

一种改进的证据合成方法

刘希亮, 陈桂明

(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

摘要: D-S 证据理论不能很好地描述证据之间的冲突, 而且证据高度冲突时合成规则会得出反直观的结果。针对这一问题, 提出了一种改进的证据合成方法。首先建立余弦相似度空间, 利用证据向量之间的夹角余弦度量证据相似性程度, 通过冲突证据检测因子对其进行分类; 然后引入冲突比例因子决定证据的修正方法, 利用相似度对其进行局部修正或全局修正; 最后将修正后的证据代入 D-S 公式进行合成。应用实例证明, 该方法能够判定冲突证据, 实现冲突证据和相似性证据的合成, 具有较好的稳定性、分类精度和收敛速度。

关键词: 证据理论; 冲突; 相似度; 聚类分析

中图分类号: TP391; TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)09-2668-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.09.027

Improved evidence combination approach

LIU Xi-liang, CHEN Gui-ming

(Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: In D-S evidence theory, conflict coefficient cannot well depict the conflict between evidence, and counterintuitive results generate in the combination of highly conflicting evidence. Aiming at this question, this paper proposed a new combination approach from the aspect of clustering analysis. Firstly, it built up cosine similarity space, in which cosine between evidence vectors was used to measure the similarity degree, and then classified the evidence by way of conflict evidence detection coefficient. Moreover, it introduced conflict proportion coefficient to decide the modified method—local modification or full modification according to its similarity. Finally, it input the modified evidence to D-S combination formula. Application examples prove that this approach can differentiate conflict evidence, processes good stability, classification precision and convergence speed, so it is suitable for the combination of similarity evidence and conflict evidence.

Key words: evidence theory; conflict; similarity; clustering analysis

0 引言

在 D-S 证据理论^[1,2]中, 合成规则是核心基石, 但高度冲突证据的合成可能会导致与直观相悖的结论^[3]。针对这一问题, 国内外学者展开了大量的研究, 早期的处理冲突证据的方法有两大类: a) 基于修正原始证据源的方法, Murphy^[4]、邓勇等人^[5]对冲突证据进行预处理, 然后再使用 D-S 组合规则, 此类方法的收敛性是在重复利用同一证据的基础上得到的, 若证据本身具有不确定性, 在没有增加其他证据的情况下人为使它达到确定性, 那么这种结果是不可靠的; b) 基于修改组合规则的方法, Yager^[6]、孙全^[7]、李弼程^[8]等人分别改进了组合公式, 但此类方法通常不符合结合性, 而且没有简化组合规则, 计算量大、分配精度低。

随着研究的深入, 近年来又出现了两个新的研究方向:

a) 基于证据冲突程度的研究。Liu^[9]指出传统冲突系数存在问题, 并提出新的问题: 如何合理度量证据之间的冲突? 其引入了 Pignistic 概率距离并与冲突系数两者结合起来描述冲突的大小。蒋雯等人^[10]全面考虑证据之间的非包容性和差异性, 通过对经典冲突系数和距离函数求算术平均来表示证据之间的冲突程度。邓勇等人^[11]基于信息熵定义了关联系数来判

断冲突程度。

b) 基于广义辨识框架的研究。其中, 邓勇等人^[12,13]定义了广义证据理论的基本框架并提出了一种强约束广义基本概率赋值方法; 胡丽芳等人^[14]在广义幂集空间中深入分析了证据冲突的原因。

这两类方法扩展了证据理论的研究范围, 为其发展注入了新的活力。本文从证据理论新的研究方向出发, 提出了一种新的证据判别方法, 通过冲突证据检测因子定量描述证据间的冲突程度, 并对其进行分类, 找出导致高度冲突的根本原因。以此为基础改进了的证据合成公式, 对不同类别的证据采取不同的修正方法。这种有针对性的处理方法在最大限度上减弱了冲突性对合成结果的影响, 最终解决了高度冲突证据的合成问题。

1 经典证据理论

在经典证据理论中, 用 Θ 表示 n 个互不相容的元素构成的完备辨识框架, 即 $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 其中 $A_j (1 \leq j \leq n)$ 称为 Θ 的一个单子。 2^Θ 称为 Θ 的幂集, 它是 Θ 所有子集的集合。

定义 1 基本概率赋值函数。若幂集 2^Θ 上的映射 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 满足

$$m(\Phi) = 0 \tag{1}$$

收稿日期: 2013-01-22; 修回日期: 2013-03-04

作者简介: 刘希亮(1983-), 男, 山东德州人, 博士研究生, 主要研究方向为机械设备状态监测与故障诊断(liuxiliang111@yahoo.com.cn); 陈桂明(1966-), 男, 江苏高邮人, 教授, 博导, 主要研究方向为智能检测与信息融合。

$$\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \quad (2)$$

则称 m 为框架 Θ 上的基本概率赋值(BPA), $m(A)$ 表示证据对辨识框架中单子 A 的精确信任程度,是对 A 的直接支持。若 $m(A) > 0$,则称 A 为证据的焦点,所有焦点的集合称为证据的核 Ω ,三元组 $\{\Theta, \Omega, m_i\}$ 称为证据体。

定义 2 证据理论合成规则。若辨识框架内有 N 条相互独立的证据 $\{\Theta, \Omega_i, m_i\}$,其合成规则为

$$\begin{cases} m(A) = \frac{1}{1-k} \sum_{A_j=A} \prod_{1 \leq j \leq n} m_i(A_j) & A \subseteq \Theta, A \neq \Phi \\ m(\Phi) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$k = \sum_{A_j \neq \Phi} \prod_{1 \leq j \leq n} m_i(A_j) \quad (4)$$

称为冲突系数,用来反映证据之间冲突的程度, k 越大说明冲突越大^[3]。

从形式上看, k 只能从总体上表征所有证据间的综合冲突,并未指出具体的冲突证据,而冲突证据正是导致合成结果有悖常理的根本原因,因此有必要对证据进行分类,找出冲突证据,从根本上解决冲突证据的合成问题。

2 改进的证据合成方法

目前常用距离测度的证据分类方法,以证据距离作为衡量证据相似程度的标准,按照“距离短则相似性好,距离长则相似性差”的原则,从全局冲突的角度对其进行分类,目前主要有 Jusselme 距离^[5]、Pignistic 概率距离^[10,11]、焦点距离三种距离测度。本文从一个全新的视角——角度相似性测度对证据进行分类,将原始证据视为空间向量,建立高维证据向量到低维向量夹角余弦的映射,提出冲突证据判据对证据进行分类,最终区分冲突证据。

2.1 冲突证据判定法则

设辨识框架内有 N 条相互独立的证据体 $\{\Theta, \Omega_i, m_i\}$,以每个证据体的单子 BPA 为坐标建立一个 R^n 维的空间(n 代表 Θ 中单子的个数),则可以定义在此空间中的一组证据向量 p_i ($1 \leq i \leq N$),即 $p_i = (m_i(A_1), m_i(A_2), \dots, m_i(A_n))^T$,所有证据体组成一个含有 N 个证据向量的集合 P 。

定义 3 余弦测度空间。集合 P 上的二元实值函数 $S(x, y)$ 为 R^n 空间中任意两个向量 x 和 y 的夹角余弦,若 $S(x, y)$ 满足:a) $S(x, y) = F(y, x)$; b) $0 \leq S(x, y) \leq 1$; c) 当且仅当 $x = y$, $S(x, y) = 1$; 当且仅当 $x \perp y$, $S(x, y) = 0$,则称 P 为余弦测度空间。

定义 4 向量夹角余弦。余弦相似度空间中任意两个证据向量 p_i 和 p_j 的夹角余弦为

$$\text{Sim}_{ij} = \cos(\angle p_i, p_j) = \frac{p_i^T p_j}{[(p_i^T p_i)(p_j^T p_j)]^{1/2}} \quad (5)$$

式中: $p_i^T p_j = \sum_{k=1}^n m_i(A_k) m_j(A_k)$ ($i, j = 1, \dots, N$)。

向量夹角余弦实际上是在向量空间内降低了证据的维数,将证据间 BPA 的两两比较转换为证据向量之间夹角余弦的比较,这大大简化了证据比较的难度,为寻找冲突证据提供了一个很好的方法。

由式(5)计算得到证据的余弦测度矩阵 $C_{N \times N}$ 为

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \text{Sim}_{12} & \text{Sim}_{13} & \dots & \text{Sim}_{1N} \\ \text{Sim}_{21} & 1 & \text{Sim}_{23} & \dots & \text{Sim}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Sim}_{N1} & \text{Sim}_{N2} & \text{Sim}_{N3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

证据 $\{\Theta, \Omega_i, m_i\}$ 与其他证据的平均相似度为

$$\overline{\text{Sim}_i} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1, j \neq i}^N \text{Sim}_{ij} \quad (7)$$

定义 5 冲突证据检测因子。对于余弦相似度空间中的任意证据向量 p_i ,若有

$$\Delta_i = \frac{\beta - \overline{\text{Sim}_i}}{\beta - \alpha} \quad (8)$$

其中: $\alpha = \min_{1 \leq i \leq N} \overline{\text{Sim}_i}$; $\beta = \max_{1 \leq i \leq N} \overline{\text{Sim}_i}$; Δ_i 为冲突证据检测因子。

当 $\Delta_i \rightarrow 0$ 时,表明证据 $\{\Theta, \Omega_i, m_i\}$ 与其他证据相互支持,属于同一类别,不存在冲突;当 $\Delta_i \rightarrow 1$ 时,表明证据 $\{\Theta, \Omega_i, m_i\}$ 与其他证据高度冲突。这样,通过冲突证据检测因子 Δ_i 实现了证据的分类。

定义 6 冲突证据判据。对于辨识框架内的任意证据 $\{\Theta, \Omega_i, m_i\}$,若它的冲突证据检测因子 $\Delta_i \leq \tau$ ($0 \leq \tau \leq 1$),判定证据 $\{\Theta, \Omega_i, m_i\}$ 为相似性证据;若 $\Delta_i > \tau$,判定证据 $\{\Theta, \Omega_i, m_i\}$ 为冲突证据。

2.2 证据的修正

Lefevre 等人^[15]认为,冲突也是一种信息,其中蕴涵着某些有用的信息分量,将其完全遗弃必然造成信息的损失,而把冲突信息提取分析并修正后加入组合规则,则可得合理的合成结果。本文基于这一思想,在对证据分类的基础上判定冲突证据,并按照相似性测度对其进行修正,提出了一种新的证据组合规则。

一般认为,一个证据与其他证据的相似性越高,被支持的程度也就越高,该证据提供的信息越可信,反之则认为该证据的可信性较低。对于辨识框架内的 N 条证据,在冲突证据判据的基础上,可以计算出冲突证据的数量及所占比例。

定义 7 冲突比例因子。辨识框架内证据的冲突比例因子为

$$\eta = \frac{n}{N} \quad (9)$$

其中: n 为冲突证据的个数。

冲突比例因子 η 反映了冲突证据占辨识框架内所有证据的比例。当 η 小于某个阈值 δ ($0 \leq \delta \leq 1$) 时,对证据源的修正,实际上是认为引起证据高度冲突的是个别证据,其他证据是可靠的,只需要对冲突证据进行折算,这种有针对性的做法既保证了其他可靠证据的 BPA 不受损失,又对冲突证据的 BPA 加以修正,使得证据冲突降到最低;而当 η 大于 δ 时,则认为证据之间存在较为普遍的冲突,引起冲突的原因不只是个别证据,需要对所有证据进行一次普遍的修正,以减少冲突对组合结果的影响。这种处理方法也符合“因地制宜,因时而异”的思想。

求出证据 $\{\Theta, \Omega_i, m_i\}$ 的平均相似度后,可以得到该证据的绝对相似度和相对相似度。

根据冲突比例因子 η 的取值可以得到以下两种证据修正方法:

a) 当 $\eta < \delta$ 时,对冲突证据作局部修正:

$$m_i'(A_j) = \begin{cases} \text{Sim}_i^{(d)} \cdot m_i(A_j) & A_j \neq \Theta \\ \text{Sim}_i^{(d)} \cdot m_i(\Theta) + 1 - \text{Sim}_i^{(d)} & A_j = \Theta \end{cases} \quad (10)$$

式中:

$$\text{Sim}_i^{(d)} = \frac{\overline{\text{Sim}_i}}{\beta} \quad (11)$$

为冲突证据的绝对相似度, $m_i(A_j)$ 为冲突证据 $\{\Theta, \Omega_i, m_i\}$ 的

单子 BPA。可以证明

对于 $\forall A \subseteq \Theta, A \neq \Phi$, 有

$$\begin{aligned} \sum_{A \subseteq \Theta} m_i'(A_j) &= \sum_{j=1, A_j \neq \Theta}^n \text{Sim}_i^{(d)} \cdot m_i(A_j) + m_i'(\Theta) = \\ &= \sum_{j=1, A_j \neq \Theta}^n \text{Sim}_i^{(d)} \cdot m_i(A_j) + \text{Sim}_i^{(d)} \cdot m_i(\Theta) + 1 - \text{Sim}_i^{(d)} = \\ &= \sum_{j=1}^n \text{Sim}_i^{(d)} \cdot m_i(A_j) + 1 - \text{Sim}_i^{(d)} = \\ &= \text{Sim}_i^{(d)} \sum_{j=1}^n m_i(A_j) + 1 - \text{Sim}_i^{(d)} = \text{Sim}_i^{(d)} + 1 - \text{Sim}_i^{(d)} = 1 \end{aligned}$$

说明式(10)修正后的证据满足式(2)的要求。

在修正后的冲突证据中,相似度小的单子 A_j 提供的确定性信息将减少,而不确定性元素 Θ 提供的不确定性信息将增加,因此可以抵消相似度小的证据对整个融合系统的影响。

b) 当 $\eta \geq \delta$ 时,对所有证据作全局修正:

$$m_i''(A_j) = \begin{cases} \text{Sim}_i^{(s)} \cdot m_i(A_j) & A_j \neq \Theta \\ \text{Sim}_i^{(s)} \cdot m_i(\Theta) + 1 - \text{Sim}_i^{(s)} & A_j = \Theta \end{cases} \quad (12)$$

其中:

$$\text{Sim}_i^{(s)} = \frac{\overline{\text{Sim}_i}}{\sum_{i=1}^N \overline{\text{Sim}_i}} \quad (13)$$

为所有证据的相对相似度, $m_i(A_j)$ 为任意证据 $\{\Theta, \Omega_i, m_i\}$ 的单子 BPA。同理可以证明式(12)修正后的证据满足式(2)的要求。

2.3 证据合成框架及步骤

基于证据分类的合成方法,是在冲突证据检测因子 Δ 和冲突比例因子 η 共同作用下完成的。由此得到如下的一般性合成框架。

设辨识框架内有 N 条相互独立的证据体 $\{\Theta, \Omega_i, m_i\}$, 则对证据源修正后的 D-S 合成模型为

$$\begin{cases} m(A) = \frac{1}{1-k} \sum_{A_j \subseteq A} \prod_{1 \leq j \leq n} \tilde{m}_i(A_j) & A \subseteq \Theta, A \neq \Phi \\ m(\Phi) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中:

$$\tilde{k} = \sum_{\cap A_j = \Phi} \prod_{1 \leq j \leq n} \tilde{m}_i(A_j) \quad (15)$$

$$\tilde{m}_i(A_j) = \begin{cases} m_i(A_j) & \Delta_i \leq \tau \\ m_i'(A_j) & \Delta_i > \tau, \eta < \delta \\ m_i''(A_j) & \Delta_i > \tau, \eta \geq \delta \end{cases} \quad (16)$$

本模型通过冲突证据检测因子 Δ 将原始证据分成可信证据和冲突证据,当 $\Delta_i \leq \tau$ 时就变成了经典 D-S 组合式,当 $\Delta_i > \tau$ 时就演变成各种改进的组合式;又通过冲突比例因子 η 对冲突证据进行局部或全局处理,在不同相似度权重下实现证据源的合理修正,同时将修正后的证据重新进行冲突检验,直到满足阈值 τ 的要求,最后代入 D-S 模型进行合成。具体步骤如图 1 所示。

3 数值算例

3.1 在冲突证据合成的应用

某控制系统连续测得以下证据:

$$\Omega_1 = \{(A), (B), (C)\}, m_1 = \{0.30, 0.60, 0.10\}$$

$$\Omega_2 = \{(A), (B), (C)\}, m_2 = \{0.30, 0.55, 0.15\}$$

$$\Omega_3 = \{(A), (B), (C)\}, m_3 = \{0.10, 0.00, 0.90\}$$

$$\Omega_4 = \{(A), (B), (C)\}, m_4 = \{0.35, 0.55, 0.10\}$$

$$\Omega_5 = \{(A), (B), (C)\}, m_5 = \{0.05, 0.90, 0.05\}$$

$$\Omega_6 = \{(A), (B), (C)\}, m_6 = \{0.30, 0.60, 0.10\}$$

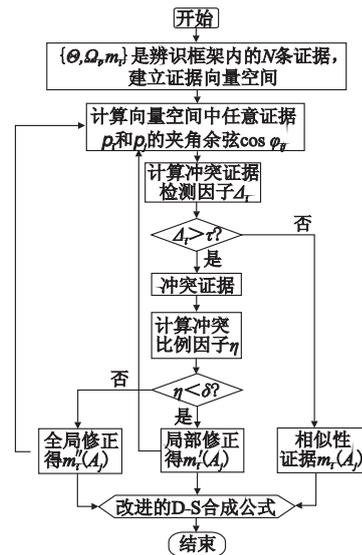


图1 证据合成流程

为验证本文方法在多证据合成中的有效性,把 D-S 方法^[1,2]、Murphy 方法^[4]、邓勇方法^[5]、Yager 方法^[6]、孙全方法^[7]、李弼程方法^[8]和本文方法进行比较。各种方法的合成结果如表 1 所示。

表 1 各种证据合成方法的合成结果

合成方法	合成结果				决策结果
	$m(A)$	$m(B)$	$m(C)$	$m(\Theta)$	
D-S 方法	0.869 2	0	0.130 8	0	A
Murphy 方法	0.106 8	0.786 3	0.106 9	0	B
邓勇方法	0.147 5	0.852 2	0.000 3	0	B
Yager 方法	0.000 1	0	0	0.999 9	Θ
孙全方法	0.123 5	0.286 5	0.119 0	0.471 0	Θ
李弼程方法	0.333 4	0.441 5	0.225 1	0	B
本文方法 1 $\tau=0.80, \delta=0.20$	0.004 8	0.995 0	0.000 2	0	B
本文方法 2 $\tau=0.60, \delta=0.30$	0.000 1	0.999 9	0	0	B

以目标 B 为例,对证据依次合成后得到的 $m(B)$ 值如图 2 所示。

从以上合成结果发现,当证据相似度较好时,使用各种方法都得到了比较理想的结果。但是,当出现冲突证据时,各方法表现出了很大的差异性;D-S 方法无法处理冲突证据,导致 $m(B)$ 始终为 0,无法对目标 B 作出合理判断;Murphy 方法对证据进行算术平均后再用 D-S 方法合成,从图 2 发现受冲突证据影响较大,缺乏稳定性,虽然具有一定的收敛速度,但分配精度不高;邓勇方法采用 Jousselle 距离对证据进行加权平均,在一定程度上抵消冲突证据带来的影响,在收敛速度和分配精度上有所提高,能够识别出目标 B;Yager 方法把冲突概率 k 全部赋予了未知领域 Θ ,使得出现证据 3 以后得到了与 D-S 方法相同的反直观结果;孙权方法同样受冲突证据影响,从证据 4 以后 $m(B)$ 增长极为缓慢,保证了收敛速度,但放弃了分配精度,而且未知目标 $m(\Theta)$ 的值较大,导致不能识别出目标 B;李弼程方法将冲突按各命题的平均支持度进行加权分配,是一种折中的策略,因此在高度冲突证据合成时显得过于保守,合成结果分布较为平均,虽然识别出了目标,但可信度不高。

本文采用了两种不同的证据合成策略——局部修正(本文方法 1)和全局修正(本文方法 2),对于前两个证据,合成结

果是一样的。第一种方法认为证据 3 是冲突证据,利用绝对相似度对其进行局部修正后再合成,从图 2 发现受冲突证据影响较小,很快收敛到较高的分配精度;第二种方法认为所有证据存在普遍冲突,利用相对相似度全局修正后再合成,从图 2 发现基本上不受冲突证据影响,三个证据合成后就很好地分辨出目标了。

各种方法的 k 值分布如图 3 所示。由于 D-S 方法与 Yager、孙全、李弼程方法的 k 值一样,因此图 3 中只绘出了 D-S 方法的 k 值曲线。当证据 3 出现后,D-S 方法的 k 值突然趋于 1, Murphy 和邓勇方法都达到 0.9,而本文两种方法 k 值较小,很显然受冲突证据影响很小。

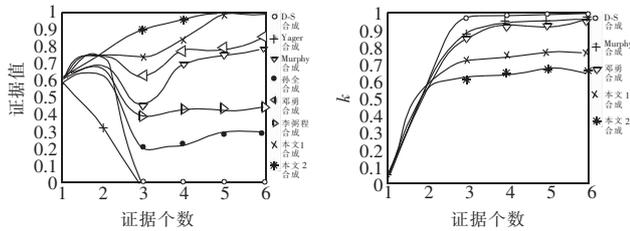


图 2 各种证据合成方法的 $m(B)$ 值 图 3 各种证据合成方法的 k 值

3.2 在相似性证据合成中的应用

以上算例证明了存在冲突证据的情况下,新合成方法取得了较好的效果。其实,在证据冲突不显著时,本文方法同样适用。

仍以上一节证据体为例,收到三条证据 $\{\Theta, \Omega_i, m_i\} (i = 1, 5, 6)$ 。不难发现,这三条证据之间没有显著性冲突,可以用经典 D-S 公式进行合成。若采用本文方法,可将冲突证据检测因子 Δ 进行扩展,通过对 τ 取值的设定,从更苛刻的角度定义冲突证据,对其进行局部修正后再合成,而且证据数量越多, Δ_i 取值的检测作用越明显。这里不再给出具体的计算过程,取 $\tau = 0.70$,即当 $\Delta_i > 0.70$ 时,认为其为冲突证据。利用 D-S 公式和本文方法合成后的结果如表 2 所示。

表 2 D-S 与本文方法合成结果比较

组和方法	m_1, m_5	m_1, m_5, m_6	决策结果
D-S 方法	$k = 0.440\ 0$	$k = 0.671\ 0$	
	$m(A) = 0.026\ 7$	$m(A) = 0.013\ 6$	
	$m(B) = 0.964\ 3$	$m(B) = 0.984\ 9$	B
	$m(C) = 0.008\ 9$	$m(C) = 0.001\ 5$	
	$m(\Theta) = 0$	$m(\Theta) = 0$	
本文方法 $\tau = 0.70$	$k = 0.186\ 0$	$k = 0.579\ 3$	
	$m(A) = 0.263\ 6$	$m(A) = 0.153\ 0$	
	$m(B) = 0.714\ 9$	$m(B) = 0.830\ 2$	B
	$m(C) = 0.021\ 4$	$m(C) = 0.016\ 8$	
	$m(\Theta) = 0$	$m(\Theta) = 0$	

由合成结果发现,对于相似性证据,本文方法具有与 D-S 方法相同的合成效果,而且结果更符合人们的认知规律,冲突证据经修正后减弱了对合成结果的影响。

当待合成证据较多 ($N \geq 10$) 时,可以根据需要对冲突证据检测因子 Δ_i 的取值进行限定,以检测出高度冲突证据和相似性一般的证据,或作放弃处理,或作修正处理,从而大大提高了证据合成方法的灵活性和针对性。

从以上两节可以知道,本文方法在分配精度、收敛速度和稳定性方面都取得了较好的效果,与其他合成方法在性能上的比较如表 3 所示。

表 3 各种合成方法的性能比较

合成方法	分配精度	收敛速度	稳定性	冲突系数
D-S 方法	—	—	—	较大
Murphy 方法	一般	一般	较差	较大
邓勇方法	一般	一般	较差	较大
Yager 方法	—	—	—	较大
孙全方法	较低	一般	较差	较大
李弼程方法	较低	一般	较差	较大
本文方法	较高	较快	较好	一般

4 结束语

针对证据理论中冲突证据的判定和合成问题,本文从以下三个方面进行了深入研究:

a) 建立了证据余弦测度空间,利用向量夹角余弦降低证据向量维数,引入冲突证据检测因子定量描述证据的冲突程度,提出了冲突证据判据对冲突证据进行判断,实现了证据分类。

b) 提出了一种解决冲突的新方法,构建了证据合成一般性框架,根据冲突比例因子决定冲突证据的修正方法,当比例因子较小时采用局部修正,较大时采用全局修正,对冲突证据修正后再进行 D-S 合成。

c) 应用实例证明,该方法既能处理冲突证据,又可以合成相似性证据,其合成结果优于其他方法。需要指出的是,本文方法主要针对单子证据焦点,虽然也适用于复合证据焦点,但其合成目标较多,而且计算量明显增大,融合成本提高,不利于快速精确融合。下一步的工作将放在任意焦点集合,同时考虑证据间的交叉融合,提高融合速度,使融合结果更加准确可靠。

参考文献:

- [1] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping[J]. *Annals of Mathematical Statistics*, 1967, 38(4): 325-339.
- [2] SHAFER G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976: 10-40.
- [3] 刘志言, 童树鸿, 王艳. 基于证据理论的多分类器集成方法研究[J]. *电机与控制学报*, 2001, 5(3): 208-212.
- [4] MURPHY C K. Combining belief functions when evidence conflicts[J]. *Decision Support Systems*, 2000, 29(1): 1-9.
- [5] 邓勇, 施文康, 朱振福. 一种有效处理冲突证据的组合方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, 23(2): 27-32.
- [6] YAGER R R. On the Dempster-Shafer framework and new combination rules[J]. *Information Sciences*, 1987, 41(2): 93-137.
- [7] 孙全, 叶秀清, 顾伟康. 一种新的基于证据理论的合成公式[J]. *电子学报*, 2000, 28(8): 117-119.
- [8] 李弼程, 王波, 魏俊, 等. 一种有效的证据理论合成公式[J]. *数据采集与处理*, 2002, 17(1): 33-36.
- [9] LIU W R. Analyzing the degree of conflict among belief functions[J]. *Artificial Intelligence*, 2006, 170(11): 909-924.
- [10] 蒋雯, 彭进业, 邓勇. 一种新的证据冲突表示方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 32(3): 562-565.
- [11] 邓勇, 王栋, 李齐, 等. 一种新的证据冲突分析方法[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(6): 839-844.
- [12] 邓勇, 蒋雯, 韩德强. 广义证据理论的基本框架[J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(2): 119-124.
- [13] 邓勇, 韩德强. 广义证据理论的基本框架[J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(2): 34-38.
- [14] 胡丽芳, 关欣, 邓勇, 等. 广义幂集空间中证据冲突的原因分析[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(12): 1717-1722.
- [15] LEFEVRE E, COLOT O, VANNOORENBERGHE P. Belief functions combination and conflict management[J]. *Information Fusion*, 2002, 3(2): 149-162.