

基于区间二型模糊EDAS的多属性决策方法

金腾宇, 耿秀丽

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 针对多属性决策存在的复杂性和不确定性问题, 提出基于区间二型模糊平均解距离法 (evaluation based on distance from average solution, EDAS) 的多属性决策方法。采用区间二型模糊集合 (interval type-2 fuzzy sets, IT2FS) 表达评价信息解决专家的偏好信息存在个体化差异问题, 并纳入EDAS对备选方案进行排序。以区间二型模糊数表达评价信息构建决策矩阵, 以计算得到的综合评价值的去模糊化结果作为最终的方案排序依据。针对EDAS中属性权重需要从外部获取的问题, 采用区间二型模糊集合改进的最优最劣法 (best-worst method, BWM) 确定属性权重。最后, 以某汽车制造企业选购新能源汽车云服务方案为例, 验证所提方法的有效性。

关键词: 多属性决策; 区间二型模糊集合; EDAS; BWM

中图分类号: C934

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2023)01-0091-07

Multi-attribute Decision Making Method Based on Interval Type-2 Fuzzy EDAS

JIN Tengyu, GENG Xiuli

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the complexity and uncertainty of multi-attribute decision-making, a multi-attribute decision-making method based on interval type-2 fuzzy EDAS is proposed. Interval type-2 fuzzy sets (IT2FS) is used to express the evaluation information to solve the problem of individual differences in experts' preference information. The evaluation based on distance from average solution (EDAS) is used to rank the alternatives, and the interval type-2 fuzzy number is used to express the evaluation information to construct the decision matrix. The final ranking of the schemes is based on the defuzzification result of the calculated comprehensive evaluation value. To solve the problem that attribute weights need to be obtained from outside in EDAS, the best worst method (BWM) improved by interval type-2 fuzzy sets is used to determine the attribute weights. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by taking the cloud service scheme of new energy vehicles purchased by an automobile manufacturing enterprise as an example.

Key words: multi-criteria decision; interval type-2 fuzzy sets (IT2FS); evaluation based on distance from average solution (EDAS); best-worst method (BWM)

由Ghorabae等^[1]提出的平均解距离评价法 (evaluation based on distance from average solution, EDAS) 的基本思想是以平均解为基础求解各备选方案与平均解间的距离, 并根据距离的远近进行方案排序。EDAS方法相比其他方法如逼近理想解 (technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 和多准则妥协解 (vlsekkriterijumska optimizacija I kompromisno resenje, VIKOR), 不需

要对原始评价信息进行规范化处理, 解决了信息失真问题。因此, EDAS既保证了评价信息的完整性又让计算过程更加简单、计算结果更加准确。决策方法的不确定导致模糊决策模型的不确定, EDAS作为一种新的决策方法已应用于多个领域。文献[2]将EDAS应用于智慧无废城市的评选; 文献[3]将EDAS应用于可再生能源的评价; 文献[4]将EDAS应用于医疗废物处理技术的评价。

收稿日期: 2021-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72271164); 教育部人文社会科学研究规划基金资助项目 (19YJA630021); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20133120120002)

作者简介: 金腾宇 (1996—), 男, 江苏省人, 硕士研究生, 主要研究方向为决策理论与方法。

针对EDAS方法中出现的评价信息模糊性和不确定性问题,文献[5]用概率语言术语集处理EDAS中的评价信息解决不确定性输入问题;文献[6]用三角模糊集处理EDAS中的评价;文献[7]将犹豫模糊语言引入EDAS中研究多阶段决策问题。然而上述文献中专家在表达偏好信息时难以刻画语言变量的个体化差异。Zadeh^[8]提出的二型模糊集包含主、次两个隶属度,相比传统模糊集能更全面地反映不确定性信息,但计算较为复杂,不适用于实际决策问题。Mendel等^[9]提出的区间二型模糊集在处理不确定信息时简化了隶属度函数,降低了二型模糊集的计算难度,并能更好地表达语言变量的多含义特征^[10]。目前,采用区间二型模糊集改进EDAS方法的研究还很少,本文将区间二型模糊集与EDAS方法结合,用区间二型模糊数表达评价信息,并将评价信息直接用于方案排序,在评价信息不失真的前提下简化计算步骤。为使评价结果更加直观,由区间二型模糊EDAS得到的各方案综合评价难以直接进行大小排序,通过去模糊化公式进行转化得到精确数,并以此为依据进行方案评价。

EDAS方法也存在属性权重需要从外部获取的问题。针对这一问题,文献[11-12]将AHP和EDAS结合获取属性权重。在复杂的决策问题中,AHP方法在进行属性间两两比较的过程中虽然可以保证评价的全面性,但评价过程尤为繁琐。假设共有 n 个属性,Razaei^[13]提出的最优最劣法(best-worst method, BWM)是在选出最优属性和最劣属性的基础上,将这两个属性与其他属性进行 $2n-3$ 比较,简化计算过程的同时也保证了结果的可靠性。

综上,本文提出基于区间二型模糊EDAS方法,并结合BWM解决多属性决策问题,采用区间二型模糊集表达专家的评价信息。用区间二型模糊BWM获取属性权重,然后用区间二型模糊EDAS对备选方案进行排序。最后,以某汽车制造企业选购新能源汽车云服务方案为例,验证所提方法的有效性。

1 区间二型模糊集合相关概念

定义1^[9] 假设 $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ 是二型模糊集合隶属度函数,则二型模糊集合 $\tilde{A}$ 可以表示为

$$\tilde{A} = \{(x,u), \mu_{\tilde{A}}(x,u) | \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1], 0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x,u) \leq 1\}. \quad (1)$$

其中, x 表示 $\tilde{A}$ 取值的论域; u 表示论域 X 上任意元素 x 隶属于 $\tilde{A}$ 的程度,即主隶属度; $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ 是主隶属度的隶属度,即次隶属度。

如果所有次隶属度取值为1,即 $\mu_{\tilde{A}}(x,u) = 1$,则称 $\tilde{A}$ 为区间二型模糊集合,可以表示为

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} 1/(x,u), J_x \subseteq [0,1]. \quad (2)$$

定义2^[14] 对于一个区间二型模糊集合 $\tilde{A}$,其上隶属度函数 $\mu_{\tilde{A}}^U(x)$ 和下隶属度函数 $\mu_{\tilde{A}}^L(x)$ 服从一维随机分布,可以表示为

$$\text{FOU}(\tilde{A}) = \bigcup_{x \in X} J_x = \{(x,u) : u \in J_x = [\mu_{\tilde{A}}^U(x), \mu_{\tilde{A}}^L(x)]\}. \quad (3)$$

区间二型模糊集合通常被认作为一种简化形式,可以用三角模糊集来表示上、下隶属度函数(如图1),例如

$$\tilde{A} = (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L) = ((a_1^U, a_2^U, a_3^U; h_{\tilde{A}^U}), (a_1^L, a_2^L, a_3^L; h_{\tilde{A}^L})). \quad (4)$$

其中, $h_{\tilde{A}^U}$ 和 $h_{\tilde{A}^L}$ 分别表示模糊集合 $\tilde{A}$ 的上、下隶属度,且 $0 \leq h_{\tilde{A}^L} \leq h_{\tilde{A}^U} \leq 1$; $a_1^U \leq a_2^U \leq a_3^U$, $a_1^L \leq a_2^L \leq a_3^L$, $a_1^U \leq a_1^L$, $a_3^U \leq a_3^L$ 。

定义3^[15] 假设区间二型模糊集合 $\tilde{A} = (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L) = ((a_1^U, a_2^U, a_3^U; h_{\tilde{A}^U}), (a_1^L, a_2^L, a_3^L; h_{\tilde{A}^L}))$,则集合 $\tilde{A}$ 的去模糊化结果 $R(\tilde{A})$ 可以表示为

$$R(\tilde{A}) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(a_3^U - a_1^U) + (a_2^U - a_1^U)}{3} + a_1^U + h_{\tilde{A}^L} \left[\frac{(a_3^L - a_1^L) + (a_2^L - a_1^L)}{3} + a_1^L \right] \right\}. \quad (5)$$

定义4^[16] 假设存在任意两个区间二型模糊集合 $\tilde{A} = (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L) = ((a_1^U, a_2^U, a_3^U; h_{\tilde{A}^U}), (a_1^L, a_2^L, a_3^L; h_{\tilde{A}^L}))$ 和 $\tilde{B} = (\tilde{B}^U, \tilde{B}^L) = ((b_1^U, b_2^U, b_3^U; h_{\tilde{B}^U}), (b_1^L, b_2^L, b_3^L; h_{\tilde{B}^L}))$,则 $\tilde{A}$ 和 $\tilde{B}$ 之间的运算法则如下。

$$\tilde{A} + \tilde{B} = \left[\begin{array}{c} a_1^U + b_1^U, a_2^U + b_2^U, a_3^U + b_3^U; \min\{h_{\tilde{A}^U}, h_{\tilde{B}^U}\} \\ a_1^L + b_1^L, a_2^L + b_2^L, a_3^L + b_3^L; \min\{h_{\tilde{A}^L}, h_{\tilde{B}^L}\} \end{array} \right]; \quad (6)$$

$$\tilde{A} - \tilde{B} = \left[\begin{array}{c} a_1^U - b_1^U, a_2^U - b_2^U, a_3^U - b_3^U; \min\{h_{\tilde{A}^U}, h_{\tilde{B}^U}\} \\ a_1^L - b_1^L, a_2^L - b_2^L, a_3^L - b_3^L; \min\{h_{\tilde{A}^L}, h_{\tilde{B}^L}\} \end{array} \right]; \quad (7)$$

$$\tilde{A} \tilde{B} = \left[\begin{array}{c} a_1^U b_1^U, a_2^U b_2^U, a_3^U b_3^U; \min\{h_{\tilde{A}^U}, h_{\tilde{B}^U}\} \\ a_1^L b_1^L, a_2^L b_2^L, a_3^L b_3^L; \min\{h_{\tilde{A}^L}, h_{\tilde{B}^L}\} \end{array} \right]; \quad (8)$$

$$\tilde{A} / \tilde{B} = \left[\begin{array}{c} a_1^U / b_1^U, a_2^U / b_2^U, a_3^U / b_3^U; \min\{h_{\tilde{A}^U}, h_{\tilde{B}^U}\} \\ a_1^L / b_1^L, a_2^L / b_2^L, a_3^L / b_3^L; \min\{h_{\tilde{A}^L}, h_{\tilde{B}^L}\} \end{array} \right]; \quad (9)$$

$$t\tilde{A} = \begin{cases} ((ta_1^U, ta_2^U, ta_3^U; h_{\tilde{A}}^U), (ta_1^L, ta_2^L, ta_3^L; h_{\tilde{A}}^L)), t \geq 0; \\ ((ta_3^U, ta_2^U, ta_1^U; h_{\tilde{A}}^U), (ta_3^L, ta_2^L, ta_1^L; h_{\tilde{A}}^L)), t < 0. \end{cases} \quad (10)$$

其中, t 表示倍乘运算法则系数的任意实数。

图1中, 横坐标 x 表示 $\tilde{A}$ 取值的论域, 纵坐标 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 表示论域 x 所对应的隶属度函数。

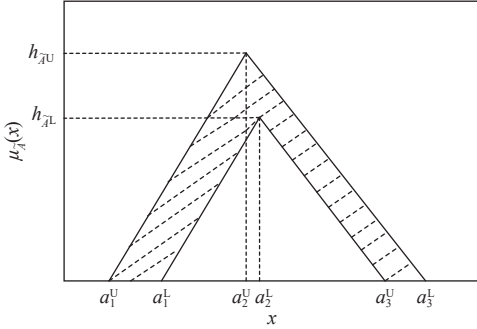


图1 区间二型模糊集几何示意图

Figure 1 Geometric diagram of interval type-2 fuzzy sets

2 基于区间二型模糊BWM计算属性权重

将区间二型模糊集合与BWM方法相结合, 解决由于评价信息犹豫性和不确定性带来的信息失真问题, 保证评价信息和评价结果的准确性。将区间二型模糊集引入BWM中计算属性权重, 假设 n 个属性构成的属性集为 $C = \{C_1, \dots, C_j, \dots, C_n\}$, 其中, $1 \leq j \leq n$, k 个专家构成的专家集为 $E = \{E_p | 1 \leq p \leq k\}$, 具体步骤如下。

步骤1 在属性集 C 中通过专家 $E = \{E_p | 1 \leq p \leq k\}$ 讨论确定最优属性 C_B 和最劣属性 C_W 。

步骤2 专家基于区间二型模糊集合进行评价, 分别确定最优属性 C_B 和最劣属性 C_W 相对于其他属性 C_j 的偏好程度, 进而构建比较向量 $\tilde{O}_B^p$ 和 $\tilde{O}_W^p$ 。则第 p 个专家进行评价打分形成的比较向量表示为

$$\tilde{O}_B^p = (\tilde{O}_{B1}^p, \dots, \tilde{O}_{Bj}^p, \dots, \tilde{O}_{Bn}^p); \quad (11)$$

$$\tilde{O}_W^p = (\tilde{O}_{1W}^p, \dots, \tilde{O}_{jW}^p, \dots, \tilde{O}_{nW}^p). \quad (12)$$

其中, $\tilde{O}_B^p$ 和 $\tilde{O}_W^p$ 分别表示最优属性和最劣属性分别与其他属性比较构成的向量; $\tilde{O}_{Bj}^p$ 和 $\tilde{O}_{jW}^p$ 分别表示第 j 个属性和最优、最劣属性构成的比较向量。

步骤3 计算属性权重。利用式(5)先将专家的评价结果进行去模糊化处理, 将得到的去模糊化

结果用数学模型(13)计算, 得到权重 $w = (w_1^*, \dots, w_j^*, \dots, w_n^*)$ 。

$\min \xi$ 。

s.t.

$$\left| \frac{w_B}{w_j^*} - O_{Bj} \right| \leq \xi, \text{ for all } j;$$

$$\left| \frac{w_j^*}{w_W} - O_{jW} \right| \leq \xi, \text{ for all } j;$$

$$\sum_j w_j^* = 1;$$

$$w_j^* \geq 0, \text{ for all } j.$$

(13)

其中, ξ 表示满足所有约束条件的最优解, 即目标函数最小值; O_{Bj} 和 O_{jW} 分别表示第 j 个属性和最优、最劣属性去模糊化后的比较向量; w_B 和 w_W 分别表示最优属性和最劣属性的权重值。

3 基于区间二型模糊EDAS进行方案排序

将区间二型模糊集合与EDAS方法结合, 解决实际决策情境下复杂性和不确定性问题。区间二型模糊集在表达偏好信息时解决难以刻画语言变量的个体化差异问题, 在处理不确定信息时能更好地表达语言变量的多含义特征, 将其引入EDAS中既能保证评价信息完整性, 又能根据平均解计算简化排序过程。

假设备选方案有 m 种, 方案构成的集合为 $D = \{D_1, \dots, D_i, \dots, D_m\}$, 其中, $1 \leq i \leq m$ 。每个备选方案的属性有 n 个, 表示为 $C = \{C_1, \dots, C_j, \dots, C_n\}$, 其中, $1 \leq j \leq n$, 属性权重由BWM方法计算得出。专家 $E = \{E_p | 1 \leq p \leq k\}$ 基于不同的属性对方案进行评价, 用区间二型模糊集合来表达评价结果。采用EDAS对方案对评价结果进行排序, 具体步骤如下。

步骤1 根据评估语言量表构建模糊矩阵 Y 。矩阵中元素为 $\tilde{y}_{ij}^p$, 表示第 p 个决策者评价第 i 个备选方案第 j 个属性的语义值。

$$Y = [\tilde{y}_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} \tilde{y}_{11} & \tilde{y}_{12} & \dots & \tilde{y}_{1n} \\ \tilde{y}_{21} & \tilde{y}_{22} & \dots & \tilde{y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{y}_{m1} & \tilde{y}_{m2} & \dots & \tilde{y}_{mn} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

$$\text{其中, } \tilde{y}_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k \tilde{y}_{ij}^p.$$

步骤2 确定平均解, 构造平均解矩阵 V 。

$$V = [\tilde{v}_j]_{1 \times n} \quad (15)$$

$$\text{其中, } \tilde{v}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tilde{y}_{ij}。$$

步骤3 计算各备选方案与平均解间的距离, 构建正向距离矩阵 P 和反向距离矩阵 Q 。

$$P = [\tilde{d}_{ij}]_{m \times n} \quad (16)$$

$$Q = [\tilde{e}_{ij}]_{m \times n} \quad (17)$$

$$\tilde{d}_{ij} = \begin{cases} \frac{Z(\tilde{y}_{ij} - \tilde{v}_j)}{R(\tilde{v}_j)}, & j \in B; \\ \frac{Z(\tilde{v}_j - \tilde{y}_{ij})}{R(\tilde{v}_j)}, & j \in N. \end{cases} \quad (18)$$

$$\tilde{e}_{ij} = \begin{cases} \frac{Z(\tilde{v}_j - \tilde{y}_{ij})}{R(\tilde{v}_j)}, & j \in B; \\ \frac{Z(\tilde{y}_{ij} - \tilde{v}_j)}{R(\tilde{v}_j)}, & j \in N. \end{cases} \quad (19)$$

其中, B 和 N 分别表示效益型属性集合和成本型属性集合, 函数 R 的计算公式已在第1节中给出, 函数 Z 定义为

$$Z(\tilde{A}) = \begin{cases} \tilde{A}, & R(\tilde{A}) > 0; \\ 0, & R(\tilde{A}) \leq 0. \end{cases}$$

步骤4 计算各备选方案的正向距离加权和 $\tilde{S}_i$ 和反向距离加权和 $\tilde{T}_i$ 。

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n (w_j^* \tilde{d}_{ij}); \quad (20)$$

$$\tilde{T}_i = \sum_{j=1}^n (w_j^* \tilde{e}_{ij}). \quad (21)$$

步骤5 计算各备选方案正向距离加权和 $\tilde{S}_i$ 与反向距离加权和 $\tilde{T}_i$ 的标准化值。

$$\bar{S}_i = \frac{\tilde{S}_i}{\max_i (R(\tilde{S}_i))}; \quad (22)$$

$$\bar{T}_i = \frac{\tilde{T}_i}{\max_i (R(\tilde{T}_i))}. \quad (23)$$

步骤6 计算各备选方案的评价分数 $R(\bar{\lambda}_i)$, 根据评价分数对备选方案进行排序, 评价分数最高的方案是备选方案中的最佳方案。

$$\bar{\lambda}_i = \frac{1}{2} (\bar{S}_i + \bar{T}_i). \quad (24)$$

4 案例分析

在能源和环保的压力下, 新能源汽车将会成为未来汽车的发展方向。随着新能源车市场的扩大和需求的增加, 各大车企为了提升自身竞争力, 在新能源车零部件技术革新的同时能够提供给用户更舒适的驾车体验。将云计算理念应用到汽车行业, 通过提供新能源汽车云服务推动车用级物联网的形成, 保证车与车、车与人之间的交互。某汽车制造企业欲给新研发的一款新能源汽车配套相应的云服务, 优选一家有竞争力的云服务提供商, 实现车辆间的通信、自动规划主动性维护等功能。采用本文所提方法, 该企业欲在5家不同的云服务商中选择与自身匹配的云服务方案, 这5种云服务方案构成的集合为 $D = \{D_1, D_2, D_3, D_4, D_5\}$ 。经专家组讨论, 确定了云服务方案的6个属性: 响应时间(C_1)、易用性(C_2)、服务安全性(C_3)、功能完善性(C_4)、服务可拓展性(C_5)、费用合理度(C_6)。在实际运用过程中, 要求云服务的易用性高、安全、功能完善、可拓展性好以及费用更合理, 则将属性 $C_2 \sim C_6$ 定义为效益型指标; 同时要求云服务响应时间越短越好, 则将属性 C_1 定义为成本型指标。采用区间二型模糊集合来表达专家的评价信息, 评估语言量表^[17]如表1所示。

表 1 区间二型模糊集对应的评估语言量表

Table 1 Evaluation language scale corresponding to interval type-2 fuzzy set

语言变量	对应的区间二型模糊集
极低 (VL)	(0,0,1;1), (0,0,0.5;0.5)
低 (L)	(0,1,3;1), (0.5,1,2;0.5)
偏低 (ML)	(1,3,5;1), (2,3,4;0.5)
中等 (M)	(3,5,7;1), (4,5,6;0.5)
偏高 (MH)	(5,7,9;1), (6,7,8;0.5)
高 (H)	(7,9,10;1), (8,9,9.5;0.5)
极高 (VH)	(9,10,10;1), (9.5,10,10;0.5)

由3位资深专家组成的专家组 $E = \{E_p | p=1,2,3\}$ 通过讨论确定新能源汽车云服务的最优属性为服务安全性(C_3)和最劣属性费用合理度(C_6)。每位专家采用区间二型模糊集合对属性间的比较进行评价, 对应的评估语言量表见表1, 3位专家的评价信息如表2所示。将表中所有语言变量转化为对应的区间二型模糊集合后, 利用式(5)将比较结果进行去模

表 2 云服务属性间比较的评价信息

Table 2 Evaluation information of comparison of cloud service attributes

属性	E_1		E_2		E_3	
	C_3	C_6	C_3	C_6	C_3	C_6
C_1	MH	L	MH	ML	H	L
C_2	H	ML	H	L	H	L
C_3	M	VL	M	VL	M	VL
C_4	MH	ML	H	L	MH	ML
C_5	H	L	MH	ML	MH	ML
C_6	VH	M	VH	M	VH	M

表 3 去模糊化后的属性比较信息

Table 3 Attribute comparison information after defuzzification

属性	E_1		E_2		E_3	
	C_3	C_6	C_3	C_6	C_3	C_6
C_1	21/4	23/24	21/4	9/4	157/24	23/24
C_2	157/24	9/4	157/24	23/24	157/24	23/24
C_3	15/4	5/24	15/4	5/24	15/4	5/24
C_4	21/4	9/4	157/24	23/24	21/4	9/4
C_5	157/24	23/24	21/4	9/4	21/4	9/4
C_6	55/8	15/4	55/8	15/4	55/8	15/4

糊化, 结果如表3所示。

根据的数据, 通过数学模型 (13) 求解云服务属性权重, 计算得到 $w_1^*=0.100\ 3$, $w_2^*=0.116\ 6$, $w_3^*=0.409\ 4$, $w_4^*=0.119\ 8$, $w_5^*=0.138\ 3$, $w_6^*=0.115\ 6$ 。

步骤1 该专家组通过讨论, 给出每个备选方案对应所有属性的评价信息, 结果如表4所示。将方案评价信息表示成具体的区间二型模糊数, 结果如表5所示。

表 4 备选方案的评价信息

Table 4 Evaluation information of each alternatives

方案	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
D_1	M	ML	H	L	MH	L
D_2	M	H	H	MH	H	ML
D_3	VH	M	MH	VH	M	MH
D_4	VL	ML	MH	M	ML	ML
D_5	M	M	M	H	L	M

表 5 区间二型模糊数表示的方案评价信息

Table 5 Scheme evaluation information represented by interval type-2 fuzzy number

方案	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
D_1	(3, 5, 7; 1), (4, 5, 6; 0.5)	(1, 3, 5; 1), (2, 3, 4; 0.5)	(7, 9, 10; 1), (8, 9, 9.5; 0.5)	(0, 1, 3; 1), (0.5, 1, 2; 0.5)	(5, 7, 9; 1), (6, 7, 8; 0.5)	(0, 1, 3; 1), (0.5, 1, 2; 0.5)
D_2	(3, 5, 7; 1), (4, 5, 6; 0.5)	(7, 9, 10; 1), (8, 9, 9.5; 0.5)	(7, 9, 10; 1), (8, 9, 9.5; 0.5)	(5, 7, 9; 1), (6, 7, 8; 0.5)	(7, 9, 10; 1), (8, 9, 9.5; 0.5)	(1, 3, 5; 1), (2, 3, 4; 0.5)
D_3	(9, 10, 10; 1), (9.5, 10, 10; 0.5)	(3, 5, 7; 1), (4, 5, 6; 0.5)	(5, 7, 9; 1), (6, 7, 8; 0.5)	(9, 10, 10; 1), (9.5, 10, 10; 0.5)	(3, 5, 7; 1), (4, 5, 6; 0.5)	(5, 7, 9; 1), (6, 7, 8; 0.5)
D_4	(0, 0, 1; 1), (0, 0, 0.5; 0.5)	(1, 3, 5; 1), (2, 3, 4; 0.5)	(5, 7, 9; 1), (6, 7, 8; 0.5)	(3, 5, 7; 1), (4, 5, 6; 0.5)	(1, 3, 5; 1), (2, 3, 4; 0.5)	(1, 3, 5; 1), (2, 3, 4; 0.5)
D_5	(3, 5, 7; 1), (4, 5, 6; 0.5)	(3, 5, 7; 1), (4, 5, 6; 0.5)	(3, 5, 7; 1), (4, 5, 6; 0.5)	(7, 9, 10; 1), (8, 9, 9.5; 0.5)	(0, 1, 3; 1), (0.5, 1, 2; 0.5)	(3, 5, 7; 1), (4, 5, 6; 0.5)

步骤2 根据表5的数据确定6个属性的平均解, 计算得到 $V_1=((3.6, 5, 6.4; 1), (4.3, 5, 5.7; 0.5))$, $V_2=((3, 5, 6.8; 1), (4.5, 5.9; 0.5))$, $V_3=((5.4, 7.4, 9; 1), (6.4, 7.4, 8.2; 0.5))$, $V_4=((4.8, 6.4, 7.8; 1), (5.6, 6.4, 7.1; 0.5))$, $V_5=((3.2, 5, 6.8; 1), (4.1, 5, 5.9; 0.5))$, $V_6=((2, 3.8, 5.8; 1), (2.9, 3.8, 4.8; 0.5))$ 。

步骤3 根据效益型属性和成本型属性, 利用式 (16)~(19) 计算5个备选方案的平均正距离和负距离, 构建正向距离矩阵 $\boldsymbol{P}$ 和反向距离矩阵 $\boldsymbol{Q}$, 结果如表6和表7所示。

步骤4 利用式 (20) 和 (21) 确定5个备选方案的平均正距离加权和 $\tilde{S}_i$ 和平均负距离加权和 $\tilde{T}_i$, 其中属性权重已由BWM计算给出, 结果如表8所示。

步骤5 利用式 (22) 和 (23) 对5个备选方案的加

权和进行标准化, 得到正距离加权和标准化值 $\tilde{S}_i$ 和负距离加权和标准化值 $\tilde{T}_i$, 结果如表9所示。

步骤6 利用式 (24) 计算各备选方案的评价得分 $\tilde{\lambda}$, 并利用式 (5) 对该结果进行去模糊化处理, 得到综合评价值 $R(\tilde{\lambda})$, 如表10所示。

根据评价分数的高低对备选方案进行排序, 有 $D_1>D_2>D_5>D_4>D_3$, 所以 D_1 为最优方案, 该汽车制造企业优先考虑 D_1 新能源汽车云服务提供商。

为了验证所提方法的有效性和优越性, 采用文献[18]中的TOPSIS方法与本文所提方法进行对比。为使对比更加突出, 同样采用区间二型模糊集合表达评价信息。属性权重参考本文案例中BWM给出的值, 分别为0.100 3、0.116 6、0.409 4、0.119 8、0.138 3、0.115 6。根据专家评价信息构建模糊矩阵并进行标

表 6 正向距离矩阵P

Table 6 Forward distance matrix P

正距离	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
$\tilde{d}_{i1}$	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0.96, 1.33, 1.44; 1), (1.15, 1.33, 1.39; 0.5)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)
$\tilde{d}_{i2}$	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(1.08, 1.08, 0.86; 1), (1.08, 1.08, 0.97; 0.5)	(0, 0, 0.05; 1), (0, 0, 0.03; 0.5)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0.05; 1), (0, 0, 0.03; 0.5)
$\tilde{d}_{i3}$	(0.42, 0.38, 0.46; 1), (0.43, 0.45, 0.47; 0.5)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0.83, 0.92, 1.24; 1), (1.04, 1.23, 1.29; 0.5)
$\tilde{d}_{i4}$	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(1.02, 1.02, 0.83; 1), (1.02, 1.02, 0.94; 0.5)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)
$\tilde{d}_{i5}$	(0.48, 0.53, 0.59; 1), (0.51, 0.53, 0.56; 0.5)	(1.01, 1.07, 0.85; 1), (1.04, 1.07, 0.96; 0.5)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)
$\tilde{d}_{i6}$	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(1.04, 1.11, 1.11; 1), (1.07, 1.11, 1.11; 0.5)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0.35, 0.42, 0.42; 1), (0.38, 0.42, 0.42; 0.5)

表 7 反向距离矩阵Q

Table 7 Reverse distance matrix Q

负距离	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
$\tilde{e}_{i1}$	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(1.44, 1.33, 0.96; 1), (1.39, 1.33, 1.15; 0.5)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)
$\tilde{e}_{i2}$	(0.54, 0.54, 0.49; 1), (0.54, 0.54, 0.51; 0.5)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0.54, 0.54, 0.49; 1), (0.54, 0.54, 0.51; 0.5)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)
$\tilde{e}_{i3}$	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0.44, 0.44, 0.52; 1), (0.44, 0.44, 0.58; 0.5)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)
$\tilde{e}_{i4}$	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(1.22, 1.28, 0.81; 1), (1.33, 1.31, 1.06; 0.5)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)
$\tilde{e}_{i5}$	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0.59, 0.53, 0.48; 1), (0.56, 0.53, 0.51; 0.5)	(0.85, 1.07, 1.01; 1), (0.96, 1.07, 1.04; 0.5)
$\tilde{e}_{i6}$	(0.69, 0.97, 0.97; 1), (0.83, 0.97, 0.97; 0.5)	(0.35, 0.28, 0.28; 1), (0.31, 0.28, 0.28; 0.5)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)	(0.35, 0.28, 0.28; 1), (0.31, 0.28, 0.28; 0.5)	(0, 0, 0; 1), (0, 0, 0; 1)

表 8 正、负距离加权和

Table 8 Weighted sum of positive and negative distances

$\tilde{S}_i$	加权和	$\tilde{T}_i$	加权和
$\tilde{S}_1$	(0.19, 0.19, 0.16; 1), (0.19, 0.19, 0.18; 0.5)	$\tilde{T}_1$	(0.26, 0.31, 0.29; 1), (0.29, 0.31, 0.30; 0.5)
$\tilde{S}_2$	(0.39, 0.41, 0.32; 1), (0.40, 0.41, 0.37; 0.5)	$\tilde{T}_2$	(0.04, 0.03, 0.03; 1), (0.04, 0.03, 0.03; 0.5)
$\tilde{S}_3$	(0.23, 0.22, 0.19; 1), (0.22, 0.22, 0.20; 0.5)	$\tilde{T}_3$	(0.17, 0.16, 0.10; 1), (0.17, 0.16, 0.13; 0.5)
$\tilde{S}_4$	(0.10, 0.13, 0.14; 1), (0.12, 0.13, 0.14; 0.5)	$\tilde{T}_4$	(0.26, 0.23, 0.18; 1), (0.25, 0.23, 0.21; 0.5)
$\tilde{S}_5$	(0.10, 0.11, 0.07; 1), (0.10, 0.11, 0.11; 0.5)	$\tilde{T}_5$	(0.30, 0.33, 0.29; 1), (0.31, 0.33, 0.31; 0.5)

表 9 正、负距离加权和的标准化值

Table 9 Standardized values of weighted sum of positive and negative distances

$\bar{S}_i$	标准化值	$\bar{T}_i$	标准化值
$\bar{S}_1$	(0.65, 0.68, 0.55; 1), (0.67, 0.68, 0.62; 0.5)	$\bar{T}_1$	(1.14, 1.34, 1.25; 1), (1.24, 1.34, 1.29; 0.5)
$\bar{S}_2$	(1.37, 1.44, 1.13; 1), (1.40, 1.44, 1.29; 0.5)	$\bar{T}_2$	(0.17, 0.14, 0.14; 1), (0.15, 0.14, 0.14; 0.5)
$\bar{S}_3$	(0.79, 0.77, 0.67; 1), (0.78, 0.77, 0.72; 0.5)	$\bar{T}_3$	(0.75, 0.70, 0.42; 1), (0.72, 0.70, 0.57; 0.5)
$\bar{S}_4$	(0.34, 0.47, 0.51; 1), (0.41, 0.47, 0.49; 0.5)	$\bar{T}_4$	(1.12, 1.00, 0.76; 1), (1.06, 1.00, 0.89; 0.5)
$\bar{S}_5$	(0.34, 0.40, 0.26; 1), (0.37, 0.40, 0.40; 0.5)	$\bar{T}_5$	(1.28, 1.41, 1.26; 1), (1.35, 1.42, 1.33; 0.5)

表 10 备选方案评价得分

Table 10 Evaluation scores of alternatives

方案	$\bar{\lambda}$	$R(\bar{\lambda})$	排名
D_1	(0.895, 1.010, 0.900; 1), (0.455, 1.010, 0.955; 0.5)	0.669	1
D_2	(0.770, 0.790, 0.635; 1), (0.775, 0.790, 0.715; 0.5)	0.556	2
D_3	(0.770, 0.735, 0.545; 1), (0.750, 0.735, 0.645; 0.5)	0.498	5
D_4	(0.730, 0.735, 0.635; 1), (0.735, 0.735, 0.690; 0.5)	0.530	4
D_5	(0.310, 0.905, 0.760; 1), (0.860, 0.910, 0.865; 0.5)	0.549	3

准化处理，确定正、负理想解并计算各方案到理想解的距离，最后计算相对贴近度分别为0.986, 0.364, 0.006, 0.213, 0.822，根据贴近度大小进行排序，结果为 $D_1 > D_5 > D_2 > D_4 > D_3$ 。由排序结果可知，两种方法对方案 D_2 和方案 D_5 的排序位置存在差异，这是因为TOPSIS需要对模糊语言表达的专家评价信息进行预处理，得到对应的精确数值，在这过程中会导致原始评价信息出现失真。而EDAS方法将评价信息转换为对应的区间二型模糊数，并在此基础上进行运算，弥补了TOPSIS在模糊语言转换中的不足，排序结果更加准确。

5 结语

本文结合了区间二型模糊集和EDAS方法, 解决实际决策情景中的复杂性和不确定性问题。区间二型模糊集合在处理不确定信息时简化了隶属度函数, 降低了二型模糊集的计算难度, 并能更好地表达语言变量的多含义特征。将区间二型模糊集改进EDAS, 以区间二型模糊数表达评价信息构建决策矩阵, 以计算得到的综合评价值的去模糊化结果作为最终的方案排序依据, 避免了因评价信息标准化处理过程产生的信息失真问题, 简化计算步骤的同时直观地表达了评价结果。

采用区间二型模糊BWM方法解决属性权重从外部获取的问题, 简化了属性间两两比较的繁琐过程, 也保证了评价过程的信息完整性。以某汽车制造企业优选新能源汽车云服务方案为例, 验证了本文所提方法的有效性。

参考文献:

- [1] GHORABAE M K, ZAVADSKAS E K, OLFAT L, et al. Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS) [J]. *Informatica*, 2015, 26(3): 435-451.
- [2] 彭定洪, 张文华. 智慧无废城市评选的序贯式群决策EDAS法[J]. *系统科学与数学*, 2021, 41(3): 688-704.
PENG Dinghong, ZHANG Wenhua. Sequential group EDAS decision making method for smart zero waste city selection[J]. *Journal of Systems Science and Mathematics*, 2021, 41(3): 688-704.
- [3] YAZDANI M, TORKAYESH A E, SANTIBANEZ-GONZALEZ E D, et al. Evaluation of renewable energy resources using integrated Shannon entropy – EDAS model[J]. *Sustainable Operations and Computers*, 2020, 1: 35-42.
- [4] MISHRA A R, MARDANI A, RANI P, et al. A novel EDAS approach on intuitionistic fuzzy set for assessment of health-care waste disposal technology using new parametric divergence measures[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272(1): 122807.
- [5] 童玉珍, 王应明. 基于后悔理论及EDAS法的概率语言多属性群决策方法[J]. *计算机应用*, 2020, 40(11): 3152-3158.
TONG Yuzhen, WANG Yingming. Multi-attribute group decision making method for probabilistic linguistic term set based on regret theory and distance from average solution method[J]. *Journal of Computer Applications*, 2020, 40(11): 3152-3158.
- [6] SRIVASTAVA P, MUSTAFA A, KHANDUJA D, et al. Prioritizing autonomous maintenance system attributes using fuzzy EDAS approach[J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 167: 1941-1949.
- [7] 耿秀丽, 马阳. 基于犹豫模糊语言的多阶段多属性决策方法[J]. *计算机应用研究*, 2021, 38(2): 484-488.
GENG Xiuli, MANG Yang. Multi-stage multi-attribute decision-making method based on hesitant fuzzy linguistic[J]. *Application Research of Computers*, 2021, 38(2): 484-488.
- [8] ZADEH L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-III[J]. *Information Sciences*, 1975, 9(1): 43-80.
- [9] MENDEL J M, JOHN R I, LIU F L. Interval type-2 fuzzy logic systems made simple[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2006, 14(6): 808-821.
- [10] 刘超, 汤国林, 刘培德. 基于模糊测度与累积前景理论的区间二型模糊多准则决策方法[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(9): 70-81.
LIU Chao, TANG Guolin, LIU Peide. Interval type-2 fuzzy multi-criteria decision making method based on fuzzy measures and cumulative prospect theory[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(9): 70-81.
- [11] TURSKIS Z, JUODAGALVIENĖ B. A novel hybrid multi-criteria decision-making model to assess a stairs shape for dwelling houses[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2016, 22(8): 1078-1087.
- [12] TURSKIS Z, MORKUNAITE Z, KUTUT V. A hybrid multiple criteria evaluation method of ranking of cultural heritage structures for renovation projects[J]. *International Journal of Strategic Property Management*, 2017, 21(3): 318-329.
- [13] REZAEI J. Best-worst multi-criteria decision-making method [J]. *Omega*, 2015, 53: 49-57.
- [14] MENDEL J M. Type-2 fuzzy sets and systems: an overview[J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2007, 2(2): 20-29.
- [15] KAHRAMAN C, ÖZTAYŞI B, SARİ İ U, et al. Fuzzy analytic hierarchy process with interval type-2 fuzzy sets[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2014, 59: 48-57.
- [16] CHEN S M, YANG M W, LEE L W, et al. Fuzzy multiple attributes group decision-making based on ranking interval type-2 fuzzy sets[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(5): 5295-5308.
- [17] GONG X M, YANG M, DU P L. Renewable energy accommodation potential evaluation of distribution network: a hybrid decision-making framework under interval type-2 fuzzy environment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286: 124918.
- [18] 陶秋香, 涂继亮, 程若发, 等. 基于未确知集和模糊TOPSIS决策的故障模式风险评估[J]. *计算机应用研究*, 2018, 35(9): 2676-2679.
TAO Qiuxiang, XU Jiliang, CHENG Ruofa, et al. Risk assessment of failure mode based on unascertained set and fuzzy TOPSIS decision[J]. *Application Research of Computers*, 2018, 35(9): 2676-2679.