

控制与决策

Control and Decision

异质信息环境下基于案例推理的应急决策方法

谭睿璞, 张文德, 陈圣群, 杨乐华

引用本文:

谭睿璞, 张文德, 陈圣群, 等. 异质信息环境下基于案例推理的应急决策方法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(8): 1966–1976.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1602>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于交叉效率的应急案例检索方法](#)

Emergency case retrieval method based on cross-efficiency

控制与决策. 2018, 33(11): 2045–2050 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0785>

[基于案例推理的突发事件应急方案生成方法](#)

Method for generating emergency alternative based on case-based reasoning

控制与决策. 2016, 31(8): 1526–1530 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0696>

[基于匹配属性相似度的应急决策方案推荐方法](#)

Emergency decision response plan recommendation method based on similarity of matched attributes

控制与决策. 2016, 31(7): 1247–1252 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0725>

[考虑方案有效性的应急案例决策方法](#)

Decision method for emergency case with considering effectiveness of alternative

控制与决策. 2016, 31(10): 1824–1830 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1102>

[考虑应急方案总体优势度的决策方法](#)

Decision method for emergency alternative with considering total superiority degree

控制与决策. 2015(7): 1239–1244 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0661>

异质信息环境下基于案例推理的应急决策方法

谭睿璞^{1,2}, 张文德^{3†}, 陈圣群², 杨乐华²

(1. 福州大学 经济与管理学院, 福州 350116; 2. 福建江夏学院 电子信息科学学院, 福州 350108; 3. 福州大学 信息管理研究所, 福州 350116)

摘要: 针对在突发事件应急决策中,信息表述为精确数、区间数、语言术语、直觉模糊数、中智数、梯形模糊中智数等多样性的特点,同时鉴于案例推理方法的简单易用,提出一种异质信息环境下基于案例推理的应急决策方法.首先,引入异质数据的距离及相似度测度,并基于偏差最大化方法计算异质信息属性权重;然后,基于综合相似度测度,采用案例推理的方法从案例库中找到与目标案例相同或者相似的历史案例,从而获得有效的解决当前突发事件的应急预案和处理措施;最后,通过一个应急突发事件案例验证所提出决策方法的可行性和有效性,同时与其他方法相比较验证其优点.

关键词: 应急决策; 案例推理; 异质信息; 中智集

中图分类号: C931 **文献标志码:** A

Emergency decision-making method based on case-based reasoning in heterogeneous information environment

TAN Rui-pu^{1,2}, ZHANG Wen-de^{3†}, CHEN Sheng-qun², YANG Le-hua²

(1. School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. College of Electronics and Information Science, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China; 3. Institute of Information Management, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: In response to the heterogeneity of decision information in emergency decision-making, and the decision information can be expressed as exact numbers, interval numbers, linguistic terms, intuitionistic fuzzy numbers, neutrosophic numbers, and trapezoidal fuzzy neutrosophic numbers, and considering the simple and easy use of case-based reasoning, an emergency decision-making method based on case-based reasoning in heterogeneous information environment is proposed. Firstly, the distance and similarity measure of heterogeneous data are introduced, and the heterogeneous information attribute weight is calculated based on the deviation maximization method. Then based on the comprehensive similarity measure, the case-based reasoning method is used to find the historical case that is the same or similar to the target case from the case base, so as to obtain an effective emergency plan and treatment measures for solving the current emergency. Finally, the feasibility and effectiveness of the decision-making method are verified by an emergency case, and the advantages of the method are illustrated by comparison with other methods.

Keywords: emergency decision making; case-based reasoning; heterogeneous information; neutrosophic set

0 引言

近年来,世界各地各种紧急事件的发生频率愈来愈高,如美国的“9·11”恐怖袭击,印度尼西亚海啸,中国的汶川地震等^[1].突发事件一旦发生,会造成巨大的经济损失、人员伤亡,并给社会稳定带来十分消极的影响.例如2008年5月12日的汶川地震,遭到严重破坏的地区超过10万平方千米,造成69227人死亡,374643人受伤,17923人失踪,是我国成立以来破

坏力最大的地震.2014年12月31日上海踩踏事件,造成36人死亡,49人受伤^[2],这是一起对群众性活动预防准备不足、现场管理不力、应对处置不当而引发的拥挤踩踏并造成重大伤亡和严重后果的公共安全责任事件,给社会造成了较大影响.2018年10月14日14时,印尼中苏拉威西省强震和海啸已造成2091人死亡、10679人受伤、680人失踪.总之,随着人类活动的频繁及社会对大自然干预的增强,突发事件无论从发

收稿日期: 2018-11-20; 修回日期: 2019-03-19.

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2018J01649); 福建省中青年教育科研项目(JAT170624); 福建省高校新世纪优秀人才项目(闽教科[2018]47号); 国家社会科学基金项目(17CGL058, 19BGL016).

责任编辑: 樊治平.

†通讯作者. E-mail: zhangwd@fzu.edu.cn.

生频率、规模及复杂性程度上都呈上升趋势,因此,决策部门或人员如何采取及时有效的措施减少或避免突发事件带来的负面影响,对应急管理非常重要.同时,突发事件具有的随机性、突然性、破坏性、复杂性、可变性、扩展性等特征,给应急决策带来很大的困难^[3].因此,近年来应急管理和应急决策方法成为研究热点^[1,4-9]. Peng等^[4]研究了区间值模糊软集环境下基于WDBA和CODAS及新的信息测度的应急决策算法. Li等^[1]提出了基于扩展TODIM的多属性风险型应急决策方法. Zheng等^[5]提出了一种基于主观偏好和客观信息的动态案例检索方法,并用于应急决策中. Zhang等^[6]研究了不同突发事件情形下基于前景理论的应急决策方法. Sun等^[7]提出了基于软模糊粗糙集的非常规突发事件应急预案评价方法. 徐选华等^[8]提出了基于累积前景理论的大群体风险型动态应急决策方法. 张炎亮等^[9]提出了不完备信息下基于案例推理的城市火灾应急决策方法.

异质说明信息或数据的类型与性质不同^[10],对异质信息进行处理是决策过程中的一个关键点^[10-12]. 鉴于突发事件具有高风险、复杂性、不确定性的特点,决策信息常常无法都表述为精确数,往往具有区间、模糊、犹豫的特点,比较合适表述为区间数、模糊数、直觉模糊数等. 此外,由于人类思维的模糊性,决策过程中难以用定量的数值表示决策信息,更倾向于用定性的语言信息评价属性. 同时,突发事件也具有较大的不确定性,此类决策信息可表征为中智数、梯形模糊中智数等. 因此,本文研究异质信息环境下的应急决策. 基于案例推理(case-based reasoning, CBR)的应急决策通过借鉴历史案例快速生成应急方案,缩短应急响应时间,随着案例库中历史案例数量的增长和改善,不断提高应急决策的有效性和实时性^[5],同时因其简单易用,已成为突发事件中解决应急决策的有效方法之一^[5,9]. 纵观国内外文献,在异质信息特别是中智数环境下,研究突发事件应急决策的还不多见,因此,本文研究异质信息环境下基于案例推理的应急决策方法及其应用.

1 理论基础

1.1 中智数与梯形模糊中智数

定义1^[13] 设 X 为对象集, x 为其中任意一个元素, X 上的一个中智集 A 可以由真实程度函数 $T_A(x)$ 、不确定程度函数 $I_A(x)$ 和谬误程度函数 $F_A(x)$ 表示,其中 $T_A(x)$ 、 $I_A(x)$ 和 $F_A(x)$ 是 $]0^-, 1^+[$ 的标准或非标准实数子集,即 $T_A(x) : X \rightarrow]0^-, 1^+[$, $I_A(x) : X \rightarrow]0^-, 1^+[$, $F_A(x) : X \rightarrow]0^-, 1^+[$ (其中非标准有限数 $1^+ = 1 + \varepsilon$, “1” 是它的标准部分, “ $\varepsilon > 0$ ” 为

无穷小数,是它的非标准部分),且 $0^- \leq \sup T_A(x) + \sup I_A(x) + \sup F_A(x) \leq 3^+$.

为计算简便,一个中智数(NN) n 可表示为 $n = \langle T, I, F \rangle$.

定义2^[14] X 是一个论域,则 X 中的一个梯形模糊中智集 \tilde{N} 可表示为如下形式:

$$\tilde{N} = \{ \langle x, T_{\tilde{N}}(x), I_{\tilde{N}}(x), F_{\tilde{N}}(x) \rangle | x \in X \}.$$

其中: $T_{\tilde{N}}(x) \subset [0, 1]$, $I_{\tilde{N}}(x) \subset [0, 1]$, $F_{\tilde{N}}(x) \subset [0, 1]$ 是3个梯形模糊数, $T_{\tilde{N}}(x) = (t_{\tilde{N}}^1(x), t_{\tilde{N}}^2(x), t_{\tilde{N}}^3(x), t_{\tilde{N}}^4(x)) : X \rightarrow [0, 1]$, $I_{\tilde{N}}(x) = (i_{\tilde{N}}^1(x), i_{\tilde{N}}^2(x), i_{\tilde{N}}^3(x), i_{\tilde{N}}^4(x)) : X \rightarrow [0, 1]$, $F_{\tilde{N}}(x) = (f_{\tilde{N}}^1(x), f_{\tilde{N}}^2(x), f_{\tilde{N}}^3(x), f_{\tilde{N}}^4(x)) : X \rightarrow [0, 1]$, 满足条件 $0 \leq t_{\tilde{N}}^4(x) + i_{\tilde{N}}^4(x) + f_{\tilde{N}}^4(x) \leq 3, x \in X$.

为计算简便,一个梯形模糊中智数(TrFNN) \tilde{n} 可表示为

$$\tilde{n} = \langle (a_1, a_2, a_3, a_4), (b_1, b_2, b_3, b_4), (c_1, c_2, c_3, c_4) \rangle,$$

其中参数可满足如下关系: $a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a_4, b_1 \leq b_2 \leq b_3 \leq b_4$ 和 $c_1 \leq c_2 \leq c_3 \leq c_4$. 当 \tilde{n} 中 $a_2 = a_3, b_2 = b_3, c_2 = c_3$ 时,梯形模糊中智数成为三角模糊中智数,三角模糊中智数是 TrFNN 的一种特殊情况.

1.2 直觉模糊数,区间直觉模糊数和区间数

定义3^[15] 假设 X 为非空的经典集合 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则 $A = \{ [x, \mu_A(x), \nu_A(x)] | x \in X \}$ 称为 X 的一个直觉模糊集. 将 $\mu_A(x)$ 称作 X 的元素 x 属于 A 的隶属度,将 $\nu_A(x)$ 称作 X 的元素 x 属于 A 的非隶属度,分别表示为 $\mu_A(x) : X \rightarrow [0, 1], \nu_A(x) : X \rightarrow [0, 1]$, 且 $0 \leq \mu_A(x) + \nu_A(x) \leq 1$. 称 $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \nu_A(x)$ 为 X 的元素 x 属于 A 的犹豫度,且 $0 \leq \pi_A(x) \leq 1, x \in X$.

为计算简便,一个直觉模糊数(IFN) α 可表示为 $\alpha = \langle \mu, \nu \rangle$.

定义4^[16] 假设 X 为非空的经典集合, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则称 $\tilde{A} = \{ [x, \mu_{\tilde{A}}(x), \nu_{\tilde{A}}(x)] | x \in X \}$ 为 X 的一个区间直觉模糊集. 将 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 称作 X 的元素 x 属于 A 的隶属度, $\nu_{\tilde{A}}(x)$ 称作 X 的元素 x 属于 A 的非隶属度,分别表示为 $\mu_{\tilde{A}}(x) = [\mu_{\tilde{A}}^l(x), \mu_{\tilde{A}}^u(x)] : X \rightarrow [0, 1], \nu_{\tilde{A}}(x) = [\nu_{\tilde{A}}^l(x), \nu_{\tilde{A}}^u(x)] : X \rightarrow [0, 1]$, 且 $0 \leq \mu_{\tilde{A}}^u(x) + \nu_{\tilde{A}}^u(x) \leq 1$. 称 $\pi_{\tilde{A}}(x) = [\pi_{\tilde{A}}^l(x), \pi_{\tilde{A}}^u(x)]$ 为 X 的元素 x 属于 A 的犹豫度,且 $\pi_{\tilde{A}}^l(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}^l(x) - \nu_{\tilde{A}}^l(x), \pi_{\tilde{A}}^u(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}^u(x) - \nu_{\tilde{A}}^u(x)$.

为计算简便,一个区间直觉模糊数(IvIFN) $\tilde{\alpha}$ 可表示为 $\tilde{\alpha} = \langle [\mu^l, \mu^u], [\nu^l, \nu^u] \rangle$, 如果 $\nu^l = \nu^u = 0$, 则区间直觉模糊数(IvIFN)成为一般区间数(IN) $IN : IN = [\mu^l, \mu^u]$.

1.3 语言术语

定义5^[17] 设 $S = \{s_\theta | \theta = -(\tau - 1)/2, \dots, -1, 0, 1, \dots, (\tau - 1)/2\}$ 是一个有限且完全有序的离散术语集,其中 τ 是奇数值并且 s_θ 为语言术语. 例如当 $\tau = 7$ 时, S 可以表示为

$$S = \{s_{-3}, s_{-2}, s_{-1}, s_0, s_1, s_2, s_3\} = \{\text{很差, 差, 稍差, 一般, 稍好, 好, 很好}\}.$$

S 满足下列条件:

- 1) 存在负算子 $\text{Neg}(s_i) = s_{-i}$;
- 2) 有序, 若 $i \leq j$, 则 $s_i \leq s_j$;
- 3) 最大算子, 若 $i \geq j$, 则 $\max(s_i, s_j) = s_i$;
- 4) 最小算子, 若 $i \leq j$, 则 $\min(s_i, s_j) = s_i$.

为了便于计算和避免丢失决策信息, 在原有语言术语集 S 的基础上, 定义一个扩展语言术语集 $\bar{S} = \{s_\theta | \theta \in [0, q]\}$. 若 $s_\theta \in S$, 则称 s_θ 为本原术语, 否则称为拓展术语. 一般运用本原术语评估决策方案, 拓展术语出现在语言计算和决策方案的排序过程中.

2 问题描述

案例推理技术起源于美国耶鲁大学 Roger Schank 于 1982 年在 Dynamic Memory 中的描述, 是人工智能领域中较新崛起的一种重要的基于知识的问题求解和学习方法, 它通过寻找与之相似的历史案例, 将它重新应用到新问题的环境中.

在考虑基于案例推理的应急决策问题中, 为了叙述方便, 记 $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_m\}$ 为案例库中的 m 个历史案例, 其中 Z_j 为第 j 个历史案例, $j \in \{1, 2, \dots, m\}$, Z^* 为目标案例. 一般案例包括问题描述、解决方案和方案效果 3 个部分. 下面给出问题描述、解决方案、方案效果及其权重等的符号表示.

问题描述可通过特征属性集来表示, 设 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 表示问题属性集, 其中 $c_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示第 i 个属性. $Z_j = \{z_{j1}, z_{j2}, \dots, z_{jn}\}$ 表示历史案例 Z_j 的问题属性值向量, 其中 z_{ji} 表示历史案例 Z_j 对于问题属性 c_i 的问题属性值. $t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 表示目标案例 Z^* 的问题属性值向量, t_i 为目标案例 Z^* 对于问题属性 c_i 的问题属性值. 用 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_g\}$ 表示解决方案属性集, 其中 $r_k (k = 1, 2, \dots, g)$ 表示解决方案第 k 个方案属性; $r_j = \{r_{j1}, r_{j2}, \dots, r_{jg}\}$ 表示历史案例 Z_j 的方案属性值向量, r_{jk} 表示历史案例 Z_j 对于方案属性 r_k 的方案属性值. 历史方案执行效果用 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 表示, 其中 $e_j (= 1, 2, \dots, m)$ 表示历史案例 Z_j 的解决方案 r_j 的方案执行效果. 具体描述如表 1 所示.

问题描述可通过特征属性集来表示, 设 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 表示问题属性集, 其中 $c_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示第 i 个属性. $Z_j = \{z_{j1}, z_{j2}, \dots, z_{jn}\}$ 表示历史案例 Z_j 的问题属性值向量, 其中 z_{ji} 表示历史案例 Z_j 对于问题属性 c_i 的问题属性值. $t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 表示目标案例 Z^* 的问题属性值向量, t_i 为目标案例 Z^* 对于问题属性 c_i 的问题属性值. 用 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_g\}$ 表示解决方案属性集, 其中 $r_k (k = 1, 2, \dots, g)$ 表示解决方案第 k 个方案属性; $r_j = \{r_{j1}, r_{j2}, \dots, r_{jg}\}$ 表示历史案例 Z_j 的方案属性值向量, r_{jk} 表示历史案例 Z_j 对于方案属性 r_k 的方案属性值. 历史方案执行效果用 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 表示, 其中 $e_j (= 1, 2, \dots, m)$ 表示历史案例 Z_j 的解决方案 r_j 的方案执行效果. 具体描述如表 1 所示.

表 1 历史案例和目标案例相关信息

案例	问题描述				解决方案				实施效果
	c_1	c_2	\dots	c_n	r_1	r_2	\dots	r_g	E
Z_1	z_{11}	z_{12}	\dots	z_{1n}	r_{11}	r_{12}	\dots	r_{1g}	e_1
Z_2	z_{21}	z_{22}	\dots	z_{2n}	r_{21}	r_{22}	\dots	r_{2g}	e_2
Z_3	z_{31}	z_{32}	\dots	z_{3n}	r_{31}	r_{32}	\dots	r_{3g}	e_3
历史案例	\vdots								
Z_m	z_{m1}	z_{m2}	\dots	z_{mn}	r_{m1}	r_{m2}	\dots	r_{mg}	e_m
目标案例	Z^*	t_1	t_2	\dots	t_n				

案例推理的基本步骤如下.

- 1) 案例表示: 收集案例特征值等信息, 构建历史案例库.
- 2) 案例检索: 采用合适有效的案例检索方法, 计算目标案例和历史案例的相似度, 从而在案例库中找到与待解决的目标案例最相似的一个案例或者多个案例.
- 3) 案例修正: 案例检索后找到与目标案例最相似的历史案例, 其解决方案有时达不到目标案例的要求, 需要结合专家意见或者其他案例修正方案, 对历史案例的解决方案进行调整, 达到解决目标案例的较好效果, 用于解决目标案例.

- 4) 案例存储: 目标案例执行后, 将其存储到案例库中成为历史案例用于下次检索.

本文重点研究异质信息环境下的案例检索方法.

3 基于异质信息和案例推理的应急决策方法

3.1 案例检索

案例检索是案例推理的一个关键环节, 也是本文研究的重点. 本文在多种异质信息环境下, 首先计算目标方案与历史方案的局部属性相似度, 然后计算加权后综合相似度, 从而在案例库中快速检索到与目标案例最相似的历史案例, 得到应急预案.

3.1.1 异质信息描述

由于突发事件具有高风险、复杂性、不确定性的特点,除少部分属性值可以精确获取外,大多属性值的表述具有模糊性、不确定性、异质性.在本文中,用精确数、区间数、语言术语、直觉模糊数、区间直觉模糊数、中智数、梯形模糊中智数等异质信息来表征属性信息,且同一属性值为同一种信息形式.为方便起见,将属性集记为 $C = C_1^{RN} \cup C_2^{IVN} \cup C_3^{LT} \cup C_4^{IFN} \cup C_5^{IVIFN} \cup C_6^{NN} \cup C_7^{TrFNN}$, 且 $C_i \cap C_j = \emptyset (i, j = 1, 2, \dots, 7; i \neq j)$. 其中: C_1^{RN} 表示属性值表述为精确数的集合, C_2^{IVN} 表示属性值表述为区间数的集合, C_3^{LT} 表示属性值表述为语言术语的集合, C_4^{IFN} 表示属性值表述为直觉模糊数的集合, C_5^{IVIFN} 表示属性值表述为区间直觉模糊数的集合, C_6^{NN} 表示属性值表述为中智数的集合, C_7^{TrFNN} 表示属性值表述为梯形模糊中智数的集合. 具体表示如下.

若 $c_i \in C_1^{RN}$, 则 $z_{ji} (j = 1, 2, \dots, m)$ 和 t_i 都表述为精确数.

若 $c_i \in C_2^{IVN}$, 则 $z_{ji} = [z_{ji}^l, z_{ji}^u] (j = 1, 2, \dots, m)$ 和 $t_i = [t_i^l, t_i^u]$ 都表述为区间数.

若 $c_i \in C_3^{LT}$, 则 $z_{ji} = s_{\theta}^{ji} (j = 1, 2, \dots, m)$ 和 $t_i = s_{\theta}^i$ 都表述为语言术语.

若 $c_i \in C_4^{IFN}$, 则 $z_{ji} = \langle \mu_{ji}, \nu_{ji} \rangle (j = 1, 2, \dots, m)$ 和 $t_i = \langle \mu_i, \nu_i \rangle$ 都表述为直觉模糊数.

若 $c_i \in C_5^{IVIFN}$, 则 $z_{ji} = \langle [\mu_{ji}^l, \mu_{ji}^u], [\nu_{ji}^l, \nu_{ji}^u] \rangle (j = 1, 2, \dots, m)$ 和 $t_i = \langle [\mu_i^l, \mu_i^u], [\nu_i^l, \nu_i^u] \rangle$ 都表述为区间直觉模糊数.

若 $c_i \in C_6^{NN}$, 则 $z_{ji} = \langle T_{ji}, I_{ji}, F_{ji} \rangle (j = 1, 2, \dots, m)$ 和 $t_i = \langle T_i, I_i, F_i \rangle$ 都表述为中智数.

若 $c_i \in C_7^{TrFNN}$, 则 $z_{ji} = \langle (a_1^{ji}, a_2^{ji}, a_3^{ji}, a_4^{ji}), (b_1^{ji}, b_2^{ji}, b_3^{ji}, b_4^{ji}), (c_1^{ji}, c_2^{ji}, c_3^{ji}, c_4^{ji}) \rangle (j = 1, 2, \dots, m)$ 和 $t_i = \langle (a_1^i, a_2^i, a_3^i, a_4^i), (b_1^i, b_2^i, b_3^i, b_4^i), (c_1^i, c_2^i, c_3^i, c_4^i) \rangle$ 都表述为梯形模糊中智数.

3.1.2 异质信息相似度计算

基于案例推理的决策方法,主要通过计算目标案例与历史案例的综合相似度值获取应急预案.首先需要计算异质数据的特征属性相似度,然后属性相似度加权后计算案例的综合相似度值.设 $\text{Sim}_i(Z^*, Z_j)$ 表示目标案例 Z^* 与历史案例 Z_j 关于特征属性 c_i 的相似度.异质决策信息包含精确数、区间数、语言术语、直觉模糊数、区间直觉模糊数、中智数、梯形模糊中智数等多种类型属性信息,其相似度计算如下.

1) 当特征属性为精确数时,相似度 $\text{Sim}_i(Z^*, Z_j)$ ^[18] 的计算公式为

$$\text{Sim}_i(Z^*, Z_j) = \exp \left[\frac{-|t_i - z_{ji}|}{d_i^{\max} - d_i^{\min}} \right], \quad i \in n, j \in m. \quad (1)$$

其中

$$d_i^{\max} = \{t_i, \max\{z_{ji} | i \in n\}\},$$

$$d_i^{\min} = \{t_i, \min\{z_{ji} | i \in n\}\}, \quad j \in m.$$

2) 当特征属性为区间数,即 $z_{ji} = [z_{ji}^l, z_{ji}^u], t_i = [t_i^l, t_i^u]$ 时, $\text{Sim}_i(Z^*, Z_j)$ ^[18] 的计算公式为

$$\text{Sim}_i(Z^*, Z_j) = \exp \left[-\frac{\sqrt{(t_i^l - z_{ji}^l)^2 + (t_i^u - z_{ji}^u)^2}}{\max_i \{ \sqrt{(t_i^l - z_{ji}^l)^2 + (t_i^u - z_{ji}^u)^2} \}} \right],$$

$$i \in n, j \in m. \quad (2)$$

3) 当特征属性为语言术语,即 $z_{ji} = s_{\theta}^{ji}, t_i = s_{\theta}^i$ 时,首先将 s_{θ} 转换为区间直觉模糊数^[19],即

$$z_{ji} = \langle [\mu_{ji}^l, \mu_{ji}^u], [\nu_{ji}^l, \nu_{ji}^u] \rangle, \quad t_i = \langle [\mu_i^l, \mu_i^u], [\nu_i^l, \nu_i^u] \rangle,$$

则 $\text{Sim}_i(Z^*, Z_j)$ ^[20] 的计算公式为

$$\text{Sim}_i(Z^*, Z_j) = 1 - \{ [(\mu_i^l - \mu_{ji}^l)^2 + (\mu_i^u - \mu_{ji}^u)^2 + (\nu_i^l - \nu_{ji}^l)^2 + (\nu_i^u - \nu_{ji}^u)^2 + (\pi_i^l - \pi_{ji}^l)^2 + (\pi_i^u - \pi_{ji}^u)^2] / 6 \}^{\frac{1}{2}},$$

$$i \in n, j \in m. \quad (3)$$

4) 当特征属性为直觉模糊数,即 $z_{ji} = \langle \mu_{ji}, \nu_{ji} \rangle, t_i = \langle \mu_i, \nu_i \rangle$ 时,采用 Ye^[21] 提出的基于余弦相似度测度公式,则 $\text{Sim}_i(Z^*, Z_j)$ 的计算公式为

$$\text{Sim}_i(Z^*, Z_j) = C_{IFS}(Z^*, Z_j) = \frac{\mu_i \mu_{ji} + \nu_i \nu_{ji}}{\sqrt{\mu_i^2 + \nu_i^2} \sqrt{\mu_{ji}^2 + \nu_{ji}^2}}, \quad i \in n, j \in m.$$

5) 当特征属性为中智数,即 $z_{ji} = \langle T_{ji}, I_{ji}, F_{ji} \rangle, t_i = \langle T_i, I_i, F_i \rangle$ 时, $\text{Sim}_i(Z^*, Z_j)$ ^[22] 的计算公式为

$$\text{Sim}_i(Z^*, Z_j) = 1 - \sqrt{(|T_i - T_{ji}|^2 + |I_i - I_{ji}|^2 + |F_i - F_{ji}|^2) / 3},$$

$$i \in n, j \in m. \quad (4)$$

6) 当特征属性为梯形模糊中智数,即 $z_{ji} = \langle (a_1^{ji}, a_2^{ji}, a_3^{ji}, a_4^{ji}), (b_1^{ji}, b_2^{ji}, b_3^{ji}, b_4^{ji}), (c_1^{ji}, c_2^{ji}, c_3^{ji}, c_4^{ji}) \rangle, t_i = \langle (a_1^i, a_2^i, a_3^i, a_4^i), (b_1^i, b_2^i, b_3^i, b_4^i), (c_1^i, c_2^i, c_3^i, c_4^i) \rangle$ 时,采用 Biswas 等^[23] 提出的 cosine 相似度测度公式,则 $\text{Sim}_i(Z^*, Z_j)$ 的计算公式为

$$\text{Sim}_i(Z^*, Z_j) = \left(\sum_{h=1}^4 a_h^{ji} a_h^i + \sum_{h=1}^4 b_h^{ji} b_h^i + \sum_{h=1}^4 c_h^{ji} c_h^i \right) / K. \quad (5)$$

$$K = \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^4 (a_h^{ji})^2 + \sum_{h=1}^4 (b_h^{ji})^2 + \sum_{h=1}^4 (c_h^{ji})^2}{\sum_{h=1}^4 (a_h^i)^2 + \sum_{h=1}^4 (b_h^i)^2 + \sum_{h=1}^4 (c_h^i)^2}}; \quad i \in n, j \in m, h = 1, 2, 3, 4. \quad (6)$$

纵观现有文献,国内外学者对相似度测度和距离测度进行了深入研究,提出了各种测度公式.例如区间数,Tran等^[24]提出了基于所有区间点的相似度测度公式,Chen等^[25]提出了基于质心点的直觉模糊数相似度测度公式,Ye等分别提出了基于 cosine 函数^[26]和 tangent 函数^[27]的单值中智数相似度测度等等.不同的测度公式在大多数情况下结果一致,特殊情况下计算效果更好的测度公式往往以计算量大为代价.本文从应急决策的时效性出发,选择用广泛且计算量较小的测度公式进行决策支持.

3.1.3 异质信息环境下属性权重的确定

为了决策的客观性,本文采用偏差最大化方法计算属性权重.由于客观事物的复杂性及人类思维的模糊性,往往难以给出明确的属性权重,有时会出现权重完全未知这种极端情况.在有限方案的多属性决策中,若方案在属性 c_i 下差异越小,则该属性对方案决策的作用越小,否则将对会方案排序与选优起着重要作用,因此,方案属性值偏差越大,则其应赋予越大的属性权重.本文基于文献[28-29]的偏差最大化思想计算异质信息环境下的属性权重,具体如下.

通过求解下列最优化模型可求得权重向量 ω :

$$\begin{cases} \max D(\omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \omega_i d(z_{ji} - z_{ki}); \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n \omega_i^2 = 1, \omega_i^2 \geq 0, i = 1, 2, \dots, n, \\ j = 1, 2, \dots, m, j \neq k. \end{cases}$$

其中 $d(z_{ji} - z_{ki})$ 表示同一属性下任意两个方案的属性值差值,异质属性信息的差值可以采用其距离测度公式来计算.根据文献[20]中提到的距离与相似度的相互关系,即 $d(z_{ji} - z_{ki}) + \text{Sim}(z_{ji}, z_{ki}) = 1$,同时考虑到要最大限度降低方法的计算量,本文采用基于3.1.2节的相似度测度计算属性差值,即 $d(z_{ji} - z_{ki}) = 1 - \text{Sim}(z_{ji}, z_{ki})$.

求解并进行归一化处理得到属性权重

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m d(z_{ji} - z_{ki})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m d(z_{ji} - z_{ki})}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

属性权重确定后,局部相似度加权即可计算目标案例与历史案例的综合相似度

$$S_j = \text{Sim}(Z^*, Z_j) = \sum_{i \in N} \omega_i \cdot \text{Sim}_i(Z^*, Z_j). \quad (8)$$

3.2 案例修正

案例修正是对检索出的历史案例的解决方案进行修正,使其能够更好地解决新的目标问题.案例检索后可得到目标案例与每个历史案例的相似度排序,本文提取综合相似度值最大的历史案例的解决方案作为目标案例的应急处理方案,但需同时满足两个条件:1)其综合相似度值满足预先设置的案例综合相似度阈值 ξ ,即 $S_j = \text{Sim}(Z^*, Z_j) \geq \xi$;2)其各局部相似度值满足局部相似度阈值 λ ,即 $\text{Sim}_i(Z^*, Z_j) \geq \lambda$.若最大综合相似度值不满足预先设置的案例综合相似度阈值 ξ ,即 $\text{Sim}_i(Z^*, Z_j) \leq \xi$,则说明案例库中的历史案例与目标案例差异较大,此时可由应急决策专家小组根据其专业知识及经验给出应急预案;若最大综合相似度值满足预先设置的案例综合相似度阈值 ξ ,但其局部相似度值不全部满足局部相似度阈值 λ ,即存在 $\text{Sim}_i(Z^*, Z_j) \leq \lambda$,则此时可对最大综合相似度值对应的解决方案进行调整和修正,修正原则根据问题属性与方案属性的相互关系对方案属性数值进行修正,以满足目标案例的要求.

3.3 基于异质信息和案例推理的应急决策方法步骤

由于应急决策环境的复杂性、信息不完全性、不确定性和时间紧迫性,数据具有异质性.例如矿井中化学物质含量可以通过设备监控获取,则可以用精确数来表示,即 $c_i \in C_1^{\text{RN}}$;再如火灾影响区域具有区间性,可以预估上下限,则可以用区间数来表示,即 $c_i \in C_2^{\text{IVN}}$;再如伤亡情况,评估专家倾向于用定性的语言信息来评价其严重程度,则可以用语言术语表示,即 $c_i \in C_3^{\text{LT}}$;再如冰雪灾害中电路恢复状况评估具有模糊性犹豫性,则可以用直觉模糊数来表示,即 $c_i \in C_4^{\text{IFN}}$ 或者 $c_i \in C_5^{\text{IVIFN}}$;再如突发事件中人员疏散的路径选择,影响路径边权的因素很多,如路面状况、疏散人群机构状况、疏散易发生事故,具有很大不确定性,则可以用中智数来表示,即 $c_i \in C_6^{\text{NN}}$;再如瓦斯二次爆炸的影响范围,能够评估出最大可能取值范围及可能波动范围,则可以采用梯形模糊中智数来表示,即 $c_i \in C_7^{\text{TrFNN}}$.总之, $c_i \in C_1^{\text{RN}} \cup C_2^{\text{IVN}} \cup C_3^{\text{LT}} \cup C_4^{\text{IFN}} \cup C_5^{\text{IVIFN}} \cup C_6^{\text{NN}} \cup C_7^{\text{TrFNN}}$ 常常表述为异质信息.在异质信息环境下基于案例推理的应急决策方法步骤如下所示.

step 1: 数据获取及转换.

step 2: 权重计算.利用式(7)计算异质信息的属

性权重.

step 3: 局部相似度计算. 利用相似度公式计算历史案例与目标案例的各个属性的相似度值.

step 4: 综合相似度计算. 利用式(8)计算目标案例与历史案例的综合相似度值.

step 5: 目标案例预处理方案获取. 基于综合相似度值进行排序, 选择 Z^* 与 Z_j 的相似度 S_j 最大值, 同时其满足 $S_j \geq \xi$ 和局部相似度值 $\text{Sim}_i(Z^*, Z_j) \geq \lambda$, 说明目标案例和历史案例 Z_j 是相同或相似情景的突发事件, 可以做相同处理, 即采用 Z_j 的解决方案 r_j 去执行目标案例. 若综合相似度值 $S_j \geq \xi$, 而一些局部相似度值 $\text{Sim}_i(Z^*, Z_j) \leq \lambda$, 则可以对解决方案修正后再作为目标案例的预处理方案.

4 算例分析

4.1 案例分析

随着中国经济的飞速发展, 对能源的需求日益增加, 国内煤炭企业活动频繁, 随着而来的是瓦斯爆炸突发事故日益增多. 此类事故的频频发生, 对经济特别是人民群众的生命安全造成重大损失, 因此, 生

成一个应对瓦斯爆炸的有效应急预案引起了社会的广泛关注. 本文引用并改编文献[30-31]中的数据, 从瓦斯爆炸突发事故案例库中获取最有效的源案例, 从而获得相应处理方案. 案例库中有8个瓦斯爆炸事故历史案例 (Z_1, Z_2, \dots, Z_8), 问题属性有10个, 包括井下被困人员数 (c_1), 爆炸的影响区域范围 (c_2), 残余 O_2 的浓度 (c_3), CO 的浓度 (c_4), CH_4 的浓度 (c_5), 原有通风系统的工作状态 (c_6), 通风系统的破坏程度 (c_7), 坍塌程度 (c_8), 火灾的影响范围 (c_9), 二次爆炸的影响程度范围 (c_{10}). 其中 $c_1, c_3, c_4, c_5 \in C_1^{RN}$, $c_2 \in C_2^{IVN}$, $c_6 \in C_3^{LT}$, $c_7 \in C_4^{IFN}$, $c_8 \in C_5^{IVIFN}$, $c_9 \in C_6^{NN}$, $c_{10} \in C_7^{TrFNN}$, 语言术语采用7粒度语言集表示, $S = \{s_{-3}, s_{-2}, s_{-1}, s_0, s_1, s_2, s_3\} = \{\text{极差, 非常差, 差, 一般, 好, 非常好, 极好}\}$. 历史案例的解决方案考虑5个重要属性, 包括救援人员数 (r_1), 应急物资套数 (r_2), 矿井是否疏通 (r_3), 通风设备恢复能力 (r_4), 专业消防车数 (r_5). 解决方案的执行效果简单取值为 $e_j \in \{\text{成功, 失败}\}$, 在本文案例中都取值为成功, 即 $e_j = \text{成功}$. 其中问题属性和方案属性数据如表2所示.

表2 决策矩阵

案例	属性								
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
Z_1	54	[25, 32]	13	32	7	s_2	$\langle 0.90, 0.05 \rangle$	$\langle [0.85, 0.90], [0.05, 0.10] \rangle$	$\langle 0.80, 0.20, 0.15 \rangle$
Z_2	77	[23, 31]	12	26	6	s_1	$\langle 0.80, 0.15 \rangle$	$\langle [0.70, 0.80], [0.15, 0.20] \rangle$	$\langle 1.00, 0.00, 0.00 \rangle$
Z_3	45	[17, 25]	30	30	8	s_{-1}	$\langle 0.50, 0.45 \rangle$	$\langle [0.20, 0.40], [0.45, 0.50] \rangle$	$\langle 0.80, 0.20, 0.15 \rangle$
Z_4	80	[15, 31]	27	45	3	s_2	$\langle 0.90, 0.05 \rangle$	$\langle [0.85, 0.90], [0.05, 0.10] \rangle$	$\langle 1.00, 0.00, 0.00 \rangle$
Z_5	73	[30, 39]	18	19	10	s_2	$\langle 0.90, 0.05 \rangle$	$\langle [0.85, 0.90], [0.05, 0.10] \rangle$	$\langle 0.90, 0.10, 0.05 \rangle$
Z_6	37	[36, 45]	29	24	12	s_1	$\langle 0.80, 0.15 \rangle$	$\langle [0.70, 0.80], [0.15, 0.20] \rangle$	$\langle 0.90, 0.10, 0.05 \rangle$
Z_7	41	[22, 32]	30	26	14	s_{-1}	$\langle 0.50, 0.45 \rangle$	$\langle [0.20, 0.40], [0.45, 0.50] \rangle$	$\langle 0.50, 0.50, 0.45 \rangle$
Z_8	32	[11, 21]	32	30	9	s_2	$\langle 0.50, 0.45 \rangle$	$\langle [0.85, 0.90], [0.05, 0.10] \rangle$	$\langle 0.80, 0.20, 0.15 \rangle$
Z^*	50	[12, 20]	26	36	9	s_0	$\langle 0.50, 0.45 \rangle$	$\langle [0.45, 0.50], [0.35, 0.45] \rangle$	$\langle 0.50, 0.50, 0.45 \rangle$

案例	属性					
	c_{10}	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5
Z_1	$\langle (0.0, 0.1, 0.2, 0.3), (0.7, 0.8, 0.9, 1.0), (0.7, 0.8, 0.9, 1.0) \rangle$	65	78	疏通原矿井通道	无法恢复, 启用新的通风设备	8
Z_2	$\langle (0.0, 0.1, 0.2, 0.3), (0.7, 0.8, 0.9, 1.0), (0.7, 0.8, 0.9, 1.0) \rangle$	95	87	疏通原矿井通道	无法恢复, 启用新的通风设备	10
Z_3	$\langle (0.5, 0.6, 0.7, 0.8), (0.0, 0.2, 0.3, 0.4), (0.0, 0.2, 0.3, 0.4) \rangle$	56	68	开辟新通道	恢复旧的通风设备	8
Z_4	$\langle (0.5, 0.6, 0.7, 0.8), (0.0, 0.2, 0.3, 0.4), (0.0, 0.2, 0.3, 0.4) \rangle$	87	80	疏通原矿井通道	无法恢复, 启用新的通风设备	10
Z_5	$\langle (0.0, 0.0, 0.0, 0.0), (1.0, 1.0, 1.0, 1.0), (1.0, 1.0, 1.0, 1.0) \rangle$	85	75	疏通原矿井通道	无法恢复, 启用新的通风设备	9
Z_6	$\langle (0.7, 0.8, 0.9, 1.0), (0.0, 0.1, 0.2, 0.3), (0.0, 0.1, 0.2, 0.3) \rangle$	48	40	疏通原矿井通道	无法恢复, 启用新的通风设备	9
Z_7	$\langle (0.7, 0.8, 0.9, 1.0), (0.0, 0.1, 0.2, 0.3), (0.0, 0.1, 0.2, 0.3) \rangle$	51	53	开辟新通道	恢复旧的通风设备	5
Z_8	$\langle (1.0, 1.0, 1.0, 1.0), (0.0, 0.0, 0.0, 0.0), (0.0, 0.0, 0.0, 0.0) \rangle$	43	38	疏通原矿井通道	恢复旧的通风设备	8
Z^*	$\langle (0.7, 0.8, 0.9, 1.0), (0.0, 0.1, 0.2, 0.3), (0.0, 0.1, 0.2, 0.3) \rangle$	-	-	-	-	-

表3 决策矩阵(转换后数据)

案例	属性						
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
Z_1	54	[25, 32]	13	32	7	$\langle [0.7540, 0.7937], [0.1751, 0.2063] \rangle$	$\langle 0.90, 0.05 \rangle$
Z_2	77	[23, 31]	12	26	6	$\langle [0.6547, 0.7071], [0.2507, 0.2929] \rangle$	$\langle 0.80, 0.15 \rangle$
Z_3	45	[17, 25]	30	30	8	$\langle [0.1837, 0.2500], [0.6848, 0.7500] \rangle$	$\langle 0.50, 0.45 \rangle$
Z_4	80	[15, 31]	27	45	3	$\langle [0.7540, 0.7937], [0.1751, 0.2063] \rangle$	$\langle 0.90, 0.05 \rangle$
Z_5	73	[30, 39]	18	19	10	$\langle [0.7540, 0.7937], [0.1751, 0.2063] \rangle$	$\langle 0.90, 0.05 \rangle$
Z_6	37	[36, 45]	29	24	12	$\langle [0.6547, 0.7071], [0.2507, 0.2929] \rangle$	$\langle 0.80, 0.15 \rangle$
Z_7	41	[22, 32]	30	26	14	$\langle [0.1837, 0.2500], [0.6848, 0.7500] \rangle$	$\langle 0.50, 0.45 \rangle$
Z_8	32	[11, 21]	32	30	9	$\langle [0.7540, 0.7937], [0.1751, 0.2063] \rangle$	$\langle 0.50, 0.45 \rangle$
Z^*	50	[12, 20]	26	36	9	$\langle [0.4286, 0.5000], [0.4286, 0.5000] \rangle$	$\langle 0.50, 0.45 \rangle$

表4 属性相似度值

案例	属性									
	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}
Z_1	0.9200	0.6002	0.5220	0.8574	0.8338	0.7592	0.7793	0.6986	0.9100	0.3816
Z_2	0.5698	0.6383	0.4966	0.6807	0.7613	0.8312	0.8538	0.7918	0.7658	0.3816
Z_3	0.9011	0.8154	0.8187	0.7939	0.9131	0.7956	1.0000	0.8646	0.9100	0.9732
Z_4	0.5353	0.7196	0.9512	0.7074	0.5796	0.7592	0.7793	0.6986	0.7658	0.9732
Z_5	0.6193	0.4699	0.6703	0.5200	0.9131	0.7592	0.7793	0.6986	0.8400	0.2364
Z_6	0.7627	0.3679	0.8607	0.6303	0.7613	0.8312	0.8538	0.7918	0.8400	1.0000
Z_7	0.8290	0.6372	0.8187	0.6807	0.6347	0.7956	1.0000	0.8646	1.0000	1.0000
Z_8	0.6873	0.9600	0.7408	0.7939	1.0000	0.7592	1.0000	0.6986	0.9100	0.9474

step 1: 为便于计算,根据文献[19]将语言术语转换为区间直觉模糊数,转换后部分数据如表3所示.

step 2: 利用式(7),通过java编程计算属性权重

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 0.1065, \omega_2 = 0.1370, \omega_3 = 0.1070, \\ \omega_4 &= 0.0736, \omega_5 = 0.1109, \omega_6 = 0.0903, \\ \omega_7 &= 0.0469, \omega_8 = 0.0876, \omega_9 = 0.0760, \\ \omega_{10} &= 0.1644. \end{aligned}$$

step 3: 利用相似度公式,计算局部属性相似度值,其中 s_i 表示在属性 c_i 下的相似度值,具体数据如表4所示.

step 4: 利用式(8)计算目标案例与各个历史案例的综合加权相似度值

$$\begin{aligned} S_{*1} &= 0.6897, S_{*2} = 0.6411, S_{*3} = 0.8784, \\ S_{*4} &= 0.7581, S_{*5} = 0.6105, S_{*6} = 0.7671, \\ S_{*7} &= 0.8184, S_{*8} = 0.8547. \end{aligned}$$

step 5: 由step 4的计算结果知 $S_{*3} \succ S_{*8} \succ S_{*7} \succ S_{*6} \succ S_{*4} \succ S_{*1} \succ S_{*2} \succ S_{*5}$,因此可得到8个历史案例与目标案例的相似程度排序为

$$Z_3 \succ Z_8 \succ Z_7 \succ Z_6 \succ Z_4 \succ Z_1 \succ Z_2 \succ Z_5.$$

方法中 step 3 属性相似度计算主要采用3.1.2节的相似度测度公式,若采用文献[20,24-25,27]提出的相似度测度公式,可以得到同样的排序结果,但与本文相比较计算量较大.

假定应急决策部门专家设置案例综合相似度阈

值 $\xi = 0.75$,根据 $S_j \geq \xi$,首先可以排除掉无效历史案例 Z_1 、 Z_2 和 Z_5 ,得到相似案例 Z_3 、 Z_8 、 Z_7 、 Z_6 和 Z_4 ;然后专家组设置局部相似度阈值 $\lambda = 0.65$,根据 $\text{Sim}_i(Z^*, Z_j) \geq \lambda$ 可以剔除历史案例 Z_7 、 Z_6 和 Z_4 ,得到有效历史案例 Z_3 和 Z_8 ;最后取全局相似度值最大,即可得到与目标案例最相似的历史案例 Z_3 ,说明目标案例与历史案例 Z_3 是相同或相似情景的突发事件,可以做相同处理.因此,采用 Z_3 的执行方案来处理目标案例,即组织56人救援队,准备68套应急物资,开辟新的临时矿井对被困人群进行搜索和解救,恢复旧的通风设备,并派遣8辆专业消防车参与灭火救援.

4.2 对比分析

为说明算法的有效性和合理性,将提出的异质信息环境下基于案例推理的应急决策方法与其他方法进行比较.首先利用文献[12]的异质信息转换方法及梯形模糊中智数与其他数据的关系,将各种异质数据都转换为梯形中智模糊数,然后利用文献[14]梯形模糊中智数加权算术平均(TNNWAA)算子计算每个历史案例与目标案例的综合评价,最后利用梯形模糊中智数的相似度测度计算目标案例与历史案例的综合相似度值,排序后得到与目标案例最相似的历史案例.

基于TNNWAA算子的决策方法步骤如下所示.

step 1: 利用文献[12]的数据转换公式将表2的异质数据统一转换梯形模糊中智数,数据如表5所示.

表5 统一的梯形模糊中智数决策矩阵

属性	案例	数据
C ₁	Z ₁	((0.675, 0.675, 0.675, 0.675), (0.650, 0.650, 0.650, 0.650), (0.325, 0.325, 0.325, 0.325))
	Z ₂	((0.963, 0.963, 0.963, 0.963), (0.075, 0.075, 0.075, 0.075), (0.038, 0.038, 0.038, 0.038))
	Z ₃	((0.563, 0.563, 0.563, 0.563), (0.650, 0.650, 0.650, 0.650), (0.438, 0.438, 0.438, 0.438))
	Z ₄	((1.000, 1.000, 1.000, 1.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000))
	Z ₅	((0.913, 0.913, 0.913, 0.913), (0.175, 0.175, 0.175, 0.175), (0.088, 0.088, 0.088, 0.088))
	Z ₆	((0.463, 0.463, 0.463, 0.463), (0.925, 0.925, 0.925, 0.925), (0.538, 0.538, 0.538, 0.538))
	Z ₇	((0.513, 0.513, 0.513, 0.513), (0.975, 0.975, 0.975, 0.975), (0.488, 0.488, 0.488, 0.488))
	Z ₈	((0.400, 0.400, 0.400, 0.400), (0.800, 0.800, 0.800, 0.800), (0.600, 0.600, 0.600, 0.600))
	Z*	((0.625, 0.625, 0.625, 0.625), (0.750, 0.750, 0.750, 0.750), (0.375, 0.375, 0.375, 0.375))
C ₂	Z ₁	((0.633, 0.633, 0.633, 0.633), (0.733, 0.733, 0.733, 0.733), (0.367, 0.367, 0.367, 0.367))
	Z ₂	((0.600, 0.600, 0.600, 0.600), (0.800, 0.800, 0.800, 0.800), (0.400, 0.400, 0.400, 0.400))
	Z ₃	((0.467, 0.467, 0.467, 0.467), (0.840, 0.840, 0.840, 0.840), (0.533, 0.533, 0.533, 0.533))
	Z ₄	((0.511, 0.511, 0.511, 0.511), (0.733, 0.733, 0.733, 0.733), (0.489, 0.489, 0.489, 0.489))
	Z ₅	((0.767, 0.767, 0.767, 0.767), (0.467, 0.467, 0.467, 0.467), (0.233, 0.233, 0.233, 0.233))
	Z ₆	((0.900, 0.900, 0.900, 0.900), (0.200, 0.200, 0.200, 0.200), (0.100, 0.100, 0.100, 0.100))
	Z ₇	((0.600, 0.600, 0.600, 0.600), (0.783, 0.783, 0.783, 0.783), (0.400, 0.400, 0.400, 0.400))
	Z ₈	((0.356, 0.356, 0.356, 0.356), (0.711, 0.711, 0.711, 0.711), (0.644, 0.644, 0.644, 0.644))
	Z*	((0.356, 0.356, 0.356, 0.356), (0.711, 0.711, 0.711, 0.711), (0.644, 0.644, 0.644, 0.644))
C ₃	Z ₁	((0.406, 0.406, 0.406, 0.406), (0.813, 0.813, 0.813, 0.813), (0.594, 0.594, 0.594, 0.594))
	Z ₂	((0.375, 0.375, 0.375, 0.375), (0.750, 0.750, 0.750, 0.750), (0.625, 0.625, 0.625, 0.625))
	Z ₃	((0.938, 0.938, 0.938, 0.938), (0.125, 0.125, 0.125, 0.125), (0.063, 0.063, 0.063, 0.063))
	Z ₄	((0.844, 0.844, 0.844, 0.844), (0.313, 0.313, 0.313, 0.313), (0.156, 0.156, 0.156, 0.156))
	Z ₅	((0.563, 0.563, 0.563, 0.563), (0.875, 0.875, 0.875, 0.875), (0.438, 0.438, 0.438, 0.438))
	Z ₆	((0.906, 0.906, 0.906, 0.906), (0.188, 0.188, 0.188, 0.188), (0.094, 0.094, 0.094, 0.094))
	Z ₇	((0.938, 0.938, 0.938, 0.938), (0.125, 0.125, 0.125, 0.125), (0.063, 0.063, 0.063, 0.063))
	Z ₈	((1.000, 1.000, 1.000, 1.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000))
	Z*	((0.813, 0.813, 0.813, 0.813), (0.375, 0.375, 0.375, 0.375), (0.188, 0.188, 0.188, 0.188))
C ₄	Z ₁	((0.711, 0.711, 0.711, 0.711), (0.578, 0.578, 0.578, 0.578), (0.289, 0.289, 0.289, 0.289))
	Z ₂	((0.578, 0.578, 0.578, 0.578), (0.844, 0.844, 0.844, 0.844), (0.422, 0.422, 0.422, 0.422))
	Z ₃	((0.667, 0.667, 0.667, 0.667), (0.667, 0.667, 0.667, 0.667), (0.333, 0.333, 0.333, 0.333))
	Z ₄	((1.000, 1.000, 1.000, 1.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000))
	Z ₅	((0.422, 0.422, 0.422, 0.422), (0.844, 0.844, 0.844, 0.844), (0.578, 0.578, 0.578, 0.578))
	Z ₆	((0.533, 0.533, 0.533, 0.533), (0.933, 0.933, 0.933, 0.933), (0.467, 0.467, 0.467, 0.467))
	Z ₇	((0.578, 0.578, 0.578, 0.578), (0.844, 0.844, 0.844, 0.844), (0.422, 0.422, 0.422, 0.422))
	Z ₈	((0.667, 0.667, 0.667, 0.667), (0.667, 0.667, 0.667, 0.667), (0.333, 0.333, 0.333, 0.333))
	Z*	((0.800, 0.800, 0.800, 0.800), (0.400, 0.400, 0.400, 0.400), (0.200, 0.200, 0.200, 0.200))
C ₅	Z ₁	((0.500, 0.500, 0.500, 0.500), (1.000, 1.000, 1.000, 1.000), (0.500, 0.500, 0.500, 0.500))
	Z ₂	((0.429, 0.429, 0.429, 0.429), (0.857, 0.857, 0.857, 0.857), (0.571, 0.571, 0.571, 0.571))
	Z ₃	((0.571, 0.571, 0.571, 0.571), (0.857, 0.857, 0.857, 0.857), (0.429, 0.429, 0.429, 0.429))
	Z ₄	((0.214, 0.214, 0.214, 0.214), (0.429, 0.429, 0.429, 0.429), (0.786, 0.786, 0.786, 0.786))
	Z ₅	((0.714, 0.714, 0.714, 0.714), (0.571, 0.571, 0.571, 0.571), (0.286, 0.286, 0.286, 0.286))
	Z ₆	((0.857, 0.857, 0.857, 0.857), (0.286, 0.286, 0.286, 0.286), (0.143, 0.143, 0.143, 0.143))
	Z ₇	((1.000, 1.000, 1.000, 1.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000))
	Z ₈	((0.643, 0.643, 0.643, 0.643), (0.714, 0.714, 0.714, 0.714), (0.357, 0.357, 0.357, 0.357))
	Z*	((0.643, 0.643, 0.643, 0.643), (0.714, 0.714, 0.714, 0.714), (0.357, 0.357, 0.357, 0.357))
C ₆	Z ₁	((0.754, 0.754, 0.794, 0.794), (0.000, 0.000, 0.071, 0.071), (0.175, 0.175, 0.206, 0.206))
	Z ₂	((0.655, 0.655, 0.707, 0.707), (0.000, 0.000, 0.095, 0.095), (0.251, 0.251, 0.293, 0.293))
	Z ₃	((0.184, 0.184, 0.250, 0.250), (0.000, 0.000, 0.132, 0.132), (0.685, 0.685, 0.750, 0.750))
	Z ₄	((0.754, 0.754, 0.794, 0.794), (0.000, 0.000, 0.071, 0.071), (0.175, 0.175, 0.206, 0.206))
	Z ₅	((0.754, 0.754, 0.794, 0.794), (0.000, 0.000, 0.071, 0.071), (0.175, 0.175, 0.206, 0.206))
	Z ₆	((0.655, 0.655, 0.707, 0.707), (0.000, 0.000, 0.095, 0.095), (0.251, 0.251, 0.293, 0.293))
	Z ₇	((0.184, 0.184, 0.250, 0.250), (0.000, 0.000, 0.132, 0.132), (0.685, 0.685, 0.750, 0.750))
	Z ₈	((0.754, 0.754, 0.794, 0.794), (0.000, 0.000, 0.071, 0.071), (0.175, 0.175, 0.206, 0.206))
	Z*	((0.429, 0.429, 0.500, 0.500), (0.000, 0.000, 0.143, 0.143), (0.429, 0.429, 0.500, 0.500))

表5(续)

属性	案例	数据
C_7	Z_1	$\langle(0.900, 0.900, 0.900, 0.900), (0.050, 0.050, 0.050, 0.050), (0.050, 0.050, 0.050, 0.050)\rangle$
	Z_2	$\langle(0.800, 0.800, 0.800, 0.800), (0.050, 0.050, 0.050, 0.050), (0.150, 0.150, 0.150, 0.150)\rangle$
	Z_3	$\langle(0.500, 0.500, 0.500, 0.500), (0.050, 0.050, 0.050, 0.050), (0.450, 0.450, 0.450, 0.450)\rangle$
	Z_4	$\langle(0.900, 0.900, 0.900, 0.900), (0.050, 0.050, 0.050, 0.050), (0.050, 0.050, 0.050, 0.050)\rangle$
	Z_5	$\langle(0.900, 0.900, 0.900, 0.900), (0.050, 0.050, 0.050, 0.050), (0.050, 0.050, 0.050, 0.050)\rangle$
	Z_6	$\langle(0.800, 0.800, 0.800, 0.800), (0.050, 0.050, 0.050, 0.050), (0.150, 0.150, 0.150, 0.150)\rangle$
	Z_7	$\langle(0.500, 0.500, 0.500, 0.500), (0.500, 0.500, 0.500, 0.500), (0.450, 0.450, 0.450, 0.450)\rangle$
	Z_8	$\langle(0.500, 0.500, 0.500, 0.500), (0.050, 0.050, 0.050, 0.050), (0.450, 0.450, 0.450, 0.450)\rangle$
	Z^*	$\langle(0.500, 0.500, 0.500, 0.500), (0.050, 0.050, 0.050, 0.050), (0.450, 0.450, 0.450, 0.450)\rangle$
C_8	Z_1	$\langle(0.850, 0.850, 0.900, 0.900), (0.000, 0.000, 0.100, 0.100), (0.050, 0.050, 0.100, 0.100)\rangle$
	Z_2	$\langle(0.700, 0.700, 0.800, 0.800), (0.000, 0.000, 0.150, 0.150), (0.150, 0.150, 0.200, 0.200)\rangle$
	Z_3	$\langle(0.200, 0.200, 0.400, 0.400), (0.100, 0.100, 0.350, 0.350), (0.450, 0.450, 0.500, 0.500)\rangle$
	Z_4	$\langle(0.850, 0.850, 0.900, 0.900), (0.000, 0.000, 0.100, 0.100), (0.050, 0.050, 0.100, 0.100)\rangle$
	Z_5	$\langle(0.850, 0.850, 0.900, 0.900), (0.000, 0.000, 0.100, 0.100), (0.050, 0.050, 0.100, 0.100)\rangle$
	Z_6	$\langle(0.700, 0.700, 0.800, 0.800), (0.000, 0.000, 0.150, 0.150), (0.150, 0.150, 0.200, 0.200)\rangle$
	Z_7	$\langle(0.200, 0.200, 0.400, 0.400), (0.100, 0.100, 0.350, 0.350), (0.450, 0.450, 0.500, 0.500)\rangle$
	Z_8	$\langle(0.850, 0.850, 0.900, 0.900), (0.000, 0.000, 0.100, 0.100), (0.050, 0.050, 0.100, 0.100)\rangle$
	Z^*	$\langle(0.450, 0.450, 0.500, 0.500), (0.050, 0.050, 0.200, 0.200), (0.350, 0.350, 0.450, 0.450)\rangle$
C_9	Z_1	$\langle(0.800, 0.800, 0.800, 0.800), (0.200, 0.200, 0.200, 0.200), (0.150, 0.150, 0.150, 0.150)\rangle$
	Z_2	$\langle(1.000, 1.000, 1.000, 1.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000)\rangle$
	Z_3	$\langle(0.800, 0.800, 0.800, 0.800), (0.200, 0.200, 0.200, 0.200), (0.150, 0.150, 0.150, 0.150)\rangle$
	Z_4	$\langle(1.000, 1.000, 1.000, 1.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000)\rangle$
	Z_5	$\langle(0.900, 0.900, 0.900, 0.900), (0.100, 0.100, 0.100, 0.100), (0.050, 0.050, 0.050, 0.050)\rangle$
	Z_6	$\langle(0.900, 0.900, 0.900, 0.900), (0.100, 0.100, 0.100, 0.100), (0.050, 0.050, 0.050, 0.050)\rangle$
	Z_7	$\langle(0.500, 0.500, 0.500, 0.500), (0.500, 0.500, 0.500, 0.500), (0.450, 0.450, 0.450, 0.450)\rangle$
	Z_8	$\langle(0.800, 0.800, 0.800, 0.800), (0.200, 0.200, 0.200, 0.200), (0.150, 0.150, 0.150, 0.150)\rangle$
	Z^*	$\langle(0.500, 0.500, 0.500, 0.500), (0.500, 0.500, 0.500, 0.500), (0.450, 0.450, 0.450, 0.450)\rangle$
C_{10}	Z_1	$\langle(0.000, 0.100, 0.200, 0.300), (0.700, 0.800, 0.900, 1.000), (0.700, 0.800, 0.900, 1.000)\rangle$
	Z_2	$\langle(0.000, 0.100, 0.200, 0.300), (0.700, 0.800, 0.900, 1.000), (0.700, 0.800, 0.900, 1.000)\rangle$
	Z_3	$\langle(0.500, 0.600, 0.700, 0.800), (0.000, 0.200, 0.300, 0.400), (0.000, 0.200, 0.300, 0.400)\rangle$
	Z_4	$\langle(0.500, 0.600, 0.700, 0.800), (0.000, 0.200, 0.300, 0.400), (0.000, 0.200, 0.300, 0.400)\rangle$
	Z_5	$\langle(0.000, 0.000, 0.000, 0.000), (1.000, 1.000, 1.000, 1.000), (1.000, 1.000, 1.000, 1.000)\rangle$
	Z_6	$\langle(0.700, 0.800, 0.900, 1.000), (0.000, 0.100, 0.200, 0.300), (0.000, 0.100, 0.200, 0.300)\rangle$
	Z_7	$\langle(0.700, 0.800, 0.900, 1.000), (0.000, 0.100, 0.200, 0.300), (0.000, 0.100, 0.200, 0.300)\rangle$
	Z_8	$\langle(1.000, 1.000, 1.000, 1.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000)\rangle$
	Z^*	$\langle(0.700, 0.800, 0.900, 1.000), (0.000, 0.100, 0.200, 0.300), (0.000, 0.100, 0.200, 0.300)\rangle$

step 2: 利用TNNWAA算子,集结各个方案的属性值得到综合评价值TNNWAA(Z_j),其中权重使用上述已计算得到的权重,具体数据如下所示:

$$\begin{aligned}
 \text{TNNWAA}(Z_1) &= \langle(0.634, 0.640, 0.664, 0.672), (0.000, 0.000, 0.418, 0.426), (0.288, 0.295, 0.324, 0.330)\rangle, \\
 \text{TNNWAA}(Z_2) &= \langle(1.000, 1.000, 1.000, 1.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000)\rangle, \\
 \text{TNNWAA}(Z_3) &= \langle(0.614, 0.628, 0.657, 0.679), (0.000, 0.000, 0.352, 0.370), (0.000, 0.303, 0.329, 0.345)\rangle, \\
 \text{TNNWAA}(Z_4) &= \langle(1.000, 1.000, 1.000, 1.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000)\rangle, \\
 \text{TNNWAA}(Z_5) &= \langle(0.728, 0.728, 0.742, 0.742), (0.000, 0.000, 0.321, 0.321), (0.220, 0.220, 0.237, 0.237)\rangle, \\
 \text{TNNWAA}(Z_6) &= \langle(0.789, 0.764, 0.833, 1.000), (0.000, 0.000, 0.221, 0.236), (0.000, 0.151, 0.176, 0.188)\rangle, \\
 \text{TNNWAA}(Z_7) &= \langle(1.000, 1.000, 1.000, 1.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000)\rangle, \\
 \text{TNNWAA}(Z_8) &= \langle(1.000, 1.000, 1.000, 1.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000), (0.000, 0.000, 0.000, 0.000)\rangle, \\
 \text{TNNWAA}(Z_*) &= \langle(0.618, 0.643, 0.688, 1.000), (0.000, 0.000, 0.346, 0.370), (0.000, 0.295, 0.343, 0.366)\rangle.
 \end{aligned}$$

step 3: 利用式(6)计算目标案例与历史案例的相似度值

$$S_{*1} = 0.9650, S_{*2} = 0.8713, S_{*3} = 0.9867,$$

$$S_{*4} = 0.8713, S_{*5} = 0.9694, S_{*6} = 0.9707,$$

$$S_{*7} = 0.8713, S_{*8} = 0.8713.$$

step 4: 由 step 3 的计算结果可知 $S_{*3} \succ S_{*6} \succ S_{*5} \succ S_{*1} \succ S_{*8} \sim S_{*7} \sim S_{*4} \sim S_{*2}$, 因此可得到 8 个历史案例与目标案例的相似程度排序为 $Z_3 \succ Z_6 \succ Z_5 \succ Z_1 \succ Z_8 \sim Z_7 \sim Z_4 \sim Z_2$.

由两种方法对比可以看出, 虽然排序结果不完全一样, 但最优方案是一样的, 都是 Z_3 . 此外, 因为 TNNWAA 算子在集结信息时对数据 0 比较敏感, 基于 TNNWAA 算子的决策方法无法对历史方案进行充分排序, 而本文提出的方法则不会出现这种情况.

当然在应急决策过程也有一些特殊情况, 例如历史案例与目标案例问题属性表示有时是不一致的, 本文通过增加或删除目标案例的属性信息来处理. 再如属性值残缺问题, 文献[32-33]对此进行了研究, 本文为满足应急决策的时间紧迫性, 简单采用补 0 或者补平均值^[32]的方法将信息补充完整后, 再用所提出方法进行决策.

与现有的其他相关算法相比较, 本文算法的优点主要包含以下几个方面:

1) 本文研究的异质信息类型更加全面、更加多样化, 包括精确数、区间数、语言术语、直觉模糊数、区间直觉模糊数、中智数、梯形模糊中智数等 7 种数据形式, 与文献[12]相比较, 其异质信息包括实数、区间数、三角模糊数、梯形模糊数, 而本文的信息表征形式更多. 与文献[11]相比较, 本文的信息类型包含了它没有涉及到的中智数和梯形模糊中智数等.

2) 本文在异质信息环境下基于偏差最大化确定属性权重, 与文献[3]的主观给定相比较, 本文的决策结果更加客观公正. 与文献[12]提出的方法相比较, 本文的方法更易于理解.

3) 本文采用案例推理来排序择优比较简单、易于理解, 与文献[3]采用的证据推理, 及文献[12]将异质信息统一转化为区间值直觉模糊数进行信息集结的方法相比较, 案例推理的计算量相对较小.

5 结论

本文在研究异质信息的基础上, 提出了基于案例推理的应急决策方法. 引入精确数、区间数、语言术语、直觉模糊数、区间直觉模糊数、中智数、梯形模糊中智数等 7 种异质数据的距离及相似度测度, 利用偏

差最大化方法确定异质信息的属性权重, 并利用案例推理的方法从案例库中找到与目标案例相同或者相似的历史案例, 从而找到解决当前突发事件的应急预案. 最后, 通过一个应急突发事件案例验证决策方法的可行性和有效性, 同时与其他方法相比较说明本文方法的优点. 在今后的工作中, 将进一步对基于中智数的应急决策及异质信息残缺情况下的应急决策进行研究.

参考文献(References)

- [1] Li M Y, Cao P P. Extended TODIM method for multi-attribute risk decision making problems in emergency response[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 135: 1286-1293.
- [2] 光明新闻. 12·31 上海外滩踩踏事故[EB/OL]. (2015-01-03)[2018-09-21]. http://news.gmw.cn/newspaper/2015-01/13/content_103695455.htm. (Bright News. 12·31 Shanghai bund stampede accident[EB/OL]. (2015-01-03)[2018-09-21]. http://news.gmw.cn/newspaper/2015-01/13/content_103695455.htm.)
- [3] 郑晶, 王应明, 叶歆. 考虑应急方案总体优势度的决策方法[J]. 控制与决策, 2015, 30(7): 1239-1244. (Zheng J, Wang Y M, Ye X. Decision method for emergency alternative with considering total superiority degree[J]. Control and Decision, 2015, 30(7): 1239-1244.)
- [4] Peng X, Garg H. Algorithms for interval-valued fuzzy soft sets in emergency decision making based on WDBA and CODAS with new information measure[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 119: 439-452.
- [5] Zheng J, Wang Y, Chen S. Dynamic case retrieval method with subjective preferences and objective information for emergency decision making[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2018, 5(3): 749-757.
- [6] Zhang Z X, Wang L, Wang Y M. An emergency decision making method based on prospect theory for different emergency situations[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2018, 9(3): 407-420.
- [7] Sun B, Ma W. An approach to evaluation of emergency plans for unconventional emergency events based on soft fuzzy rough set[J]. Kybernetes, 2016, 45(3): 461-473.
- [8] 徐选华, 杨玉珊. 基于累积前景理论的大群体风险型动态应急决策方法[J]. 控制与决策, 2017, 32(11): 1957-1965. (Xu X H, Yang Y S. Method of dynamic emergency decision for risk type of large group based on cumulative prospect theory[J]. Control and Decision, 2017, 32(11): 1957-1965.)
- [9] 张炎亮, 徐元元, 李俊雅. 不完备信息下基于案例推理的城市火灾应急决策方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(3): 13-18. (Zhang Y L, Xu Y Y, Li J Y. Study on emergency decision-making method of urban fire based on case-based reasoning under incomplete information[J].

- Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(3): 13-18.)
- [10] 余高峰, 李登峰, 叶银芳, 等. 考虑后悔规避的异质多属性变权决策方法[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 154-161.
(Yu G F, Li D F, Ye Y F, et al. Heterogeneous multi-attribute variable weight decision making method considering regret aversion[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 154-161.)
- [11] 潘亚虹, 耿秀丽. 一种基于VIKOR的混合多属性群决策方法[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(1): 177-182.
(Pan Y H, Geng X L. A hybrid multiple attributes group decision making method based on VIKOR[J]. Machine Design and Research, 2018, 34(1): 177-182.)
- [12] 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.
- [13] Wang H, Smarandache F, Zhang Y Q, et al. Interval neutrosophic sets and logic: Theory and applications in computing [M]. Hexis: Arizona, 2005: 6-14.
- [14] Ye J. Trapezoidal neutrosophic set and its application to multiple attribute decision-making [J]. Neural Comput & Applic, 2015, 26(5): 1157-1166.
- [15] Atanassov K. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(11): 87-96.
- [16] Atanassov K, Gargov G. Interval valued intuitionistic fuzzy sets[J]. Physica-Verlag HD, 1999, 31(3): 343-349.
- [17] Xu Z S. Group decision making based on multiple types of linguistic preference relations[J]. Information Sciences, 2008, 178(2): 452-467.
- [18] Fan Z P, Li Y H, Wang X, et al. Hybrid similarity measure for case retrieval in CBR and its application to emergency response towards gas explosion[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(5): 2526-2534.
- [19] 戚筱雯, 梁昌勇, 黄永青, 等. 基于混合型评价矩阵的多属性群决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(2): 473-481.
(Qi X W, Liang C Y, Huang Y Q, et al. Multi-attribute group decision making method based on hybrid evaluation matrix[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(2): 473-481.)
- [20] 谢建明, 刘三阳. 区间直觉模糊集的相似性测度及其应用[J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(4): 249-255.
(Xi J M, Liu S Y. Similarity measure of interval valued intuitionistic fuzzy sets and its application[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2018, 48(4): 249-255.)
- [21] Ye J. Cosine similarity measures for intuitionistic fuzzy sets and their applications[J]. Mathematical & Computer Modelling, 2011, 53(1): 91-97.
- [22] Ye J. Clustering methods using distance-based similarity measures of single-valued neutrosophic sets[J]. Journal of Intelligent Systems, 2014, 23(4): 379-389.
- [23] Biswas P, Pramanik S, Giri B C. Cosine similarity measure based multi-attribute decision-making with trapezoidal fuzzy neutrosophic numbers[J]. Neutrosophic Sets and Systems, 2014, 8: 46-56.
- [24] Tran L, Duckstein L. Comparison of fuzzy numbers using a fuzzy distance measure[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 130(3): 343-344.
- [25] Chen S M, Cheng S H, Lan T C. A novel similarity measure between intuitionistic fuzzy sets based on the centroid points of transformed fuzzy numbers with applications to pattern recognition[J]. Information Sciences, 2016, 343: 15-40.
- [26] Ye J. Improved cosine similarity measures of simplified neutrosophic sets for medical diagnoses[J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2015, 63(3): 171-179.
- [27] Ye J, Fu J. Multi-period medical diagnosis method using a single valued neutrosophic similarity measure based on tangent function[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2016, 123: 142-149.
- [28] Wang Y M. Using the method of maximizing deviations to make decision for multiindices[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 1997, 8(3): 21-26.
- [29] Yang B, Yuan J, Ye Z. Risk assessment of coal mining above confined aquifer based on maximizing deviation in a GIS environment[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(12): 299.
- [30] 靖可, 赵希男. 基于整体优势度的应急救援案例推理决策[J]. 系统工程, 2008, 26(9): 15-20.
(Jing K, Zhao X N. CBR decision for emergency rescue based on integral superiority degree[J]. Systems Engineering, 2008, 26(9): 15-20.)
- [31] Zhang H Y, Ji P, Wang J Q. A novel decision support model for satisfactory restaurants utilizing social information: A case study of TripAdvisor.com[J]. Tourism Management, 2017, 59: 281-297.
- [32] 杨静. 具有残缺值且偏好信息形式不同的复杂大群体决策方法[J]. 统计与决策, 2017(21): 54-56.
(Yang J. Complex large group decision making method with incomplete values and different forms of preference information[J]. Statistics and Decision, 2017(21): 54-56.)
- [33] 吴诗辉, 刘晓东, 李正欣, 等. 不完全信息下的AHP优化决策方法研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(10): 38-48.
(Wu S H, Liu X D, Li Z X, et al. Research on the optimization method for AHP decision making with incomplete information[J]. Operations Research and Management Science, 2018, 27(10): 38-48.)

作者简介

谭睿璞(1982—), 女, 副教授, 博士生, 从事模糊信息处理等研究, E-mail: tanruipu123@163.com;

张文德(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事信息管理与信息系统等研究, E-mail: zhangwd@fzu.edu.cn;

陈圣群(1977—), 男, 教授, 博士, 从事数据管理与智能决策等研究, E-mail: csq255@qq.com;

杨乐华(1983—), 男, 讲师, 硕士, 从事数据挖掘的研究, E-mail: yanglh358@163.com.

(责任编辑: 孙艺红)