

文章编号:2095-6134(2020)06-0814-06

一种基于模糊语言 TOPSIS 的应急决策方法*

李海明¹, 虞钢^{1,2,3†}, 田崇鑫^{1,3}, 尚国彬¹

(1 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049; 2 中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

3 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

(2019 年 4 月 22 日收稿; 2019 年 5 月 24 日收修改稿)

Li H M, Yu G, Tian C X, et al. An emergency decision method based on fuzzy linguistic TOPSIS[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(6): 814-819.

摘要 在应急决策过程中, 决策信息通常具有犹豫性、模糊性和非对称性, 且决策者呈现出直观、快速的语言决策偏好。提出一种基于模糊语言 TOPSIS 的应急决策方法, 使用犹豫模糊语言术语集和二元语义表达式对高度不确定环境下的语言进行处理, 提高对犹豫模糊语言信息的提取能力, 生成易于理解的语言评估结果, 从而辅助决策者进行快速、准确的决策判断。案例证实该方法的可行性与有效性, 为解决应急决策问题提供了一种新方法。

关键词 应急决策; 空中备降; 犹豫模糊语言集; 二元语义; 马氏距离 TOPSIS 法

中图分类号: TP399 文献标志码: A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2020.06.013

An emergency decision method based on fuzzy linguistic TOPSIS

LI Haiming¹, YU Gang^{1,2,3}, TIAN Chongxin^{1,3}, SHANG Guobin¹

(1 School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2 Materials and Photoelectric Research Center, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract During the process of emergency decision-making, information is frequently hesitant, fuzzy, and unbalanced, and decision makers often present their intuitive and rapid linguistic decision preference. In this work, an emergency decision-making method based on fuzzy linguistic TOPSIS is proposed. It combines the hesitant fuzzy linguistic term set (HFLTS) and 2-tuple linguistic expression to deal with words in highly uncertain context, which not only improves the elicitation of hesitant fuzzy information but also leads to linguistic results easy to understand by decision makers, and it could be helpful to making a rapid and accurate decision judgement. A case study verifies the feasibility and effectiveness of this method and proves its certain practical value.

Keywords emergency decision; flight alternate; hesitant fuzzy linguistic term set; 2-tuple; Mahalanobis distance-based TOPSIS method

高度不确定环境下的多属性决策问题是应急决策中需要面对的问题。Zadeh^[1]提出的模糊集为模拟客观事物的不确定性提供了方法, 然而决策者

的认知不确定性逐渐成为影响决策结果的关键因素。目前, 基于模糊理论的应急决策方法主要包括直觉模糊贝叶斯网络^[2]、模糊神经网络^[3]、

* 国家自然科学基金(11672304 和 11502269)资助

† 通信作者, E-mail: gyu@imech.ac.cn

F-TOPSIS (fuzzy technique for order preference by similarity to ideal solution)^[4] 和基于犹豫模糊语言术语集(HFLT S)的 TODIM^[5] 等,这些方法为应急决策研究做出了贡献,但却较少关注高度不确定环境下语言决策信息的犹豫性、模糊性和非对称性,以及决策主体直观、快速的语言决策偏好问题^[6-8]。

针对这一问题,本文提出一种基于模糊语言 TOPSIS 的多属性决策方法(multi-criteria decision-making method, MCDM),能够辅助决策者在应急情景下进行快速、准确的决策判断。该方法采用 HFLT S^[9] 和二元语义^[10] 表达式对高度不确定环境下的语言进行处理,在提高对犹豫模糊语言信息提取能力的同时可生成决策者易于理解的语言评估结果,更加符合应急情景下决策主体的认知水平和表达习惯。此外,考虑到不确定环境下指标权重信息易缺失且指标间可能存在线性相关问题,对传统的欧氏距离 TOPSIS 进行改进,并采用基于离差最大化的马氏距离 TOPSIS 法确定评估指标的客观权重并对决策备选方案进行排序,在避免决策信息丢失的同时,使指标含义更加准确。最后,通过空中备降决策实例验证该方法的可行性与有效性。

1 基本假设

1.1 犹豫模糊语言集

HFLT S 以犹豫模糊集为基础,是指语言变量取值为语言术语集的一个有序且连贯的子集^[9]。本文采用自由文本语法^[11] 将决策信息中的自然语言转化为 HFLT S 进行处理。

定义 1^[9] 设 $S = \{s_0, \dots, s_g\}$ 为语言术语集, $G_H = (V_N, V_T, I, P)$ 为四元文本自由语法,现对 G_H 定义如下:

$V_N = \{\text{主词, 复合词, 一元关系, 二元关系, 连词}\};$

$V_T = \{\text{“至多”, “至少”, “介于...之间”}, s_0, \dots, s_g\};$

$I \in V_N;$

$P = \left\{ \begin{array}{l} I \rightarrow \text{主词 or 复合词;} \\ \text{主词} \rightarrow s_0, \dots, s_g; \\ \text{复合词} \rightarrow \text{一元关系+主词} \\ \text{二元关系} \rightarrow \text{二元关系+连词+主词;} \\ \text{一元关系} \rightarrow \text{“至少”or“至多”} \\ \text{二元关系} \rightarrow \text{“介于...之间”;} \\ \text{连词} \rightarrow \text{“和”;} \end{array} \right\}.$

通过上述自由文本语法可生成表达式 ll , 并定义表达域 $ll = S$ 。语言表达式可描述如下:

$ll_1 = \text{至多是好};$

$ll_2 = \text{介于好和完美之间}.$

定义 2^[9] 设 S 为语言术语集, 则定义犹豫模糊语言集 H_S 有序有限且为 S 的连续语言术语子集: $H_S = \{s_i, s_{i+1}, \dots, s_j\}, s_k \in S, k \in \{i, \dots, j\}$ 。根据本文定义的语言术语集 S , 可有

$$H_S = (s_4, s_5, s_6).$$

定义 3^[9] 设 E_{G_H} 为比较语言表达式 ll 的转化函数, 且 $ll \in S_{ll}$ 。现可将自由文本语法 G_H 生成的 S_{ll} 语言表达式集转化为 HFLT S H_S , 即 $E_{G_H}: S_{ll} \rightarrow H_S$, 包括

$$E_{G_H}(s_i) = \{s_i \mid s_i \in S\},$$

$$E_{G_H}(\text{至少 } s_i) = \{s_j \mid s_j \in S \ \& \ s_j \geq s_i\},$$

$$E_{G_H}(\text{至多 } s_i) = \{s_j \mid s_j \in S \ \& \ s_j \leq s_i\},$$

$$E_{G_H}(\text{介于 } s_i \text{ 和 } s_j \text{ 之间}) = \{s_k \mid s_k \in S \ \& \ s_i \leq s_k \leq s_j\}.$$

定义 4^[11] 令 $H_S = \{s_i, s_{i+1}, \dots, s_j\}$ 为 HFLT S, 且 $s_k \in S, k \in \{i, \dots, j\}$, 则有

$$\text{env}_F(H_S) = T(a, b, c, d). \quad (1)$$

通过 env_F 计算得到的模糊包络示例见图 1。

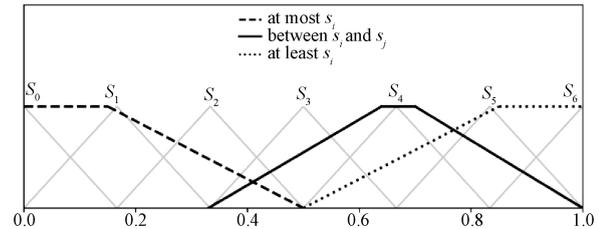


图 1 3 种模糊包络示例^[12]

Fig. 1 Examples of 3 types of fuzzy envelope^[12]

1.2 二元语义

二元语义模型在传统模糊语言的基础上进行扩展, 增加用于度量信息偏差的符号翻译参数 α , 能够在提升语言计算精度的同时避免计算过程中信息的丢失^[10]。该模型可表示为 $(s_i, \alpha) \in \bar{S} \equiv S \times [-0.5, 0.5]$, 其中 $s \in S$ 为语言术语, $\alpha \in [-0.5, 0.5]$ 。

定义 5^[13] 设 $S = \{s_0, \dots, s_g\}$ 为语言术语集, $\beta \in [0, g]$ 表示语言符号的集结数值, 且二元语义等价于 β , 即

$$\Delta: [0, g] \rightarrow \bar{S}, \quad (2)$$

$$\Delta(\beta) = (s_i, \alpha), \begin{cases} s_i, & i = \text{round}(\beta), \\ \alpha = \beta - i, & \alpha \in [-0.5, 0.5], \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta^{-1}:\bar{S} \rightarrow [0, g], \quad (4)$$

$$\Delta^{-1}(s_i, \alpha) = i + \alpha = \beta. \quad (5)$$

式中: round 为四舍五入, i 为 β 与符号 s_i 横坐标距离最近的索引值, Δ 为映射函数。

2 基于改进型模糊语言 TOPSIS 的多属性决策方法

2.1 语言信息的集结

根据基本假设, 定义语言术语集 S , 使用转化函数 E_{G_H} 将决策者给出的语言表达式 l 转化为基于 HFLTS 的 H_S 。根据文献[12]所提方法, 可采用 OWA 算子^[14]将 H_S 集成为基于梯形模糊数的模糊包络。

2.2 二元语义一致性转化

使用二元语义变量对模糊包络进行一致性转化计算, 转化过程可分为以下两个步骤:

步骤 1 采用转化函数 τ ^[15]将基于梯形模糊数的模糊包络转化为序偶表达式, 即

$$\tau: T(\cdot) \rightarrow F(S), \quad (6)$$

$$\tau(t_i) = \{(s_k, \gamma_k^i) \mid k \in \{0, \dots, g\}\}, \forall t_i \in T(\cdot), \quad (7)$$

$$\gamma_k^i = \max_y \min \{\mu_{t_i}(y), \mu_{s_k}(y)\}. \quad (8)$$

式中: $T(\cdot)$ 为梯形模糊数, $F(S)$ 为模糊集 S 的正规集, $\mu_{t_i}(\cdot)$ 和 $\mu_{s_k}(\cdot)$ 为梯形模糊数中各点 t_i 和语言术语 s_k 对应集合 S 的隶属函数。

步骤 2 采用翻译函数 χ ^[15]将序偶表达式翻译为语言术语集 S 所在区间的实数值, 然后再将这一实数值转化为二元语义变量, 即

$$\chi: F(S) \rightarrow \bar{S}, \quad (9)$$

$$\chi(F(S)) = \Delta\left(\frac{\sum_{j=0}^g j\gamma_j}{\sum_{j=0}^g \gamma_j}\right) = \Delta(\beta) = (s, \alpha). \quad (10)$$

2.3 加权马氏距离 TOPSIS 法

针对评估指标权重未知以及指标间易存在线性相关性的问题, 本文提出一种基于离差最大化的马氏距离 TOPSIS 的多属性决策方法, 使用基于离差最大化的赋权法确定各指标的客观权重, 然后使用马氏距离 TOPSIS 法计算得到应急决策备选方案的排序。具体步骤如下:

步骤 1 计算待评方案各指标值的离差与各方案指标的总离差

$$D_{ij}(w) = \Delta\left(\sum_{k=1}^n \Delta^{-1}d[(s_{ij}, \alpha_{ij}), (s_{kj}, \alpha_{kj})]w_j\right), \quad (11)$$

$$D_j(w) = \Delta\left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \Delta^{-1}d[(s_{ij}, \alpha_{ij}), (s_{kj}, \alpha_{kj})]w_j\right). \quad (12)$$

构造目标函数为全部方案总离差最大化的数学规划模型, 即

$$\max \Delta^{-1}D(w) =$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \Delta^{-1}d[(s_{ij}, \alpha_{ij}), (s_{kj}, \alpha_{kj})]w_j, \quad (13)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^m w_j^2 = 1, w_j \geq 0. \quad (14)$$

步骤 2 针对上述规划模型构造拉格朗日函数并求偏导, 进行归一化处理后可得最优权重

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \Delta^{-1}d[(s_{ij}, \alpha_{ij}), (s_{kj}, \alpha_{kj})]}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \Delta^{-1}d[(s_{ij}, \alpha_{ij}), (s_{kj}, \alpha_{kj})]}. \quad (15)$$

步骤 3 构建有 n 个备选方案和 m 个评估指标的初始语言决策矩阵 Z

$$Z = \{(s_{ij}, \alpha_{ij})\}_{n \times m} = \begin{pmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{nm} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

用式(5)对初始语言决策矩阵 Z 中的元素进行转化, 得到

$$z_{ij} = \Delta^{-1}(s_{ij}, \alpha_{ij}) = \beta. \quad (17)$$

步骤 4 确定评估指标值的正、负理想解

$$K^+ = \{(\max_{1 \leq i \leq n} z_{ij} \mid j \in G^+), (\min_{1 \leq i \leq n} z_{ij} \mid j \in G^-)\}, \quad (18)$$

$$K^- = \{(\min_{1 \leq i \leq n} z_{ij} \mid j \in G^+), (\max_{1 \leq i \leq n} z_{ij} \mid j \in G^-)\}. \quad (19)$$

步骤 5 计算决策评估对象 z_{ij} 到正、负理想解的加权马氏距离 B^+ 和 B^- , 由式(15)得到评估指标权重矩阵 $\Omega = \text{diag}(\sqrt{w_1}, \sqrt{w_2}, \dots, \sqrt{w_n})$, C^{-1} 为初始决策矩阵的协方差逆阵。加权马氏距离的计算公式可表示为

$$B_i^+ = \sqrt{(z_{ij} - k_j^+) \Omega^T C^{-1} \Omega (z_{ij} - k_j^+)^T}, \quad (20)$$

$$B_i^- = \sqrt{(z_{ij} - k_j^-) \Omega^T C^{-1} \Omega (z_{ij} - k_j^-)^T}. \quad (21)$$

计算得到各方案的相对贴近度, 即决策评估值

$$L_i = B_i^- / (B_i^+ + B_i^-). \quad (22)$$

步骤 6 用式(3)将评估值转化为二元语义表达式, 有

$$\Delta(L_i) = (s, \alpha). \quad (23)$$

根据备选方案的评估结果, 使用二元语义比

较算子^[10]进行排序。

需要注意的是,在使用马氏距离进行测度时,应避免出现以下两种情况^[16]:1)行数 n 小于列数 m ;2)决策矩阵中数据标准差为 0。

3 结果与讨论

3.1 空中备降应急决策

空中备降是指飞行器在飞行过程中受不确定因素影响选择目的地以外机场降落的运行过程^[17]。作为一类应急决策问题,受不确定因素发生的突然性和所导致后果的严重性影响,决策者需要在尽可能短的时间内做出准确的备降决策。

结合文献[17]中算例对本文所提方法进行验证。设备降航班为 3U8834,备降场集合 Z 为 {ZUUU, ZUMY, ZUNC, ZLXY, ZUZY, ZUGY}, 选

取 5 个正向指标作为空中备降决策的评估指标,即:“地面保障能力”(G_1),“备降机场相对距离”(G_2),“备降机场能见度”(G_3),“备降航路云高”(G_4),“着陆操作复杂程度”(G_5)。

3.2 备降方案求解

现运用本文所提方法求解该空中备降决策问题,具体步骤如下:

步骤 1 设决策评估指标的语言术语集 S 为

$$S = \left\{ \begin{array}{l} s_0: \text{糟糕}; s_1: \text{差}; s_2: \text{略差}; s_3: \text{中等}; \\ s_4: \text{略好}; s_5: \text{好}; s_6: \text{完美} \end{array} \right\}.$$

决策者可根据备降决策评估指标,使用基于自由文本语法的语言表达式对备选方案进行评估(受篇幅限制,不直接列出)。

步骤 2 使用转化函数 E_{G_H} 将语言表达式 ll 转化为 HFLTS 并构造语言决策矩阵 H_S ,见表 1。

表 1 语言决策矩阵

Table 1 Linguistic decision matrix

方案	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
Z_1	(s_3, s_4, s_5)	(s_6)	(s_4, s_5, s_6)	(s_5, s_6)	(s_0, s_1, s_2, s_3)
Z_2	(s_4, s_5)	(s_3, s_4)	(s_2, s_3, s_4)	(s_3, s_4)	(s_2)
Z_3	(s_5, s_6)	(s_4, s_5)	(s_2, s_3)	(s_1, s_2, s_3)	(s_3, s_4)
Z_4	(s_5)	(s_0, s_1, s_2)	(s_1, s_2)	(s_1, s_2, s_3)	(s_4, s_5)
Z_5	(s_0, s_1, s_2, s_3)	(s_1, s_2)	(s_2, s_3)	(s_3, s_4)	(s_2, s_3, s_4)
Z_6	(s_5)	(s_0)	(s_2, s_3, s_4, s_5)	(s_0, s_1, s_2, s_3)	(s_5, s_6)

步骤 3 采用基于 OWA 算子的方法对语言决策矩阵中各元素进行集结,得到各元素的梯形模糊数,然后分别使用转化函数 τ 和翻译函数 χ

对其进行二元语义一致性转化,得到基于二元语义的决策矩阵,见表 2。

步骤 4 通过式(15)确定评估指标的客观权

表 2 二元语义决策矩阵

Table 2 2-tuple linguistic decision matrix

方案	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
Z_1	$(s_4, 0)$	$(s_6, 0)$	$(s_5, -0.1)$	$(s_5, 0.31)$	$(s_2, -0.4)$
Z_2	$(s_4, 0.5)$	$(s_3, 0.5)$	$(s_3, 0)$	$(s_3, 0.5)$	$(s_2, 0)$
Z_3	$(s_5, 0.31)$	$(s_4, 0.5)$	$(s_3, -0.49)$	$(s_2, 0)$	$(s_3, 0.5)$
Z_4	$(s_5, 0)$	$(s_1, 0.1)$	$(s_1, 0.1)$	$(s_2, 0)$	$(s_4, 0.5)$
Z_5	$(s_2, -0.4)$	$(s_1, 0.5)$	$(s_3, -0.49)$	$(s_3, 0.5)$	$(s_3, 0)$
Z_6	$(s_5, 0)$	$(s_0, 0)$	$(s_3, 0.5)$	$(s_2, -0.4)$	$(s_5, 0.31)$

重,见表 3。

正、负理想解,见表 4。

表 3 基于 2 种不同方法所得的客观权重

Table 3 Objective weights of indexes determined using two different weighting methods

赋权方法	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
离差最大化	0.199 2	0.211 0	0.166 3	0.207 6	0.216 0
熵权	0.116 8	0.208 2	0.178 2	0.280 4	0.216 4

表 4 评估指标的正、负理想解

Table 4 Positive and negative ideal solutions of assessment indexes

名称	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
正理想解 A^+	$(s_5, 0.31)$	$(s_6, 0)$	$(s_5, -0.1)$	$(s_5, 0.31)$	$(s_5, 0.31)$
负理想解 A^-	$(s_2, -0.4)$	$(s_0, 0)$	$(s_1, 0.1)$	$(s_2, -0.4)$	$(s_2, -0.4)$

步骤 5 根据式(18)、式(19)得到各评估指标的

步骤 6 使用加权马氏 TOPSIS 法对备降方

案进行评估,并最终得到基于二元语义表达式的备降方案排序结果,见表 5。

同时,采用熵权-欧氏 TOPSIS、熵权-马氏 TOPSIS 和离差最大化-欧氏 TOPSIS 方法对该问题进行求解排序,所得结果见表 6,2 种评估指标权重和 4 种决策排序结果如图 2 和图 3 所示。

表 5 空中备降方案相对贴近度和排序结果

Table 5 The relative similarities and ranking results of the flight alternate schemes

ZUUU	ZUMY	ZUNC	ZLXY	ZUZY	ZUGY
$(s_3, 0.03)$	$(s_2, 0.15)$	$(s_3, -0.41)$	$(s_3, -0.06)$	$(s_2, 0.47)$	$(s_3, -0.37)$
1	6	4	2	5	3

表 6 基于 3 种不同方法的备降方案相对贴近度和排序结果

Table 6 The relative similarities and ranking results of the alternate schemes obtained using three different methods

方法	ZUUU	ZUMY	ZUNC	ZLXY	ZUZY	ZUGY
熵权欧氏 TOPSIS	$(s_4, -0.16)$ 1	$(s_3, -0.3)$ 2	$(s_3, -0.42)$ 4	$(s_2, 0.22)$ 6	$(s_2, 0.28)$ 5	$(s_3, -0.38)$ 3
熵权马氏 TOPSIS	$(s_3, 0.18)$ 1	$(s_2, 0.16)$ 6	$(s_2, 0.46)$ 4	$(s_3, -0.24)$ 2	$(s_3, -0.48)$ 3	$(s_2, 0.46)$ 4
离差欧氏 TOPSIS	$(s_4, -0.28)$ 1	$(s_3, -0.12)$ 4	$(s_3, 0.18)$ 2	$(s_3, -0.3)$ 5	$(s_2, -0.08)$ 6	$(s_3, 0)$ 3

Computation of 2 weighting methods

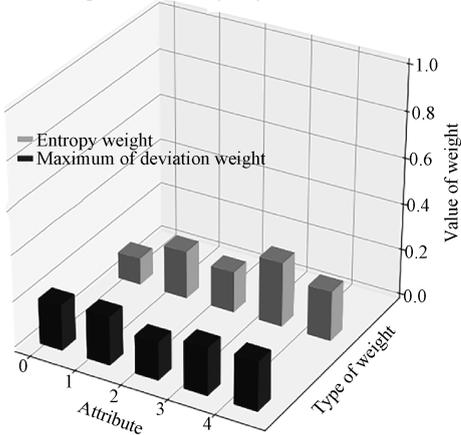


图 2 2 种权重计算方法

Fig. 2 Two kinds of the weighting methods

Alternatives rank of various MCDMs

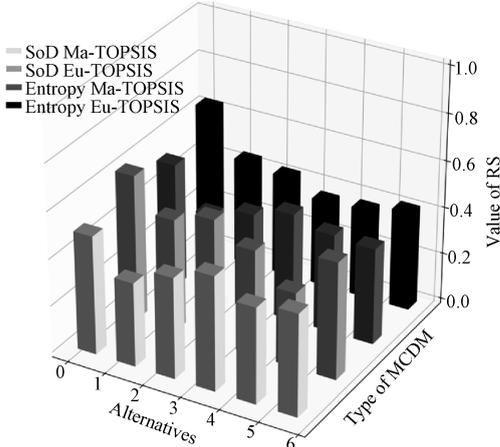


图 3 4 种多属性决策方法的排序结果

Fig. 3 Ranking results of four different MCDM methods

3.3 权重对决策结果的影响

由表 6 可知,采用不同的赋权方法时,若评估结果以 β 值计算,基于欧氏距离 TOPSIS 法所得相同方案的平均差值为 0.062,其中方案 3 差值最大,为 0.1;基于马氏距离 TOPSIS 法所得结果中同一方案平均差值为 0.018,方案 4 差值最大,为 0.03。可以看出,基于欧式距离测度时,受指标间相关性影响所得评估结果对权重变化的敏感度更高。相比之下,使用马氏距离 TOPSIS 法计算时各指标线性无关,使得评估结果对指标权重变化的敏感度较低。

3.4 二元语义对决策判断的影响

由二元语义比较算子定义^[10]可知,若二元语义中语言评价元素 s 的索引值更大,则评价结果更优;索引值相等时, α 值更大的评价结果则更优。可见,二元语义作为一种定性定量结合的比较语言表达式,其比较算子的比较规则为先触发定性比较,再触发定量比较。

表 7 中,以基于离差最大化的欧氏距离 TOPSIS 和马氏距离 TOPSIS 为例,2 种方法均选择 ZUUU 为首选备降场,第 2 备降场分别为 ZUNC 和 ZLXY。其中,欧氏距离 TOPSIS 法在评估排序中触发二元语义比较算子中的定性比较规则,而马氏距离 TOPSIS 法触发定量比较规则。

表 7 二元语义比较算子的使用

Table 7 The use of 2-tuple comparison operator

方法	第 1 备降场	第 2 备降场	触发规则
马氏 TOPSIS	$(s_3, 0.03)$	$(s_3, -0.06)$	定量比较
欧式 TOPSIS	$(s_4, -0.28)$	$(s_3, 0.18)$	定性比较

由 3.3 节的讨论结果可知,基于欧式距离 TOPSIS 法的评价结果差值更大,更易触发比较算子中的定性比较规则,若加之决策者在决策判断过程中持有的乐观或悲观的决策偏好,可能会带来新的不确定性。因此,二元语义表达式更适用于马氏距离 TOPSIS 方法。

此外,本文所提方法在应用过程中仍需要关注以下两方面的问题:1)受 TOPSIS 自身测度的距离限制^[18],可能导致各方案评估结果差值过小,不能反映备选方案的真正优势;2)对决策备选方案进行动态调整时,若新增方案非最优,或原非最优方案被更差的方案取代时,可能导致评估结果出现矛盾^[18]。

4 结论

本文所提方法实现了对应急决策备选方案定性与定量相结合的评估,能够辅助决策者在应急情景下进行快速、准确的决策判断,拓宽了模糊语言与 TOPSIS 的适用范围。

1)采用犹豫模糊语言和二元语义表达式对语言决策信息进行处理,可提高对犹豫模糊语言信息的提取能力并得到易于理解的语言评估结果,降低应急情景下决策者的认知难度;

2)在评估指标权重信息缺失或未知的情况下生成各指标的客观权重,且能够消除指标间的相关性,使含义更加准确;

3)案例分析表明,本文所提方法操作简单且具有较好的实时性,所得首选备降场为 ZUUU,评估结果为“中等,0.03”,验证了该方法的可行性与有效性,对于指导高度不确定环境下的应急决策实践具有重要意义。

参考文献

- [1] Zadeh L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning [J]. *Information Science*, 1974, 8(3):199-249.
- [2] Hao Z N, Xu Z S, Zhao H, et al. A dynamic weight determination approach based on the intuitionistic fuzzy Bayesian network and its application to emergency decision making [J]. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 2018, 26(4):1893-1907.
- [3] Simonovic S P, Ahmad S. Computer-based model for flood evacuation emergency planning [J]. *Natural Hazards*, 2005, 34(1):25-51.
- [4] Fu G. A fuzzy optimization method for multi-criteria decision making: an application to reservoir flood control operation [J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 34(1):145-149.
- [5] Liang Y Y, Tu Y, Ju Y B, et al. A multi-granularity proportional hesitant fuzzy linguistic TODIM method and its application to emergency decision making [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, 36(2019):101081.
- [6] Vanderhaegen F. Erik Hollnagel; Safety-I and Safety-II, the past and future of safety management [J]. *Cognition Technology & Work*, 2015, 17(3):461-464.
- [7] Plioutsias A, Karanikas N. Using STPA in the evaluation of fighter pilots training programs [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 128:25-34.
- [8] 吴立珍,李远,彭辉,等. 有人机/无人机协同任务指令集的设计与实现 [J]. *系统仿真学报*, 2008(S1):514-517.
- [9] Rodriguez R M, Martinez L, Herrera F. Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2012, 20(1):109-119.
- [10] Herrera F, Martinez L. A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2000, 8(6):746-752.
- [11] Rodríguez Rosa M, Martínez L, Herrera F. A linguistic 2-tuple multicriteria decision making model dealing with hesitant linguistic information [C] // 2015 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). *IEEE*, 2015: 1-7.
- [12] Liu H, Rodríguez R M. A fuzzy envelope for hesitant fuzzy linguistic term set and its application to multicriteria decision making [J]. *Information Sciences*, 2014, 258:220-238.
- [13] Martínez L, Herrera F. An overview on the 2-tuple linguistic model for computing with words in decision making: extensions, applications and challenges [J]. *Information Sciences*, 2012, 207:1-18.
- [14] Yager R R. On ordered weighted averaging aggregation operations in multicriteria decision making [J]. *IEEE Trans Systems Man Cybernet*, 1988, 18(1):80-87.
- [15] Herrera F, Martinez L, Sánchez P J. Managing non-homogeneous information in group decision making [J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 166(1):115-132.
- [16] Suo M, Zhu B, Zhang Y, et al. Fuzzy Bayes risk based on Mahalanobis distance and Gaussian kernel for weight assignment in labeled multiple attribute decision making [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2018, 152:26-39.
- [17] 王岩韬,唐建勋,赵焱飞. 基于机位可调整的航班空中备降优化 [J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(2):636-639.
- [18] Zavadzas E K, Mardani A, Turskis Z, et al. Development of TOPSIS method to solve complicated decision-making problems; an overview on developments from 2000 to 2015 [J]. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 2016, 15(3):645-682.