

控制与决策

Control and Decision

不确定语言信息下的大规模群体DEMATEL决策方法

王伟明, 徐海燕

引用本文:

王伟明, 徐海燕. 不确定语言信息下的大规模群体DEMATEL决策方法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(8): 2023–2033.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1486>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于犹豫度和相似度的专家权重确定方法及其应用](#)

Expert weights determination method and application based on hesitancy degree and similarity measure

控制与决策. 2021, 36(6): 1482–1488 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1382>

[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>

[概率区间值直觉犹豫模糊Maclaurin对称平均算子及决策方法](#)

Probabilistic interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy Maclaurin symmetric mean operators and decision method

控制与决策. 2021, 36(5): 1249–1258 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1370>

[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>

[基于前景理论和模糊理论的在线多属性采购拍卖 供应商选择决策](#)

Decision method of supplier selection for online multi-attribute procurement auction based on prospect theory and fuzzy theory

控制与决策. 2020, 35(11): 2637–2645 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1768>

不确定语言信息下的大规模群体DEMATEL决策方法

王伟明[†], 徐海燕

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

摘要: 针对现有不确定语言决策试验和评价实验(DEMATEL)方法大多仅适用于中小规模群体,且未考虑不确定语言变量采用非均匀标度的情况,探讨一种新的不确定语言信息下的大规模群体DEMATEL决策方法.首先,给出一种群体不确定语言DEMATEL矩阵的聚类方法,并对大规模群体DEMATEL意见进行合理分组;然后,定义三维不确定语言密度算子,并对大规模群体DEMATEL意见进行有效集结;最后,提出一种改进的基于不确定语言DEMATEL的指标权重确定方法,并在此基础上进行多属性决策.算例分析验证了所提方法的可行性与有效性,该方法采用非均匀标度来表征和呈现不确定语言变量,而且考虑了大规模群体决策的共识度,使得决策结果更为客观合理且更为可靠.

关键词: 多属性决策; 大规模; 群体DEMATEL; 三维不确定语言密度算子; 非均匀标度; 聚类

中图分类号: C934 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1486

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 王伟明,徐海燕.不确定语言信息下的大规模群体DEMATEL决策方法[J].控制与决策,2021,36(8):2023-2033.

Large-scale group DEMATEL decision making method under uncertain linguistic information

WANG Wei-ming[†], XU Hai-yan

(School of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: So far the decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) decision making methods based on uncertain linguistic information are more suitable for small and medium-sized groups, and do not consider that uncertain linguistic variables use the non-uniform evaluation scale. To overcome this kind of defects, a new large-scale group DEMATEL decision making method under uncertain linguistic information is proposed. Firstly, a reasonable cluster method for the uncertain linguistic group DEMATEL matrix is given, which is used to make a cluster for large-scale group DEMATEL evaluation information. Then, the three dimensional uncertain linguistic density operator is defined, which is used to aggregate large-scale group DEMATEL evaluation information. Finally, an improved index weights calculation method based uncertain linguistic DEMATEL is proposed, on this basis, the multiple attribute decision making is implement. One numeral example is used to illustrate the feasibility and effectiveness of the proposed method. The results show that the decision making is rational and credible as it can use the uncertain linguistic variables with non-uniform evaluation scale and consider large-scale group decision making's consensus degree.

Keywords: multiple attribute decision making; large-scale; group DEMATEL; three-dimensional uncertain linguistic density operator; non-uniform scale; cluster

0 引言

决策试验与评估实验室法(decision making trial and evaluation laboratory, DEMATEL)是由日内瓦巴特尔研究所Gabus和Fontela两位教授共同提出的一种复杂系统因素分析方法,该方法能够较好揭示复杂系统中各因素之间的因果关系和识别关键因素^[1].近

年来,DEMATEL方法在能源经济、医疗管理、供应链管理等问题中掀起了应用热潮^[2-8].随着DEMATEL方法的大量推广与应用,众多专家和学者利用该方法来探讨多属性决策问题中各指标之间的相互影响关系,并以此确定指标权重.Lo等^[2]利用模糊数DEMATEL方法来探讨指标间的相互影

收稿日期: 2019-10-24; 修回日期: 2020-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71971115, 71701097, 61673209); 江苏省自然科学基金项目(BK20170777).

责任编辑: 唐万生.

[†]通讯作者. E-mail: wwmlsy@163.com.

响关系,并给出了一种基于模糊数 DEMATEL 的指标权重确定方法; Büyüközkan 等^[3]提出了一种基于 DEMATEL-ANP 的指标权重确定方法,并将其应用于客户关系管理决策问题; Abdullah 等^[4]给出了一种基于区间直觉模糊数 DEMATEL 的指标权重确定方法,并利用 Choquet 积分消除指标间相关性; Salarpour 等^[5]针对群体 DEMATEL 问题进行研究,探讨了一种基于犹豫模糊数 DEMATEL 的指标权重确定方法,并将其应用于房地产市场选择问题. 另外,一些学者基于定性信息探讨了 DEMATEL 决策问题. 弓晓敏等^[6]利用二元语义模型来表示语言信息,并提出了一种基于二元语义 DEMATEL 的指标权重确定方法; Ding 等^[7]将 DEMATEL 方法推广到二维不确定语言信息,拓展探讨了一种基于二维不确定语言 DEMATEL 的指标权重确定方法; Han 等^[8]致力于多粒度犹豫模糊语言信息下群体 DEMATEL 决策方法研究,并提出了一种新的多属性决策模型. 综合来看,现有 DEMATEL 指标权重确定方法在定性信息和定量信息两方面均取得了丰硕成果,并给出了一些较好的理论模型,这对开展其后续研究打下了良好的基础. 但也应该注意到,上述研究还存在如下问题: 1) 现有 DEMATEL 决策方法大多仅适用于中小规模群体,较少有文献探讨大规模群体 DEMATEL 决策问题(通常将超过 20 名决策个体的群体决策称为大规模群体决策^[9-10]); 2) 基于不确定语言 DEMATEL 的指标权重确定方法尚未考虑采用非均匀标度的情况.

针对问题 1), 一方面,相较于中小规模群体决策,大规模群体决策所包含的信息量更为丰富,其能够依靠大规模群体智慧得到更为可靠的决策结果^[9]; 另一方面,在一些重要的实际决策问题中,通常是依据大规模专家的信息而最终决定^[10]. 因此,大规模群体决策方法的研究必然会成为未来决策领域的重点研究方向. 针对问题 2), 一方面,与传统的均匀标度相比,非均匀标度通常更符合人类的思维特征,结论的一致性也相对更高^[11-12]; 另一方面,基于非均匀标度的语言型决策方法是当前学术界的研究热点,相应的优秀成果正在不断涌现,例如文献[11-15]. 鉴于此,本文考虑决策者个数为大规模群体且采用非均匀标度来表征和呈现不确定语言变量,探讨一种新的不确定语言信息下的大规模群体 DEMATEL 决策方法.

1 问题描述和假设条件

考虑不确定语言信息下的群体 DEMATEL 决策问题,为方便起见,记 $M = \{1, 2, \dots, m\}$, $N = \{1, 2, \dots, n\}$. 假设指标集 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, 其中 C_i

表示第 i 个指标, $i \in N$; 决策者集 $D = \{D^1, D^2, \dots, D^m\}$, 其中 D^j 表示第 j 个决策者, $j \in M (m \geq 20)$; 决策者 D^j 给出的指标间直接关联矩阵 $\tilde{X}^j = (\tilde{x}_{kl}^j)_{n \times n}$, 其中 $\tilde{x}_{kl}^j (k, l \in N)$ 表示决策者 D^j 针对指标 C_k 影响指标 C_l 程度的不确定语言评分.

此时的问题是: 如何充分利用各决策者给出的指标间直接关联矩阵 $\tilde{X}^j = (\tilde{x}_{kl}^j)_{n \times n} (j \in M)$, 以此来确定指标权重 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$.

为了准确地说明问题,探讨前给出如下假设.

假设 1 各指标之间存在明显的相互影响关系;

假设 2 各决策者给出的 DEMATEL 评分是不确定语言信息;

假设 3 各决策者给出的评分是真实可靠的;

假设 4 决策者的个数符合大规模群体.

2 预备知识

2.1 语言评估标度

在语言型决策问题中,决策者通常需要选择适当的语言评估标度. Xu^[11]和 Zhou 等^[12]将传统的均匀标度和非均匀标度进行对比,结果表明,非均匀标度通常更符合人类的思维特征,结论的一致性也相对更高. 为此,本文选取一种非均匀的语言评估标度^[11]

$$S = \left\{ s_\alpha \mid \alpha = -(\tau - 1), -\frac{2}{3}(\tau - 2), -\frac{2}{4}(\tau - 3), \dots, 0, \dots, \frac{2}{4}(\tau - 3), \frac{2}{3}(\tau - 2), \tau - 1 \right\}. \quad (1)$$

其中: s_α 表示语言术语,特别地, $s_{-(\tau-1)}$ 和 $s_{\tau-1}$ 分别表示决策者实际使用语言术语的下限和上限; τ 为正整数,称语言术语的个数 $2\tau - 1$ 为该语言术语集的粒度. 例如,当 $\tau = 4$ 时(此时粒度为 7), S 可表示为

$$S = \{s_{-3} = \text{极差}, s_{-4/3} = \text{很差}, s_{-1/2} = \text{差}, s_0 = \text{一般}, s_{1/2} = \text{好}, s_{4/3} = \text{很好}, s_3 = \text{极好}\}. \quad (2)$$

在语言信息的集成过程中,为了方便计算和避免丢失决策信息,给出一种拓展标度^[11]

$$\bar{S} = \{s_\alpha \mid \alpha \in [-q, q]\}, \quad (3)$$

其中 $q (q > \tau - 1)$ 是一个充分大的正数. 若 $s_\alpha \in S$, 则称 s_α 为本原术语; 否则,称 s_α 为拓展术语(或虚拟术语). 规定 S 和 \bar{S} 满足^[16]: 1) 当 $\alpha \geq \beta$ 时, $s_\alpha \geq s_\beta$; 2) 当 $\alpha = -\beta$ 时,存在负算子 $\text{neg}(s_\alpha) = s_\beta$; 3) $\lambda s_\alpha = s_{\lambda\alpha}$; 4) $(s_\alpha)^\lambda = s_{\alpha\lambda}$; 5) $s_\alpha \oplus s_\beta = s_{\alpha+\beta}$; 6) $s_\alpha - s_\beta = s_{\alpha-\beta}$; 7) $s_\alpha \otimes s_\beta = s_{\alpha \times \beta}$; 8) $s_\alpha / s_\beta = s_{\alpha/\beta} (\beta \neq 0)$.

2.2 不确定语言变量

设 $\tilde{s} = [s_\alpha, s_\beta]$, 且 $s_\alpha, s_\beta \in \bar{S}$, 则称 \tilde{s} 为不确定语言变量^[16], 其中 s_α 和 s_β 分别为 \tilde{s} 的下限和上限. 规

定: 1) $\lambda \tilde{s} = \lambda [s_\alpha, s_\beta] = [s_{\lambda\alpha}, s_{\lambda\beta}]$; 2) $\tilde{s}_1 \oplus \tilde{s}_2 = [s_{\alpha_1}, s_{\beta_1}] \oplus [s_{\alpha_2}, s_{\beta_2}] = [s_{\alpha_1+\alpha_2}, s_{\beta_1+\beta_2}]$. 其中: $\lambda \in [0, 1]$, $\tilde{s}, \tilde{s}_1, \tilde{s}_2 \in \tilde{S}$, \tilde{S} 为所有不确定语言变量的集合^[16].

定义 1^[16] 设 $\tilde{s}_1 = [s_{\alpha_1}, s_{\beta_1}]$, $\tilde{s}_2 = [s_{\alpha_2}, s_{\beta_2}] \in \tilde{S}$, 则称

$$p(\tilde{s}_1 \geq \tilde{s}_2) = \min \left\{ \max \left(\frac{\beta_1 - \alpha_2}{\beta_1 + \beta_2 - \alpha_1 - \alpha_2}, 0 \right), 1 \right\}. \quad (4)$$

文献 [16] 给出不确定语言变量组 $\tilde{s}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的一个排序向量 $\zeta = (\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n)^T$, 计算公式为

$$\zeta_i = \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{j=1}^n p_{ij} + \frac{n}{2} - 1 \right). \quad (5)$$

其中: n 为不确定语言变量的个数, p_{ij} 为 $\tilde{s}_i \geq \tilde{s}_j$ 的可能性. 利用 $\zeta_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 可对 \tilde{s}_i 进行排序.

定义 2^[16] 设 $\tilde{s}_1 = [s_{\alpha_1}, s_{\beta_1}]$, $\tilde{s}_2 = [s_{\alpha_2}, s_{\beta_2}]$, 且 $s_{\alpha_i}, s_{\beta_i} \in S, i = 1, 2$, 则称

$$d(\tilde{s}_1, \tilde{s}_2) = \frac{|\alpha_1 - \alpha_2| + |\beta_1 - \beta_2|}{2(2\tau - 1)} \quad (6)$$

为 \tilde{s}_1 与 \tilde{s}_2 之间的偏离度. 式 (6) 中, $2\tau - 1$ 为语言评估标度 S 的势^[16]. 显然, $0 \leq d(\tilde{s}_1, \tilde{s}_2) \leq 1$, 且其值越小, \tilde{s}_1 与 \tilde{s}_2 越接近, 偏差也越小.

3 方法与模型

3.1 群体不确定语言 DEMATEL 矩阵的聚类

在群体决策问题中, 由于各决策者的偏好和掌握的知识存在一定差异, 会给出不同的评价意见. 通常而言, 各决策者的意见差异性越小, 群体共识度越大, 群体满意度越高. 因此, 为了有效提高群体满意度, 有必要对群体意见进行聚类分组. 下面探讨一种群体不确定语言 DEMATEL 矩阵的聚类方法.

定义 3 设决策者 $D^{j_1} (j_1 \in M)$ 、 $D^{j_2} (j_2 \in M)$ 给出的指标间直接关联矩阵分别为 $\tilde{X}^{j_1} = (\tilde{x}_{kl}^{j_1})_{n \times n}$ 、 $\tilde{X}^{j_2} = (\tilde{x}_{kl}^{j_2})_{n \times n}$, 若

$$d_{j_1 j_2} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1, l \neq k}^n d(\tilde{x}_{kl}^{j_1}, \tilde{x}_{kl}^{j_2}), \quad (7)$$

则称 $d_{j_1 j_2}$ 为决策者 D^{j_1} 、 D^{j_2} 意见之间的差异度. 式 (7) 中, $d(\tilde{x}_{kl}^{j_1}, \tilde{x}_{kl}^{j_2})$ 为 $\tilde{x}_{kl}^{j_1}$ 和 $\tilde{x}_{kl}^{j_2}$ 之间的偏离度, n 为指标的个数.

由式 (7) 可知: 1) $d_{j_1 j_2}$ 满足对称性, 即 $d_{j_1 j_2} = d_{j_2 j_1}$; 2) $d_{j_1 j_2} \in [0, 1]$, 当 $d_{j_1 j_2} = 0$ 时, 决策者 D^{j_1} 、 D^{j_2} 意见之间的差异性最小, 此时二者意见完全相同; 3) 当 $d_{j_1 j_2} = 1$ 时, 决策者 D^{j_1} 、 D^{j_2} 意见之间的差异性最大, 此时二者意见完全相反; 4) 随着 $d_{j_1 j_2}$ 值的增加, 决策者 D^{j_1} 、 D^{j_2} 意见之间的差异性逐渐变大. 由此

可见, $d_{j_1 j_2}$ 可以较好地衡量决策者意见之间的差异性.

与其他聚类方法相比, 编网聚类法一方面具有计算量小、适用性强等优点, 可以快速有效地实现不确定语言信息下的大规模群体 DEMATEL 意见的聚类; 另一方面具有计算过程通俗易懂、直观明了等优点, 可以较好呈现大规模群体 DEMATEL 决策问题中各决策者意见之间的联系情况. 为此, 下面结合传统编网聚类法^[17]的基本思想, 给出适合本文聚类算法的具体步骤.

step 1: 确定差异度矩阵. 依据式 (7) 计算各决策者之间的差异度, 并构成差异度矩阵 $D' = (d_{ij})_{m \times m}$.

step 2: 确定下三角矩阵. 将差异度矩阵 D' 中主对角线以上元素去掉, 并用决策者 D^1, D^2, \dots, D^m 分别代替主对角线上元素 $d_{11}, d_{22}, \dots, d_{mm}$, 以此形成下三角矩阵 D'' .

step 3: 构建 λ 截矩阵. 选定截割水平 $\lambda \in [0, 1]$, 当 D'' 中主对角线以下元素 $d_{ij} \leq \lambda$ 时, 令 $d_{ij} = 0$; 当 $d_{ij} > \lambda$ 时, 令 $d_{ij} = 1$, 以此构建 λ 截矩阵 D_λ .

step 4: 确定聚类结果. 将 λ 截矩阵 D_λ 中的元素“1”替换为“*”并去掉元素“0”, 以“*”所在的位置为结点, 过结点作经纬线得到编网图, 最后将过结点处对应的经纬线上的决策者划分为同一类, 这样就得到了最终的聚类结果.

上述 step 3 中的 λ 采用阈值变化率最大法^[18] 进行确定. 阈值变化率的计算公式为

$$\lambda'_i = \frac{\lambda_{i-1} - \lambda_i}{n_i - n_{i-1}}. \quad (8)$$

其中: i 为 λ 由小到大的分类次数, n_i 和 n_{i-1} 分别为第 i 次和第 $i-1$ 次分类的对象个数, λ_i 和 λ_{i-1} 分别为第 i 次和第 $i-1$ 次分类的阈值, λ'_i 为第 $i-1$ 次至第 i 次分类过程中的阈值变化率. 令

$$\lambda'_j = \max_i \{\lambda'_i\}, \quad (9)$$

则将第 j 次分类的阈值视为截割水平, 即 $\lambda = \lambda_j$.

需要说明的是, 在群体 DEMATEL 决策问题中, 一方面, 截割水平 λ 的确定可以使得 $\lambda_{i-1} - \lambda_i$ 的值最大, 进而使得聚类结果中类间决策者意见的差异性尽可能大; 另一方面, 编网聚类法的原理是使得决策者意见差异性小的划分为同一类, 这样可以使得聚类结果中类内决策者意见的差异性尽可能小. 因此, 本文的聚类方法是较为合理的. 此外, 由于各决策者均具备丰富的实践经验和专业知识, 而且彼此之间不存在利益冲突问题, 这样群体 DEMATEL 意见的差异性通常较小, 此时采用阈值变化率最大法来确定截割水平

λ , 可以使得差异性较小的群体意见分组更为精确, 同时所得到的分组结果也更为合理^[17-18].

3.2 三维不确定语言密度算子

密度算子是一种体现数据分布情况的信息集结算子, 该算子先对数据进行合理分组, 再赋予各组数据相应的密度权重, 在此基础上对组间数据进行集结(组内数据利用其他算子进行集结), 以此得到最终的信息集结结果. 与现有的一般算子有所不同, 一方面, 该算子涉及到数据的聚类分组, 因此在处理一维数据(点值信息)、二维数据(向量信息)、三维数据(矩阵信息)等不同维数的数据时, 其计算过程存在明显差异; 另一方面, 如果处理高维数据时仍采用低维数据聚类方法逐一进行聚类, 那么计算过程将会十分繁琐, 而且涉及的参数较多会导致评价结果的稳健性不强. 在一维数据方面, 易平涛等^[19]给出一种有序增量分割法, 在此基础上开发了一维密度算子, 并将其与WAA、OWA等算子进行有效融合; 林友谅等^[20]将密度算子推广到直觉模糊数, 提出一维直觉模糊密度加权平均算子和一维直觉模糊密度混合算术平均算子. 在二维数据方面, 张发明等^[21-22]致力于群体评价方法研究, 拓展探讨了二维密度算子、二维不确定语言密度算子等. 本文在前人的研究基础上, 针对群体不确定语言DEMATEL评分矩阵为三维不确定语言数据组的情况, 对现有密度算子做进一步拓展和推广, 定义新的三维不确定语言密度算子.

定义4 对于三维不确定语言数据组 $\tilde{X} = (\tilde{X}^1, \tilde{X}^2, \dots, \tilde{X}^m)$, 其中 $\tilde{X}^j = (\tilde{x}_{kl}^j)_{g \times h} (j = 1, 2, \dots, m)$ 为不确定语言矩阵, $\tilde{x}_{kl}^j (k = 1, 2, \dots, g, l = 1, 2, \dots, h)$ 为不确定语言变量, 设 $T_2\text{ULDWA}: \tilde{R}^m \rightarrow \tilde{R}$, 若

$$T_2\text{ULDWA}^\xi(\tilde{X}^1, \tilde{X}^2, \dots, \tilde{X}^m) = \tilde{Y} = \sum_{r=1}^q \xi_r \Lambda(\tilde{X}^r), \quad (10)$$

则称 $T_2\text{ULDWA}$ 为三维不确定语言密度加权平均算子, 亦称为 $T_2\text{ULDWA}$ 算子. 式(10)中, $\tilde{Y} = (\tilde{y}_{kl})_{g \times h}$ 为不确定语言矩阵, $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_q)^T$ 为密度加权向量, $\xi_r \in [0, 1], \sum_{r=1}^q \xi_r = 1, \Lambda$ 为某三维不确定语言信息集结算子, $(\tilde{X}^1, \tilde{X}^2, \dots, \tilde{X}^q)$ 为 \tilde{X} 的三维不确定语言分类(即不确定语言矩阵的分类), q 为分类数.

特别地, 当定义4中的 Λ 为三维不确定语言加权算术平均算子时, 此时的合成算子称为三维不确定语言密度加权算术平均(three-dimensional uncertain linguistic density weighted arithmetic averaging, $T_2\text{ULDWAA}$)算子, 亦称为 $T_2\text{ULDWAA}$ 算子.

$T_2\text{ULDWAA}$ 算子是现有密度算子的有益补充, 其能够较好地体现三维不确定语言数据的分布情况, 进而深入揭示三维不确定语言数据之间的密切联系. 在不确定语言信息下的群体DEMATEL决策问题中, 各决策者给出的不确定语言DEMATEL意见恰好构成了一个三维不确定语言数据组, 因此本文利用 $T_2\text{ULDWAA}$ 算子对群体不确定语言DEMATEL意见进行集结. $T_2\text{ULDWAA}$ 算子具有如下特点: 一方面, $T_2\text{ULDWAA}$ 算子兼顾了密度权重, 能够充分考虑各决策者不确定语言DEMATEL意见之间的疏密程度, 进而充分考虑群体共识度, 提高群体满意度; 另一方面, $T_2\text{ULDWAA}$ 算子利用了ULWA算子的优点, 能够充分重视各决策者自身意见的重要程度(各决策者的权重), 进而充分重视各决策者自身的DEMATEL意见.

利用 $T_2\text{ULDWAA}$ 算子对群体DEMATEL意见进行集结, 其主要包括组内信息和组间信息集结, 组内信息和组间信息集结的关键分别在于决策者权重和密度权重的确定. 下面定义一个子群意见评价效用得分函数, 以此来确定新的决策者权重和密度权重.

定义5 设 $D^r = \{D^1, D^2, \dots, D^{m_r}\}$ 为决策者集 $D = \{D^1, D^2, \dots, D^m\}$ 的一个子集(子群), 则定义该子群意见评价效用得分函数为

$$F(D^r) = G(D^r)H(D^r) = \left(\frac{m_r}{m}\right)^2 \cdot \frac{1}{m_r^2} \sum_{j_1=1}^{m_r} \sum_{j_2=1}^{m_r} (1 - d_{j_1 j_2}^r) = \frac{1}{m^2} \sum_{j_1=1}^{m_r} \sum_{j_2=1}^{m_r} (1 - d_{j_1 j_2}^r). \quad (11)$$

其中: $G(D^r) = (m_r/m)^2$ 表示该子群意见中决策者个数的得分函数, $H(D^r) = \frac{1}{m_r^2} \sum_{j_1=1}^{m_r} \sum_{j_2=1}^{m_r} (1 - d_{j_1 j_2}^r)$ 表示该子群意见中群体共识度的得分函数, m_r 表示子群 D^r 中的决策者个数, m 表示决策者集 D 中的决策者个数(决策者的总个数), $d_{j_1 j_2}^r$ 表示子群 D^r 中决策者 $D^{j_1(r)}$ 、 $D^{j_2(r)}$ 意见之间的差异度. 特别地, 当 $m_r = 1$ 时, $F(D^r) = 1/m^2$ 表示某个体决策者的子群意见评价效用得分; 当 $m_r = m$ 时, $F(D^r) = F(D)$ 表示整个决策者集的子群意见评价效用得分. 通过式(11)可计算任意一个子群意见评价效用得分.

子群意见评价效用得分函数具有如下性质.

性质1 有界性. $F(D^r) \in [0, 1]$.

证明 $D^r = \{D^1, D^2, \dots, D^{m_r}\}$ 为 $D = \{D^1, D^2, \dots, D^m\}$ 的一个子集, 因此 $1 \leq m_r \leq m$, 于是有

$$G(D^r) = (m_r/m)^2 \in [1/m^2, 1]. \quad (12)$$

另外, $d_{j_1 j_2}^r$ 为子群 D^r 中决策者 $D^{j_1(r)}$ 、 $D^{j_2(r)}$ 意见之

间的差异度,因此 $d_{j_1 j_2}^r \in [0, 1]$, 于是有 $(1 - d_{j_1 j_2}^r) \in [0, 1]$, 且满足

$$H(D^r) = \frac{1}{m_r^2} \sum_{j_1=1}^{m_r} \sum_{j_2=1}^{m_r} (1 - d_{j_1 j_2}^r) \in [0, 1], \quad (13)$$

进而有

$$F(D^r) = G(D^r)H(D^r) \in [0, 1]. \quad (14)$$

该性质得证. \square

性质2 单调性. $F(D^r)$ 是单调递增函数, 即在子群 D^r 中增加某决策者后, $F(D^r)$ 的值也增加.

证明

$$\begin{aligned} F(D^r + D^j) - F(D^r) &= \\ \frac{1}{m^2} \sum_{j_1=1}^{m_{r+1}} \sum_{j_2=1}^{m_{r+1}} (1 - d_{j_1 j_2}^{r+j}) - \frac{1}{m_r^2} \sum_{j_1=1}^{m_r} \sum_{j_2=1}^{m_r} (1 - d_{j_1 j_2}^r) &= \\ \frac{1}{m^2} \left(\sum_{j_1=1}^{m_{r+1}} \sum_{j_2=1}^{m_{r+1}} (1 - d_{j_1 j_2}^{r+j}) - \sum_{j_1=1}^{m_r} \sum_{j_2=1}^{m_r} (1 - d_{j_1 j_2}^r) \right) &= \\ \frac{1}{m^2} \left(2 \sum_{j_1=1}^{m_r} (1 - d_{j_1(m_r+1)}^{r+j}) + (1 - d_{(m_r+1)(m_r+1)}^{r+j}) \right), & \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $F(D^r + D^j)$ 为子集 D^r 中增加决策者 D^j 后的子群意见评价效用得分. 此外, $d_{(m_r+1)(m_r+1)}^{r+j} = 0$, 因此

$$\begin{aligned} F(D^r + D^j) - F(D^r) &= \\ \frac{1}{m^2} \left(2 \sum_{j_1=1}^{m_r} (1 - d_{j_1(m_r+1)}^{r+j}) + 1 \right) &> 0. \end{aligned} \quad (16)$$

该性质得证. \square

性质3 一致性. 当子群中的决策者个数相同时, 各决策者意见的一致性程度越高, 子群意见评价效用得分的值越大.

证明 子群 $D^{r_1} = \{D^1, D^2, \dots, D^{m_{r_1}}\}$ 和子群 $D^{r_2} = \{D^1, D^2, \dots, D^{m_{r_2}}\}$ 中的决策者个数相同, 因此 $m_{r_1} = m_{r_2}$, 于是有

$$G(D^{r_1}) = (m_{r_1}/m)^2 = (m_{r_2}/m)^2 = G(D^{r_2}). \quad (17)$$

当子群 D^{r_1} 意见的一致性程度高于 D^{r_2} 时, 满足

$$H(D^{r_1}) > H(D^{r_2}), \quad (18)$$

进而

$$G(D^{r_1})H(D^{r_1}) > G(D^{r_2})H(D^{r_2}), \quad (19)$$

因此

$$F(D^{r_1}) > F(D^{r_2}). \quad (20)$$

该性质得证. \square

上述得分函数给出一种新的子群意见评价效用得分的计算方法, 为解决现实群体决策问题提供了一种新途径. 依据以上性质可知, 其具有如下特点: 1) 该得分函数的值在 $[0, 1]$ 范围内变化, 这样十分有

利于计算, 而且不需要进行无量纲化处理等复杂过程, 具有较强的实用性; 2) 该得分函数考虑了子群意见中的决策者数量, 可以更好地考虑专家群体的决策信息, 进而能够充分地依靠群体智慧, 具有较好的可行性; 3) 该得分函数考虑了群体意见的一致性, 能够充分考虑群体共识度和提高群体满意度, 具有一定的合理性. 事实上, 也可将本文提出的子群意见评价效用得分函数推广到其他群体决策问题.

下面依据上述提出的子群意见评价效用得分函数, 给出决策者权重和密度权重的具体确定方法.

定义6 设 $F(D)$ 为决策者集 $D = \{D^1, D^2, \dots, D^m\}$ 的子群意见评价效用得分, 若

$$\Delta F(D^j) = F(D) - F(D - D^j), \quad (21)$$

则称 $\Delta F(D^j)$ 为决策者 D^j 意见评价效用得分的影响度. 式(21)中: $F(D - D^j)$ 为决策者集 D 删除决策者 D^j 后的子群意见评价效用得分. $\Delta F(D^j)$ 可以较好地衡量决策者 D^j 对决策者集 D 意见评价效用得分的贡献度, $\Delta F(D^j)$ 的值越大, 决策者 D^j 对决策者集 D 意见评价效用得分的贡献度越大, 反之则贡献度越小.

通过对 $\Delta F(D^j)$ 进行归一化处理, 即可得到决策者 D^j 的权重, 计算公式为

$$u_j = \Delta F(D^j) / \sum_{j=1}^m \Delta F(D^j), \quad (22)$$

其中 u_j 为决策者 D^j 的权重. 为不失一般性, 记决策者权重向量为 $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$.

类似地, 这里对 $\Delta F(D^j)$ 进行拓展, 定义子群意见评价效用得分的影响度.

定义7 设 $F(D)$ 为决策者集 $D = \{D^1, D^2, \dots, D^m\}$ 的子群意见评价效用得分, 若

$$\Delta F(D^r) = F(D) - F(D - D^r), \quad (23)$$

则称 $\Delta F(D^r)$ 为子群 D^r 意见评价效用得分的影响度. 式(23)中, $F(D - D^r)$ 为决策者集 D 删除子群 D^r 后的子群意见评价效用得分. $\Delta F(D^r)$ 可以较好地衡量子群 D^r 对决策者集 D 意见评价效用得分的贡献度, $\Delta F(D^r)$ 的值越大, 子群 D^r 对决策者集 D 意见评价效用得分的贡献度越大, 反之则贡献度越小.

在确定密度权重时, 不仅要考虑子群意见自身的评价效用得分 $F(D^r)$, 还应该要考虑子群对决策者集评价意见效用得分的影响度 $\Delta F(D^r)$. 下面给出密度权重的确定方法, 即

$$\xi_r = \frac{F(D^r)\Delta F(D^r)}{\sum_{r=1}^q \Delta F(D^r)\Delta F(D^r)}, \quad (24)$$

其中 ξ_r 为第 r ($r = 1, 2, \dots, q$)类群体意见(子群意见)的密度权重.

值得注意的是,一方面,决策者权重 u_j 可以有效反映决策者 D^j 对决策者集 D 意见评价效用得分的影响力,进而能够较好衡量决策者 D^j 对决策者集 D 意见评价效用得分的贡献度,因此该决策者权重的确定是合理的;另一方面,密度权重 ξ_r 同时兼顾了子群意见评价效用得分 $F(D^r)$ 和子群对决策者集评价意见效用得分的影响度 $\Delta F(D^r)$,可以同时反映 D^r 意见评价效用得分和 D^r 对决策者集 D 意见评价效用得分的影响力,进而能够同时衡量 D^r 意见自身的评价效用得分和 D^r 对决策者集 D 意见评价效用得分的贡献度,因此该密度权重的确定也是合理的.

在确定决策者权重 u_j 和密度权重 ξ_r 后,利用 T_2ULD_{WAA} 算子对群体DEMATEL意见进行集结(其中类内信息利用ULWA算子进行集结,类间信息基于密度权重进行集结),以此得到群体综合的指标间直接关联矩阵 $\tilde{Y} = (\tilde{y}_{kl})_{n \times n}$ ($k, l \in N$).

3.3 基于不确定语言DEMATEL的指标权重确定

传统的DEMATEL方法多采用 $\{0, 1, 2, 3\}$ 标度来反映指标间的相互影响关系^[1](其中0、1、2、3分别表征为无影响、影响小、影响大、影响极大). Wu等^[23]在此基础上进行拓展,设计了一种新的 $\{0, 1, 2, 3, 4\}$ 标度(其中0、1、2、3、4分别表征为无影响、影响小、影响适中、影响大、影响极大).与上述评估标度不同, Tzeng等^[24]给出了一种较为复杂的DEMATEL评估标度方法,即采用 $\{0 \sim 10\}$ 来分析复杂系统问题(0~10分别表征为从无影响到极高的影响按整数逐级递增).

通过文献梳理可知,现有的DEMATEL评估标度确定方法均是依据整数逐级递增原理产生的,即该评估标度的内部评分是均匀分布的.然而,在实际生活中,决策者对客观事物的掌握程度和自身的认知水平可能会与这些标度不相匹配,此时决策者反而更容易选择适合自己粒度的语言信息来进行决策.同时,由于人类思维的模糊性和客观事物的复杂性,决策者在评估过程中可能选择不确定语言变量,而不确定语言变量通常是由非均匀分布的语言评估标度构成^[11-12].因此,采用非均匀标度的不确定语言变量来表征和呈现DEMATEL评分具有重要现实意义.

鉴于此,本文对传统的DEMATEL指标权重确定方法进行改进,考虑决策者的DEMATEL评分为基于非均匀标度的不确定语言变量^[11],提出一种新的基于不确定语言DEMATEL的指标权重确定方法.事

实上,在现实生活中,一方面,不确定语言DEMATEL决策问题是较为常见的,且不确定语言DEMATEL指标权重确定方法的操作性较强;另一方面,非均匀标度的语言型信息通常更符合人类的思维特征,结论的一致性也相对更高.因此,改进的新方法具有较好的有效性和合理性,其具体步骤如下.

step 1: 确定指标间直接关联矩阵 \tilde{Y} .本文中利用 T_2ULD_{WAA} 算子对群体不确定语言DEMATEL矩阵进行集结,以此得到群体综合的指标间直接关联矩阵 $\tilde{Y} = (\tilde{y}_{kl})_{n \times n}$ ($k, l \in N$),其中 \tilde{y}_{kl} 表示群体决策综合得到的针对指标 C_k 影响指标 C_l 程度的不确定语言评分,特殊地,主对角线上元素 $\tilde{y}_{kk} = [s_{-(\tau-1)}, s_{-(\tau-1)}]$ 表示各指标对自身无影响.

step 2: 确定规范化后的直接影响矩阵 \tilde{P} .将矩阵 \tilde{Y} 进行规范化处理,以此得到规范化后的直接影响矩阵 $\tilde{P} = (\tilde{p}_{kl})_{n \times n}$,其中 $\tilde{p}_{kl} = [\tilde{p}_{kl}^-, \tilde{p}_{kl}^+]$,计算公式为

$$\begin{cases} \tilde{p}_{kl}^- = (\tilde{y}_{kl}^- \oplus s_{\tau-1}) / \max_{1 \leq k \leq n} \sum_{l=1}^n (\tilde{y}_{kl}^+ \oplus s_{\tau-1}), \\ \tilde{p}_{kl}^+ = (\tilde{y}_{kl}^+ \oplus s_{\tau-1}) / \max_{1 \leq k \leq n} \sum_{l=1}^n (\tilde{y}_{kl}^+ \oplus s_{\tau-1}). \end{cases} \quad (25)$$

其中: \tilde{y}_{kl}^+ 和 \tilde{y}_{kl}^- 分别为不确定语言变量 \tilde{y}_{kl} 的上限和下限, $s_{\tau-1}$ 为决策者实际使用语言术语的上限.

step 3: 构造综合影响矩阵 \tilde{T} .计算公式为

$$\tilde{T} = [\tilde{T}^-, \tilde{T}^+] = [\tilde{P}^-(\mathbf{E} - \tilde{T}^-)^{-1}, \tilde{P}^+(\mathbf{E} - \tilde{T}^+)^{-1}]. \quad (26)$$

其中: \tilde{P}^- 和 \tilde{P}^+ 分别为由不确定语言变量 \tilde{p}_{kl} 的下限 \tilde{p}_{kl}^- 和上限 \tilde{p}_{kl}^+ 构成的语言术语矩阵, \mathbf{E} 为由主对角线上元素 $e_{kk} = s_1$ ($k \in N$)以及其余元素均为 s_0 构成的语言术语矩阵.式(26)的推导如下:

$$\begin{aligned} \tilde{T} &= (\tilde{t}_{kl})_{n \times n} = \\ & \lim_{r \rightarrow \infty} [(\tilde{P}^-)^1 \oplus (\tilde{P}^-)^2 \oplus \dots \oplus (\tilde{P}^-)^r] = \\ & \lim_{r \rightarrow \infty} [(\tilde{P}^+)^1 \oplus (\tilde{P}^+)^2 \oplus \dots \oplus (\tilde{P}^+)^r], \\ & (\tilde{P}^+)^1 \oplus (\tilde{P}^+)^2 \oplus \dots \oplus (\tilde{P}^+)^r = \\ & [\lim_{r \rightarrow \infty} ((\tilde{P}^-)^1 \oplus (\tilde{P}^-)^2 \oplus \dots \oplus (\tilde{P}^-)^r), \\ & \lim_{r \rightarrow \infty} ((\tilde{P}^+)^1 \oplus (\tilde{P}^+)^2 \oplus \dots \oplus (\tilde{P}^+)^r)] = \\ & [\tilde{P}^-(\mathbf{E} - \tilde{T}^-)^{-1}, \tilde{P}^+(\mathbf{E} - \tilde{T}^+)^{-1}]. \end{aligned} \quad (27)$$

step 4: 确定指标 C_k ($k \in N$)的影响度 \tilde{e}_k 和被影响度 \tilde{f}_k ,计算公式为

$$\tilde{e}_k = \bigoplus_{l=1}^n \tilde{t}_{kl}, \quad \tilde{f}_k = \bigoplus_{l=1}^n \tilde{t}_{lk}. \quad (28)$$

step 5: 确定指标 C_k ($k \in N$)的权重,计算公式为

$$\tilde{\eta}_k = \tilde{e}_k \oplus \tilde{f}_k, \quad (29)$$

其中 $\tilde{\eta}_k$ 为指标 C_k 的中心度, 表征指标在整个系统中的相对重要程度. 依据式(5)中的排序向量进一步计算指标中心度 $\tilde{\eta}_k$ 的得分, 以此得到指标 C_k 的权重, 即 $w_k = \zeta_k$, 显然 $w_k \in [0, 1]$, $\sum_{k=1}^n w_k = 1$.

3.4 算法步骤

不确定语言信息下的大规模群体DEMATEL决策方法的基本步骤如下.

step 1: 依据式(7)~(9), 利用本文给出的聚类方法将群体不确定语言DEMATEL矩阵 $\tilde{X}^j = (\tilde{x}_{kl}^j)_{n \times n} (j \in M)$ 合理分组.

step 2: 依据式(10)~(24), 利用 T_2 ULD_{WAA} 算子对群体不确定语言DEMATEL矩阵进行有效集结, 以此得到群体综合的指标间直接关联矩阵 $\tilde{Y} = (\tilde{y}_{kl})_{n \times n} (k, l \in N)$.

step 3: 依据式(25)~(29), 利用改进的基于不确定语言DEMATEL的指标权重确定方法计算指标权重 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$.

step 4: 依据多属性决策模型进行方案排序择优.

4 实例分析

随着经济全球化和市场竞争的加剧, 供应商选择问题越来越受到企业界和学术界的关注. 考虑在南北水调中线工程问题中欲选择一个优秀的供应商, 经过20位专家决定(假定决策者集为 $D = \{D^1, D^2, \dots, D^{20}\}$), 现从企业资质(C_1)、服务能力(C_2)、技术水平(C_3)、报价价格(C_4)这4项指标进行评估. 由于各指标之间存在明显的相互影响关系, 20位专家凭借其丰富的实践经验和专业知识对各指标之间的相互影响关系予以分析. 此外, 由于人类思维的模糊性和客观事物的复杂性, 20位专家采用不确定语言信息来进行评估, 其选用的语言标度为 $S = \{s_{-3} = \text{非常弱}, s_{-4/3} = \text{很弱}, s_{-1/2} = \text{弱}, s_0 = \text{中}, s_{1/2} = \text{强}, s_{4/3} = \text{很强}, s_3 = \text{非常强}\}$, 相应的不确定语言DEMATEL评分矩阵如下所示:

$$\tilde{X}^1 = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^2 = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^3 = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-3}, s_{1/2}] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-4/3}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-3}, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^4 = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-4/3}, s_{4/3}] & [s_{-4/3}, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-4/3}, s_{1/2}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^5 = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^6 = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{1/2}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^7 = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-4/3}, s_{1/2}] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-4/3}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-3}, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^8 = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-3}, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^9 = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_{1/2}, s_{4/3}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^{10} = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-1/2}] & [s_{-3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^{11} = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{1/2}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^{12} = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-4/3}, s_{1/2}] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-4/3}, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-3}, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^{13} = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-4/3}, s_{1/2}] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-4/3}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-3}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^{14} = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_0] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^{15} = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-3}, s_{1/2}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^{16} = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{4/3}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^{17} = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-4/3}, s_{4/3}] & [s_{-4/3}, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{4/3}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^{18} = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-4/3}, s_{4/3}] & [s_{-4/3}, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-1/2}, s_{1/2}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^{19} = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-4/3}, s_{1/2}] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-4/3}, s_0] & [s_{1/2}, s_3] \\ [s_{-1/2}, s_{1/2}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-3}, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}^{20} = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-3}, s_{-4/3}] & [s_{-4/3}, s_{-1/2}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_{-1/2}, s_0] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-1/2}, s_0] & [s_{4/3}, s_3] \\ [s_{-4/3}, s_{4/3}] & [s_{-4/3}, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] & [s_0, s_{1/2}] \\ [s_0, s_{1/2}] & [s_{4/3}, s_3] & [s_0, s_{4/3}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix}.$$

4.1 计算步骤

不确定语言信息下的大规模群体DEMATEL决策方法的计算步骤如下。

step 1: 依据式(7)~(9),利用本文给出的聚类方法将群体不确定语言DEMATEL矩阵 $\tilde{X}^j = (\tilde{x}_{kl}^j)_{n \times n} (j \in M)$ 划分为5组,即 $\{(\tilde{X}^1, \tilde{X}^2, \tilde{X}^6, \tilde{X}^9, \tilde{X}^{10}, \tilde{X}^{16}), (\tilde{X}^3, \tilde{X}^7, \tilde{X}^{12}, \tilde{X}^{13}, \tilde{X}^{19}), (\tilde{X}^4, \tilde{X}^{17}, \tilde{X}^{18}, \tilde{X}^{20}), (\tilde{X}^5, \tilde{X}^{11}, \tilde{X}^{14}), (\tilde{X}^8, \tilde{X}^{15})\}$ 。

step 2: 依据式(21)和(22),计算各决策者的权重分别为0.0511、0.0506、0.0498、0.0500、0.0494、

0.0504、0.0503、0.0486、0.0508、0.0506、0.0490、0.0502、0.0502、0.0491、0.0484、0.0505、0.0501、0.0506、0.0501、0.0503;再依据式(23)和(24),计算各组子群意见的密度权重分别为0.4808、0.2854、0.1503、0.0642、0.0193;在此基础上,依据式(10),利用 $T_2ULDWAA$ 算子对群体不确定语言DEMATEL矩阵进行集结,得到群体综合的指标间直接关联矩阵

$$\tilde{Y} = \begin{bmatrix} [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-2.73}, s_{-1.01}] \\ [s_{-0.83}, s_{0.14}] & [s_{-3}, s_{-3}] \\ [s_{-0.63}, s_{0.63}] & [s_{-0.63}, s_{0.20}] \\ [s_{-0.86}, s_{1/2}] & [s_{1.13}, s_{2.72}] \\ [s_{-1.60}, s_{-0.50}] & [s_{0.04}, s_{0.63}] \\ [s_{-0.62}, s_{0.22}] & [s_{1.29}, s_{3.00}] \\ [s_{-3}, s_{-3}] & [s_{-0.07}, s_{0.53}] \\ [s_{-0.06}, s_{1.26}] & [s_{-3}, s_{-3}] \end{bmatrix}.$$

step 3: 依据式(25)~(29),利用改进的基于不确定语言DEMATEL的指标权重确定方法计算各指标的中心度分别为 $[s_{0.3155}, s_{0.5603}]$ 、 $[s_{0.4317}, s_{0.7064}]$ 、 $[s_{0.3966}, s_{0.6188}]$ 、 $[s_{0.5265}, s_{0.7948}]$ 。在此基础上,依据式(5),进一步利用排序向量公式计算各指标的权重分别为0.1803、0.2673、0.2262、0.3262。

step 4: 假定若干备选供应商的评价指标得分如表1所示(假设已进行标准化处理,且指标的得分越高,方案的排序越高)。利用线性加权法计算各备选供应商的综合评价价值分别为80.5987、78.1724、82.0602、82.1096、82.1181,相应的排序为 $O_5 \succ O_4 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$ 。因此,应该优先选择备选供应商 O_5 。

表1 备选供应商的指标得分

备选供应商	C_1	C_2	C_3	C_4
O_1	85	83	78	78
O_2	83	81	77	74
O_3	80	77	84	86
O_4	80	80	85	83
O_5	70	88	85	82

4.2 方法比较

为便于比较,用其他3种方法计算本文算例。方法1:利用个体决策方法计算20位专家DEMATEL指标权重,并进行多属性决策。方法2:利用张发明等^[22]提出的 TD_{WAA} 算子将个体决策方法计算的指标权重进行集结,以此得到基于 TD_{WAA} 算子的指标权重,并进行多属性决策。方法3:利用 $ULWA$ 算子^[16]对算例中的群体DEMATEL评分矩阵进行集结(采用均匀标度),以此得到基于 $ULWA$ 算子的指标权重,并进行多属性决策。不同方法的指标权重和方案排序结果见表2。

表2 不同方法的指标权重结果和方案排序结果对比

方法	w_1	w_2	w_3	w_4	方案排序
决策者 D^1	0.1691	0.2667	0.2192	0.3450	$O_5 \succ O_3 \succ O_4 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^2	0.1735	0.2821	0.2029	0.3414	$O_5 \succ O_4 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^3	0.1842	0.2608	0.2408	0.3142	$O_4 \succ O_5 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^4	0.1724	0.2568	0.2310	0.3398	$O_3 \succ O_4 \succ O_5 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^5	0.1625	0.2629	0.2714	0.3032	$O_5 \succ O_4 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^6	0.1756	0.2882	0.1903	0.3459	$O_5 \succ O_4 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^7	0.1833	0.2681	0.2350	0.3136	$O_4 \succ O_5 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^8	0.2361	0.2331	0.2528	0.2780	$O_4 \succ O_5 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^9	0.1782	0.2598	0.2120	0.3500	$O_3 \succ O_4 \succ O_5 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^{10}	0.1784	0.2719	0.2105	0.3391	$O_5 \succ O_4 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^{11}	0.1880	0.2664	0.2589	0.2867	$O_4 \succ O_5 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^{12}	0.1824	0.2691	0.2378	0.3108	$O_5 \succ O_4 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^{13}	0.1783	0.2703	0.2371	0.3143	$O_5 \succ O_4 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^{14}	0.1820	0.2654	0.2619	0.2907	$O_5 \succ O_4 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^{15}	0.2395	0.2357	0.2484	0.2764	$O_4 \succ O_3 \succ O_5 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^{16}	0.1795	0.2662	0.2115	0.3428	$O_3 \succ O_4 \succ O_5 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^{17}	0.1784	0.2594	0.2345	0.3277	$O_5 \succ O_4 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^{18}	0.1832	0.2642	0.2281	0.3245	$O_4 \succ O_5 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^{19}	0.1887	0.2644	0.2394	0.3074	$O_4 \succ O_5 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
决策者 D^{20}	0.1792	0.2624	0.2289	0.3295	$O_4 \succ O_5 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
TD _{WAA} 算子	0.1819	0.2660	0.2276	0.3245	$O_4 \succ O_5 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$
ULWA 算子	0.1852	0.2599	0.2287	0.3262	$O_3 \succ O_4 \succ O_5 \succ O_1 \succ O_2$
本文方法	0.1803	0.2673	0.2262	0.3262	$O_5 \succ O_4 \succ O_3 \succ O_1 \succ O_2$

首先,将本文方法与方法1进行比较.一方面,方法1中20位专家依据个体决策方法计算的20种指标权重结果和方案排序结果是不一致的.例如,决策者 D^1 、 D^2 、 D^5 、 D^6 、 D^{10} 、 D^{12} 、 D^{13} 、 D^{14} 的最优方案为 O_5 ,决策者 D^3 、 D^7 、 D^8 、 D^{11} 、 D^{15} 、 D^{17} 、 D^{18} 、 D^{19} 、 D^{20} 的最优方案为 O_4 ,决策者 D^4 、 D^9 、 D^{16} 的最优方案为 O_3 .由此可见,不同决策者得到的指标权重结果和方案排序结果确实存在一定差异,这验证了需要对大规模群体DEMATEL意见进行集结的必要性.事实上,大规模群体决策所包含的信息量更为丰富,其能够依靠大规模群体智慧得到更为可靠的决策结果.另一方面,利用Matlab软件计算本文方法指标权重结果与个体决策方法20种指标权重结果的Pearson相关系数的平均数为0.949;同时也计算出个体决策方法每一种指标权重结果与个体决策方法其他19种指标权重结果的Pearson相关系数的平均数分别为0.946、0.914、0.948、0.948、0.854、0.887、0.946、0.719、0.932、0.929、0.871、0.942、0.942、0.867、0.730、0.932、0.948、0.948、0.947、0.948.由此可见,相较于个体决策方法中任何一种指标权重结果,本文方法与个体决策方法20种指标权重结果的相似度相对更

高.因此,本文方法比个体决策方法的群体共识度和群体满意度更高,稳定性也更强,这进一步验证了本文方法的合理性.

其次,将本文方法与方法2进行比较.一方面,两种方法指标权重结果的Pearson相关系数为0.999;另一方面,两种方法方案排序结果仅 O_2 和 O_4 相反.事实上,两种方法都利用了密度算子的优点,均能够提高群体共识度和群体满意度.因此,两种方法结果具有较大的相似性.然而,两种方法结果也具有较小的差异性,究其原因主要是本文方法对传统的密度权重确定方法进行了改进,其在构建子群意见评价效用得分函数时能够同时兼顾考虑子群内的决策者个数和子群内的群体共识度,而传统的密度权重确定方法仅考虑了子群内的决策者个数.因此,本文方法能够更好地考虑群体共识度和提高群体满意度.此外,值得一提的是,TD_{WAA}算子方法需要分别计算大规模群体的基于不确定语言DEMATEL的指标权重结果(本文中需要计算20种指标权重结果),该过程较为繁琐,且涉及到多次数据的规范化处理,进而使得决策结果的稳定性不强.

最后,将本文方法与方法3进行比较.一方面,两

种方法指标权重结果也存在一定差异,且比本文方法与方法2的差异更大;另一方面,两种方法方案排序结果存在较大差异,其中本文方法中排序前3的结果为 $O_5 \succ O_4 \succ O_3$,而方法3中排序前3的结果为 $O_3 \succ O_4 \succ O_5$.究其原因, O_5 在本文方法中排序第1名是因为本文利用了密度算子的优点,其能够充分考虑群体共识度和提高群体满意度,进而使得决策结果更为可靠.另外, O_3 在本文方法中排序第3名是因为本文采用了非均匀的语言评估标度,而非均匀的语言评估标度中各语言术语下标值之间的距离是不均匀的(越接近两端的语言术语下标值之间的距离越大,反之越小),这一点与均匀的语言评估标度有所差异.

综合来看,本文方法采用了非均匀标度来表征和呈现不确定语言变量,而且还考虑了大规模群体决策的共识度,因此可使决策结果更为客观合理且更为可靠.

5 结论

不确定语言信息下的大规模群体DEMATEL决策方法具有如下特点.

1) 针对决策者评分的测度问题,定义了一个新的子群意见评价效用得分函数,能够同时兼顾决策者个数和群体共识度,进而有效衡量量子群决策的评价质量.

2) 将一维密度算子、二维密度算子等拓展到三维不确定语言密度加权算术平均(T_2ULD_{WAA})算子,该算子不仅能够利用ULWA算子的优点,还能够考虑三维不确定语言数据的“分布密度”.

3) 对传统的密度权重确定方法提出了改进,能够同时考虑子群意见评价效用得分和考虑子群对决策者集评价效用得分的影响度,进而充分考虑群体共识度和提高群体满意度.

4) 给出了一种群体不确定语言DEMATEL的决策者权重确定方法,能够考虑决策者对决策者集评价效用得分的影响度,进而有效衡量该决策者对决策者集评价效用得分的贡献度.

5) 引入非均匀标度来表征和呈现不确定语言变量,提出了一种新的改进的基于不确定语言DEMATEL的指标权重确定方法,更符合人类的思维特征,进而使决策结果更为客观合理.

6) 针对群体不确定语言DEMATEL决策问题,给出了一种较为合理的分组方法,为解决群体不确定语言DEMATEL意见分类问题提供了一种新途径.

值得注意的是,本文方法仅探讨了不确定语言信

息下的大规模群体DEMATEL决策方法.事实上,还可将该方法扩展和推广到犹豫语言、概率语言、模糊数等决策环境中.另外,未来还可探讨多轮交互情景下的大规模群体DEMATEL决策方法,更细致的研究有待进一步深入.

参考文献(References)

- [1] Gabus A, Fontela E. World Problems, An invitation to further thought within the Framework of DEMATEL[R]. Geneva: Switzerland Geneva Battelle Geneva Research Centre, 1972.
- [2] Lo H W, Liou J J H, Tzeng G H. Comments on “Sustainable recycling partner selection using fuzzy DEMATEL-AEW-FVIKOR: A case study in small-and medium enterprises” [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228: 1011-1012.
- [3] Büyüközkan G, Sezin G, Birsen K. A new combined IF-DEMATEL and IF-ANP approach for CRM partner evaluation[J]. International Journal of Production Economics, 2017, 191: 194-206.
- [4] Abdullah L, Zulkifli N, Liao H, et al. An interval-valued intuitionistic fuzzy DEMATEL method combined with Choquet integral for sustainable solid waste management[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2019, 82: 207-215.
- [5] Salarpour H, Amiri G G, Mousavi S M. A hierarchical group decision approach based on DEMATEL and dynamic hesitant fuzzy sets to evaluate sustainability criteria for strategic management of housing market problem[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 37(1): 821-833.
- [6] 弓晓敏, 耿秀丽, 孙绍荣. 基于二元语义DEMATEL和DEA的多属性群决策方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(8): 1992-2000.
(Gong X M, Geng X L, Sun S R. Multi-criteria group decision making based on 2-tuple linguistic DEMATEL and DEA[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(8): 1992-2000.)
- [7] Ding X F, Liu H C. A 2-dimension uncertain linguistic DEMATEL method for identifying critical success factors in emergency management[J]. Applied Soft Computing, 2018, 71: 386-395.
- [8] Han W, Sun Y H, Xie H, et al. Hesitant fuzzy linguistic group DEMATEL method with multi-granular evaluation scales[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2018, 20(7): 2187-2201.
- [9] Liu B S, Zhou Q, Ding R X, et al. Large-scale group decision making model based on social network analysis: Trust relationship-based conflict detection and elimination[J]. European Journal of Operational

- Research, 2019, 275(2): 737-754.
- [10] Liu X, Xu Y J, Herrera F. Consensus model for large-scale group decision making based on fuzzy preference relation with self-confidence: Detecting and managing overconfidence behaviors[J]. Information Fusion, 2019, 52: 245-256.
- [11] Xu Z S. An interactive approach to multiple attribute group decision making with multigranular uncertain linguistic information[J]. Group Decision and Negotiation, 2009, 18(2): 119-145.
- [12] Zhou W, Xu Z S. Generalized asymmetric linguistic term set and its application to qualitative decision making involving risk appetites[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 254(2): 610-621.
- [13] Xu X H, Wang L L, Chen L L, et al. Large group emergency decision-making method with linguistic risk appetites based on criteria mining[J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 182: 104849.
- [14] Liao H C, Qin R, Gao C Y, et al. Score-HeDLiSF: A score function of hesitant fuzzy linguistic term set based on hesitant degrees and linguistic scale functions: An application to unbalanced hesitant fuzzy linguistic MULTIMOORA[J]. Information Fusion, 2019, 48: 39-54.
- [15] Xue W T, Xu Z S, Wang H, et al. Hazard assessment of landslide dams using the evidential reasoning algorithm with multi-scale hesitant fuzzy linguistic information[J]. Applied Soft Computing, 2019, 79: 74-86.
- [16] Xu Z S. Linguistic decision making: Theory and methods[M]. Beijing: Science Press, 2012: 147-158.
- [17] Zhou X, Zhang F M, Hui X B, et al. Group decision-making method based on entropy and experts cluster analysis[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(3): 468-472.
- [18] 陈云翔, 董晓雄, 项华春, 等. 基于信息熵的群组聚类组合赋权法[J]. 中国管理科学, 2015, 23(6): 142-146. (Chen Y X, Dong X X, Xiang H C, et al. Method for combination weighting experts based on information entropy and cluster analysis[J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(6): 142-146.)
- [19] 易平涛, 郭亚军, 张丹宁. 密度加权平均中间算子及其在多属性决策中的应用[J]. 控制与决策, 2007, 22(5): 515-519. (Yi P T, Guo Y J, Zhang D N. Density weighted averaging middle operator and application in multi-attribute decision making[J]. Control and Decision, 2007, 22(5): 515-519.)
- [20] 林友谅, 李武, 韩庆兰. 直觉模糊数密度集成算子及其应用[J]. 控制与决策, 2017, 32(6): 1026-1032. (Lin Y L, Li W, Han Q L. Intuitionistic fuzzy number density aggregation operator and its application[J]. Control and Decision, 2017, 32(6): 1026-1032.)
- [21] 张发明, 王伟明. 不确定语言信息下的大规模交互式群体评价方法及其应用[J]. 系统管理学报, 2018, 27(6): 1081-1092. (Zhang F M, Wang W M. Large-scale interactive group evaluation method based on uncertain linguistic information and its application[J]. Journal of Systems & Management, 2018, 27(6): 1081-1092.)
- [22] 张发明, 郭亚军, 易平涛. 基于二维密度加权算子的群体评价信息集结方法[J]. 系统管理学报, 2009, 18(4): 397-401. (Zhang F M, Guo Y J, Yi P T. A method of group evaluation information aggregation based on two-dimensional density operator[J]. Journal of Systems & Management, 2009, 18(4): 397-401.)
- [23] Wu H H, Tsai Y N. A DEMATEL method to evaluate the causal relations among the criteria in auto spare parts industry[J]. Applied Mathematics & Computation, 2011, 218(5): 2334-2342.
- [24] Tzeng G H, Huang C Y. Combined DEMATEL technique with hybrid MCDM methods for creating the aspired intelligent global manufacturing & logistics systems[J]. Annals of Operations Research, 2012, 197(1): 159-190.

作者简介

王伟明(1991—), 男, 博士生, 从事综合评价与决策支持的研究, E-mail: wwmsy@163.com;

徐海燕(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 从事冲突分析与决策理论等研究, E-mail: xuhaiyan@nuaa.edu.cn.

(责任编辑: 齐 霖)