的有效性. 蒸汽阀系统是在复杂工况下输送介质的关键部件,对电厂汽轮机运行的可靠性至关重要. 因而,须采取各种预防性措施,以提高蒸汽阀系统的可靠性. 为此,将本文所提方法应用于失效模式影响分析(FMEA)评估过程,以识别蒸汽阀系统的关键失效模式. 首先邀请3位具有不同背景的风险评估专家共同研讨,确定该系统的8种潜在失效模式(见表1).

表1 某电厂蒸汽阀系统的失效模式

编号	失效模式名称	失效影响
FM ₁	阀门关闭时间较长	转子超速及零部件故障
FM ₂	阀门未紧密关闭	汽轮机叶片腐蚀
FM ₃	阀轴周围的蒸汽泄露	造成浪费和热损失
FM ₄	阀门波动	阀门不能正常开闭
FM ₅	阀门堵塞	阀门不能开启和关闭
FM ₆	阀轴断裂	汽轮机组跳闸
FM ₇	阀轴支撑轴承故障	阀门系统运行异常
FM ₈	阀门系统噪音大	噪音污染,降低组件寿命

3.2 数据收集与预算基线获取

3位专家 E_1 、 E_2 、 E_3 分别依据发生频率(O)、不易探测度(D)和严重度(S)3个指标对8种失效模式进行评估. 数字1表示失效可能性最低,10表示失效可能性最高. 失效模式的风险评估矩阵如表2所示.

表2 3位专家的失效模式风险评估矩阵

编号	O			S			D		
	E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3
FM ₁	4	3	4	6	7	6	9	8	8
FM ₂	3	3	3	3	4	3	2	3	2
FM ₃	6	5	5	3	4	4	4	3	5
FM ₄	3	4	3	3	3	4	5	6	5
FM ₅	3	4	4	4	3	3	9	8	8
FM ₆	3	4	4	3	2	3	8	9	9
FM ₇	6	5	6	2	3	2	7	7	6
FM ₈	4	6	5	4	5	4	5	4	6

由于专家权重的确定不是本文研究的重点,事先将专家的权重向量设为 $w = (0.426, 0.332, 0.242)^T$,并采用加权平均算子将专家个体的评估矩阵集结为集体的评估矩阵. 专家根据各自的偏好选择最重要的指标和最不重要的指标,并将它们与其他指标进行

成对比较,结果如下:

$E_1 : BR = ([7, 9] [2, 4] 1), RW = (1 [2, 4] [7, 9]);$

$E_2 : BR = ([5, 7] [3, 4] 1), RW = (1 [3, 4] [5, 7]);$

$E_3 : BR = ([5, 8] 1 [2, 3]), RW = (1 [5, 8] [2, 3]).$

根据上述偏好信息,利用模型(6)可得每位专家关于指标的重要性指数,结果见表3.

表3 基于专家个体偏好下的指标重要性指数

编号	$E_1 (\xi = 0.001)$	$E_2 (\xi = 0.104)$	$E_3 (\xi = 0.026)$
<i>O</i>	[0.077, 0.087]	[0.086, 0.102]	[0.087, 0.103]
<i>S</i>	[0.173, 0.305]	[0.202, 0.240]	[0.543, 0.719]
<i>D</i>	[0.609, 0.690]	[0.616, 0.707]	[0.231, 0.284]

将 ξ 的值代入式(5)可知,3位专家的偏好信息均满足一致性要求.接下来,须获取预算基线.假设调整关于指标重要性指数意见需向专家 E_1 、 E_2 、 E_3 分别支付2、4、2个单位成本.专家个体偏好与群体共识的指标重要性指数的偏差不能超过0.5.将表3作为模型(7)的输入数据,可求解出预算基线为1.876.

3.3 风险态度讨论与结果分析

3.3.1 风险态度对指标重要性及共识效用水平影响

考虑到决策成员的风险态度,协调者需适当增加成本预算,以保证较高的群体共识效用水平.因而在预算基线1.876的基础上将成本增加为5.当专家为风险追求型,协调者改变风险态度时.利用模型(8)~(10)可得群体共识的指标重要性指数、关联指数、莫比乌斯容量和共识效用水平 δ ,结果见表4.

表4 预算限制下,专家为风险追求型,协调者改变风险态度的计算结果

类别	共识效用水平	符号	<i>O</i>	<i>S</i>	<i>D</i>	<i>OD</i>	<i>OS</i>	<i>DS</i>
风险追求	$\delta = 1$	I^*	0.087	0.297	0.616	0.174	0	0.420
		m	0	0	0.406	0.174	0	0.420
风险中立	$\delta = 0.891$	I^*	0.094	0.282	0.624	0.187	0	0.377
		m	0	0	0.436	0.187	0	0.377
风险规避	$\delta = 0.587$	I^*	0.082	0.261	0.657	0.164	0	0.359
		m	0	0	0.477	0.164	0	0.359

从以上结果可以看出:1)当协调者为风险追求型时,指标*O*的群体共识重要性指数高于所有专家个体的区间上限,指标*D*和*S*则在满足重要性指数归一化的条件下更趋向于区间上限;当协调者为风险中立型时,指标*O*、*D*和*S*的群体共识重要性指数更趋向于区间中值;当协调者为风险规避型时,指标*O*、*D*和*S*的群体共识重要性指数则更趋向于区间下限.这里指标*S*的重要性指数之所以会略微高于“风险追求-追求”和“风险追求-中立”模型,是因为在满

足效用水平最大化的情况下,指标*O*和*S*的重要性指数变小了,则必然会导致指标*S*的重要性指数略微增加,但仍在合理的范围之内.就模型(8)~(10)的最优目标解而言,当协调者与专家个体的风险态度差异变大时,群体的共识效用水平呈下降趋势,该结果与实际相符.2)模型(11)~(13)的结果分析与上述相似,这里不再赘述.

将6个模型所获得的指标重要性指数分别代入式(3),可计算出失效模式的得分(见图2).图2表明,当专家为风险追求型时,失效模式的得分明显比专家为风险规避型时要高,这一结果也符合实际情况.虽然不同风险态度下失效模式的得分有所不同,但均得出失效模式FM₁出现失效的可能性最大.因此,须重点关注失效模式FM₁.

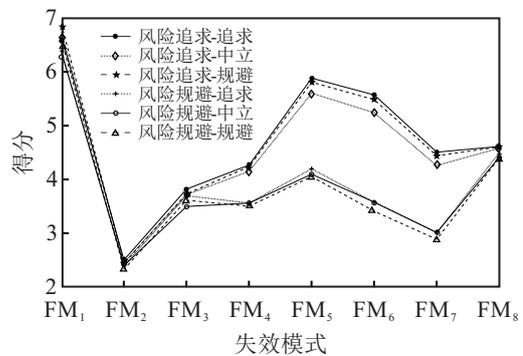


图2 失效模式得分

3.3.2 方法对比

为了更好地说明在计算属性重要性指数(权重)时考虑属性关联关系和决策成员风险态度的必要性,将本文提出的方法与文献[20, 30-31]的研究进行对比,结果如表5所示.对比的方法可以直接或者稍加调整应用于案例.由于本文提出的方法包含6个共识模型,对应于6种不同的计算结果,选取协调者为风险中立的两种情况进行对比.

表5的结果表明,使用不同的BWM方法可以得到不同的属性权重值.当专家为风险追求型时,本文提出的方法得到的失效模式的排序结果与前述3种方法有所差别.这是由于它们均未考虑属性间的关联关系,而本文提出的方法考虑了这一因素.此外,当专家的风险态度为风险规避时,失效模式的排序较风险追求型时有了明显的变化,这说明决策成员的心理行为对属性重要性指数产生的影响会显著地影响失效模式的排序.结合3.3.1节的分析可知,本文提出的方法进一步扩展了BWM方法的应用场景,增加了模型的灵活性,丰富了结果的多样性,适用于更为复杂的决策情境.

表5 方法对比分析

方法	属性重要性的确定方法	不确定性环境	属性关联	风险态度	属性权重值	失效模式的排序结果
文献[30]	BWM-加权平均方法	否	否	否	(0.045, 0.35, 0.605)	FM ₁ > FM ₅ > FM ₆ > FM ₇ > FM ₈ > FM ₄ > FM ₃ > FM ₂
文献[31]	考虑机会约束的BWM方法	是	否	否	(0.131, 0.298, 0.571)	FM ₁ > FM ₅ > FM ₆ > FM ₇ > FM ₈ > FM ₄ > FM ₃ > FM ₂
文献[20]	BWM的共识方法	是	否	否	(0.09, 0.3, 0.61)	FM ₁ > FM ₅ > FM ₆ > FM ₇ > FM ₈ > FM ₄ > FM ₃ > FM ₂
本文方法	BWM的共识方法	是	是	是	(0.094, 0.282, 0.624)	风险追求-中立: FM ₁ > FM ₅ > FM ₆ > FM ₈ > FM ₇ > FM ₄ > FM ₃ > FM ₂
					(0.053, 0.422, 0.525)	风险规避-中立: FM ₁ > FM ₈ > FM ₃ > FM ₅ > FM ₇ > FM ₄ > FM ₂ > FM ₆

4 结论

本文提出了预算限制下考虑决策成员风险态度的区间值非加性BWM共识模型,具有重要的理论意义和实践意义. 首先,为了在不确定环境中处理属性的关联关系,提出了区间值非加性BWM方法. 该方法既能体现专家偏好比较时的不确定性,又能很好地处理属性关联关系. 其次,采用共识驱动的方法获取群体共识的属性重要性指数可以很好地消除不同专家关于属性重要性的偏好差异,克服了因使用传统聚合算子而导致专家对最终结果不认可的局限性. 最后,在关于属性重要性的共识达成过程中,通过增加成本预算以实现群体共识效用水平最大化的目标,充分考虑了决策成员风险态度对群体共识属性重要性指数的影响,使最终结果尽可能地与决策成员的心理行为保持一致. 案例分析的结果表明,专家和协调者的不同风险态度对群体共识的属性重要性指数与共识效用水平具有重要作用. 因此,在共识决策之前,决策成员之间须进行充分的沟通,以提高共识满意度. 值得注意的是,本文提出的BWM共识模型仅考虑了个体偏好下与群体共识的属性重要性指数的偏差限制,未来的研究可以增加考虑专家个体之间的偏差限制. 此外,还可以将本文方法进一步扩展到语言环境下的大群体决策.

参考文献(References)

[1] Saaty T L. Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary[J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 145(1): 85-91.

[2] Saaty T L. Decision making—The analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP)[J]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2004, 13(1): 1-35.

[3] Danielson M, Ekenberg L. An improvement to swing techniques for elicitation in MCDM methods[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2019, 168: 70-79.

[4] 楚俊峰, 刘议聪, 王应明. 考虑社会网络邻接关系的群体判断矩阵决策方法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(4): 983-992.
(Chu J F, Liu Y C, Wang Y M. Group preference relations decision making approach based on social network adjacency relations[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(4): 983-992.)

[5] 杨洪涛, 李海燕. Warshal I-ANP算法下创业投资家对创业者信任的动态考量因素研究[J]. *科技进步与对策*, 2018, 35(16): 129-136.
(Yang H T, Li H Y. Research on dynamic factors of venture capitalists' trust on entrepreneurs based on warshall-ANP[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2018, 35(16): 129-136.)

[6] Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method[J]. *Omega*, 2015, 53: 49-57.

[7] Dong J Y, Wan S P, Chen S M. Fuzzy best-worst method based on triangular fuzzy numbers for multi-criteria decision-making[J]. *Information Sciences*, 2021, 547: 1080-1104.

[8] Mi X M, Liao H C. An integrated approach to multiple criteria decision making based on the average solution and normalized weights of criteria deduced by the hesitant fuzzy best worst method[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 133: 83-94.

[9] 耿秀丽, 周青超. 基于概率语言BWM与PROMETHEE II的多准则决策方法[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(6): 124-129.
(Geng X L, Zhou Q C. Multi criteria decision making method based on probabilistic language BWM and PROMETHEE II[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(6): 124-129.)

[10] 贾凡, 王兴元. 基于粗糙数的BWM-TOPSIS多准则群决策方法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(10): 1915-1920.
(Jia F, Wang X Y. BWM-TOPSIS multi-criteria group decision-making method based on rough number[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(10): 1915-1920.)

[11] Wu Q, Zhou L G, Chen Y, et al. An integrated approach to green supplier selection based on the interval type-2

- fuzzy best-worst and extended VIKOR methods[J]. *Information Sciences*, 2019, 502: 394-417.
- [12] Mi X, Tang M, Liao H, et al. The state-of-the-art survey on integrations and applications of the best worst method in decision making: Why, what, what for and what's next?[J]. *Omega*, 2019, 87: 205-225.
- [13] Grabisch M. The application of fuzzy integrals in multicriteria decision making[J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 89(3): 445-456.
- [14] 徐选华, 余艳粉. 大群体应急决策中考虑属性关联的偏好信息融合方法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(10): 2537-2546.
(Xu X H, Yu Y F. Preference information fusion method of large groups emergency decision-making based on attributes association[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(10): 2537-2546.)
- [15] Liang Y Y, Ju Y B, Tu Y, et al. Nonadditive best-worst method: Incorporating criteria interaction using the Choquet integral[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2022: 1-12.
- [16] 董鹏宇, 王红卫, 陈游. 区间条件下基于GRA和TOPSIS的辐射源威胁评估[J]. *控制与决策*, 2021, 36(6): 1516-1522.
(Dong P Y, Wang H W, Chen Y. Combining TOPSIS and GRA for emitter threat evaluation with interval number[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(6): 1516-1522.)
- [17] 刘金培, 杨宏伟, 陈华友, 等. 基于交叉效率DEA与群体共识的区间乘性语言偏好关系群决策[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(2): 190-198.
(Liu J P, Yang H W, Chen H Y, et al. Group decision making with interval multiplicative linguistic preference relations based on cross-efficiency DEA and group consensus[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(2): 190-198.)
- [18] 张恒杰, 王芳, 董庆兴, 等. 群体共识决策的研究进展与展望[J]. *电子科技大学学报: 社科版*, 2021, 23(2): 26-37.
(Zhang H J, Wang F, Dong Q X, et al. Consensus in group decision making: Research progress and prospect[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China: Social Sciences Edition*, 2021, 23(2): 26-37.)
- [19] 张发明, 朱姝琪. 基于EDAS和共识模型的动态概率语言多属性群决策方法[J]. *控制与决策*, 2023, 1329: 1-8.
(Zhang F M, Zhu S Q. A dynamic probabilistic linguistic multi-attribute group decision making method based on EDAS and consensus model[J]. *Control and Decision*, 2023, 1329: 1-8.)
- [20] Licerán-Gutiérrez A, Ortega-Rodríguez C, Moreno-Albarracín A L, et al. A linguistic group best-worst method for measuring good governance in the third sector: A Spanish case study[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2022, 24(5): 2133-2156.
- [21] Qin J D, Ma X Y, Liang Y Y. Building a consensus for the best-worst method in group decision-making with an optimal allocation of information granularity[J]. *Information Sciences*, 2023, 619: 630-653.
- [22] Gong Z W, Xu X X, Lu F L, et al. On consensus models with utility preferences and limited budget[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 35: 840-849.
- [23] Gong Z W, Xu X X, Zhang H H, et al. The consensus models with interval preference opinions and their economic interpretation[J]. *Omega*, 2015, 55: 81-90.
- [24] Murofushi T, Sugeno M. An interpretation of fuzzy measures and the Choquet integral as an integral with respect to a fuzzy measure[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1989, 29(2): 201-227.
- [25] Marichal J L. Aggregation of interacting criteria by means of the discrete choquet integral[M]. *Aggregation Operators*. Heidelberg, 2002: 224-244.
- [26] Grabisch M. k -order additive discrete fuzzy measures and their representation[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, 92(2): 167-189.
- [27] Sugihara K, Ishii H, Tanaka H. Interval priorities in AHP by interval regression analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 158(3): 745-754.
- [28] Ren J Z, Ren X S, Dong L C, et al. Multiactor multicriteria decision making for life cycle sustainability assessment under uncertainties[J]. *AIChE Journal*, 2018, 64(6): 2103-2112.
- [29] Wang W Z, Liu X W, Chen X Q, et al. Risk assessment based on hybrid FMEA framework by considering decision maker's psychological behavior character[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 136: 516-527.
- [30] Safarzadeh S, Khansefid S, Rasti-Barzoki M. A group multi-criteria decision-making based on best-worst method[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 126: 111-121.
- [31] Qu S J, Xu Y, Wu Z, et al. An interval-valued best-worst method with normal distribution for multi-criteria decision-making[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(2): 1771-1785.

作者简介

肖婧梅(1989—), 女, 博士生, 从事群决策、模糊决策分析等研究, E-mail: 20211124005@nuist.edu.cn;

蔡玫(1980—), 女, 教授, 博士生导师, 从事模糊决策分析、应急协同决策等研究, E-mail: caimei@nuist.edu.cn;

高宇(1998—), 女, 硕士生, 从事模糊决策分析的研究, E-mail: m13583696867@163.com;

周坤(1993—), 男, 博士生, 从事群决策、模糊决策分析等研究, E-mail: zk199311@163.com.