文章编号:1000-5862(2017)03-0280-05

基于 C-OWHA 算子的区间证据理论及其应用

龚雅玲[1],曾广洪[2*]
(1. 南昌教育学院学报编辑部,江西 南昌 330004;2. 江西师范大学数学与信息科学学院,江西 南昌 330022)

摘要:为解决经典区间证据合成方法具有计算复杂、不满足结合律等问题,利用连续区间数据有序加权调和平均(C-OWHA)算子提出一种新的区间信度合成方法.该方法借助 C-OWHA 算子构造区间信度点化函数,使得区间基本概率分配函数转化为点信度函数,再结合 Dempster 合成规则将转化后的点信度进行融合.最后,将该方法应用于一个算例,以说明该方法的实用性.

关键词:区间证据;Dempster 合成规则;C-OWHA 算子;基本概率分配
中图分类号 O 224;C 934 文献标志码:A DOI:10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2017.03.13

0 引言

作为不确定性建模和推理的概念框架,Dempster-Shafer 理论(也称为证据理论)已经在许多领域中得到广泛应用[1-5].在证据理论中,基本概率分配函数是一个重要的元素,它的取值通常是由决策者主观给出的,存在较大的经验成分,采用 0 与 1 之间的单点值表示显然不够精确[6];同时,在多属性决策、群决策、信息融合等一些实际决策中,由于信息的不完整或缺失而导致信息的不确定性,决策者对基本概率分配采用精确数的假设往往较为严格而难以给出[7].而区间数能够有效地表示这种不确定性情况,区间信度结构借助区间数给出基本概率分配函数的赋值,以表现信息的不确定性,基于区间数的证据理论研究可以拓展经典证据理论的应用范围.

然而,针对证据合成问题,经典的 Dempster 合成规则无法应用于区间信度结构中.为了拓展证据理论的使用领域,近年来,区间证据的合成成为信息融合的一个重点研究内容,引起了许多国内外学者的关注.E. S. Lee 等[8]利用区间数给出了区间信度结构的定义,并结合区间数的乘法与加法研究了区间证据的合成规则,但是该方法存在证据合成过程未进行正规化、参数值的设定过于主观等问题;T. Denoeux[9-10]系统地研究了区间信度合成问题,利用非线性规划模型提出了区间证据的合成规则,然而,该方法将信度的正规化过程与合成步骤分开,这容易导致合成结果不是全局最优而仅是局部最优;R. R. Yager[11]利用区间数的计算方法研究了 2 个区间信度结构的合成,但是该方法可能会产生区间上限小于下限的不一致情况;Wang Yingming 等[12]利用优化模型将区间证据的正规化过程和合成过程统一,提出了区间证据合成的改进方法,克服了以上研究方法中存在的一些不足之处,取得了较理想的效果;Gao Bin 等[13]改进了 Wang Yingming 等提出的非线性规化模型,使得合成结果更合理化;肖文等[14]将区间信度分成“未知信度”和“确知信度”2 个部分,给出一种区间信度的扩展分配,并基于此提出一种有效的区间信度合成方法;Fu Chao 等[15-16]在文献[12]的基础上研究了冲突性区间证据和相关区间证据的合成方法;冯海山等[17]构建了区间证据的相似度,提出了冲突性区间证据的合成规则,有效地弱化了决策中的信息不确定性;陈圣群等[18]针对区间冲突证据合成存在不符合直觉的问题,利用 Pignistic 概率距离最优化模型提出一种冲突区间证据合成规则;Song Yafei 等[19]利用直觉模糊集理论提出了一种新的区间证据合成方法,并通过算例分析了该方法的有效性;孙伟超等[20-21]对区间证据的合成规则和信息源进行修正,提出了改进的区间证据合成方法.

在上述研究文献中,区间证据合成结果是一个区间数,依然是不确定性的,不易用于决策[22].如何将区间证据转化为单值证据,再利用经典 Dempster 合成规则进行信息融合,以便于决策,这是区间证据合成中一个非常重要的新问题.针对此类问题,本文

收稿日期:2016-12-20
基金项目:国家自然科学基金(61663015)和江西省教育科学“十二五”规划课题(15YB200)资助项目.
通信作者:曾广洪(1972-),男,江西吉安人,副教授,主要从事模糊数学与非线性动力系统方面的研究.E-mail:zengguanghong@gmail.com
龚雅玲(1985-),女,江西南昌人,讲师,主要从事应用数学方面的研究.E-mail:104958193@qq.com

引入连续区间数据有序加权调和平均(C-OWHA)算子[23],建立区间信度的 C-OWHA 点化函数,将区间数转化为精确数,再结合 Dempster 合成规则融合转化后的点信度,较好地解决了区间信度合成后仍是区间数的问题,可以直接应用于决策中.

1　区间证据理论的相关概念

当基本概率分配不是精确数,而是不确定的区间数时,传统的 D-S 证据理论需要进行相应的调整[24].

1.1　区间信度结构

定义 1[11]　设Θ 是识别框架,$A_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为识别框架Θ 的子集,区间数 $[a_i,b_i]$ 满足 $0\leqslant a_i\leqslant b_i\leqslant 1(i=1,2,\cdots,n)$,定义区间基本概率分配函数 m 为有效的区间信度结构,若满足:(i) $a_i\leqslant m(A_i)\leqslant b_i,i=1,2,\cdots,n$;(ii) $\sum_{i=1}^{n}a_i\leqslant 1,1\leqslant\sum_{i=1}^{n}b_i$;(iii) $m(A)=0,\forall A\notin\{A_1,A_2,\cdots,A_n\}$.

对于有效的区间信度结构 m,$A_i(m(A_i)>0,i=1,2,\cdots,n)$ 为Θ 上的焦元,称所有焦元的集合为区间信度结构的核. 当 $m(\Theta)>0$ 时,$m(\Theta)$ 表示未知部分分配的信度. 若 $\sum_{i=1}^{n}a_i>1$ 或 $\sum_{i=1}^{n}b_i<1$,则称区间信度结构 m 为无效的,这时需要将基本概率分配函数修正为有效的,才可以进行合成运算.

定义 2[11]　设 m 为一个有效的区间信度结构,且对于焦元 $A_i(i=1,2,\cdots,n)$ 有 $a_i\leqslant m(A_i)\leqslant b_i$,称 m 是正规化的区间信度结构,若 a_i,b_i 满足:

$$\sum_{j=1}^{n}b_j-(b_i-a_i)\geqslant 1,\ \sum_{j=1}^{n}a_j+(b_i-a_i)\leqslant 1,\ \forall i\in\{1,2,\cdots,n\}.$$

对于非正规化的有效区间信度结构,可以采取

$$\max\{a_i,1-\sum_{j\neq i}b_j\}\leqslant m(A_i)\leqslant \min\{b_i,1-\sum_{j\neq i}a_j\}(i=1,2,\cdots,n)$$

的方法去除所有不可能的基本概率分配,从而区间数 $[\max\{a_i,1-\sum_{j\neq i}b_j\},\min\{b_i,1-\sum_{j\neq i}a_j\}](i=1,2,\cdots,n)$ 构成了正规化的区间信度.

1.2　区间证据理论的合成规则

信息融合是证据理论中最核心的内容,合成方法还在不断地探索中[25]. 然而,现有文献对区间证据的合成问题仍然没有完全解决. 对于区间证据合成规则,由于 T. Denoeux[9-10] 所提出的方法存在合成结果区间较大的问题,因而为解决该问题,Wang Yingming 等[12] 给出了一种归一化的区间证据合成方法.

定义 3　设Θ 是识别框架,m_1,m_2 为 2 个有效的区间信任结构,$A_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为关于 m_1 的识别框架Θ 上的焦元,$B_j(j=1,2,\cdots,k)$ 为关于 m_2 的识别框架Θ 上的焦元,且满足 $m_1^-(A_i)\leqslant m_1(A_i)\leqslant m_1^+(A_i)(i=1,2,\cdots,n)$,$m_2^-(B_j)\leqslant m_2(B_j)\leqslant m_2^+(B_j)(j=1,2,\cdots,k)$,其中 m^-,m^+ 分别表示 m 的下限、上限,将 m_1,m_2 的合成 $m_1\oplus m_2$ 定义为

$$m_1\oplus m_2(C)=\begin{cases}0, & C=\varnothing,\\ [(m_1\oplus m_2)^-(C),(m_1\oplus m_2)^+(C)], & C\neq\varnothing,\end{cases}$$

这里 $(m_1\oplus m_2)^-(C),(m_1\oplus m_2)^+(C)$ 分别为如下优化问题的最小值和最大值:

$$\min/\max\ m_1\oplus m_2(C)=\frac{\sum_{A_i\cap B_j=C}m(A_i)m(B_j)}{1-\sum_{A_i\cap B_j=\varnothing}m(A_i)m(B_j)}$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{i=1}^{n}m_1(A_i)=1,\ \sum_{j=1}^{k}m_2(B_j)=1,$$

$$m_1^-(A_i)\leqslant m_1(A_i)\leqslant m_1^+(A_i),i=1,2,\cdots,n,$$

$$m_2^-(B_j)\leqslant m_2(B_j)\leqslant m_2^+(B_j),j=1,2,\cdots,k.$$

定义 3 给出的证据合成方法基本思路是:先判断区间信度结构 m_1,m_2 的有效性,再将有效区间信度结构正规化处理,然后利用非线性规划和 Dempster 合成规则,计算出点信度集结后的最小值和最大值,得到合成后的区间信度结构.

然而,该证据合成规则存在正规化和优化求解计算复杂、合成不满足结合律、合成后的区间宽度也较大等问题,这将造成不确定性增加的不利局面[17,22].

2　基于 C-OWHA 算子的区间证据合成规则

2.1　连续区间数据的有序加权调和平均算子

定义 4[23]　设 $0<a<b$,对于区间数 $[a,b]$,有

$$F_Q([a,b])=1\Big/\int_0^1\frac{\mathrm{d}Q(y)}{\mathrm{d}y}\left(\frac{1}{b}+y\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{b}\right)\right)\mathrm{d}y,$$

其中函数 $Q:[0,1]\to[0,1]$ 满足 $Q(0)=0,Q(1)=1$,当 $x_1>x_2$ 时,$Q(x_1)\geqslant Q(x_2)$,则称算子 F 为连续区间数据的有序加权调和平均算子(简称 C-OWHA 算子),函数 Q 为基本的单位区间单调函数(简称 BUM 函数).

注 1　利用 C-OWHA 算子 F,可以将不确定的区间数 $[a,b]$ 转化为一个具体的数值;C-OWHA 算子是对处理离散数据的 OWHA 算子的一种拓展.

定义5 设 Q 为 BUM 函数,称 $\rho = \int_0^1 Q(y)\,\mathrm{d}y$ 为决策者的乐观程度.

显然,$0 \leqslant \rho \leqslant 1$,$\rho = \int_0^1 Q(y)\,\mathrm{d}y = 1 - \int_0^1 \frac{\mathrm{d}Q(y)}{\mathrm{d}y} \cdot y\mathrm{d}y$. 引入决策者的态度参数 ρ 后,可以得到 C-OWHA 算子为 $F_Q([a,b]) = 1/(\rho/b + (1-\rho)/a)$.

为便于计算与分析,$\forall x \in [0,1]$,通常选取 $Q(x) = x^r (r \geqslant 0)$,则 $\rho = \int_0^1 x^r \mathrm{d}x = 1/(r+1)$,从而 $F_Q([a,b]) = 1/(1/b(r+1) + r/a(r+1))$,其中待定参数 r 描述了决策者的风险态度. 当 $r = 1$ 时,$\rho = 1/2$,决策者面对风险的态度是中性的;当 $0 \leqslant r < 1$ 时,$\rho > 1/2$,决策者面对风险的态度是喜好的(乐观型决策者);当 $r > 1$ 时,$\rho < 1/2$,决策者面对风险的态度是规避的(保守型决策者).

注2 对于 C-OWHA 算子 F,有

(i) $\lim\limits_{r\to 0} F_Q([a,b]) = b$;

(ii) $\lim\limits_{r\to +\infty} F_Q([a,b]) = a$;

(iii) 当 $r = 1$ 时,$F_Q([a,b]) = ab/(a+b)$.

2.2 基于 C-OWHA 算子的点信度构建

定义6 设 Θ 是识别框架,$A_i (i = 1,2,\cdots,n)$ 为识别框架 Θ 的所有焦元,区间数 $[a_i,b_i]$ 满足 $0 \leqslant a_i \leqslant b_i \leqslant 1 (i = 1,2,\cdots,n)$,对于 Θ 上的有效区间信度结构 m,定义 m_{F_Q} 为

$$m_{F_Q}(A_i) = 1\Big/\left[K\int_0^1 \frac{\mathrm{d}Q(y)}{\mathrm{d}y}\left(\frac{1}{b_i} + y\left(\frac{1}{a_i} - \frac{1}{b_i}\right)\right)\mathrm{d}y\right],$$

其中 Q 为 BUM 函数,$K = \sum_{i=1}^{n} 1\Big/\int_0^1 \frac{\mathrm{d}Q(y)}{\mathrm{d}y}\left(\frac{1}{b_i} + y\left(\frac{1}{a_i} - \frac{1}{b_i}\right)\right)\mathrm{d}y$,称 m_{F_Q} 为区间信度 m 的 C-OWHA 点化函数.

注3 利用区间信度的 C-OWHA 点化函数 m_{F_Q},可以将不确定的区间信度 $m(A_i)(a_i \leqslant m(A_i) \leqslant b_i)$ 转化为确定的点信度 $m_{F_Q}(A_i)$,且 $\sum_{i=1}^{n} m_{F_Q}(A_i) = 1$.

若 $Q(x) = x^r (r \geqslant 0)$,则区间信度的 C-OWHA 点化函数为

$$m_{F_Q}(A_i) = \frac{a_i b_i (r+1)}{K(a_i + r b_i)}, \tag{1}$$

其中 $K = \sum_{i=1}^{n} \frac{a_i b_i (r+1)}{(a_i + r b_i)}$. 由此给出如下命题.

命题1 设 Θ 是识别框架,$A_i (i = 1,2,\cdots,n)$ 为识别框架 Θ 的所有焦元,区间数 $[a_i,b_i]$ 满足 $0 \leqslant a_i \leqslant b_i \leqslant 1 (i = 1,2,\cdots,n)$,$m_{F_Q}$ 为区间信度 m 的 C-OWHA 点化函数,若 BUM 函数 Q 取为 $Q(x) = x^r (r \geqslant 0)$,则

$$\lim_{r\to 0} m_{F_Q}(A_i) = b_i\Big/\sum_{i=1}^{n} b_i, \quad \lim_{r\to +\infty} m_{F_Q}(A_i) = a_i\Big/\sum_{i=1}^{n} a_i.$$

证 将(1)式分别依 $r \to 0$,$r \to +\infty$ 取极限即可得证.

又由区间信度 m 的有效性知,$\sum_{i=1}^{n} a_i \leqslant 1$,$1 \leqslant \sum_{i=1}^{n} b_i$. 从而可得如下结论.

命题2 设 m_{F_Q} 为有效区间信度 m 的 C-OWHA 点化函数,若 BUM 函数 Q 取为 $Q(x) = x^r (r \geqslant 0)$,则 $\forall i \in \{1,2,\cdots,n\}$,区间信度 $m(A_i)(a_i \leqslant m(A_i) \leqslant b_i)$ 转化为确定的点信度 $m_{F_Q}(A_i)$ 满足 $a_i \leqslant m_{F_Q}(A_i) \leqslant b_i$.

证 由命题1知,$a_i\Big/\sum_{i=1}^{n} a_i \leqslant m_{F_Q}(A_i) \leqslant b_i\Big/\sum_{i=1}^{n} b_i$. 又由区间信度 m 的有效性知,$\sum_{i=1}^{n} a_i \leqslant 1$,$1 \leqslant \sum_{i=1}^{n} b_i$. 因此,$a_i \leqslant m_{F_Q}(A_i) \leqslant b_i$,即命题2得证.

2.3 区间证据合成算法

区间证据理论中最关键的是多个区间信度结构的合成. 基于 C-OWHA 算子的区间证据合成的思路是:对于多个区间信度结构,利用区间信度的 C-OWHA 点化函数,将区间数转化为单点值,再结合单点值的 Dempster 证据合成规则对多个证据进行集结. 具体过程如下:

假定对于 M 个备选方案 $X_i (i = 1,2,\cdots,M)$,方案评价的识别框架 $\Theta = \{A_1,A_2,\cdots,A_N\}$,专家 j 给出的区间信任结构为 $m_j (j = 1,2,\cdots,L)$,其中区间信度 $m_j^i(A_k)$ 表示专家 j 对方案 X_i 评价为 A_k 的可能性程度,则通过如下步骤将多个区间信度结构进行合成和方案选取.

Step 1 将区间信度结构 $m_j (j = 1,2,\cdots,L)$ 进行有效化和正规化处理;

Step 2 利用区间信度的 C-OWHA 点化函数,根据不同决策者的类型将区间信度转化为点信度;

Step 3 将转化后的点信度采用 Dempster 证据合成规则进行集结,从而得到多个证据源信息的综合评价结果;

Step 4 结合综合评价结果比较备选方案,选择出满意的方案.

显然,从上述的合成算法可以看出,基于 C-OWHA 算子的区间证据合成方法满足合成的结合律和交换律,即 $(m_1 \oplus m_2) \oplus m_3 = m_1 \oplus (m_2 \oplus m_3)$,$m_1 \oplus m_2 = m_2 \oplus m_1$,这意味着该合成与信息源的次序无关. 同时,基于 C-OWHA 算子的区间证据合成方法在计算方面也比 Wang Yingming 等[12]

提出的合成方法更为简单且操作方便.

3　应用举例

为说明本文方法的实用性，将该方法应用于综合评价高等数学教育质量. 假定某学校对基于建模思想的高等数学教学设计了 2 个方案，安排 3 个专家对 2 个方案的预期教育质量分别进行评价，评价结果的等级有 3 种：A_1（很好）、A_2（比较好）、A_3（不太好），每个专家将方案 $j(j=1,2)$ 评价为 $A_i(i=1,2,3)$ 的可能性为一个区间数，根据专家们的评价结果分析选择哪种方案更适合提升教学效果. 针对这类问题，下面给出一个算例.

假设 2 个备选方案，评价识别框架 $\Theta=\{A_1,A_2,A_3\}$，3 个专家提供的识别框架 Θ 下的区间信度结构分别为

专家 1：$m_1^1(A_1)=[0.2,0.4]$，$m_1^1(A_2)=[0.3,0.5]$，$m_1^1(A_3)=[0.1,0.3]$，$m_1^1(\Theta)=[0.1,0.2]$，$m_1^2(A_1)=[0.3,0.5]$，$m_1^2(A_2)=[0.1,0.3]$，$m_1^2(A_3)=[0.2,0.3]$，$m_1^2(\Theta)=[0.1,0.2]$；

专家 2：$m_2^1(A_1)=[0.3,0.4]$，$m_2^1(A_2)=[0.1,0.2]$，$m_2^1(A_3)=[0.2,0.3]$，$m_2^1(\Theta)=[0.2,0.4]$，$m_2^2(A_1)=[0.1,0.2]$，$m_2^2(A_2)=[0.3,0.5]$，$m_2^2(A_3)=[0.1,0.4]$，$m_2^2(\Theta)=[0.1,0.3]$；

专家 3：$m_3^1(A_1)=[0.2,0.3]$，$m_3^1(A_2)=[0.3,0.4]$，$m_3^1(A_3)=[0.1,0.3]$，$m_3^1(\Theta)=[0.2,0.3]$，$m_3^2(A_1)=[0.2,0.4]$，$m_3^2(A_2)=[0.1,0.2]$，$m_3^2(A_3)=[0.3,0.4]$，$m_3^2(\Theta)=[0.2,0.3]$.

取 BUM 函数 Q 为 $Q(x)=x$，即考虑专家为中性决策者，根据(1)式可以计算区间信度的点化值，再利用 Dempster 合成规则对 3 个专家的区间信度进行集结，即 $m^1=m_{1F_Q}^1\oplus m_{2F_Q}^1\oplus m_{3F_Q}^1$，$m^2=m_{1F_Q}^2\oplus m_{2F_Q}^2\oplus m_{3F_Q}^2$，则对 2 个方案合成后的结果分别为

方案 1：$m^1(A_1)=0.39$，$m^1(A_2)=0.40$，$m^1(A_3)=0.18$，$m^1(\Theta)=0.03$；

方案 2：$m^2(A_1)=0.36$，$m^2(A_2)=0.27$，$m^2(A_3)=0.34$，$m^2(\Theta)=0.03$.

若对评价等级分别记分为 4（很好）、3（比较好）、2（不太好）、1（不确定），则 2 个方案的综合得分分别为

$$S^1=4m^1(A_1)+3m^1(A_2)+2m^1(A_3)+m^1(\Theta)=4\times0.39+3\times0.40+2\times0.18+1\times0.03=3.15,$$

$$S^2=4m^2(A_1)+3m^2(A_2)+2m^2(A_3)+m^2(\Theta)=4\times0.36+3\times0.27+2\times0.34+1\times0.03=2.96.$$

从而 $S^1>S^2$，即方案 1 的预期教学效果更优于方案 2 的预期教学效果.

由此得出方案 1 是更为满意的方案.

通过上述算例，可以看出本文的合成方法不仅计算过程较为简便，而且利用 C-OWHA 算子将不确定的区间信息转化为确定的单值信息，保留了区间信度最主要的信息，再利用单值证据合成规则进行集结，使得合成方法保证结合律成立，更符合常理.

4　总结

针对经典区间证据理论中合成规则存在计算复杂、多源信息合成不满足结合律、合成结果仍为区间信度等问题，提出了一种基于 C-OWHA 算子的区间证据合成方法. 在实际应用中，根据每个决策者给出的区间信度结构，由决策者的不同类型选取合适的 BUM 函数，再利用 C-OWHA 算子将区间信度转化成点信度，最后采用 Dempster 合成规则对转化后的点信度进行合成. 该方法更符合实际情况，克服了经典区间证据理论存在的一些问题，算例分析表明本文方法简洁、合理、有效. 在质量评价、供应商选择、投资组合等相关决策领域，本文提出的方法具有广泛的应用价值.

5　参考文献

[1] Yang Shanlin，Fu Chao. Constructing confidence belief functions from one expert [J]. Expert Systems with Applications，2009，36(4)：8537-8548.

[2] Wang Yingming，Yang Jianbo，Xu Dongling，et al. Consumer preference prediction by using a hybrid evidential reasoning and belief rule-based methodology [J]. Expert Systems with Applications，2009，36(4)：8421-8430.

[3] 杨国梁，李晓轩，孟溦，等. 基于区间数证据推理方法的用户满意度调查 [J]. 管理工程学报，2012，26(1)：27-34.

[4] 靳留乾，徐扬，方新，等. 基于证据理论的不确定性推理方法及其应用 [J]. 计算机工程与应用，2015，51(10)：6-11.

[5] 李喜华，王傅强，陈晓红. 基于证据理论的直觉梯形模糊 IOWA 算子及其应用 [J]. 系统工程理论与实践，2016，36(11)：2915-2923.

[6] 蒋雯，张安，邓勇. 基于区间信息的基本概率赋值转换概率方法及应用 [J]. 西北工业大学学报，2011，29(1)：44-48.

[7] 杨春，李怀祖. 基于信度函数的决策方法探讨 [J]. 系统工程，2000，18(2)：66-72.

[8] Lee E S，Zhu Qing. An interval Dempster-Shafer approach [J]. Computers Math Applic，1992，24(7)：89-95.

[9] Denoeux T. Reasoning with imprecise belief structures [J]. International Journal of Approximate Reasoning，1999，20(1)：79-111.

[10] Denoeux T. Modeling vague beliefs using fuzzy-valued belief structures [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 116(2): 167-199.

[11] Yager R R. Dempster-Shafer belief structures with interval valued focal weights [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2001, 16(4): 497-512.

[12] Wang Yingminig, Yang Jianbo, Xu Dongling, et al. On the combination and normalization of interval-valued belief structures [J]. Information Sciences, 2007, 177(5): 1230-1247.

[13] Gao Bin, Ni Mingfang. A note on article "The evidential reasoning approach for multiple attribute decision analysis using interval belief degrees" [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 197(2): 809-812.

[14] 肖文,王正友,王耀德. 一种区间信度的扩展分配及合成方法 [J]. 统计与决策, 2009(18): 8-10.

[15] Fu Chao, Yang Shanlin. Analyzing the applicability of Dempster´s rule to the combination of interval-valued belief structures [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(4): 4291-4301.

[16] Fu Chao, Yang Shanlin. The conjunctive combination of interval-valued belief structures from dependent sources [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2012, 53(5): 769-785.

[17] 冯海山,徐晓滨,文成林. 基于证据相似性度量的冲突性区间证据融合方法 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 851-857.

[18] 陈圣群,王应明. 区间值信念结构下冲突证据组合 [J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(1): 256-261.

[19] Song Yafei, Wang Xiaodan, Lei Lei, et al. Combination of interval-valued belief structures based on intuitionistic fuzzy set [J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 67(3): 61-70.

[20] 孙伟超,许爱强,李文海. 区间信度结构下的证据合成方法研究 [J]. 电子学报, 2016, 44(11): 2726-2734.

[21] 孙伟超,许爱强,李文海. 基于证据特征的区间证据合成方法研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(12): 2790-2798.

[22] 张洪涛,朱卫东,王慧. 基于 C-OWA 算子的区间信度合成方法 [J]. 系统工程, 2014, 32(5): 154-158.

[23] 陈华友,刘金培,王慧. 一类连续区间数据的有序加权调和(C-OWH)平均算子及其应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(7): 86-92.

[24] Song Yafei, Wang Xiaodan, Lei Lei, et al. Uncertainty measure for interval-valued belief structures [J]. Measurement, 2016, 80: 241-250.

[25] Nguyen V D, Huynh V N. Two-probabilities focused combination in recommender systems [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2017, 80: 225-238.

The Interval Evidence Theory and Its Application Based on the C-OWHA Operator

GONG Yaling[1], ZENG Guanghong[2*]

(1. Journal Editorial Board, Nanchang Education College, Nanchang Jiangxi 330004, China;
2. College of Mathematics and Informatics, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330022, China)

Abstract: For the deficiency of the classical combination approach for interval beliefs, such as being complex in computation and not satisfying the associative law, a new belief combination approach based on the continuous ordered weighted harmonic averaging(C-OWHA) operator is given. Firstly, the point function of interval belief is constructed by the C-OWHA operator, which convert the interval mass function to point beliefs. Then the converted point beliefs can be combined by Dempster rule. Lastly, a numerical example is given to illustrate the practicability of the approach.

Key words: interval evidence; Dempster rule; C-OWHA operator; basic probability assignment

(责任编辑:曾剑锋)