

## 采用聚类分析的冲突证据判定及合成方法

刘希亮, 陈桂明, 李方溪, 张倩

(第二炮兵工程大学 装备管理工程系, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 针对 D-S 证据理论中高度冲突证据合成时产生反直观结果的问题, 从聚类分析的角度提出了一种新的冲突证据合成方法。首先建立余弦相似度空间, 利用证据向量之间的夹角余弦定义冲突证据检测因子, 进而提出冲突证据判定冲突证据, 从而实现证据分类; 其次引入冲突比例因子决定冲突证据的修正方式, 通过绝对相似度对冲突证据进行局部修正, 通过相对相似度对证据进行全局修正; 最后将修正后的证据带入 D-S 公式进行合成。应用实例证明: 新方法能够判定并有效合成冲突证据, 具有较好的分类精度、收敛速度和稳定性。

**关键词:** 聚类分析; 冲突; 相似度; 证据理论

**中图分类号:** TP391   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2853-05

## Approach of conflict evidence judgment and combination based on clustering analysis

Liu Xiliang, Chen Guiming, Li Fangxi, Zhang Qian

(Department of Equipment Management Engineering, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** D-S evidence theory cannot combine highly conflict evidence and brings counterintuitive results. In order to solve this issue, a new conflict evidence combination approach was proposed from clustering analysis. Firstly, cosine similarity space in which evidence was regarded as space vector was built up, and cosine between evidence vectors was calculated to define conflict evidence detection coefficient. Based on the space and coefficient, conflict evidence criterion was presented to judge the conflict evidence, and the evidence was classified into similar evidence and conflict evidence. Secondly, conflict proportion coefficient was introduced to decide the modified method in which conflict evidence was modified by use of the absolute similarity and all the evidence was modified by use of the relative similarity. Finally, the modified evidence was put into D-S combination formula to combine. Application examples prove that this new method can judge conflict evidence and combine them effectively, and processes good classification precision, convergence speed and stability.

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

收稿日期: 2013-02-08; 修订日期: 2013-03-10

基金项目: 国防预研基金(9140A27020309JB4701)

作者简介: 刘希亮(1983-), 男, 博士, 主要从事多源信息融合方面的研究。Email: purplelincoln@163.com

## 0 引言

D-S 证据理论<sup>[1]</sup>作为一种不确定信息处理方法,能在不需要先验知识的情况下,以简单的推理形式得出融合结果。因此,广泛应用于信息融合、目标识别、故障诊断和决策分析等领域<sup>[2-11]</sup>。

冲突证据的合成一直是证据理论研究的焦点,目前解决这一问题的方法主要有两类:一是修正原始证据的方法,Murphy、邓勇等人<sup>[3-4]</sup>对证据进行预处理后再使用 D-S 组合规则,此类方法的不足之处是反复利用同一证据,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;二是基于修改组合规则的方法,Yager、孙全、李弼程、王栋等人<sup>[5-8]</sup>分别改进了组合公式,这些改进公式通常不具备结合性,没有简化组合规则,计算量大,不容易得到判断结果。

文中认为,D-S 组合规则具有完备的数学基础,主张从修改证据源的角度来解决冲突证据的合成问题。将采用聚类分析法对证据进行分类,建立余弦相似度空间,提出冲突证据判据来判断冲突证据,通过冲突比例因子决定其修正方式,最后将修正后的证据利用 D-S 合成规则实现证据融合。

## 1 证据理论基础

在证据理论中,用  $\Theta$  表示  $n$  个互不相容的命题构成的完备辨识框架,即  $\Theta=\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ ,  $2^\Theta$  称为  $\Theta$  的幂集,是  $\Theta$  所有子集的集合。

**定义 1** 基本概率赋值。若幂集  $2^\Theta$  上的集函数  $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  满足:

$$m(\Phi)=0 \quad (1)$$

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

则称  $m$  为基本概率赋值(BPA),  $m(A)$  表示证据对命题  $A$  的支持程度。【

**定义 2** D-S 证据合成规则。若辨识框架内有  $N$  条相互独立的证据  $m_i (1 \leq i \leq N)$ , 其合成规则为:

$$m(A)=\frac{1}{1-k} \sum_{\cap A_i=A} \prod_{1 \leq j \leq n} m_j(A_j), A \subseteq \Theta \quad (3)$$

式中

$$k=\sum_{\cap A_i=\Phi} \prod_{1 \leq j \leq n} m_j(A_j) \quad (4)$$

称为冲突系数,用来反映证据之间冲突的程度<sup>[9]</sup>。

从上述定义看出,D-S 组合规则完全舍弃了每个冲突,这可能把 100% 的确定性赋予少数意见,失去占主导地位的多数意见,而且只要有一个证据彻底不支持某一命题,那么合成结果永远为 0。从下面的例子可以发现证据理论存在的问题。

**证据合成悖论** 在辨识框架  $\Theta=\{a, b, c\}$  下,有 3 条相互独立的证据  $m_1=\{0.80, 0.15, 0.05\}$ ;  $m_2=\{0.00, 0.15, 0.85\}$ ;  $m_3=\{0.85, 0.15, 0.00\}$ 。

可以发现证据  $m_2$  和证据  $m_1, m_3$  是高度冲突的,根据公式(3)、(4)可得  $k=0.996 625$ ,  $m(a)=m(c)=0$ ,  $m(b)=1$ 。计算结果有悖常理,支持度很低的命题  $b$  在合成后获得了最大的支持。

## 2 证据的聚类分析

### 2.1 基本思想

聚类分析作为模式识别的常用方法,是基于对象集客观存在着若干自然类、每个自然类中个体的某些属性具有较强的相似性而建立的一种数据描述方法<sup>[10]</sup>。从这一角度出发可以对证据进行分类,将相互支持的证据视为相似证据,反之视为冲突证据,通过适当的准则函数将其分开,并寻求两类之间的关系,对冲突证据修正后实现合理证据融合。

在各种证据合成方法中,经常采用距离测度的分析方法,以证据距离作为衡量相似程度的标准。笔者从一个全新的视角——角度相似性测度对证据进行分类,将原始证据视为独立的空间向量,提出余弦相似度空间的概念,利用向量夹角余弦对证据进行聚类分析,最终区分冲突证据。

### 2.2 冲突证据判定法则

以辨识框架内每个证据的 BPA 为坐标建立一个  $R^n$  维空间( $n$  表示命题个数),则可以定义在此空间中的证据向量  $p_i=(m_i(A_1), m_i(A_2), \dots, m_i(A_n))^T (1 \leq i \leq N)$ , 所有证据组成一个含有  $N$  个证据向量的集合。

**定义 3** 余弦相似度空间。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:(1)  $S(x, y)=S(y, x)$ ;(2)  $0 \leq S(x, y) \leq 1$ ;(3) 当且仅当  $x=y$ ,  $S(x, y)=1$ ; 当且仅当  $x \perp y$ ,  $S(x, y)=0$ , 则称  $P$  为余弦相似度空间。

**定义 4** 向量夹角余弦。向量空间  $R^n$  中任意两个证据向量  $p_i$  和  $p_j$  的夹角余弦为:

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

式中:  $P_i^T P_j = \sum_{l=1}^n m_i(l)m_j(l)$  ( $i, j=1, \dots, N; l=1, \dots, n$ )。

证据  $m_i$  与其他证据的平均相似度为:

$$\overline{\text{Sim}}_i = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1, j \neq i}^N \text{Sim}_{ij} \quad (6)$$

运用聚类分析法得到冲突证据检测因子:

**定义 5** 冲突证据检测因子。向量空间  $R^n$  中的任意证据向量  $p_i$ , 若有:

$$\Delta_i = \frac{\beta - \overline{\text{Sim}}_i}{\beta - \alpha} \quad (7)$$

式中:  $\alpha = \min_{1 \leq i \leq N} \overline{\text{Sim}}_i, \beta = \max_{1 \leq i \leq N} \overline{\text{Sim}}_i$ , 则称  $\Delta_i$  为冲突证据检测因子。

当  $\Delta_i=0$  时, 表明证据  $m_i$  与其他证据完全相同, 属于同一类别, 不存在冲突; 当  $\Delta_i=1$  时, 表明证据  $m_i$  与其他证据高度冲突, 有别于其他类。这样, 通过冲突证据检测因子  $\Delta_i$  实现了证据的分类。由此可以得到以下的冲突证据判据:

**定义 6** 冲突证据判据。对于证据  $m_i$ , 若它的冲突证据检测因子  $\Delta_i \leq \tau$  ( $0 \leq \tau \leq 1$ ), 判定  $m_i$  为相似证据; 若  $\Delta_i > \tau$ , 判定  $m_i$  为冲突证据。

### 3 新的冲突证据合成方法

#### 3.1 证据的修正

Lefevre<sup>[11]</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, 可得到符合常理的结果。基于这一思想, 文中在对证据进行聚类分析的基础上判定冲突证据, 计算冲突证据的数量及所占比例, 按照相似性测度对其进行修正, 提出一种新的证据组合规则。

**定义 7** 冲突比例因子。辨识框架内证据的冲突比例因子为:

$$\eta = \frac{n}{N} \quad (8)$$

式中:  $n$  为冲突证据的个数。

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, 可以认为引起证据高度冲突是由个别冲突证据造成的, 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相似证据的 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  $\eta$  大于  $\delta$  时, 则认为证据之间存在较为普遍的冲突, 引起高度冲突的原因不只是个别证据, 需要对所有证据进行一次“大规模”地修正, 以减少冲突性对组合结果的影响。

求出证据  $m_i$  的平均相似度后, 可以得到该证据的绝对相似度

$$\text{Sim}_i^{(d)} = \frac{\overline{\text{Sim}}_i}{\beta} \quad (9)$$

和相对相似度

$$\text{Sim}_i^{(s)} = \frac{\overline{\text{Sim}}_i}{\sum_{i=1}^N \overline{\text{Sim}}_i} \quad (10)$$

根据冲突比例因子  $\eta$ , 可以得到以下两种证据修正方法。

(1) 当  $\eta < \delta$  时, 利用证据的绝对相似度, 对冲突证据做局部修正:

$$m_i'(A_j) = \begin{cases} \text{Sim}_i^{(d)} \cdot m_i(A_j), & A_j \neq \Theta \\ \text{Sim}_i^{(d)} \cdot m_i(\Theta) + 1 - \text{Sim}_i^{(d)}, & A_j = \Theta \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $m_i(A_j)$  为冲突证据  $m_i$  的 BPA。

(2) 当  $\eta \geq \delta$  时, 利用证据的相对相似度, 对所有证据做全局修正:

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

式中:  $m_i(A_j)$  为任意证据  $m_i$  的 BPA。

由此得到如下的证据源修正方法:

$$\tilde{m}_i(A_j) = \begin{cases} m_i(A_j) & \Delta_i \leq \tau \\ m_i'(A_j) & \Delta_i > \tau, \eta < \delta \\ m_i''(A_j) & \Delta_i > \tau, \eta \geq \delta \end{cases} \quad (13)$$

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, 因此, 可以抵消相似度小的证据对整个融合系统的影响。

#### 3.2 证据合成步骤

基于聚类分析的证据合成方法是在冲突证据检测因子  $\Delta_i$  和冲突比例因子  $\eta$  共同作用下完成的。首先计算冲突证据检测因子  $\Delta_i$ , 判断是否存在冲突证

据,若存在则根据冲突比例因子  $\eta$  决定其修正方式——局部修正或全局修正,最后代入 D-S 公式进行合成,具体步骤如图 1 所示。

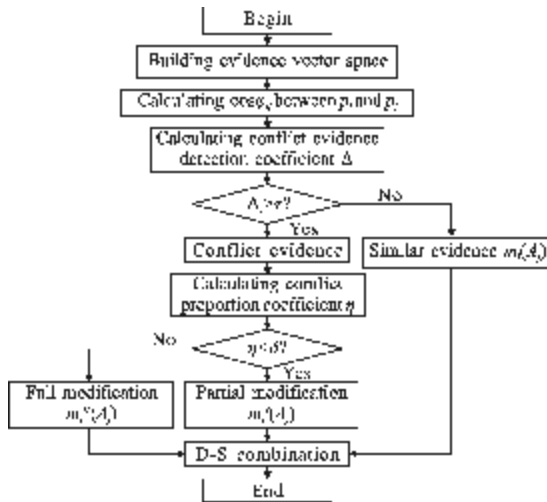


图 1 证据合成流程图

Fig.1 Flow chart of evidence combination

## 4 应用实例

### 4.1 在证据合成悖论中的应用

证据合成悖论已经说明 D-S 公式无法解决高度冲突证据的合成问题,为此使用文中方法对悖论中的证据重新合成。

由公式(5)计算证据向量之间的夹角余弦,公式(6)得到各证据的平均相似度  $\overline{\text{Sim}}_1=0.5452$ ,  $\overline{\text{Sim}}_2=0.0613$ ,  $\overline{\text{Sim}}_3=0.5145$ ,则  $\alpha=0.0613$ ,  $\beta=0.5452$ 。由公式(7)得到冲突证据检测因子  $\Delta_1=0$ ,  $\Delta_2=1$ ,  $\Delta_3=0.064$ 。由以上结果可知,证据  $m_1$ 、 $m_3$  为相似证据,证据  $m_2$  为冲突证据(由于证据数量较少,很容易就找出了冲突证据,因而此时并未设定阈值  $\tau$ )。此时的冲突比例因子  $\eta=33.33\%$ ,认为引起高度冲突的原因是证据  $m_2$ ,利用公式(11)对其进行局部修正,得到修正后的证据  $m_2'=\{0, 0.0168, 0.0955, 0.8877\}$ 。

此时再利用公式(3)对修正后的证据进行合成,经计算得  $k=0.376013$ ,  $m(a)=0.967385$ ,  $m(b)=0.032615$ ,  $m(c)=m(\theta)=0$ 。由结果可知,虽然存在冲突证据  $m_2$ ,但经过修正后合成结果并未受其影响,仍然得到了符合常理的结果。

### 4.2 在多目标识别中的应用

我军飞机利用目标识别系统,通过红外传感器

对敌方目标飞机(A, B, C)进行识别,在某一时间间隔内对敌方飞机进行连续侦察得到以下证据:

$$m_1=\{0.30, 0.60, 0.10\}; m_2=\{0.30, 0.55, 0.15\};$$

$$m_3=\{0.10, 0.00, 0.90\}; m_4=\{0.35, 0.55, 0.10\};$$

$$m_5=\{0.30, 0.40, 0.30\}; m_6=\{0.30, 0.60, 0.10\}。$$

为验证文中方法在多证据合成中的有效性,分别以 2~6 个证据依次递增的方式进行合成,把 D-S<sup>[1]</sup>、Murphy<sup>[3]</sup>、邓勇<sup>[4]</sup>、Yager<sup>[5]</sup>、孙全<sup>[6]</sup>、李弼程<sup>[7]</sup>、王栋<sup>[8]</sup>等人提出的方法和文中方法进行比较,合成结果见表 1。

以待识别目标 B 为例,对证据依次合成后得到的  $m(B)$  值如图 2 所示。

从表 1 和图 2 可以看出:当证据相似性较好时,应用各种方法都得到了比较理想的合成结果。但是,当出现冲突证据时,不同方法表现出了很大的差异:D-S 和 Yager 方法无法处理冲突证据,证据  $m_3$  出现后  $m(B)$  始终为 0;Murphy 方法受  $m_3$  严重影响,缺乏稳定性,从  $m_4$  以后合成结果才趋于收敛;邓勇方法在一定程度上抵消了  $m_3$  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;孙权提出的方法同样受证据  $m_3$  影响,从  $m_4$  以后  $m(B)$  增长极为缓慢,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,导致不能对目标 B 进行有效识别;李弼程提出的方法分配精度较低,不利于目标识别;王栋提出的方法在前 2 个证据合成时  $m(B)$  反而有所降低,与常理不符,随着证据数量的增加  $m(B)$  有所增加,但分配精度较低,也无法用来进行目标识别。

文中方法在分配精度、收敛速度和稳定性方面都取得了较好的效果,从  $m_3$  以后就能很快地收敛于较高的目标合成值,而且波动较小,准确判断出待识别目标 B。根据冲突证据检测因子  $\Delta_i$  和冲突比例因子  $\eta$  对证据合成采用了 2 种方法——局部修正(文中方法 1)和全局修正(文中方法 2),对于前 2 个证据,合成结果是一样的。方法 1 认为证据  $m_3$  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  $m_3$  影响较小,很快收敛到较高的分配精度;方法 2 认为证据之间普遍存在冲突,对所有证据利用相对相似度进行全局修正后再合成,从图 2 可以看出:3 个证据合成后能很好地识别出目标。

表 1 各种证据合成方法的结果比较

Tab.1 Comparison of results of all kinds of combination methods

Combination methods	$m_1, m_2$	$m_1, m_2, m_3$	$m_1, m_2, m_3, m_4$	$m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$	$m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6$	Recognition result
D-S method	m(A)=0.206 897 m(B)=0.758 621 m(C)=0.034 482 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.869 565 m(B)=0 m(C)=0.130 435 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.688 889 m(B)=0 m(C)=0.311 111 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.688 889 m(B)=0 m(C)=0.311 111 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.869 159 m(B)=0 m(C)=0.130 841 m( $\theta$ )=0	A
Method proposed by Murphy	m(A)=0.206 327 m(B)=0.757 967 m(C)=0.035 706 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.101 256 m(B)=0.449 372 m(C)=0.449 372 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.101 234 m(B)=0.695 422 m(C)=0.203 344 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.113 012 m(B)=0.757 066 m(C)=0.129 922 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.106 872 m(B)=0.786 213 m(C)=0.106 915 m( $\theta$ )=0	B
Method proposed by Deng Yong	m(A)=0.206 315 m(B)=0.757 944 m(C)=0.035 741 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.129 037 m(B)=0.618 053 m(C)=0.252 910 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.200 632 m(B)=0.771 661 m(C)=0.027 607 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.214 269 m(B)=0.783 413 m(C)=0.002 218 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.147 521 m(B)=0.852 235 m(C)=0.000 344 m( $\theta$ )=0	B
Method proposed by Yager	m(A)=0.090 00 m(B)=0.330 000 m(C)=0.015 000 m( $\theta$ )=0.565 000	m(A)=0.090 000 m(B)=0 m(C)=0.013 500 m( $\theta$ )=0.896 500	m(A)=0.003 100 m(B)=0 m(C)=0.001 400 m( $\theta$ )=0.995 500	m(A)=0.000 155 m(B)=0 m(C)=0.000 070 m( $\theta$ )=0.999 775	m(A)=0.000 047 m(B)=0 m(C)=0.000 007 m( $\theta$ )=0.999 946	$\theta$
Method proposed by Sun Quan	m(A)=0.235 912 m(B)=0.651 744 m(C)=0.058 537 m( $\theta$ )=0.053 807	m(A)=0.128 226 m(B)=0.204 437 m(C)=0.196 321 m( $\theta$ )=0.471 016	m(A)=0.138 616 m(B)=0.225 843 m(C)=0.155 712 m( $\theta$ )=0.479 829	m(A)=0.117 823 m(B)=0.283 432 m(C)=0.113 644 m( $\theta$ )=0.465 001	m(A)=0.123 556 m(B)=0.286 514 m(C)=0.119 021 m( $\theta$ )=0.471 009	$\theta$
Method proposed by Li Bicheng	m(A)=0.252 014 m(B)=0.684 056 m(C)=0.063 930 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.238 037 m(B)=0.392 845 m(C)=0.369 118 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.264665 m(B)=0.435713 m(C)=0.299622 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.320 109 m(B)=0.429 889 m(C)=0.250 002 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.333 435 m(B)=0.441 549 m(C)=0.225 026 m( $\theta$ )=0	B
Method proposed by Wang Dong	m(A)=0.147 029 m(B)=0.419 245 m(C)=0.037 314 m( $\theta$ )=0.402 712	m(A)=0.189 425 m(B)=0.308 219 m(C)=0.310 833 m( $\theta$ )=0.191 523	m(A)=0.210 822 m(B)=0.340 318 m(C)=0.250 424 m( $\theta$ )=0.198 336	m(A)=0.197 951 m(B)=0.468 018 m(C)=0.234 000 m( $\theta$ )=0.100 031	m(A)=0.210 015 m(B)=0.479 963 m(C)=0.210 021 m( $\theta$ )=0.100 001	B
Proposed method (1) $\tau=0.80$ $\delta=0.20$	m(A)=0.206 897 m(B)=0.758 621 m(C)=0.034 482 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.212 744 m(B)=0.735 832 m(C)=0.051 424 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.151 839 m(B)=0.838 541 m(C)=0.009 520 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.098 03 m(B)=0.989 566 m(C)=0.000 631 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.004 827 m(B)=0.995 019 m(C)=0.000 154 m( $\theta$ )=0	B
Proposed method (2) $\tau=0.15$ $\delta=0.30$	m(A)=0.206 897 m(B)=0.758 621 m(C)=0.034 482 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.101 146 m(B)=0.898 712 m(C)=0.000 142 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.034 297 m(B)=0.957 655 m(C)=0.009 520 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.000 619 m(B)=0.999 305 m(C)=0.000 0761 m( $\theta$ )=0	m(A)=0.000 021 m(B)=0.999 973 m(C)=0.000 006 m( $\theta$ )=0	B

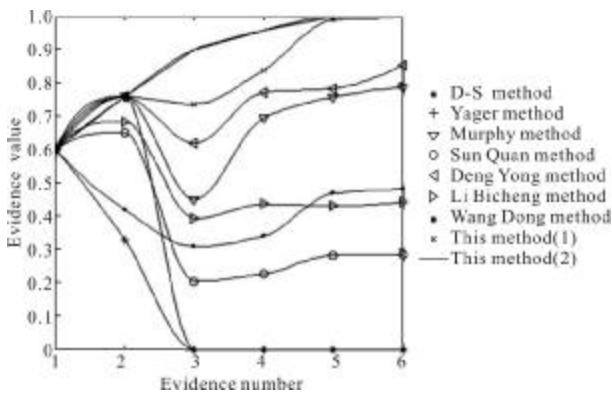


图 2 各种证据合成方法的 m(B)值

Fig.2 m(B) of all kinds of combination methods

### 5 结论

针对证据理论中冲突证据的判定与合成问题,文中进行了以下研究:

(1) 利用证据余弦相似度空间,从向量夹角余弦的角度对证据进行聚类分析,提出了冲突证据检测因子,对冲突证据进行判断;

(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,通过设定阈值  $\tau$  和  $\delta$  对冲突证据局部修正或全局修正,并对修正后的证据进行D-S合成;

(下转第 2870 页)

赫兹图像的过亮散斑噪声很有效。灰度拉伸有利于增强图像的对比度。倾斜的交叉“十”字滤波器在对灰度抖动修复的同时,更有利于保护图像倾斜的边缘。高斯卷积方法对于平坦部分的散点噪声去除很有效,但是不利于保护边缘、细节和纹理,且卷积次数要选择适当。低通滤波器可以滤除高频噪声,但同时会损失高频细节。而高通滤波锐化后的图像可以凸显图像的边缘。综合运用以上的办法,可以获得比较理想的图像降噪和图像增强效果。

当然,图像降噪和增强方法远不限于文中已经使用的方法。但是通常涉及非常复杂的数学运算,在通用性和直观性上,不如文中采用的办法<sup>[9-10]</sup>。更为重要的是,实用有效的图像降噪和图像增强手段应该与成像机理、实验系统和成像过程紧密结合起来,有针对性地原始图像中提取有效信息,而不是将图像处理与实验完全脱节。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Cunlin. Terahertz Sensing and Imaging [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [2] Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. Terahertz Science, Technology and Application [M]. Beijing: Peking University Press,

2007. (in Chinese)

- [3] Mittleman D M, Jacobsen R H, Nuss M C. T-Ray Imaging [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(3): 679-692.
- [4] John F Federici, Brian Schulkin, Feng Huang. THz imaging and sensing for security applications -explosives, weapons and drugs [J]. Semicond Sci Technol, 2005, 20(7): S266-S280.
- [5] Wai Lam Chan, Jason Deibel, Mittleman D M. Imaging with terahertz radiation [J]. Rep Prog Phys, 2007, 70: 1325-1379.
- [6] Fitzgerald A J, Berry E, Zinovev N N. An introduction to medical imaging with coherent terahertz frequency radiation [J]. Phys Med Biol, 2002, 47: R67-R84.
- [7] Liang Yuqing, Fan Wenhui, Xue Bing. Image enhancement techniques used for THz imaging [C]//SPIE, 2011, 8915: 819515-1-819515-6.
- [8] Buades A, Coll B, Morel J M. A review of image de-noising algorithms, with a new one [J]. Multi-scale Model Simul, 2005, 4(2): 490-530.
- [9] Li Qi, Xia Zhiwei, Ding Shenghui. Image de-noising of CW THz images by use of nonlocal means [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 517-522. (in Chinese)
- [10] Wu Wei, Bi Gang. Image restoration in T-ray imaging based on wavelet de-noising [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(5): 592-596. (in Chinese)

(上接第 2857 页)

(3) 应用实例证明,该方法解决了高度冲突证据的合成问题,其合成结果优于其他方法。需要指出的是,文中方法主要针对单个命题证据,并未涉及复合命题证据的合成。下一步的工作将放在任意命题集合,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] Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence [M]. Princeton: Princeton University Press, 1976.
- [2] Li Qihua, Li Jicheng, Shen Zhenkang. Dual band IR small target fusion detection using the D-S evidence theory[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(3): 266-271. (in Chinese)
- [3] Murphy C K. Combining belief functions when evidence conflicts[J]. Decision Support Systems, 2000, 29(1): 1-9.
- [4] Deng Yong, Shi Wenkang, Zhu Zhenfu. Efficient combination approach of conflict evidence [J]. Journal Infrared Millimeter Waves, 2004, 23(1): 27-32. (in Chinese)
- [5] Yager R R. On the Dempster-Shafer framework and new

combination rules[J]. Information Sciences, 1987, 41(2): 93-137.

- [6] Sun Quan, Ye Xiuqing, Gu Weikang. A new combination rules of evidence theory [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(8): 117-119. (in Chinese)
- [7] Li Bicheng, Wang Bo, Wen Jun, et al. An efficient combination rule of evidence theory [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2002, 17(1): 33-36. (in Chinese)
- [8] Wang Dong, Li Qi, Jiang Wen, et al. New method to combine conflict evidence based on pignistic probability distance [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1): 149-154. (in Chinese)
- [9] Li Kexin, Xu Guoxin. Method of air target recognition based on D-S evidential theory[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(9): 193-196. (in Chinese)
- [10] Sun Jixiang. Modern Pattern Recognition[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)
- [11] Lefevre E, Colot O, Vannoorenbergh P. Belief functions combination and conflict management[J]. Information Fusion, 2002, 3(3): 149-162.