

# 相关证据融合综述

苏晓燕<sup>1</sup>, 韩文花<sup>1</sup>, 许培达<sup>2</sup>, 邓勇<sup>3,4</sup>

(1. 上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 3. 西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072; 4. 西南大学计算机与信息科学学院, 重庆 400715)

**摘要:** 证据理论因具有较强的不确定性信息表达及处理能力,在信息融合系统中具有广泛的应用。然而,经典的证据组合规则假设证据之间相互独立,这在实际系统中往往难以成立。忽略证据间的相关关系,可能导致不合理的融合结果,甚至出现决策失误。因此,如何有效地融合相关证据是证据理论中一个不可避免的、重要的研究课题。通过归纳和比较国内外该方向上的研究成果,将现有的相关证据融合方法分为修改 Dempster 组合规则和修改证据源方法,并分别剖析各类方法的思路、优缺点及相互关系。最后,讨论了相关证据融合研究中存在的问题并指出未来的研究趋势。

**关键词:** 信息融合; 证据理论; 相关证据; 融合

**中图分类号:** TP 39

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1001-506X.2016.06.20

## Review of combining dependent evidence

SU Xiao-yan<sup>1</sup>, HAN Wen-hua<sup>1</sup>, XU Pei-da<sup>2</sup>, DENG Yong<sup>3,4</sup>

(1. School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. School of Electronics Information and Electric Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 4. College of Computer and Information Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** The evidence theory is widely applied in the information fusion system due to its flexibility in representing and handling uncertainty information. However, the classical evidence theory assumes that evidence is independent, which is unrealistic. The ignorance of dependence among evidence may cause an unreasonable result. Thus, how to combine dependent evidence effectively is an inevitable and important issue. In this paper, the combination methods of dependent evidence are divided into two categories from the points of the modification of the Dempster's combination rule and the modification of evidence source. The basic ideas, advantages and disadvantages of these methods, as well as their relationships are analyzed. Finally, the shortcomings of the present methods and the possible research directions in the future are discussed.

**Keywords:** information fusion; evidence theory; dependent evidence; combination

## 0 引言

DS(Dempster-Shafer)证据理论,又称为证据理论或信度函数理论,最早由 Dempster 于 1967 年提出<sup>[1]</sup>,后由 Shafer 在 1976 年将其进一步推广<sup>[2]</sup>。证据理论可以看成是对经典概率论的扩充,它将概率论中的基本事件空间拓宽为基本事件的幂集空间,并在其上建立起基本信度赋值(basic belief assignment, BBA)函数。由于证据理论具有较强的不

确定性信息表达及处理能力,在目标识别、遥感等信息融合系统中具有广泛的应用<sup>[3-6]</sup>。

虽然证据理论的应用取得了一定进展,但也存在一些亟待解决的共性关键问题<sup>[7-8]</sup>。主要包括:①如何合理地构建 BBA 函数<sup>[9]</sup>;②证据理论的合成规则具有呈指数式增长的计算复杂度<sup>[10-11]</sup>;③Dempster 组合规则在融合高度冲突的证据时,常常会得到与常理相悖的结果<sup>[12-13]</sup>;④经典证据理论假设证据间相互独立,无法有效处理相关信息。

收稿日期:2015-04-02; 修回日期:2015-08-04; 网络优先出版日期:2015-12-23。

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20151223.1113.028.html>

基金项目:国家自然科学基金(51107080,61174022,61503237,61573290);上海市电站自动化技术重点实验室(13DZ2273800)资助课题

针对前 3 个问题的研究比较丰富,国内也有相关的研究综述报道<sup>[14-15]</sup>。然而,针对第 4 个问题,即针对相关证据的表达及融合问题的方法比较零散,至今在国内外文献中也未看到较为全面的综述性文章。本文通过对国内外该方向上具有代表性的研究工作归纳总结,分析探讨各种方法的优缺点,并在此基础上对相关证据融合研究提出一些建议和展望。

## 1 证据理论基础

本节简要回顾证据理论的基本概念。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:

**定义 1** 设  $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$  是变量  $X$  的所有可能值的穷举集合,并且  $\Theta$  中的元素是互斥的,称  $\Theta$  为  $X$  的一个辨识框架。 $\Theta$  的幂集  $2^\Theta$  构成命题集合。当  $\Theta$  中元素的个数为  $n$ ,命题集合所代表的空间大小为  $2^n$ 。

证据理论中最基本的信息载体称为基本信度赋值(basic belief assignment, BBA),其定义如下:

**定义 2** 设  $\Theta$  为辨识框架,如果函数  $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  满足条件

$$\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \quad (1)$$

式中,  $m(A)$  反映了证据对命题  $A$  的支持程度。若对  $\forall A \subseteq \Theta$ , 有  $m(A) > 0$ , 则称  $A$  为焦元,所有的焦元集合称为核。式中,若限制  $m(\emptyset) = 0$ , 则对应闭世界假设;若允许  $m(\emptyset) > 0$ , 则对应开世界假设,其中  $\emptyset$  为空集。

**定义 3** 设两相互独立且完全可靠的证据源,其 BBA 分别为  $m_1$  和  $m_2$ , 焦元分别为  $B_i$  和  $C_j$ 。按照证据理论的 Dempster 组合规则可以将这两个 BBA 进行融合,该规则定义为

$$m(A) = \frac{\sum_{B_i \cap C_j = A} m_1(B_i) m_2(C_j)}{1 - K} \quad (2)$$

式中,  $K = \sum_{B_i \cap C_j = \emptyset} m_1(B_i) m_2(C_j)$  称为冲突系数,能在一定程度上反映证据之间的冲突程度。

**定义 4** 设  $m$  为辨识框架  $\Theta$  上的 BBA, 则其对应的赌博概率转换  $BetPm: \Theta \rightarrow [0, 1]$  定义为

$$BetPm(\omega) = \sum_{A \subseteq \Theta: \omega \in A} \frac{1}{|A|} \cdot \frac{m(A)}{1 - m(\emptyset)}, m(\emptyset) \neq 1 \quad (3)$$

式中,  $|A|$  为集合  $A$  的基数。

## 2 相关证据融合

DS 证据理论在 1976 年被系统提出时, Dempster 和 Shafer 指出, Dempster 组合规则要求融合的证据必须满足独立性条件。原文表述为: “The uncertainties in the arguments being combined, ..., must be independent when the arguments are viewed abstractly-i. e., before the interactions of their conclusions are taken into account”<sup>[2]</sup>。他们认为, 融合的证据之间必须相互独立, 证据源之间没有相互影响。然而, 这里所指的独立性的解释非常抽象和模糊,

Dempster 和 Shafer 并没有明确所谓的“独立性”的含义。而后, Robert 和 Voobraak 等学者相继指出忽略证据源之间的相关关系, 直接使用 Dempster 组合规则, 将导致融合结果不合理的情形<sup>[16-18]</sup>。以下是文献[16]给出的反例。

**例 1** 有一个均匀的六面骰子以及“大小”和“奇偶”两种传感器。投掷该骰子同样大量的次数, 奇偶传感器报告骰子朝上的点数奇偶对半, 大小传感器报告骰子朝上的点数大小对半。此时, 再投掷一次该骰子, 结果将是什么?

该问题用数学的语言可描述为, 已知辨识框架  $\Theta = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ , 由两传感器采集的信息所生成的基本信度赋值分别为:

$$\text{奇偶: } m_1(\{1, 3, 5\}) = 0.5, m_1(\{2, 4, 6\}) = 0.5;$$

$$\text{大小: } m_2(\{1, 2, 3\}) = 0.5, m_2(\{4, 5, 6\}) = 0.5.$$

如果使用经典的 Dempster 组合规则对以上两个证据进行融合, 其结果为

$$m(\{1, 3\}) = m(\{2\}) = m(\{4, 6\}) = m(\{5\}) = 0.25$$

这实际上明显与人的直观认知不符。

针对这些证据相关导致的融合悖论, 国内外学者纷纷提出解决方法。本文对现有的方法进行归纳分析, 认为这些方法主要可以分为两类: 一是基于修改 Dempster 组合规则的方法; 二是基于修改证据源的方法。下面分别对这两类方法进行总结。

### 2.1 基于修改 Dempster 组合规则的方法

这类方法的核心思想是: 既然 Dempster 组合规则要求证据之间相互独立, 那么如果提出一种新的证据融合方法可以免去“证据独立性”条件的限制, 就可以解决相关证据的融合问题。文献[19]将 Dempster 组合规则中的“独立性假设”置换成“最小冲突假设”, 最早提出了基于修改 Dempster 组合规则的相关证据融合方法。然而, 该方法实质上是在 BBA 层面对证据间的冲突(相似性)进行分析, 并没有把握证据源“相关”的真正内涵。美国 SANDIA 国家实验室在 2004 年发表了题为“Dependence in probabilistic modeling, Dempster-Shafer theory, and probability bounds analysis”的技术报告<sup>[20]</sup>, 采用概率论中常见的相关系数、copula 函数等进行相关分析, 主张采用 Fréchet 界限来描述相关不确定的情况。然而, 该报告仅针对区间概率形式的证据体进行分析, 并不能解决一般情况下的证据相关关系分析及融合。文献[21-22]将可能性理论中的最小准则推广到相关证据的融合中, 并提出了相应的融合规则, 但文献[23]指出, 该规则并不满足证据理论的基本等式。文献[24]认为, 要去除“独立性假设”, 那么组合规则必须满足“幂等”条件。为此, 文献[24]针对可靠的证据源提出了谨慎组合规则(the cautious rule of combination), 针对不可靠的证据源提出了冒险的析取规则(the bold disjunctive rule)。这两个规则均满足交换律、结合律以及幂等律。然而, 文献[24]所提出的组合规则都是在 BBA 函数能规范分解的基础上建立起来的, 对于不能分解的 BBA 显得无能为力。此外, 满足“幂等”性质的组合规则是否就意味着能够处理相关证据还有待商榷, 因为相互独立的证据

源也可能构建起相同结构的 BBA 函数, 幂等的结果反而会损失一些信息。文献[25-26]注意到了这些问题, 并在文献[24]方法的基础上, 分别提出了自适应的谨慎规则(the cautious-adaptive rule)<sup>[25]</sup>以及混合式组合规则(the mixed combination rule)<sup>[26]</sup>, 用于融合部分相关的证据。以上两种组合规则可以分别看成是谨慎规则与 Dempster 组合规则及合取规则(the conjunctive rule)的中间过渡规则, 但其确定证据间相关程度的评判仍然建立在 BBA 结构层面上。文献[27]将 BBA 规范分解的权重函数分为正权重函数和负权重函数, 建立起证据间的偏序关系, 并基于此提出新的相关证据融合规则。此外, 文献[28]还基于文献[24]的谨慎组合规则以及基于区间信度函数推理的工作<sup>[29-30]</sup>, 提出了相关的区间信度函数的融合方法, 并将其应用于绩效考核中。文献[31]受到“贝叶斯更新规则是 Dempster 组合规则在单子集命题上的特殊表现形式”的启发, 将相关证据的融合问题回归到贝叶斯更新规则的修改问题。为了实现问题的转化, 文献[31]首先提出了 Dirichlet BBA 的概念, 并将其与 Dirichlet 分布建立起双射关系(bijective mapping), 在此基础上提出了累加性融合方法(cumulative rule)以及平均融合方法(averaging rule), 分别用于融合独立源证据和相关证据。该方法采用简单的平均方法融合相关证据, 只适用于处理完全相关的证据, 无法处理证据之间部分相关的情况。此外, 该方法仅适用于 Dirichlet BBA, 且不能有效降低融合结果的不确定性。文献[32]借鉴概率论中处理相关关系的方法, 即联合概率分布的思想, 提出了相关证据的融合方法。然而, 该方法实质上是将证据理论中的 BBA 直接看做离散的概率分布来处理, 得到的融合结果也不是 BBA, 而是 BBA 焦元的成对组合。文献[33]同样是从联合概率分布的思想出发, 但与文献[32]不同之处在于, 该融合方法没有将 BBA 直接与离散概率分布划等号, 而是将它们放在两个层次上考虑: 认为 BBA 是证据源的一种具体表现形式(即用于描述证据源不确定的一种外在形式, 属于 BBA 层次), 而证据源属于信息源层次(assumption level), 其相关关系可采用联合概率的方式进行描述。该方法首先基于线索理论(the theory of hints)定义了信息源层次到 BBA 层次的映射关系  $H=(\Omega, P, \Gamma, \Theta): \Omega$  为有限的假设集(信息源层次),  $\Theta$  为所关心的对象的辨识框架(BBA 层次),  $P$  为  $\Omega$  中命题发生的概率,  $\Gamma$  则是从信息源的命题到  $\Theta$  的幂集的映射。而后, 结合联合概率分布及 Dempster 组合规则, 提出了新的相关证据融合规则, 并将其应用于区分含有噪声和相关关系的证据分类器中<sup>[34]</sup>。该方法能够很好地解决例 1 存在的问题(用联合概率描述信息源层次的命题“奇偶”及“大小”之间存在的相关关系, 再将融合的结果映射到关心的对象, 即骰子的点数  $\Theta=\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  中去)。该方法跳出了修改组合规则一类方法中普遍存在的从 BBA 结构层次上研究相关关系的思路的束缚, 探索信息源之间本质的内在关联, 具有较大突破, 但依然存在一些问题: 如基于概率的信息源层次的不确定性不能很好地表达;

基于线索理论的映射关系只能处理点到集合的映射, 无法处理点到分布的映射关系。

## 2.2 基于修改证据源的方法

基于修改证据源的相关证据融合方法又可分为基于相关源证据模型的方法和基于折扣修正模型的方法。以下分别予以介绍。

### 2.2.1 基于相关源证据模型的方法

相关源证据模型是文献[35]在 1992 年提出的一种相关证据模型, 该模型认为: 两个证据之所以相关是由于它们是从同一个证据源更新后得到的。由于 Dempster 组合规则可以看成是贝叶斯更新规则的推广, 因此, 这里所谓的“更新”规则即是指 Dempster 组合规则, 而被更新的源证据则称为相关源证据。该模型也可以更具体地表述为: 两个相关的证据  $E_1$  和  $E_2$  可以看成由一个相关源证据  $E_c$  分别与另外两个独立源证据  $E_{1i}$  和  $E_{2i}$  通过 Dempster 组合规则融合后得到, 如图 1 所示。

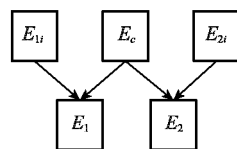


图 1 相关源证据模型

此时, 若没有考虑  $E_1$  和  $E_2$  之间的相关关系, 直接采用 Dempster 组合规则进行融合, 则有

$$m_1 \oplus m_2 = m_{1i} \oplus m_c \oplus m_c \oplus m_{2i} \quad (4)$$

式中,  $m_i$  为  $E_i$  的 mass 函数。显然, 相关源证据被重复计算了 1 次, 这将导致融合结果超估计。合理的融合结果应该为

$$\begin{aligned} m_1 \oplus m_2 &= m_{1i} \oplus m_c \oplus m_{2i} = \\ m_{1i} \oplus m_2 &= m_1 \oplus m_{2i} \end{aligned} \quad (5)$$

基于该模型的相关证据融合方法, 主要思路就是避免相关源证据的重复计算。文献[35]给出了可传递信度模型(transferable belief model, TBM)框架下的相关证据融合规则, 该规则是基于众信度函数的表达式构建起来的, 简单明了, 通过除法运算扣除了相关源证据的重复计算部分。但由于该规则是建立在 TBM 框架下的, 因此没有得到足够的关注。国内的很多学者更倾向于将相关证据“去合成”, 辨识出对应的独立源证据(求解独立源证据可以看做是 Dempster 融合的逆过程), 再将这两个独立源证据与相关源证据进行融合, 得到正确的融合结果。文献[36]采用梯度下降法迭代求解独立源证据, 此过程需设定误差门限, 计算量较大, 且所求得的结果为近似解, 并且解不唯一。不过他们证明, 如果最终的目的是得到融合结果(即两个独立源证据与一个相关源证据的融合结果), 则解的不唯一性对最后的结果没有任何影响。文献[37]采用构造线性方程组的方法反求独立源证据, 比文献[36]方法计算成本低, 且可得精确解。但当识别框架元素增多时, 方程数可能成指数增长, 计算量还是很大。文献[38]在文献[37]的基础上, 针对贝叶斯结构的 BBA, 给出了一种新的方程组的构建求解

法。文献[39]在文献[36]的基础上,对 DS 理论(Dezert-Smarandache theory, DSmT)<sup>[40-41]</sup>中同样存在的证据独立性假设进行研究,给出了 DSmT 框架下的求解独立源证据的精确解法和近似解法,并初步探讨了多相关证据融合的情况。该方法得到精确解的条件极为苛刻,更多地是采用近似解法,同样存在计算量大,结果不唯一等问题。文献[42]追根溯源,借鉴文献[35]中的方法,基于众信度函数的表达式(参见文献[43]),提出了 DS 证据理论框架下的 Dempster 组合规则的逆运算(即“去合成”)表达式,以及相关证据的融合规则,并予以证明。

设  $\Theta$  为辨识框架,  $Q_i$  为  $m_i$  的众信度函数,若已知  $m_1, m_c$ , 且  $m_1 = m_{1i} \oplus m_c, m_c(\Theta) \neq 0$ , 则  $m_{1i}$  的众信度函数  $Q_{1i}$  可通过以下“去合成”公式得到。

$$Q_{1i}(A) = C^{-1} \frac{Q_1(A)}{Q_c(A)}, \forall A \subseteq \Theta \quad (6)$$

式中,  $C = \sum_{\emptyset \neq X \subseteq \Theta} (-1)^{|X|+1} \frac{Q_1(X)}{Q_c(X)}$ 。

相应地,若  $m_1, m_2$  为  $\Theta$  下两相关 BBA, 它们的相关源证据的 BBA 为  $m_c$ , 且  $m_c(\Theta) \neq 0$ , 则合理的融合结果可用众信度函数形式简洁地表达为

$$Q_{1 \oplus 2}^*(A) = c^{-1} \frac{Q_1(A)Q_2(A)}{Q_c(A)}, \forall A \subseteq \Theta \quad (7)$$

式中,  $c = \sum_{\emptyset \neq X \subseteq \Theta} (-1)^{|X|+1} \frac{Q_1(X)Q_2(X)}{Q_c(X)}$ 。

根据以上相关证据融合规则,在无需辨识独立源证据的情况下,可以直接得到正确的融合结果,避免对相关源证据的重复计算。该方法巧妙地运用了证据理论中 BBA 函数与众信度函数之间的对应关系,较之前的方法更为简便,可以说基本上解决了 Dempster 组合规则求逆的问题。然而,该方法也有一定的使用限制,如相关源证据中全集的置信度不为零。

值得注意的是,相关源证据模型只是定义证据的相关关系的其中一种模型,并不能广泛适用于各种相关关系。比如,两相关证据间的相关部分并不一定以“证据”的形式存在;相关源证据的更新规则并不一定就是 Dempster 组合规则。文献[44]是相关源证据模型扩展方向上的最新研究成果,该文献采用条件概率表达相关源证据与相关证据间的关联关系,并通过假设两相关证据间的条件独立性,提出基于概率论思想的相关证据融合方法。除了上述提到的相关源证据模型在相关关系表达方面的局限性以外,基于该模型的融合方法还存在一个共性问题有待解决,即如何获取两个相关证据的相关源证据或者近似相关源证据。

### 2.2.2 基于折扣修正模型的方法

这类方法的观点是采用 Dempster 组合规则直接融合相关证据,则证据间相关的部分将被重复计算,导致合成结果超估计。与第 2.2.1 节的“相关源证据模型”不同,基于折扣修正模型的方法并没有定义相关证据及其相关部分的转化关系,而是认为相关证据之间必然存在某种形式的关联,但具体的形式可能是纷繁复杂的。这类方法的基本思

路是:比起独立的证据,相关证据存在信息的交叠,在融合过程中不能被赋予相同的权重,而应该进行一定的折扣,并且折扣系数取决于相关的程度。

文献[45]定义了规范证据相关度,使其正比于证据相关强度。并采用“1-规范证据相关度”为相关证据的可信度,对相关证据的所有焦元进行修正,以消除相关部分的影响。文献[46]认为相关证据之所以相关,是因为它们的某些焦元由共同的信息源所产生,并据此给出相关焦元的定义。根据证据强度(the energy of evidence)的概念提出了相关证据的相关程度表达式,基于此相关程度定义了两相关证据对应的相关系数,并将相关系数作为修正系数,提出了相关证据的融合规则。文献[47]同样认为相关证据的相关性必然体现在某些相关焦元上,提出基于相关证据强度的融合方法,并利用机器人的力觉和视觉传感器实验验证该方法的有效性。文献[48]对“相关焦元”做了进一步解释,并对相关焦元的分布情况进行分析,认为相关证据的焦元可以分为相关焦元与非相关焦元两个部分。在此基础上,提出基于可变参数优化的相关证据合成方法,其中,参数是指对相关焦元的修正系数,可变是指该修正系数可以用已有的数据为学习样本,通过神经网络、遗传算法等进行优化来确定。文献[49-50]分别采用神经网络算法以及粒子群神经网络优化方法(partial swarm optimization-back propagation, PSO-BP)确定相关焦元的修正系数,提高了优化过程收敛的速度和精度。基于“相关焦元”的相关证据融合方法认为,相关源只对相关证据的部分焦元产生影响,由此可推知:当相关源作用于所有焦元时(即“相关焦元”为所有焦元),则该方法退化成肖人彬等人提出的全局折扣方法。从这个角度来说,基于“相关焦元”的融合方法是更为全面更为精确的一种模型。然而,在实际应用中,“相关焦元”的物理意义并非十分明确,如何确定“相关焦元”仍是十分具有挑战性的问题。并且这些研究都仅限于两个相关证据的融合,对于多个相关证据的情况,还有更多的研究工作需要展开。比如,此时的相关焦元如何确定,因为很有可能每两个证据之间的相关焦元不尽相同。此外,此类方法多采用可变参数优化方法确定修正系数,这需要大量的符合条件的历史性数据作为支撑,实际应用中往往不容易实现。

基于上述存在的问题,通过全局折扣的方式将相关证据转化为近似独立的证据是一个现阶段切实可行的方案。文献[51]将相关证据通过全局折扣系数拆分为独立部分以及相关部分,所有相关部分进行平均运算,得到一个代表相关部分的 BBA,再与其他的独立部分的 BBA 用 Dempster 组合规则进行融合。文献[52]在文献[51]的基础上,研究了 DSmT 框架下的相关证据融合方法,并应用于并发故障诊断中。这类融合方法适用于多个相关证据的融合,但由于多个相关证据之间的相关程度并不一定相同,简单的求取平均值显得较为粗糙。文献[53]提出了以相对独立性程度作为权重的加权融合相关证据方法。所谓的相对独立性程度,是指后一个证据相对于之前所有证据的独立程度。

采用相对独立性程度作为折扣因子处理过的证据,可视为与之前的证据相互独立,故可采用 Dempster 组合规则进行融合。该方法依赖于证据融合的顺序,排在前面的证据对融合结果的影响更大,为此,文献[53]提出了基于证据信息量排序的方法,尽可能减小信息量的损失。然而,该方法并没有给出相对独立性程度的判定依据,并且当证据量较多时,该方法的计算复杂度将大大增加。针对折扣模型中相关程度的判定,文献[54]提出了一种基于网络分析法(analytic network process, ANP)的相关折扣系数求解方法。该方法需要依靠专家意见进行建模,存在一定的主观性。

从上面的分析可以看出,这类方法旨在将相关证据通过折扣系数进行修正,转化为“近似”独立的证据,使其适用于 Dempster 组合规则。相较于之前“基于相关源证据模型”的方法,该方法没有限制相关源对相关证据的作用模式,是一种较为灵活的处理方式。

### 3 总结与讨论

通过上述国内外研究现状的分析可知:相关证据融合问题是研究 DS 证据理论及其应用中的共性关键问题,正在逐渐成为该领域的研究热点,它的有效解决将在很大程度上推进 DS 证据理论的应用和发展,对信息融合的理论 and 实践都具有重要意义。前文对现有的相关证据融合方法进行全面深入地归纳总结,将其分为两大类,并对每一个类别的主要思想进行概括提炼、理清其研究发展脉络,整理分析了各个类别中不同方法的优缺点。这两类方法是从不同角度对相关证据进行分析处理,都有一定的合理性,二者并不全然对立,应该根据具体的情况选择合适的方法。然而,虽然每种方法在理论和应用上都取得了一定进展,但仍然存在一些关键问题未能解决。以下分别对不同类别的方法所存在的问题进行归纳总结:

(1) 修改 Dempster 组合规则的方法,通过提出新的不受“证据独立性”条件约束的组合方法来实现相关证据的融合。以文献[19, 24]为代表的基于 BBA 结构层次的相关证据融合方法,错误地将 BBA 结构相似与证据源相关划等号,忽略了独立证据同样可以产生相同结构 BBA 的情形,存在理论上的缺陷。文献[31-33]注意到这个问题,并采用不同的方法对信息源的相关关系进行建模,但仍然存在一些不足:如简单地采用基于概率论的贝叶斯推理方法以及联合分布概率的方法,只能处理特定形式的 BBA;基于概率的信息源层次的不确定性不能很好的表达;基于线索理论的映射关系只能处理点到集合的映射,无法处理点到分布的映射关系。

(2) 基于相关源证据模型的方法,属于修改证据源方法的一种,它是建立在“相关证据是由同一个相关源证据与另外两个独立的证据通过 Dempster 组合规则融合后得到”这一假设前提上的,并不能广泛地适用于各种相关关系。首先,相关源是并不一定以证据(BBA)的形式存在,它可以是构成证据的一个参考要素;其次,相关源证据的更新规则

不一定是 Dempster 组合规则。此外,如何获取两个相关证据的相关源证据或者近似相关源证据也是该模型方法具体应用中的一个难题。

(3) 基于折扣修正模型的方法,属于另一种修改证据源的方法,它将相关证据通过折扣系数进行修正,转化为“近似”独立的证据,使其在采用 Dempster 组合规则进行融合的过程中尽量避免相关部分的重复计算。其中,基于“相关焦元”的融合方法理论上而言是较为全面精确的一种模型,但在实际应用中,如何确定“相关焦元”,以及如何处理多个相关证据一直是个难点,此外,采用变参数优化方法确定“相关焦元”的修正系数,这需要大量的符合条件的历史性数据作为支撑,实际应用中往往难以实现。因此,基于“全局折扣”的修正模型是现阶段较为可行的方案,但该方案同样存在一个关键的问题亟待解决,即如何确定相关证据之间的相关程度,它将直接影响到融合结果的可靠性。

(4) 在第1个问题中,一些学者错误地将 BBA 结构相似等同于证据源相关,实质上是混淆了冲突证据融合问题与相关证据融合问题的研究对象。从解决问题的层次来看,冲突证据融合是属于 BBA 层次的问题,而相关证据融合则是属于信息源层次的问题,二者之间有本质的区别。相关的证据源在具体的 BBA 表示上,可以是冲突的也可以是不冲突的;不相关的证据源(独立证据源)在 BBA 的表示上,同样可以是冲突或者不冲突的,反之同样成立。因此,证据源(信息源)之间是否相关与证据(BBA)是否冲突并无必然联系。然而,值得注意的是,通过对来自不同信息源的大量的证据进行冲突(或相似性)的分析,所得结果可作为信息源之间相关关系及程度的参考依据(这与基于统计参数的相关证据融合方法思路一致)。同样地,在某些情况下,通过分析证据源之间的相关关系也可以对证据的冲突进行解释。证据的相关与冲突之间的关系有待进一步的探索和研究。

(5) 在应用方面,目前很多基于 DS 证据理论的应用依然保留“证据独立性”的假设条件,并没有充分考虑相关证据的影响。然而,在实际的工程实践中,信息源之间相互关联相互影响是更为普遍、更为一般的情况,如果采用与现实相背离的简化模型,必将导致部分融合结果不尽人意,影响证据理论的进一步发展及应用。当然,若所有的融合过程均考虑相关性的计算及处理,则会大大增加信息融合的时间,这对某些实时性要求较高的系统并不一定合理。在未来的研究中,可以考虑设计用于度量关联性显著程度的指标或指标体系,并根据不同的系统制定相应的指标阈值参数,并分析该参数与证据融合合理性之间的关系,从而针对不同关联程度制定更有效的融合策略。

### 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.
- [3] Han C Z, Zhu H Y, Duan Z S. *Multi-source information fusion*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (韩崇昭, 朱红艳, 段战胜. 多源信息融合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.)
- [4] Pan Q, Cheng Y M, Liang Y, et al. *Multi-source information fusion theory and its applications*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (潘泉, 程咏梅, 梁彦, 等. 信息融合理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.)
- [5] Pan Q, Wang Z F, Liang Y, et al. Basic methods and progress of information fusion[J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(4): 1233 – 1244. (潘泉, 王增福, 梁彦, 等. 信息融合理论的基本方法与进展(II)[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(4): 1233 – 1244.)
- [6] Guan X, He Y, Yi X. Radar emitter recognition of gray correlation based on D-S reasoning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(3): 274 – 277. (关欣, 何友, 衣晓. 基于 D-S 推理的灰关联雷达辐射源识别方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(3): 274 – 277.)
- [7] Han D Q, Yang Y, Han C Z. Advances in DS evidence theory and related discussions[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(1): 1 – 11. (韩德强, 杨艺, 韩崇昭. DS 证据理论研究进展及相关问题探讨[J]. 控制与决策, 2014, 29(1): 1 – 11.)
- [8] Dai G Z, Pan Q, Zhang S Y, et al. The developments and problems in evidence reasoning[J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(4): 465 – 469. (戴冠中, 潘泉, 张山鹰, 等. 证据推理的进展及存在问题[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(4): 465 – 469.)
- [9] Xu P D, Deng Y, Su X Y, et al. A new method to determine basic probability assignment from training data[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2013, 46(1): 69 – 80.
- [10] Haenni R, Lehmann N. Resource bounded and anytime approximation of belief function computations[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2002, 31(1): 103 – 154.
- [11] Wang Z, Hu W D, Yu W X, et al. A fast evidential combination method based on truncated Dempster-Shafer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2002, 24(12): 1863 – 1869. (王壮, 胡卫东, 郁文贤, 等. 基于截断型 D-S 的快速证据组合方法[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(12): 1863 – 1869.)
- [12] Han D Q, Deng Y, Han C Z, et al. Conflicting evidence combination by using uncertainty degree[J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(6): 788 – 792. (韩德强, 邓勇, 韩崇昭, 等. 利用不确定度的冲突证据组合[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(6): 788 – 792.)
- [13] He Y, Hu L F, Guan X, et al. A new method of measuring the degree of conflict among general basic probability assignments[J]. *Science China: Information Science*, 2011, 41(8): 989 – 997. (何友, 胡丽芳, 关欣, 等. 一种度量广义基本概率赋值冲突的方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(8): 989 – 997.)
- [14] Guo H W, Shi W K, Deng Y, et al. Evidential conflict and its 3D strategy: discard, discover and disassemble[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(6): 890 – 898. (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.)
- [15] Fu Y W, Yang W, Zhuang Z W. Review on evidence modeling[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(6): 1160 – 1167. (付耀文, 杨威, 庄钊文. 证据建模研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(6): 1160 – 1167.)
- [16] Fung R, Chong C. Metaprobability and Dempster-Shafer in evidential reasoning[C] // *Proc. of the 1st Conference Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI – 85)*, 1985: 76 – 83.
- [17] Voorbraak F. On the justification of Dempster's rule of combination[J]. *Artificial Intelligence*, 1991, 48(2): 171 – 197.
- [18] Altincay H. On the independence requirement in Dempster-Shafer theory for combining classifiers providing statistical evidence[J]. *Applied Intelligence*, 2006, 25(1): 73 – 90.
- [19] Cattaneo M E. Combining belief functions issued from dependent sources[C] // *Proc. of the 3rd International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications*, 2003.
- [20] Ferson S, Nelsen R B, Hajagos J, et al. *Dependence in probabilistic modeling, Dempster-Shafer theory, and probability bounds analysis*[M]. New Mexico: Sandia National Laboratories, 2004.
- [21] Destercke S, Dubois D, Chojnacki E. Cautious conjunctive merging of belief functions[J]. *Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning with Uncertainty*, 2007, 4724: 332 – 343.
- [22] Destercke S, Dubois D. Idempotent conjunctive combination of belief functions: extending the minimum rule of possibility theory[J]. *Information Sciences*, 2011, 181(18): 3925 – 3945.
- [23] Cattaneo M E. Belief functions combination without the assumption of independence of the information sources[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2011, 52(3): 299 – 315.
- [24] Denœux T. Conjunctive and disjunctive combination of belief functions induced by nondistinct bodies of evidence[J]. *Artificial Intelligence*, 2008, 172(2): 234 – 264.
- [25] Kallel A, Hégarat M S L. Combination of partially non-distinct beliefs: the cautious-adaptive rule[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2009, 50(7): 1000 – 1021.
- [26] Chebbah M, Martin A, Yaghlane B B. Combining partially independent belief functions[J]. *Decision Support Systems*, 2015, 73: 37 – 46.
- [27] Fu C, Yang S. Conjunctive combination of belief functions from dependent sources using positive and negative weight functions[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(4): 1964 – 1972.
- [28] Fu C, Yang S. The combination of dependence-based interval-valued evidential reasoning approach with balanced scorecard for performance assessment[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(3): 3717 – 3730.
- [29] Wang Y M, Yang J B, Xu D L, et al. The evidential reasoning approach for multiple attribute decision analysis using interval belief degrees[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 175(1): 35 – 66.
- [30] Wang Y M, Yang J B, Xu D L, et al. On the combination and normalization of interval-valued belief structures[J]. *Information Sciences*, 2007, 177(5): 1230 – 1247.

- [31] Jøsang A, Diaz J, Rifqi M. Cumulative and averaging fusion of beliefs[J]. *Information Fusion*, 2010, 11(2): 192–200.
- [32] Choenni S, Blok H E, Leertouwer E. Handling uncertainty and ignorance in databases; a rule to combine dependent data[C]// *Proc. of the 11th International Conference on Database Systems for Advanced Applications*, 2006: 310–324.
- [33] Monney P A, Chan M. Modelling dependence in Dempster-Shafer theory[J]. *International Journal of Uncertainty Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2007, 15(1): 93–114.
- [34] Monney P A, Chan M, Romberg P. A belief function classifier based on information provided by noisy and dependent features[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2011, 52(3): 335–352.
- [35] Smets P, Kennes R. The concept of distinct evidence[C]// *Proc. of the 4th Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-based Systems*, 1992:789–794.
- [36] Sun H J, Yang J Y. A combination method for dependent evidences[J]. *Chinese Journal of Computers*, 1999, 22(9): 1004–1007. (孙怀江, 杨静宇. 一种相关证据合成方法[J]. 计算机学报, 1999, 22(9): 1004–1007.)
- [37] Wang M W, Wu G X, Sun Y Q. The combination method for dependent evidence[J]. *Journal of Jiangxi Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2002, 26(2): 135–149. (王明文, 吴根秀, 孙永强. 相关证据合成方法[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2002, 26(2): 135–149.)
- [38] Zhang Z L, Liu S W, Gao S S, et al. The study and improve of dependent evidence combining method[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(2): 452–454. (张震龙, 刘思伟, 高社生, 等. 相关证据合成方法的研究及改进[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(2): 452–454.)
- [39] Wang J, Sun H J. Model for dependent evidences in DS<sub>m</sub>T framework[J]. *Computer Science*, 2009, 36(8): 260–263. (王进, 孙怀江. 一种 DS<sub>m</sub> 理论相关证据模型[J]. 计算机科学, 2009, 36(8): 260–263.)
- [40] Dezert J, Wang P, Tchamova A. On the validity of Dempster-Shafer theory[C]// *Proc. of the 15th International Conference on Information Fusion*, 2012: 655–660.
- [41] Smarandache F, Dezert J. *Applications and advances of DS<sub>m</sub>T for information fusion (Vol III)*[M]. Rehoboth: American Research Press, 2009.
- [42] Xiao W, Wang Z Y, Wang Y D. Combination rule for dependent evidences[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(5): 773–776. (肖文, 王正友, 王耀德. 一种相关证据的合成规则[J]. 控制与决策, 2011, 26(5): 773–776.)
- [43] Smets P. The application of the matrix calculus to belief functions[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2002, 31(1): 1–30.
- [44] Nakama T, Ruspini E. Combining dependent evidential bodies that share common knowledge[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2014, 55(9): 2109–2125.
- [45] Xiao R B, Wang X. Research on the combination of dependent evidences[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1993, 6(3): 227–234. (肖人彬, 王雪. 相关证据合成方法的研究[J]. 模式识别与人工智能, 1993, 6(3): 227–234.)
- [46] Wu Y G, Yang J Y, Liu L J, et al. On the evidence inference theory[J]. *Information Sciences*, 1996, 89(3): 245–260.
- [47] Luo Z Z, Ye M. Fusion of dependency information using Dempster-Shafer evidential reasoning[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2001, 23(10): 970–974. (罗志增, 叶明. 用证据理论实现相关信息的融合[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(10): 970–974.)
- [48] Yang S L, Zhu W D, Ren M L. Combination theory and method for interrelated evidences based optimal adjustment coefficient[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2003, 6(5): 12–16. (杨善林, 朱卫东, 任明仑. 基于可变参数优化的相关证据合成方法研究[J]. 管理科学学报, 2003, 6(5): 12–16.)
- [49] Basir O, Karray F, Zhu H. Connectionist-based Dempster-Shafer evidential reasoning for data fusion[J]. *IEEE Trans. on Neural Networks*, 2005, 16(6): 1513–1530.
- [50] Chen L. Related evidence synthesis based on particle swarm optimization neural network parameter and application [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(3): 711–715. (陈莉. 基于粒子群神经网络优化的相关证据合成及应用[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(3): 711–715.)
- [51] Guralnik V, Mylaraswamy D, Voges H. On handling dependent evidence and multiple faults in knowledge fusion for engine health management[C]// *Proc. of the IEEE Aerospace Conference*, 2006: 9–17.
- [52] Jiang H N, Xu X B, Wen C L. The combination method for dependent evidence and its application for simultaneous faults diagnosis[C]// *Proc. of the International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*, 2009: 496–501.
- [53] Yager R R. On the fusion of non-independent belief structures[J]. *International Journal of General Systems*, 2009, 38(5): 505–531.
- [54] Su X Y, Sankaran M, Xu P D, et al. Handling of dependence in Dempster-Shafer theory[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2015, 30(4): 441–467.

## 作者简介:

苏晓燕(1986–),女,讲师,博士,主要研究方向为信息融合、风险评估。  
E-mail: suxiaoyan@shiep.edu.cn

韩文花(1976–),女,副教授,博士,主要研究方向为智能信息处理、电力系统中无功优化。

E-mail: hanwenhua@shiep.edu.cn

许培达(1987–),男,博士研究生,主要研究方向为信息融合、安防系统。

E-mail: xupeida@sjtu.edu.cn

邓勇(1975–),男,教授,博士,主要研究方向为信息融合、决策支持、风险分析和不确定决策。

E-mail: ydeng@nwpu.edu.cn