控制与决策
Control and Decision

基于密度峰值聚类理念的大群体应急模糊决策模型

丁雪枫, 朱丽霞

引用本文:
丁雪枫,朱丽霞. 基于密度峰值聚类理念的大群体应急模糊决策模型[J]. 控制与决策, 2022, 37(12): 3307-3313.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0503

基于密度峰值聚类理念的大群体应急模糊决策模型

丁雪枫†, 朱丽霞

(上海大学 管理学院，上海 200444)

摘　要: 针对决策者权重未知情形下重大突发事件应急决策问题,提出一种SFN-CFSFDP-Borda-MULTIMOORA模型. 首先,采用球形模糊数描述决策者对应急备选方案的评价信息;其次,基于密度峰值聚类理念对大决策群体进行聚类;然后,提出可扩展的群体综合冲突优化模型,根据聚类结果进行冲突测度,求解决策者及聚集的权重并实现意见融合;再次,利用改进Borda-MULTIMOORA法决策最优方案;最后,以黑龙江东湖水库事件为例,对模型的有效性与实用性给予验证. 结果表明,SFN-CFSFDP-Borda-MULTIMOORA模型能够充分考虑决策者的心理特征,强化在重大突发不确定情景下决策者的知识表达能力,同时明确聚类中心的选择方法,达到聚集内部差异小、聚集间差异大的聚类效果,通过考虑群体综合冲突及实际决策情形对决策者权重和聚集权重进行设置更符合实际,有效实现群体冲突融合,并提高决策效率,为重大突发事件大群体应急决策提供理论支持.

关键词: 大群体应急；模糊决策；球形模糊数；密度峰值聚类理念；冲突融合；Borda-MULTIMOORA

中图分类号: C934　　**文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0503

引用格式: 丁雪枫,朱丽霞. 基于密度峰值聚类理念的大群体应急模糊决策模型 [J]. 控制与决策, 2022, 37(12): 3307-3313.

A large group emergency fuzzy decision-making method based on theory of clustering by fast search and find of density peaks

DING Xue-feng†, *ZHU Li-xia*

(School of Management，Shanghai University，Shanghai 200444，China)

Abstract: Aiming at the major emergency decision-making problem when the weights of decision-makers are unknown, a SFN-CFSFDP-Borda-MULTIMOORA method is proposed. Firstly, spherical fuzzy number is used to describe the evaluation information of experts on emergency alternatives. Secondly, the clustering method based on the theory of clustering by fast search and find of density peaks is used to cluster the large group experts. Then, according to the clustering results, the conflict is measured and an extensible multi-objective optimization model of group comprehensive conflict is constructed, the weights of experts and clusters are obtained and group conflicts are effectively reduced by solving the model. Thirdly, the optimal alternative is decided by the Borda-MULTIMOORA method. Finally, taking Donghu reservoir in Heilongjiang province as an example, the effectiveness and practicability of the method are verified. The results show that the proposed method fully considers the psychological characteristics of experts, strengthens the knowledge expression ability of experts in major emergency scenarios, and clarifies the selection method of clustering centers, which achieves better clustering effect with small internal differences and large differences among clusters. Besides, it is more practical by considering the comprehensive conflicts of groups and actual decision-making situations to determine the weights of experts and clusters, which effectively reduces group conflicts, improves the efficiency of decision-making and provides support for the large group emergency decision-making of major emergencies.

Keywords: large group emergency；fuzzy decision-making；spherical fuzzy number；clustering by fast search and find of density peaks；conflict integration；Borda-MULTIMOORA

收稿日期: 2021-03-26；**录用日期:** 2021-08-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71502098)；教育部人文社会科学规划基金项目(21YJA630010)；上海市“科技创新行动计划”软科学研究领域重点项目(19692109000)；上海市科技计划项目(20692109400)；上海大学管理学院培育专项项目(2020-SDGY-KZ-003).

责任编委: 李勇建.

†通讯作者. E-mail: athena_tju@sina.com.

0 引 言

近年来重大突发灾害事件频发,如2020年底的"新冠肺炎"疫情、2019年贵州水城"7·23"特大山体滑坡灾害等. 根据国家应急管理部等联合部门统计,2020年,以自然灾害为例,我国共造成受灾人数1.38亿人,死亡失踪人数591人,直接经济损失3 701.5亿元. 面对破坏性强、影响深远的突发灾害事件,必须采取及时有效的应急措施,以防止事件进一步恶化而引发更严重的次生衍生事件.

重大突发事件应急决策是指在重大突发事件发生时,相关应急部门或机构组成应急决策团队,综合各类影响因素,从符合应急情境的备选方案中确定最优方案的过程. 重大突发事件高时间压力、情景复杂等特点,使得决策者难以给出精确数值进行描述,因此采用反映信息不确定性的模糊类语言是现有较为通用与可行的方法. 模糊理论及隶属度概念由Zadeh[1]于1965年提出,此后,Atanassov[2]又提出了直觉模糊集理论;Yager[3]扩展并定义了勾股模糊集. 但是,这些模糊集只能通过满意或不满意来表示决策者的心理,具有一定局限性. 基于勾股模糊集和图像模糊集[4],Ashraf等[5-7]将决策者心理特征扩展至包括中立在内的3个维度,提出了球形模糊集(spherical fuzzy sets, SFS),大大提升了语言的适应性.

此外,重大突发应急决策问题呈现多学科交叉的特点,需要跨领域、跨部门的决策者($\geqslant$ 20人)共同进行决策. 由于决策者的知识背景、目标利益等方面存在差异,群体冲突不可避免. 现有的大群体应急决策冲突融合往往结合聚类和共识达成两步骤,通过不断修正决策者给出的信息以提高共识度,过程较为复杂. 在聚类方面,徐选华等[8]提出根据选定的阈值与相聚度的大小比较对决策者进行分类;杨静[9]提出根据偏好距离矩阵实现决策成员的聚类;徐选华等[10]基于模糊数欧氏距离的贴近度和夹角余弦相似度刻画了综合相似度,并提出基于综合相似度的闭包聚类法. 现有聚类方法在初始聚类中心的选择上具有随意性,会极大影响聚类结果. 2014年,Rodriguez等[11]提出了一种基于密度峰值快速搜索和查找的聚类方法(clustering by fast search and find of density peaks, CFSFDP),该方法处理数据更高效,且计算复杂度低、稳定性高. 在权重方面,现有许多研究多采用熵权法求解[12-13],较少考虑工作经验、社会水平等因素对决策者权重的影响,并且在聚集权重的确定上只考虑了聚集规模的影响,未考虑聚集内决策者权重的影响,与实际情景尚不匹配.

为了提升重大突发事件下大群体应急决策结果的合理性和准确性,本文提出一种决策者权重未知情形下基于密度峰值聚类理念下的大群体应急模糊决策模型. 该模型将共识达成过程融入聚类过程,根据聚类结果初步测算综合冲突并基于综合冲突最小化目标和相关权重约束条件建立扩展性较好的综合冲突优化模型,通过对模型的求解,确定决策者的权重,再综合聚集规模和聚集内决策者权重对聚集权重进行调整,在求解确定更合理的权重的同时实现综合冲突的最小化.

1 基础知识

1.1 球形模糊数

定义1[5] 令R为一个非空集合,r为R中的元素,则球形模糊集表示为

$$A=\{\langle r,P_A(r),I_A(r),N_A(r)|r\in R\rangle\}. \tag{1}$$

其中: $P_A:R\to[0,1]$, $I_A:R\to[0.1]$和$N_A:R\to[0.1]$表示r对R的隶属度、中立隶属度和非隶属度,满足$\forall r\in R,\ 0\leqslant(P_A(r))^2+(I_A(r))^2+(N_A(r))^2\leqslant 1$. $\pi_A(r)=\sqrt{1-(P_A^2(r)+I_A^2(r)+N_A^2(r))}$为$r\in R$的犹豫度,称$e=\langle P_e,I_e,N_e\rangle$为球形模糊数(spherical fuzzy number, SFN).

定义2[5] 设e_1和e_2为任意两个SFNs,运算规则如下:

$$e_1\oplus e_2=\langle\sqrt{P_{e_1}^2+P_{e_2}^2-P_{e_1}^2\cdot P_{e_2}^2},I_{e_1}\cdot I_{e_2},N_{e_1}\cdot N_{e_2}\rangle,$$

$$e_1\otimes e_2=\langle P_{e_1}\cdot P_{e_2},I_{e_1}\cdot I_{e_2},\sqrt{N_{e_1}^2+N_{e_2}^2-N_{e_1}^2\cdot N_{e_2}^2}\rangle;$$

$$\lambda e_1=\langle\sqrt{1-(1-P_{e_1}^2)^\lambda},(I_{e_1})^\lambda,(N_{e_1})^\lambda\rangle;$$

$$e_1^\lambda=\langle(P_{e_1})^\lambda,(I_{e_1})^\lambda,\sqrt{1-(1-N_{e_1}^2)^\lambda}\rangle.$$

定义3[14] 设A和B为任两个SFNs,则两者间的加权距离$d_\omega(A,B)$为

$$d_\omega(A,B)=1-\sum_{j=1}^n\omega_j[P_A^2(r_j)\cdot P_B^2(r_j)+I_A^2(r_j)\cdot I_B^2(r_j)+N_A^2(r_j)\cdot N_B^2(r_j)]\Big/\Big(\sum_{j=1}^n[\{P_A^4(r_j)\bigvee P_B^4(r_j)\}+\{I_A^4(r_j)\bigvee I_B^4(r_j)\}+\{N_A^4(r_j)\bigvee N_B^4(r_j)\}]\Big(\sum_{j=1}^n\omega_j\Big)\Big), \tag{2}$$

其中$\bigvee$为最大值运算.

定义4[5] 设$e_j=\langle P_{e_j},I_{e_j},N_{e_j}\rangle(j=1,2,\ldots,n)$为一组SFNs, $\omega=(\omega_1,\omega_2,\ldots,\omega_n)^{\mathrm T}$为$e_j(j=1,2,$

$\dots,n)$ 的权重向量, 满足 $\omega_j \geqslant 0$ 且 $\sum\limits_{j=1}^{n}\omega_j = 1$, 则球形模糊数加权平均(SFNWAA)算子表示为

$$\mathrm{SFNWAA}(e_1,e_2,\dots,e_n)=\sum_{j=1}^{n}\omega_j e_j=$$
$$\Big\langle\Big(\sqrt{1-\prod_{j=1}^{n}(1-P_{e_j}^2)^{\omega_j}}\Big),\prod_{j=1}^{n}(I_{e_j})^{\omega_j},\prod_{j=1}^{n}(N_{e_j})^{\omega_j}\Big\rangle. \tag{3}$$

其球形模糊数加权几何(SFNWGA)算子表示为

$$\mathrm{SFNWGA}(e_1,e_2,\dots,e_n)=\prod_{j=1}^{n}{e_j}^{\omega_j}=$$
$$\Big\langle\prod_{j=1}^{n}(P_{e_j})^{\omega_j},\prod_{j=1}^{n}(I_{e_j})^{\omega_j},\sqrt{1-\prod_{j=1}^{n}(1-N_{e_j}^2)^{\omega_j}}\Big\rangle. \tag{4}$$

1.2 基于密度峰值快速搜索和查找的聚类理念

基于密度峰值快速搜索和查找的聚类方法基本思想[11]为: 聚类中心局部密度较高, 其周围数据点局部密度较低, 且聚类中心与任何局部密度较高的点有较大的相对距离, 即聚集内部距离较近, 聚集之间距离较远. 根据每个数据点局部密度及其与高密度点相对距离两个指标对数据集进行聚类, 两个指标只依赖于数据点间的距离.

2 模型的提出

2.1 问题描述

重大突发事件大群体应急决策问题中, 设 $A=\{A_1,A_2,\dots,A_m\}$ 为方案集; $C=\{C_1,C_2,\dots,C_n\}$ 为属性集; $w=(w_1,w_2,\dots,w_n)^{\mathrm{T}}$ 为属性权重向量, 满足 $0\leqslant w_j\leqslant 1$ 且 $\sum\limits_{j=1}^{n}w_j=1$; $D=\{D_1,D_2,\dots,D_l\}(l\geqslant 20)$ 为决策者集; $E_i^k=(e_{i1}^k,e_{i2}^k,\dots,e_{in}^k)$ 为决策者 $D_k(k=1,2,\dots,l)$ 对方案 $A_i(i=1,2,\dots,m)$ 做出的评价; $\omega=(\omega_1,\omega_2,\dots,\omega_l)^{\mathrm{T}}$ 为决策者权重向量, 满足 $0\leqslant\omega_k\leqslant 1$ 且 $\sum\limits_{k=1}^{l}\omega_k=1$. 这里要解决的问题是: 在决策者权重未知的情形下, 综合决策者的评价信息实现冲突融合, 并从备选应急方案中决策出最优方案.

2.2 模型构建

为求解决策者权重未知情形下重大突发事件大群体应急决策问题, 实现群体冲突融合, 提出一种结合SFN、CFSFDP法和改进Borda-MULTIMOORA法的应急模糊决策模型(简称为SFN-CFSFDP-Borda-MULTIMOORA模型), 其主要步骤如下.

step 1: 基于密度峰值快速搜索和查找聚类理念对决策群体聚类.

step 1.1: 决策者评价向量的标准化处理. 设 $\overline{e}_{ij}^k$ 为 e_{ij}^k 的补集, 将各决策者的评价向量 $E_i^k=(e_{i1}^k,e_{i2}^k,\dots,e_{im}^k)$ 标准化为 $\widetilde{E}_i^k=(\widetilde{e}_{i1}^k,\widetilde{e}_{i2}^k,\dots,\widetilde{e}_{im}^k)$. 其中: $\widetilde{e}_{ij}^k=e_{ij}^k$ 为效益型属性, $\widetilde{e}_{ij}^k=\overline{e}_{ij}^k$ 为成本性属性.

step 1.2: 计算各方案 $A_i(i=1,2,\dots,m)$ 下决策者间评价向量的加权距离

$$d_w(\tilde{E}_i^k,\tilde{E}_i^s)=$$
$$1-\sum_{j=1}^{n}w_j[P_{\tilde{e}_{ij}^k}^2(r_j)\cdot P_{\tilde{e}_{ij}^s}^2(r_j)+I_{\tilde{e}_{ij}^k}^2(r_j)\cdot I_{\tilde{e}_{ij}^s}^2(r_j)+$$
$$N_{\tilde{e}_{ij}^k}^2(r_j)\cdot N_{\tilde{e}_{ij}^s}^2(r_j)]\Big/\Big(\sum_{j=1}^{n}[\{P_{\tilde{e}_{ij}^k}^4(r_j)\bigvee P_{\tilde{e}_{ij}^s}^4(r_j)\}+$$
$$\{I_{\tilde{e}_{ij}^k}^4(r_j)\bigvee I_{\tilde{e}_{ij}^s}^4(r_j)\}+\{N_{\tilde{e}_{ij}^k}^4(r_j)\bigvee N_{\tilde{e}_{ij}^s}^4(r_j)\}]\Big). \tag{5}$$

step 1.3: 确定各方案 A_i 的截断距离 d_i^c. 将 $M=l(l-1)/2$ 个决策者评价向量的加权距离按升序排列, 所得序列表示为 $d_i^1\leqslant d_i^2\leqslant\dots\leqslant d_i^M$, 则方案的截断距离 $d_i^c=d_i^{f(Mt)}$. 其中: $t\in[0,1]$, $f(Mt)$ 为 Mt 取整值.

step 1.4: 计算各方案 A_i 下决策者 D_k 评价向量 $\tilde{E}_i^k$ 的局部密度 $\rho_i^k=\sum\limits_{k,s\in l,k\neq s}\mathrm{e}^{-\big(\frac{d_w(\tilde{E}_i^k,\tilde{E}_i^s)}{d_i^c}\big)^2}$.

step 1.5: 计算评价向量 $\tilde{E}_i^k$ 与高密度决策者评价向量间的相对距离 δ_i^k. 将 $\rho_i^k(k=1,2,\dots,l)$ 降序排列, q_i^k 表示 ρ_i^k 降序排列后对应的上标序, 当 $q_i^k\geqslant 2$ 时, $\delta_i^k=\min\limits_{q_i^s\prec q_i^k}\{d_w(\tilde{E}_i^k,\tilde{E}_i^s)\}$; 当 $q_i^k=1$ 时, $\delta_i^k=\max\limits_{q_i^s\geqslant 2}\{d_w(\tilde{E}_i^k,\tilde{E}_i^s)\}$.

step 1.6: 确定聚类中心. 对决策者给出的评价向量按其局部密度和相对距离降序排序, 各选取前 $\beta\,\%$(β 的值由决策小组根据排序后的分布情况确定, 一般为30), 若决策者的评价向量在两个指标下的排名均在选取范围内, 则为聚类中心. 令 $\{m_{\tilde{k}}^i\}_{\tilde{k}=1}^K$ 为各聚类中心对应评价向量的编号, 即 $\tilde{E}_i^{m_{\tilde{k}}^i}$ 为第 $\tilde{k}$ 个聚类中心.

step 1.7: 对非聚类中心决策者进行聚类. 将 $\tilde{E}_i^k$ 的初始归类属性标记为 c_i^k, 若 $\tilde{E}_i^k$ 为聚类中心, 且归属于第 $\tilde{k}$ 个聚集, 则 $c_i^k=\tilde{k}$, 否则 $c_i^k=-1$. 令 n_i^k 为所有局部密度比 $\tilde{E}_i^k$ 大的评价向量中与 $\tilde{E}_i^k$ 距离最近的评价向量的编号, 当 $k=1$ 时, $n_i^k=0$; 当 $k\geqslant 2$ 时, $n_i^k=\arg\min\limits_{q_i^s\prec q_i^k}\{d_w(\tilde{E}_i^k,\tilde{E}_i^s)\}$. 其中, 若 $c_i^k=-1$, 则使 $c_i^k=c_i^{n_k^i}$, 可确定各个决策者给出的评价向量的归类属性, 完成聚类.

step 2: 基于综合冲突优化模型判定决策者及聚集的权重.

step 2.1: 计算决策者意见间的冲突度. 方案 A_i 下决策者 D_k 与 D_s 间的冲突度为 $\varphi^i(D_k,D_s) = d_w(\tilde{E}_i^k,\tilde{E}_i^s)$.

step 2.2: 计算聚集的冲突度. 设 $G_i^{\tilde{k}}$ 为 A_i 下以 $\tilde{E}_i^{m_i^{\tilde{k}}}$ 为聚类中心的聚集, $n_{\tilde{k}}$ 为 $G_i^{\tilde{k}}$ 中 $\tilde{E}_i^k$ 的数量且满足 $\sum_{\tilde{k}=1}^{K} n_{\tilde{k}} = l$, 则 $G_i^{\tilde{k}}$ 的冲突度为

$$\varphi_i^{\tilde{k}} = \frac{2\Big(\sum_{n_{\tilde{k}}} d_w(\tilde{E}_i^k,\tilde{E}_i^s)\Big)}{n_{\tilde{k}}(n_{\tilde{k}}-1)}.$$

step 2.3: 基于群体综合冲突度的多目标优化模型求解决策者权重. 结合聚集的权重和冲突度, 构建基于群体综合冲突度的多目标优化模型为

$$\min\varphi_i = \sum_{\tilde{k}=1}^{K}\Bigg(\eta\frac{n_{\tilde{k}}}{l} + (1-\eta)\frac{\sum_{k=1}^{n_{\tilde{k}}}\omega^k/n_{\tilde{k}}}{\sum_{\tilde{k}=1}^{K}\Big(\sum_{k=1}^{n_{\tilde{k}}}\omega^k/n_{\tilde{k}}\Big)}\Bigg)\cdot \Bigg(\frac{2\Big(\sum_{n_{\tilde{k}}} d_w(\tilde{E}_i^k,\tilde{E}_i^s)\Big)}{n_{\tilde{k}}(n_{\tilde{k}}-1)}\Bigg).$$

$$\text{s.t. } 0 \prec \omega^k \prec 1,\ \sum_{k=1}^{l}\omega^k = 1. \tag{6}$$

其中: φ_i 为方案 A_i 下的综合冲突度; 参数 η 为控制聚集规模和决策者重要性对聚集权重影响的权重系数, $\eta \prec 0.5$ 表明更重视决策者重要性对聚集权重的影响, $\eta \succ 0.5$ 表明更重视聚集规模对聚集权重的影响. 通过求解式(6), 可得到决策者的最优权重为 $\{\omega^k\}_{k=1}^{l}$.

step 2.4: 计算最终的聚集权重 $\varpi_{G_i^{\tilde{k}}}$, 有

$$\varpi_{G_i^{\tilde{k}}} = \eta\frac{n_{\tilde{k}}}{l} + (1-\eta)\frac{\sum_{k=1}^{n_{\tilde{k}}}\omega^k/n_{\tilde{k}}}{\sum_{\tilde{k}=1}^{K}\Big(\sum_{k=1}^{n_{\tilde{k}}}\omega^k/n_{\tilde{k}}\Big)}. \tag{7}$$

step 2.5: 利用 SFNWAA 算子将聚集 $G_i^{\tilde{k}}$ 中 $\tilde{E}_i^k$ 集结为 $E_i^{G_i^{\tilde{k}}} = (e_{i1}^{G_i^{\tilde{k}}}, e_{i2}^{G_i^{\tilde{k}}},\dots,e_{in}^{G_i^{\tilde{k}}})$, 其中

$$e_{ij}^{G_i^{\tilde{k}}} = \mathrm{SFNWAA}(\tilde{e}_{ij}^1,\tilde{e}_{ij}^2,\dots,\tilde{e}_{ij}^{n_{\tilde{k}}}) = \Big\langle\Big(\sqrt{1-\prod_{k=1}^{n_{\tilde{k}}}(1-P_{\tilde{e}_{ij}^k}^2)^{\omega^k}}\Big), \prod_{k=1}^{n_{\tilde{k}}}(I_{\tilde{e}_{ij}^k})^{\omega^k}, \prod_{k=1}^{n_{\tilde{k}}}(N_{\tilde{e}_{ij}^k})^{\omega^k}\Big\rangle. \tag{8}$$

step 2.6: 利用 SFNWAA 算子得到方案 A_i 的整体评价向量 $\tilde{E}_i^* = (\tilde{e}_{i1}^*,\tilde{e}_{i2}^*,\dots,\tilde{e}_{in}^*)$, 其中

$$e_{ij}^* = \mathrm{SFNWAA}(\tilde{e}_{ij}^{G_i^1},\tilde{e}_{ij}^{G_i^2},\dots,\tilde{e}_{ij}^{G_i^K}) = \Big\langle\Big(\sqrt{1-\prod_{k=1}^{n_{\tilde{k}}}(1-P_{\tilde{e}_{ij}^{G_i^{\tilde{k}}}}^2)^{\varpi_{G_i^{\tilde{k}}}}}\Big), \prod_{k=1}^{K}(I_{\tilde{e}_{ij}^{G_i^{\tilde{k}}}})^{\varpi_{G_i^{\tilde{k}}}}, \prod_{k=1}^{n_{\tilde{k}}}(N_{\tilde{e}_{ij}^{G_i^{\tilde{k}}}})^{\varpi_{G_i^{\tilde{k}}}}\Big\rangle. \tag{9}$$

step 3: 利用 Borda-MULTIMOORA 法决策最优方案.

MULTIMOORA 法由 3 部分组成[15]: 比率系统、参考点系统和完全乘法形式比值系统. 该方法具有满足所有鲁棒性条件的优点, 被认为是最稳定的方案排序方法之一. 但传统 MULTIMOORA 仅利用优势理论对排名序数进行聚合, 在备选方案较多的情况下会出现循环推理的情况, 往往难以决策. Hafezalkotob 等[16] 进一步提出了结合 Borda 法则的改进 MULTIMOORA 法 (称为 Borda-MULITIMOORA 法), 该方法同时考虑了评估值和序数两个维度, 避免了传统 MULTIMOORA 法的缺点.

step 3.1: 确定比率系统下的方案排序. 由 $y_i^* = \sum_{j=1}^{n} w_j\tilde{e}_{ij}^*$ 可得方案 A_i 的总体评价值 y_i^*，在此基础上, 通过式 $A_{\mathrm{RS}}^* = \{A_i|\max_i y_i^*\}$ 得到比率系统下的最优方案 A_{RS}^*.

step 3.2: 确定参考点系统下的方案排序. 方案 A_i 的最大偏差值 z_i^* 可由 $z_i^* = \max_j|w_j\max_i\tilde{e}_{ij}^* - w_j\tilde{e}_{ij}^*|$ 得到. 由式 $A_{\mathrm{RP}}^* = \{A_i|\min_i z_i^*\}$, 通过比较 z_i^*, 即可得到参考点系统中的最优方案 A_{RP}^*.

step 3.3: 确定完全乘法形式比值系统下的方案排序. 根据式 $A_{\mathrm{MF}}^* = \{A_i|\max_i u_i^*\}$, 通过比较 U_i^* 的值, 其中 $u_i^* = \prod_{j=1}^{n}(\tilde{e}_{ij}^*)^{w_j}$, 可以得到完全乘法形式比值系统中的最佳方案 A_{MF}^*.

step 3.4: 根据 Borda 法则对备选方案综合排序. 设 $r(y_i^*)$、$r(z_i^*)$ 和 $r(u_i^*)$ 分别为方案 A_i 在比率系统下、参考点系统下和完全乘法形式比值系统下的排名, 结合各系统下的评估值和排名序数, 可得方案 A_i 的综合评估值为

$$\mathrm{MB}_i^* = y_i^*\cdot\frac{m-r(y_i^*)+1}{m(m+1)/2} - z_i^*\cdot\frac{r(z_i^*)}{m(m+1)/2} + u_i^*\cdot\frac{m-r(u_i^*)+1}{m(m+1)/2}.$$

通过 $A_{\mathrm{MB}}^* = \{A_i|\max_i\mathrm{MB}_i^*\}$ 可得到最佳方案 A_{MB}^*.

3 算例分析

3.1 实例描述

2017年8月1日～4日,黑龙江发生连续强降雨,其中安达市累计雨量499.4 mm,超过历史最大月雨量. 暴雨造成农作物受灾171万亩,房屋倒塌172间,3.2亿元经济损失. 此外,安达市东湖水库面临险情,水库水位超过汛限水位71 cm,超设计洪水水位28 cm,溃坝的发生会直接威胁下游的6个村庄,人民群众的生命财产安全和生态环境将受到严重破坏. 东湖水库溃坝面临3种情况:堤坝完全破裂、堤坝部分破裂、堤坝不破裂,各情况发生的可能性依次增加,分别为10%、20%和70%. 为了能够快速采取有效的应急管理措施,来自水利、消防、应急管理、交通及医疗救助5个部门20名决策者$D = \{D_1, D_2, \ldots, D_{20}\}$迅速成立应急专案小组,针对东湖水库下游村庄人民制定应急疏散方案.

现有3种应急疏散备选方案:将4个村庄的居民撤离受威胁地区,并通知其余2个较远村庄的居民为撤离做准备(A_1);将2个核心区域的村庄的居民撤离受威胁地区,将另外2个村庄的居民撤离到高地,并通知其余2个较远村庄的居民为撤离做准备(A_2);立即将所有6个村庄的居民撤离到高地(A_3). 需要注意的是,当堤坝完全破损时,高地也同样会受到威胁. 针对以上应急方案,应急决策专案小组从3个属性$C = \{C_1, C_2, C_3\}$进行评价:死亡人数(C_1)、公众满意度(C_2)、财产损失(C_3),并需要尽快选定最佳应急方案.

3.2 决策过程

利用SFN-CFSFDP-Borda-MULTIMOORA模型对算例进行求解. 限于篇幅,这里只给出部分计算结果.

首先,对所有决策者评价矩阵进行标准化,计算决策者间的加权距离,通过确定方案$A_i (i = 1, 2, 3)$下的截断距离d_i^c对$d_w(\widetilde{E}_i^k, \widetilde{E}_i^s)$进行升序排列,可得$M$值为190,这里取$t = 0.01$,得到各方案下的截断距离分别为$d_1^c = 0.633, d_2^c = 0.688, d_3^c = 0.673$. 计算方案$A_i$下决策者$D_k (k = 1, 2, \ldots, 20)$的评价向量$\widetilde{E}_i^k$的局部密度$\rho_i^k$,以及各方案下决策者与高密度决策者评价向量间的相对距离. 令$\beta = 30$,可得到各决策者评价向量的局部密度和相对距离的分布情况,并最终得到方案A_1下的聚类结果为:$G_1^1 = \{D_7, D_{10}\}$, $G_1^2 = \{D_4, D_{12}, D_{13}, D_{14}, D_{15}, D_{18}\}$, $G_1^3 = \{D_1, D_2, D_3, D_5, D_6, D_8, D_9, D_{11}, D_{16}, D_{17}, D_{19}, D_{20}\}$; 方案$A_2$下的聚类结果为:$G_2^1 = \{D_1, D_2, D_3, D_8, D_{16}\}$, $G_2^2 = \{D_6, D_7, D_9, D_{11}, D_{15}\}$, $G_2^3 = \{D_5, D_{10}, D_{12}, D_{14}, D_{17}, D_{18}, D_{20}\}$, $G_2^4 = \{D_4, D_{13}, D_{19}\}$;方案$A_3$下的聚类结果为:$G_3^1 = \{D_1, D_3, D_6, D_8, D_{10}, D_{11}, D_{13}, D_{17}, D_{18}, D_{20}\}$, $G_3^2 = \{D_2, D_4, D_5, D_7, D_9, D_{12}, D_{14}, D_{15}, D_{16}, D_{19}\}$.

然后,计算决策者意见间的冲突度,得到各聚集的冲突度分别为:$\varphi_1^1 = 0.658, \varphi_1^2 = 0.841, \varphi_1^3 = 0.843$; $\varphi_2^1 = 0.843, \varphi_2^2 = 0.802, \varphi_2^3 = 0.828, \varphi_2^4 = 0.827$; $\varphi_3^1 = 0.867, \varphi_3^2 = 0.866$. 本例中,决策者$D_1$、$D_5$、$D_7$、$D_{15}$、$D_{18}$为各部门代表,被赋予更高的权重. 此外,为了在考虑决策者权重差异性同时兼顾全体决策者的评价信息,避免权威决策者对个体决策权的稀释,给出决策者的权重上下限为[0.0125, 0.2]. 设$\eta = 0.5$,由式(6)可得决策者最优权重为:$\{\omega^k\}_{k=1}^{20} = \{0.198, 0.013, 0.043, 0.052, 0.053, 0.013, 0.052, 0.043, 0.013, 0.040, 0.013, 0.040, 0.040, 0.040, 0.052, 0.032, 0.013, 0.200, 0.040, 0.013\}$. 利用式(7)计算最终聚集权重,得到$G_1^1 = 0.197, G_1^2 = 0.375, G_1^3 = 0.428$; $G_2^1 = 0.294, G_2^2 = 0.198, G_2^3 = 0.320, G_2^4 = 0.188$; $G_3^1 = 0.557, G_3^2 = 0.443$. 由式(8)将聚集内的评价值进行集结,计算各方案下的聚集评价矩阵;利用式(9),将聚集的评价值集结,得到各方案总体评价值为

$$\tilde{e}_{11}^* = \langle 0.273, 0.528, 0.193 \rangle,$$
$$\tilde{e}_{12}^* = \langle 0.216, 0.699, 0.167 \rangle,$$
$$\tilde{e}_{13}^* = \langle 0.250, 0.420, 0.275 \rangle,$$
$$\tilde{e}_{21}^* = \langle 0.313, 0.631, 0.154 \rangle,$$
$$\tilde{e}_{22}^* = \langle 0.277, 0.568, 0.209 \rangle,$$
$$\tilde{e}_{23}^* = \langle 0.133, 0.620, 0.229 \rangle,$$
$$\tilde{e}_{24}^* = \langle 0.308, 0.638, 0.170 \rangle,$$
$$\tilde{e}_{31}^* = \langle 0.298, 0.722, 0.157 \rangle,$$
$$\tilde{e}_{32}^* = \langle 0.389, 0.404, 0.266 \rangle.$$

最后,计算方案总体评价值为$y_1^* = \langle 0.259, 0.561, 0.189 \rangle$, $y_2^* = \langle 0.298, 0.614, 0.170 \rangle$, $y_3^* = \langle 0.310, 0.644, 0.170 \rangle$,比率系统下排序结果为$A_2 \succ A_1 \succ A_3$;计算方案最大偏差度为$z_1^* = 0.427, z_2^* = 0.296, z_3^* = 0.455$,参考点系统下排序为$A_2 \succ A_1 \succ A_3$;计算方案总体效用值得到$U_1^* = \langle 0.256, 0.561, 0.192 \rangle$, $U_2^* = \langle 0.292, 0.614, 0.174 \rangle$, $U_3^* = \langle 0.309, 0.644, 0.173 \rangle$,完全乘法形式比值系统下方案排序为$A_2 \succ A_1 \succ A_3$. 由此可得$\mathrm{MB}_1^* = 0.192, \mathrm{MB}_2^* = 0.454, \mathrm{MB}_3^* = -0.062$,方案最终排序结果为$A_2 \succ A_1 \succ A_3$,即方案$A_2$为最优方案.

3.3 结果分析

3.3.1 对比分析

为验证所提出方法的有效性,将本文模型(方法1)与Wang等[17]提出的基于距离聚类及调整系数的一致性方法(方法2)、齐淼等[18]提出的改进模糊C-均值聚类算法(方法3)、李武等[19]提出的基于平均差异度优选初始聚类中心的改进K-均值聚类算法(方法4)和Xu等[20]提出的基于相似度聚类的群体偏好一致性方法(方法5)进行比较,方法2的方案排序结果为$A_2 \succ A_1 \succ A_3$;方法3的方案排序结果为$A_3 \succ A_2 \succ A_1$;方法4的方案排序结果为$A_3 \succ A_2 \succ A_1$;方法5的方案排序结果为$A_1 \succ A_2 \succ A_3$.

由各方法排序结果可见,所提出模型得到的结果与方法2完全一致,表明SFN-CFSFDP-Borda-MULTIMOORA模型是有效的,但同时与其他3种方法有所不同,其原因在于:从现实角度而言,在黑龙江的溃坝突发事件中,堤坝部分破损的概率为20%,全部破损的概率为10%,溃坝事件发生概率均较低. 同时,相关政府部门也采取措施对堤坝进行加固,进一步防止溃坝的发生,因此村庄的全部疏散是没有必要的. 此外,由于村庄的位置不同,当溃坝发生时他们所受影响也是不同的. 方案A_2将核心区域的两个村庄的人撤离受威胁地区,避免了堤坝部分破损时造成的影响,将另外两个村庄的人撤离到高地并通知其余两个较远的村庄的人为撤离做准备,将不同情况下可能造成的损失最小化,且方案A_2相比方案A_1所需成本更低. 村民的人身安全是最为重要的,方案A_3将6个村庄的村民全部疏散至高地,不仅不能保证当堤坝完全破损时核心区域的两个村庄的安全,成本也更高. 此外,方案A_2与本案例实际采取的方案一致. 从数学模型角度看,方法3和方法4虽结果一致,但两者模型原理相同,其初始聚类中心数量和选择的任意性对聚类结果有极大影响,容易受极端偏好的影响. 相比而言,所提出的模型对于任意形状的聚集都可以准确识别,只考虑点与点之间的距离,不需要将点映射到一个向量空间中,在初始聚类中心的选择上有明确的指标,参数也较少,因此更为科学合理.

3.3.2 性能改进分析

重大突发事件下,应急决策方法的复杂度越低,决策效率越高,越有利于快速找出最佳应急方案. 上述5种方法中,方法1的时间复杂度为常数阶$O(1)$;方法2的时间复杂度为线性阶$O(n)$;方法3的时间复杂度为线性阶$O(nK)$;方法4的时间复杂度为线性阶$O(nK)$;方法5的时间复杂度为线性阶$O(n)$. 可见,所提出模型的时间复杂度为常数阶$O(1)$,且不存在循环结构;方法2的时间复杂度为线性阶$O(n)$,在该实例中需要3次循环;方法3和方法4时间复杂度均为线性阶$O(nK)$,受元素个数n和初始聚类中心个数K的影响,本实例中分别进行了3次与4次循环;方法5的时间复杂度为线性阶$O(n)$,在该算例中虽然也只进行了1次循环,但其受元素个数n影响,不同情况下进行迭代次数不同. 所提出模型的时间复杂度低于其他4种方法的原因主要在于:本文模型通过构建基于群体冲突的多目标优化模型实现了聚类和冲突协调过程的融合,降低了模型参数,且明确的聚类中心确定方式消除了复杂的迭代计算,适用性较强,同时避免了对评价信息的修改,更完整地保留了决策者的原始决策信息;方法2和方法5需先进行聚类,再根据相关系数与群体一致性阈值不断识别并修改聚集评价信息,直到群体一致性水平达到设定的阈值要求;方法3和方法4需要预先指定所需聚类的个数,对初始聚类中心的选择较为随意且敏感,因此对聚类结果和后续为实现冲突协调而进行的群体一致性达成过程中信息修改的次数有较大影响.

4 结 论

本文针对重大突发事件应急信息模糊、多群体参与及群体冲突存在的特点,提出并构建了一种决策者权重未知情形下基于大群体意见密度冲突融合下的大群体应急决策模型,并通过实例研究验证了模型的有效性. 相较于已有研究,所提出模型的主要优点如下:

1) 相比于其他模糊语言集,SFN从隶属、中立、非隶属3个维度表示决策者满意、中立、不满意的态度,充分描述了决策者的心理特征,还扩展了隶属程度取值范围,提升了信息处理能力,有利于更准确完整地表述重大突发不确定情境下的评价信息;

2) 考虑了决策群体中成员权重不一致的情况,提出了基于综合冲突优化模型的决策者权重确定模型,该模型扩展性高,并结合聚集规模和聚集内成员重要性两个指标对聚集权重进行调整,更加贴合实际情况;

3) 采用密度峰值快速搜索和查找理念进行大群体聚类,聚类中心的选择更明确,实现了聚集内部差异小、聚集间差异大的聚类效果,同时通过量化测度决策者间、聚集间和群体的综合冲突,构建群体冲突最小化多目标优化模型,可根据决策者地位、经验等对模型进行调整,灵活性较高,相比于其他冲突融合方法,实现了聚类和冲突协调过程的融合,避免了对

决策者原始信息的修改;

4) 相对性能更高,可以对任意大群体数据进行聚类,对异常离群值不敏感,不会受数据集分布的限制,聚类结果也没有偏倚,不会受初始聚类中心等的影响,较好地满足了高时间压力及不确定环境下大群体决策的要求.

参考文献(References)

[1] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353.

[2] Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96.

[3] Yager R R. Pythagorean membership grades in multicriteria decision making[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22(4): 958-965.

[4] Cuong B C. Picture fuzzy sets[J]. Journal of Computer Science and Cybernetics, 2015, 30(4): 409-420.

[5] Ashraf S, Abdullah S, Mahmood T, et al. Spherical fuzzy sets and their applications in multi-attribute decision making problems[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 36(3): 2829-2844.

[6] Ashraf S, Abdullah S, Mahmood T. Spherical fuzzy Dombi aggregation operators and their application in group decision making problems[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020, 11(7): 2731-2749.

[7] Ashraf S, Abdullah S, Aslam M, et al. Spherical fuzzy sets and its representation of spherical fuzzy t-norms and t-conorms[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 36(6): 6089-6102.

[8] 徐选华, 蔡晨光, 陈晓红. 基于区间模糊数的多阶段冲突型大群体应急决策方法[J]. 运筹与管理, 2015, 24(4): 9-15.
(Xu X H, Cai C G, Chen X H. A multi-stage conflict style large group decision-making emergency method based on interval fuzzy number[J]. Operations Research and Management Science, 2015, 24(4): 9-15.)

[9] 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 methods with incomplete values and different forms of preference information[J]. Statistics & Decision, 2017(21): 54-56.)

[10] 徐选华, 刘尚龙. 考虑时间序列的动态大群体应急决策方法[J]. 控制与决策, 2020, 35(11): 2609-2618.
(Xu X H, Liu S L. Dynamic large group emergency decision-making method considering time series[J]. Control and Decision, 2020, 35(11): 2609-2618.)

[11] Rodriguez A, Laio A. Clustering by fast search and find of density peaks[J]. Science, 2014, 344(6191): 1492-1496.

[12] Xu X H, Hou Y Z, He J S, et al. A two-stage similarity clustering-based large group decision-making method with incomplete probabilistic linguistic evaluation information[J]. Soft Computing, 2020, 24(22): 16869-16883.

[13] Xu Y J, Wen X W, Zhang W C. A two-stage consensus method for large-scale multi-attribute group decision making with an application to earthquake shelter selection[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 116: 113-129.

[14] Khan M J, Kumam P, Deebani W, et al. Distance and similarity measures for spherical fuzzy sets and their applications in selecting mega projects[J]. Mathematics, 2020, 8(4): 519.

[15] Brauers W K M, Zavadskas E K. Project management by multimoora as an instrument for transition economies[J]. Ukio Technologinis Ir Ekonominis Vystymas, 2010, 16(1): 5-24.

[16] Hafezalkotob A, Hafezalkotob A, Liao H C, et al. Interval Multimoora method integrating interval Borda rule and interval best-worst-method-based weighting model: Case study on hybrid vehicle engine selection[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 50(3): 1157-1169.

[17] Wang P, Xu X H, Huang S. An improved consensus-based model for large group decision making problems considering experts with linguistic weighted information[J]. Group Decision and Negotiation, 2019, 28(3): 619-640.

[18] 齐淼, 张化祥. 改进的模糊 C-均值聚类算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(20): 133-135.
(Qi M, Zhang H X. Research on modified fuzzy C-means clustering algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(20): 133-135.)

[19] 李武, 赵娇燕, 严太山. 基于平均差异度优选初始聚类中心的改进 K-均值聚类算法[J]. 控制与决策, 2017, 32(4): 759-762.
(Li W, Zhao J Y, Yan T S. Improved K-means clustering algorithm optimizing initial clustering centers based on average difference degree[J]. Control and Decision, 2017, 32(4): 759-762.)

[20] Xu X H, Cai C G, Chen X H, et al. A multi-attribute large group emergency decision making method based on group preference consistency of generalized interval-valued trapezoidal fuzzy numbers[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2015, 24(2): 211-228.

作者简介

丁雪枫 (1980−), 女, 副教授, 博士, 从事不确定性决策理论与方法、应急决策与风险管理、商业生态链管理等研究, E-mail: athena_tju@sina.com;

朱丽霞 (1996−), 女, 硕士生, 从事大群体决策、应急决策的研究, E-mail: zhulixia0117@qq.com.

(责任编辑：郑晓蕾)