

# D-S 理论中证据损耗分析及改进方法\*

徐凌宇<sup>1+</sup>, 张博锋<sup>1</sup>, 徐炜民<sup>1</sup>, 徐怀宇<sup>2</sup>, 郭非凡<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(上海大学 计算机科学与工程学院, 上海 200072)

<sup>2</sup>(加州大学 洛杉矶分校 计算机系, 洛杉矶 90095, 美国)

<sup>3</sup>(哈佛大学 贝斯医学中心, 波士顿 02215, 美国)

## Evidence Ullage Analysis in D-S Theory and Development

XU Ling-Yu<sup>1+</sup>, ZHANG Bo-Feng<sup>1</sup>, XU Wei-Min<sup>1</sup>, XU Huai-Yu<sup>2</sup>, GUO Fei-Fan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

<sup>2</sup>(Department of Computer Science, University of California, Los Angeles 90095, USA)

<sup>3</sup>(Beth Medical Center, Harvard University, Boston 02215, USA)

+Corresponding author: Phn: +86-21-56332451 ext 801, E-mail: lyxu@mail.shu.edu.cn, <http://www.shu.edu.cn>

Received 2003-06-12; Accepted 2003-08-12

**Xu LY, Zhang BF, Xu WM, Xu HY, Guo FF. Evidence ullage analysis in D-S theory and development. *Journal of Software*, 2004,15(1):69~75.**

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/69.htm>

**Abstract:** In this paper, it is found that there are errors in D-S combination rules even though the evidences are unconflict. The error, unanti-jamming and opposition during the evidence combination in traditional D-S theory are studied. An effort has been made to prove that the evidence ullage is caused by ill-suited definitions and ill-suited rules in the combination process. In this paper, new generic definitions and combination rules are also proposed. The evidence ullage in the compatible evidence combination process in terms of the definitions and rules is found and then solved. The experimental results show that the methodology developed here can not only solve the conflicts efficiently, but also produce reasonable results.

**Key words:** information fusion; Dempster-Shafer; evidence theory; combination rule; unconflict; conflict; evidence ullage

**摘要:** 分析了传统 D-S 理论在证据组合过程中的误差、抗干扰能力弱以及与人类思维相悖的原因;认为主要是由于部分定义和规则的局限性引发了组合过程中的证据损耗;提出了一种扩展的定义和组合规则,发现并解决了完全兼容证据组合过程中的证据损耗,有效地化解了冲突;理论分析和实验结果支持了方法的合理性与可行性。

**关键词:** 信息融合;Dempster-Shafer;证据理论;组合规则;兼容;冲突;证据损耗

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60203011 (国家自然科学基金)

**作者简介:** 徐凌宇(1965—),男,辽宁沈阳人,博士,副教授,主要研究领域为信息融合,不确定性决策;张博锋(1968—),男,博士,副教授,主要研究领域为智能人机交互系统;徐炜民(1949—),男,教授,主要研究领域为网络技术;徐怀宇(1969—),男,博士,主要研究领域为智能信息处理;郭非凡(1968—),男,博士,主要研究领域为病理生理及推理。

中图法分类号: TP18 文献标识码: A

证据理论被认为是多元不确定性信息融合的有效方法,其原理是对各自独立的结论通过组合给出一致性结果,实现信息互补.由 Dempster 首先提出<sup>[1]</sup>,后经 Shafer 完善<sup>[2]</sup>,该理论的局限性是在应用时往往得到与直觉相悖的结果,Yager 率先发现冲突证据组合时产生的问题,并提出将冲突信息部分归结为未知以减小冲突<sup>[3]</sup>,Dubois 则进一步提出组合中的冲突应适当予以保留<sup>[4]</sup>.此后的学者不断进行改进,比较一致的看法是使用“距离”衡量证据的相似度以缓解冲突<sup>[5-7]</sup>;划分子集区别对待<sup>[8,9]</sup>;采用优先级/加权组合思想<sup>[9-14]</sup>,其中文献<sup>[9-11]</sup>增加的可调节能力使融合结果更具有灵活性,便于融入人类经验.

我们在深入研究的基础上提出,比较完整的组合规则应具备以下几个特点:① 用一个更确切的概念比文献<sup>[5-9]</sup>的“距离/相似”更能从本质上量化组合过程中的证据“损失”;② 有一个因子比加权/优先方式更能清晰地表达证据冲突时结论的倾向性;③ 形式上应该更接近原有 D-S 规则的简单、易懂的方式,尽量减少现有规则中形式复杂或打补丁的方法;④ 更具有开放性,能够在整个融合过程中提供随时融入人类经验和处理方法的接口,使这一信息融合中的重要决策技术由“数学/符号”融合靠近“信息/智能”融合.

为此我们给出一种新规则,以便更为细致地描述这种组合行为,后文中将详细阐述其原理以及新方法对文献中长处继承与不足的克服.

## 1 D-S 证据组合规则及分析

### 1.1 定义

令  $\Theta$  为识别框架:

定义 1. 设函数  $m$  满足  $2^\Theta \rightarrow [0,1]$ ,且满足:

$$\begin{aligned} m(\emptyset) &= 0 \\ \sum m(A_i) &= 1 \end{aligned}$$

$m$  为基本概率函数,任取  $A_i \in \Theta$ ,若  $A_i \neq \emptyset$ ,则  $A_i$  为焦点元素.

### 1.2 组合规则

对于两组证据  $m_1, m_2$ ,有:

$$m_1 \oplus m_2(A) = c^{-1} \sum_{A=A_i \cap A_j} m_1(A_i) m_2(A_j) \quad (1)$$

其中,

$$c = \sum_{A_i \cap A_j \neq \emptyset} m_1(A_i) m_2(A_j) = 1 - \sum_{A_i \cap A_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(A_j).$$

对于多组证据组合:

$$m(A) = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n(A) = c^{-1} \sum_{\cap A_j = A} \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(A_j) \quad (2)$$

其中,

$$c = \sum_{\cap A_j \neq \emptyset} \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(A_j).$$

### 1.3 证据损失分析

下面的证据可以是原始证据,也可以是经过类似于文献<sup>[3,4,15]</sup>中处理过的证据,我们对最终组合过程中的损失及后果进行分析:

令“ $\equiv$ ”代表语义与数值完全一致;“ $=$ ”则代表仅数值相同; $\Delta$ 代表证据损失.

(1) 完全兼容证据组合中的误差

对于  $A \subset A_j$ ,若  $m_2(A) = m_2(A_j)$ ,根据式(1)有正交项  $m_1(A) m_2(A) \equiv m_1(A) m_2(A_j)$ ,则  $A =$ 对  $\{A_j\} - \{A\}$  可能性的估计如下:

① 两证据兼容

$$m_1: \{A\}: x_1 \dots;$$

$$m_2: \{A_j\}: x_2 \dots$$

若  $x_1, x_2 \rightarrow 1$ , 则  $m(A) \approx 1$ .

即结论按定义 1 为两证据共同绝对支持  $A$ , 认为可以排除  $\{A_j\} - \{A\}$ . 这里, 证据损失是  $m_2$  认为  $\{A_j\} - \{A\}$  的可能性与  $A$  同样大, 在组合过程中被“歪曲”.

## ② 多证据兼容

$$m_1: \{A\}: x_1 \dots; m_2: \{A_j\}: x_2 \dots; m_3: \{A_j\}: x_3 \dots; \dots; m_n: \{A_j\}: x_n \dots$$

根据式(2), 若  $x_1, x_2, \dots, x_n \rightarrow 1$ , 组合证据  $m(A) \approx 1, m(\{A_j\} - \{A\}) \approx 0$ , 则  $\Delta = n - 1$  个证据对  $\{A_j\} - \{A\}$  具有同等怀疑度. 人类推理的思维方式通常支持  $n - 1$  个专家的共同结论  $\{A_j\}$ , 组合时,  $n - 1$  个证据对  $\{A_j\} - \{A\}$  的可能性估计没有积累并携带到结论中, 式(1)、式(2)认为  $m_1(A) \times m_2(A_j) \equiv m_1(A) \times m_2(A)$ , 将这些“失真”不断放大并带到最终结论, 缘于一个证据对  $\{A_j\} - \{A\}$  的未知所导致. 按人类理解方式,  $m_1(A) \times m_2(A_j) \times \dots \times m_n(A_j)$  与  $m_1(A) \times \dots \times m_{n-1}(A) \times m_n(A_j)$  的语义完全不同.

## (2) 因冲突损失的证据

当证据部分冲突或完全冲突时, 按式(1)、式(2), 若  $A_i \cap A_j = \emptyset$ , 则正交项  $m_1(A_i) m_2(A_j) \equiv m_1(\emptyset) m_2(\emptyset) \equiv 0$ , 则  $\Delta =$  对  $\{A_i\}, \{A_j\}$  的可能估计, 若另有  $A_k$  且  $A_k \cap A_i \cap A_j = \emptyset$ , 则:

## ① 两证据冲突

$$m_1: \{A_i\}: x_{11} \quad \{A_k\}: x_{12}; \quad m_2: \{A_j\}: x_{21} \quad \{A_k\}: x_{22}.$$

若  $x_{11}, x_{21} \rightarrow 1$ , 则  $m(A_i) = m(A_j) \approx 0, m(A_k) \approx 1$ , 而真实语义是两个证据都认为  $\{A_k\}$  可能性很小, 这一组合过程提取了二者对  $\{A_k\}$  的可能认知, 遗弃了共同持有的对  $\{A_k\}$  的否定, 从而导致结论立场的改变.

## ② 多证据冲突

$$m_1: \{A_i\}: x_{11} \quad \{A_k\}: x_{12}; \dots; m_{n-1}: \{A_i\}: x_{n-1,1} \quad \{A_k\}: x_{n-1,2}; m_n: \{A_j\}: x_{n1} \quad \{A_k\}: x_{n2}.$$

若  $x_{11}, x_{21}, \dots, x_{n1} \rightarrow 1$ , 则  $m(A_i) = m(A_j) \approx 0, m(A_k) \approx 1$ , 若  $n - 1$  个结论支持  $\{A_i\}$ , 而 1 个否定  $\{A_i\}$ , 则结论不支持  $\{A_i\}$ .

上述组合证据损失具有代表性, 事实上,  $\Delta$  普遍存在于任何两个冲突证据, 对于轻微冲突, 证据损失带来的只是结果量的误差, 对于严重冲突, 将导致主证据损失从而引起最终结论错误.

## 1.4 证据损失对区间理论的影响

区间理论是证据理论的重要组成部分, 实际上是对信任范围的定义和描述, 对结论的可能性作进一步分析, 为最终决策提供依据, 这里我们讨论证据损失对区间估计带来的误差和错误. 下面的证据如无特殊说明, 均表示是组合证据. 根据定义有:

信任函数(支持度):  $Bel(A) = \sum_{A_i \in A} m(A_i)$ , 若  $m(A_i)$  存在前述问题, 则  $Bel(A)$  不可靠.

似然函数(不否定度):  $Pls(A) = 1 - Bel(A')$ , 该定义的问题出在  $1 - Bel(A')$ , 当两个证据没有其他共同支持点时, 则视为不否定, 对于前述冲突情况, 上式中对  $A$  的共同否定性信息完全损失, 此时,  $Pls$  不能客观反映合情度.

怀疑度(否定度):  $Dbt(A) = 1 - Pls(A)$ .

未知度:  $Igr(A) = Pls(A) - Bel(A)$ .

证据区间:  $EI(A) = [Bel(A), Pls(A)] = [Bel(A), 1 - Bel(A')]$ .

对于第 1.3 节中的问题, 主结论的信任区间都为  $[1, 1]$ , 否定度均为 0, 不仅未代表诸证据的意图, 反而对最终决策起了误导作用.

文献[5~15]对有关冲突进行了有效管理, 局部取得良好效果, 但偏于专用性, 且对于无冲突情况重视不足. 以 Josang<sup>[11]</sup>为代表的学者认为, 冲突时应考虑多数人的意见, 然而规则中未能对兼容性证据组合的“投票”给出详细的量化.

## 2 扩展组合规则定义及描述

### 2.1 一致性定义

我们发现导致证据损失的主要原因有两个:一个是证据的兼容性定义不够确切,另一个是组合过程中的损失.下面对证据兼容性进一步量化,以期提高对证据的理解精度.

**定义 2.** 设证据  $m_1, m_2$ , 若  $m(A) = \sum_{A=A_i \cap A_j} m_1(A_i) m_2(A_j) \neq 0$ , 则称  $m_1, m_2$  关于  $A$  存在一致性; 若对所有正交项  $m_1(A_i) m_2(A_j)$  均有  $A_i \cap A_j \neq \emptyset$ , 则  $m_1, m_2$  为一致性证据. 其中  $\hat{m}(A) = \sum m_1(A) m_2(A)$  为  $m_1, m_2$  关于  $A$  的完全一致性组合;  $\hat{m}(A) = \sum_{A_i \supset A} m_1(A_i) m_2(A) + \sum_{A_j \supset A} m_1(A) m_2(A_j)$  为  $m_1, m_2$  关于  $A$  的包容性组合;  $\hat{m}(A) = \sum_{\substack{A_i \supset A \\ A_j \supset A \\ A=A_i \cap A_j}} m_1(A_i) m_2(A_j)$  为  $m_1, m_2$  关于  $A$  的相交性组合.

这里将完全兼容更名为一致性并取消“完全”一词, 是为了表明这里仍然存在着诸多不一致: 其中  $m_1(A)$  与  $m_2(A)$  为完全一致;  $m_1(A)$  与  $m_2(A, B)$  为包容性一致;  $m_1(A, B)$  与  $m_2(A, C)$  为相交性一致. 定义后直观上就可以看出它们对  $A$  的支持度是有区别的.

**定义 3.** 设证据  $m_1, m_2$ , 若  $\sum_{A_i \cap A_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(A_j) \neq 0$ , 则  $m_1, m_2$  存在冲突, 其中  $\hat{m}(A) = \sum_{A_i \cap A = \emptyset} m_1(A_i) m_2(A) + \sum_{A_j \cap A = \emptyset} m_1(A) m_2(A_j)$  为对  $A$  的干扰性冲突组合;  $\hat{m}(\neg A) = \sum_{\substack{A_i \cap A = \emptyset \\ A \cap A_j = \emptyset \\ A_i \cap A_j = \emptyset}} m_1(A_i) m_2(A_j)$  为对  $A$  的否定性冲突组合.

**定义 4.** 证据损耗函数  $\Delta(T_1, T_2, A_i, A_j) = \begin{cases} 0, & A_i = A_j \\ 0 < \Delta \leq 1, & A_i \neq A_j \end{cases}$ , 完全一致性证据组合为无损组合, 其余为有损组合. 其中  $T_1, T_2$  分别为  $m_1, m_2$  的证据标识,  $\Delta$  按照定义 2 和定义 3 中的类别依次增大.

一个正交项的证据损耗因证据源、焦点、相遇对象的不同而有所不同, 证据损耗的定义描述了只有无损证据的组合结论才是绝对可靠的, 有损组合存在误差, 这样我们可以摆脱文献中兼容与冲突简单分类的局限性.

### 2.2 扩展组合规则

$$\begin{aligned}
 m_1 \hat{\oplus} m_2(A) = & c'^{-1} \left\{ \sum_{A=A_i \cap A_j} m_1(A_i) m_2(A_j) [1 - \Delta(T_1, T_2, A_i, A_j)] \eta(A, T_1, T_2, A_i, A_j) + \right. \\
 & \sum_{\substack{A_i \cap A = \emptyset \\ A_j = A}} m_1(A_i) m_2(A_j) [1 - \Delta(T_1, T_2, A_i, A_j)] \eta(A, T_1, T_2, A_i, A_j) + \\
 & \left. \sum_{\substack{A_j \cap A = \emptyset \\ A_i = A}} m_1(A_i) m_2(A_j) [1 - \Delta(T_1, T_2, A_i, A_j)] \eta(A, T_1, T_2, A_i, A_j) \right\} \\
 = & c'^{-1} \sum_{\substack{A_i \cap A_j = A, \text{ or} \\ A_i \cap A = \emptyset \wedge A_j = A, \text{ or} \\ A_j \cap A = \emptyset \wedge A_i = A}} m_1(A_i) m_2(A_j) [1 - \Delta(T_1, T_2, A_i, A_j)] \eta(A, T_1, T_2, A_i, A_j) \quad (3)
 \end{aligned}$$

或表示成:

$$\sum m_1(A_i) m_2(A_j) [1 - \Delta(T_1, T_2, A_i, A_j)] \eta(A, T_1, T_2, A_i, A_j).$$

其中  $A_i \cap A_j = A$  或  $A_i \cap A = \emptyset$  但  $A_j = A$  或  $A_j \cap A = \emptyset$  但  $A_i = A$ .

$$c' = 1 - \sum m_1(A_i) m_2(A_j) \Delta(T_1, T_2, A_i, A_j)$$

$$\hat{m}(A) = m_1 \hat{\oplus} m_2 \dots \hat{\oplus} m_n(A)$$

$$\begin{aligned}
&=c^{r-1} \left\{ \sum_{\cap A_j=A} \left[ \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(A_j) \right] [1-\Delta(\{T_i, A_j\})] \eta(A, \{T_i, A_j\}) + \sum_{\substack{\cap A_j=\emptyset \\ \text{and } \exists A_j: \\ A_j=A}} \left[ \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(A_j) \right] [1-\Delta(\{T_i, A_j\})] \eta(A, \{T_i, A_j\}) \right\} \\
&=c^{r-1} \sum_{1 \leq i \leq n} \left[ \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(A_j) \right] [1-\Delta(\{T_i, A_j\})] \eta(A, \{T_i, A_j\}) \quad (4)
\end{aligned}$$

其中,  $\cap A_j=A$  或  $\cap A_j=\emptyset$  但存在  $A_j=A$ ,

$$c'=1-\sum_{1 \leq i \leq n} \left[ \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(A_j) \right] \Delta(\{T_i, A_j\}).$$

这里,我们引入了两个重要参数(函数)对正交项的有效性和倾向性按定义 2、定义 3 定位.

$m_1(A_i)m_2(A_j)[1-\Delta(T_1, T_2, A_i, A_j)]$  表示正交项去掉因一致性不同而损耗后的保留(有效)部分,  $\Delta(T_1, T_2, A_i, A_j)$  表示  $m_1(A_i)m_2(A_j)$  相遇时的损耗.

$m_1(A_i)m_2(A_j)[1-\Delta(T_1, T_2, A_i, A_j)]\eta(A, T_1, T_2, A_i, A_j)$  表示有效证据中倾向  $A$  的比例,  $\eta(A, T_1, T_2, A_i, A_j)$  表示  $m_1(A_i)m_2(A_j)$  相遇时对  $A$  的倾向因子.

对于完全一致性证据,正交项  $m_1(A)m_2(A)$  完全支持  $A$ ,与传统 D-S 相同.

式(3)和式(4)中合并前的第 1 项是完全兼容证据,根据定义 2 可以进一步分解为 3 项,但从  $\Delta, \eta$  的定义已经能够对  $m_1(A)m_2(A)$  和  $m_1(A)m_2(AB)$  的结果加以区别,后者必定有适当损耗且应大部分支持  $A$ ,保留少部分支持  $(AB)$ ,从  $\Delta, \eta$  可以看出,最终多信源的融合结果能够有效区别  $m_1(A)m_2(A), m_1(AB)m_2(AC)$  和  $m_1(A)m_2(AB)$ .

对于式(4)多证据组合情况,例如  $m_1:\{A\}:1; m_2:\{A\}:1; \dots; m_{n-1}:\{A\}:1; m_n:\{C\}:1$ ,为简单假设不考虑证据源因素,则  $\hat{m}(C)=m_1(A)\dots m_n(C)\Delta(A, A, \dots, A, C)\eta(C, A, A, \dots, A)$ ,  $\hat{m}(A)=m_1(A)\dots m_n(C)\Delta(A, A, \dots, A, C)\eta(C, A, A, \dots, A, C)$ ,若假设  $\eta$  函数与证据数呈线性关系且认为含有高度一致性时  $\Delta(A, A, \dots, A, C)$  很小,则  $m(A)=0.99, m(C)=0.01$  为一组可能的答案,更符合人类逻辑,从而化解了前述问题.

### 2.3 新规则证据区间分析

由于对组合方式进行了修正,因此在区间定义形式不变的前提下,内容已发生了很大变化.

$Bel(A)=\sum_{A_i \subset A} \hat{m}(A_i)$ ,由于将未损耗的证据更多地保留下来,  $c'$  更接近于 1.因此  $Bel$  结果不容易被轻易放大.

$Pls(A)=1-Bel(A^+)$ ,且  $Bel(A^+)=\sum_{A_i \cap A=\emptyset} \hat{m}(A_i)$ ,由于倾向因子的作用,包含冲突在内否定  $A$  的信息没有被抛弃,而是

全部累加在  $A^+$  中,因此这里的  $Pls$  是合乎逻辑的.

同样解释前述冲突情况,若  $\eta$  仍采用公平法则,  $Bel$  和  $Pls$  变得很低.

怀疑度(否定度)  $Dbt(A)$  与未知度  $Igr(A)$  均有所改善.

对于第 1.3 节中的情况,主结论的信任区间  $EI$  都为  $[x, y]$ ,  $x, y$  趋近于 0,否定度趋近于 1,真实地反映了多证据的客观结论.

### 3 新规则分析

(1) 新方法涵盖传统 D-S 方法

若  $[1-\Delta(T_1, T_2, A_i, A_j)]\eta(A, T_1, T_2, A_i, A_j) = \begin{cases} 0 & A_i \cap A_j = \emptyset \\ 1 & A_i \cap A_j \neq \emptyset \end{cases}$ , 则式(1)  $\equiv$  式(3).

若  $[1-\Delta(\{T_i, A_j\})]\eta(A, \{T_i, A_j\}) = \begin{cases} 0 & \cap A_j = \emptyset \\ 1 & \cap A_j \neq \emptyset \end{cases}$ , 则式(2)  $\equiv$  式(4).

(2) 在文献[2~15]中使用兼容/冲突定义证据的基础上,新方法使用“一致性”定义,识别灵敏度高,由于定义的细化,在面临一致性细微差别的微弱优势证据时,新方法能够加以区别.

(3) 对于较难辨识的干扰性冲突,本文与文献[11]同样可以遵从多数人的意见.

(4) 完全兼容证据中的虚假现象具有更深的隐蔽性,本文着重从定义上对其进行分类,弥补了现有研究薄弱的地方.

(5) 考虑到证据的分类<sup>[5]</sup>、距离<sup>[6]</sup>、相似性<sup>[7]</sup>、分离<sup>[8]</sup>、划分子集<sup>[10]</sup>方法是对证据间总体冲突程度的区别,对个别冲突焦元不公平,本文中的损耗因子将证据间的相似/冲突度量到焦元;重新分配信任<sup>[7,10,15]</sup>和加权<sup>[12-14]</sup>对证据本身的权威性和证据面临不同结论时表现出的动态权威性兼顾不够,文中倾向因子进一步量化到证据项,描述同一证据的同一证据项在遇到同一证据的不同证据项或不同证据的同一证据项时表现出不同的倾向性.使用证据损耗与倾向因子相结合可以实现损耗“保留量”与倾向性的各自独立调整.

(6) 文献[7,10]通过补充定义和增加规则的方式将上面(5)中的两个方面技术结合,对特定领域也取得了很好的效果.但我们希望给出的组合规则形式上遵照 Dempster 的原有表达方式,不另行补充公式会具有更好的通用性.

## 4 实验

我们对肝区非病变性疼痛溯源进行研究:

基本病源: $\{A\}$ :肝, $\{B\}$ :脊髓, $\{C\}$ :脑.

3个证据源:肝胆科、神经外科、脑神经内科.

根据本例的具体情况,有意义参数及范围见表1,其中X表示结论为证据源专业,Y则相反.

**Table 1** Areas of parameter values

**表 1** 参数取值范围

Evidence classification		$A(\{T_k, A_i\})$ (%)				$\eta(A, \{T_k, A_i\})$ (%)			
D-S standard	Extended standard	XXX	XXY	XYX	YYY	XXX	XXY	XYX	YYY
Complete unconflict	Complete consistency	----	0	0	----	----	100/0	100/0	----
	Contained consistency	----	1~5	1~5	----	----	5~95	5~95	----
	Superposed consistency	----	1~10	1~10	----	----	10~90	10~90	----
Conflict	Disturbed conflict	50~90	10~50	10~30	40~80	10~70	40~90	50~80	10~70
	Negative conflict	50~90	10~50	10~30	40~80	10~70	0	0	0

这里举例说明表1的XXY中的一种情况:两个神经科结论(B,C),而一个肝胆科结论是B,认为可能是由于肝胆科对C未知,则结论仍为(B,C).

参数取值表面上看范围不易把握,但实际较简单.例如,上边的例子是(B,C)96%×90,是根据经验而来,由于参数较多故略.要说明的是,这些例子中的参数是在没有精确复杂计算的情况下凭经验取得的,效果仍然可观,方法可行,且不同的经验可以解决不同的问题而不必更改规则.类似于本例问题,文献[2~15]中的方法在处理多变问题时柔性较弱(见前述分析).

其中5个简单例子,两种方法都能给出正确答案,对于复杂问题,本文的能力更强.

我们挑选了30个具有代表性的例子,计算结果见表2.

**Table 2** Results and comparison

**表 2** 计算结果及对照

Examples classification	Quantification	Example number	D-S rules	New rules
Complete unconflict	$c=1$	10	3	8
General conflict	$0.3 \leq c < 1$	10	2	8
Serious conflict	$0 \leq c < 0.3$	10	0	7

使用损耗与倾向性进行各自独立的判断更容易使用经验和直觉,且损耗点明显,更容易发现在哪个具体地方可能出错.

## 5 结 论

给出的一套完整规则以取代打补丁的方式,即新定义和新规则能较为系统地应对融合中出现的普遍性和特殊性问题,便于将其他理论与技术融入;在保持原有 D-S 形式的前提下实现了扩展。

从理论和实例分析上看,本文提出的方法其主要特点是增强了对兼容证据中隐含问题的辨识;证据损耗与倾向因子的定义使其能够面对复杂多变的冲突环境;提高了对噪声证据的抵抗力,具有较好的鲁棒性.实验表明,损耗因子和倾向因子在应用中可以直接依靠经验取得,并不需要过于复杂的选择与演算,故方法可行。

将来自不同证据源的各异信息由“数学”融合向“语义”融合更接近一步,以期充分利用人类先验知识处理分歧性信息。

**致谢** 本文方法受第一作者导师、著名信息融合专家赵海教授/博士“信息代谢”思想的启发,在此深表感谢。

### References:

- [1] Dempster A. Upper and lower probabilities induced by multivalued mapping. *Annals of Mathematical Statistics*, 1967,38(2): 325~339.
- [2] Shafer G. *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton: Princeton University Press, 1976.
- [3] Yager R. Using approximate reasoning to represent default knowledge. *Artificial Intelligence*, 1987,31(1):99~112.
- [4] Dubois D, Prade H. Default reasoning and possibility theory. *Artificial Intelligence*, 1988,35(2):243~257.
- [5] He B, Mao SY, Zhang YW. Evidence combination based on evidence classification. In: Shunjun W, ed. *Proc. of the 2001 CIE Int'l. Conf. on Radar*. Piscataway: IEEE, 2001. 732~736.
- [6] Joussleme AL, Grenier D, Bosse E. A new distance between two bodies of evidence. *Information Fusion*, 2001,2(2):91~101.
- [7] Wang Z, Hu WD, Yu WX. A combination rule of conflict evidence based on proportional belief assignment. *Acta Electronica Sinica*, 2001,29(z1):1852~1855 (in Chinese with English abstract).
- [8] Joshi AV, Sahasrabudhe SC, Shankar K. Sensitivity of combination schemes under conflicting conditions and a new method advances in artificial intelligence. In: Wainer J, Carvalho A, eds. *Proc. of the 12th Brazilian Symp. on Artificial Intelligence*. Berlin: Sping-Verlag, 1995. 39~48.
- [9] Su YS, Guan JW, Bell DA. Evidence theory and rough set theory. *Journal of Software*, 1999,19(3):277~283 (in Chinese with English abstract).
- [10] Lefevre E, Colot O, Vannoorenberghe P. A generic framework for resolving the conflict in the combination of belief structures. In: Sotk A, Rom S, Livie H, eds. *Proc. of the 3rd Int'l. Conf. on Information Fusion*. Sunnyvale: Int.Soc.Inf.Fusion, 2000. 11~18.
- [11] Josang A. The consensus operator for combining beliefs. *Artificial Intelligence*, 2002,141(1-2):157~170.
- [12] Lefevre E, Colot O, Vannoorenberghe P. Belief function combination and conflict management. *Information Fusion*, 2002, 3(2):149~162.
- [13] Yager RR. On the aggregation of prioritized belief structures. *IEEE Trans. on Systems*, 1996,26(6):708~717.
- [14] Liu DY, Yang K, Tang HY. A convex evidence theory model. *Journal of Computer Research and Development*, 2000,37(2): 175~181 (in Chinese with English abstract).
- [15] Sun Q, Ye XQ, Gu WK. A new combination rules of evidence theory. *Acta Electronica Sinica*, 2000,28(8):117~119 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献:

- [7] 王壮,胡卫东,郁文贤.基于均衡信度分配准则的冲突证据组合方法. *电子学报*,2001,29(z1):1852~1855.
- [9] 苏运霖,管纪文,Bell DA.证据论与约集论. *软件学报*,1999,19(3):277~283.
- [14] 刘大有,杨鲲,唐海鹰.凸函数证据理论模型. *计算机研究与发展*,2000,37(2):175~181.
- [15] 孙全,叶秀清,顾伟康.一种新的基于证据理论的合成公式. *电子学报*,2000,28(8):117~119.