

基于非线性复杂系统观的直觉模糊变权多属性决策方法

孙永河[†], 杨海涛, 谢 晖, 赵叶叶

(昆明理工大学 管理与经济学院, 昆明 650093)

摘 要: 为克服传统直觉模糊多属性决策方法所存在的采用固定不变的权重体系难以反映复杂系统因素之间蕴含的非线性联结机理、尚未考虑方案之间的内在关联性、对于决策主体风险偏好的异质性关注不足等缺陷, 依据非线性复杂系统思维观, 通过将属性因素变权、方案因素关联和决策主体风险态度合理引入三方面有机融合, 提出一种直觉模糊变权多属性决策方法. 该方法运用决策试行与评价实验室 (DEMATEL) 算法确定出不同方案情境下变化的属性权重, 且通过综合集成集对势理论和风险态度系数构建出新的记分函数, 并证明了其相关性. 最后, 通过案例应用及对比分析验证了所提出方法的科学性和可行性.

关键词: 直觉模糊; 集对势; 风险态度; 决策试行与评价实验室; 记分函数

中图分类号: C934

文献标志码: A

Intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making method with variable weights based on the perspective of nonlinear complex systems

SUN Yong-he[†], YANG Hai-tao, XIE Hui, ZHAO Ye-ye

(Faculty of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The conventional intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making method has following drawbacks: The fixed weight system is difficult to reflect effectively the nonlinear combination mechanism among factors for complex systems; the intrinsic relevancy of alternatives is ignored; the heterogeneous risk attitude of decision-makers is not considered sufficiently. To overcome abovementioned drawbacks, based on the thinking perspective of nonlinear complex systems, an intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making method with variable weights is proposed, which integrates well of the three aspects: the varying weights of attribute factors, the correlation of alternatives and the reasonable introduction of risk attitude of decision-maker. It should be noted that, varying attribute weights are determined by applying decision making trial and evaluation lab (DEMATEL) method. Furthermore, a new score function is constructed by combining the set pair potential theory with the risk attitude parameter, and its relevant properties are also proved. Finally, a real example study and corresponding comparative analysis verify the scientificity and feasibility of the proposed method.

Keywords: intuitionistic fuzzy; set pair potential; risk attitude; DEMATEL method; score function

0 引 言

在大数据、云计算、网络经济日新月异的当今时代, 企业管理者、决策者面临的是一个集不确定性、非线性和动态变化性为一体的超复杂决策环境, 决策者受限于自身的知识水平、能力、智慧、经验, 在对评价对象进行分析判断时往往存在着较强的模糊性和不确定性. 为适应这种复杂的决策情境, 直觉模糊理论近年来在多属性决策领域受到了国内外学者的广

泛关注, 涌现出一系列具有重要理论贡献和较强实践推广价值的研究成果^[1-12]. 文献 [1-2] 针对直觉模糊偏好关系和信息集成进行了系统研究. 文献 [3-5] 提出了一系列有效处理包括直觉模糊、三角模糊数、区间数、实数等多源判断信息的异质多属性决策新方法. 文献 [6-7] 分别提出了充分考虑决策者风险态度变化的直觉模糊多属性决策新方法. 文献 [8-11] 从直觉模糊决策与群组决策融合创新思维观出发, 基于偏

收稿日期: 2016-10-16; 修回日期: 2017-02-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71561015, 71261013); 云南省应用基础研究面上项目 (2016FB116, 2015FB137); 昆明理工大学管经学院热点科研支撑计划项目 (QY2015047); 昆明理工大学管经学院硕博生科研项目预研计划.

作者简介: 孙永河 (1978—), 男, 教授, 博士, 从事复杂系统管理决策等研究; 杨海涛 (1990—), 男, 硕士, 从事管理决策的研究.

[†]通讯作者. E-mail: syhch@126.com

好度、概率度等方法提出了相应的(区间)直觉模糊多属性群组决策模型. 文献[12]注意到一些算术(几何)加权平均集成算子在直觉模糊决策领域应用时存在易受极值数据影响的缺陷,提出了一种能够有效解决上述缺陷问题的直觉模糊多属性决策方法.

需要指出的是,现有直觉模糊多属性决策研究成果中的属性权重均采用不因方案变化而变化的固定权重,且假定各决策方案之间是相互独立的,彼此之间不存在内在关联,这显然与企业决策的实际情况相违背. 企业的决策过程是一个复杂系统(由决策主体、决策咨询专家、方案、属性等组成),属性权重应该随着方案的变化而变化,以便有效反映复杂系统的非线性特征. 事实上,对此问题文献[13]已经明确予以了系统阐述;文献[14]虽然认知到割裂方案的内在联系存在理论缺陷,并运用集对势理论从整体层面描述决策方案之间的相互联系,但方案属性权重从本质上仍然是固定不变的. 因此,从非线性复杂系统观来看,将属性因素变权、方案因素关联和体现决策主体风险态度3方面有机融合来科学认知复杂问题机理是必要的,有利于揭示复杂系统内部蕴含的各种非线性联系. 遗憾的是,目前针对该问题的相关研究尚鲜见报道.

本文通过分析相关文献所存在的缺陷,提出一种直觉模糊变权多属性决策实现方法. 首先,运用决策试行与评价实验室方法构建与决策方案特定情境相匹配的属性变权体系;然后,采用直觉模糊加权集成(IFWA)算子对方案各属性值进行集成,通过构造新的记分函数对犹豫度进行初次和二次分配;最后,依据方案综合直觉模糊得分值进行优选排序.

1 传统直觉模糊多属性决策方法缺陷分析

1.1 记分函数的缺陷分析

1.1.1 不含风险态度参数的记分函数缺陷分析

文献[15-16]分别提出了如下记分函数:

$$S_1 = \mu_i - \nu_i, \quad (1)$$

$$S_2 = \mu_i + \mu_i(1 - \mu_i - \nu_i). \quad (2)$$

式(1)未考虑犹豫度对方案排序的影响,该记分函数的构建机理不够严密,有时无法对方案优劣顺序进行有效甄别;式(2)犹豫度分配方式的操作缺乏必要的理论依据,未将决策者的风险偏好和犹豫度分配的内在联系阐释清楚,从而导致式(2)存在与式(1)相同的问题. 如:4个方案直觉模糊值 $\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \tilde{\alpha}_3, \tilde{\alpha}_4$ 分别为 $\tilde{\alpha}_1 = (0.5, 0.4), \tilde{\alpha}_2 = (0.4, 0.3), \tilde{\alpha}_3 = (0.4, 0.3), \tilde{\alpha}_4 = (0.5, 0.46)$. 运用式(1)可得出 $S_1(\tilde{\alpha}_1) =$

$S_1(\tilde{\alpha}_2) = 0.1$,运用式(2)可得出 $S_2(\tilde{\alpha}_3) = S_2(\tilde{\alpha}_4) = 0.52$,故无法甄别方案优劣.

1.1.2 含有风险态度参数的记分函数缺陷分析

文献[17-18]通过引入风险态度参数 $2\lambda - 1$ 和 λ 构造如下记分函数:

$$S_3 = \mu_i - \nu_i + (2\lambda - 1)\pi_i, \quad \lambda \in [0, 1]; \quad (3)$$

$$S_4 = (\mu_i - \nu_i)(1 + \pi_i) + \lambda\pi_i^2, \quad \lambda \in [-1, 1]. \quad (4)$$

现有的记分函数通过风险态度参数的具体取值将决策者划分为不同的风险态度类型,进而对决策方案的犹豫度进行分配,初步建立了决策者的风险偏好与犹豫度分配之间的关系. 但是,分析式(3)和(4)可知,如何依据决策者风险态度对犹豫度进行分配存在较大的差异,其科学合理性在学术界仍有争议. 目前来看,现有文献针对该问题的处理只是给出了初浅的定性认知,尚未给出有实践指导意义的操作机理,从而导致不同决策者对同一犹豫度的分配过于随意. 此外,现有大多数记分函数尚未考虑决策方案之间的内在联系,这样人为地割裂了方案之间的联结机理,可能会导致系统因素之间的非线性、复杂性、突变性等特征难以有效反映.

1.2 权重体系缺陷分析

决策程序是由决策各要素组成的复杂系统,虽然用直觉模糊数描述系统组成部分的不确定性,可以更加细腻地揭露系统的模糊性内涵,但现有直觉模糊多属性决策方法在属性权重方面存在如下缺陷:1)多数相关文献中的属性权重是直接假设给出的,缺乏清晰的导出机理;2)均采用了固定不变的属性权重(即固权)体系. 事实上,固权体系本质上认为属性权重集与方案集无任何关联关系,决策系统的属性权重不因方案的变动而调整,这样的权重体系难以有效揭示系统属性因素之间的内在非线性联系. 对此问题,变权决策思维认为属性权重本质上应随待评价方案的改变而调整,以更好地体现复杂系统的非线性等特征^[13,19].

2 预备知识

2.1 直觉模糊理论

Atanassov 最初提出了直觉模糊集理论,通过引入非隶属度和犹豫度对传统模糊集理论予以了有效拓展.

定义1^[7] 设非空集合 Ω 中一个直觉模糊集

$$C = \{x_i, \mu(x_i), \nu(x_i), \pi(x_i) | x_i \in X\}. \quad (5)$$

其中: $\mu(x_i) : X \rightarrow [0, 1], \nu(x_i) : X \rightarrow [0, 1], \pi(x_i) : X \rightarrow [0, 1], \mu(x_i) + \nu(x_i) + \pi(x_i) = 1, \forall x_i \in X, i =$

1, 2, \dots, n.

隶属度 $\mu(x_i)$ 表示决策者对评价对象的支持程度(或评价对象满足评价属性的程度), 非隶属度 $\nu(x_i)$ 表示决策者对评价对象的反对程度(或评价对象不满足评价属性的程度), 犹豫度 $\pi(x_i)$ 反映决策者对评价对象的不确定程度(或评价对象无法确定是否满足评价属性的程度). 为方便起见, 下文统一将 $\mu(x_i), \nu(x_i), \pi(x_i)$ 简化为 μ_i, ν_i, π_i .

定义 2^[20] 联系度函数 $w = a + bi + cj$ 中, a 代表同一度, b 代表差异度, c 代表对立度. 当 $c \neq 0$ 时, $\text{shi}(w) = a/c$ 为在某一特定问题下的集对势.

定义 3^[21] 设 $\tilde{a} = (\mu_a, \nu_a)$ 和 $\tilde{b} = (\mu_b, \nu_b)$ 是两个直觉模糊数, 有

$$\left\{ \begin{array}{l} 1) \tilde{a} = (\nu_a, \mu_a); \\ 2) \tilde{a} \cap \tilde{b} = (\min\{\mu_a, \mu_b\}, \max\{\nu_a, \nu_b\}); \\ 3) \tilde{a} \cup \tilde{b} = (\max\{\mu_a, \mu_b\}, \min\{\nu_a, \nu_b\}); \\ 4) \tilde{a} \oplus \tilde{b} = (\mu_a + \mu_b - \mu_a \mu_b, \nu_a \nu_b); \\ 5) \tilde{a} \otimes \tilde{b} = (\mu_a \mu_b, \nu_a + \nu_b - \nu_a \nu_b); \\ 6) \eta \tilde{a} = (1 - (1 - \mu_a)^\eta, \nu_a^\eta), \eta > 0; \\ 7) \tilde{a}^\eta = (\mu_a^\eta, 1 - (1 - \nu_a)^\eta), \eta > 0. \end{array} \right. \quad (6)$$

定义 4^[22] 设 $\tilde{a}_i = (\mu_i, \nu_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ 是 n 个直觉模糊数, 且设 IFWA: $\Theta^n \rightarrow \Theta$, 有

$$\text{IFWA}_\omega(\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n) = \sum_{i=1}^n \omega_i \tilde{a}_i = \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)^{\omega_i}, \prod_{i=1}^n \nu_i^{\omega_i} \right). \quad (7)$$

在企业管理中恰当地运用直觉模糊集成算子对决策方案各属性信息进行汇总, 可以突出重要属性对决策方案排序的影响, 节省决策成本, 提高决策的准确性. 因此本文用直觉模糊加权集成算子对各决策方案在不同属性下的直觉模糊评价价值进行集成, 从而得出各决策方案的集成属性直觉模糊评价价值.

2.2 决策者风险态度特征

不同企业可能具有异质性的风险偏好特性, 同一企业的决策者在不同发展阶段对与企业目标相关投资项目的风险态度也可能不同, 并且只有当企业的行业特色、企业发展战略的合理制订和决策者的风险态度特征等因素相匹配时, 企业才能合理配置资源并实现预期的管理目标, 因此在企业决策过程中, 要充分体现决策者的风险态度特征.

设决策者针对某企业投资方案在给定属性下的直觉模糊评价价值为 $\tilde{\beta}_1 = (0.6, 0.3, 0.1)$, 用投票模型解释为: 决策者对该投资方案支持的比例为 60%, 反对的比例为 30%, 不确定的比例为 10%. 可将直觉模

糊评价价值中的犹豫度(不确定性)视为风险, 该风险在未来会有 3 种转化可能性: 按照概率 p_1 转化为隶属度(从对方案不确定的决策者转化为支持该方案的决策者), 按照概率 p_2 仍然保留为犹豫度(仍然为对方案不确定的决策者), 按照概率 p_3 转化为非隶属度(从对方案不确定的决策者转化为反对该方案的决策者), 且 $p_1 + p_2 + p_3 = 1$. 文献[15]指出, 风险厌恶型决策者倾向于将犹豫度更多地分配给非隶属度, 按照概率 $q_1 (q_1 < 0.5)$ 分配给隶属度, 按照概率 $1 - q_1$ 分配给非隶属度; 风险中性型决策者倾向于将犹豫度在隶属度和非隶属度之间平均分配, 按照概率 0.5 将犹豫度平均分配给隶属度和非隶属度; 风险偏好型决策者倾向于将犹豫度更多地分配给隶属度, 按照概率 $q_2 (q_2 > 0.5)$ 分配给隶属度, 按照概率 $1 - q_2$ 分配给非隶属度.

3 决策方法

设 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_r\} (i = 1, 2, \dots, r)$ 为方案集, $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_\vartheta\} (j = 1, 2, \dots, \vartheta)$ 为属性集, d_{ij} 为方案 A_i 在满足属性 τ_j 的直觉模糊评价价值, $D = (d_{ij})_{r \times \vartheta}$ 为直觉模糊判断矩阵, $\omega = (\omega_{ij})_{r \times \vartheta}$ 为属性权重矩阵.

3.1 属性权重

在企业管理实践中, 系统决策主体(即对待评价复杂问题最终拍板的决策者)依据多属性因素对候选方案进行排序时, 每个属性因素的权重应随着待评价方案的变化而变化. 另外, 在决策过程中也不应忽视系统属性因素之间的复杂关联关系. 鉴于此, 针对方案 A_i , 其相应属性权重的具体确定方法如下.

Step 1: 在方案 A_i 情景下, 运用 DEMATEL 方法构造 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_\vartheta$ 之间的直接影响矩阵 $M^i = [m_{i'j'}]_{\vartheta \times \vartheta}$, 其中: $m_{i'j'} (i', j' \in N^+, \text{且 } i', j' \in [1, \vartheta], i' \neq j')$ 反映因素 $\tau_{i'}$ 对 $\tau_{j'}$ 的直接影响关系, 仍用 0、1、2、3、4 予以标度(表征相应的影响强度分别为“无影响、影响较弱、影响适中、影响较高、影响强烈”).

Step 2: 按下式将矩阵 M^i 规范化, 形成规范化直接影响矩阵 M_1^i :

$$M_1^i = M^i / \max_{1 \leq i' \leq \vartheta} \left(\sum_{j'=1}^{\vartheta} m_{i'j'} \right). \quad (8)$$

Step 3: 求解综合影响矩阵

$$M_2^i = [\theta_{i'j'}]_{v \times v} = M_1^i (I - M_1^i)^{-1}, \quad (9)$$

其中 I 为单位阵.

Step 4: 计算系统各属性因素的中心度和原因度. 由于各因素的影响度向量和被影响度向量分别

为

$$\Gamma_i^j = [\rho_{i'j'}^i]_{\vartheta \times 1} = \left[\sum_{j'=1}^{\vartheta} \theta_{i'j'} \right]_{\vartheta \times 1},$$

$$\sigma_i^j = [\sigma_{j'}^i]_{\vartheta \times 1} = \left[\sum_{i'=1}^{\vartheta} \theta_{i'j'} \right]_{1 \times \vartheta}^T, \quad (10)$$

依据DEMATEL规则,系统各因素的中心度向量为 $z_i^j = \Gamma_i^j + \sigma_i^j$. 在方案 A_i 情景下,系统属性因素 τ_j 的相应权重 ω_{ij} 的表达式为

$$\omega_{ij} = z_i^j / \sum_{j=1}^{\nu} z_i^j. \quad (11)$$

3.2 基于集对势理论的新记分函数

在企业管理实践中,投资方案之间往往不是相互独立的,而是相互联系、相互影响的.若要保证一个记分函数能够在复杂环境中合理有效,并准确筛选出企业的优先投资方案,不能仅考虑该投资方案的直觉模糊评价值,还应将该方案的直觉模糊评价值与其他投资方案的直觉模糊评价值进行对比.集对势理论通过将整个决策方案看作一个相互联系、相互作用的整体,不仅从“确定性”和“不确定性”两个维度对决策方案进行比较分析,而且从决策方案已有的信息进行深入追踪来对其未知信息进行推断,从而确保决策方案整体有效信息的完整性,进而有助于提高决策结果的准确性.

在此基础上,借鉴文献[14,17]的思想,给出如下融合主客观因素的犹豫度分配机理:

1) 对文献[14]所提出的记分函数中的犹豫度分配系数进行改进,在分母中只对其他所有方案的隶属度和非隶属度求和,运用集对势理论,通过方案之间的相互比较,考虑了方案集内部的关联性,对犹豫度进行初次客观分配;

2) 参考初次分配的结果,吸纳文献[17]的风险偏好系数 $2\lambda - 1$,搭建起决策者的风险偏好与犹豫度分配之间的“桥梁”,对犹豫度进行二次主观分配.

显然,上述将主客观相融合的分配方式能够克服现有记分函数中对犹豫度分配过于主观武断、对决策方案内在联系发掘不足的缺陷.

基于上述理论认知,本文提出如下新记分函数.

定义5 设 $\tilde{d}_i = (\mu_i, \nu_i) (i = 1, 2, \dots, r)$ 为第 i 个直觉模糊评价值,则新的记分函数 S_{new}^i 为

$$S_{\text{new}}^i = \mu_i - \nu_i + (\hat{\theta}_i')(2\lambda - 1)\pi_i,$$

$$i = 1, 2, \dots, r;$$

$$\theta_i' = \frac{\text{shi}(d_i)}{\text{shi}(I_i)}, \lambda \in [0, 1];$$

$$\text{shi}(I_i) = \frac{\sum_{i=1}^{i-1} \mu_i + \sum_{i=i+1}^r \mu_i}{\sum_{i=1}^{i-1} \nu_i + \sum_{i=i+1}^r \nu_i};$$

$$\text{shi}(d_i) = u_i/v_i;$$

$$\hat{\theta}_i' = \frac{\theta_i' - \min_i \theta_i'}{\max_i \theta_i' - \min_i \theta_i'}. \quad (12)$$

其中: $\text{shi}(d_i)$ 表示方案 A_i 支持程度与反对程度的对比,其值越大表明该方案越符合要求; $\text{shi}(I_i)$ 反映所有其他方案支持程度与反对程度的对比; θ_i' 为在对方案进行整体考虑的情景下,方案 A_i 直觉模糊评价值的相对集对势; $\hat{\theta}_i'$ 为将 θ_i' 规范化后的结果,其取值在 $[0, 1]$ 区间内; λ 为决策主体风险态度参数.

式(12)给出的新记分函数具有以下性质:

1) 当 $0.5 < \lambda \leq 1$ 时,决策主体表现为风险偏好;当 $\lambda = 0.5$ 时,决策主体表现为风险中性;当 $0 \leq \lambda < 0.5$ 时,决策主体表现为风险厌恶.

2) $S_{\text{new}} \in [-1, 1)$.

证明 在新记分函数 S_{new}^i 中, $(2\lambda - 1)/\text{shi}(I_i)$ 与 μ_i 和 ν_i 无关,故在求 S_{new}^i 对 μ_i 和 ν_i 的偏导数时,可以令 $(2\lambda - 1)/\text{shi}(I_i) = \beta$. 因为

$$\partial S_{\text{new}} / \partial \mu_i = [\beta_i(1 - 2\mu_i - \nu_i) + \nu_i] / \nu_i, \quad (13)$$

$$\partial S_{\text{new}} / \partial \nu_i = [\beta_i(\mu_i^2 - \mu_i) - \nu_i^2] / \nu_i^2. \quad (14)$$

要求解 S_{new} 的最值,令式(13) = 0,式(14) = 0.由于 $\text{shi}(d_i) = u_i/v_i$,有 $\nu_i \neq 0$,进而有 $\beta = -\nu_i/(1 - 2\mu_i - \nu_i) = \nu_i^2/(\mu_i^2 - \mu_i)$,经整理得

$$\mu_i^2 - \nu_i^2 - 2\mu_i\nu_i - \mu_i + \nu_i = 0. \quad (15)$$

假设 $\pi_i = 0, \mu_i = 1 - \nu_i$,代入式(15)可求得 $\mu_i = 0, \nu_i = 1 (\mu_i = 1, \nu_i = 0$ 舍去).

因为 μ_i 的取值越大, ν_i 的取值越小, S_{new}^i 的值越大; μ_i 的取值越小, ν_i 的取值越大, S_{new}^i 的值越小,所以 $\mu_i = 0, \nu_i = 1, S_{\text{new}}^i$ 取最小值 -1 ,但 $\mu_i = 1, \nu_i = 0$ 取不到,故 S_{new}^i 无法取得最大值 1 .

综上所述, $S_{\text{new}}^i \in [-1, 1)$. \square

3.3 方法的实现步骤

企业管理实践中,决策者在不同情境下往往会体现出不同的风险偏好,这里依据风险态度参数 λ 的取值,将决策主体的风险态度划分为风险偏好、风险中性和风险厌恶3种表现形式.鉴于此,给出如下基于非线性复杂系统观的直觉模糊变权多属性决策方法的实现步骤.

Step 1: 决策主体在征询组织内外部专家建议的基础上给出直觉模糊判断矩阵 $D = (\tilde{d}_{ij})_{r \times \vartheta}$. 需要强

调指出,在此阶段,矩阵 D 中判断信息更多体现的是咨询专家对于方案在属性表现信息的偏好判断,决策主体主要承担咨询会议组织者、决策问题背景介绍、回答咨询专家问题和对于咨询专家判断信息的统计处理等角色。

Step 2: 决策主体运用 DEMATEL 方法得出属性权重矩阵 $\omega = (\omega_{ij})_{r \times \vartheta}$ (具体操作详见第 3.1 节)。

Step 3: 根据式 (7) 计算出决策方案的集成属性直觉模糊评价值 $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_r$, 如下式所示:

$$\tilde{d}_i = \text{IFWA}_\omega(\tilde{d}_{i1}, \tilde{d}_{i2}, \dots, \tilde{d}_{i\vartheta}) = \sum_{j=1}^{\vartheta} \omega_{ij} \tilde{d}_{ij} = \left(1 - \prod_{j=1}^{\vartheta} (1 - \mu_{ij})^{\omega_{ij}}, \prod_{j=1}^{\vartheta} \nu_{ij}^{\omega_{ij}}\right), \quad i = 1, 2, \dots, r. \quad (16)$$

Step 4: 由式 (12) 和 $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_r$ 计算 $S_{\text{new}}^1, S_{\text{new}}^2, \dots, S_{\text{new}}^r$, 并按其大小进行方案优劣排序。

4 案例应用及对比分析

4.1 案例应用

某投资公司欲对从事民用无人机行业的企业进行投资,有 A_1, A_2, \dots, A_5 五家企业可供选择。来自该公司不同职能部门的决策者组成评审小组对备选企业进行评价,评审小组在评价的过程中可以咨询外部专家的意见。对备选企业进行投资时,有 3 个评价属性,分别是企业的品牌价值 (τ_1)、企业的技术水平 (τ_2)、企业的市场占有率 (τ_3)。

由于决策主体在对备选企业评价过程中,可能在属性 τ_1, τ_2, τ_3 上存在偏好依赖关联关系,在使用 DEMATEL 方法计算各方案的属性权重前,需要对决策主体就属性是否存在偏好依赖结构关系作出定性调查。决策主体回答为: 1) 企业的技术水平对品牌价值和市场占有率有着较好的支撑作用; 2) 即使企业的品牌价值较高,而技术水平较差,该企业也不应该作为首选; 3) 即使企业的市场占有率较高,但技术水平和品牌价值较差,该企业也不应获得较高的评价。

将 5 家企业 A_1, A_2, \dots, A_5 视作评价方案,按本文所提出的方法,请系统决策主体在汇总咨询专家判断信息的基础上给出针对方案 A_1, A_2, \dots, A_5 的直觉模糊判断关系矩阵 D , 如下所示:

$$D = \begin{bmatrix} (0.6,0.3) & (0.9,0.1) & (0.3,0.2) \\ (0.6,0.3) & (0.7,0.1) & (0.4,0.3) \\ (0.7,0.2) & (0.5,0.5) & (0.5,0.4) \\ (0.7,0.1) & (0.8,0.1) & (0.4,0.3) \\ (0.5,0.1) & (0.6,0.1) & (0.3,0.3) \end{bmatrix}.$$

请系统决策主体分别针对各方案情境,运用 DEMATEL 方法判断系统属性之间的直接影响矩阵,给出如下属性直接影响矩阵 M_1, M_2, \dots, M_5 :

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 \\ 4 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, M_2 = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 1 \\ 4 & 0 & 2 \\ 2 & 2 & 0 \end{bmatrix}, M_3 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 1 \\ 2 & 2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 4 & 0 & 2 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, M_5 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 4 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 \end{bmatrix}.$$

结合方案 1 在直觉模糊判断关系矩阵中各属性下的取值,简要解释直接影响矩阵 M_1 的含义: 在属性 τ_1 (品牌价值) 下,决策结果支持方案 1 的比例为 60%, 反对该方案的比例为 30%; 在属性 τ_2 (技术水平) 下,决策结果支持方案 1 的比例为 90%, 反对方案 1 的比例为 10%; 在属性 τ_3 (市场占有率) 下,决策者支持方案 1 的比例为 30%, 反对该方案的比例为 20%。因此,决策主体认为在该方案情境下,企业 1 的品牌价值对技术水平的影响适中,对市场占有率几乎无影响; 企业 1 的技术水平对品牌价值有较强的影响,对市场占有率则有着较弱的影响; 企业 1 的市场占有率则对品牌价值和技水平均有微弱的影响。

根据 DEMATEL 方法求解属性权重的步骤,计算出相应的属性权重矩阵为

$$\omega = \begin{bmatrix} 0.402 & 0.422 & 0.176 \\ 0.358 & 0.377 & 0.265 \\ 0.421 & 0.248 & 0.331 \\ 0.365 & 0.391 & 0.244 \\ 0.368 & 0.380 & 0.250 \end{bmatrix}.$$

由式 (7) 计算得出各方案的集成属性直觉模糊评价值为

$$\tilde{d}_1 = (0.754, 0.176), \tilde{d}_2 = (0.600, 0.198),$$

$$\tilde{d}_3 = (0.597, 0.316), \tilde{d}_4 = (0.697, 0.131),$$

$$\tilde{d}_5 = (0.500, 0.132).$$

由式 (12) 和 $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_5$ 求解各方案的综合直觉模糊得分值,并依据其取值大小对各方案进行优劣排序,结果见表 1 (括号内数字表示对应方案的排序次序,后同)。

表 1 决策主体不同风险态度下各方案排序值及排序结果

决策主体风险态度	S_{new}^1	S_{new}^2	S_{new}^3	S_{new}^4	S_{new}^5
风险偏好 ($\lambda = 1$)	0.63(2)	0.47(4)	0.28(5)	0.74(1)	0.57(3)
风险中性 ($\lambda = 0.5$)	0.58(1)	0.40(3)	0.28(5)	0.57(2)	0.37(4)
风险厌恶 ($\lambda = 0$)	0.53(1)	0.34(3)	0.28(4)	0.39(2)	0.17(5)

1) 当 $\lambda = 1$ (决策主体表现为风险偏好) 时

$$S_{new}^1 = 0.63, S_{new}^2 = 0.47, S_{new}^3 = 0.28,$$

$$S_{new}^4 = 0.74, S_{new}^5 = 0.57;$$

$$A_4 \succ A_1 \succ A_5 \succ A_2 \succ A_3.$$

2) 当 $\lambda = 0.5$ (决策主体表现为风险中性) 时

$$S_{new}^1 = 0.58, S_{new}^2 = 0.40, S_{new}^3 = 0.28,$$

$$S_{new}^4 = 0.57, S_{new}^5 = 0.37;$$

$$A_1 \succ A_4 \succ A_2 \succ A_5 \succ A_3.$$

3) 当 $\lambda = 0$ (决策主体表现为风险厌恶) 时

$$S_{new}^1 = 0.53, S_{new}^2 = 0.34, S_{new}^3 = 0.28,$$

$$S_{new}^4 = 0.39, S_{new}^5 = 0.17;$$

$$A_1 \succ A_4 \succ A_2 \succ A_3 \succ A_5.$$

通过比较决策主体在3类不同风险态度下的投资方案排序结果可知,决策主体在不同风险态度情境下,各方案的优劣排序次序是不同的,充分体现了决策结果对决策主体偏好态度变化的敏感性,这与企业决策实际情况也是相吻合的。

1) 当决策主体表现为风险偏好时, $A_4 \succ A_1, A_5 \succ A_2$. $A_4 \succ A_1$ 是因为 A_4 和 A_1 的技术水平和市场占有率相差不大,但是 A_4 的品牌价值却优于 A_1 , 这表明 A_4 的技术水平对未来品牌价值的提升支持空间有限, A_4 未来经营的风险较高. $A_5 \succ A_2$ 是因为 A_5 和 A_2 的技术水平相差不大,但是 A_5 的品牌价值和市场占有率优于 A_2 , 这表明 A_5 的技术水平对未来品牌价值和市场占有率的提升支持空间有限, A_5 未来经营的风险较高。

2) 当决策主体表现为风险中性时,由于决策主体对 A_1, A_4, A_2, A_5, A_3 的技术水平支持程度依次递减,依据决策主体的属性偏好,此时对方案的排序结果也符合其属性结构偏好,因此这一结果是合理的。

3) 当决策主体表现为风险厌恶时,他或她更青睐技术水平、品牌价值以及市场占有率三者较为均衡的方案,因此从定性推理认知视角看 $A_3 \succ A_5$ 也是合理的。

4.2 与文献[6]方法的对比分析

从本文所提出方法实现机理和案例分析可知,新的记分函数是核心,因此下文通过与文献[6]类似方法对比分析来进一步验证所提出记分函数的相对合理性. 与本文相同,文献[6]也充分考虑了决策主体的风险态度,指出采用传统记分函数可能出现反直觉的方案评价结果,并给出了如下函数对各方案的直觉模

糊值予以测度:

$$Z_Q(x) = (1 - (t/t + 1)\pi(x))(\mu(x) + (1/t + 1)\pi(x)), \quad (17)$$

其中参数 t 为决策主体的风险态度,且 $t > 0$. 当 $0 < t < 1$ 时,决策主体表现为风险偏好;当 $t = 1$ 时,决策主体表现为风险中性;当 $t > 1$ 时,决策主体表现为风险厌恶;当 $t \rightarrow 0$ 或 $t \rightarrow +\infty$ 时,分别表示风险偏好和风险厌恶的极端值. 为便于对比,使用第4.1节案例应用部分得出的方案直觉模糊评价值 $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_5$, 通过式(17)计算出在不同风险态度下各方案的排序值,见表2.

表2 决策主体不同风险态度下各方案排序值及排序结果 (运用文献[6]测度函数)

决策主体风险态度	$Z_Q(1)$	$Z_Q(2)$	$Z_Q(3)$	$Z_Q(4)$	$Z_Q(5)$
风险偏好 ($t = 0.5$)	0.78(1)	0.69(3)	0.64(5)	0.77(2)	0.65(4)
风险中性 ($t = 1$)	0.76(1)	0.63(3)	0.61(4)	0.72(2)	0.56(5)
风险厌恶 ($t = 1.5$)	0.75(1)	0.60(3)	0.60(3)	0.69(2)	0.50(4)

分析表2可知,当 $t = 0.5$ 时,各方案的优劣排序为 $A_1 \succ A_4 \succ A_2 \succ A_5 \succ A_3$; 当 $t = 1$ 时,各方案的优劣排序为 $A_1 \succ A_4 \succ A_2 \succ A_3 \succ A_5$; 当 $t = 1.5$ 时,各方案的优劣排序为 $A_1 \succ A_4 \succ A_2 \sim A_3 \succ A_5$. 显然,3种风险态度下各方案的优劣次序不同,该测度函数体现了方案排序相对决策主体风险态度变化的敏感性,但当 $t = 1.5$ 时,方案2和方案3的排序值均为0.6,无法对其予以有效甄别. 此外,在风险偏好情境下, $A_1 \succ A_4$ 和 $A_2 \succ A_5$ 均与案例背景下的决策主体对于属性偏好的定性认知相悖。

与表2决策主体风险态度参数 t 取0.5、1、1.5相匹配,本文所提出新记分函数中的 λ 分别取0.75、0.5、0.25时,各方案的排序值和排序结果见表3. 分析表3可知,基于新记分函数得出的、在3类不同风险态度情境下的各方案优劣排序也是不同的. 一方面,充分体现出方案排序结果相对决策主体风险态度变化的敏感性;另一方面,3种排序结果不仅易于对方案优劣进行甄别,而且与案例决策主体对于属性偏好的定性认知相符合。

表3 决策主体不同风险态度下各方案排序值及排序结果 (运用本文记分函数)

决策主体风险态度	S_{new}^1	S_{new}^2	S_{new}^3	S_{new}^4	S_{new}^5
风险偏好 ($\lambda = 0.75$)	0.60(2)	0.44(4)	0.28(5)	0.65(1)	0.47(3)
风险中性 ($\lambda = 0.5$)	0.58(1)	0.40(3)	0.28(5)	0.57(2)	0.37(4)
风险厌恶 ($\lambda = 0.25$)	0.55(1)	0.37(3)	0.28(4)	0.48(2)	0.27(5)

通过上述定量对比分析可知,本文所提出的新记分函数较之文献[6]测度函数更为合理.此外,从式(17)所示函数导出过程看,缺乏较为深入的严密性论证.相比较而言,式(12)所提记分函数在导出时有着较为严密的逻辑分析和数理推证(详见第3.2节),因此,从理论依据充分性视角分析,本文的新记分函数也比式(17)更为合理.

4.3 与文献[7]方法的定性对比分析

文献[7]提出了一种考虑决策者风险态度的直觉模糊多属性决策新方法,该方法有较强的数理严密性,是一种评价直觉模糊偏好值的有效方法.但该方法与本文所提方法在实现机理上存在较大差异,通过案例数据难以找到共同的比较基础,因此这里从定性层面对两种方法的异同予以对比分析.

两者的相同之处在于:1)研究对象相同,即点估计型直觉模糊集;2)均体现了方案排序结果对于决策主体风险态度变化的敏感性.

两者的差异之处主要有以下三点:1)使用的测度函数有明显不同,本文使用的是易于实践操作的记分函数 S_{new}^i ,而文献[7]给出了存在多种表达形式的BUM函数,如 $Q(s) = s^t$ 、 $Q(s) = (1 - e^{-s}) / (1 - e^{-1})^t$ 等,在管理决策实践中如何选用合适的BUM函数目前作者尚未给出有现实指导意义的操作机理,因此在推广应用时存在一定的局限性;2)使用的属性权重体系不同,文献[7]在导出属性因素权重时提出了基于线性规划的权重计算方法,并且有效地反映了决策主体的属性偏好结构,但从本质上看属性权重仍采用的是不因方案变化而变化的固权体系,难以有效反映方案与属性在权重视角下的非线性关联关系.相比较而言,由式(11)可知,本文基于方案情境和DEMATEL导出的属性权重 ω_{ij} 显然会因待评价方案不同而不同,体现的是适应复杂社会经济系统评价问题的变权决策权重体系.比如,某高校在对教师的教学表现进行测评时,年轻教师由于任教时间短,在评价其教学表现时显然不应应对教学经验这一属性赋予较高的权重,而应对其教学态度和教学能力提升潜质等属性赋予较高的权重;对于老教师而言,应重点关注其讲授内容知识的新颖性(即对该属性赋予较高的权重)等方面.由此可见,决策主体采用变权决策的评价权重体系更符合现实情境;3)本文方法在使用过程中明确强调决策主体和咨询专家在不同阶段的角色和作用,即在初始直觉模糊判断矩阵构造阶段,决策主体承担决策辅助者的角色,咨询专家在该阶段发挥着重要作用.在属性权重导出和方案综合直觉

模糊排序值计算阶段,咨询专家不再承担任何角色,决策主体此时成为属性关联分析判断以及体现风险行为态度偏好的唯一决策分析者,从而充分突显组织的战略偏好、确保属性关联影响判断和属性权重偏好结构认知的一致性.相比较而言,文献[7]并未对决策主体与咨询专家的作用地位进行界定和区分.

5 结论

传统直觉模糊固权多属性决策方法可以较好地刻画评价对象的不确定内涵,近年来已成为决策研究领域的热点问题.然而,由于其未将决策过程视为一个决策各要素相互联结的复杂系统,从非线性复杂系统观来看存在着如下明显的缺陷:1)属性因素固权体系无法体现属性权重因待评价方案不同而变化的特征,难以有效揭示复杂系统问题蕴含的非线性联结机理;2)将决策方案视为彼此孤立、互不相关的个体,未能从系统整体上挖掘方案之间蕴含的非线性关系,难以反映系统层次之间的突变性等特征;3)绝大多数相关文献未深入分析决策主体风险偏好的异质性与系统其他要素之间的关系,使决策群体的风险态度趋向同质性.

为克服上述缺陷,本文基于非线性复杂观提出了一种直觉模糊多属性变权决策方法,其创新之处在于:1)基于属性变权视角,充分揭示了属性之间的偏好依赖关联关系,并应用DEMATEL方法求解出评价属性在不同方案下的变权信息;2)从考虑方案因素关联和合理引入决策主体风险态度视角提出了新的记分函数.利用集对势理论将决策方案看作一个密切相关的整体,通过决策方案的相互对比,对犹豫度进行了初次分配;将决策者的风险偏好融合到记分函数中,对犹豫度进行了二次分配.在此基础上,通过计算综合直觉模糊得分值对方案进行排序.案例应用和对比分析结果表明,本文所提出方法是切实可行的,有着较强的实践应用推广价值.

参考文献(References)

- [1] Xu Z S. Intuitionistic preference relations and their application in group decision making[J]. Information Sciences, 2007, 177(11): 2363-2379.
- [2] Beliakov G, Bustince H, Goswami D P, et al. On averaging operators for Atanassov's intuitionistic fuzzy sets[J]. Information Sciences, 2011, 181(6): 1116-1124.
- [3] Wan S P, Li D F. Fuzzy LINMAP approach to heterogeneous MADM considering comparisons of alternatives with hesitation degrees[J]. Omega, 2013, 41(6): 925-940.
- [4] Wan S P, Li D F. Atanassov's intuitionistic fuzzy programming method for heterogeneous multiattribute

- group decision making with Atanassov's intuitionistic fuzzy truth degrees[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2014, 22(2): 300-312.
- [5] Wan S P, Xu J, Dong J Y. Aggregating decision information into interval-valued intuitionistic fuzzy numbers for heterogeneous multi-attribute group decision making[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016, 113: 155-170.
- [6] Guo K. Amount of information and attitudinal-based method for ranking Atanassov's intuitionistic fuzzy values[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2014, 22(1): 177-188.
- [7] Wan S P, Wang F, Dong J Y. A novel risk attitudinal ranking method for intuitionistic fuzzy values and application to MADM[J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 40(C): 98-112.
- [8] Gupta P, Mehlatat M K, Grover N. Intuitionistic fuzzy multi-attribute group decision-making with an application to plant location selection based on a new extended VIKOR method[J]. *Information Sciences*, 2016, 370/371: 184-203.
- [9] Yue C. A geometric approach for ranking interval-valued intuitionistic fuzzy numbers with an application to group decision-making[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 102: 233-245.
- [10] Wan S P, Wang F, Dong J Y. A preference degree for intuitionistic fuzzy values and application to multi-attribute group decision making[J]. *Information Sciences*, 2016, 370/371: 127-146.
- [11] Wan S P, Dong J Y. A possibility degree method for interval-valued intuitionistic fuzzy multi-attribute group decision making[J]. *J of Computer & System Sciences*, 2014, 80(1): 237-256.
- [12] Ouyang Y, Pedrycz W. A new model for intuitionistic fuzzy multi-attributes decision making[J]. *European J of Operational Research*, 2016, 249(2): 677-682.
- [13] 李春好, 杜元伟, 孙永河, 等. 多属性隐式变权决策分析方法[J]. *中国管理科学*, 2012, 20(5): 163-172.
(Li C H, Du Y W, Sun Y H, et al. Approach to multiple attribute decision making with weights implicitly changing[J]. *Chinese J of Management Science*, 2012, 20(5): 163-172.)
- [14] 李鹏, 刘思峰, 朱建军. 基于前景理论的随机直觉模糊决策方法[J]. *控制与决策*, 2012, 27(11): 1601-1606.
(Li P, Liu S F, Zhu J J. Intuitionistic fuzzy stochastic multi-criteria decision-making methods based on prospect theory[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(11): 1601-1606.)
- [15] Chen S M, Tan J M. Handling multi-criteria fuzzy decision-making problems based on vague set theory[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1994, 67(2): 163-172.
- [16] 刘华文. 多目标模糊决策 Vague 集方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2004, 24(5): 103-109.
(Liu H W. Vague set methods of multi-criteria fuzzy decision making[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2004, 24(5): 103-109.)
- [17] 陈均明, 李红霞. 直觉模糊数风险偏好一致排序方法和决策[J]. *模糊系统与数学*, 2010, 24(6): 85-91.
(Chen J M, Li H X. A ranking method and decision-making with consistent risk preference in intuitionistic fuzzy numbers[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2010, 24(6): 85-91.)
- [18] 王中兴, 罗雪鹏. 基于决策者风险偏好的直觉模糊数排序方法[J]. *模糊系统与数学*, 2014, 28(6): 129-136.
(Wang Z X, Luo X P. A method for ranking intuitionistic fuzzy numbers based on the risk preference of decision maker[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2014, 28(6): 129-136.)
- [19] 李春好, 孙永河, 贾艳辉, 等. 变权层次分析法[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(4): 723-731.
(Li C H, Sun Y H, Jia Y H, et al. Analytic hierarchy process based on variable weights[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2010, 30(4): 723-731.)
- [20] Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, 20(1): 87-96.
- [21] Chong T, Yi S, Che H. Application of set pair analysis method on occupational hazard of coal mining[J]. *Safety Science*, 2017, 92: 10-16.
- [22] 徐泽水. 直觉模糊信息集成理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 12-20.
(Xu Z S. Intuitionistic fuzzy information integrated theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2008: 12-20.)

(责任编辑: 郑晓蕾)