

专家权重完全未知的区间直觉不确定语言多属性群决策方法

庞继芳¹ 宋 鹏²

(山西大学计算机与信息技术学院 太原 030006)¹ (山西大学经济与管理学院 太原 030006)²

摘 要 针对专家权重信息完全未知且属性值为区间直觉不确定语言数的模糊多属性群决策问题,提出一种基于混合权重信息及决策者风险态度的群决策分析方法。在定义区间直觉不确定语言数差异度的基础上,分别利用专家在方案评价上的贴近度以及方案排序上的一致度来计算两类专家权重,并基于均衡度得到专家的客观综合权重。进而通过融合专家客观综合权重以及基于相似度的个体综合评价权重,提出一种混合加权集结方法,从而得到方案的群体综合评价,并通过定义带有风险态度因子的期望值与精确函数实现对方案的比较和排序。最后,通过实例分析证明所提方法的有效性和合理性。

关键词 区间直觉不确定语言数,多属性群决策,专家权重,均衡度,混合权重信息,风险态度

中图分类号 TP181 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.01.007

Multi-attribute Group Decision Making Method for Interval-valued Intuitionistic Uncertain Language with Completely Unknown Experts' Weights

PANG Ji-fang¹ SONG Peng²

(School of Computer and Information Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)¹

(School of Economic and Management, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)²

Abstract For the multi-attribute group decision making problems with completely unknown experts' weights in which the attribute values take the form of interval-valued intuitionistic uncertain linguistic variables, this paper investigated a group decision analysis method based on hybrid weight information and decision maker's risk attitude. On the basis of defining the difference degree between two interval-valued intuitionistic uncertain linguistic variables, two kinds of experts' weights were calculated by using the closeness degree in evaluation and consistency degree in ranking respectively. Then based on the equilibrium degree, the objective comprehensive weights of experts were obtained. By fusing the objective comprehensive weights of experts and the weights of individual comprehensive evaluation values based on similarity, a hybrid weighted aggregation method was proposed to obtain the group comprehensive evaluation values. Furthermore, by defining the expected value and accuracy function with risk attitude factor, the comparison and ranking of the alternatives were completed. Finally, an illustrative example was given to prove the effectiveness and rationality of the above method.

Keywords Interval-valued intuitionistic uncertain linguistic variables, Multi-attribute group decision making, Experts' weights, Equilibrium degree, Hybrid weight information, Risk attitude

多属性群决策是社会、经济、工程、管理、军事等领域经常采用的一种决策分析方法,可以为决策者提供较为科学、客观、准确的决策结果。专家赋权作为群决策过程中的一个重要环节,直接影响到整体决策结果的合理性。目前,学者们越来越重视对专家客观权重信息的挖掘和研究,并提出了一系列新颖、有效的权重计算方法,如基于扩展 TOPSIS(理想点法)的方法^[1-3]、基于距离或相似度的优化方法^[4]、基于投影的方法^[5-6]等。随着直觉模糊集以及区间直觉模糊集的提出^[7-8],具有不确定性、不完全性的模糊多属性群决策问题已

成为当前研究的一个重要热点^[9-10]。文献[11]通过定义正、负理想矩阵,利用扩展的 TOPSIS 方法给出基于相对贴近度的专家权重确定方法。文献[4]针对专家权重部分已知和完全未知两种情形下的直觉模糊多属性群决策问题,构造了基于距离的权重优化模型。文献[12]针对三角直觉模糊数多属性群决策问题,利用基于证据理论的距离公式定义了可靠度,并据此确定专家权重。文献[13]针对直觉模糊多属性群决策问题,基于群体评价一致性和群体排序一致性构造了确定专家权重的双目标规划模型。

收稿日期:2017-03-03 返修日期:2017-06-24 本文受国家自然科学基金项目(61573229,61402272),山西省青年基金项目(201701D221098)资助。

庞继芳(1980—),女,博士,讲师,CCF 会员,主要研究方向为数据挖掘与智能决策,E-mail:purplepjf@sxu.edu.cn(通信作者);宋 鹏(1979—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为投融资决策、数据挖掘、粒计算,E-mail:songpeng@sxu.edu.cn。

然而,在现实的决策中,人们往往更倾向于用自然语言^[14-15]、不确定语言^[16-17]或多粒度语言^[18-19]等偏好信息对决策对象进行评估。2012年刘培德将语言信息与直觉模糊数、区间直觉模糊数^[20-21]相结合,对直觉语言数^[22]、直觉不确定语言数^[23]以及区间直觉不确定语言数^[24]的定义和集成等问题进行了一系列的研究,并给出了专家权重已知情形下的多属性群决策方法。文献^[25]针对专家权重信息部分已知的区间直觉不确定语言多属性群决策问题,建立了基于 shapley 函数和信息熵的专家权重优化模型。区间直觉不确定语言数集合了区间直觉模糊数和不确定语言变量^[26]的特点,可以更加准确、真实地反映专家的实际偏好。因此,研究基于区间直觉不确定语言数的多属性群决策方法具有重要的理论和应用价值。目前相关研究主要集中在集成算子及其相关性质的讨论上^[24-25],对于如何客观、合理地设置专家权重缺乏细致、深入的探讨。此外,现有研究大多基于风险中性的假设。然而,实际决策环境的复杂性和不确定性,使得决策者往往表现出有限理性及不同的风险态度(风险追求型、风险中立型和风险规避型)^[27-28],决策者的风险态度取向直接影响到整个决策行为。因此,研究考虑决策者风险态度的区间直觉不确定语言多属性群决策方法有助于进一步提高决策的灵活性和实用性。

综上所述,本文将在文献^[24]的基础上,针对专家权重完全未知的情形对决策者风险态度的区间直觉不确定语言多属性群决策问题进行深入研究。在定义区间直觉不确定语言数差异度的基础上,从评价价值和方案序两个方面对专家决策信息进行全面的分析和比较,建立专家客观综合权重的计算模型,并结合相似度对专家个体综合评价价值进行混合加权集结,进而通过引入决策者风险态度因子实现对方案的比较和排序。最后,通过实例分析验证所提方法的有效性。

1 区间直觉不确定语言数的相关概念

1.1 区间直觉模糊集

定义 1^[7] 设 X 为一非空集合,则称 $A = \{\langle x, u_A(x), v_A(x) \mid x \in X \rangle\}$ 为直觉模糊集,其中, $u_A(x)$ 和 $v_A(x)$ 分别为 X 中元素 x 属于 X 的隶属度和非隶属度, $u_A(x) \in [0, 1]$, $v_A(x) \in [0, 1]$,且满足条件 $0 \leq u_A(x) + v_A(x) \leq 1$ 。

此外,定义 $\pi_A(x) = 1 - u_A(x) - v_A(x)$,表示直觉模糊集 X 中元素 x 属于 X 的犹豫度。特别地,当 $\pi_A(x) = 0$ 时,直觉模糊集 X 退化为传统模糊集。

定义 2^[8] 设 X 为一非空集合,则称 $\tilde{A} = \{\langle x, \tilde{u}_A(x), \tilde{v}_A(x) \mid x \in X \rangle\} = \{\langle x, (u_A^L(x), u_A^U(x)), (v_A^L(x), v_A^U(x)) \mid x \in X \rangle\}$ 为区间直觉模糊集,其中, $\tilde{u}_A(x) \in [0, 1]$, $\tilde{v}_A(x) \in [0, 1]$,且满足条件 $0 \leq u_A^U(x) + v_A^U(x) \leq 1$ 。

特别地,当 $\tilde{u}_A(x) = u_A^L(x) = u_A^U(x)$ 且 $\tilde{v}_A(x) = v_A^L(x) = v_A^U(x)$ 时,区间直觉模糊集退化为直觉模糊集。

1.2 不确定语言变量

设 $S = \{s_\alpha \mid \alpha = 0, 1, \dots, l\}$ 表示语言术语集, l 为偶数,且 S 满足下列条件^[18]:

- 1) 若 $\alpha > \beta$, 则 $s_\alpha > s_\beta$;
- 2) 存在负算子 $neg(s_\alpha) = s_\beta$, 使得 $\alpha + \beta = l$;

3) 若 $s_\alpha > s_\beta$, 则 $\max\{s_\alpha, s_\beta\} = s_\alpha$;

4) 若 $s_\alpha < s_\beta$, 则 $\max\{s_\alpha, s_\beta\} = s_\beta$ 。

例如,当 $l = 6$ 时, S 可取 $S = \{s_0 = \text{extremely poor}, s_1 = \text{very poor}, s_2 = \text{poor}, s_3 = \text{fair}, s_4 = \text{good}, s_5 = \text{very good}, s_6 = \text{extremely good}\}$ 。

为了便于计算和避免丢失决策信息, $S = \{s_\alpha \mid \alpha = 0, 1, \dots, l\}$ 可拓展为一个连续的语言术语集 $\bar{S} = \{s_\alpha \mid \alpha \in [0, q]\}$, 其中 $q (q > l)$ 是一个充分大的自然数。拓展集合 \bar{S} 仍满足上述条件^[29]。为了便于表达,常用 $I(s_\alpha)$ 表示语言术语 s_α 的术语指标,即 $I(s_\alpha) = \alpha$ 。

定义 3^[26] 设 $\tilde{s} = [s_\alpha, s_\beta]$, $s_\alpha, s_\beta \in S$ 且 $\alpha \leq \beta$, s_α 和 s_β 分别是 \tilde{s} 的下限和上限,则称 \tilde{s} 为不确定语言变量。

1.3 区间直觉不确定语言集

定义 4^[24] 设 $\tilde{s}_x = [s_{\theta(x)}, s_{\tau(x)}] \in \bar{S}$, X 为一给定论域,则称 $\tilde{A} = \{\langle x, (\tilde{s}_x, \tilde{u}_A^L(x), \tilde{v}_A^L(x)) \mid x \in X \rangle\} = \{\langle x, ([s_{\theta(x)}, s_{\tau(x)}], [u_A^L(x), u_A^U(x)], [v_A^L(x), v_A^U(x)]) \mid x \in X \rangle\}$

为区间直觉不确定语言集,其中 $\theta(x) = I(s_{\theta(x)})$, $\tau(x) = I(s_{\tau(x)})$ 分别为不确定语言变量 \tilde{s}_x 的下限和上限所对应的术语指标。 $\tilde{u}_A^L(x) \in [0, 1]$, $\tilde{v}_A^L(x) \in [0, 1]$ 分别表示 x 隶属于和非隶属于不确定语言评价价值 $\tilde{s}_x = [s_{\theta(x)}, s_{\tau(x)}]$ 的程度,且满足条件 $0 \leq u_A^U(x) + v_A^U(x) \leq 1$ 。

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_A^L(x) &= [1 - u_A^U(x) - v_A^U(x), 1 - u_A^L(x) - v_A^L(x)] \\ &= [1 - u_A^U(x) - v_A^U(x), 1 - u_A^L(x) - v_A^L(x)] \end{aligned}$$

表示 x 属于不确定语言评价价值 $\tilde{s}_x = [s_{\theta(x)}, s_{\tau(x)}]$ 的犹豫度。

定义 5^[24] 设 $\tilde{A} = \{\langle x, ([s_{\theta(x)}, s_{\tau(x)}], [u_A^L(x), u_A^U(x)], [v_A^L(x), v_A^U(x)]) \mid x \in X \rangle\}$ 为区间直觉不确定语言集,则称 $\langle [s_{\theta(x)}, s_{\tau(x)}], [u_A^L(x), u_A^U(x)], [v_A^L(x), v_A^U(x)] \rangle$ 为一个区间直觉不确定语言数。

1.4 区间直觉不确定语言数大小的比较

定义 6^[24] 设 $\tilde{a}_1 = \langle [s_{\theta(\tilde{a}_1)}, s_{\tau(\tilde{a}_1)}], [u^L(\tilde{a}_1), u^U(\tilde{a}_1)], [v^L(\tilde{a}_1), v^U(\tilde{a}_1)] \rangle$ 为区间直觉不确定语言数,则称 $E(\tilde{a}_1) = \frac{S^{(\theta(\tilde{a}_1) + \tau(\tilde{a}_1)) \times (u^L(\tilde{a}_1) + u^U(\tilde{a}_1) + 2 - v^L(\tilde{a}_1) - v^U(\tilde{a}_1))}}{8}$ 为 \tilde{a}_1 的期望值。

定义 7^[24] 设 $\tilde{a}_1 = \langle [s_{\theta(\tilde{a}_1)}, s_{\tau(\tilde{a}_1)}], [u^L(\tilde{a}_1), u^U(\tilde{a}_1)], [v^L(\tilde{a}_1), v^U(\tilde{a}_1)] \rangle$ 为区间直觉不确定语言数,则称 $H(\tilde{a}_1) = \frac{S^{(\theta(\tilde{a}_1) + \tau(\tilde{a}_1)) \times (u^L(\tilde{a}_1) + u^U(\tilde{a}_1) + v^L(\tilde{a}_1) + v^U(\tilde{a}_1))}}{4}$ 为 \tilde{a}_1 的精确函数。

区间直觉不确定语言数的排序方法如下:设 \tilde{a}_1 和 \tilde{a}_2 是任意两个区间直觉不确定语言数,则有^[24]:

- 1) 若 $E(\tilde{a}_1) > E(\tilde{a}_2)$, 则 $\tilde{a}_1 > \tilde{a}_2$;
- 2) 若 $E(\tilde{a}_1) = E(\tilde{a}_2)$, 那么
 - 若 $H(\tilde{a}_1) > H(\tilde{a}_2)$, 则 $\tilde{a}_1 > \tilde{a}_2$;
 - 若 $H(\tilde{a}_1) = H(\tilde{a}_2)$, 则 $\tilde{a}_1 = \tilde{a}_2$ 。

1.5 区间直觉不确定语言加权算术的平均算子

定义 8^[24] 设 $\tilde{a}_i = \langle [s_{\theta(\tilde{a}_i)}, s_{\tau(\tilde{a}_i)}], [u^L(\tilde{a}_i), u^U(\tilde{a}_i)], [v^L(\tilde{a}_i), v^U(\tilde{a}_i)] \rangle (i = 1, 2, \dots, n)$ 是一组区间直觉不确定语言数,设 $IVIULWAA: \Omega^n \rightarrow \Omega$, 如果:

$$\text{IVIULWAA}_{\omega}(\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n)$$

$$= \sum_{i=1}^n \omega_i \tilde{a}_i$$

$$= \langle [s_{\sum_{i=1}^n \omega_i \theta(\tilde{a}_i)}, s_{\sum_{i=1}^n \omega_i \tau(\tilde{a}_i)}], [1 - \prod_{i=1}^n (1 - u^L(\tilde{a}_i))^{\omega_i}, 1 - \prod_{i=1}^n (1 - u^U(\tilde{a}_i))^{\omega_i}] \rangle$$

$$[\prod_{i=1}^n (v^L(\tilde{a}_i))^{\omega_i}, \prod_{i=1}^n (v^U(\tilde{a}_i))^{\omega_i}] \rangle$$

其中, Ω 是区间直觉不确定语言集, $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 是 \tilde{a}_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的加权向量, 且 $\omega_i \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ 。称 IVIULWAA 为区间直觉不确定语言的加权算术平均算子。

2 基于区间直觉不确定语言数的多属性群决策方法

2.1 问题描述

在一个基于区间直觉不确定语言数的多属性群决策问题中, 设 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 表示方案集, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 表示属性集, $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 表示属性权重向量(已知), 且 $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \geq 0$; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$ 为群决策中的专家集, $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p)^T$ 表示专家权重向量(未知), 且 $\sum_{k=1}^p \lambda_k = 1$ 。专家 e_k 对决策方案 A_i 在属性 C_j 下的评价用区间直觉不确定语言数表示为 $\tilde{R}_{ij}^k = \langle [a_{ij}^L, a_{ij}^U], [u_{ij}^L, u_{ij}^U], [v_{ij}^L, v_{ij}^U] \rangle$, 专家 e_k 给出的决策矩阵为 $\tilde{R}^k = [\tilde{R}_{ij}^k]_{m \times n}$, 其中, a_{ij}^L 和 a_{ij}^U 是语言术语集 $S = \{s_\alpha | \alpha = 0, 1, \dots, l\}$ 中的元素, 且有 $a_{ij}^L \leq a_{ij}^U, 0 \leq u_{ij}^L \leq 1, 0 \leq v_{ij}^L \leq 1, u_{ij}^L \leq u_{ij}^U, v_{ij}^L \leq v_{ij}^U, u_{ij}^L + v_{ij}^L \leq 1$ 。本文将在给出专家客观综合权重计算方法的基础上, 提出一种考虑决策者风险态度的多属性群决策方法来对方案进行排序并择优。

首先给出度量两个区间直觉不确定语言数之间差异程度的公式。

定义 9 两个区间直觉不确定语言数 $\tilde{a}_1 = \langle [s_{\theta(\tilde{a}_1)}, s_{\tau(\tilde{a}_1)}], [u^L(\tilde{a}_1), u^U(\tilde{a}_1)], [v^L(\tilde{a}_1), v^U(\tilde{a}_1)] \rangle$ 和 $\tilde{a}_2 = \langle [s_{\theta(\tilde{a}_2)}, s_{\tau(\tilde{a}_2)}], [u^L(\tilde{a}_2), u^U(\tilde{a}_2)], [v^L(\tilde{a}_2), v^U(\tilde{a}_2)] \rangle$ 之间的差异度可定义为:

$$d(\tilde{a}_1, \tilde{a}_2) = \left(\frac{1}{6} \left(\left(\frac{\theta(\tilde{a}_1) - \theta(\tilde{a}_2)}{l} \right)^2 + \left(\frac{\tau(\tilde{a}_1) - \tau(\tilde{a}_2)}{l} \right)^2 + (u^L(\tilde{a}_1) - u^L(\tilde{a}_2))^2 + (u^U(\tilde{a}_1) - u^U(\tilde{a}_2))^2 + (v^L(\tilde{a}_1) - v^L(\tilde{a}_2))^2 + (v^U(\tilde{a}_1) - v^U(\tilde{a}_2))^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

不难证明, $0 \leq d(\tilde{a}_1, \tilde{a}_2) \leq 1$ 。

2.2 专家权重的确定

在属性权重 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 已知的情况下, 利用 IVIULWAA 算子对方案进行集结, 可以得到各专家关于各方案的个体综合评价 $\tilde{R}^k = \sum_{j=1}^n \omega_j \tilde{R}_{ij}^k = \langle [a_{ik}^L, a_{ik}^U], [u_{ik}^L, u_{ik}^U], [v_{ik}^L, v_{ik}^U] \rangle$, 其中, $I(a_{ik}^L) = \sum_{j=1}^n \omega_j I(a_{ij}^L), I(a_{ik}^U) = \sum_{j=1}^n \omega_j I(a_{ij}^U), u_{ik}^L = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - u_{ij}^L)^{\omega_j}, u_{ik}^U = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - u_{ij}^U)^{\omega_j}, v_{ik}^L = \prod_{j=1}^n (v_{ij}^L)^{\omega_j}, v_{ik}^U = \prod_{j=1}^n (v_{ij}^U)^{\omega_j}$ 。

下面给出两种确定专家客观权重的方法。

2.2.1 基于贴近度的专家权重计算方法

基于贴近度的专家权重计算方法通过分析和比较单个专家与其余所有专家在方案个体综合评价大小上的贴近程度来计算专家权重。贴近度越大, 表明专家与群体关于评价值的共识程度越大, 应赋予该专家较大的权重。具体计算方法如下:

1) 确定方案 A_i 的正理想点 \tilde{R}_i^+ ($1 \leq i \leq m$)。

用 $\tilde{R}_i^+ = \langle [a_i^{L+}, a_i^{U+}], [u_i^{L+}, u_i^{U+}], [v_i^{L+}, v_i^{U+}] \rangle$ 表示方案 A_i 上的正理想点, 其中, $a_i^{L+} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p a_{ik}^L, a_i^{U+} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p a_{ik}^U, u_i^{L+} = 1 - \prod_{k=1}^p (1 - u_{ik}^L)^{1/p}, u_i^{U+} = 1 - \prod_{k=1}^p (1 - u_{ik}^U)^{1/p}, v_i^{L+} = \prod_{k=1}^p (v_{ik}^L)^{1/p}, v_i^{U+} = \prod_{k=1}^p (v_{ik}^U)^{1/p}, p$ 为专家个数。

2) 确定方案 A_i 上的左负理想点 \tilde{R}_i^- 及右负理想点 \tilde{R}_i^- ($1 \leq i \leq m$)。

用 $\tilde{R}_i^- = \langle [a_i^{L-}, a_i^{U-}], [u_i^{L-}, u_i^{U-}], [v_i^{L-}, v_i^{U-}] \rangle$ 表示方案 A_i 上的左负理想点, 其中, $a_i^{L-} = \min_{1 \leq k \leq p} \{a_{ik}^L\}, a_i^{U-} = \min_{1 \leq k \leq p} \{a_{ik}^U\}, u_i^{L-} = \min_{1 \leq k \leq p} \{u_{ik}^L\}, u_i^{U-} = \min_{1 \leq k \leq p} \{u_{ik}^U\}, v_i^{L-} = \max_{1 \leq k \leq p} \{v_{ik}^L\}, v_i^{U-} = \max_{1 \leq k \leq p} \{v_{ik}^U\}$ 。

用 $\tilde{R}_i^- = \langle [a_i^{L-}, a_i^{U-}], [u_i^{L-}, u_i^{U-}], [v_i^{L-}, v_i^{U-}] \rangle$ 表示方案 A_i 上的右负理想点, 其中, $a_i^{L-} = \max_{1 \leq k \leq p} \{a_{ik}^L\}, a_i^{U-} = \max_{1 \leq k \leq p} \{a_{ik}^U\}, u_i^{L-} = \max_{1 \leq k \leq p} \{u_{ik}^L\}, u_i^{U-} = \max_{1 \leq k \leq p} \{u_{ik}^U\}, v_i^{L-} = \min_{1 \leq k \leq p} \{v_{ik}^L\}, v_i^{U-} = \min_{1 \leq k \leq p} \{v_{ik}^U\}$ 。

3) 计算专家 e_k 关于方案个体综合评价的贴近度 s^k :

$$s^k = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m (d(\tilde{R}_i^k, \tilde{R}_i^-))^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^m (d(\tilde{R}_i^k, \tilde{R}_i^-))^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (d(\tilde{R}_i^k, \tilde{R}_i^+))^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^m (d(\tilde{R}_i^k, \tilde{R}_i^-))^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^m (d(\tilde{R}_i^k, \tilde{R}_i^-))^2}} \quad (2)$$

4) 计算专家 e_k 基于贴近度的客观权重:

$$\lambda_k^s = \frac{s^k}{\sum_{h=1}^p s^h} \quad (3)$$

2.2.2 基于一致度的专家权重计算方法

基于一致度的专家权重计算方法是通过分析和比较单个专家与其余所有专家关于个体综合评价在方案排序上的一致程度来计算专家权重。一致度越大表明专家与群体在方案排序上的共识程度越大, 应赋予该专家较大的权重。

用 $R^{k \geq}$ 表示在专家 e_k 下方案集 A 关于个体综合评价的优势关系, 即对 $\forall A_i, A_r \in A$, 若根据 1.4 节中给出的区间直觉不确定语言数的排序方法有 $\tilde{R}_i^k \geq \tilde{R}_r^k$, 则称 A_r 优于 A_i , 记作 $A_r R^{k \geq} A_i$ 。在专家 e_k 下方案 A_i 关于个体综合评价的优势类记作 $[A_i]^{k \geq} = \{A_r \in A | A_r R^{k \geq} A_i\}$ 。

定义 10 专家 e_k 与专家 e_h 之间关于个体综合评价在方案排序上的一致度定义为:

$$c_k^h = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|[A_i]^{k \geq} \cap [A_i]^{h \geq}|}{|[A_i]^{k \geq} \cup [A_i]^{h \geq}|} \quad (4)$$

其中, m 表示方案的总数。

性质 1(对称性) $c_k^k = c_k^k$ 。

性质 2(最小值) 若对 $\forall A_i \in A(1 \leq i \leq m)$, 有 $[A_i]^{k \geq} \cap [A_i]^{k \geq} = \{A_i\}$ 且 $[A_i]^{k \geq} \cup [A_i]^{k \geq} = A$, 则 c_k^k 达到最小值 $\frac{1}{m}$ 。

性质 3(最大值) 若对 $\forall A_i \in A(1 \leq i \leq m)$, 有 $[A_i]^{k \geq} = [A_i]^{k \geq}$, 则 c_k^k 达到最大值 1。

定义 11 专家 e_k 与其余所有专家之间关于个体综合评价在方案排序上的平均一致度定义为:

$$c^k = \frac{1}{p-1} \sum_{1 \leq h \leq p, h \neq k} c_h^k \quad (5)$$

由定义 11 可进一步得到专家 e_k 基于一致度的客观权重:

$$\lambda_k = \frac{c^k}{\sum_{h=1}^p c^h} \quad (6)$$

2.2.3 两类专家权重信息的综合

为了便于对两类专家权重信息进行比较和分析, 首先给出如下均衡度的定义。

定义 12 权重向量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p)^T$ 在分布上的均衡度定义为:

$$f(\lambda) = -\frac{1}{\log_2^p} \sum_{h=1}^p \lambda_h \log_2^h \quad (7)$$

不难证明, $0 < f(\lambda) < 1$ 。 $f(\lambda)$ 越大, 表明权重的分布越均衡。特别地, 当权重是等概率分布时, $f(\lambda)$ 达到最大值 1。

权重向量的均衡度越小, 表明该指标下专家的意见差异越大, 即该指标反映专家意见差异的能力越强; 权重向量的均衡度越大, 表明该指标下专家的意见差异越小, 即该指标反映专家意见差异的能力越弱。因此, 在对专家权重进行综合时, 分布越不均衡的权重向量在综合权重中占的比例越大; 反之, 则越小。根据均衡度的大小可实现对两类专家权重信息的客观综合, 具体计算方法如下。

1) 分别计算两类专家权重向量在分布上的均衡度: $f(\lambda^l)$ 和 $f(\lambda^c)$;

2) 计算比例系数:

$$\alpha = \frac{1/f(\lambda^c)}{1/f(\lambda^l) + 1/f(\lambda^c)} \quad (8)$$

3) 计算专家 e_k 的客观综合权重:

$$\lambda_k = \alpha \lambda_k^c + (1-\alpha) \lambda_k^l \quad (9)$$

此处的比例系数 α 也可根据实际需要或具体情况进行设定或调节。

2.3 个体综合评价值的混合加权集结方法

利用 IVIULWAA 算子及 2.2 节得到的专家客观综合权重, 可以得到 p 个专家的加权平均评价价值, 即

$$\bar{R}_i = \sum_{k=1}^p \lambda_k \bar{R}_i^k = \langle [\bar{a}_i^l, \bar{a}_i^c], [\bar{u}_i^l, \bar{u}_i^c], [\bar{v}_i^l, \bar{v}_i^c] \rangle$$

其中, $I(\bar{a}_i^l) = \sum_{k=1}^p \lambda_k I(a_{ik}^l)$, $I(\bar{a}_i^c) = \sum_{k=1}^p \lambda_k I(a_{ik}^c)$, $\bar{u}_i^l = 1 -$

$$E^\gamma(\bar{a}_1) = s_{((1-\gamma)\theta(\bar{a}_1) + \gamma \times c(\bar{a}_1)) \times ((1-\gamma)u^l(\bar{a}_1) + \gamma \times u^c(\bar{a}_1)) + 1 - (\gamma \times v^l(\bar{a}_1) + (1-\gamma) \times v^c(\bar{a}_1))} / 2$$

为 \bar{a}_1 在风险态度因子为 γ 时的期望值, 其中 γ 的选择取决于决策者的风险态度。若决策者是风险偏好的, 则 $\gamma > 0.5$; 若

$$\prod_{k=1}^p (1 - u_{ik}^l)^{\lambda_k}, \bar{u}_i^c = 1 - \prod_{k=1}^p (1 - u_{ik}^c)^{\lambda_k}, \bar{v}_i^l = \prod_{k=1}^p (v_{ik}^l)^{\lambda_k}, \bar{v}_i^c = \prod_{k=1}^p (v_{ik}^c)^{\lambda_k}。$$

为了得到更加合理的集结结果, 本文将通过计算 \bar{R}_i^k 与 \bar{R}_i 之间的相似度, 给出 \bar{R}_i^k 的权重信息, 并将其与专家客观综合权重相结合对个体综合评价 \bar{R}_i^k 进行混合加权集结, 从而得到方案集最终的群体综合评价。具体集结方法如下:

1) 计算专家 e_k 在方案 A_i 上的个体综合评价 \bar{R}_i^k 与群体加权平均评价 \bar{R}_i 之间的相似度。

$$s(\bar{R}_i^k, \bar{R}_i) = 1 - \frac{d(\bar{R}_i^k, \bar{R}_i)}{\sum_{h=1}^p d(\bar{R}_i^h, \bar{R}_i)} \quad (10)$$

2) 计算 \bar{R}_i^k 的权重。

$$\bar{\omega}_i^k = \frac{s(\bar{R}_i^k, \bar{R}_i)}{\sum_{h=1}^p s(\bar{R}_i^h, \bar{R}_i)} \quad (11)$$

对 $\forall i(1 \leq i \leq m)$, 有 $\sum_{k=1}^p \bar{\omega}_i^k = 1$ 。

由式(10)和式(11)可知, 若专家 e_k 关于方案 A_i 的个体综合评价 \bar{R}_i^k 靠近群体关于该方案的加权平均评价 \bar{R}_i , 则 \bar{R}_i^k 具有较大的权重; 若 \bar{R}_i^k 远离 \bar{R}_i , 则 \bar{R}_i^k 具有较小的权重。权重信息 $\bar{\omega}_i^k (1 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq p)$ 从更细的粒度更精确地刻画了各专家个体综合评价的重要程度。

3) 将专家客观综合权重 $\lambda_k (1 \leq k \leq p)$ 与 \bar{R}_i^k 的权重信息 $\bar{\omega}_i^k (1 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq p)$ 相融合, 实现对 \bar{R}_i^k 的混合加权集结, 从而得到专家群体关于各方案的综合评价 $\bar{R}_i (1 \leq i \leq m)$ 。

$$\bar{R}_i = \sum_{k=1}^p \lambda_k \bar{\omega}_i^k \bar{R}_i^k = p \sum_{k=1}^p \lambda_k \bar{\omega}_i^k \bar{R}_i^k = \langle [a_i^l, a_i^c], [u_i^l, u_i^c], [v_i^l, v_i^c] \rangle \quad (12)$$

其中, $I(a_i^l) = p \sum_{k=1}^p \lambda_k \bar{\omega}_i^k I(a_{ik}^l)$, $I(a_i^c) = p \sum_{k=1}^p \lambda_k \bar{\omega}_i^k I(a_{ik}^c)$, $u_i^l = 1 - \prod_{k=1}^p (1 - u_{ik}^l)^{(\lambda_k \bar{\omega}_i^k)}$, $u_i^c = 1 - \prod_{k=1}^p (1 - u_{ik}^c)^{(\lambda_k \bar{\omega}_i^k)}$, $v_i^l = \prod_{k=1}^p (v_{ik}^l)^{(\lambda_k \bar{\omega}_i^k)}$, $v_i^c = \prod_{k=1}^p (v_{ik}^c)^{(\lambda_k \bar{\omega}_i^k)}$ 。

可以看出, 上述集结过程无需对个体综合评价 \bar{R}_i^k 进行排序, 且无需引入额外的位置权重向量, 既考虑了粗粒度的专家权重信息, 又考虑了细粒度的个体综合评价权重信息, 集结方式更为客观, 结果更为合理。

2.4 基于决策者风险态度的方案比较与排序方法

在实际决策过程中, 不同的决策者对待风险可能会持不同的态度。为了便于不同风险类型的决策者对方案进行比较和排序, 给出如下定义。

定义 13 设 $\bar{a}_1 = \langle [s_{\theta(\bar{a}_1)}, s_{c(\bar{a}_1)}], [u^l(\bar{a}_1), u^c(\bar{a}_1)], [v^l(\bar{a}_1), v^c(\bar{a}_1)] \rangle$ 为区间直觉不确定语言数, 那么称

决策者是风险中立的, 则 $\gamma = 0.5$; 若决策者是风险厌恶的, 则 $\gamma < 0.5$ 。

特别地,当 $\gamma=0.5$ 时, $E^{0.5}(\tilde{a}_1)=E(\tilde{a}_1)$, 即 $E(\tilde{a}_1)$ 是 $E^{\gamma}(\tilde{a}_1)$ 的一种特殊情形。

$$H^{\gamma}(\tilde{a}_1) = s_{((1-\gamma)\theta(\tilde{a}_1) + \gamma \times \tau(\tilde{a}_1)) \times ((1-\gamma)u^{\tau}(\tilde{a}_1) + \gamma \times u^{\theta}(\tilde{a}_1) + \gamma \times v^{\tau}(\tilde{a}_1) + (1-\gamma)v^{\theta}(\tilde{a}_1))}$$

为 \tilde{a}_1 在风险态度因子为 γ 时的精确函数。

特别地,当 $\gamma=0.5$ 时, $H^{0.5}(\tilde{a}_1)=H(\tilde{a}_1)$, 即 $H(\tilde{a}_1)$ 是 $H^{\gamma}(\tilde{a}_1)$ 的一种特殊情形。

设 \tilde{R}_i 和 \tilde{R}_j 是方案 A_i 和 A_j 的群体综合评价价值, γ 是决策者设定的风险态度因子, 根据定义 13 和定义 14, 给出如下考虑决策者偏好态度的排序方法:

- 1) 若 $E^{\gamma}(\tilde{R}_i) > E^{\gamma}(\tilde{R}_j)$, 则 $A_i > A_j$;
- 2) 若 $E^{\gamma}(\tilde{R}_i) = E^{\gamma}(\tilde{R}_j)$, 那么
若 $H^{\gamma}(\tilde{R}_i) > H^{\gamma}(\tilde{R}_j)$, 则 $A_i > A_j$;
若 $H^{\gamma}(\tilde{R}_i) = H^{\gamma}(\tilde{R}_j)$, 则 $A_i = A_j$ 。

2.5 区间直觉不确定语言多属性群决策过程

根据上述权重计算方法、信息集结方式及方案排序方法, 给出一种新的基于区间直觉不确定语言数的多属性群决策方法, 具体过程如下:

步骤 1 利用属性权重及 IIVIULWAA 算子对方案进行集结, 得到各专家关于各方案的个体综合评价价值 $\tilde{R}_i^k (1 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq p)$;

步骤 2 利用式(1)一式(3)计算各专家基于贴近度的客观权重 $\lambda_k^i (1 \leq k \leq p)$;

步骤 3 利用式(4)一式(6)计算各专家基于一致度的客观权重 $\lambda_k^i (1 \leq k \leq p)$;

步骤 4 利用式(7)和式(8)确定比例系数 α , 并利用式(9)计算各专家的客观综合权重 $\lambda_k (1 \leq k \leq p)$;

步骤 5 利用专家客观综合权重及 IIVIULWAA 算子对

定义 14 设 $\tilde{a}_1 = \langle [s_{\theta(\tilde{a}_1)}, s_{\tau(\tilde{a}_1)}], [u^L(\tilde{a}_1), u^U(\tilde{a}_1)], [v^L(\tilde{a}_1), v^U(\tilde{a}_1)] \rangle$ 为区间直觉不确定语言数, 那么称

各专家关于各方案的个体综合评价价值进行集结, 得到各方案的群体加权平均评价价值 $\bar{R}_i (1 \leq i \leq m)$;

步骤 6 利用式(10)计算 \bar{R}_i^k 与 \bar{R}_i 之间的相似度, 并利用式(11)得到 \bar{R}_i^k 的权重信息 $\omega_i^k (1 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq p)$;

步骤 7 利用式(12)得到专家群体关于各方案的综合评价价值 $\bar{R}_i (1 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq p)$;

步骤 8 由决策者设定风险态度因子 γ , 并利用定义 13 和定义 14 对各方案的群体综合评价价值 $\bar{R}_i (1 \leq i \leq m)$ 进行比较和排序, 从而得到反映决策者风险态度的方案排序及最优方案。

3 实例分析

某煤炭企业经过初步的市场形势分析, 选取了 4 家物资供应商 $\{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ 作为候选研究对象。考虑到煤炭企业对产品质量和安全生产的特殊要求, 制定了如下评价指标: 质量水平(C_1)、价格水平(C_2)、交货能力(C_3)、技术能力(C_4)和售后服务(C_5), 指标权重 $\omega = (0.28, 0.31, 0.18, 0.14, 0.09)$ 。现由 3 位专家 $\{e_1, e_2, e_3\}$ 对各候选供应商按上述 5 项指标进行评估, 各专家采用区间直觉不确定语言数给出的各供应商的评价价值如表 1—表 3 所列(本例中的评价指标和指标权重是在对文献[30]进行简化的基础上得来的, 实验数据是在文献[30]的基础上进行的扩展和调整)。专家采用的语言评价集为 $S = \{s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6\}$ 。最终给出 4 个候选供应商的排序。

表 1 专家 e_1 给出的决策矩阵

Table 1 The decision matrix given by expert e_1

方案	指标(C_1)	指标(C_2)	指标(C_3)	指标(C_4)	指标(C_5)
A_1	$\langle [s_4, s_5], [0.7, 0.8], [0.1, 0.2] \rangle$	$\langle [s_5, s_6], [0.6, 0.6], [0.1, 0.3] \rangle$	$\langle [s_5, s_6], [0.8, 0.8], [0.1, 0.1] \rangle$	$\langle [s_4, s_4], [0.8, 0.8], [0.1, 0.1] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.7, 0.8], [0.1, 0.2] \rangle$
A_2	$\langle [s_5, s_5], [0.7, 0.8], [0.1, 0.2] \rangle$	$\langle [s_6, s_6], [0.7, 0.8], [0.2, 0.2] \rangle$	$\langle [s_4, s_5], [0.8, 0.8], [0.2, 0.3] \rangle$	$\langle [s_4, s_5], [0.5, 0.6], [0.3, 0.3] \rangle$	$\langle [s_4, s_5], [0.9, 0.9], [0.0, 0.1] \rangle$
A_3	$\langle [s_3, s_4], [0.7, 0.7], [0.2, 0.2] \rangle$	$\langle [s_4, s_4], [0.7, 0.8], [0.1, 0.2] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.7, 0.7], [0.1, 0.2] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.7, 0.8], [0.1, 0.2] \rangle$	$\langle [s_3, s_4], [0.8, 0.8], [0.1, 0.1] \rangle$
A_4	$\langle [s_6, s_6], [0.6, 0.7], [0.2, 0.3] \rangle$	$\langle [s_3, s_3], [0.5, 0.6], [0.2, 0.3] \rangle$	$\langle [s_4, s_4], [0.6, 0.7], [0.2, 0.3] \rangle$	$\langle [s_3, s_4], [0.7, 0.7], [0.2, 0.2] \rangle$	$\langle [s_5, s_6], [0.6, 0.8], [0.2, 0.2] \rangle$

表 2 专家 e_2 给出的决策矩阵

Table 2 The decision matrix given by expert e_2

方案	指标(C_1)	指标(C_2)	指标(C_3)	指标(C_4)	指标(C_5)
A_1	$\langle [s_5, s_6], [0.6, 0.7], [0.1, 0.1] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.7, 0.7], [0.1, 0.1] \rangle$	$\langle [s_4, s_5], [0.9, 0.9], [0.0, 0.1] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.7, 0.8], [0.1, 0.2] \rangle$	$\langle [s_4, s_6], [0.6, 0.6], [0.1, 0.1] \rangle$
A_2	$\langle [s_4, s_5], [0.5, 0.7], [0.2, 0.2] \rangle$	$\langle [s_4, s_6], [0.6, 0.7], [0.2, 0.2] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.6, 0.7], [0.1, 0.2] \rangle$	$\langle [s_5, s_6], [0.6, 0.7], [0.1, 0.1] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.7, 0.9], [0.1, 0.1] \rangle$
A_3	$\langle [s_5, s_5], [0.6, 0.7], [0.0, 0.2] \rangle$	$\langle [s_4, s_5], [0.8, 0.9], [0.1, 0.1] \rangle$	$\langle [s_4, s_4], [0.6, 0.6], [0.2, 0.2] \rangle$	$\langle [s_4, s_4], [0.7, 0.7], [0.2, 0.2] \rangle$	$\langle [s_3, s_5], [0.7, 0.8], [0.1, 0.2] \rangle$
A_4	$\langle [s_5, s_5], [0.7, 0.8], [0.1, 0.2] \rangle$	$\langle [s_4, s_4], [0.5, 0.6], [0.2, 0.3] \rangle$	$\langle [s_3, s_5], [0.9, 0.9], [0.0, 0.1] \rangle$	$\langle [s_3, s_4], [0.8, 0.8], [0.1, 0.2] \rangle$	$\langle [s_4, s_4], [0.8, 0.8], [0.1, 0.1] \rangle$

表3 专家 e_3 给出的决策矩阵

Table 3 The decision matrix given by expert e_3

方案	指标(C ₁)	指标(C ₂)	指标(C ₃)	指标(C ₄)	指标(C ₅)
A ₁	$\langle [s_5, s_5], [0.7, 0.8], [0.1, 0.1] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.8, 0.9], [0.1, 0.1] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.8, 0.9], [0.1, 0.1] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.7, 0.8], [0.2, 0.2] \rangle$	$\langle [s_4, s_4], [0.8, 0.8], [0.1, 0.1] \rangle$
A ₂	$\langle [s_5, s_5], [0.6, 0.7], [0.1, 0.2] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.7, 0.7], [0.1, 0.2] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.8, 0.8], [0.1, 0.1] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.9, 0.9], [0.1, 0.1] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.8, 0.8], [0.2, 0.2] \rangle$
A ₃	$\langle [s_5, s_5], [0.8, 0.8], [0.0, 0.1] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.7, 0.8], [0.1, 0.2] \rangle$	$\langle [s_4, s_4], [0.7, 0.8], [0.1, 0.2] \rangle$	$\langle [s_4, s_4], [0.7, 0.8], [0.1, 0.1] \rangle$	$\langle [s_4, s_4], [0.8, 0.9], [0.0, 0.1] \rangle$
A ₄	$\langle [s_4, s_5], [0.8, 0.9], [0.1, 0.1] \rangle$	$\langle [s_4, s_4], [0.8, 0.8], [0.0, 0.2] \rangle$	$\langle [s_4, s_5], [0.8, 0.8], [0.0, 0.1] \rangle$	$\langle [s_5, s_5], [0.7, 0.7], [0.1, 0.2] \rangle$	$\langle [s_4, s_5], [0.7, 0.8], [0.1, 0.1] \rangle$

具体决策过程如下:

0.09)及IVIULWAA算子对方案进行集结,得到各专家关于各

步骤1 利用属性权重 $\omega = (0.28, 0.31, 0.18, 0.14,$

方案的个体综合评价价值 $\tilde{R}_k^i (1 \leq i \leq 4, 1 \leq k \leq 3)$,如表4所列。

表4 各专家关于各方案的个体综合评价价值

Table 4 Individual comprehensive evaluation values of each expert on each scheme

方案	e_1	e_2	e_3
A ₁	$\langle [s_4, 580, s_5, 040], [0.712, 0.752], [0.1, 0.182] \rangle$	$\langle [s_4, 730, s_5, 370], [0.726, 0.761], [0.0, 0.110] \rangle$	$\langle [s_4, 910, s_5, 050], [0.763, 0.858], [0.110, 0.110] \rangle$
A ₂	$\langle [s_4, 900, s_5, 310], [0.729, 0.793], [0.0, 0.214] \rangle$	$\langle [s_4, 410, s_5, 140], [0.585, 0.728], [0.151, 0.171] \rangle$	$\langle [s_5, 000, s_5, 590], [0.750, 0.769], [0.106, 0.160] \rangle$
A ₃	$\langle [s_4, 230, s_4, 320], [0.711, 0.759], [0.121, 0.188] \rangle$	$\langle [s_4, 190, s_4, 680], [0.698, 0.783], [0.0, 0.161] \rangle$	$\langle [s_4, 590, s_4, 590], [0.742, 0.812], [0.0, 0.140] \rangle$
A ₄	$\langle [s_3, 360, s_3, 870], [0.588, 0.684], [0.2, 0.273] \rangle$	$\langle [s_3, 960, s_4, 100], [0.737, 0.781], [0.0, 0.188] \rangle$	$\langle [s_4, 140, s_4, 690], [0.780, 0.826], [0.0, 0.137] \rangle$

步骤2 基于贴近度计算专家权重。

2)计算各专家关于方案个体综合评价价值的贴近度,得

计算步骤如下:

$s^1 = 0.674, s^2 = 0.760, s^3 = 0.731$ 。

1)计算各方案下的正理想点 \tilde{R}_+^i 、左负理想点 \tilde{R}_-^i 与右负

3)计算各专家基于贴近度的客观权重,得 $\lambda_1^i = 0.311,$

理想点 $\tilde{R}_-^i (1 \leq i \leq 4)$,如表5所列。

$\lambda_2^i = 0.351, \lambda_3^i = 0.338$ 。

表5 各方案下的正、负理想点

Table 5 Positive and negative ideal point under each scheme

方案	正理想点	左负理想点	右负理想点
A ₁	$\langle [s_4, 735, s_5, 148], [0.734, 0.796], [0.0, 0.130] \rangle$	$\langle [s_4, 580, s_5, 040], [0.712, 0.752], [0.110, 0.182] \rangle$	$\langle [s_4, 910, s_5, 370], [0.763, 0.858], [0.0, 0.110] \rangle$
A ₂	$\langle [s_4, 765, s_5, 341], [0.695, 0.765], [0.0, 0.180] \rangle$	$\langle [s_4, 410, s_5, 140], [0.585, 0.728], [0.151, 0.214] \rangle$	$\langle [s_5, 000, s_5, 590], [0.750, 0.793], [0.0, 0.160] \rangle$
A ₃	$\langle [s_4, 332, s_4, 525], [0.717, 0.786], [0.0, 0.162] \rangle$	$\langle [s_4, 190, s_4, 320], [0.698, 0.759], [0.121, 0.188] \rangle$	$\langle [s_4, 590, s_4, 680], [0.7142, 0.812], [0.0, 0.140] \rangle$
A ₄	$\langle [s_3, 816, s_4, 216], [0.712, 0.770], [0.0, 0.192] \rangle$	$\langle [s_3, 360, s_3, 870], [0.588, 0.684], [0.2, 0.273] \rangle$	$\langle [s_4, 140, s_4, 690], [0.780, 0.826], [0.0, 0.137] \rangle$

步骤3 基于一致度计算专家权重。

根据定义12,可得 $f(\lambda^i) = 0.998, f(\lambda^i) = 0.994$ 。由此

首先,计算各专家关于各方案的个体综合评价价值的期望值,计算结果如表6所列。

确定比例系数 $\alpha = 0.5$,从而可得各专家的综合客观权重: $\lambda_1 = 0.336, \lambda_2 = 0.316, \lambda_3 = 0.349$ 。

表6 各专家关于各方案个体综合评价价值的期望值

步骤5 利用专家综合客观权重及IVIULWAA算子对各专家关于方案的个体综合评价价值进行集结,得到各方案的加权平均评价价值。

Table 6 Expections of individual comprehensive evaluation values of each expert on each scheme

方案	e_1	e_2	e_3
A ₁	3.827	4.264	4.233
A ₂	4.221	3.572	4.306
A ₃	3.378	3.681	3.917
A ₄	2.529	3.355	3.829

然后,根据期望值计算结果对各专家下的方案进行排序,得到各方案在各专家下关于个体综合评价价值的优势类。如 $[A_1]^{\triangleright} = \{A_1, A_2\}, [A_2]^{\triangleright} = \{A_2\}, [A_3]^{\triangleright} = \{A_1, A_2, A_3\}, [A_4]^{\triangleright} = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}, [A_1]^{\triangleright} = \{A_1\}, [A_2]^{\triangleright} = \{A_1, A_2, A_3\}, [A_3]^{\triangleright} = \{A_1, A_3\}, [A_4]^{\triangleright} = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ 。根据定义10可得, $c_1^i = \frac{1}{4} \times (\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{2}{3} + 1) = 0.625$,同理可得 $c_1^i = 1, c_2^i = 0.625$ 。根据定义11可得, $c^1 = \frac{1}{2} \times (0.625 + 1) = 0.813, c^2 = 0.625, c^3 = 0.813$ 。从而可得各专家基于一致度的客观权重为 $\lambda_1^i = 0.36, \lambda_2^i = 0.28, \lambda_3^i = 0.36$ 。

$\tilde{R}_1 = \langle [s_4, 747, s_5, 157], [0.735, 0.798], [0.0, 0.130] \rangle$

$\tilde{R}_2 = \langle [s_4, 916, s_5, 356], [0.706, 0.765], [0.0, 0.180] \rangle$

$\tilde{R}_3 = \langle [s_4, 345, s_4, 635], [0.718, 0.787], [0.0, 0.161] \rangle$

$\tilde{R}_4 = \langle [s_3, 828, s_4, 231], [0.714, 0.772], [0.0, 0.190] \rangle$

步骤6 计算 \tilde{R}_k^i 与 \tilde{R}_i 之间的相似度,结果如表7所列。

表7 各专家个体综合评价价值与群体加权平均评价价值之间的相似度
Table 7 Similarity between the comprehensive evaluation values of each expert and the weighted mean evaluation values of group

方案	e_1	e_2	e_3
A ₁	0.596	0.825	0.579
A ₂	0.853	0.491	0.666
A ₃	0.426	0.824	0.750
A ₄	0.385	0.913	0.702

进而可得 \tilde{R}_k^i 的权重 $\omega_k^i (1 \leq i \leq 4, 1 \leq k \leq 3)$,如表8所列。

表 8 各专家个体综合评价值的权重

Table 8 Weights of individual comprehensive evaluation values

under each expert			
方案	e_1	e_2	e_3
A ₁	0.298	0.413	0.290
A ₂	0.426	0.241	0.333
A ₃	0.213	0.412	0.375
A ₄	0.193	0.456	0.351

步骤 7 计算专家群体关于各方案的综合评价价值,可得:

$$\tilde{R}_1 = \langle [s_4, 730, s_5, 167], [0, 733, 0, 793], [0, 0, 0, 128] \rangle$$

$$\tilde{R}_2 = \langle [s_4, 831, s_5, 379], [0, 709, 0, 772], [0, 0, 0, 183] \rangle$$

$$\tilde{R}_3 = \langle [s_4, 359, s_4, 576], [0, 719, 0, 791], [0, 0, 0, 157] \rangle$$

$$\tilde{R}_4 = \langle [s_3, 910, s_4, 269], [0, 732, 0, 784], [0, 0, 0, 180] \rangle$$

步骤 8 由决策者设定风险态度因子 γ ,完成对群体综合评价价值 \tilde{R}_i 的比较和排序。

表 9 列出了当 γ 取不同值时,对应的群体综合评价价值 \tilde{R}_i ($1 \leq i \leq 4$) 的期望值及排序结果。当 $\gamma \in [0, 0.5)$,即决策者是风险厌恶型时,方案的排序结果为 $A_1 > A_2 > A_3 > A_4$,其中 A_1 为最优方案;而当 $\gamma \in [0.5, 1]$,即决策者是风险中立型或风险偏好型,方案的排序结果为 $A_2 > A_1 > A_3 > A_4$,其中 A_2 为最优方案。

表 9 不同风险态度因子下的方案排序结果

Table 9 Ranking results under different risk attitude factors

态度因子	期望值	排序结果
0	$E^0(\tilde{R}_1)=3.796, E^0(\tilde{R}_2)=3.687, E^0(\tilde{R}_3)=3.403, E^0(\tilde{R}_4)=3.033$	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$
0.1	$E^{0.1}(\tilde{R}_1)=3.875, E^{0.1}(\tilde{R}_2)=3.789, E^{0.1}(\tilde{R}_3)=3.470, E^{0.1}(\tilde{R}_4)=3.107$	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$
0.2	$E^{0.2}(\tilde{R}_1)=3.956, E^{0.2}(\tilde{R}_2)=3.892, E^{0.2}(\tilde{R}_3)=3.538, E^{0.2}(\tilde{R}_4)=3.182$	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$
0.3	$E^{0.3}(\tilde{R}_1)=4.038, E^{0.3}(\tilde{R}_2)=3.996, E^{0.3}(\tilde{R}_3)=3.606, E^{0.3}(\tilde{R}_4)=3.257$	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$
0.4	$E^{0.4}(\tilde{R}_1)=4.120, E^{0.4}(\tilde{R}_2)=4.102, E^{0.4}(\tilde{R}_3)=3.675, E^{0.4}(\tilde{R}_4)=3.333$	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$
0.5	$E^{0.5}(\tilde{R}_1)=4.203, E^{0.5}(\tilde{R}_2)=4.209, E^{0.5}(\tilde{R}_3)=3.744, E^{0.5}(\tilde{R}_4)=3.410$	$A_2 > A_1 > A_3 > A_4$
0.6	$E^{0.6}(\tilde{R}_1)=4.287, E^{0.6}(\tilde{R}_2)=4.318, E^{0.6}(\tilde{R}_3)=3.813, E^{0.6}(\tilde{R}_4)=3.488$	$A_2 > A_1 > A_3 > A_4$
0.7	$E^{0.7}(\tilde{R}_1)=4.372, E^{0.7}(\tilde{R}_2)=4.428, E^{0.7}(\tilde{R}_3)=3.884, E^{0.7}(\tilde{R}_4)=3.566$	$A_2 > A_1 > A_3 > A_4$
0.8	$E^{0.8}(\tilde{R}_1)=4.457, E^{0.8}(\tilde{R}_2)=4.539, E^{0.8}(\tilde{R}_3)=3.954, E^{0.8}(\tilde{R}_4)=3.646$	$A_2 > A_1 > A_3 > A_4$
0.9	$E^{0.9}(\tilde{R}_1)=4.544, E^{0.9}(\tilde{R}_2)=4.651, E^{0.9}(\tilde{R}_3)=4.025, E^{0.9}(\tilde{R}_4)=3.726$	$A_2 > A_1 > A_3 > A_4$
1	$E^1(\tilde{R}_1)=4.631, E^1(\tilde{R}_2)=4.765, E^1(\tilde{R}_3)=4.097, E^1(\tilde{R}_4)=3.807$	$A_2 > A_1 > A_3 > A_4$

实例表明,将基于贴近度和一致度的专家客观综合权重与个体综合评价值的权重结合可对专家决策矩阵进行有效集结,在方案比较和排序阶段通过设定不同的风险态度因子可辅

助决策者做出合适的选择,得出相对合理、灵活的决策结果。

将本文所提方法与文献[24]和文献[25]的群决策方法进行对比,结果如表 10 所列。

表 10 群决策方法对比

Table 10 Comparison of different group decision making methods

	文献[24]中方法	文献[25]中方法	本文方法
适用情形	专家和属性的权重信息完全已知	专家和属性的权重取值范围已知,即权重信息部分已知	属性权重已知,专家权重完全未知
专家权重设置方法	已知	求解优化模型	基于贴近度与一致度的两类专家客观权重信息的综合
集结方式	先利用 IIVIULWGA 算子对所有专家的决策信息进行集结,再利用 IIVIULHG 算子及相关权重向量 ω 对所有属性下的决策信息进行集结	先利用 IIVIULCA 算子对所有专家的决策信息进行集结,再利用 IIVIULCA 算子对所有属性下的决策信息进行集结	先利用 IIVIULWAA 算子对各专家在所有属性下的决策信息进行集结,再利用混合加权集结方法对所有专家的个体综合评价值进行集结
排序策略	期望值 $E(\tilde{a})$ 和精确函数 $H(\tilde{a})$	基于期望值 $E(\tilde{a})$ 和精确函数 $H(\tilde{a})$ 的两个连续函数 $f(\tilde{a})$ 和 $g(\tilde{a})$	带有风险态度因子的期望值 $E^\gamma(\tilde{a})$ 和精确函数 $H^\gamma(\tilde{a})$

为了进一步分析风险态度对方案排序结果的影响,将本文提出的带有风险态度因子的期望值 $E^\gamma(\tilde{a})$ 和精确函数 $H^\gamma(\tilde{a})$ 用于文献[24]和文献[25]的方案排序中,排序结果如表 11 所列。可以看出,文献[24]中的方案排序结果比较稳定,不受风险态度的影响;文献[25]中的方案排序结果会随风险态度因子 γ 的不同而有所变动。当 $\gamma < 0.5$ 时,用本文方法得到的排序结果与文献[24]和文献[25]中的排序结果一致。

通过比较分析可知,本文所提方法适用于专家权重完全未知情形下的区间直觉不确定语言多属性群决策问题,所得的专家权重信息具有较强的综合性,且无需设置额外的位置权重向量对排序后的决策信息进行加权,集结过程具有较强的客观性;此外,由于引入了风险态度因子对方案进行排序,决策的灵活性得到增强。

表 11 文献[24]和文献[25]在不同风险态度因子下的方案排序结果

Table 11 Ranking results of Ref. [24] and Ref. [25] under different risk attitude factors

态度因子	文献[24]	文献[25]
0	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$	$A_2 > A_1 > A_3 > A_4$
0.1	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$
0.2	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$
0.3	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$
0.4	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$
0.5	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$	$A_1 > A_2 > A_4 > A_3$
0.6	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$	$A_1 > A_2 > A_4 > A_3$
0.7	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$	$A_1 > A_2 > A_4 > A_3$
0.8	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$	$A_1 > A_2 > A_4 > A_3$
0.9	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$	$A_1 > A_2 > A_4 > A_3$
1	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$	$A_1 > A_2 > A_4 > A_3$

结束语 区间直觉不确定语言数是区间直觉模糊数和

不确定语言变量的扩展,具有较强的实用价值,已被用于解决实际模糊多属性群决策问题。本文给出了一种基于混合权重信息及决策者风险态度的区间直觉不确定语言多属性群决策方法,并通过实例分析系统介绍了该方法实现的全过程,证明了该方法的有效性和合理性。本文所提方法能够较为客观、合理地解决专家权重完全未知情形下的区间直觉不确定语言多属性群决策问题,满足不同风险类型决策者的需要,丰富和发展了模糊群决策理论和方法,拓宽了群决策理论的适用范围,可以为决策者提供更加切实可行的决策参考依据。下一步将围绕属性客观权重的挖掘以及风险态度对排序结果的影响等问题进行研究。

参 考 文 献

- [1] LIU S, CHAN F T S, RAN W X. Decision making for the selection of cloud vendor: An improved approach under group decision-making with integrated weights and objective/subjective attributes[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016(55): 37-47.
- [2] LIU S, CHAN F T S, RAN W X. Multi-attribute group decision-making with multi-granularity linguistic assessment information: An improved approach based on deviation and TOPSIS[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(24): 10129-10140.
- [3] YUE Z L. Group decision making with multi-attribute interval data[J]. *Information Fusion*, 2013, 14(4): 551-561.
- [4] MAO J J, YAO D B, WANG C C. Group decision making methods based on intuitionistic fuzzy soft matrices[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(9): 6425-6436.
- [5] JU Y B. A new method for multiple criteria group decision making with incomplete weight information under linguistic environment[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(21/22): 5256-5268.
- [6] YUE Z L. Approach to group decision making based on determining the weights of experts by using projection method[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(7): 2900-2910.
- [7] ATANASSOV K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, 20(1): 87-96.
- [8] ATANASSOV K, GARGOV G. Interval-valued intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1989, 31(3): 343-349.
- [9] YUE Z L, JIA Y Y. An application of soft computing technique in group decision making under interval-valued intuitionistic fuzzy environment[J]. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(5): 2490-2503.
- [10] WEI G W, ZHAO X F. Some induced correlated aggregating operators with intuitionistic fuzzy information and their application to multiple attribute group decision making[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(2): 2026-2034.
- [11] YUE Z L. TOPSIS-based group decision-making methodology in intuitionistic fuzzy setting[J]. *Information Sciences*, 2014, 277(2): 141-153.
- [12] WAN S P, WANG Q Y, DONG J Y. The extended VIKOR method for multi-attribute group decision making with triangular intuitionistic fuzzy numbers[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2013, 52(6): 65-77.
- [13] ZHANG X L, XU Z S. Deriving experts' weights based on consistency maximization in intuitionistic fuzzy group decision making[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2014, 27(1): 221-233.
- [14] ZHOU L G, CHEN H Y. A generalization of the power aggregation operators for linguistic environment and its application in group decision making [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2012(26): 216-224.
- [15] PANG J F, LIANG J Y. Evaluation of the results of multi-attribute group decision-making with linguistic information[J]. *Omega*, 2012, 40(3): 294-301.
- [16] WANG J Q, PENG J J, ZHANG H Y, et al. An uncertain linguistic multi-criteria group decision-making method based on a cloud model[J]. *Group Decision and Negotiation*, 2015, 24(1): 171-192.
- [17] PANG B, YE C M, ZENG S Z. Uncertain pure linguistic hybrid harmonic averaging operator and generalized interval aggregation operator based approach to group decision making[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2012(36): 175-181.
- [18] HERRERA F, MARTINEZ L. A model based on linguistic 2-tuples for dealing with multi-granular hierarchical linguistic contexts in multi-expert decision-making[J]. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 2001, 31(2): 227-233.
- [19] ZHANG Z, GUO C H. A method for multi-granularity uncertain linguistic group decision making with incomplete weight information[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2012(26): 111-119.
- [20] CHEN T Y. An interval-valued intuitionistic fuzzy LINMAP method with inclusion comparison possibilities and hybrid averaging operations for multiple criteria group decision making[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2013, 45(3): 134-146.
- [21] WU J, LIU Y J. An approach for multiple attribute group decision making problems with interval-valued intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2013, 66(2): 311-324.
- [22] LIU P D. Some generalized dependent aggregation operators with intuitionistic linguistic numbers and their application to group decision making [J]. *Journal of Computer and System Sciences*, 2013, 79(1): 131-143.
- [23] LIU P D, JIN F. Methods for aggregating intuitionistic uncertain linguistic variables and their application to group decision making[J]. *Information Sciences*, 2012, 205(1): 5-71.
- [24] LIU P D. Some geometric aggregation operators based on interval intuitionistic uncertain linguistic variables and their application to group decision making[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(4): 2430-2444.
- [25] MENG F Y, CHEN X H, ZHANG Q. Some interval-valued intuitionistic uncertain linguistic Choquet operators and their application to multi-attribute group decision making[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(9/10): 2543-2557.
- [26] XU Z S. Induced uncertain linguistic OWA operators applied to group decision making[J]. *Information Fusion*, 2006, 7(2): 231-238.

结束语 本文提出了一种新的结合词向量和 Bootstrapping 的领域实体上下位关系获取方法,包括语料预处理、词向量运算、初始种子集选择、模式抽取、Bootstrapping 迭代、候选关系实例的获取以及领域实体层级关系自动组织。从实验结果可以看出,本文所提方法在领域实体上下位关系抽取和层级关系组织方面都取得了不错的效果,证明了该方法的可行性。目前本文构建的旅游领域知识库还不够完善,接下来将继续完善领域知识库,将该方法移植到其他特定领域以进行分析对比。

参考文献

- [1] MILLER G A. WordNet: a lexical database for English[J]. Communications of the ACM, 1995, 38(11): 39-41.
 - [2] SHEN D R. SKM: A Schema Matching Model Based on Schema Structure and Known Matching Knowledge[J]. Journal of Software, 2009, 20(2): 327-338.
 - [3] HEARST, MARTI A. Automatic acquisition of hyponyms from large text corpora[C]// Conference on Computational Linguistics, 1992: 539-545.
 - [4] MANN G S. Fine-grained proper noun ontologies for question answering[C]// The Workshop on Building & Using Semantic Networks. Association for Computational Linguistics, 2003.
 - [5] FLEISCHMAN M, HOVY E, ECHIHIABI A, et al. Offline strategies for online question answering: answering questions before they are asked[C]// Meeting on Association for Computational Linguistics. Association for Computational Linguistics, 2003: 1-7.
 - [6] ANDO M, SEKINGE S, ISHIZAKI S. Automatic Extraction of Hyponyms from Newspaper Using Lexicosyntactic Pattern[J]. Ipsi Sig Notes, 2004, 2003: 77-82.
 - [7] LIU L, CAO C G, WANG H T, et al. A Method of Hyponym Acquisition Based on "isa" Pattern[J]. Computer Science, 2006, 33(9): 146-151. (in Chinese)
刘磊, 曹存根, 王海涛, 等. 一种基于“是一个”模式的下位概念获取方法[J]. 计算机科学, 2006, 33(9): 146-151.
 - [8] NAKAYA N, KUREMATSU M, YAMAGUCHI T. A Domain Ontology Development Environment Using a MRD and Text Corpus[J]. Casopis Lékar Ceskych, 2002, 128(37): 1166-1169.
 - [9] SUMIDA A, TORISAWA K. Hacking Wikipedia for hyponymy relations acquisition [C] // International Joint Conference on Natural Language Processing, 2008.
 - [10] SUCHANEK FM, KASNECI G, WEIKUM G. Yago: A core of semantic knowledge unifying wordnet and wikipedia[C]// Proceedings of the Third International Joint Conference on Natural Language Processing, 2008: 883-888.
 - [11] FAN Q H, ZAN H Y, CHAI Y M, et al. hyponym discovery of multiple resource fusion[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(12): 4310-4315. (in Chinese)
范庆虎, 管红英, 柴玉梅, 等. 多资源融合的下位词发现[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(12): 4310-4315.
 - [12] CARABALLO S A. Automatic Acquisition of a Hypernym-Labeled Noun Hierarchy from Text[C]// Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 1999: 120-126.
 - [13] BOELLA G, CARO L D. Extracting Definitions and Hypernym Relations Relying on Syntactic Dependencies and Support Vector Machines[C]// Proceedings of the 51st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2013: 532-537.
 - [14] ETZIONI O, BANKO M, SODERLAND S, et al. Open information extraction from the web[C]// International Joint Conference on Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2007: 68-74.
 - [15] FANG N M, NON-MEMBER C Y, MEMBER F R. Hyponym extraction from the web by bootstrapping[J]. IEEJ Transactions on Electrical & Electronic Engineering, 2012, 7(7): 62-68.
 - [16] KOZAREVA Z, HOVY E. A semi-supervised method to learn and construct taxonomies using the web[C]// Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Association for Computational Linguistics, 2010: 1110-1118.
 - [17] MIKOLOV T, CHEN K, CORRADO G, et al. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space[J]. Computer Science, 2013, 23(1): 1301-1306.
 - [18] GOLDBERG Y, LEVY O. word2vec Explained: deriving Mikolov et al.'s negative-sampling word-embedding method [J/OL]. <https://arxiv.org/abs/1402.3722>.
 - [19] BENNETT J, GROUT R, PEBAY P, et al. Numerically stable, single-pass, parallel statistics algorithms[C]// IEEE International Conference on Cluster Computing and Workshops, 2009: 1-8.
 - [20] FU R J, QIN B, LIU T. Exploiting multiple sources for open-domain hypernym discover[C]// EMNLP, 2013: 1224-1234.
 - [21] WANG P, HU J, ZENG H J, et al. Improving Text Classification by Using Encyclopedia Knowledge[C]// IEEE International Conference on Data Mining. IEEE, 2007: 332-341.
-
- (上接第 54 页)
- [27] YE F, LI Y N. Group multi-attribute decision model to partner selection in the formation of virtual enterprise under incomplete information[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(5): 9350-9357.
 - [28] XU Z S. Group decision making based on multiple types of linguistic preference relations[J]. Information Sciences, 2008, 178(2): 452-467.
 - [29] XU Z S. A multi-attribute group decision making method based on term indices in linguistic evaluation scales[J]. Journal of Systems and Engineering, 2005, 20(1): 84-88. (in Chinese)
徐泽水. 基于语言标度中术语指标的多属性群决策法[J]. 系统工程学报, 2005, 20(1): 84-88.
 - [30] PANG J F, SONG P. A research on evaluation and selection of materials suppliers for large coal enterprises [J]. East China Economic Management, 2015, 29(2): 117-122. (in Chinese)
庞继芳, 宋鹏. 面向大型煤炭企业的物资供应商评价与选择研究[J]. 华东经济管理, 2015, 29(2): 117-122.