

DOI:10.3969/j.issn.1000-1565.2019.06.001

单值中智语言环境下的 TODIM 决策方法

郭子雪, 孙方方

(河北大学 管理学院, 河北 保定 071002)

摘要:基于决策过程中属性值信息的不确定性以及决策者对收益与损失风险态度的差异,提出了单值中智语言环境下的交互式多属性决策方法(TODIM).首先,利用单值中智语言集量化属性值信息中的不确定度并进一步地描述属性值信息;其次,基于改进后的语言标度函数定义了单值中智语言数的距离测度和集结算子;在此基础上,通过标准差计算属性权重,依据 TODIM 方法计算各方案的全局优势度并排序;最后,通过节能服务公司的选择案例验证了该方法的可行性与有效性.

关键词:单值中智语言集;语言变量;交互式多属性决策(TODIM);优势度

中图分类号:C934 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1565(2019)06-0561-07

A TODIM decision making method in single-valued neutrosophic linguistic environment

GUO Zixue, SUN Fangfang

(College of Management, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: Based on the uncertainty of attribute value information and the different risk attitudes of decision-makers towards gain and loss, an extended TODIM (an acronym in Portuguese of interactive and multi-criteria decision making) under single-valued neutrosophic linguistic environment is proposed. First, the uncertainty in attribute value information can be quantified directly by using single-valued neutrosophic language set. Second, based on the extended language scale function, the distance measure and aggregator of single-valued neutrosophic linguistic numbers are defined. Based on these, weights are calculated by standard deviation and ranks are obtained by the TODIM method. Finally, the practical application process of the proposed method is illustrated by the case of energy-saving service company selection, which verifies the feasibility and effectiveness of the method.

Key words: single-valued neutrosophic linguistic set; linguistic variable; TODIM method; dominance degree

自 Smarandache^[1]从哲学角度提出了中智逻辑和中智集的概念以后,有关中智集的研究就引起了人们的重视.在中智集中,不确定度是可以明确量化的,而且真实隶属度、不确定隶属度、失真隶属度是相互独立的.与模糊集^[2]、直觉模糊集^[3]相比,它能更好地量化不确定度,处理不确定和不一致信息.为了中智集能够

收稿日期:2019-03-27

基金项目:河北省社科基金资助项目(HB18GL008)

第一作者:郭子雪(1964—),男,河北清河人,河北大学教授,博士生导师,主要从事决策理论与方法、物流与供应链管理方向研究.E-mail: guo_zx@163.com

在实际工程中应用, Ye^[4] 提出简单中智集, 之后不断发展出单值中智集^[5] 和区间中智集^[6] 等. 中智集研究的方向主要有中智集的基本性质、中智模糊多属性决策方法等. Wu^[7] 通过交叉熵计算简单中智数的距离; 基于模糊交叉熵和单值中智交叉熵, Şahin^[8] 定义了区间中智交叉熵, 并将其应用于多属性决策问题中; Ye^[4] 给出了简单中智集的集结算子, 但该集结算子在一些场景是不可取的; Peng 等^[9] 对此做了修正, 提出了新的集结算子. 此外, 很多学者将中智集与其他排序方法相结合, 例如 ELECTRE(选择消去法)^[10]、TOPSIS(逼近理想的排序方法)^[11] 等, 应用于多属性决策问题中, 建立了中智环境下的多属性决策模型; 朱轮等^[12] 设计了衡量单值中智数不确定性的信息熵公式, 提出了单值中智多属性决策方法.

模糊多属性决策的一个重要分支是基于语言变量的决策方法. Zadeh^[13] 最早提出采用语言变量来描述偏好信息, 并引起了国内外学者的重视. Xian 等^[14] 提出了区间直觉模糊语言诱导混合算子, 将区间直觉模糊语言与 TOPSIS 方法结合建立了多属性群决策模型; Zhang 等^[15] 将犹豫模糊语言术语集与双重犹豫模糊集结合, 建立了双重犹豫模糊语言多属性决策模型; 李海涛等^[16] 利用 EMD 方法, 将语言信息集结为正态分布随机变量信息, 结合经典灰色随机决策方法对方案进行排序择优. 在中智环境下, 也有一些学者研究中智语言变量, 但将其应用于多属性决策的较少. Ye^[17] 在中智集的基础上提出了单值中智语言集的概念; 进一步地, Wang 等^[18] 将麦克劳林对称均值算子应用到单值中智语言数中.

针对不确定性的多属性决策问题, 单值中智语言集具备了中智集和语言变量的优势, 使其在处理不确定信息的能力更强. 分析发现, 以上研究成果都是基于决策者完全理性的假设, 在实际决策过程中, 决策者往往是有限理性的. 交互式多属性决策方法(TODIM)^[19] 是在前景理论的基础上考虑决策者心理的行为决策方法. 因此, 本文将经典的 TODIM 拓展到单值中智语言环境中, 进而获得方案的排序结果, 为决策者提供决策支持.

1 预备知识

定义 1^[4] 设 X 是一个对象(点)集, x 是对象集中的元素, 定义在 X 上的简单中智集 A 是由真实度隶属函数 $T_A(x)$ 、不确定度隶属函数 $I_A(x)$ 以及失真度隶属函数 $F_A(x)$ 三者共同构成, 记

$$A = \{ (x, T_A(x), I_A(x), F_A(x)) \mid x \in X \}, \quad (1)$$

其中, $T_A(x) \in [0, 1]$, $I_A(x) \in [0, 1]$, $F_A(x) \in [0, 1]$, 且对任意 $x \in X$, $T_A(x)$ 、 $I_A(x)$ 和 $F_A(x)$ 都是 $[0, 1]$ 中确定的 1 个实数, 即 $0 \leq T_A(x) + I_A(x) + F_A(x) \leq 3$.

定义 2^[20] 设 $S = \{s_\theta \mid \theta = 0, 1, \dots, 2t\}$ 是有限且完全有序的离散语言术语集, 其中 t 是正整数, 集合 S 的基为奇数, 语言术语集 S 的粒度为 $2t + 1$.

语言术语集 S 满足如下条件. 1) 有序性: 若 $i > j$, $s_i > s_j$; 2) 存在逆运算算子 neg : 若 $j = 2t - i$, $neg(s_i) = s_j$; 3) 存在极大化和极小化运算: 若 $s_i \geq s_j$, $\max(s_i, s_j) = s_i$, $\min(s_i, s_j) = s_j$.

为了尽量减少语言决策信息在运算过程中丢失, 把原有的离散性语言标度扩展为连续性语言标度 $\tilde{S} = \{s_\theta \mid \theta \in [0, 2t]\}$ ^[21].

定义 3^[17] 设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为给定的论域, $S = \{s_0, s_1, \dots, s_{2t}\}$ 为有限且完全有序的离散语言术语集. 单值中智语言集 A 定义为

$$A = \{ \langle x_i, [s_{\theta(x_i)}, (T_A(x_i), I_A(x_i), F_A(x_i))] \rangle \}, \quad (2)$$

其中, $x_i \in X$, $s_{\theta(x_i)} \in S$, $T_A(x_i) \in [0, 1]$, $I_A(x_i) \in [0, 1]$, $F_A(x_i) \in [0, 1]$. $T_A(x_i)$ 、 $I_A(x_i)$ 、 $F_A(x_i)$ 分别表示 x_i 在 X 为 $s_{\theta(x_i)}$ 的真实度、不确定度、失真度, 对任意的 $x_i \in X$, 均有 $0 \leq T_A(x_i) + I_A(x_i) + F_A(x_i) \leq 3$.

A 可以看作是单值中智语言数的集合 $A = \{ \langle s_{\theta(x_i)}, (T_A(x_i), I_A(x_i), F_A(x_i)) \rangle \mid x \in X \}$, 其中 $\langle s_{\theta(x_i)}, (T_A(x_i), I_A(x_i), F_A(x_i)) \rangle$ 称为单值中智语言数, 以小写字母 a 、 b 等表示.

2 单值中智语言数的运算

在单值中智语言环境中,若出现 2 个中智语言数的语言术语都是 s_0 ,但模糊部分不同.这种情况在文献[17]中,得分函数均为 0,认为这 2 个数是相等的,无法判断 2 个中智语言数的大小,进而不能保证后续运算的精确性.因此依据拉普拉斯平滑定理改进了文献[17]的语言标度函数,分别在分母加 2,分子加 1.

定义 4 设 $S = \{s_0, s_1, \dots, s_{2t}\}$ 表示语言术语集,改进后的语言标度函数可定义为

$$f(s_{\theta(x_i)}) = \frac{\theta(x_i) + 1}{2t + 2} (\theta(x_i) = 0, 1, 2, \dots, 2t), \quad (3)$$

其中, $f \in [\frac{1}{2t+2}, \frac{2t+1}{2t+2}]$ 该函数是严格单调递增的连续函数.

定义 5^[22] 设 $a = \langle s_{\theta(a)}, (T_a, I_a, F_a) \rangle, b = \langle s_{\theta(b)}, (T_b, I_b, F_b) \rangle$, 是任意 2 个单值中智语言数, f 为语言标度函数, f^{-1} 是其反函数, $\lambda > 0$, 单值中智语言数运算定义如下:

- 1) $a + b = \langle f^{-1}(f(s_{\theta(a)}) + f(s_{\theta(b)})), (\frac{f(s_{\theta(a)})T_a + f(s_{\theta(b)})T_b}{f(s_{\theta(a)}) + f(s_{\theta(b)})}, \frac{f(s_{\theta(a)})I_a + f(s_{\theta(b)})I_b}{f(s_{\theta(a)}) + f(s_{\theta(b)})}, \frac{f(s_{\theta(a)})F_a + f(s_{\theta(b)})F_b}{f(s_{\theta(a)}) + f(s_{\theta(b)})}) \rangle$;
- 2) $a \times b = \langle f^{-1}(f(s_{\theta(a)}) \times f(s_{\theta(b)})), (T_a T_b, I_a + I_b - I_a I_b, F_a + F_b - F_a F_b) \rangle$;
- 3) $\lambda a = \langle f^{-1}(\lambda f(s_{\theta(a)})), (T_a, I_a, F_a) \rangle$;
- 4) $a^\lambda = \langle f^{-1}((f(s_{\theta(a)}))^\lambda), ((T_a)^\lambda, 1 - (1 - I_a)^\lambda, 1 - (1 - F_a)^\lambda) \rangle$;
- 5) $neg(a) = \langle f^{-1}(f(s_{\theta(2t)}) - f(s_{\theta(a)})), (F_a, 1 - I_a, T_a) \rangle$.

定义 6^[22] 设 $a = \langle s_{\theta(a)}, (T_a, I_a, F_a) \rangle$ 是单值中智语言数, f 是语言标度函数, 那 a 的得分函数 $s(a)$ 定义为

$$s(a) = f(s_{\theta(a)})(T_a + 1 - I_a + 1 - F_a). \quad (4)$$

精确度函数 $h(a)$ 定义为

$$h(a) = f(s_{\theta(a)})(T_a - F_a). \quad (5)$$

确定度函数 $\pi(a)$ 定义为

$$\pi(a) = f(s_{\theta(a)})T_a. \quad (6)$$

定义 7^[22] 设 $a = \langle s_{\theta(a)}, (T_a, I_a, F_a) \rangle, b = \langle s_{\theta(b)}, (T_b, I_b, F_b) \rangle$ 是 2 个单值中智语言数, 单值中智语言数之间的比较方法如下:

- 1) 如果 $s(a) > s(b)$, 则 $a > b$;
- 2) 如果 $s(a) = s(b), h(a) > h(b)$, 则 $a > b$;
- 3) 如果 $s(a) = s(b), h(a) = h(b), \pi(a) > \pi(b)$, 则 $a > b$;
- 4) 如果 $s(a) = s(b), h(a) = h(b), \pi(a) = \pi(b)$, 则 $a = b$.

定义 8 设 $a = \langle s_{\theta(a)}, (T_a, I_a, F_a) \rangle, b = \langle s_{\theta(b)}, (T_b, I_b, F_b) \rangle$ 为任意 2 个单值中智语言数, $S = \{s_0, s_1, \dots, s_{2t}\}$ 为语言术语集, f 为语言标度函数, 则单值中智语言数的欧氏距离为

$$d(a, b) = [|f(\theta(a))T_a - f(\theta(b))T_b|^2 + |f(\theta(a))I_a - f(\theta(b))I_b|^2 + |f(\theta(a))F_a - f(\theta(b))F_b|^2]^{1/2}. \quad (7)$$

定义 9 设 $B = \{ \langle s_{\theta(x_i)}, (T(x_i), I(x_i), F(x_i)) \rangle \}$, $(i = 1, 2, \dots, n)$ 是单值中智语言数的集合, $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 是 x_i 的权重向量, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 并且 $w_i \geq 0, (i = 1, 2, \dots, n)$, 单值中智语言的加权算子 (SVNLWA) 定义为

$$SVNLWA = \sum_{i=1}^n (w_i x_i) = \sum_{i=1}^n w_i \langle s_{\theta(x_i)}, (T(x_i), I(x_i), F(x_i)) \rangle = \langle f^{-1}(\sum_{i=1}^n w_i f(s_{\theta(x_i)})), (\frac{\sum_{i=1}^n w_i f(s_{\theta(x_i)})T(x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i f(s_{\theta(x_i)})}, \frac{\sum_{i=1}^n w_i f(s_{\theta(x_i)})I(x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i f(s_{\theta(x_i)})}, \frac{\sum_{i=1}^n w_i f(s_{\theta(x_i)})F(x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i f(s_{\theta(x_i)})}) \rangle. \quad (8)$$

如果权重向量 $w = (\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n})^T$ 时, 则 $SVNLWA$ 算子变为单值中智语言算数平均算子 ($SVNLAA$), 即

$$SVNLAA = \langle f^{-1}(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(s_{\theta(x_i)})), (\frac{\sum_{i=1}^n f(s_{\theta(x_i)})T(x_i)}{\sum_{i=1}^n f(s_{\theta(x_i)})}, \frac{\sum_{i=1}^n f(s_{\theta(x_i)})I(x_i)}{\sum_{i=1}^n f(s_{\theta(x_i)})}, \frac{\sum_{i=1}^n f(s_{\theta(x_i)})F(x_i)}{\sum_{i=1}^n f(s_{\theta(x_i)})} \rangle. \quad (9)$$

3 单值中智语言环境下的 TODIM 方法

在多属性决策问题中, 设 $A' = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 表示方案集, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 为属性集, 其权重向量为 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, 满足 $0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^n w_j = 1, S = \{s_0, s_1, \dots, s_{2t}\}$ 为语言术语集, 则方案 A_i 在属性 C_j 下的评价值为 $x_{ij} = \langle s_{ij}, (T_{ij}, I_{ij}, F_{ij}) \rangle$. 由此得到单值中智语言决策矩阵 $D = (x_{ij})_{m \times n}$. 单值中智语言环境下的 TODIM 决策方法的步骤如下.

步骤 1: 单值中智语言决策矩阵 $D = (x_{ij})_{m \times n}$ 规范化. 多属性决策问题中, 有效益型和成本型 2 种属性类型, 根据式(10)得到规范化后的决策矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$.

$$r_{ij} = \begin{cases} x_{ij} & , C_j \text{ 为效益型属性,} \\ \text{neg}(x_{ij}) & , C_j \text{ 为成本型属性.} \end{cases} \quad (10)$$

步骤 2: 确定属性权重. 考虑方案属性值的差异对决策的重要性, 本文采用标准差衡量属性值的差异. 当全部方案的某个属性 C_j 的属性值差异越大, 属性 C_j 对方案排序所起的作用越大, 此时对属性 C_j 赋予较大权重. 根据式(11)计算各方案的 C_j 属性期望; 根据式(12)计算所有属性的标准差; 因此通过式(13)计算属性 C_j 的权重.

$$E(C_j) = SVNLAA(r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{mj}). \quad (11)$$

$$\sigma(C_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (d(r_{ij}, E(C_j)))^2}. \quad (12)$$

$$w_j = \frac{\sigma(C_j)}{\sum_{j=1}^n \sigma(C_j)}. \quad (13)$$

步骤 3: 计算相对权重. ω_{jt} 表示属性 C_j 相对于属性 C_t 的相对权重, 其中 $\omega_t = \max\{\omega_j | j = 1, 2, \dots, n\}$.

$$\omega_{jt} = \frac{\omega_j}{\omega_t}, (j, t = 1, 2, \dots, n). \quad (14)$$

步骤 4: 构建优势度矩阵. 对于属性 C_j , 备选方案 A_i 与 A_k 的优势度计算如下:

$$\delta(A_i, A_k) = \sum_{j=1}^n \Phi_j(A_i, A_k), \quad (15)$$

$$\text{其中, } \Phi_j(A_i, A_k) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\omega_{jt}}{\sum_{j=1}^n \omega_{jt}} * d(r_{ij}, r_{kj})}, & r_{ij} > r_{kj}, \\ 0 & , r_{ij} = r_{kj}, \\ -\frac{1}{\theta} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \omega_{jt}}{\omega_{jt}} * d(r_{ij}, r_{kj})}, & r_{ij} < r_{kj}. \end{cases}$$

$\Phi_j(A_i, A_k)$ 表示方案 A_i 相对方案 A_k 在属性 C_j 下的优势度, θ 是损失衰减因数 ($\theta > 0$), θ 越小, 表明决策者的损失规避程度越高. $r_{ij} > r_{kj}$ 表示对于属性 C_j , 方案 A_i 获得的收益大于方案 A_k ; $r_{ij} = r_{kj}$, 表示对于属性 C_j , 方案 A_i 与 A_k 收益无差别; $r_{ij} < r_{kj}$, 则表示对于属性 C_j , 方案 A_i 获得的收益小于方案 A_k , 意味着损失.

在单值中智语言环境下,通过单值中智语言数的比较方法判断损失或受益,距离测度衡量收益或损失的大小,最终的优势矩阵通过加总各属性下的相对优势度得出.

步骤 5:计算全局优势度.

$$\xi(A_i) = \frac{\sum_{k=1}^n \delta(A_i, A_k) - \min_i \left\{ \sum_{k=1}^n \delta(A_i, A_k) \right\}}{\max_i \left\{ \sum_{k=1}^n \delta(A_i, A_k) \right\} - \min_i \left\{ \sum_{k=1}^n \delta(A_i, A_k) \right\}}, i=1, 2, \dots, m. \quad (16)$$

步骤 6:排序.依据全局优势度 $\xi(A_i)$ 的大小,对所有方案进行排序, $\xi(A_i)$ 越大,相应的方案就越好.

4 算例分析

为说明所提出方法的运用过程和方法的可行性与有效性,将单值中智语言变量的 TODIM 方法应用到节能服务公司(ESCO)的选择问题中.有 4 个备选的 ESCO(A_1, A_2, A_3, A_4)可供用能单位选择.在选择时,考虑四项指标:技术能力(C_1)、项目管理能力(C_2)、风险控制能力(C_3)、成本(C_4),其中 C_1, C_2, C_3 为收益型属性,评价价值越高越好, C_4 为成本型属性,评价价值越低越好;语言术语集 $S = \{s_0, s_1, s_2, s_3, s_4\}$, 即 5 个粒度:很差,差,一般,好,很好.专家采用单值中智语言评估各方案,同时提供以下信息:1)他认为这个评估的真实度;2)他对这个评估的不确定程度;3)他对这个评估的失真度.例如专家对方案 A_1 的 C_1 评价为 s_3 ,同时认为该评价的真实度为 0.4,不确定程度为 0.6,失真度为 0.2.专家对 x_1 方案的属性 C_1 的评价为 $\langle s_3, (0.4, 0.6, 0.2) \rangle$.表 1 为决策者对 4 个供能单位的单值中智语言评价矩阵表.

表 1 单值中智语言评价矩阵

Tab.1 Single-valued neutrosophic linguistic evaluation matrix

	C_1	C_2	C_3	C_4
A_1	$\langle s_2, (0.4, 0.4, 0.3) \rangle$	$\langle s_3, (0.4, 0.4, 0.1) \rangle$	$\langle s_3, (0.1, 0.7, 0.3) \rangle$	$\langle s_4, (0.6, 0.5, 0.0) \rangle$
A_2	$\langle s_2, (0.8, 0.1, 0.1) \rangle$	$\langle s_2, (0.7, 0.4, 0.5) \rangle$	$\langle s_0, (0.1, 0.4, 0.8) \rangle$	$\langle s_2, (0.1, 0.8, 0.9) \rangle$
A_3	$\langle s_3, (0.7, 0.2, 0.3) \rangle$	$\langle s_3, (0.6, 0.5, 0.1) \rangle$	$\langle s_2, (0.9, 0.2, 0.1) \rangle$	$\langle s_3, (0.7, 0.4, 0.4) \rangle$
A_4	$\langle s_3, (0.5, 0.3, 0.5) \rangle$	$\langle s_2, (0.5, 0.8, 0.1) \rangle$	$\langle s_3, (0.2, 0.9, 0.5) \rangle$	$\langle s_3, (0.6, 0.2, 0.4) \rangle$

步骤 1:将单值中智语言评价矩阵 D 规范化,得到规范化单值中智语言评价矩阵 R ,如表 2 所示.

表 2 规范化单值中智语言评价矩阵

Tab.2 Normalized single-valued neutrosophic linguistic evaluation matrix

	C_1	C_2	C_3	C_4
A_1	$\langle s_2, (0.4, 0.4, 0.3) \rangle$	$\langle s_3, (0.4, 0.4, 0.1) \rangle$	$\langle s_3, (0.1, 0.7, 0.3) \rangle$	$\langle s_0, (0.0, 0.5, 0.6) \rangle$
A_2	$\langle s_2, (0.8, 0.1, 0.1) \rangle$	$\langle s_2, (0.7, 0.4, 0.5) \rangle$	$\langle s_0, (0.1, 0.4, 0.8) \rangle$	$\langle s_2, (0.9, 0.2, 0.1) \rangle$
A_3	$\langle s_3, (0.7, 0.2, 0.3) \rangle$	$\langle s_3, (0.6, 0.5, 0.1) \rangle$	$\langle s_2, (0.9, 0.2, 0.1) \rangle$	$\langle s_3, (0.4, 0.6, 0.7) \rangle$
A_4	$\langle s_3, (0.5, 0.3, 0.5) \rangle$	$\langle s_2, (0.5, 0.8, 0.1) \rangle$	$\langle s_3, (0.2, 0.9, 0.5) \rangle$	$\langle s_3, (0.4, 0.8, 0.6) \rangle$

步骤 2:属性权重的确定.首先通过式(11)计算各方案的不同属性的期望: $E(C_1) = \langle s_{2.5}, (0.60, 0.25, 0.31) \rangle, E(C_2) = \langle s_{2.5}, (0.54, 0.51, 0.19) \rangle, E(C_3) = \langle s_{2.0}, (0.33, 0.62, 0.36) \rangle, E(C_4) = \langle s_2, (0.49, 0.56, 0.51) \rangle$;然后利用式(12)计算标准差,并通过式(13)计算各属性权重, $\tau\omega = (0.179, 0.142, 0.339, 0.346)^T$.

步骤 3:根据公式(14)计算相对权重. $\omega_{1r} = 0.50, \omega_{2r} = 0.41, \omega_{3r} = 0.98, \omega_{4r} = 1$.

步骤 4:构建优势度矩阵.考虑决策者风险态度,取 $\theta = 2$.将备选方案两两对比,根据式(15)计算方案 A_i 相对每个方案 A_j 相对优势度,并得到优势度矩阵,见表 3.

表 3 优势度矩阵

Tab.3 Dominance degree matrix

	A_1	A_2	A_3	A_4
A_1	0	-0.65	-2.42	-0.83
A_2	-0.19	0	-1.29	-0.24
A_3	1.24	0.12	0	1.04
A_4	-0.22	-1.62	-2.10	0

步骤 5:用公式(16)标准化优势度,计算各方案的优势度结果分别为 $\xi(A_1)=0.01$, $\xi(A_2)=0.43$, $\xi(A_3)=1$, $\xi(A_4)=0$.依据 $\xi(A_i)$ 越大,相应的方案越好,对所有方案进行排序,4 个方案的排序为 $A_3 > A_2 > A_1 > A_4$.

为了检验结果的稳定性,选取不同的 θ 值(损失衰减因数)对此算例进行计算,得到的结果如表 4 所示.当 $\theta \leq 2$ 时,排列顺序为 $A_3 > A_2 > A_1 > A_4$;但当 $\theta \geq 3$ 时,排列顺序为 $A_3 > A_2 > A_4 > A_1$.这意味着调整决策者的损失规避倾向会对排序结果产生影响,也说明决策者的心理行为会影响其决策.

表 4 不同 θ 值的方案排序表Tab.4 Ranking orders of alternatives with different θ

	$\theta=0.5$		$\theta=1$		$\theta=2$		$\theta=3$		$\theta=5$	
	ξ	排序	ξ	排序	ξ	排序	ξ	排序	ξ	排序
A_1	0.03	3	0.02	3	0.01	3	0	4	0	4
A_2	0.42	2	0.42	2	0.43	2	0.43	2	0.44	2
A_3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A_4	0	4	0	4	0	4	0.01	3	0.02	3

5 结论

本文利用单值中智语言集描述属性值信息并考虑决策者的行为,利用 TODIM 方法,提出了中智语言环境下的多属性决策方法.首先改进了语言标度函数,依据该标度函数改进了单值中智语言数的距离测度和集结算子.鉴于在实际决策中决策者不是完全理性的,面对收益与损失的态度具有差异性,采用基于有限理性的 TODIM 方法对方案进行排序.此外,基于客观赋权方法,以标准差衡量方案之间的差异,并确定权重.最后,将单值中智语言变量的 TODIM 方法应用到节能服务公司的选择评价问题中,并对不同的 θ 值进行敏感性分析,结果显示了该方法的可行性与有效性.所提出的方法能够很好地表达决策者或专家的认知,在一定程度上量化了不确定性,尽可能地避免了信息的丢失与歪曲.在实际决策过程中,可以根据决策者的风险偏好与行业的发展趋势调整参数,以便得到更准确的评价.未来研究中,还可以进一步研究中智环境下的群体决策或者大规模群体决策.

参 考 文 献:

- [1] SMARANDACHE F. A unifying field in logics: neutrosophic logic, neutrosophy, neutrosophic set, neutrosophy probability[M]. Rehoboth: American Research Press, 1999.
- [2] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Inform Control, 1965, 8(3): 338-356. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [3] ATANASSOV K. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets Systems, 1986, 20(1): 87-96. DOI: 10.1016/S0165-0114(86)

- 80034-3.
- [4] YE J. A multicriteria decision-making method using aggregation operators for simplified neutrosophic sets[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2014, 26(5): 2459-2466. DOI: 10.3233/IFS-130916.
- [5] WANG H, SMARANDACHE F, ZHANG Y Q, et al. Single valued neutrosophic sets[M]. *Multispace Multistruct*, 2010: 410-413.
- [6] WANG H, SMARANDACHE F, ZHANG Y Q, et al. Interval neutrosophic sets and logic: theory and applications in computing[J]. *Computer Science*, 2005, 65(4): 1-87. DOI:10.5281/zenodo.8818.
- [7] WU X H, WANG J Q, PENG J J, et al. Cross-entropy and prioritized aggregation operator with simplified neutrosophic sets and their application in multi-criteria decision-making problems[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2016, 18(6): 1104-1116. DOI :10.1007/s40815-016-0180-2.
- [8] ŞAHIN R. Cross-entropy measure on interval neutrosophic sets and its applications in multicriteria decision making[J]. *Neural Computing and Applications*, 2017, 28(5): 1177-1187. DOI:10.1007/s00521-015-2131-5.
- [9] PENG J J, WANG J Q, ZHANG H Y, et al. An outranking approach for multi-criteria decision-making problems with simplified neutrosophic sets[J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 25: 336-346. DOI: 10.1016/j.asoc.2014.08.070.
- [10] JI P, ZHANG H Y, WANG J Q. Selecting an outsourcing provider based on the combined MABAC-ELECTRE method using single-valued neutrosophic linguistic sets[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 120: 429-441. DOI: 10.1016/j.cie.2018.05.012.
- [11] XIAN S D, DONG Y F, LIU Y B, et al. A novel approach for linguistic group decision making based on generalized interval-valued intuitionistic fuzzy linguistic induced hybrid operator and TOPSIS[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2018, 33(2): 288-314. DOI: 10.1016/j.cie.2018.05.012.
- [12] 朱轮,杨波.单值中智信息熵及其多属性决策方法[J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(15): 107-111. DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.1712-0192.
- [13] ZADEH L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning: I[J]. *Information Sciences*, 1975, 8(3): 199-249. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90036-5.
- [14] XIAN S D, DONG Y F, LIU Y B, et al. A novel approach for linguistic group decision making based on generalized interval-valued intuitionistic fuzzy linguistic induced hybrid operator and TOPSIS[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2018, 33(2): 288-314. DOI:10.1002/int.21931.
- [15] ZHANG R C, LI Z M, LIAO H C. Multiple-attribute decision-making method based on the correlation coefficient between dual hesitant fuzzy linguistic term sets[J]. *Knowledge-based Systems*, 2018, 159: 186-192. DOI:10.1016/j.knsys.2018.07.014.
- [16] 李海涛,罗觉,王洁方.语言型群决策专家信息集结的随机 EMD 方法[J]. *统计与决策*, 2018, 34(19): 46-50. DOI:10.13546/j.cnki.tjyc.2018.19.010.
- [17] YE J. An extended TOPSIS method for multiple attribute group decision making based on single valued neutrosophic linguistic numbers[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2015, 28(1): 247-255. DOI: 10.3233/IFS-141295.
- [18] WANG J Q, YANG Y, LI L. Multi-criteria decision-making method based on single-valued neutrosophic linguistic Maclaurin symmetric mean operators[J]. *Neural Computing and Applications*, 2018, 30(5): 1529-1547. DOI: 10.1007/s00521-016-2747-0.
- [19] GOMESL F A M. An application of the TODIM method to the multicriteria rental evaluation of residential properties [J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 193(1): 204-211. DOI:10.1016/j.ejor.2007.10.046.
- [20] DELGADO M, VERDEGAY J L, VILA M A. Linguistic decision-making models[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 1992, 7(5): 479-492. DOI:10.1002/int.4550070507.
- [21] XU Z S. A note on linguistic hybrid arithmetic averaging operator in multiple attribute group decision making with linguistic information[J]. *Group Decision and Negotiation*, 2006, 15(6): 593-604. DOI:10.1007/s10726-005-9008-4.
- [22] TIAN Z P, WANG J Q, WANG J, et al. Simplified neutrosophic linguistic multi-criteria group decision-making approach to green product development[J]. *Group Decision and Negotiation*, 2017, 26(3): 597-627. DOI:10.1007/s10726-016-9479-5.