

## 一种自适应冲突证据检验与合成方法

刘希亮, 陈桂明

(第二炮兵工程大学 装备管理工程系, 西安 710025)

**摘要:** 在D-S证据理论中, 冲突系数不能很好地描述证据之间的冲突, 而且当证据高度冲突时会得到有悖常理的结果. 为了解决该问题, 提出一种自适应冲突证据检验与合成方法. 首先, 利用证据向量夹角余弦度量证据之间的相似性程度, 并提出冲突证据判据, 通过冲突证据检验因子实现证据分类; 然后, 引入冲突比例因子来决定证据的修正方法, 并利用相似度对其进行局部或全局修正; 最后, 将修正后的证据进行检验与合成. 通过应用实例验证了所提出方法的有效性.

**关键词:** 证据理论; 冲突检验; 相似度; 修正

**中图分类号:** TP391

**文献标志码:** A

### A self-adaptive conflicting evidence test and combination approach

LIU Xi-liang, CHEN Gui-ming

(Equipment Management Engineering Department, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China. Correspondent: LIU Xi-liang, E-mail: purplelincoln@163.com)

**Abstract:** In the D-S evidence theory, conflicting coefficient cannot well depict the conflict between evidences, and counterintuitive results may be generated in the combination of highly conflicting evidence. Therefore, a self-adaptive conflicting evidence test and combination approach is proposed. Firstly, cosine between evidence vectors is used to measure the similarity degree, and conflicting evidence criterion is presented. The evidence is classified by conflict evidence detection coefficient. Then, the conflicting proportion coefficient is introduced to decide the modified method for the evidence, and the local modification or full modification is decided according to its similarity. Finally, the modified evidence is tested and combined. Application example illustrates the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** evidence theory; conflicting test; similarity; modification

## 0 引言

经典D-S方法<sup>[1-2]</sup>无法合成高度冲突的证据, 其合成结果有悖常理. 针对该问题, 国内外学者展开了广泛的研究, 总结起来主要有两大类: 一类是基于修正原始证据源的方法, 另一类是基于修改组合规则的方法. 随着研究的深入, 近年来又出现了一个新的研究方向——对于证据冲突程度的研究. 文献[3]首先指出了传统冲突系数存在的问题, 引入了pignistic概率距离与冲突系数, 并将两者结合起来描述冲突的大小; 文献[4]全面考虑了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值来度量证据之间的冲突程度; 文献[5]基于信息熵定义关联系数来判断冲突程度. 然而, 上述方法对于冲突程度的研究仅限于两个证据之间, 并未进行多证据之

间冲突程度的深入分析.

本文遵循第1类研究方法, 首先对证据进行冲突检验, 提出一种自适应冲突证据判定法则, 利用冲突证据检验因子定量描述证据间的冲突程度并对其进行分类, 对不同类型的证据采取不同的修正方法. 这种有针对性的处理方法既保留了非冲突证据向合理融合结果聚焦的能力, 又从最大限度上削弱了冲突证据对合成结果的影响. 最后对修正后的证据进行D-S合成, 实现了证据的合理融合.

## 1 经典冲突度量

D-S证据理论中用冲突系数 $k$ 来描述证据之间的冲突程度.

**定义1** (冲突系数 $k$ ) 若辨识框架内有 $N$ 条相

收稿日期: 2012-11-16; 修回日期: 2013-07-21.

基金项目: 国防预言基金项目(9140A27020309JB4701).

作者简介: 刘希亮(1983-), 男, 博士生, 从事多传感器数据融合、模式识别的研究; 陈桂明(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能故障诊断、信息融合等研究.

互独立的证据  $m_i$ , 其冲突系数为

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

其中  $m_i(A_j)$  表示第  $i$  条证据中第  $j$  个命题的基本概率赋值 (BPA).

冲突系数  $k$  用来反映证据之间冲突的程度, 数值越大说明冲突越大<sup>[6]</sup>. 然而,  $k$  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, 因此有必要对证据进行冲突检验, 区分冲突证据, 从而降低冲突性对合成结果的影响.

## 2 冲突证据检验与合成

目前, 常用的距离测度证据分类方法, 以证据距离作为衡量证据相似程度的标准. 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, 提出冲突证据判据来对证据进行分类, 最终区分冲突证据.

### 2.1 冲突证据判据

以每个证据的 BPA 为坐标建立一个  $R^n$  维空间,  $n$  代表辨识框架中命题的个数, 可以定义在此空间中的一组证据向量为  $\mathbf{p}_i = (m_i(A_1), m_i(A_2), \dots, m_i(A_n))^T, 1 \leq i \leq N$ , 则此空间称为证据向量空间.

**定义 2** (证据向量夹角余弦) 证据向量空间中任意两个证据向量  $\mathbf{p}_i$  和  $\mathbf{p}_j$  的夹角余弦为

$$\cos(\angle \mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j) = \frac{\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_j}{\sqrt{(\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i)(\mathbf{p}_j^T \mathbf{p}_j)}} = \text{Sim}_{ij}. \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_j = \sum_{k=1}^n m_i(A_k) m_j(A_k), \quad i, j = 1, 2, \dots, N;$$

$\text{Sim}_{ij}$  表示证据之间的相似度.

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 的两两比较转化为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.

证据  $m_i$  与其他证据的平均相似度为

$$\text{Sim}_i = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1, i \neq j}^N \cos \varphi_{ij}. \quad (3)$$

**定义 3** (冲突证据检验因子) 对于任意证据向量  $\mathbf{p}_i$ , 若有

$$\Delta_i = \frac{\beta - \text{Sim}_i}{\beta - \alpha}. \quad (4)$$

其中:  $\alpha = \min_{1 \leq i \leq N} \text{Sim}_i, \beta = \max_{1 \leq i \leq N} \text{Sim}_i$ . 则称  $\Delta_i$  为冲突证据检验因子.

当  $\Delta_i \rightarrow 0$  时, 表明  $m_i$  与其他证据相互支持, 属于同一类别, 冲突较小; 当  $\Delta_i \rightarrow 1$  时, 表明  $m_i$  与其他

证据高度冲突. 这样, 便通过  $\Delta_i$  实现了证据的分类. 由此即可得如下冲突证据判据.

**定义 4** (冲突证据判据) 对于辨识框架内的任意证据  $m_i$ , 若其冲突证据检验因子  $\Delta_i \leq \tau, 0 \leq \tau \leq 1$ , 则判定  $m_i$  为非冲突证据; 若  $\Delta_i > \tau$ , 则判定  $m_i$  为冲突证据.

### 2.2 证据的修正

Lefevre 等<sup>[7]</sup>认为, 冲突也是一种信息, 其中蕴含着某些有用的信息分量, 将其完全遗弃必然会造成信息的损失, 而把冲突信息提取分析并修正后加入组合规则, 则可得出合理的合成结果. 本文基于这一思想, 在证据分类的基础上判定冲突证据, 计算出冲突证据的数量及所占比例, 并按照相似度对其进行修正.

**定义 5** (冲突比例因子) 辨识框架内证据的冲突比例因子为

$$\eta = \frac{n}{N} \times 100\%, \quad (5)$$

其中  $n$  为冲突证据的数量.

冲突比例因子  $\eta$  反映了冲突证据占有所有证据的比例, 当  $\eta$  小于某一阈值  $\delta (0 \leq \delta \leq 1)$  时, 对证据源进行修正, 认为引起证据高度冲突是由个别证据造成的, 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, 使得冲突降到最低; 而当  $\eta$  大于  $\delta$  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”修正, 以减少冲突对合成结果的影响. 根据这一思想, 可以得到以下两种证据修正方法.

**方法 1** 当  $\eta < \delta$  时, 对冲突证据作局部修正, 可得

$$m'_i(A_j) = \begin{cases} \text{Sim}_i^{(d)} \cdot m_i(A_j), & A_j \neq \Theta; \\ \text{Sim}_i^{(d)} \cdot m_i(\Theta) + 1 - \text{Sim}_i^{(d)}, & A_j = \Theta. \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\text{Sim}_i^{(d)} = \text{Sim}_i / \beta \quad (7)$$

为冲突证据  $m_i$  的绝对相似度.

**方法 2** 当  $\eta \geq \delta$  时, 对所有证据作全局修正, 可得

$$m''_i(A_j) = \begin{cases} \text{Sim}_i^{(s)} \cdot m_i(A_j), & A_j \neq \Theta; \\ \text{Sim}_i^{(s)} \cdot m_i(\Theta) + 1 - \text{Sim}_i^{(s)}, & A_j = \Theta. \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\text{Sim}_i^{(s)} = \text{Sim}_i / \sum_{i=1}^N \text{Sim}_i \quad (9)$$

为证据  $m_i$  的相对相似度.

冲突证据经修正后,相似度小的命题  $A_j$  提供的确定性信息将减少,而不确定性元素  $\theta$  提供的不确定性信息将增加,故可削弱冲突证据对合成结果的影响。

### 2.3 证据合成步骤

新的证据合成方法是在冲突证据检验因子  $\Delta_i$  和冲突比例因子  $\eta$  共同作用下完成的. 设辨识框架内有  $N$  条相互独立的证据  $m_i$ , 则对证据源修正后的D-S合成模型为

$$\begin{cases} m(A) = \frac{1}{1-\tilde{k}} \sum_{\cap A_j=A} \prod_{1 \leq j \leq n} \tilde{m}_i(A_j), \\ A \subseteq \theta, A \neq \Phi; \\ m(\Phi) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\tilde{k} = \sum_{\cap A_j=\Phi} \prod_{1 \leq j \leq n} \tilde{m}_i(A_j); \quad (11)$$

$$\tilde{m}_i(A_j) = \begin{cases} m_i(A_j), & \Delta_i \leq \tau; \\ m'_i(A_j), & \Delta_i > \tau, \eta < \delta; \\ m''_i(A_j), & \Delta_i > \tau, \eta \geq \delta. \end{cases} \quad (12)$$

本模型通过冲突证据检验因子  $\Delta$  将原始证据分成非冲突证据和冲突证据,又利用冲突比例因子  $\eta$  决定冲突证据的修正方法,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  $\tau$  的要求,最后代入D-S模型进行合成. 具体合成流程如图1所示。

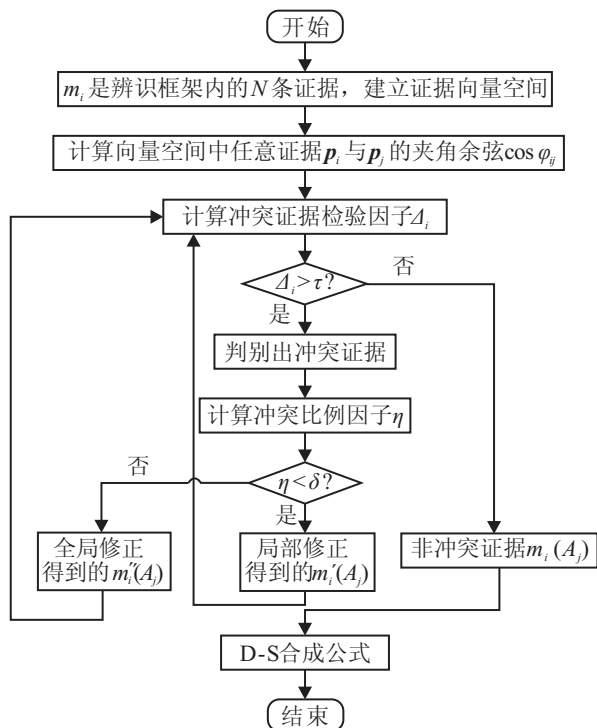


图1 证据合成流程

### 3 应用实例

某控制系统在辨识框架  $\theta = \{A, B, C\}$  内, 经测试获得以下证据:

$$\begin{aligned} m_1 &= \{0.30, 0.20, 0.50\}, m_2 = \{0.25, 0.25, 0.50\}, \\ m_3 &= \{0.90, 0.10, 0.00\}, m_4 = \{0.30, 0.30, 0.40\}, \\ m_5 &= \{0.20, 0.20, 0.60\}, m_6 = \{0.35, 0.30, 0.35\}, \\ m_7 &= \{0.50, 0.25, 0.25\}, m_8 = \{0.30, 0.20, 0.50\}. \end{aligned}$$

将本文方法与D-S<sup>[1-2]</sup>、文献[8]、文献[9]、文献[10]、文献[11]和文献[12]方法进行比较, 各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	$m(A)$	$m(B)$	$m(C)$	$m(\theta)$	决策结果
D-S	0.9759	0.0241	0	0	A
文献[8]	0.5280	0.0085	0.4635	0	A
文献[9]	0.2017	0.1788	0.6195	0	C
文献[10]	0.0001	0	0	0.9999	$\theta$
文献[11]	0.1535	0.1076	0.3180	0.4209	$\theta$
文献[12]	0.3876	0.2312	0.3812	0	A
方法1 ( $\tau = 0.80, \delta = 0.30$ )	0.0082	0.0048	0.9870	0	C
方法2 ( $\tau = 0.60, \delta = 0.50$ )	0.0001	0	0.9999	0	C

将证据依次合成后得到的  $m(C)$  值如图2所示。

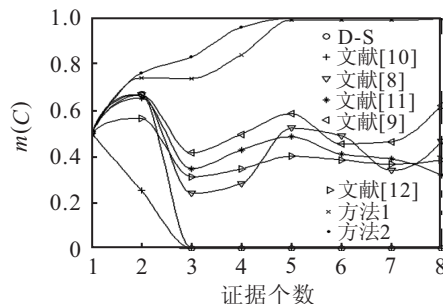


图2 各种证据合成方法的  $m(C)$  值

由表1和图2可知, 由于D-S方法和文献[10]方法无法合成冲突证据, 导致出现证据  $m_3$  以后  $m(C)$  始终为0; 文献[8]方法受冲突证据的影响较大, 缺乏稳定性, 无法识别出目标C; 文献[11]方法同样受冲突证据的影响, 从证据  $m_5$  以后  $m(C)$  没有增长, 保证了收敛速度, 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C; 文献[9]方法在一定程度上抵消了冲突证据带来的影响, 在收敛速度和分配精度方面有所提高, 能够识别出目标C; 文献[12]方法在冲突证据合成时显得过于保守, 合成结果分布较为平均, 可信度不高。

本文采用两种不同的证据合成策略——局部修正法(方法1)和全局修正法(方法2). 方法1认为证据  $m_3$  和  $m_7$  是冲突证据, 故利用绝对相似度对其局部修正后再进行检验与合成. 由图2可见, 方法1受冲突证据的影响较小, 能很快收敛到较高的分配精度. 方法2认为所有证据存在普遍冲突, 故利用相对相似度对所有证据全局修正后再进行检验与合成. 方法2基

本上不受冲突证据的影响, 3 个证据以后即可较好地识别出目标  $C$ 。

各种方法的  $k$  值分布如图 3 所示. 由于 D-S 方法与文献 [10]、文献 [11] 和文献 [12] 方法的  $k$  值一样, 图中只绘出了 D-S 方法的  $k$  值曲线. 当证据  $m_3$  出现后, D-S 方法的  $k$  值突然趋向于 1, 文献 [8] 和文献 [9] 方法都达到 0.94, 而本文所提出的两种方法的  $k$  值较小, 很显然受冲突证据的影响较小.

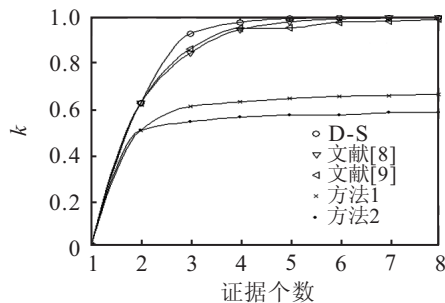


图 3 各种证据合成方法的  $k$  值

## 4 结 论

针对证据理论中冲突证据的检验与合成问题, 本文从以下 3 个方面进行了深入研究:

1) 建立了证据向量空间, 利用向量夹角余弦降低证据向量维数, 引入冲突证据检验因子定量描述证据的冲突程度, 并提出了冲突证据判据对冲突证据进行判断, 从而实现了证据分类.

2) 提出了一种冲突证据合成的新方法, 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检验与合成.

3) 应用实例表明, 本文方法能明确地检验出冲突证据, 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一命题证据, 对于复合证据, 由于合成目标较多, 计算量明显增大, 不利于快速精确融合. 下一步将对任意命题集合进行研究, 以提高融合速度, 使融合结果更加准确可靠.

## 参考文献(References)

[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.

[3] Liu W R. Analyzing the degree of conflict among belief functions[J]. Artificial Intelligence, 2006, 170(11): 909-924.  
 [4] 蒋雯, 彭进业, 邓勇. 一种新的证据冲突表示方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(3): 562-565.  
 (Jiang W, Peng J Y, Deng Y. New representation method of evidential conflict[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 32(3): 562-565.)  
 [5] 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.  
 (Deng Y, Wang D, Li Q, et al. A new method to analyze evidence conflict[J]. Control Theory & Application, 2011, 28(6): 839-844.)  
 [6] 耿涛, 卢广山, 张安. 基于直觉模糊证据合成的多传感器目标识别[J]. 控制与决策, 2012, 27(11): 1725-1729.  
 (Geng T, Lu G S, Zhang A. Intuitionistic fuzzy evidence combination algorithm for multi-sensor target recognition[J]. Control and Decision, 2012, 27(11): 1725-1729.)  
 [7] Lefevre E, Colot O, Vannoorenberghe P. Belief functions combination and conflict management[J]. Information Fusion, 2002, 3(2): 149-162.  
 [8] Murphy C K. Combining belief functions when evidence conflicts[J]. Decision Support Systems, 2000, 29(1): 1-9.  
 [9] 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(1): 27-32.  
 (Deng Y, Shi W K, Zhu Z F. Efficient combination approach of conflict evidence[J]. J of Infrared Millimeter Waves, 2004, 23(1): 27-32.)  
 [10] Yager R R. On the Dempster-Shafer framework and new combination rules[J]. Information Sciences, 1987, 41(2): 93-137.  
 [11] 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.  
 (Sun Q, Ye X Q, Gu W K. A new combination rules of evidence theory[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(8): 117-119.)  
 [12] 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.  
 (Li B C, Wang B, Wei J, et al. An efficient combination rule of evidence theory[J]. J of Data Acquisition & Processing, 2002, 17(1): 33-36.)

(责任编辑: 滕 蓉)