

不完备识别框架下的证据组合方法

曾 成 赵保军 何佩琨

(北京理工大学信息科学技术学院电子工程系 北京 100081)

摘 要: 证据理论应用中经常面临识别框架不完备问题。本文引入证据框架概念, 把识别框架分为已知和未知两个部分, 提出一种在识别框架不完备条件下表示和组合证据的开放识别框架方法。该方法能明确区分“识别框架不完备”与“证据冲突”两个不同概念, 并合理解决了对未知命题集合的基本概率赋值问题, 从而克服了 D-S 理论以及 Smets 的“开放世界假设”方法在处理不完备识别框架时存在的不足。

关键词: D-S 理论, 证据组合, 开放识别框架, 证据框架, 开放世界假设

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)07-1043-04

The Combination of Evidences in an Incomplete Frame of Discernment

Zeng Cheng Zhao Bao-jun He Pei-kun

(Dept of Electronic Engineering, School of Information Science and Technology,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The incompleteness of the frame of discernment is one of the main difficulties confronted in the application of the evidence theory. In this paper, through introducing a newly defined evidence frame which divides the frame of discernment into known and unknown parts, an open frame method to represent and combine evidence under incomplete frame is proposed. This method can distinguish the “incompleteness of frame” from the “conflict of evidence” clearly. It also presents a rational way to assign a BPA to the set of unknown propositions. Therefore such a method avoids the problems confronted by the D-S theory and Smets’s “open world assumption” in dealing with incomplete frame.

Key words Dempster-Shafer theory, Combination of evidence, Open frame of discernment, Evidence frame, Open world assumption

1 引言

证据理论源于 Dempster 在上下限概率方面的研究工作^[1]。后来 Shafer 引入信任函数的概念, 对 Dempster 的理论进行发展, 确立了一套基于证据组合来处理不确定推理问题的数学方法^[2], 所以证据理论通常被称为 Dempster-Shafer(D-S)理论¹。作为一种行之有效的不确定性推理决策方法, 证据理论为不确定信息的表达和合成提供了自然而强有力的工具, 在人工智能^[3]、多传感器数据融合^[4]等领域受到了广泛重视与应用。但是, 由于 D-S 理论在理论上不是十分严谨, 实际应用中还存在一些有待解决的问题, 一度受到诸多质疑和批评, 同时也有许多人对证据理论进行了完善和发展, 其中代表性的有 Smets “可传递信度模型(Transferable Belief Model, TBM)”^[5,6], Kohlas 和 Monney 的“线索理论(Theory of hints)”^[7]以及 Mahler 的“随机集理论(Random set theory)”^[8]等。

在证据理论的应用中, 通常需要首先确定一个包含所有可能命题的完备的识别框架。但对于一些具体问题, 尤其是实时应用中, 新证据随着时间的推移而不断出现, 此时往往无法预先准确确定一个完备的封闭识别框架, 而只知道识别框架中的一部分可能命题, 甚至是一无所知。如何处理这种识别框架的不完备性, 是证据理论中一个比较突出的问题。当前处理这种不完备识别框架的代表性方法是 Smets 提出的“开放世界假设(Open world assumption)”。在开放世界假设中, 根据 TBM 理论, Smets 把对空集 \emptyset 的基本概率赋值 $m(\emptyset) \geq 0$ 定义为“真命题在当前已知识别框架之外”的信任度, 证据组合中取消对组合结果的归一化, 而把两个证据组合产生的冲突归于 $m(\emptyset)$ ^[5]。

本文首先对 Smets 的开放世界假设方法的合理性与实用性进行分析, 指出它所存在的一些问题。随后探讨在 D-S 理论的框架内解决不完备识别框架问题的可能性及其实现方案。在此基础上, 把 D-S 理论推广到一个开放的识别框架, 提出一种处理不完备识别框架的更为合理有效的方法。

2004-02-26 收到, 2004-08-05 改回

国家 863 计划(2002AA813032)资助课题

¹ 本文为了与 Smets 提出的基于 TBM 的证据组合方法相区别, 用 D-S 理论特指 Shafer 所提出的方法, 而把基于信任函数的证据组合方法统称为证据理论。

2 开放世界假设方法

在开放世界假设下,组合两个证据 m_1 与 m_2 的规则为^[5,6]

$$m_{12}(A) = [m_1 \oplus m_2](A) = \sum_{X \cap Y = A} m_1(X)m_2(Y), \quad \forall A \subseteq \Theta \quad (1)$$

式中 \oplus 表示组合, Θ 为识别框架。 $A = \phi$ 时的基本概率赋值 (BPA)² 表示支持“真命题在当前已知识别框架之外”的程度。而在 D-S 理论中,定义 $m(\phi) = 0$, 并通过 Dempster 组合规则的归一化把“证据冲突”($X \cap Y = \phi$ 的 BPA)按一定比例分配到组合结果的各焦元上。

然而,开放世界假设方法实际上并没有在理论上和应用上根本解决识别框架不完备问题。首先,开放世界假设把组合过程中的“证据冲突”等价于“识别框架不完备”,这种方法缺乏理论依据,也不符合一般常识,因为证据冲突并不一定是由识别框架的不完备造成的。其次,“开放世界假设”认为一个识别框架可能并没有包括所有可能的命题,这就意味着不同的证据可能会有不同的识别框架,显然与识别框架本身的概念有相背之处。并且,如果一个新证据包含原识别框架中所没有的命题,该证据应该如何与现有证据进行组合,在开放世界假设下并没有一个明确可行的方法。此外,根据式(1)进行证据组合,随着证据冲突的不断积累,将导致 $m(\phi)$ 不断增大,而其它焦元的 BPA 却越来越小,在开放世界假设下也难以对此作出一个合理的解释。

例 1 设当前已知识别框架为 $\Theta = \{a, b\}$, 并有两个证据: $m_1(a) = 0.5, m_1(b) = 0.4, m_1(\phi) = 0.1; m_2(a) = 0.4, m_2(b) = 0.3, m_2(\Theta) = 0.1, m_2(\phi) = 0.2$ 。一个新证据: 识别框架 $\Theta' = \{a, c\}$, $m_3(a) = 0.2, m_3(c) = 0.5, m_3(\Theta') = 0.2, m_3(\phi) = 0.1$ 。要求在开放世界假设下组合这 3 个证据。

利用式(1), $m_{12} = m_1 \oplus m_2$ 很容易求得。但证据 m_3 有一个不同的识别框架 Θ' , 它含有不属于 Θ 的命题 $\{c\}$, Θ' 也不包含 Θ 中的命题 $\{b\}$ 。在开放世界假设下应该如何将 m_3 与当前证据组合, Smets 未明确提出一个方法,但无非是以下两种选择:

(1)根据开放世界假设的物理含义, $\forall A \subseteq \Theta'$, 在计算 $m_{12}(\phi)$ 与 $m_3(A)$ 的组合时,若 $c \subseteq A$, 应该有 $\phi \cap A = c$; 同样, $\forall A \subseteq \Theta$, 在计算 $m_3(\phi)$ 与 $m_{12}(A)$ 的组合时,若 $b \subseteq A$, 应该有 $\phi \cap A = b$ 。不考虑这种表述方式在数学上存在的问题,据此利用式(1)依次组合 3 个证据: $m_{123} = m_1 \oplus m_2 \oplus m_3$, 组合结果为 $m_{123}(a) = 0.1, m_{123}(b) = 0.016, m_{123}(c) = 0.413, m_{123}(\phi) = 0.471$ 。但是,如果改变各证据的组合顺序,将有可能得到不同的结果,比如 $m_{132} = m_1 \oplus m_3 \oplus m_2$, 则组合结果为 $m_{132}(a) = 0.1, m_{132}(b) = 0.016, m_{132}(c) = 0.014, m_{132}(\phi) = 0.87$ 。因此,此时的证据组合不满足结合律,组合结果对组合顺序敏感,这显然不符合证据组合的一般公理化要求。

导致这一结果的根本原因在于 $m(\phi)$ 同时代表“证据冲突”和“识别框架不完备”两个不同的概念,在组合具有不同识别框架的证据时,先组合证据之间的冲突的大小将直接影响随后的证据组合结果。

(2)单纯从数学上考虑,即 $\forall A \subseteq \Theta$ 或 $\forall A \subseteq \Theta'$, 有 $\phi \cap A = \phi$, 则 3 个证据的组合结果为 $m_{123}(a) = 0.1, m_{123}(\phi) = 0.9$ 。这时证据组合满足结合律,但其组合过程与开放世界假设的物理含义有矛盾。其次,证据组合结果的识别框架中只保留了同时属于 Θ 和 Θ' 的焦元 a , 虽然并没有排除 b 和 c , 但它们被归入到当前识别框架之外,组合结果无法提供关于 b 和 c 的任何信息。此外,3 个证据都对 a 具有相当的支持,组合结果却主要支持不包含 a 的 ϕ , 显然不符合直觉。

综上所述,开放世界假设仅仅在概念上为不完备识别框架下证据的表示提供了一种方法,但实际上并不能真正解决不完备识别框架的证据组合问题。

3 D-S 理论方法

D-S 理论并不要求识别框架是已知的和封闭的,它在理论上没有作出“封闭世界假设”^[9]。如果不需要明确指出识别框架 Θ 是什么,在 D-S 理论的范畴内也能处理不完备识别框架下的证据表示和组合问题。

考虑一个具有 4 个焦元的非武断型(Non-dogmatic)证据 $m_1: m_1(a), m_1(b), m_1(a, b), m_1(\Theta)$ 。这里没有明确指出 Θ 包含哪些元命题,它包含已知的 a, b , 也包含未知的任何其它可能的命题。只要保持 $m(\Theta) > 0$, 识别框架 Θ 就具有一种开放性,它不排斥新证据带来的任何新命题,而是把它们吸纳到识别框架中,作为已知识别框架的一部分。例如,设包含已知命题 a, c 且有 4 个焦元的新证据 $m_2: m_2(a), m_2(c), m_2(a, c), m_2(\Theta)$, 把 m_1 与 m_2 组合,组合结果 m_{12} 中必然会有焦元 $a, b, c, \{a, b\}, \{a, c\}$ 和 Θ 。

因为未知的 Θ 包含一切可能命题,如果要表示某个命题是不可能的或者证据对于某个命题是确定性的(其似然函数 $Pl(\cdot)$ 等于信任函数 $Bel(\cdot)$),就需要把这些命题从 Θ 里剔除。设 A 为所有不可能命题与确定性命题的并集,则 $\Theta - A$ 就表示去除了 A 之后的识别框架。例如,一个 $A = \{b, c\}$ 且具有焦元 b 和 $\Theta - A$ 的证据,就表明命题 c 是不可能的,证据对命题 b 是确定性的即 $Pl(b) = Bel(b)$ 。

与开放世界假设方法相比,由于在 D-S 理论中证据的组合是采用 Dempster 组合规则,其证据组合过程满足交换律、结合律等一般公理。同时, Dempster 组合规则的归一化,把组合过程中产生的证据冲突按一定比例分配到组合结果的所有焦元上,在没有明确信息表明证据冲突是由何种原因造成时,这种分配方法显然更为合理。

² Smets 称之为“基本信度赋值(Basic Belief Assignment, BBA)”,本文为与 D-S 理论一致,统一采用“基本概率赋值(Basic Probability Assignment, BPA)”。

但是, 由于 Θ 既包含识别框架的已知命题, 又包含其未知命题, 难以确定 $m(\Theta)$ 或 $m(\Theta - A)$ 的明确物理含义。如何适当地确定包含未知部分的命题 Θ 或 $\Theta - A$ 的 BPA, 是这种处理不完备识别框架的 D-S 方法所面临的一个主要问题。

4 开放识别框架方法

识别框架的不完备就意味着无法完全确定它所包含的元命题, 从而使证据的建模面临困难。但是, 一个独立证据包含哪些已知命题通常是知道的, 因此可以考虑从证据本身出发来定义证据的模型。下面通过定义“证据框架”, 对 Shafer^[1]的证据模型进行推广, 新提出一种处理不完备识别框架的开放识别框架方法。

定义 1 设 Δ 为 I 个互斥命题 $\delta_i (i=1, 2, \dots, I)$ 的穷举集合, $\Psi = 2^\Delta$ 为 Δ 的幂集。一个包含 J 个命题 $A_j (j=1, 2, \dots, J)$ 的独立证据 E , 若 $\forall j=1, 2, \dots, J$, 满足 $A_j \in \Psi$, 且 $\bigcup_{j=1}^J A_j = \Delta$, 则称 Δ 为证据 E 的证据框架, 而称 $\delta_i (i=1, 2, \dots, I)$ 为该证据框架的元命题。

证据框架 Δ 就是一个证据所能确定的元命题的集合, 它是整个识别框架 Θ 的一个子集。记 $\bar{\Delta} = \Theta - \Delta$, 表示 Θ 中所有不包含在 Δ 内的命题的集合, 据此对 D-S 理论关于基本概率赋值的定义进行推广。

定义 2 设一个证据框架为 Δ 的证据, 定义在其上的函数 $m: \{\Psi, \bar{\Delta}\} \rightarrow [0, 1]$ 在满足下列条件:

- (1) $m(\phi) = 0$;
- (2) $m(A) \geq 0, \forall A \in \Psi$ 且 $A \neq \phi$;
- (3) $m(\bar{\Delta}) \geq 0$;
- (4) $m(\bar{\Delta}) + \sum_{A \in \Psi} m(A) = 1$

时, 称 m 为该证据的基本概率赋值函数。

证据的组合采用 Dempster 组合规则, 但被组合的证据可以有不同的证据框架。设 m_1, m_2 是分别定义在证据框架 Δ_1, Δ_2 上的两个独立证据, Ψ_1, Ψ_2 分别为 Δ_1, Δ_2 的幂集。将 m_1, m_2 组合, Ψ_{12} 为组合证据 m_{12} 的证据框架 $\Delta_{12} = \Delta_1 \cup \Delta_2$ 的幂集, 记 $\hat{\Psi}_1 = \{\Psi_1, \bar{\Delta}_1\}, \hat{\Psi}_2 = \{\Psi_2, \bar{\Delta}_2\}, \hat{\Psi}_{12} = \{\Psi_{12}, \bar{\Delta}_{12}\}$, 则 $\forall A \in \hat{\Psi}_{12}$, 有

$$m_{12}(A) = \begin{cases} \frac{1}{K} \sum_{X \cap Y = A} m_1(X)m_2(Y), & X \in \hat{\Psi}_1, Y \in \hat{\Psi}_2, A \neq \phi \\ 0, & A = \phi \end{cases} \quad (2)$$

其中 $K = 1 - \sum_{X \cap Y = \phi} m_1(X)m_2(Y)$ 为归一化系数。若 $A \subset \Delta_2, A \subseteq X$ 且 $X - A \subseteq \Delta_2$, 则 $X \cap \bar{\Delta}_2 = A$; 同样, 若 $A \subset \Delta_1, A \subseteq Y$ 且 $Y - A \subseteq \Delta_1$, 则 $\bar{\Delta}_1 \cap Y = A$ 。

在组合具有不同框架的证据的过程中, 不断获取关于未知识别框架的新的信息, 使得证据框架的内涵不断扩展并逐渐趋近于完整的识别框架。所以, 证据框架就可以视为一个

开放的识别框架, 其开放性就体现在证据组合时证据框架的变化。特别地, 如果能够确定某个证据框架 Δ 就是识别框架 Θ , 即有证据 $m(\Delta) = m(\Theta) = 1, m(\bar{\Delta}) = 0$, 把这个证据与任何开放识别框架下的证据组合, 就可以把开放框架下证据变为 D-S 理论所定义的封闭识别框架下的证据。因此, 这种开放识别框架下的证据组合方法可以视为 D-S 理论的一种推广。

同时, 开放识别框架方法也可以看作是上一节 D-S 方法在 $A = \Delta$ 时的一个特例。对于一个证据来说, Δ 就是它所能知道的全部, 因此可以合理假设 $Pl(\Delta) = Bel(\Delta)$ 。也就是说, 相对整个未知的识别框架 Θ 而言, 可以认为该证据对 Δ 是确定性的, 因此, 令 $A = \Delta$ 有其合理性。在 $A = \Delta$ 的条件下, 开放识别框架方法就把未知的识别框架明确划分为已知和未知两个部分, 对未知部分所定义的基本概率赋值 $m(\bar{\Delta})$ 在证据的描述上明确表达了当前识别框架的不完备性。由于 $\bar{\Delta}$ 只包含未知命题, 所以 $m(\bar{\Delta})$ 具有比 $m(\Theta)$ 或 $m(\Theta - A)$ 更明确的物理含义, 其直观解释是“真命题在当前已知识别框架(即证据框架 Δ)之外”的信任度, 但它也从另一方面表达了证据对 Δ 内所有命题的总体置信程度: $m(\bar{\Delta})$ 越大, 表明对 Δ 内命题的置信程度越低。虽然从信任函数的角度, 对未知的 $\bar{\Delta}$ 赋予一个 BPA 没有物理意义, 但是, 在开放识别框架下, 却可以从另一个不同的角度来确定 $m(\bar{\Delta})$ 的值。

考虑两个定义在同一个证据框架 Δ 上的仅有 Δ 和 $\bar{\Delta}$ 两个焦元的证据 m_1, m_2 , 其组合结果

$$\left. \begin{aligned} m_{12}(\Delta) &= \frac{m_1(\Delta)m_2(\Delta)}{m_1(\Delta)m_2(\Delta) + m_1(\bar{\Delta})m_2(\bar{\Delta})} \\ m_{12}(\bar{\Delta}) &= 1 - m_{12}(\Delta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

不失一般性, 可以认为 m_{12} 是 m_2 对 m_1 的一个作用结果。考察在 m_2 的作用下 m_1 的变化情况,

$$\begin{aligned} \frac{m_{12}(\Delta)}{m_1(\Delta)} &= \frac{m_2(\Delta)}{m_1(\Delta)m_2(\Delta) + m_1(\bar{\Delta})m_2(\bar{\Delta})} \\ &= \frac{1}{m_1(\Delta) + m_1(\bar{\Delta})m_2(\bar{\Delta})/m_2(\Delta)} \end{aligned} \quad (4)$$

若 $m_2(\Delta) > m_2(\bar{\Delta})$, 则 $m_{12}(\Delta) > m_1(\Delta)$, 说明 m_2 作用的结果增强了 m_1 对 Δ 的支持, 此时称 m_2 是一个关于 Δ 正证据。反之, 若 $m_2(\Delta) < m_2(\bar{\Delta})$, 则 $m_{12}(\Delta) < m_1(\Delta)$, m_2 作用的结果削弱了 m_1 对 Δ 的支持, 此时称 m_2 是一个关于 Δ 的负证据。若 $m_2(\Delta) = m_2(\bar{\Delta})$, 则 $m_{12}(\Delta) = m_1(\Delta)$, m_2 对 m_1 没有产生任何影响, 此时称 m_2 是一个关于 Δ 的中性证据。

正证据对命题持支持态度, 负证据对命题持排斥或反对态度, 而中性证据则对命题持既不支持也不反对的态度。对于具有不同证据框架和两个以上焦元的复杂证据的组合, 其元命题的 $Pl(\cdot), Bel(\cdot)$ 与 $m(\bar{\Delta})$ 的相对大小在一定意义上也可以反映证据的类似性质: 对于某个元命题 A , 若 $Bel(A) > m(\bar{\Delta})$, 则表明证据为正, 它与其它证据组合将增强后者对 A 的支持度; 若 $Pl(A) < m(\bar{\Delta})$, 则表明证据为负, 它与其它证据组合将削弱 A 为真的可能性(有关开放识别框架

下证据性质的更进一步的讨论将另文详述)。这一结果的物理含义很明显: 如果相信命题 A 的程度 ($\text{Bel}(A)$) 大于所有未知命题的最大可能程度 $m(\bar{\Delta})$, 则证据对 A 是支持的; 如果命题 A 的可能性 ($\text{Pl}(A)$) 小于未知命题的可能性, 则证据对 A 实际上是排斥的。所以, 在开放识别框架下, $m(\bar{\Delta})$ 的大小就可以根据证据对 Δ 中各命题的性质及其支持反对程度再结合 $\sum m(\cdot)=1$ 的约束条件来确定, 而不必从信任函数的角度赋予 $\bar{\Delta}$ 一个 BPA。反过来, $m(\bar{\Delta})$ 的引入也给定性和定量评价证据提供了一个参考基准, 方便了证据建模与证据决策。

开放识别框架方法从单个的证据本身出发来定义证据, 在不破坏识别框架概念的完整性的前提下, 利用证据框架的概念来表达不完备的识别框架, 并把“真命题在证据框架之外”的信度 $m(\bar{\Delta})$ 与组合过程中的“证据冲突” $m(\phi)$ 这两个概念区分开来, 使得基于 Dempster 规则的证据组合满足结合律等公理化要求, 为解决证据理论在识别框架不完备或者识别框架未知条件下的应用问题找到了一条较为合理有效的途径。

例 2 设有 3 个证据: $\Delta_1 = \Delta_2 = \{a, b\}$, $\Delta_3 = \{a, c\}$; $m_1(a) = 0.5$, $m_1(b) = 0.4$, $m_1(\bar{\Delta}_1) = 0.1$; $m_2(a) = 0.4$, $m_2(b) = 0.3$, $m_2(\Delta_2) = 0.1$, $m_2(\bar{\Delta}_2) = 0.2$; $m_3(a) = 0.2$, $m_3(c) = 0.5$, $m_3(\Delta_3) = 0.2$, $m_3(\bar{\Delta}_3) = 0.1$ 。这 3 个证据的组合结果: $\Delta_{123} = \Delta_{132} = \{a, b, c\}$, $m_{123}(a) = m_{132}(a) = 0.758$, $m_{123}(b) = m_{132}(b) = 0.121$, $m_{123}(c) = m_{132}(c) = 0.106$, $m_{123}(\bar{\Delta}_{123}) = m_{132}(\bar{\Delta}_{132}) = 0.015$ 。

例 2 的 3 个证据与例 1 的 3 个证据是相对应的, 只是在具体表达形式上有所区别: 在例 1 中, 对所有证据都以 ϕ 表示不包含在已知框架内的命题的集合, 因而不能根据具体情况区分识别框架的已知和未知部分; 例 2 则分别以 $\bar{\Delta}_1$, $\bar{\Delta}_2$, $\bar{\Delta}_3$ 表示不同证据框架的未知部分, 它们具有明确的物理含义, 也克服了用 ϕ 来表示未知时在数学表述上存在的问题。从组合结果来看, 证据框架在证据组合过程中逐步完善, Δ_{123} (Δ_{132}) 包含 3 个被组合证据中出现的所有元命题, 且 m_{123} (m_{132}) 主要支持在 3 个证据中同时具有较高支持度的命题 a , 这一结果显然比例 1 得出的支持 ϕ 的结论更为合理。此外, 在开放识别框架下, 由于采用满足结合律的 Dempster 规则进行证据组合, 组合顺序不影响组合结果 ($m_{123} = m_{132}$), 并且以其它任意顺序组合例 2 中的各证据其结果也将完全相同, 这一特性符合证据组合的一般公理化要求。最后需指出, 这里为了简化讨论, 例 2 采用的都是关于各自元命题的正证据, 对于含有负证据的情形也有相同的结论。

5 结束语

如何处理识别框架的不完备性, 是证据理论中一个比较突出的问题, 当前处理此类问题的代表性方法是 Smets 所提出的“开放世界假设”。由于开放世界假设方法无法区分“识

别框架不完备”和组合过程中的“证据冲突”这两个不同的概念, 它并没有真正解决不完备识别框架下的证据组合问题。

利用一个不明确的抽象识别框架, 在 D-S 理论的范畴内也能够较好地实现未知识别框架下的证据组合, 但它所面临的主要困难是如何对未知命题赋予一个 BPA。作为 D-S 理论的一个推广, 开放识别框架方法从证据本身出发来定义证据, 引入证据框架的概念, 把整个识别框架分为已知和未知两个部分, 并解决了对未知命题的基本概率赋值问题。同时, 开放识别框架方法能有效区分“不完备识别框架”与“证据冲突”两个概念, 克服了开放世界假设方法所遇到的困难, 为解决证据理论在识别框架不完备或者识别框架未知条件下的应用问题找到了一条较为合理有效的途径。

参考文献

- [1] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping [J]. *Annals of Mathematical Statistics*, 1967, 38(2): 325 - 339.
- [2] Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence [M]. Princeton, Princeton University Press, 1976: 1 - 302.
- [3] Barnett J A. Computational methods for a mathematical theory of evidence [J]. *Proceedings of 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, Vancouver, 1981, Vol. II: 868 - 875.
- [4] 徐从富, 耿卫东, 潘云鹤. 面向数据融合的 DS 方法综述[J]. *电子学报*, 2001, 29(3): 393 - 396.
- [5] Smets P. The combination of evidence in the transferable belief model [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(5): 447 - 458.
- [6] Smets P. The transferable belief model [J]. *Artificial Intelligence*, 1994, 66(2): 191 - 234.
- [7] Kohlas J, Monney P A. Representation of evidence by hints. In R.R. Yager, J. Kacprzyk and M. Fedrizzi (eds.), *Advances in the Dempster-Shafer Theory of Evidence* [M]. New York: John Wiley, 1994: 473 - 492.
- [8] Mahler R. Multisource-multitarget filtering: a unified approach [J]. *SPIE Proc.*, 1998, 3373: 296 - 307.
- [9] Shafer G. Rejoinder to comments on “perspectives on the theory and practice of belief functions” [J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 1992, 6(3): 445 - 480.

曾成: 男, 1971 年生, 博士生, 研究方向为信号处理、数据融合、人工智能。

赵保军: 男, 1960 年生, 博士后, 教授, 主要研究方向为图像处理、信号处理、神经网络与模糊控制、DSP 与 ASIC 设计。

何佩琨: 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高速实时信号处理、雷达系统。