广义证据理论的基本框架

邓勇[1,4]，蒋雯[2]，韩德强[3]

（1.西南大学计算机与信息科学学院，400715，重庆；2. 西北工业大学电子信息学院，710072，西安；
3. 西安交通大学综合自动化研究所，710049，西安；4.上海交通大学电子信息与电气工程学院，200240，上海）

摘要：针对经典证据理论不能有效处理辨识框架不完整情况下的信息融合问题，提出了一种广义证据理论.新理论定义了广义基本概率指派函数，对空集的广义基本概率指派大小表明了支持辨识框架不完整命题的程度，提出了能够融合广义基本概率指派的广义组合规则，该组合规则是一个与空集基本概率指派相关的函数，同时满足交换律和结合律.广义证据理论是经典证据理论的推广，当空集赋值为零时，广义证据理论退化为经典的证据理论.用算例表明了所提出的广义证据理论的有效性.

关键词：信息融合；广义证据理论；广义基本概率指派；广义证据组合规则；辨识框架

中图分类号：TP391 **文献标志码**：A **文章编号**：0253-987X(2010)12-0119-06

Basic Frame of Generalized Evidence Theory

DENG Yong[1,4], JIANG Wen[2], HAN Deqiang[3]

(1. College of computer and information science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi′an 710072, China; 3. Institute of Integrated Automation, Xi′an Jiaotong University, Xi′an 710049, China; 4. School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The basic assumption of classical Dempster-Shafer theory of evidence is that the frame of discernment is complete. However, the frame of discernment is often incomplete in real data fusion application systems. A generalized evidence theory (GET) is proposed to solve this problem in this paper. The generalized basic probability assignment (GBPA) is defined. The value assigned to the empty set shows the support degree to incomplete frame of discernment. A new combination rule, called generalized combination rule (GCR), is proposed to handle evidence combination. It is shown that the proposed combination rule satisfies both commutative law and associative law. Another desirable property of the proposed GET is that it will be reduced as the classical evidence theory when the GBPA to empty set is zero. Some numerical examples are used to show the efficiency of the proposed GET.

Keywords: information fusion; generalized evidence theory; generalized basic probability assignment; generalized combination rule; discernment frame

信息融合技术是协同利用多源信息以获得对事物或目标的更客观、更本质认识的信息综合处理技术，是提高智能系统智能化程度的关键技术之一[1]. Dempster-Shafer 证据理论（下文简称为证据理论）最初由 Dempster 于 1967 年提出，他的学生 Shafer 在 1976 年将其进一步推广[2]. 该理论把概率

收稿日期：2010-05-29. 作者简介：邓勇（1975—），男，教授，博士生导师. 基金项目：国家重点基础研究发展规划资助项目（2007CB311006）；国家自然科学基金资助项目（60874105，60904099）；教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目（NCET-08-0345）；上海市青年科技启明星计划资助项目（09QA1402900）；重庆市自然科学基金资助项目（CSCT，2010BA2003）.

论中的基本事件空间拓宽为基本事件的幂集(又称为辨识框架),在辨识框架上建立了基本概率指派函数(Basic Probability Assignment,BPA).此外,证据理论还提供了一个 Dempster 组合规则,该规则可以在没有先验信息的情况下实现证据的融合.特别地,当 BPA 只在辨识框架的单子集命题上进行分配时,BPA 就转换为概率论中的概率,而组合规则的融合结果与概率论中的 Bayes 公式相同.从这个角度来看,D-S 证据理论能够比概率论更有效地表示和处理不确定信息,这些特点使其在信息融合领域得到了广泛的应用.

证据理论虽然有以上诸多优点,但是也存在着一些问题有待解决,这些共性关键问题在很大程度上制约了它的应用推广.例如,基于证据理论的系统计算复杂度随着辨识框架中单子集命题数目的增长呈指数增长,无法应用到某些实时性要求较高的军事应用系统.另外一个广受关注的问题是 D-S 组合规则在证据高度冲突时,常常会得出与常理相悖的结论.第三个问题是如何合理地生成 BPA 函数.

针对第一个问题,在实时性要求比较高的场合,常常要根据具体情况在运算前做一些预处理工作,或者使用近似算法.文献[3-4]给出了这个研究方向上有代表性的工作,较好地解决了算法复杂性问题.

与第一个问题相比,第二个问题更为严重,因为在实际的应用中,特别是在军事应用领域,由于现场自然环境恶劣或人为干扰等原因,常常导致传感器的报告相互冲突,如果不能有效处理证据理论组合规则问题,实际应用系统就无法判断融合结果是否正确,无法实现有效决策,将极大地影响融合系统的性能[5-6].

BPA 生成方法也非常值得研究,这主要表现在两个方面:一方面,证据理论中只要给出各个信息源的 BPA 函数,使用 D-S 组合规则就可以得到融合结果,因此正确生成 BPA 是应用证据理论的基础,BPA 是否合理直接关系到融合结果是否合理;另一方面,上述证据理论的第一个问题(算法实时性)和第二个问题(冲突证据处理)事实上都与 BPA 有着重要的关系[5],而第二个问题更是直接与 BPA 生成相关,但现有的解决冲突信息融合的方法却都忽视了这一点.是什么样的 BPA 生成方法导致了高度冲突的 BPA? 随着对这一问题的深入研究,我们认为,在证据理论框架下,导致证据冲突的主要原因有两点,一个是辨识框架不完整,另外一个是传感器报告本身的不可靠性.现有的修改组合规则和修改数据模型的方法都不能从根本上解决冲突证据的融合.例如,根据证据的可信度调整数据模型在传感器受干扰时是有效的,但在辨识框架不完整而导致冲突的情况下却无效.

对证据冲突的问题,一些研究人员另辟蹊径,提出了新的理论模型,目前主要有两个,第一个是比利时的 Smets 提出的可传递信度模型(Transferable Belief Model,TBM)[7],该模型为双层结构,第一层是信度传递层,第二层是决策层,将信度函数利用转换方法获得概率之后进行决策.TBM 引入了封闭世界和开放世界的概念,这是该理论的一大特点.但是,目前的研究并没有系统地把辨识框架不完整与冲突的表示和处理有机地结合起来,目前其应用仍然局限于封闭世界.第二个是由 Dezert 和 Smarandache 提出的 Dezert-Smarandache 理论(DSmT)[8],与经典证据理论相比,DSmT 为解决证据矛盾时的证据组合问题提供了一个新的思路,但是 DSmT 计算量过大,且在低冲突情况下融合效果次于 DST,更重要的是,DSmT 没有考虑辨识框架不完整情况,这使得该理论在冲突处理以及实时性要求较高领域的应用有着很大的局限性.

综上所述,证据高度冲突这个问题仍然需要新的更为合理的理论与模型.新的理论和模型应该可以有效处理辨识框架不完整这一情况,且计算复杂度不应该高于经典证据理论.在这种背景下,我们提出了一种广义证据理论,在该理论体系下探索解决高度冲突证据的处理和融合以及 BPA 生成这两个问题.

本文的主要工作是提出广义证据理论,为后续关键问题的研究和应用提供理论基础.

1 广义基本概率赋值及相关定义

经典的证据理论将概率论的基本事件空间推广为辨识框架,其定义如下[2].

定义 1 设 U 是变量 X 的所有可能值的穷举集合,并且 U 中的元素是互斥的,称 U 为 X 的一个辨识框架.

U 由一完备的互不相容的陈述集合组成,U 的幂集 2^U 构成命题集合 2^U.当 U 中元素的个数为 n 时,命题集合所代表的空间大小为 2^n.

定义 2 设 U 为识别框架,U 的幂集 2^U 构成命题集合 2^U,$\forall A\subset U$,如果函数 $m:2^U\to[0,1]$ 满足

$$\sum_{A\subseteq U}m(A)=1(1)m(\varnothing)=0 \tag{1}$$

$$m(\varnothing)=0 \tag{2}$$

则称 m 为框架 U 上的基本概率指派(Basic Probability Assignment, BPA). BPA 反映了证据对识别框架中的命题 A 的支持程度,即 $m(A)$. 若 $\forall A\subset U$,且满足 $m(A)>0$, 则称 A 为焦元. 所有的焦元集合称为核.

由式(1)、式(2)可以看出,经典证据理论的 BPA 是建立在辨识框架上的,且限定空集$\varnothing$的 BPA 为 0,这就使得经典证据理论只能是一个处理封闭世界的理论. 所谓封闭世界,就是默认辨识框架中的命题是可穷尽且完整的. 现实生活中这样的例子很多,例如骰子的点数就有 1、2、3、4、5、6 这 6 种可能. 但是在一些应用领域,由于未知信息,使得我们无法给出完整的辨识框架. 例如,在目标识别系统中,已知道敌方的目标类型为 a、b 和 c,但是敌方可能还有一个秘密研制并未公开的目标 d,在这种情况下,辨识框架$\{a,b,c\}$就是不完整的,就是一个开放世界问题. 应该说,随着人们认识的深入,开放世界是绝对的,封闭世界是相对的. 例如,在没有 SARS 之前,有关肺炎的辨识框架肯定就是不完整的. 科技的发展会使得辨识框架不断扩展和完善. 显而易见,经典证据理论只能处理和描述封闭世界问题,很大程度上制约了经典证据理论的应用.

本文提出的广义证据理论(GET)是建立在广义基本概率指派上的.

定义 3　设 U 为开放世界的辨识框架,U 的幂集 2^U 构成命题集合 2^U_G, $\forall A\subset U$, 如果函数 $m:2^U_G\to[0,1]$ 满足

$$\sum_{A\subseteq U} m_G(A)=1 \tag{3}$$

则称 m 为框架 U 上的广义基本概率指派(Generalized Basic Probability Assignment, GBPA). GBPA 与经典 BPA 的区别是没有式(2)的限制,也就是 $m(\varnothing)$并不需要强制为 0. 换言之,空集可以是焦元,也可以成为核的一部分. 如果 $m(\varnothing)$等于 0,GBPA 就退化为经典的 BPA.

在 GET 中,我们希望用空集$\varnothing$来建模开放世界,因此我们强调,GET 中的$\varnothing$不是传统意义上的空集,它对应的是辨识框架中没有的任何一个命题或是命题的组合. 从这个角度看定义 3 中使用的 2^U_G,表明幂集中的空集$\varnothing$是表示辨识框架以外的命题,而不是经典集合理论中的空集概念. 同理,在式(3)中 m_G 表示 GBPA 还分配给了辨识框架外的命题. 这里作一约定,本文中的基本概率指派如无特别说明都是指 GBPA,为了表示方便,仍然沿袭经典证据理论的表示方法,不再用下标 G 区分相关概念. 基于类似的思路,给出广义信度函数(Generalized Belief Function, GBF)和广义似真函数(Generalized Plausible Function, GPF).

定义 4　给定一个 GBPA,命题 A 的 GBF 可以表示为 $G_B:2^U\to[0,1]$满足

$$G_B(A)=\sum_{B\subseteq A} m(B) \tag{4}$$

$$G_B(\varnothing)=m(\varnothing) \tag{5}$$

定义 5　给定一个 GBPA,命题 A 的 GPF 可以表示为 $G_{Pl}:2^U\to[0,1]$满足

$$G_{Pl}(A)=\sum_{B\cap A\neq\varnothing} m(B) \tag{6}$$

$$G_{Pl}(\varnothing)=m(\varnothing) \tag{7}$$

在定义 4 和定义 5 中,强制定义 $G_B(\varnothing)$和 $G_P(\varnothing)$都等于$\varnothing$的 GBPA 值,这样定义是符合逻辑的. 因为$\varnothing$是辨识框架以外的命题,本身得不到辨识框架内命题的支持,也无法确认辨识框架外是否有其他命题支持,所以其 GBF 和 GPF 重合. 对辨识框架中其他不是$\varnothing$的命题 A 来说,GBF 可以看做是广义下概率函数,GPF 可以看做是广义上概率函数,GBF 和 GPF 构成了一个概率区间,可以很容易地证明对命题 A 而言,有下列关系存在

$$G_B(A)\leqslant G_P(A) \tag{8}$$

针对上面的定义下面给出一些算例.

例 1　设辨识框架为$\{a,b,c\}$,GBPA 可以表示为

$$m(a)=0.6;\ m(b)=0.2;\ m(b,c)=0.2$$

例 1 中的 GBPA 只在非空集的命题上进行分配,也就是 $m(\varnothing)=0$,此时 GBPA 与 BPA 没有区别.

$$G_B(a)=0.6 \qquad G_P(a)=0.6$$
$$G_B(b)=0.2 \qquad G_P(b)=0.4$$
$$G_B(c)=0 \qquad G_P(c)=0.2$$
$$G_B(b,c)=0.4 \qquad G_P(b,c)=0.4$$

例 1 计算的结果表明,当 $m(\varnothing)=0$ 时,基于 GBPA 的 GBF 和 GPF 与经典证据理论辨识框架幂集空间中的信度函数和似真函数结果相同.

例 2　设辨识框架为$\{a,b,c\}$,GBPA 可以表示为

$$m(a)=0.6;\ m(b)=0.2;\ m(b,c)=0.1;$$
$$m(\varnothing)=0.1$$

例 2 中的 GBPA 分配到了空集上. 各命题对应的 GBF 和 GPF 如下

$$G_B(a)=0.6 \quad G_P(a)=0.6$$
$$G_B(b)=0.2 \quad G_P(b)=0.3$$
$$G_B(c)=0 \quad G_P(c)=0.1$$
$$G_B(b,c)=0.1 \quad G_P(b,c)=0.3$$
$$G_B(\varnothing)=0.1 \quad G_P(\varnothing)=0.1$$

2 广义组合规则

定义 6 经典证据理论的 Dempster 组合规则可以将两个 BPA 进行融合，该规则定义为

$$m(A)=\frac{\sum_{B\cap C=A} m_1(B)m_2(C)}{1-k} \tag{9}$$

其中

$$k=\sum_{B\cap C=\varnothing} m_1(B)m_2(C) \tag{10}$$

在 GBPA 的基础上，我们提出广义组合规则(Generalized Combination Rule, GCR).

定义 7 在广义证据理论中，设$\varnothing_1\cap\varnothing_2=\varnothing$，即空集和空集的交集仍然是空集，给定两个 GBPA，定义 GCR 为

$$m(A)=\frac{(1-m(\varnothing))\sum_{B\cap C=A} m_1(B)m_2(C)}{1-K} \tag{11}$$

$$K=\sum_{B\cap C=\varnothing} m_1(B)m_2(C) \tag{12}$$

$$m(\varnothing)=m_1(\varnothing)m_2(\varnothing) \tag{13}$$

$$m(\varnothing)=1 \text{ 当且仅当 } K=1 \tag{14}$$

关于 GCR 的具体使用方法可以参考第 4 节的算例.

3 GET 的讨论

3.1 GET 的一些性质

GET 具有下列一些性质.

性质 1 当 $m(\varnothing)=0$ 时，GBPA 就退化为 BPA. 更一般地，如果 GBPA 只在单子集上进行分配时，GBPA 就退化为概率论中的概率.

性质 2 对组合规则而言，如果 $m(\varnothing)=0$，则 GCR 退化为经典证据理论中的 Dempster 组合规则. 更一般地，如果 GBPA 只在单子集上进行分配时，GCR 融合结果与概率论中的贝叶斯公式结果相同.

性质 3 GCR 既满足交换律，又满足结合律. 这一特点使得基于 GCR 的融合结果与数据的组合次序无关.

限于篇幅，本文略去以上性质的证明.

3.2 关于 $m(\varnothing)$ 及冲突相关问题

在经典证据理论中，$m(\varnothing)$ 是限定为 0 的，从这个意义上来说，空集在任何时候都是一个没有支持的命题，因此，经典证据理论中的 $m(\varnothing)$ 在实际应用中没有具体物理意义.

第一次对 $m(\varnothing)$ 进行关注并赋值的是 Semts 的 TBM[7]. 在 TBM 中，如果证据冲突过大，则将冲突的 BPA 分配给空集. TBM 模型为了表示与经典证据理论的区别，使用基本信度指派(Basic Belief Assignment, BBA)代替 BPA，但是 BBA 本质上与 BPA 一样，都只在不包含空集的命题上进行分配，也就是 $m(\varnothing)=0$ 这个限制仍然予以保留. 这在逻辑上是有问题的，既然是处理开放世界的问题，为什么不在 BBA 生成阶段就给 $m(\varnothing)$ 赋值？此外，TBM 在冲突处理时的策略也比较简单. Yager 曾提出在冲突高度处理时将冲突赋给全集，他的这种冲突分配方式在后续研究中备受争议[9]. 类似地，TBM 只是简单地将冲突赋给空集，同样没有提出一些有意义的信息，无法满足智能系统的各种复杂情况.

在我们所提出的 GET 中，在生成 GBPA 阶段就允许 $m(\varnothing)\neq0$，其物理意义也比较容易理解，那就是系统有可能存在辨识框架中命题以外的其他命题或是假设. $m(\varnothing)$ 的大小直观地反映了系统是开放世界的可能性. 如果说经典证据理论的幂集是对概率基本事件空间进行推广，使得证据理论能够比概率论更有效地表示和处理不确定信息的话，那么本文所提出的 GET 则进一步推广了经典证据理论的幂集空间，可以在开放世界的思路下表示和处理不确定性信息.

关于证据之间冲突的研究一直是证据理论的热点. 总的来说，对冲突信息的处理主要有两种思路：第一种思路是对经典 D-S 证据理论的组合规则进行修改，以适应高度冲突的环境，以 Lefevre 为代表[10]；第二种思路是保持经典证据理论的组合规则，而在融合前对冲突数据进行预处理，这一思路以 Haenni 为代表[11]. Liu 提出了一种新的冲突表示方法[12]，给这方面的研究带来了新的冲击. 这么多研究都集中在提供新的组合规则或是建立新的数学模型来消解冲突，但是却忽视了冲突的表示本身就有问题.

物理学从牛顿力学到相对论的产生，以及光的波粒二象性认识等，都经过了反复曲折螺旋上升的过程. 牛顿力学只适用于宏观低速的环境中，而不能有效处理微观高速的物理问题. 牛顿力学本身没有错，既然是理论，就一定有其适用范围. 从这个角度

来看,一有冲突就修改规则的方法固然不可取,固执地认为 Dempster 规则就是好的态度也有问题(比如辨识框架中的目标为$\{a,b,c\}$,而真实目标是 d,在这种情况下使用 Dempster 规则无论证据之间是否有冲突也是无用的). 具体到冲突证据处理研究,GET 的核心思想是,是否使用 Dempster 组合规则要区分系统是在封闭世界还是在开放世界中. 如果在封闭世界中,则使用 Dempster 组合规则,该规则是封闭世界中一个非常有效的组合规则. 当证据之间冲突较小时可以直接使用 Dempster 组合规则,当证据之间冲突较大时可以调整数据模型之后再使用 Dempster 组合规则. 如果是在开放世界中,则不建议使用 Dempster 组合规则,而使用我们提出的广义组合规则. 那么,如何判断系统是处于开放世界还是封闭世界呢? 我们后续的论文表明,将 $m(\varnothing)$ 与其他冲突系数相结合可以构成一个有效的判据. 直观地看,如果 $m(\varnothing)$值大,则表明系统处于开放世界,辨识框架中的命题并未穷尽可能的状态;如果 $m(\varnothing)$值小,则表明系统处于封闭世界.

4　算　例

本节给出几个算例来说明 GET 的应用,并结合算例进行一些分析和讨论.

例 3　辨识框架为 $U=(a,b,c)$,两组 GBPA 如下

$$m_1(a)=0.8;\quad m_1(a,b)=0.2$$

$$m_2(a)=0.5;\quad m_2(b)=0.3;\quad m_2(U)=0.2$$

计算过程如下:首先

$$m(\varnothing)=m_1(\varnothing)m_2(\varnothing)=0\times 0=0$$

之后,计算 K

$$K=m_1(a)m_2(b)=0.8\times 0.3=0.24$$

组合后的焦元为

$$m(a)=0.868\quad m(b)=0.079$$

$$m(a,b)=0.053\quad m(U)=0$$

例 3 中 $m(\varnothing)=0$,GET 的计算结果与经典证据理论的结果相同.

例 4　辨识框架为 $U=(a,b,c)$,两组 GBPA 如下

$$m_1(a)=0.1;\quad m_1(b)=0.2;\quad m_1(\varnothing)=0.7$$

$$m_2(a)=0.1;\quad m_2(b,c)=0.1;\quad m_2(\varnothing)=0.8$$

首先计算出广义证据理论中的冲突系数 $K=0.97$,$m(\varnothing)=m_1(\varnothing)m_2(\varnothing)=0.56$,则有 $1-m(\varnothing)=0.44$,分别计算焦元的 GBPA 如下

$$m(a)=0.147;\quad m(b)=0.293;\quad m(c)=0$$

最后的结果整理如下

$$m(a)=0.147;\quad m(b)=0.293;$$

$$m(c)=0;\qquad m(\varnothing)=0.56$$

例 5　辨识框架为 $U=(a,b,c)$,两组 GBPA 如下

$$m_1(a)=0.3;\quad m_1(\varnothing)=0.7$$

$$m_2(b)=0.2;\quad m_2(\varnothing)=0.8$$

计算结果为

$$K=1;\quad m(\varnothing)=1$$

例 5 的计算过程中,首先分配 $m(\varnothing)=0.56$,余下的 0.44 再分配给辨识框架中其他命题,但是由于其他传感器报告互不支持,一个支持类别 a,一个支持类别 b,所以无法分配,最终又将 0.44 重新分配给空集$\varnothing$. 我们认为这是合理的,当证据冲突很大且互不支持时,应该考虑是否辨识框架不完整.

例 6　辨识框架为 $U=(a,b,c)$,两组 GBPA 如下

$$m_1(a)=0.3;\quad m_1(b)=0.7$$

$$m_2(U)=1$$

计算结果为

$$m(U)=1$$

例 6 表明,$m(\varnothing)$类似于数字 0,任何一个数和 0 相乘都是 0. 如果一个传感器生成的 GBPA 是 $m(\varnothing)=1$,则该传感器报告强烈支持系统的辨识框架不完整.

例 7　辨识框架为 $U=(a,b,c)$,两组 GBPA 如下

$$m_1(a)=1;\quad m_2(b)=1$$

计算结果为

$$m(\varnothing)=1;\quad m(a)=m(b)=1$$

例 7 表明,当两个传感器报告完全冲突时,系统认为辨识框架不完整的程度最高. 应该指出,经典的 Dempster 组合规则在这种情况下完全不能使用.

5　结　论

在分析现有证据理论的一些主要问题基础之上,本文提出了广义证据理论 GET. GET 的出发点立足于融合系统所处的环境是一个开放世界,舍弃 $m(\varnothing)$等于 0 的限制,提出了广义基本概率指派 GBPA. 此外,本文还提出了广义合成公式 GCR,以实现两个 GBPA 的融合.

当系统处于封闭世界,也就是$m(\varnothing)=0$满足时,GET 就退化为经典的证据理论,从这个角度来看,GET 是经典证据理论简单而直观的推广. GET 是面向开放世界的,在未来有着广阔的应用前景. 本文的思路经简单扩展也可以应用到 Dezert 和 Smarandache 提出的 DSmT 理论中.

参考文献：

[1] 韩崇昭，朱洪艳，段战胜. 多源信息融合[M]. 北京：清华大学出版社，2006.

[2] SHAFER G. A mathematical theory of evidence[M]. NJ，USA：Princeton University Press，1976.

[3] VOORBRAAK F. Computationally efficient approximation of Dempster-Shafer theory[J]. International Journal of Man-Machine Studies，1989，30(5)：525-536.

[4] HAENNI R，LEHMANN N. Resource bounded and anytime approximation of belief function computations [J]. International Journal of Approximate Reasoning，2002，31(1/2)：103-154.

[5] 邓勇，施文康，朱振福. 一种有效处理冲突证据的组合规则[J]. 红外与毫米波学报，2004，23(1)：27-32.
DENG Yong，SHI Wenkang，ZHU Zhenfu. Efficient combination approach of conflict evidence [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves，2004，23(1)：27-32.

[6] 郭华伟，施文康，邓勇，等. 证据冲突：丢弃，发现或化解？[J]. 系统工程与电子技术，2007，29(6)：890-898.
GUO Huawei，SHI Wenkang，DENG Yong，et al. Evidential conflict and its 3D strategy：discard，discover and disassemble? [J]. Systems Engineering and Electronics，2007，29(6)：890-898.

[7] SMETS P，KENNES R. The transferable belief model [J]. Artificial Intelligence，1994，66(3)：191-243.

[8] SMARANDACHE F，DEZERT J. Applications and advances of DSmT for information fusion [M]. Rehoboth，USA：America Research Press，2004.

[9] YAGER R R. On the Dempster-Shafer framework and new combination rules [J]. Information Science，1989，41(2)：93-137.

[10] LEFEVRE E，COLOT O，VANNOORENBERGHE P. Belief function combination and conflict management [J]. Information Fusion，2002，3(3)：149-162.

[11] HAENNI R. Are alternatives to Dempster's rule of combination real alternatives：comments on "about the belief function combination and the conflict management problem"——Lefevre et al [J]. Information Fusion，2002，3(4)：237-239.

[12] LIU Weiru. Analyzing the degree of conflict among belief functions[J]. Artificial Intelligence，2006，170(11)：909-924.

（编辑 武红江）