文章编号: 2095-2163(2019)06-0229-05 中图分类号: O159 文献标志码: A

区间值犹豫模糊多属性决策方法在 WSN 路由安全评估中的应用

付 伟, 丁云鸿, 刘明宇, 林 琳, 石晔琼
(哈尔滨师范大学 计算机科学与信息工程学院, 哈尔滨 150025)

摘 要: 无线传感器网络,作为一种可以进行信息收集、处理、发送的集成网络,将现实世界与信息世界相连,极大地改变了人与自然的交流途径。无线传感器网络具有广泛潜在的应用领域,如工业,农业,军事,环境监测,生物医学,城市管理和灾难救助等。具有区间值犹豫模糊信息的无线传感器网络路由安全性评估问题,需要多属性决策来解决。在本文中,通过引入区间值犹豫模糊信息扩展了 ELECTRE 方法,提出改进的 ELECTRE 方法来解决多属性决策问题。最后给出了评估无线传感器网络路由安全性的实例,证明了所提供方法的实用性和有效性。

关键词: ELECTRE 方法; 多属性决策; 区间值犹豫模糊集; 无线传感器网络路由; 安全性评估

A method for interval-valued hesitant fuzzy multiple attribute decision making and their application in wireless sensor network

FU Wei, DING Yunhong, LIU Mingyu, LIN Lin, SHI Yeqiong
(College of Computer Science and Information Engineering, Harbin Normal University, Harbin, China)

【Abstract】 Wireless sensor network, as an integrated network which can perform information gathering, processing and delivering, can connect the real world and logistic information world. It greatly changes the interaction between people and nature. There are wide potential applications for wireless sensor network, such as industry, agriculture, military affairs, environment monitoring, biomedicine, city managing and disaster succoring. The problem of evaluating the security of wireless sensor network route with interval-valued hesitant fuzzy information is the multiple attribute decision making. In this paper, we extend the ELECTRE method to take into account interval-valued hesitant fuzzy information and propose the improved ELECTRE method to solve the multiple attribute decision making problems. Finally, a practical example for evaluating the wireless sensor network route security is given to verify the developed approach and to demonstrate its practicality and effectiveness.

【Key words】 ELECTRE method; multiple attribute decision making; interval-valued hesitant fuzzy set; wireless sensor network route; security evaluation

0 引 言

无线传感器网络利用集成的微型传感器来协作,监视和收集各种对象和环境信息。无线传感器网络使用嵌入式系统处理信息和传输已处理的信息,并以自组织、多跳方式,通过无线自组织网络向用户终端提供数据,将逻辑信息世界和现实世界相交融,改变了人与自然交互的形式,在军事、环境科学、医疗卫生、太空探索、自动化工业和农业上有广泛的应用前景。通常情况,无线传感器都被部署在无人看守的地方,甚至一些敌对地区,且传感器节点使用无线方式相互通信,节点的计算、存储、通信和电池容量都非常有限,因此无线传感器网络容易受到各种恶意攻击。

基于区间值模糊信息的无线传感器网络路由安全性评价问题是一个多属性决策问题[1-16],是解决多属性决策问题(multi - attribute decision making, MADM)的重要方法。其概念源于现实世界应用中关于一致性、不一致性和超越性。与其它方法相比,ELECTRE 方法能够使用更复杂的算法来处理来自决策问题的复杂和不精确的信息,并使用这些算法排列替代品。该方法使用一致性和不一致性指数,通过决策图来分析备选方案之间的排名关系。一般来说,很多现实世界 MADM 问题发生在复杂的环境中,通常存在不精确的数据和不确定性。区间值犹豫模糊集可以处理决策者对属性替代方案判断模糊不清的问题,可以根据决策者的意见准确而完美地描述问题。在本文中,通过引入区间值犹豫模糊信息扩展了 ELECTRE 方法,提出 IVHF-ELECTRE 方法来解决 MADM 问题。最后,提出评估无线传感器网络路由安全性的实例,验证 IVHF-ELECTRE 方法并证明其实用性和有效性。

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12531205)。
作者简介: 付 伟(1979-),男,硕士,副教授,主要研究方向:人工智能、DTN 网络。
收稿日期: 2019-09-08

1 预备知识

在许多实际情况中,通常存在不完整和不确定的信息,而且决策者不能轻易地对候选人做出准确而清晰的判断。因此,与真实数字相比,区间值模糊集更适合进行模拟现实生活中的决策问题。Chen[17]、Wei[18]和Zhao[19]分别提出了基于犹豫模糊集的区间值犹豫模糊集。

定义 1 设 X 是一组固定集,X 的区间值犹豫模糊集($IVHFS$)是每个 x 在 X 中的函数,并返回间隔值的子集[0,1]中。

为了便于理解,用数学符号表达 IVHFS:

$$E = \{ < x,\tilde{h}_{E(x)} > \mid x \in X\}, \tag{1}$$

其中;$\tilde{h}_{E(x)}$ 为区间[0,1]中值的集合,表示 $x \in X$ 对集合 E 的可能归属度。简单来说,将 $\tilde{h}_{E(x)} = \tilde{h} = [\gamma^L,\gamma^R]$ 称为区间值犹豫模糊元(IVHFE),$\tilde{h}$ 为所有 IVHFEs 的集合。给定 3 个 IVHFEs 值 $\tilde{h}$、$\tilde{h}_1$ 和 $\tilde{h}_2$,将其运算定义为:

(1) $\tilde{h}^{\lambda} = \cup_{\gamma \in \tilde{h}}\{[(\gamma^L)^{\lambda},(\gamma^R)^{\lambda}]\}$;

(2) $\lambda\tilde{h}^{\lambda} = \cup_{\gamma \in \tilde{h}}\{[1-(1-\gamma^L)^{\lambda},1-(1-\gamma^R)^{\lambda}]\}$;

(3) $\tilde{h}_1 \oplus \tilde{h}_2 = \cup_{\gamma_1 \in \tilde{h}_1,\gamma_2 \in \tilde{h}_2}\{[\gamma_1{}^L + \gamma_2{}^L - \gamma_1{}^L\gamma_2{}^L,\gamma_1{}^R + \gamma_2{}^R - \gamma_1{}^R\gamma_2{}^R]\}$;

(4) $\tilde{h}_1 \otimes \tilde{h}_2 = \cup_{\gamma_1 \in \tilde{h}_1,\ \gamma_2 \in \tilde{h}_2}\{[\gamma_1^L\gamma_2^L,\gamma_1^R\gamma_2^R]\}$。

为了比较 IVHFEs,定义了以下比较定律:

定义 2 对于 IVHFE $\tilde{h}$,$s(\tilde{h}) = \left[\dfrac{\sum_{\gamma \in \tilde{h}}\gamma^L}{\#\tilde{h}},\dfrac{\sum_{\gamma \in \tilde{h}}\gamma^R}{\#\tilde{h}}\right]$ 称为 h 的得分函数,其中:$\#\tilde{h}$ 是 $\tilde{h}$ 中元素的个数。因此,将 $\tilde{h}_1$ 与 $\tilde{h}_2$ 的比较定义为:

(1)如果 $s(\tilde{h}_1) > s(\tilde{h}_2)$,则 $\tilde{h}_1 > \tilde{h}_2$;

(2)如果 $s(\tilde{h}_1) \geqslant s(\tilde{h}_2)$,则 $\tilde{h}_1 \geqslant \tilde{h}_2$。

$s(\tilde{h})$ 是区间模糊值数,可以利用区间值的可能性程度来比较区间值变量。

定义 3 设 $A = [a_1,a_2]$ 和 $B = [b_1,b_2]$ 是两个区间范围,令 $len(A) = a_2 - a_1$,$len(B) = b_2 - b_1$,则 $A \geqslant B$ 的可能性程度定义为:

$$p(A \geqslant B) = \frac{\mathrm{Max}\{0,len(A) + len(B) - \mathrm{Max}(b_2 - a_1,0)\}}{len(A) + len(B)}, \tag{2}$$

定义 4 设 $\tilde{h}_1$ 和 $\tilde{h}_2$ 为 $X = \{x_1,x_2,\ldots,x_n\}$ 上的两个 IVHFSs,则 $\tilde{h}_1$ 和 $\tilde{h}_2$ 之间犹豫归一化的距离测度定义为:

$$\| \widetilde{h_1} - \widetilde{h_2} \| = \frac{1}{2l}\sum_{j=1}^{l}(\mid \tilde{h}^L_{1\sigma(j)} - \tilde{h}^L_{2\sigma(j)} \mid + \mid \tilde{h}^U_{1\sigma(j)} - \tilde{h}^U_{2\sigma(j)} \mid). \tag{3}$$

$l(\tilde{h})$ 是 $\tilde{h}$ 的区间数,大多数情况下 $l(\tilde{h}_1) \neq l(\tilde{h}_2)$,为方便起见,设 $l = \max\{l(\tilde{h}_1),l(\tilde{h}_2)\}$,其中:$l(\tilde{h}_1)$ 和 $l(\tilde{h}_2)$ 分别为 IVHFEs $\tilde{h}_1$ 和 $\tilde{h}_2$ 中的区间数,根据可能性度公式将区间值按任意顺序排列。

2 区间值犹豫模糊 ELECTRE 方法

设构造一个犹豫模糊决策矩阵,其元素是 IVHFEs,由于满足属性 P_j 的备选 A_i 的隶属度,可能来自几个不同区间值之间的一个疑问所致,因此得到犹豫模糊决策矩阵 $\tilde{\boldsymbol{h}}_{ij} = (\tilde{\boldsymbol{h}}_{E(x)})_{ij}$。区间值犹豫模糊信息的 ELECTRE 方法由以下步骤组成:

步骤 1 利用得分函数的概念和可能性程度公式计算一致性和不一致性集合。一致性集合由以下所有属性组成,其中 A_k 优先于 A_l。使用上述概念的索引集 C_{kl} 可以表述为:

$$CP(j)_{kl} = \{p(s(\tilde{h}_{kj}) \geqslant s(\tilde{h}_{lj})) \mid \tilde{h}_{kj} \geqslant \tilde{h}_{lj};k,l = 1,2,\ldots,m,j = 1,2,\ldots,n\}, \tag{4}$$

其中:$CP(j)_{kl}$ 表示 A_k 优先于 A_l 的可能性程度。$CP(j)_{kl}$ 越大,$HFEs$ 值越大。

不一致性集合由 A_k 不优于 A_l 的所有属性组成。使用上述概念的不一致性集合 D_{kl} 可以表述为:

$$DP(j)_{kl} = \{p(s(\tilde{h}_{kj}) < s(\tilde{h}_{lj})) \mid \tilde{h}_{kj} < \tilde{h}_{lj};k,l = 1,2,\ldots,m,j = 1,2,\ldots,n\}. \tag{5}$$

其中:$DP(j)_{kl}$ 表示 A_k 不优于 A_l 的可能性程度。该公式还使用了相同的概念,即得分越大,IVHFEs 值越大,准确度越高,犹豫度越低。

步骤 2 使用一致性和不一致性集合的概念来计算一致性和不一致性矩阵。

每对备选方案明智比较的一致性矩阵定义为:

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} - & g_{12} & \cdots & \cdots & g_{1m} \\ g_{21} & - & g_{23} & \cdots & g_{2m} \\ \cdots & \cdots & - & \cdots & \cdots \\ g_{(m-1)1} & \cdots & \cdots & - & g_{(m-1)m} \\ g_{m1} & g_{m2} & \cdots & g_{m(m-1)} & - \end{bmatrix}, \tag{6}$$

其中，$g_{kl}=\sum_{j=1}^{n}CP_{kl}{}^{j}\times w_j$，且 g_{kl} 值越高，说明 A_k 越优先于 A_l。

不协调矩阵定义为：

$$R=\begin{bmatrix} - & r_{12} & \cdots & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & - & r_{23} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & - & \cdots & \cdots \\ r_{(m-1)1} & \cdots & \cdots & - & r_{(m-1)m} \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{m(m-1)} & - \end{bmatrix},\quad(7)$$

其中，$r_{kl}=\dfrac{\max_j\{DP_{kl}^{j}\times\|h_{kj}-h_{lj}\|\}}{\max_j\|h_{kj}-h_{lj}\|}$，且 r_{kl} 值越高，说明 A_k 比 A_l 更不利。

步骤 3　基于最小一致性和最小不一致性实现布尔矩阵 $\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{E}$。

布尔矩阵 $\boldsymbol{B}$ 是根据最小一致性和 $\bar{G}$ 组成如下：

$$B=\begin{bmatrix} - & b_{12} & \cdots & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & - & b_{23} & \cdots & b_{2m} \\ \cdots & \cdots & - & \cdots & \cdots \\ b_{(m-1)1} & \cdots & \cdots & - & b_{(m-1)m} \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{m(m-1)} & - \end{bmatrix},\quad(8)$$

其中，$\begin{cases} g_{kl}\geqslant\bar{G}\Leftrightarrow b_{kl}=1 \\ g_{kl}<\bar{G}\Leftrightarrow b_{kl}=0 \end{cases}$，$\bar{G}=\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}g_{kl}/m(m-1)$ 可定义为一致性矩阵中各元素的平均值。

布尔矩阵 $\boldsymbol{E}$ 由最小不一致性水平测量：

$$E=\begin{bmatrix} - & e_{12} & \cdots & \cdots & e_{1m} \\ e_{21} & - & e_{23} & \cdots & e_{2m} \\ \cdots & \cdots & - & \cdots & \cdots \\ e_{(m-1)1} & \cdots & \cdots & - & e_{(m-1)m} \\ e_{m1} & e_{m2} & \cdots & e_{m(m-1)} & - \end{bmatrix},\quad(9)$$

其中，$\begin{cases} r_{kl}<\bar{R}\Leftrightarrow e_{kl}=1 \\ r_{kl}\geqslant\bar{R}\Leftrightarrow e_{kl}=0 \end{cases}$，$\bar{R}=\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}r_{kl}/m(m-1)$，可定义为一致性矩阵中各元素的平均值。

步骤 4　通过矩阵 $\boldsymbol{B}$ 和矩阵 $\boldsymbol{E}$ 元素的点对点乘法构造全局矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 如下：

$$\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{B}\otimes\boldsymbol{E}.\quad(10)$$

其中：矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 的每个元素（z_{gf}）都表示为 $\boldsymbol{Z}_{kl}=b_{kl}e_{kl}$。

步骤 5　创建决策图。该决策图从大量不精确的数据中推导出来，可以看出哪种选择是可取的，哪种选择是无可比拟的，哪种选择是无差异的。

步骤 6　按优先顺序排序。

3　数值分析实例

无线传感器网络作为执行信息收集、处理和传递的集成网络，可以连接现实世界和信息世界。对改变人与自然之间的交互发挥了巨大作用。无线传感器网络在很多领域有宽广的潜在使用价值，如工业、农业、军事事务、环境监测、生物医学、城市管理和灾难救助。在此给出了一个数值分析实例，来说明本文提出的方法。假设一个公司计划评估无线传感器网络路由的安全性。有一个包含 5 个可能的计算机网络系统 $A_i(i=1,2,3,4,5)$ 的面板可供选择。公司选择 4 个属性来评估 5 种可能的计算机网络系统：G_1 是策略；G_2 是技术；G_3 是经济；G_4 是物流和战略。为了避免决策者之间的相互影响，要求决策者提供匿名偏好，决策矩阵 $H=(h_{il})_{m\times n}$ 见表 1。

其中：$h_{ij}(i=1,2,3,4,5;\ j=1,2,3,4)$ 以 IVHFEs 的形式表示。

表 1　区间值犹豫模糊决策矩阵

Tab. 1　Interval-alued hesitant fuzzy decision matrix

	G_1	G_2
A_1	{[0.4,0.6],[0.3,0.5],[0.2,0.4]}	{[0.8,1],[0.7,0.9],[0.6,0.8],[0,0.2]}
A_2	{[0.4,0.6],[0.2,0.4]}	{[0.8,1],[0.6,0.8],[0.5,0.7],[0.4,0.6],[0.1,0.3]}
A_3	{[0.6,0.8],[0.5,0.7]}	{[0.8,1],[0.5,0.7]}
A_4	{[0.7,0.9],[0.6,0.8],[0.3,0.5],[0.2,0.4]}	{[0.6,0.8],[0.3,0.5],[0.1,0.3]}
A_5	{[0.8,1],[0.6,0.8],[0.5,0.7],[0.2,0.4],[0,0.2]}	{[0.7,0.9],[0.6,0.8],[0.5,0.7],[0.3,0.5]}

	G_3	G_4
A_1	{[0.4,0.6],[0.3,0.5],[0.1,0.3]}	{[0.8,1],[0.5,0.7],[0.4,0.6],[0.2,0.4]}
A_2	{[0.7,0.9],[0.5,0.7],[0.4,0.6],[0,0.2]}	{[0.6,0.8],[0.2,0.4],[0.3,0.5]}
A_3	{[0.6,0.8],[0.4,0.6],[0.2,0.4]}	{[0.5,0.7],[0.3,0.5]}
A_4	{[0.7,0.9],[0,0.2]}	{[0.8,1],[0.7,0.9],[0.5,0.7]}
A_5	{[0.8,1],[0.7,0.9],[0.6,0.8]}	{[0.8,1],[0.6,0.8],[0.5,0.7],[0.2,0.4]}

使用 IVHF-ELECTRE 方法解决这个示例,需要经过以下步骤:

步骤 1 利用得分函数的概念和可能性程度公式计算一致集和不一致集。一致集应用公式(4)得到:

$$CP(1)=\begin{bmatrix}0.500&0.500&0.000&0.125&0.200\\0.500&0.500&0.000&0.125&0.200\\1.000&1.000&0.500&0.750&0.825\\0.875&0.875&0.250&0.500&0.575\\0.800&0.800&0.175&0.425&0.500\end{bmatrix}$$

$$CP(2)=\begin{bmatrix}0.500&0.613&0.188&0.979&0.500\\0.388&0.500&0.075&0.867&0.388\\0.813&0.925&0.500&1.000&0.813\\0.021&0.133&0.000&0.500&0.021\\0.500&0.613&0.188&0.979&0.500\end{bmatrix}$$

$$CP(3)=\begin{bmatrix}0.500&0.167&0.167&0.292&0.000\\0.833&0.500&0.500&0.625&0.000\\0.833&0.500&0.500&0.625&0.000\\0.708&0.375&0.375&0.500&0.000\\1.000&1.000&1.000&1.000&0.500\end{bmatrix}$$

$$CP(4)=\begin{bmatrix}0.500&0.771&0.688&0.021&0.375\\0.229&0.500&0.417&0.000&0.104\\0.313&0.583&0.500&0.000&0.188\\0.979&1.000&1.000&0.500&0.854\\0.625&0.896&0.813&0.146&0.500\end{bmatrix}$$

不一致集应用公式(5)得到:

$$DP(1)=\begin{bmatrix}0.500&0.500&1.000&0.875&0.800\\0.500&0.500&1.000&0.875&0.800\\0.000&0.000&0.500&0.250&0.175\\0.125&0.125&0.750&0.500&0.425\\0.200&0.200&0.825&0.575&0.500\end{bmatrix}$$

$$DP(2)=\begin{bmatrix}0.500&0.388&0.813&0.021&0.500\\0.613&0.500&0.925&0.133&0.613\\0.188&0.075&0.500&0.000&0.188\\0.979&0.867&1.000&0.500&0.979\\0.500&0.388&0.813&0.021&0.500\end{bmatrix}$$

$$DP(3)=\begin{bmatrix}0.500&0.833&0.833&0.708&1.000\\0.167&0.500&0.500&0.375&1.000\\0.167&0.500&0.500&0.375&1.000\\0.292&0.625&0.625&0.500&1.000\\0.000&0.000&0.000&0.000&0.500\end{bmatrix}$$

$$DP(4)=\begin{bmatrix}0.500&0.229&0.313&0.979&0.625\\0.771&0.500&0.583&1.000&0.896\\0.688&0.417&0.500&1.000&0.813\\0.021&0.000&0.000&0.500&0.146\\0.375&0.104&0.188&0.854&0.500\end{bmatrix}$$

步骤 2 计算一致性矩阵和不一致性矩阵。

计算一致性矩阵:

$$\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}-&0.562&0.330&0.378&0.311\\0.438&-&0.268&0.404&0.183\\0.670&0.732&-&0.538&0.433\\0.622&0.596&0.463&-&0.391\\0.689&0.817&0.567&0.609&-\end{bmatrix}$$

计算不一致矩阵:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}-&0.833&1.000&0.565&1.000\\0.514&-&1.000&1.000&1.000\\0.463&0.268&-&0.859&1.000\\0.979&0.693&1.000&-&1.000\\0.200&0.189&0.558&0.171&-\end{bmatrix}$$

步骤 3 根据最小一致性程度和最小不一致性程度获得布尔矩阵 $\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{E}$。

布尔矩阵 $\boldsymbol{B}$ 是根据最小的一致性水平 $\overline{G}$ 得到:

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}-&1&0&0&0\\0&-&0&0&0\\1&1&-&1&0\\1&1&0&-&0\\1&1&1&1&-\end{bmatrix}$$

布尔矩阵 $\boldsymbol{E}$ 由最小不一致水平衡量:

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}-&0&0&1&0\\1&-&0&0&0\\1&1&-&0&0\\0&1&0&-&0\\1&1&1&1&-\end{bmatrix}$$

步骤 4 通过元素点对点乘法,由矩阵 $\boldsymbol{B}$ 和矩阵 $\boldsymbol{E}$ 构造全局矩阵 $\boldsymbol{Z}$, 如下:

$$\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{B}\otimes\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}-&0&0&0&0\\0&-&0&0&0\\1&1&-&0&0\\0&1&0&-&0\\1&1&1&1&-\end{bmatrix}$$

步骤 5 创建决策图,是由大量不精确的数据推导而来的,显示了哪一种选择更好,无可比拟的或无差异的。因此, 优先选择 A_5。

4 结束语

无线传感器网络作为可以进行信息收集、处理和传递的集成网络,可以连接现实世界和逻辑信息世界,正在改变人与自然的相互作用。无线传感器网络在很多领域有宽广的潜在使用价值,如工业、农业、军事、环境监测、生物医学、城市管理和灾难救助。具有区间值犹豫模糊信息的无线传感器网络路由安全评估性问题属于多属性决策问题的范畴。ELECTRE 方法在解决 MADM 问题时发挥了重要作用,其原理是源于现实世界应用的关于一致性、不一致性和超越的概念。很多现实世界的 MADM 问题发生在复杂的环境中,通常会有数据不准确性和不确定性。区间值犹豫模糊集可以处理决策者对属性替代方案的判断的模糊性,可以根据决策者的意见准确、完美地描述不确定性问题。本文通过引入区间值犹豫模糊信息扩展了 ELECTRE 方法,提出 IVHF-ELECTRE 方法来解决 MADM 问题。最后,给出了一个实际的例子评估无线传感器网络路由安全性,以验证所开发的方法并证明其实用性和有效性。

参考文献

[1] CHEN Q, XU Z S, LIU S S, et al. A Method Based on Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Entropy for Multiple Attribute Decision Making[J]. Information-an International Interdisciplinary Journal, 201, 13(1):67-77

[2] CHEN T Y. An outcome-oriented approach to multicriteria decision analysis with intuitionistic fuzzy optimistic/pessimistic operators[J]. Expert Systems with Applications, vol. 37, no. 12, pp. 7762-7774, 2010.

[3] CHEN T Y. A comparative analysis of score functions for multiple criteria decision making in intuitionistic fuzzy settings[J]. Information Sciences, 2011, 181(17): 3652-3676.

[4] CHEN T Y. Bivariate models of optimism and pessimism in multi-criteria decision-making based on intuitionistic fuzzy sets[J]. Information Sciences, 2011, 1(181):, pp. 2139-2165.

[5] ATANASSOV K, GARGOV G. Interval-valued intuitionistic fuzzy sets, Fuzzy Sets and Systems, 1090. 31(5): 343-349.

[6] XU Z S. Approaches to multiple attribute group decision making based on intuitionistic fuzzy power aggregation operators, [J] Knowledge-Based Systems, 2011, 24(6):749-760.

[7] XU Z S, CAI X Q. Recent advances in intuitionistic fuzzy information aggregation [J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, vol. 9, no. 4, pp. 359-381, Dec, 2010.

[8] WEI Guiwu. Hesitant Fuzzy prioritized operators and their application to multiple attribute group decision making, Knowledge-Based Systems, 31(2012) 176-182.

[9] MIYAMOTO S. Remarks on basics of fuzzy sets and fuzzy multisets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 156: 427-431.

[10] PAL S K, KING R A. Image enhancement using smoothing with fuzzy sets [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 11 (1981) 495-501.

[11] WU D, MENDEL J M. A vector similarity measure for linguistic approximation: interval type-2 and type-1 fuzzy sets, Information Sciences, 2008, 178. 381-402.

[12] WU D, MENDEL J M. A comparative study of ranking methods, similarity measures and uncertainty measures for interval type-2 fuzzy sets, Information Sciences, 2009, 179. 1169-1192.

[13] ZENG W Y, LI H X. Relationship between similarity measure and entropy of interval valued fuzzy sets, Fuzzy Sets and Systems, 2006, 157. 1477-1484.

[14] YANG M S, SHIH H M. Cluster analysis based on fuzzy relations [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001,120. 197-212.

[15] BUSTINCE H. Indicator of inclusion grade for interval-valued fuzzy sets: application to approximate reasoning based on interval-valued fuzzy sets, International Journal of Approximate Reasoning,2000 23. 137-209.

[16] BENAYOUN R, ROY B, SUSSMAN B. ELECTRE: Une méthode pour guider le choix en présence de points de vue multiples, Note de travail, 1966,49. [17] CHEN N, XU Z S, X M M. Correlation coefficients of hesitant fuzzy sets and their applications to clustering analysis, Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(4): 2197-2211.

[18] WEI G W, ZHAO X F. Some hesitant interval-valued fuzzy aggregation operators and their applications to multiple attribute decision making, Knowledge-Based Systems, in press, 2013.

[19] WEI Guiwu, ZHAO Xiaofei. Induced Hesitant Interval-Valued Fuzzy Einstein Aggregation Operators and Their Application to Multiple Attribute Decision Making[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2013, 24. 789-803.

[20] WANG Y M, YANG J B, XU D L. A preference aggregation method through the estimation of utility intervals[J]. Computers & Operations Research, 2005, 32. 2027-2049.

(上接第 228 页)

参考文献

[1] 李飞, 周晓光. 分类后栅格数据矢量化中自交多边形处理算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013.

[2] 姜晓慧. 栅格数据矢量化并行算法研究. 南京大学, 2013.

[3] 单长贺. 栅格地形图的图斑矢量化研究. 林业科技通讯,2016.

[4] 魏金标. 自适应栅格数据矢量化并行方法研究. 南京大学, 2014.