

基于扩展相容性关系的通用证据模型建立过程¹

王 壮 郁文贤 庄钊文 胡卫东

(国防科技大学 ATR 国家重点实验室 长沙 410073)

摘 要: 证据建模已经成为当前制约 D-S 证据理论广泛应用的一个瓶颈问题。Dempster(1967) 基于在多值映射方面的工作, 率先提出了相容性关系这一重要概念; Shafer(1976) 根据这一概念, 定义了信任函数(即证据模型)。本文通过扩展信任函数的相容性关系, 探索性地描述了一个适用于各种不确定性的通用证据模型的建立过程。通用证据模型的建立过程与 Appriou(1999) 的证据模型 1 相比, 物理意义更加明确, 理论体系更加完整; 与其他针对具体应用背景的证据建模方法相比, 适用范围更加广泛。

关键词: 证据建模, 相容性关系, 通用证据模型

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)02-0233-08

The Process of Founding a Generic Evidential Model Based on Extending Compatibility Relation

Wang Zhuang Yu Wen-xian Zhuang Zhao-wen Hu Wei-dong

(ATR State Key Lab, National Univ. of Defense Tech., Changsha 410073, China)

Abstract Evidence modeling has become a bottleneck problem of restricting the application of D-S evidence theory currently. Dempster(1967) firstly brought forward an important concept—compatibility relation based on the research of multi-value mapping. Shafer(1985) defined basic probability assignment function—the model of evidence based on the compatibility relation later. By extending compatibility relation of belief function, the process of founding a generic evidential model is described for kinds of uncertainty in this paper. Compared with Appriou's(1999) first model, the physical meaning of the process of founding the generic evidential model is much more explicit and the system info is much more integrated. This process of modeling has wider range of application than other modeling methods of evidence.

Key words Modeling of evidence, Compatibility relation, Generic evidential model

1 引言

Dempster-Shafer 证据理论作为一种不确定性推理方法, 为不确定信息的表达和合成提供了自然而强有力的方法。在实际问题中, 应用证据理论模型进行不确定性推理的第一步, 就是要将对问题答案的情况提供的信息转化成用一个 (m, F) 的形式表示的证据, 这一过程通常被称为证据的获取或证据模型的建立。证据建模是证据理论研究中的一个关键问题, 但是一直没有得到足够的重视, 已成为制约 D-S 证据理论应用的瓶颈问题^[1]。Shafer 是最先讨论证据模型建立问题的学者, 他根据人们对证据的不同解释, 提出了两种证据模型: 一种是针对统计数据的证据模型^[2], 另一种是针对主观判断的证据模型^[3]。本质上来说, 统计证据模型所反映的是条件概率 $P(s|\theta_i)$ 之间的比例关系, 其中 θ_i 为辨识空间 Θ 上的元素, s 为观测数据, 因此证据所表示的并不是概率本身; 对于主观证据来说, 由于无法采用概率形式来具体表示, 因此主观证据表示的是一种被称为非特定性^[4]的不确定性。随后, Smets 提出了可传递信度模型^[5],

¹ 2002-07-25 收到, 2003-03-03 改回

作为对证据理论模型的另外一种解释。TBM(Transferable Belief Model) 主要是针对主观判断的, 与 Shafer 提出的主观证据模型是一致的。近些年来, 随着 D-S 证据理论在多传感器数据融合中的广泛应用, 使得证据建模问题的研究主要是针对具体的应用背景, 结合实际效果来考虑的^[6-9], 其中最具代表性的是 Appriou 给出的两个不同的证据模型^[9]。但是 Appriou 模型的建立过程及其物理含义并不十分明确。一般情况下, 不同的证据模型对不确定推理结果有较大的影响, 本文基于扩展信任函数的相容性关系 (Compatibility relation)^[10], 探索性地描述了一个适用于各种不确定性的通用证据模型的建立过程。

2 证据模型

Dempster-Shafer 证据理论源于 60 年代 Dempster^[11] 在多值映射方面的工作, 后经 Shafer 的发展, 形成了处理不确定信息的证据理论。一个多值映射把空间 S 中的元素 s 和空间 Θ 中的元素集合联系起来, 即 $\Gamma: S \rightarrow 2^\Theta$, 在映射 Γ 下的元素 s 的像称为 s 的粒子 (Granule), 记为 $G(s)$, S 到 Θ 的多值映射关系被 Dempster 称为空间 S 到 Θ 的相容性关系, 记为 C , 则

$$G(s) = \{\theta | \theta \in \Theta, sC\theta\} \quad (1)$$

定义 1 如果已知空间 S 的概率分布 P , 且空间 S 与 Θ 具有相容性关系 G , 则空间 Θ 上的基本概率分配函数 (Basic Probability Assignment Function, BPAF) $m(2^\Theta \rightarrow [0, 1])$ 可以定义如下:

$$m(A) = \sum_{G(s_i)=A} P(s_i) / \left[1 - \sum_{G(s_i)=\phi} P(s_i) \right] \quad (2)$$

其中空间 $\Theta = \{\theta_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 称为辨识空间 (Frame of discernment), 由对某个问题的所有答案组成。当 $i \neq j$ 时, $\theta_i \cap \theta_j = \phi$, θ_i 和 θ_j 表示不同的答案。由 Θ 的所有子集构成的集合用 2^Θ 来表示, Θ 的子集 A 被称为命题。

$m(A)$ 表示了这样一种概念: 在当前证据提供的信息之下, 我们只能得出问题的答案在 A 中的信度, 而无法知道对 A 中的某个特定答案的信度为多少。 m 的这种定义方法使得在证据理论中, 可以表达以往在概率论中无法表示的一种不确定性——非特定性 (Nonspecificity)^[4]。对于 $A \subseteq \Theta$, 如果 $m(A) \neq 0$, 则 A 称为是 m 的一个焦元 (Focal element), 由所有焦元组成的集合用 F 来表示, F 称为是 m 的核 (Core)。一个证据提供的对问题答案的信息都寄载于二元组 (m, F) 之上, 我们把 (m, F) 称为一个证据体。

3 扩展的相容性关系

3.1 相容性关系^[10]

定义 2 设 $X = \{x_i | i = 1, \dots, k\}$, $Y = \{y_j | j = 1, \dots, l\}$ 为两个不同的辨识空间, $X \times Y$ 表示由 X 和 Y 构成的笛卡尔积空间

$$X \times Y = \{(x_i, y_j) | i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, l\} \quad (3)$$

定义 3 X 和 Y 为两个不同的辨识空间, 其中的元素分别表示对某两个问题的答案。如果 $x \in X$ 是定义在 X 上的问题的答案时, $y \in Y$ 可能为定义在 Y 上的问题的答案, 则称 x 与 y 是相容的, 用笛卡尔积空间 $X \times Y$ 中的元素 (x, y) 来表示。

定义 4 由 X 和 Y 中的所有相容元素 x, y 构成的二元组 (x, y) 组成的集合称为 X 与 Y 之间的相容关系集 $C(X, Y)$, 显然 $C(X, Y) \subseteq X \times Y$ 。

相容性关系集的表示方法有多种。一方面, 可以将 X 与 Y 中相容的元素逐对列出, 如 $C(X, Y) = \{(x_1, y_2), (x_2, y_4), \dots\}$; 另一方面, 可以用规则来表达 X 与 Y 之间的相容性关系集, 如对 $A \subseteq X, B \subseteq Y$, 规则 $A \rightarrow B$ 所表达的相容性关系由这条规则中的逻辑蕴涵关系^[12]来表示, 即

$$C(X, Y) = \bar{A} \vee B = \{(x, y) | x \in \bar{A}, y \in Y\} \cup \{(x, y) | x \in X, y \in B\} \quad (4)$$

其中 \bar{A} 表示集合 A 的补集。

实际上, X 中的元素与 Y 中元素之间的相容性关系往往也是不确定的, 存在着一定的模糊性, 例如 “ $A \subseteq X$ 与 $B \subseteq Y$ 在一定程度 $a(0 \leq a \leq 1)$ 上相容”。这种模糊相容性关系可用这样一条模糊规则来表达:

$$A \rightarrow B, \quad a \quad (5)$$

通过变换可表示成如下处于 $X \times Y$ 上的证据:

$$\left. \begin{aligned} m_C(\bar{A} \vee B) &= a \\ m_C(X \times Y) &= 1 - a \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

3.2 不同辨识空间之间的证据传播

定义 5 给定 $A \subseteq X$, 则集合 A 在 $X \times Y$ 上的独立性扩展为

$$A \times Y = \{(x, y) | x \in A, y \in Y\} \quad (7)$$

定义 6 给定 $A \subseteq X \times Y$, 则集合 A 在空间 X 和 Y 上的投影分别为

$$\text{PROJ}_X(A) = \{x | (x, y) \in A\} \quad (8)$$

$$\text{PROJ}_Y(A) = \{y | (x, y) \in A\} \quad (9)$$

定义 7 设有两个辨识空间 X 和 Y , 二者之间的相容性关系集为 $C(X, Y)$, 对集合 $A \subseteq X$, 它在空间 Y 上的投影为

$$A_{X \downarrow Y} = \{y | x \in A \text{ 且 } (x, y) \in C(X, Y)\} \quad (10)$$

还可以用下式来表示 $A_{X \downarrow Y}$

$$A_{X \downarrow Y} = \text{PROJ}_Y\{(A \times Y) \cap C(X, Y)\} \quad (11)$$

Shafer 在文献 [2] 中给出了不同辨识空间之间的证据传播, 具体定义如下: 对于空间 X 上的证据 (m_X, F_X) , 它在空间 Y 上的投影为 (m_Y, F_Y) , 设 $A \in F_X$ 为 m_X 在 X 上的焦点, 则 $A_{X \downarrow Y}$ 为 A 对应的 Y 上的焦点, 且

$$m_Y(B) = \sum (m_X(A) | A_{X \downarrow Y} = B) \quad (12)$$

文献 [12] 给出了与 Shafer 定义相同的另一种表达形式:

定义 8 设 (m_X, F_X) 为辨识空间 X 上的一个证据, $A \in F_X$ 为 m_X 的焦点, 则此证据在空间 $X \times Y$ 上的扩展形式为 (m_{XY}, F_{XY}) , 其焦点 $B \in F_{XY}$ 为

$$B = A \times Y \quad (13)$$

$$m_{XY}(B) = m_X(A) \quad (14)$$

如果已知 X 与 Y 之间的相容性关系集为 $C(X, Y)$, 我们把它用一条证据来表示, 则有

$$m_C(C(X, Y)) = 1 \quad (15)$$

在空间 $X \times Y$ 上将证据 (m_{XY}, F_{XY}) 与表示 $X \times Y$ 相容性的证据 $m_C(C(X, Y))$ 进行合成, 得到合成后的证据为 (m'_{XY}, F'_{XY}) ; 并且将 (m'_{XY}, F'_{XY}) 投影到空间 Y 上, 得到 (m_Y, F_Y) , 即为在相容性关系 $C(X, Y)$ 下 X 空间的证据 (m_X, F_X) 到空间 Y 上的投影。

设 $B \in F_Y$ 为 (m_Y, F_Y) 的某个焦点, 则有

$$B = \text{PROJ}_Y\{(A \times Y) \cap C(X, Y)\} \quad (16)$$

$$m_Y(B) = \sum (m_X(A) | \text{PROJ}_Y\{(A \times X) \cap C(X, Y)\} = B) \quad (17)$$

可以看出, 上述结果与 Shafer 的表达形式是相同的。从信度的传播过程中可以看出, 由相容性关系集 $C(X, Y)$ 提供的证据类似于概率论中的条件概率, 它为信度的传播建立起一个桥梁, 规定了传播的通路。

4 通用证据模型的建立过程

4.1 通用局部证据模型

设 $\Theta = \{\theta_i | i = 1, \dots, n\}$ 表示由对某个问题的所有答案组成的集合, S 表示由某个特征 u 的测量值构成的集合, $S = \{s\}$, 其中 s 代表 u 的某个特定的测量值。一般根据先验知识, 我们可以建立特征 u 与假设 θ_i 之间的相似性关系, 例如条件概率密度分布 $p(u|\theta_i)$, 或者模糊隶属函数 $\mu_{\theta_i}(u)$ 等。当给定一个测量值 s 时, 根据特征与假设之间的相似性关系, 可以得到 n 个相似性参数 $C_i (C_i \in [0, 1])$, 表示假设 $\theta_i (i = 1, \dots, n)$ 与 s 的相似程度。

如何根据参数 $C_i (i = 1, \dots, n)$ 提供的信息来建立证据模型 (m, F) 呢? 通常有两种途径: 一是直接产生证据模型 (m, F) , 这需要对问题有一个全面的判断, 在实现过程中是很难达到的; 另一方面, 由于参数 C_i 可以看作是由独立的信息源产生的, 所以首先分别利用参数 C_i 对每个假设 $\theta_i (i = 1, \dots, n)$ 建立局部证据模型 (m_i, F_i) , 然后利用 Dempster 组合规则对局部证据模型进行合成, 从而最终获得全局证据模型 (m, F) 。我们采用第二条途径来建立证据模型, 下面描述了一个通用证据模型的建立过程。

首先我们利用参数 C_i 来建立 Θ 中的元素与 S 中的元素之间的相容性关系, 即如果假设 θ_i 是问题答案, 那么 s 是其特征测量值的可能性为 C_i 。用以下两条模糊规则表示为

$$\left. \begin{aligned} \theta_i \rightarrow s, & \quad C_i \\ \theta_i \rightarrow \bar{s}, & \quad 1 - C_i \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

然后把这两条规则表示的信息用以下证据来表示:

$$\left. \begin{aligned} m_{iC}(\bar{\theta}_i \vee s) &= C_i \\ m_{iC}(\bar{\theta}_i \vee \bar{s}) &= 1 - C_i \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

当我们对一个实际问题做了一个观察, 得到一个测量值 s 后, 则可将此测量值表示成一个证据:

$$m_f(s) = 1 \quad (20)$$

它在 $\Theta \times S$ 上的扩展形式为

$$m_f(s \times \Theta) = 1 \quad (21)$$

利用 Dempster 组合规则, 将它与证据 m_{iC} 进行合成, 即 $m_{iT} = m_f \oplus m_{iC}$, 结果如表 1 所示。

表 1 证据 m_f 与 m_{iC} 的合成结果 m_{iT}

	$m_{iC}(E_1) = C_i$ $E_1 = \bar{\theta}_i \vee s$	$m_{iC}(E_2) = 1 - C_i$ $E_2 = \bar{\theta}_i \vee \bar{s}$
$m_f(H) = 1$ $H = s \times \Theta$	$m_{iT}(T_1) = C_i$ $T_1 = H \cap E_1$	$m_{iT}(T_2) = 1 - C_i$ $T_2 = H \cap E_2$

其中

$$\begin{aligned}
 T_1 &= H \cap E_1 \\
 &= (s \times \Theta) \cap (\bar{\theta}_i \vee s) \\
 &= \{(x, y) | x \in \Theta, y = s\} \cap \{(x, y) | x \in \bar{\theta}_i, y \in S\} \cup \{(x, y) | x \in \Theta, y = s\} \\
 &= \{(x, y) | x \in \Theta, y = s\} \cap \{(x, y) | x \in \bar{\theta}_i, y \in S\} \\
 &\quad \cup \{(x, y) | x \in \Theta, y = s\} \cap \{(x, y) | x \in \Theta, y = s\} \\
 &= \{(x, y) | x \in \bar{\theta}_i, y = s\} \cup \{(x, y) | x \in \Theta, y = s\} \\
 &= \{(x, y) | x \in \Theta, y = s\}
 \end{aligned} \tag{22}$$

同理可得

$$T_2 = H \cap E_2 = \{(x, y) | x \in \bar{\theta}_i, y = s\} \tag{23}$$

将 m_{iT} 投影到 Θ 上, 即 $m_i = \text{PROJ}_{\Theta}(m_{iT})$, 得到 Θ 上的通用局部证据模型为

$$\left. \begin{aligned}
 m_i(\bar{\theta}_i) &= 1 - C_i \\
 m_i(\Theta) &= C_i
 \end{aligned} \right\} \tag{24}$$

通过以上操作, 我们可以把所有的参数 C_i 都转化成一系列的局部证据模型 $(m_i, F_i) (i = 1, \dots, n)$ 。由于 Θ 中的各个假设 θ_i 是互不相交的, 实际中参数 C_i 一般来自对不同的假设 θ_i 下数据分布的计算结果, 而构造不同假设 θ_i 下的数据分布时, 所取的样本集是不同的, 因此我们可以说参数 C_i 是不相关的, 或者说由 C_i 获得的一系列证据 (m_i, F_i) 之间是互相独立的, 所以可以使用 Dempster 规则对这些局部证据模型进行合成, 得到一个全局证据模型 (m, F) :

$$m = \bigoplus_{i=1}^n m_i \tag{25}$$

这就是上述问题在某个测量值 s 下的证据模型。

4.2 考虑可信度因子的证据模型

在实际应用中, 特别是数据融合过程要涉及到许多不同的证据, 它们的来源各异, 例如它们来自不同的特征观察, 不同的表象或不同的专家。很自然, 这些来自于不同信息源的证据的可信度是有差别的, 如不同的特征观察值提供的分类信息是不同的, 不同专家因经验的差别, 提供的证据的可信度也是有差别的。因此我们不能将这些具有不同可信度的证据同等看待, 而应当充分考虑到可信度因素对结果的影响, 否则会对整个推理结果的可信程度产生消极的影响。根据前面的通用局部证据模型, 所谓可信度, 可以看成是对参数 C_i 提供的有关假设 θ_i 是否为题答案的信息的正确性的一种评价。一般用可信度因子 $a_i (a_i \in [0, 1])$ 表示, 通过专门的学习过程或者其他知识 (例如专家的经验) 获得。这里, 我们同样可以利用相容性关系来表示参数 C_i 的可信度因子 a_i 。

设 $X = \{x_i | i = 1, \dots, n\}$, $Y = \{y_i | i = 1, \dots, n\}$ 为两个辨识空间, 其中 X 由对某个问题的所有答案构成, 我们称其为答案空间; Y 由证据对问题答案的判断结果所构成, 我们称其为

判断空间。 y_i 和 x_i 相对应, 表示该证据对问题答案的判断为 x_i 。如果实际答案为 x_i 时证据提供的答案总为 y_i , 则说明该证据对 x_i 的判断是可信的。可信度因子 a_i 反映了 X 中元素 x_i 与 Y 中元素 y_i 之间的相容性程度, 即如果实际答案为 x_i , 那么根据参数 C_i 得到的判断结果为 y_i 的可能性为 a_i 。用以下两条模糊规则表示为

$$\left. \begin{aligned} x_i &\rightarrow y_i, & a_i \\ x_i &\rightarrow \bar{y}_i, & 1 - a_i \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

然后把这两条规则表示的信息用以下证据来表示

$$\left. \begin{aligned} m_{ir}(\bar{x}_i \vee y_i) &= a_i \\ m_{ir}(\bar{x}_i \vee \bar{y}_i) &= 1 - a_i \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

这样, 前面建立的证据模型 (m_i, F_i) 可以看作是处于判断空间 Y 上的 (m_{iY}, F_{iY}) 。在一般情况下 (m_{iY}, F_{iY}) 并不是完全可信的, 因此它不能完全等同于我们对问题的真实答案的判断。为了得到 (m_{iY}, F_{iY}) 提供的关于真实答案的判断, 我们需将它从 Y 传播到答案空间 X 上得到 (m_{iX}, F_{iX}) , 它即代表了我们对真实答案的判断。而传播路径正是由可信度 a_i 建立的相容性关系来确定。这样具体步骤如下:

(1) 将判断空间 Y 中的证据 (m_{iY}, F_{iY}) 扩展到 $X \times Y$ 上, 得到 (m_{iXY}, F_{iXY}) , 即

$$\left. \begin{aligned} m_{iXY}(X \times \bar{\theta}_i) &= 1 - C_i \\ m_{iXY}(X \times \Theta) &= C_i \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

(2) 将 (m_{iXY}, F_{iXY}) 和 (m_{ir}, F_{ir}) 在 $X \times Y$ 上使用 Dempster 组合规则进行合成, 即 $m_{iT} = m_{iXY} \oplus m_{ir}$, 结果如表 2 所示。

表 2 证据 m_{iXY} 与 m_{ir} 的合成结果 m_{iT}

	$m_{ir}(E_1) = a_i$ $E_1 = \bar{x}_i \vee y_i$	$m_{ir}(E_2) = 1 - a_i$ $E_2 = \bar{x}_i \vee \bar{y}_i$
$m_{iXY}(H_1) = 1 - C_i$ $H_1 = X \times \bar{\theta}_i$	$m_{iT}(T_1) = a_i \cdot (1 - C_i)$ $T_1 = H_1 \cap E_1$	$m_{iT}(T_2) = (1 - a_i) \cdot (1 - C_i)$ $T_2 = H_1 \cap E_2$
$m_{iXY}(H_2) = C_i$ $H_2 = X \times \Theta$	$m_{iT}(T_3) = a_i \cdot (C_i)$ $T_3 = H_2 \cap E_1$	$m_{iT}(T_4) = (1 - a_i) \cdot (C_i)$ $T_4 = H_2 \cap E_2$

其中

$$\begin{aligned} T_1 &= H_1 \cap E_1 \\ &= (X \times \bar{\theta}_i) \cap (\bar{x}_i \vee y_i) \\ &= \{(x, y) | x \in X, y \in \bar{\theta}_i\} \cap [\{(x, y) | x \in \bar{x}_i, y \in \Theta\} \cup \{(x, y) | x \in X, y = \theta_i\}] \\ &= [\{(x, y) | x \in X, y \in \bar{\theta}_i\} \cap \{(x, y) | x \in \bar{x}_i, y \in \Theta\}] \\ &\quad \cup [\{(x, y) | x \in X, y \in \bar{\theta}_i\} \cap \{(x, y) | x \in X, y = \theta_i\}] \\ &= \{(x, y) | x \in \bar{x}_i, y \in \bar{\theta}_i\} \cup \phi \\ &= \{(x, y) | x \in \bar{x}_i, y \in \bar{\theta}_i\} \end{aligned} \quad (29)$$

同理可得

$$T_2 = H_1 \cap E_2 = \{(x, y) | x \in X, y \in \bar{\theta}_i\} \tag{30}$$

$$T_3 = H_2 \cap E_1 = \{(x, y) | x \in \bar{x}_i, y \in \Theta\} \cup \{(x, y) | x \in X, y = \theta_i\} \tag{31}$$

$$T_4 = H_2 \cap E_2 = \{(x, y) | x \in \bar{x}_i, y \in \Theta\} \cup \{(x, y) | x \in X, y \in \bar{\theta}_i\} \tag{32}$$

(3) 将 m_{iT} 投影到空间 X 上, 并且合并相同项, 得到证据 (m_{iX}, F_{iX}) , 它表达了考虑原始证据的可信度以后对真实答案的判断, 即

$$\left. \begin{aligned} m_{iX}(\bar{x}_i) &= a_i(1 - C_i) \\ m_{iX}(X) &= 1 - a_i(1 - C_i) \end{aligned} \right\} \tag{33}$$

实际上, 考虑参数 C_i 的可信度 a_i 后的证据模型, 可以看作是对原有证据模型的每一个焦元的基本概率分配值都用可信度因子打了一个折扣, 而焦元保持不变, 即最终的通用局部证据模型为

$$\left. \begin{aligned} m_i(\bar{\theta}_i) &= a_i(1 - C_i) \\ m_i(\Theta) &= 1 - a_i(1 - C_i) \end{aligned} \right\} \tag{34}$$

从 Y 到 X 的传播过程也可看成是一个考虑了可信度因子以后的归一化过程, 经过此变换后, 具有不同可信度的证据在 X 上就可以同等对待了。

以上证据由测量空间 S 向答案空间 X 上的传播过程, 即通用局部证据模型的建立过程可用图表示, 如图 1。

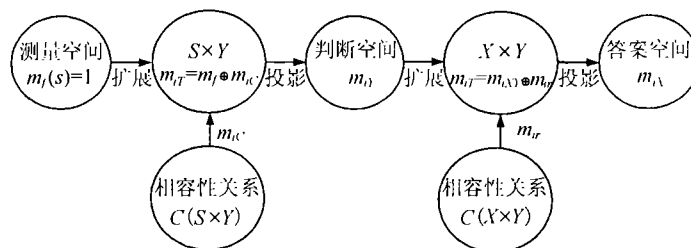


图 1 通用局部证据模型的建立过程

在给定相容性关系 $C(S \times Y)$ 后, 测量空间 S 上的证据 (m_f, F_f) 在判断空间 Y 上的投影为 (m_{iY}, F_{iY}) ; 在给定相容性关系 $C(X \times Y)$ 后, 判断空间 Y 上的证据 (m_{iY}, F_{iY}) 在答案空间 X 上的投影为 (m_{iX}, F_{iX}) , 即最终的通用局部证据模型。

5 结论

本文基于扩展信任函数的相容性关系, 探索性地描述了一个适用于各种不确定性的通用证据模型的建立过程。通用证据模型的建立过程与 Appriou 的证据模型^[9]相比, 物理意义更加明确, 理论体系更加完整; 而且该模型的建立过程与其他针对具体应用背景的证据建模方法相比, 适用范围更加广泛, 为不确定性推理获取合适的证据模型提供了理论基础。

参 考 文 献

[1] Lawrence D S, Thomas L C, James B H. Technical documentation of nodestar(AD-A302458). Naval Research Laboratory, Washington, DC, 1995.

- [2] Shafer G A. *Mathematical Theory of Evidence*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1976: 35-56.
- [3] Shafer G. Belief functions and possibility measures. *Analysis of Fuzzy Information*, edited by J. C. Bezdek, Boca Raton, Fla: CRC Press, 1985: 55-60.
- [4] George J K. Uncertainty in the Dempster-Shafer theory: a critical re-examination. *Int. J. of General Systems*, 1990, 18(2): 155-166.
- [5] Smets P. The combination of evidence in the transferable belief modal. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(5): 447-458.
- [6] Ngwenyama O K, Bryson N. Generating belief functions from qualitative preferences: An approach to eliciting expert judgments and deriving probability functions. *Data & Knowledge Engineering*, 1998, 28(2): 145-159.
- [7] Coombs K, Freel D, *et al.*. Using Dempster-Shafer methods for object classification in the theater ballistic missile environment, SPIE vol.3719, *Sensor Fusion: Architectures, Algorithms and Applications III*, 1999: 103-113.
- [8] 罗志增, 蒋静坪. 基于 D-S 理论的多信息融合方法及应用. *电子学报*, 1999, 27(9): 100-102.
- [9] Appriou A. Multisensor signal processing in the framework of the theory of evidence. NATO/RTO-Lecture Series 216 on Application of Mathematical Signal Processing Techniques to Mission Systems, 1999.
- [10] Lingras P, Wong S K M. Two perspectives of the Dempster-Shafer theory of belief functions. *Int. J. Man-Machine Studies*, 1990, 33(5): 467-487.
- [11] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by multivalued mapping. *Ann. Math. Stat.*, 1967, 38(3): 325-339.
- [12] 曲大健. 不确定性推理的证据理论方法在地震信号解释中的应用. [博士学位论文], 北京: 清华大学, 1993.

王 壮: 男, 1973 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向: 目标识别与数据融合.

郁文贤: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 智能信号处理、目标识别与数据融合.

庄钊文: 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 模糊信息处理、目标识别与复合制导.

胡卫东: 男, 1967 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向: 雷达目标识别与数据融合.