CN 43-1258/TP
ISSN 1007-130X

计算机工程与科学
Computer Engineering & Science

第37卷第12期2015年12月
Vol. 37, No. 12, Dec. 2015

文章编号:1007-130X(2015)12-2405-06

考虑优先级的广义犹豫模糊信息集成方法*

杨建辉,阮传扬
(华南理工大学工商管理学院,广东 广州 510641)

摘　要:研究了在属性之间存在优先级的情况下的广义犹豫模糊信息集成问题。考虑到属性优先级以及属性元素的统一程度的双重影响,首先给出了犹豫模糊信息下的熵值求法,并在其基础上提出了优先级混合赋权方法。之后,在该优先级混合赋权方法的基础上提出了广义犹豫模糊优先级混合几何(GHF-PHG)算子,并给出了该类算子的优良特性。最后,利用案例验证了本文所提方法的实用性和有效性。

关键词:犹豫模糊集;多属性决策;广义犹豫模糊集成算子;优先级;熵值

中图分类号:C934　　**文献标志码:**A

doi:10.3969/j.issn.1007-130X.2015.12.032

Generalized hesitant fuzzy information aggregation method with prioritized levels

YANG Jian-hui, RUAN Chuan-yang
(School of Business Administration, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In this paper, we investigate the generalized hesitant fuzzy information aggregation issues in which the attributes are on different priority levels. Considering the impact of both attributes' priority levels and the dispersion degree of hesitant fuzzy elements, we first give the entropy based on hesitant fuzzy information, and propose a prioritized hybrid weighted method accordingly. Then, we put forward generalized hesitant fuzzy prioritized hybrid geometric (GHFPHG) operator based on the hybrid weighted method. Furthermore, we discuss some desirable properties of the proposed prioritized operator. Finally, the practicality and effectiveness of the proposed approach are verified by a practical example.

Key words: hesitant fuzzy sets; multiple attribute decision making; generalized hesitant fuzzy integration operator; priority level; entropy

1　引言

犹豫模糊集 HFS(Hesitant Fuzzy Set)是 Torra V[1] 在模糊集 FS(Fuzzy Set)基础上提出的一类广义模糊集,HFS 最大的特点是允许一个元素属于一个集合的隶属度可以同时出现几个不同的评价值,当决策小组针对某一个元素属于一个集合的隶属度不能达成一致意见时(也即呈现犹豫状态),犹豫模糊集能够有效地刻画这一现象,是一种非常有用的工具。在目前的大数据浪潮下,如何对大数据信息(尤其是犹豫模糊信息)进行识别和精简显得尤为重要。因此,信息集成方法引起了越来越多学者的关注。信息集成就是利用大量信息融合成少量信息的一个关键技术,特别是加入偏好信息的信息集成方法。Bedregal B[2] 详细研究了具有典型犹豫模糊现象的所有可能隶属水平的信息集成因子。Xia M M 和 Xu Z S[3] 在直觉模糊信息集成算子的基础上详细给出了犹豫模糊加权平均 HFWA(Hesitant Fuzzy Weighted Average)算子

* 收稿日期:2015-08-03;修回日期:2015-09-07
基金项目:广东省委省政府重点项目(N6131810);中央高校基本科研业务资助项目(Y6090020)
通信地址:510641 广东省广州市天河区华南理工大学工商管理学院
Address: School of Business Administration, South China University of Technology, Tianhe District, Guangzhou 510641, Guangdong, P. R. China

和犹豫模糊加权几何 HFWG(Hesitant Fuzzy Weighted Geometric)算子等犹豫模糊信息集成算子。针对属性值存在关联关系的情况,Xu Z S 和 Cai X Q[4]定义了区间幂均融合算子,并用区间值之间的支持程度来确定权重信息。Yager R R[5]对 Bonferroni 算子进行了讨论,并将有序加权平均 OWA(Ordered Weighted Average)和 Choquet 积分结合进来共同反映数据之间的内在联系。Wei G[6]和 Yu D J 等[7]在优先级集成 PA(Prioritized Aggregation)因子[8]的基础上提出了新的犹豫模糊优先级信息集成因子。

通过现有的文献资料不难发现,犹豫模糊信息集成算子中一个关键因素就是偏好信息的集成方法,信息的偏好侧重点各不相同,现有的反映偏好信息的方法主要是采用 Choquet 积分和优先级集成(PA)因子,而在信息集成中具体从属性自身信息量的多少以及离散程度出发,结合属性的优先级进行定权的方法截止目前还未见有所研究。基于此,本文从犹豫模糊信息出发,研究一种新的属性信息权重确定方法,即基于熵值的优先级混合加权方法。之后,在该优先级混合加权方法基础上提出一种广义犹豫模糊优先级混合几何 GHFPHG(Generalized Hesitant Fuzzy Prioritized Hybrid Geometric)算子,并讨论该类算子存在的特性。最后,利用应急预案评估的数值算例验证本文所提方法的可行性和优越性。

2 预备知识

著名数学以及控制理论专家 Zadeh L A[9]首次提出用隶属函数来表达不确定的信息,这一数学方法即为模糊集。犹豫模糊集是广义的模糊集,其特点是允许一个属性中同时出现多个可能的评价值。

定义 1[1,3] 若存在一个非空集合 $X=\{x_1, x_2,\cdots,x_n\}$,则犹豫模糊集即为从 $X=\{x_1,x_2,\cdots, x_n\}$ 到[0,1]的一个子集的函数,可以用如下数学公式表示:

$$E=\{\langle x,h_E(x)\rangle \mid x\in X\} \tag{1}$$

其中,$h_E(x)$ 表示隶属于[0,1]的几个可能的数的集合,$x\in X$ 表示在集合 E 中的隶属度。

定义 2[3] 若存在一个非空犹豫模糊集合 h,则 h 的得分函数为:

$$s(h)=\frac{1}{\sharp h}\sum\nolimits_{\gamma\in h}\gamma \tag{2}$$

其中,$\sharp h$ 为犹豫模糊集 h 中的元素个数。

假设存在两个非空犹豫模糊集 h_1 和 h_2,若 $s(h_1)>s(h_2)$,则 $h_1>h_2$,若 $s(h_1)=s(h_2)$,则 $h_1=h_2$。

根据犹豫模糊集的特性及其运算规则,Xia Mei-mei[10]给出了基于阿基米德 T 模和 S 模的犹豫模糊运算,规则如下:

定义 3[10] 假设 h、h_1 和 h_2 为三个犹豫模糊集,则:

(1) $\lambda h=\bigcup_{\gamma\in h}\{l^{-1}(\lambda l(\gamma))\}$;

(2) $h^{\lambda}=\bigcup_{\gamma\in h}\{k^{-1}(\lambda k(\gamma))\}$;

(3) $h_1\otimes h_2=\bigcup_{\gamma_1\in h_1,\gamma_2\in h_2}\{k^{-1}(k(\gamma_1)+k(\gamma_2))\}$;

(4) $h_1\oplus h_2=\bigcup_{\gamma_1\in h_1,\gamma_2\in h_2}\{l^{-1}(l(\gamma_1)+l(\gamma_2))\}$。

其中,$l(t)=k(1-t)$。

一个严格的阿基米德 T 模是由一个加性的发生器 k 产生的,Klement 定义为:$T(x,y)=k^{-1}(k(x)+k(y))$,$k:[0,1]\to[0,+\infty]$ 为严格递减的函数且 $k(1)=0$。由 $l(t)=k(1-t)$,则阿基米德 S 模可表示为 $S(x,y)=l^{-1}(l(x)+l(y))$。

3 广义犹豫模糊优先级混合集成算子

信息集成是犹豫模糊集理论的重点研究内容之一,但是大多数学者都是假定属性之间是独立的,并没有考虑属性之间的优先级关系。但是,在现实生活中,属性之间往往存在某种程度的优先级关系,并且犹豫模糊集元素的数量也会影响评价数据的可信程度。因此,本文提出一种既能考虑属性优先级又能同时考虑到犹豫模糊集中元素的离散程度的信息集成因子:广义犹豫模糊优先级混合几何(GHFPWG)算子。

3.1 基于熵值的优先级混合赋权方法

本文给出一种混合赋权方法,不仅可以考虑属性优先级,而且又能考虑到属性数据的统一程度。详细步骤如下[11,12]:

(1)评审专家组给出属性偏好信息,即属性优先级排序。

(2)通过计算第 j 项属性的熵值 e_j 来确定相邻优先级属性 x_j 与 x_{j+1} 重要性程度之比 r_j:

$$e_j=-k\sum_{s=1}^{p}w_{js}\ln w_{js} \tag{3}$$

$$r_j=\begin{cases}e_j/e_{j+1},e_j\geqslant e_{j+1}\\1,e_j<e_{j+1}\end{cases},j=1,2,\cdots,n-1 \tag{4}$$

其中，$w_{js}=x_{js}/\sum_{s=1}^{p}x_{js}$ 表示第 j 个属性的第 s 项犹豫模糊数的比重，$k>0$，ln 为自然对数，$e_j\geqslant 0$。如果第 j 项属性的数据全部相等，那么 $w_{js}=x_{js}/\sum_{s=1}^{p}x_{js}=1/p$，此时 e_j 最大，即 $e_j=-k\sum_{s=1}^{p}\frac{1}{p}\ln\frac{1}{p}=k\ln p$，若设 $k=1/\ln p$，于是有 $0\leqslant e_j\leqslant 1$，同时令 $r_n=1$。

对于第 j 项属性，属性内的犹豫模糊信息差异性越小，则 e_j 越大；当所有专家对第 j 项属性的评价数据全部相等时，此时专家意见高度统一，在犹豫模糊集中仅保留一个数据，则令 $e_j=e_{\max}=1$；当第 j 项属性的专家评价数据相差较大时，e_j 较小，该项属性的评价数据的可信程度较低，因此所起的作用也应当较小。

(3)根据给出的 r_j 值，按照属性优先级从高到低的顺序计算优先级排序在第 k 个属性的权重 t_k 为：

$$t_k=\frac{\prod_{j=k}^{n}r_j}{\sum_{k=1}^{n}\prod_{j=n-k+1}^{n}r_j} \tag{5}$$

3.2 广义犹豫模糊优先级混合几何(GHFPHG)算子

基于现有的犹豫模糊信息集成算子以及考虑属性优先级的熵值组合赋权方法，我们可以定义广义犹豫模糊优先级混合几何(GHFPHG)算子。

定义 4 设一组犹豫模糊数 $h_j(j=1,2,\cdots,n)$，且设 $GHFPHG:\Omega_n\to\Omega$，若

$$GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n)=h_1^{t_1}\otimes h_2^{t_1}\otimes\cdots\otimes h_n^{t_n} \tag{6}$$

其中，$t_j(j=1,2,\cdots,n)$ 表示第 j 个属性的基于熵值的优先级混合权重，且 $t_j\in[0,1]$，$\sum_{j=1}^{n}t_j=1$，则称 $GHFPHG$ 为广义犹豫模糊优先级混合几何算子。

根据犹豫模糊集的运算规则，可以得到如下的定理以及推论：

定理 1 设一组犹豫模糊数 $h_j(j=1,2,\cdots,n)$，则通过 $GHFPHG$ 算子集结后仍然为犹豫模糊数，且：

$$GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n)=h_1^{t_1}\otimes h_2^{t_1}\otimes\cdots\otimes h_n^{t_n}=\bigcup_{\gamma_j\in h_j}\left\{k^{-1}\left(\sum_{j=1}^{n}t_jk(r_j)\right)\right\} \tag{7}$$

其中，$t_j(j=1,2,\cdots,n)$ 表示第 j 个属性的基于熵值的优先级混合权重。

定理 2 若所有犹豫模糊数满足 $h_1=h_2=\cdots=h_n=h^*$，$t_j(j=1,2,\cdots,n)$ 表示第 j 个属性基于熵值的优先级混合权重，则有：

$$GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n)=h^* \tag{8}$$

推论 1 设一组最大的犹豫模糊数为 $h_j(j=1,2,\cdots,n)$，即 $h_j=h^*=\{1\}(j=1,2,\cdots,n)$，则：

$$GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n)=GHFPHG(h^*,h^*,\cdots,h^*)=\{1\} \tag{9}$$

推论 2 设一组最小的犹豫模糊数为 $h_j(j=1,2,\cdots,n)$，即 $h_j=h^*=\{0\}(j=1,2,\cdots,n)$，则：

$$GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n)=GHFPHG(h^*,h^*,\cdots,h^*)=\{0\} \tag{10}$$

定理 3 设一组犹豫模糊数 $h_j(j=1,2,\cdots,n)$，$t_j(j=1,2,\cdots,n)$ 表示第 j 个属性基于熵值的优先级混合权重，若 $\lambda>0$，则：

$$GHFPHG(\lambda h_1,\lambda h_2,\cdots,\lambda h_n)=\lambda GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n) \tag{11}$$

定理 4 设两组犹豫模糊数 $h_j(j=1,2,\cdots,n)$、$f_j(j=1,2,\cdots,n)$，$t_j(j=1,2,\cdots,n)$ 表示第 j 个属性基于熵值的优先级混合权重，则：

$$GHFPHG(h_1\otimes f_1,h_2\otimes f_2,\cdots,h_n\otimes f_n)=GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n)\otimes GHFPHG(f_1,f_2,\cdots,f_n) \tag{12}$$

推论 3 设一组犹豫模糊数 $h_j(j=1,2,\cdots,n)$，$t_j(j=1,2,\cdots,n)$ 表示第 j 个属性基于熵值的优先级混合权重，若 f 为一犹豫模糊数，则：

$$GHFPHG(h_1\otimes f,h_2\otimes f,\cdots,h_n\otimes f)=GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n)\otimes f \tag{13}$$

推论 4 设一组犹豫模糊数 $h_j(j=1,2,\cdots,n)$，$t_j(j=1,2,\cdots,n)$ 表示第 j 个属性基于熵值的优先级混合权重，若 f 为一犹豫模糊数且 $\lambda>0$，则：

$$GHFPHG(\lambda h_1\otimes f,\lambda h_2\otimes f,\cdots,\lambda h_n\otimes f)=\lambda GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n)\otimes f \tag{14}$$

定理 5 设一组犹豫模糊数 $h_j(j=1,2,\cdots,n)$，$t_j(j=1,2,\cdots,n)$ 表示第 j 个属性基于熵值的优先级混合权重，则：

$$GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n)\leqslant GHFPHA(h_1,h_2,\cdots,h_n) \tag{15}$$

假设赋予函数 k 具体的函数式，则会产生不同的情况：

情况 1 若 $k(t)=-\log(t)$，则 $GHFPHG$ 算子转化为：

$$GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n)=$$

$$t_1h_1\otimes t_2h_2\otimes\cdots\otimes t_nh_n=\prod_{j=1}^{n}r_j^{t_j} \quad (16)$$

其中,$t_j(j=1,2,\cdots,n)$ 表示第 j 个属性基于熵值的优先级混合权重。我们称这种形式的算子为犹豫模糊优先级混合几何 HFPHG(Hesitant Fuzzy Priorited Hybrid Geometric)算子。

情况 2 若 $k(t)=\log((2-t)/t)$,则 $GHFPHG$ 算子转化为:

$$GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n)=$$

$$t_1h_1\otimes t_2h_2\otimes\cdots\otimes t_nh_n=\frac{2\prod_{j=1}^{n}r_j^{t_j}}{\prod_{j=1}^{n}(2-r_j)^{t_j}+\prod_{j=1}^{n}r_j^{t_j}} \quad (17)$$

其中,$t_j(j=1,2,\cdots,n)$ 表示第 j 个属性基于熵值的优先级混合权重。我们称这种形式的算子为犹豫模糊爱因斯坦优先级混合几何 HFEPHG(Hesitant Fuzzy Einstein Prioritized Hybrid Geometric)算子。

情况 3 若 $k(t)=\log(\frac{\tau+(1-\tau)t}{t})$,则 $GHFPHG$ 算子转化为:

$$GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n)=$$

$$t_1h_1\otimes t_2h_2\otimes\cdots\otimes t_nh_n=$$

$$\frac{\tau\prod_{j=1}^{n}r_j^{t_j}}{\prod_{j=1}^{n}(1+(\tau-1)(1-r_j))^{t_j}+(\tau-1)\prod_{j=1}^{n}r_j^{t_j}} \quad (18)$$

其中,$t_j(j=1,2,\cdots,n)$ 表示第 j 个属性基于熵值的优先级混合权重。我们称这种形式的算子为犹豫模糊哈马克优先级混合几何 HFHPHG(Hesitant Fuzzy Hamacher Prioritized Hybrid Gometric)算子。特别地,当 $\tau=1$ 时,则 $HFHPHG$ 算子退化为情况 1 中的 $HFPHG$ 算子;当 $\tau=2$ 时,则 $HFHPHG$ 算子退化为情况 2 中的 $HFEPHG$ 算子。

4 基于 GHFPHG 算子的突发事件应急预案

某突发事件有五个应急预案 $A_j(j=1,2,3,4,5)$,决策小组拟从以下四个方面对其进行评价:G_1:处置的快速性,G_2:内容和费用的合理性,G_3:保障的充分性,G_4:广泛适用性。若评审专家组给出的属性重要程度如下:$G_1\succ G_2\succ G_3\succ G_4$。为了得到更加合理的结果,领导小组聘请了由高校的应急管理学者、政府机关的应急管理领域专家以及相关公司的应急管理专家组成的六人评审专家小组。六位专家 $E=\{e_1,e_2,e_3,e_4,e_5,e_6\}$ 分别对五个应急方案下的各个属性 $G_j(j=1,2,3,4)$ 进行评估,则每个方案所对应的每个属性的评估值都有 P 个数据,若出现相同数据仅保留一个,就组成了一个犹豫模糊决策矩阵 $\boldsymbol{H}=(h_{ij})_{m\times n}$。其中 $t_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$ 表示第 i 个方案第 j 个属性基于熵值的优先级混合权重,且 $t_{ij}\in[0,1]$,$\sum_{j=1}^{n}t_{ij}=1(i=1,2,\cdots,m)$。具体决策矩阵见表 1。

Table 1 Hesitant fuzzy decision making matrix

表 1 犹豫模糊决策矩阵

	G_1	G_2	G_3	G_4
A_1	{0.4, 0.5, 0.7}	{0.5, 0.8, 0.9}	{0.3, 0.7, 0.9}	{0.4,0.8}
A_2	{0.6,0.8}	{0.4, 0.6, 0.8}	{0.4, 0.6, 0.7,0.9}	{0.3, 0.5, 0.8}
A_3	{0.8}	{0.2, 0.3, 0.6,0.7}	{0.3,0.6}	{0.4,0.7}
A_4	{0.5, 0.6, 0.7}	{0.3,0.5}	{0.8,0.9}	{0.2, 0.4, 0.5}
A_5	{0.3, 0.5, 0.7,0.8}	{0.7}	{0.7,0.9}	{0.2, 0.4, 0.8,0.9}

Table 2 Attribute entropy matrix

表 2 属性熵值矩阵

	G_1	G_2	G_3	G_4
A_1	0.975 5	0.974 2	0.922 3	0.918 3
A_2	0.985 2	0.965 6	0.971 6	0.932 0
A_3	1.000 0	0.920 6	0.918 3	0.945 7
A_4	0.991 5	0.954 4	0.997 5	0.943 2
A_5	0.957 1	1.000 0	0.988 7	0.902 4

方法 1 为了得到最优应急预案,利用 $GHFPHG$ 算子且令 $k(t)=-\log(t)$ 构建了一种犹豫模糊优先级多属性决策方法,具体步骤如下:

步骤 1 首先利用公式(3)计算每个方案 $A_i\in A$ 关于每个属性 $G_j\in G$ 的评估值的熵值,构成熵值矩阵如表 2 所示,然后在熵值的基础上利用公式(5)计算基于熵值的优先级混合权重 $t_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$。

$$\boldsymbol{t}_{ij}=\begin{bmatrix}0.2574 & 0.2570 & 0.2433 & 0.2423\\0.2564 & 0.2513 & 0.2513 & 0.2411\\0.2662 & 0.2450 & 0.2444 & 0.2444\\0.2607 & 0.2510 & 0.2510 & 0.2373\\0.2570 & 0.2570 & 0.2541 & 0.2319\end{bmatrix}$$

步骤 2 若 $k(t)=-\log(t)$，则 $GHFPHG$ 算子转化为：

$$GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n)=$$
$$t_1h_1\otimes t_2h_2\otimes\cdots\otimes t_nh_n=\prod_{j=1}^{n}r_j^{t_j} \tag{19}$$

利用 $GHFPHG$ 算子集成犹豫模糊矩阵 $\boldsymbol{H}=(h_{ij})_{m\times n}$，得出应急预案 $A_i(i=1,2,\cdots,5)$ 的综合表现值 $h_i(i=1,2,\cdots,5)$。由于数据过多，本文仅以综合表现值 h_1 为例，其他类似。

$h_1=\{$0.395 0,0.467 2,0.418 3,0.494 8,0.456 2,0.539 6,0.445 7,0.527 2,0.472 0,0.558 4,0.514 7,0.608 9,0.459 4,0.543 4,0.486 5,0.575 5,0.530 6,0.627 6,0.485 4,0.574 2,0.514 1,0.608 1,0.560 6,0.663 1,0.547 7,0.647 9,0.580 1,0.686 2,0.632 6,0.748 3,0.564 5,0.667 8,0.597 9,0.707 3,0.652 0,0.771 3,0.516 0,0.610 4,0.546 5,0.646 5,0.596 0,0.704 9,0.582 3,0.688 7,0.616 7,0.729 4,0.672 5,0.795 4,0.600 1,0.709 9,0.635 6,0.751 9,0.693 1,0.819 9$\}$

步骤 3 根据犹豫模糊得分函数公式(见定义 2)计算 $h_i(i=1,2,\cdots,m)$ 的得分如下：

$s(h_1)=0.597\ 1,s(h_2)=0.600\ 0,s(h_3)=0.529\ 2,s(h_4)=0.515\ 5,s(h_5)=0.631\ 1$

由于 $s(h_5)>s(h_2)>s(h_1)>s(h_3)>s(h_4)$，则可选方案排序结果为：$A_5>A_2>A_1>A_3>A_4$，因此最优应急预案为 A_5。

方法 2 为了得到最优应急预案，若利用 $GHFPHG$ 算子且令 $k(t)=\log((2-t)/t)$ 构建了一种犹豫模糊优先级多属性决策方法，详细步骤如下：

步骤 1′ 见步骤 1；

步骤 2′ 由于 $k(t)=\log((2-t)/t)$，则 $GHFPHG$ 算子转化为：

$$GHFPHG(h_1,h_2,\cdots,h_n)=$$
$$t_1h_1\otimes t_2h_2\otimes\cdots\otimes t_nh_n=\frac{2\prod_{j=1}^{n}r_j^{t_j}}{\prod_{j=1}^{n}(2-r_j)^{t_j}+\prod_{j=1}^{n}r_j^{t_j}} \tag{20}$$

利用 $GHFPHG$ 算子集成犹豫模糊矩阵 $\boldsymbol{H}=(h_{ij})_{m\times n}$，得出应急预案 $A_i(i=1,2,\cdots,5)$ 的综合表现值 $h_i(i=1,2,\cdots,5)$。由于数据过多，本文仅以综合表现值 h_1 为例，其他类似。

$h_1=\{$0.396 6,0.489 9,0.528 5,0.477 5,0.583 0,0.626 0,0.420 6,0.517 8,0.557 8,0.505 0,0.614 1,0.658 2,0.463 1,0.566 6,0.608 8,0.553 0,0.667 8,0.713 8,0.456 2,0.558 8,0.600 6,0.545 3,0.659 2,0.705 0,0.482 8,0.589 1,0.632 2,0.575 1,0.692 4,0.739 1,0.529 5,0.641 6,0.686 8,0.627 0,0.749 3,0.797 5,0.475 0,0.580 2,0.623 0,0.566 4,0.682 7,0.729 2,0.502 4,0.611 2,0.655 2,0.596 9,0.716 4,0.763 8,0.550 2,0.664 8,0.710 7,0.649 9,0.774 1,0.822 9$\}$

步骤 3′ 根据犹豫模糊得分函数公式(见定义 2)计算 $h_i(i=1,2,\cdots,m)$ 的得分如下：

$s(h_1)=0.609\ 1,s(h_2)=0.609\ 2,s(h_3)=0.542\ 3,s(h_4)=0.530\ 1,s(h_5)=0.644\ 2$

由于 $s(h_5)>s(h_2)>s(h_1)>s(h_3)>s(h_4)$，则可选方案排序结果为：$A_5>A_2>A_1>A_3>A_4$，因此最优应急预案为 A_5。

方法 3 为了与现有方法进行对比，若本文采用文献[3]中的 HFHA 算子构建犹豫模糊多属性决策方法，假设权重数据已知且为方法 1 中所得权重，具体步骤如下：

步骤 1″ 采用方法 1 中的基于熵值的优先级混合权重 $t_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$。

步骤 2″ 由文献[3]可知 $HFHA$ 算子为：

$$HFHA(h_1,h_2,\cdots,h_n)=t_1h_1\oplus t_2h_2\oplus\cdots\oplus t_nh_n=$$
$$\bigcup_{\gamma_j\in h_j}(1-\prod_{j=1}^{n}(1-\gamma_j)^{t_j}) \tag{21}$$

利用 $HFHA$ 算子集成犹豫模糊矩阵 $\boldsymbol{H}=(h_{ij})_{m\times n}$，得出应急预案 $A_i(i=1,2,\cdots,5)$ 的综合表现值 $h_i(i=1,2,\cdots,5)$。由于数据过多，本文仅以综合表现值 h_1 为例，其他类似。

$h_1=\{$0.405 6,0.516 3,0.629 8,0.544 5,0.629 4,0.716 3,0.432 8,0.538 5,0.646 7,0.565 4,0.646 4,0.729 3,0.502 7,0.595 4,0.690 3,0.618 9,0.689 9,0.762 7,0.530 3,0.617 8,0.707 4,0.640 1,0.707 1,0.775 8,0.551 8,0.635 3,0.720 9,0.656 6,0.720 6,0.786 1,0.607 1,0.680 3,0.755 3,0.698 9,0.755 0,0.812 5,0.606 9,0.680 2,0.755 2,0.698 8,0.754 9,0.812 4,0.625 0,0.694 8,0.766 4,0.712 6,0.766 1,0.821 0,0.671 2,0.732 4,0.795 2,0.748 0,0.795 0,0.843 1$\}$

步骤 3″ 根据犹豫模糊得分函数公式(见定义 2)计算 $h_i(i=1,2,\cdots,m)$ 的得分如下：

$s(h_1)=0.675\ 9,s(h_2)=0.657\ 0,s(h_3)=0.612\ 6,s(h_4)=0.622\ 0,s(h_5)=0.709\ 7$

由于 $s(h_5)>s(h_1)>s(h_2)>s(h_4)>s(h_3)$，则可选方案排序结果为：$A_5>A_1>A_2>A_4>$

A_3,因此最优应急预案为 A_5 。

由以上结果可知,利用三种方法计算的最优应急预案全为 A_5,从具体排序结果可以发现本文所提方法主要优点如下:

(1)在 *GHFPHG* 算子中,当 $k(t)$ 取不同的形式时,对决策结果并没有显著影响,排序结果完全相同,证明 *GHFPHG* 算子具有稳定性的特征。

(2)文献[3]仅仅考虑了属性信息大小的影响,与之相比,本文不仅考虑了属性之间的优先级关系,而且也考虑了属性数据的统一程度,因此具有良好的区分度。

(3)当选择不同的集成算子时,即 *HFHA* 和 *GHFPHG* 算子,若两个方案的得分非常接近时,由两个集成算子所得到的结果会有微小差别,也即侧重点不同。现有的 *HFHA* 算子要求必须事先有权重数据且侧重于群体决策,而 *GHFPHG* 算子可以直接利用基于熵值的优先级混合赋权方法得出客观权重数据,主要侧重于个体决策,决策者可以根据个人偏好进行选择。在属性权重信息不明确的情况下,利用本文提出的 *GHFPHG* 算子对犹豫模糊信息进行信息集成,计算操作相对简单、科学,可以有效地对候选方案进行抉择。

5 结束语

本文研究了在属性之间存在优先级的前提下的广义犹豫模糊信息集成问题。为了对多属性决策中的犹豫模糊信息进行区别和集成,本文首先提出了基于熵值的优先级混合赋权方法,新赋权方法同时考虑到了属性优先级以及属性元素的离散程度的双重影响,较好体现了犹豫模糊信息间的内在联系。其次,在优先级混合赋权方法的基础上提出了 *GHFPHG* 算子,该类算子的特点是将属性优先级跟属性评价信息的统一程度有机地融合在一起。最后,本文利用该类算子构建了在属性具有优先级的条件下的广义犹豫模糊多属性决策方法,并用应急预案评估的数值案例验证了本文所提方法的实用性和有效性。

参考文献:

[1] Torra V. Hesitant fuzzy sets[J]. International Journal of Intelligent Systems,2010,25(6):529-539.

[2] Bedregal B,Reiser R,Bustince H,et al. Aggregation functions for typical hesitant fuzzy elements and the action of automorphisms[J]. Information Sciences,2014,255:82-99.

[3] Xia M M,Xu Z S. Hesitant fuzzy information aggregation in decision making[J]. International Journal of Approximate Reasoning,2011,52(3):395-407.

[4] Xu Z S,Cai X Q. Uncertain power average operators for aggregating interval fuzzy preference relations[J]. Group Decision and Negotiation,2012,21(3):381-397.

[5] Yager R R. On generalized Bonferroni mean operators for multi-criteria aggregation[J]. International Journal of Approximate Reasoning,2009,50(8):1279-1286.

[6] Wei G. Hesitant fuzzy prioritized operators and their application to multiple attribute decision making[J]. Knowledge-Based Systems,2012,31:176-182.

[7] Yu D J,Zhang W Y,Xu Y J. Group decision making under hesitant fuzzy environment with application to personnel evaluation[J]. Knowledge-Based Systems,2013,32:1-10.

[8] Yager R R. Prioritized aggregation operators[J]. International Journal of Approximate Reasoning,2008,48(1):263-274.

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

[10] Xia Mei-mei. Research on fuzzy decision making information aggregation techniques and measures[D]. Nanjing:Southeast University,2012.(in Chinese)

[11] Li Gang. The science and technology evaluation model and its empirical research based on entropy-revised G1 combination weighting[J]. Soft Science,2010,24(5):31-36.(in Chinese)

[12] Ruan C Y,Yang J H. Software quality evaluation model based on weighted mutation rate correction incompletion G1 combination weights[J]. Mathematical Problems in Engineering,2014(2014),Article ID 541292.

附中文参考文献:

[10] 夏梅梅. 模糊决策信息集成方式及测度研究[D]. 南京:东南大学,2012.

[11] 李刚. 基于熵值修正 G1 组合赋权的科技评价模型及实证[J]. 软科学,2010,24(5):31-36.

作者简介:

杨建辉(1960 -),男,广东广州人,博士后,教授,研究方向为管理决策。**E-mail**:bmjhyang@scut.edu.cn

YANG Jian-hui, born in 1960, post doctor, professor, his research interest includes management decision-making.