

## 利用不确定度的冲突证据组合

韩德强<sup>1</sup>, 邓 勇<sup>2</sup>, 韩崇昭<sup>1</sup>, 杨 艺<sup>3</sup>, 蒋 雯<sup>4</sup>, 侯志强<sup>5</sup>

(1. 西安交通大学 智能网络与网络安全教育部重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 上海交通大学 电子信息学院, 上海 200240; 3. 西安交通大学 航天航空学院, 陕西 西安 710049;

4. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072; 5. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘要:** D-S(Dempster-Shafer)证据理论在信息融合中有着广泛的应用. 针对证据理论中高冲突证据组合出现反直观结果问题, 提出一种新的证据组合方法. 依据证据体不确定度生成权重, 并基于所获权重修正待组合证据体再利用Dempster规则完成证据组合. 算例分析表明所提方法是合理有效的.

**关键词:** 证据理论; 冲突; 证据组合; 不确定度

**中图分类号:** TP181      **文献标识码:** A

## Conflicting evidence combination by using uncertainty degree

HAN De-qiang<sup>1</sup>, DENG Yong<sup>2</sup>, HAN Chong-zhao<sup>1</sup>,  
YANG Yi<sup>3</sup>, JIANG Wen<sup>4</sup>, HOU Zhi-qiang<sup>5</sup>

(1. Ministry of Education Key Lab for Intelligent Networks and Network Security Lab,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China;

2. School of Electronics and Information Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200240, China;

3. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China;

4. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China;

5. Telecommunication Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710077, China;)

**Abstract:** Dempster-Shafer evidence theory is widely applied to the fields of information fusion. To suppress the counterintuitive results generated in the combination of high conflicting bodies of evidence, a modified evidence combination approach is proposed. Uncertainty degree is used to generate the weights, which are used to modify the bodies of evidence before the combination based on the Dempster's rule. Numerical examples show the efficiency and rationality of the proposed approach.

**Key words:** evidence theory; conflict; evidence combination; uncertainty degree

### 1 引言(Introduction)

Dempster-Shafer(D-S)证据理论<sup>[1,2]</sup>能满足比概率论更弱的公理体系, 给出了不满足可加性的概率, 还给出了两批证据组合的方法即Dempster证据组合规则, 现已成为专家系统、模式识别特别是信息融合等领域的基本理论之一. 证据理论虽然有诸多优点, 但在待组合证据体具有高度冲突时会出现反直观的, 即有悖常理的组合结果<sup>[3,4]</sup>.

针对高冲突证据组合这一热点研究问题, 研究人员提出了众多改进的证据组合方法. Jean Dezert等人对证据理论的框架本身进行了修改, 提出的DSmT理论<sup>[5]</sup>, 能有效地解决多种高冲突证据组合问题. Lefevre等人<sup>[6]</sup>、孙全等人<sup>[7]</sup>、Smets<sup>[8]</sup>、张山鹰和潘泉等人<sup>[9]</sup>以及本文作者等<sup>[10]</sup>针对组合规则本身进行修改, 通过重新分配冲突证据来解决反直观组合结

果问题. Florea等人<sup>[11]</sup>将交运算与并运算相结合提出了一种鲁棒的证据组合规则. 此外, Murphy<sup>[12]</sup>及本文作者之一邓勇等<sup>[13]</sup>通过对证据进行预处理(修正), 再进行证据组合, 也取得了较为理想的效果. 陈伟军等人<sup>[14]</sup>将修正证据体与修改组合规则相结合进行证据组合.

对证据理论模型框架的修改难度很大, 目前的大部分研究成果集中在对规则的修改以及对证据体的修正上. 但对于规则的修改往往会破坏Dempster组合规则本身的一些优良性质, 比如满足交换律、满足结合律等. 如果是传感器失效的问题带来的证据体冲突造成反直观结果, 将其归咎于证据组合规则似有不妥. 基于上述原因, 研究工作者目前更倾向于采用修改数据模型, 即对证据体的修正方式来应对高冲突证据组合问题. 但对于证据体修正方法来

说, 权重的生成是个相对棘手的问题. 本文的工作中首先基于证据不确定度来生成证据体的权重. 证据的不确定度反映证据的清晰程度: 从直观上来看, 证据越清晰则决策愈可靠. 即, 一个证据体不确定度越小, 应赋予其相应较高的权重. 基于所获权重利用加权证据修正方法对证据体进行预处理, 再进行 Dempster 证据组合. 文中所附算例表明本文所提方法合理有效.

## 2 证据理论及高冲突证据组合问题 (Evidence theory and highly conflicting evidence combination problem)

### 2.1 证据理论概要(Essentials of evidence theory)

Dempster-Shafer 证据理论为不确定性信息的表达和组合提供了强有力的工具, 在信息融合、模式识别、故障诊断等领域得到了广泛应用. 证据理论的基本概念简述如下.

设  $\Theta$  为辨识框架, 若  $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  满足<sup>[1, 15]</sup>

$$m(\emptyset) = 0, \tag{1}$$

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

则称  $m$  为辨识框架  $\Theta$  上的基本信度赋值(basic probability assignment, BPA), 也称为 mass 函数. 其中  $2^\Theta$  表示  $\Theta$  的幂集(power set), 即  $\Theta$  所有的子集所构成的集合.

信度函数(Bel)和似真度函数(Pl)定义如下:

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B), \forall A \subseteq \Theta, \tag{3}$$

$$\text{Pl}(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B). \tag{4}$$

Dempster 组合规则<sup>[1, 15]</sup>反映了证据的联合作用, 定义如下:

设统一辨识框架上的两个独立证据体, 其相应的 mass 函数分别为  $m_1$  及  $m_2$ , 焦点分别为  $A_1, \dots, A_k$  和  $B_1, \dots, B_l$ , 则组合后的证据  $m = m_1 \oplus m_2$  由下式计算所得:

$$m(A) = \begin{cases} 0, & A = \emptyset, \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i)m_2(B_j)}{1 - K}, & A \neq \emptyset, \end{cases} \tag{5}$$

其中  $K = \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i)m_2(B_j)$  代表冲突项. 多个证据体进行证据组合时, Dempster 规则满足结合律和交换律. 需要指出的是, 有研究表明仅靠冲突项  $K$  是不足以描述证据间冲突的, 需要结合其它因素如证据距离等来共同表征和描述, 详见文献[16].

### 2.2 高冲突证据组合存在的问题(Problems in highly conflicting evidence combination)

针对高冲突证据组合问题, Zadeh 提出过一个经

典的例子:

**例 1**<sup>[4]</sup> 两个医生针对同一病人进行诊断, 认为病症可能是脑膜炎( $M$ )、脑震荡( $C$ )及脑肿瘤( $T$ )中的一种. 辨识框架可设为  $\Theta = \{M, C, T\}$ . 两位医生的诊断结果表示为:

医生1:  $m_1(M) = 0.99, m_1(T) = 0.01$ ;

医生2:  $m_2(C) = 0.99, m_2(T) = 0.01$ .

依据 Dempster 组合规则有如下结果:

$m(M) = 0, m(C) = 0, m(T) = 1$ .

据此组合后得到的证据体得出的结论是: 该病人所患疾病为脑肿瘤. 显然这是违背常理的结果, 因为两个医生都认为病人患脑肿瘤的可能性极低. 两个医生对其他两种病症的可能性判断几乎是完全冲突的. 本例就是证据体冲突的极端例子, 它能很好地反映出在对高冲突证据体之间利用 Dempster 规则进行组合时可能出现的问题.

冲突产生的可能原因主要包括: 传感器(或信息源)异常; 证据体描述方式(如 mass 函数)的生成方法带来的问题; 人们对事物的认知程度也会造成证据的冲突, 即因为辨识框架不完整造成证据冲突. 针对高冲突证据体, 在基于 Dempster 规则进行组合之前, 需要更多的关注冲突的具体成因、程度并设法最大限度地减小冲突程度, 但这往往难以实现. 随着相关领域研究的深入, 对基于 Dempster 规则进行高冲突证据组合出现反常结果这一问题, 如本文引言中所述已经出现了相当多的方法. 本文的研究工作中采用修正证据体解决高冲突证据组合问题, 这是基于如下出发点: 反直观组合结果不是证据组合规则引起的, 而是证据体本身存在问题(由传感器或信息源引起). 正如 Haenni<sup>[17]</sup>所指出的那样, 对数据模型的修改无论是在工程上、数学上、哲学上来说都更为合理.

设有  $n$  个待组合证据体  $m_i (i = 1, \dots, n)$ , 基于权重修正证据体的公式如下:

$$m_{\text{wAE}} = \sum_{i=1}^n (w(m_i) \cdot m_i), \tag{6}$$

加权修正时, 各证据体的 mass 赋值分别乘以各自证据体对应的权重, 再按照焦点对应关系相加得到修正后的证据体  $m_{\text{wAE}}$ . 最后将  $m_{\text{wAE}}$  组合  $n - 1$  次就得到了最终的证据组合结果. 若遇两个证据体焦点不一致, 将各自缺失焦点的 mass 赋值设为 0 即可.

本文的研究将采用式(6)中所描述的对待组合证据体进行修正的方法来处理高冲突证据组合问题.

## 3 利用不确定度的证据体修正组合方法 (Modified evidence combination by using uncertainty degree)

在针对证据体进行加权修正的方法中, 需要权重

的生成. 权重往往依赖于先验知识, 而先验知识的获取通常较为困难. 因此从证据体本身挖掘信息来构造权重是一种可行的方法. 如邓勇等人<sup>[12]</sup>的工作中权重的生成是基于待组合证据体间的相互关系即证据距离<sup>[18]</sup>来构造的. 证据体间的距离是基于BPA构造的, BPA描述表征了证据体的信息. 除了用于构造距离之外, BPA还可以用于计算证据的不确定度. 证据的不确定度反映了证据清晰度, 从某种意义上讲反映了证据体的品质和可信度. 因此本文将基于证据体的不确定度来构造权重进而实现对证据体的修正, 以应对高冲突证据组合问题.

不确定性主要有3类<sup>[19]</sup>: 模糊性(fuzziness)、冲突(discord)、非特异性(nonspecificity), 后两者可称为多义性(ambiguity). 证据理论中的BPA隐含了两种不确定性: 冲突和非特异性, 合称多义性.

在证据理论中常见的不确定度包括<sup>[19]</sup>:

- 1) 非特异度(nonspecificity measure).

$$N(m) = \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) \log_2 |A|. \quad (7)$$

- 2) 聚合不确定度(aggregated uncertainty measure, AU).

$$AU(\text{Bel}) = \max_{P_{\text{Bel}}} [-\sum_{\theta \in \Theta} p_{\theta} \log_2 p_{\theta}], \quad (8)$$

$$\begin{cases} \text{Bel}(B) \leq \sum_{\theta \in B} p_{\theta} \leq \text{Pl}(B), \\ 0 \leq p_{\theta} \leq 1, \forall \theta \in \Theta, \\ \sum_{\theta \in \Theta} p_{\theta} = 1. \end{cases} \quad (9)$$

式(8)中的 $P_{\text{Bel}}$ 代表所有满足式(9)中条件的概率分布. 式(9)是一个优化求解问题, 即在所有可能的概率分布情况下, 选取使得式(8)中取值最大的一组概率分布, 进而求取Shannon熵即为AU.

- 3) 总体不确定度(total uncertainty measure, TU). 可看作是非特异度和AU的线性组合即:

$$TU(m, \delta) = \delta AU(m) + (1 - \delta)N(m). \quad (10)$$

- 4) 多义度(ambiguity measure, AM). 设 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 为辨识框架,  $m$ 是BPA, 定义

$$AM(m) = -\sum_{\theta \in \Theta} \text{Bet}P_m(\theta) \log_2(\text{Bet}P_m(\theta)), \quad (11)$$

其中

$$\text{Bet}P_m(\theta) = \sum_{B \subseteq \Theta} m(B)(1/|B|) \quad (12)$$

为可传递信度模型(transferable belief model, TBM)<sup>[20]</sup>中定义的pignistic概率分布.

上述不确定度量中, 非特异度只能描述非特异性这一层面的不确定性程度, 而对于证据内部的冲突或不一致性就无法有效描述. 聚合不确定度量AU能全面的描述证据体内部的不确定性, 且能

同时满足作为不确定度量的5个条件<sup>[19]</sup>. 但AU问题在于对证据体的变化不敏感, 而且计算复杂度较高. 总体不确定度TU实际上是非特异度与AU的加权. 对于TU来说, 首先, AU存在的问题TU也同时存在; 其次, 存在参数选择问题(式(10)中的 $\delta$ ), 即TU分别从多大程度上依赖AU或是特异度. 多义度AM也是一种总体性的不确定性度量. 虽然AM不满足不确定度量条件中的次可加性, 但次可加性是针对笛卡尔空间而言的, 是涉及边际BPA之间的关系. 当问题不涉及笛卡尔空间, 即不考虑多维度上的边际BPA问题时, AM是可以用来表征证据体的不确定度的. 相比AU而言, 首先AM计算更为简便. AM的计算过程是通过将证据体对应的BPA通过pignistic概率转换<sup>[20]</sup>得到概率分布进而求取Shannon信息熵. 此外AM对证据体的变化较为敏感<sup>[19]</sup>. 虽然证据理论中目前还没有完善的不确定性度量, 针对上述利弊权衡之后, 在本文的工作中选取了AM作为不确定度指标来构造权重.

本文研究是基于如下假设: 不确定度越大, 证据体越含混; 不确定度越小, 证据体越清晰. 直观来看证据越含混, 可信度就越差, 对决策越不利, 所赋予的权重应越小; 证据越清晰, 可信度就越高, 对决策越有利, 所赋予的权重应越大. 即权重与AM之间呈反向变化关系. 因此首先对AM取负指数函数再进行归一化生成权重. 当然也可以用其它降函数来构造权重, 比如求倒数等. 但考虑到AM存在为0的情况, 即出现完全确定的证据时, 此时就无法对AM求倒数, 而负指数函数并不存在这样的问题.

权重的具体构建如下:

设有 $n$ 个待组合证据体 $m_i (i = 1, \dots, n)$ , 其各自对应的不确定度为 $AM_i$ , 每个证据体对应的权重为( $\alpha$ 为负指数函数参数)

$$w_i = \frac{\exp(-\alpha \cdot AM_i)}{\sum_j \exp(-\alpha \cdot AM_j)}. \quad (13)$$

依式(13)获取权重之后, 按照式(6)得到修正后的证据体, 再依据Dempster证据组合公式进行 $n - 1$ 次组合, 即可得到最终的证据组合结果. 负指数函数中 $\alpha$ 参数的选取主要依靠经验进行:  $\alpha$ 越大, 对于含混证据的抑制作用就越明显. 但也不宜过大, 即便是含混的证据也包含一定的有用信息, 即过度的抑制也是不可取的.

## 4 实验算例(Numerical examples)

### 4.1 算例1 Zadeh反例(Example 1 Zadeh's counter example)

Zadeh算例详见本文第2节例1.

本例中 $m_1$ 和 $m_2$ 均为Bayesian信度函数(焦点均为单点焦点). 其相应的pignistic概率分布与BPA相同, 此时求取AM相当于求取Shannon熵. 计算可得两个证据体的AM均为0.0808. 生成权重为 $w_1 = w_2 = 0.5$ , 证据组合结果如下:

$$m(M) = 0.495, m(T) = 0.01, m(C) = 0.495.$$

本例中, 该结论相对合理.

### 4.2 算例2(Example 2)

某目标识别系统利用4个传感器进行信号采集与目标识别任务. 设辨识框架为 $\Theta = \{A, B, C\}$ . 4个传感器所获取信息以证据体形式表示为:

$$\begin{aligned} m_1(A) &= 0.700, m_1(B) = 0.005, m_1(C) = 0.295, \\ m_2(A) &= 0.000, m_2(B) = 0.400, m_2(C) = 0.600, \\ m_3(A) &= 0.800, m_3(B) = 0.000, m_3(C) = 0.200, \\ m_4(A) &= 0.750, m_4(B) = 0.010, m_4(C) = 0.240. \end{aligned}$$

针对4个BPA分别求取多义度AM. 首先按照式(12)求取其各自相应的pignistic概率. 由于本例中证据体均为Bayesian信度函数, 因此pignistic概率与原BPA赋值相同, 分别为:

$$\begin{aligned} \text{Bet}P_1(A) &= 0.700, \text{Bet}P_1(B) = 0.005, \\ \text{Bet}P_1(C) &= 0.295, \\ \text{Bet}P_2(A) &= 0.000, \text{Bet}P_2(B) = 0.400, \\ \text{Bet}P_2(C) &= 0.600, \\ \text{Bet}P_3(A) &= 0.800, \text{Bet}P_3(B) = 0.000, \\ \text{Bet}P_3(C) &= 0.200, \\ \text{Bet}P_4(A) &= 0.750, \text{Bet}P_4(B) = 0.010, \\ \text{Bet}P_4(C) &= 0.240. \end{aligned}$$

针对这4组pignistic概率分别求取Shannon信息熵, 可得:  $AM_1 = 0.8798, AM_2 = 0.9710, AM_3 = 0.7219, AM_4 = 0.8719$ . 取 $\alpha = 6$ , 依据式(13)求取权重并依式(6)得加权平均后的证据体为:  $m_{\text{wAE}}(A) = 0.6810, m_{\text{wAE}}(B) = 0.0492, m_{\text{wAE}}(C) = 0.2698$ . 利用Dempster证据组合规则将 $m_{\text{wAE}}$ 组合3次即可得最终组合结果. 除采用本文中不确定度的证据体修正方法外, 针对上述证据体同时利用Dempster组合规则、Murphy的证据体平均修正方法以及邓勇的基于证据距离的加权修正方法进行证据组合, 结果如表1所示.

本例中, 证据体 $m_2$ 是个干扰项, 与其他各条证据冲突较大. 从表1中的结果可以看出, 基于Dempster证据组合规则直接进行组合所得的结果受到 $m_2$ 的干扰严重, 后续证据组合已不可能再获得正确的决策结果. 而基于Murphy的证据体平均修正方法、邓勇等人的加权平均修正方法以及本文所提方法进

行证据组合, 均可以有效抵制证据 $m_2$ 的干扰. 相比于Murphy的平均修正方法与邓勇等人的加权平均方法, 基于本文所提出的方法得到的组合结果收敛速度更快.

表1 各种组合结果比较

Table 1 Comparisons among different combination approaches

组合方式	$m_{12}$	$m_{123}$	$m_{1234}$
直接组合	$m(A)=0.000$	$m(A)=0.000$	$m(A)=0.000$
	$m(B)=0.011$	$m(B)=0.000$	$m(B)=0.000$
	$m(C)=0.989$	$m(C)=1.000$	$m(C)=1.000$
简单平均 <sup>[12]</sup>	$m(A)=0.337$	$m(A)=0.710$	$m(A)=0.889$
	$m(B)=0.113$	$m(B)=0.014$	$m(B)=0.001$
	$m(C)=0.550$	$m(C)=0.276$	$m(C)=0.110$
加权平均 <sup>[13]</sup>	$m(A)=0.337$	$m(A)=0.8502$	$m(A)=0.9592$
	$m(B)=0.113$	$m(B)=0.0030$	$m(B)=0.0001$
	$m(C)=0.550$	$m(C)=0.1468$	$m(C)=0.0407$
不确定度修正	$m(A)=0.440$	$m(A)=0.931$	$m(A)=0.976$
	$m(B)=0.079$	$m(B)=0.000$	$m(B)=0.000$
	$m(C)=0.481$	$m(C)=0.069$	$m(C)=0.024$

以上是通过收敛速度这一指标对各种方法进行比较. 目前针对证据组合方法的优劣评价还没有统一的标准. 实际应用中主要从两个方面来考虑<sup>[18]</sup>: 一方面是合成结果是否符合人们的逻辑推理, 即合理性; 另外, 可以通过考察组合后的结果不确定性是否降低. 从这两个意义上来定性分析, 本文所提的方法也是合理有效的.

### 5 结论(Conclusions)

在本文的研究中提出了基于不确定度修正证据体来应对高冲突证据组合的方法, 实验结果表明本文所提方法合理有效.

针对高冲突证据组合的研究, 包括基于修正证据体及修改组合规则往往都需要用到权重<sup>[21]</sup>. 作者之前的工作中已经利用证据体不确定度生成权重来修改组合规则, 取得了良好的效果<sup>[10]</sup>. 即只要在需要利用权重的场合, 证据的不确定度都可有其用武之地. 因此证据理论中不确定度的研究必将有利地推动证据理论应用领域的进一步拓展.

需要指出的是, 本文的工作是在证据越清晰则越可靠这一假设前提下进行的. 实际上证据越清晰并不总是意味着该证据就更加真实、可靠. 清晰程度只是从一个侧面反映了证据体的质量或可靠程度. 因此单纯依靠不确定度往往并不能解决所有问题. 还需要结合其他因素共同构造权重, 这也是本文未来的重要研究方向之一.

## 参考文献(References):

- [1] SHAFER G. A *Mathematical Theory of Evidence*[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976.
- [2] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping[J]. *Annals of Mathematical Statistics*, 1967, 38(2): 325 – 339.
- [3] ZADEH L A. Review of Shafer's a mathematical theory of evidence[J]. *AI Magazine*, 1984, 5(3): 81 – 83.
- [4] ZADEH L A. A simple view of the Dempster-Shafer theory of evidence and its implication for the rule of combination [J]. *AI magazine*, 1986, 2(7): 85 – 90.
- [5] SMARANDACHE F, DEZERT J. *Applications and Advances of DSmT for Information Fusion*[M]. Rehoboth: American Research Press, 2009.
- [6] LEFEVRE E, COLOT O, VANNOORENBERGHE P. Belief functions combination and conflict management[J]. *Information Fusion*, 2002, 3(2): 149 – 162.
- [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(08): 117-119.  
(SUN Quan, YE Xiuqing, GU Weikang. A new combination rules of evidence theory[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(8): 117 – 119.)
- [8] SMETS P. Data fusion in the transferable belief model[C] // *Proceedings of the 3rd International Conference on Information Fusion*. Sunnyvale, CA, USA: ISIF, 2000: 21 – 33.
- [9] 张山鹰, 潘泉, 张洪才. 证据推理冲突问题研究[J]. 航空学报, 2001, 22(4): 369 – 372.  
(ZHANG Shanying, PAN Quan, ZHANG Hongcai. Conflict problem of Dempster-Shafer evidence theory[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2001, 22(4): 369 – 372.)
- [10] HAN Deqiang, HAN Chongzhao, YANG Yi. A modified evidence combination approach based on ambiguity measure[C] // *Proceedings of the 11th International Conference on Information Fusion*. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 1346 – 1351.
- [11] FLOREA M C, JOUSSELME A-L, BOSSE E. Robust combination rules for evidence theory[J]. *Information Fusion*, 2009, 10(2): 183 – 197.
- [12] MURPHY C K. Combining belief functions when evidence conflicts[J]. *Decision Support Systems*, 2000, 29(1): 1 – 9.
- [13] DENG Yong, SHI Wenkang, ZHU Zhenfu, et al. Combining belief functions based on distance of evidence[J]. *Decision Support Systems*, 2004, 38(3): 489 – 493.
- [14] 陈伟军, 景占荣, 袁芳菲, 等. D-S证据理论的不足及其数学修正[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2010, 32(2): 161 – 168.  
(CHEN Weijun, JING Zhanrong, YUAN Fangfei, et al. Shortcomings of D-S evidence theory and its mathematic modification[J]. *Journal of North University of China(Natural Science Edition)*, 2010, 31(2): 161 – 168.)
- [15] 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.  
(HAN Chongzhao, ZHU Hongyan, DUAN Zhansheng. *Multisource Information Fusion*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.)
- [16] LIU, W R. Analyzing the degree of conflict among belief functions[J]. *Artificial Intelligence*, 2006, 170(11): 909 – 924.
- [17] HAENNI R. Are alternatives to Dempster's rule of combination real alternative?: Comments on "About the belief function combination and the conflict management problem" - Lefevre et al[J]. *Information Fusion*, 2002, 3(3): 237 – 239.
- [18] JOUSSELME A L, GRENIER D, BOSSE E. A new distance between two bodies of evidence[J]. *Information Fusion*, 2001, 2(2): 91 – 101.
- [19] JOUSSELME A L, LIU CHUNSHENG, GRENIER D, et al. Measuring ambiguity in the evidence theory[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, 2006, 36(5): 890 – 903.
- [20] SMETS P. The transferable belief model[J]. *Artificial Intelligence*, 1994, 66 (2): 191 – 234.
- [21] 王肖霞. 冲突证据合成规则的研究[D]. 太原: 中北大学, 2007.  
(WANG Xiaoxia. *Research on the combination rule of conflict evidences*[D]. Taiyuan: North University of China, 2007.)

## 作者简介:

**韩德强** (1980—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为不确定性推理、信息融合、目标识别、组合导航, E-mail: de-qhan@mail.xjtu.edu.cn;

**邓勇** (1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信息融合、智能信息处理, E-mail: doctordengyong@yahoo.com.cn;

**韩崇昭** (1943—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为多源信息融合、随机控制与自适应控制、非线性频谱分析, E-mail: czhan@mail.xjtu.edu.cn;

**杨艺** (1980—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为多源信息融合、图像处理、飞行器控制, E-mail: jiafeiyy@mail.xjtu.edu.cn;

**蒋雯** (1974—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为信息融合, E-mail: jiangwen@nwpu.edu.cn;

**侯志强** (1973—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为图像处理、图像分割、信息融合, E-mail: hou-zhq@sohu.com.