

新的证据冲突衡量标准下的 D-S 改进算法

胡昌华¹, 司小胜¹, 周志杰^{1,2}, 王 鹏¹

(1. 第二炮兵工程学院 302 教研室, 陕西西安 710025; 2. 清华大学自动化系, 北京 100084)

摘 要: 针对传统证据冲突衡量标准存在的不足及高冲突下 Dempster 证据组合规则失效的问题, 通过 pignistic 变换, 定义了新的证据冲突衡量标准, 基于此, 提出了一种新的 D-S 改进算法. 该方法依据少数服从多数的决策思想, 引入了描述证据重要度的权重系数, 对证据进行预处理, 再采用 Dempster 规则进行组合. 通过仿真算例分析, 并与其它改进方法进行对比, 验证了新算法在处理证据冲突方面的性能显著改进, 加快了收敛速度, 同时降低了决策风险.

关键词: D-S 理论; 证据冲突; 组合规则; pignistic 变换; 信息熵

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 07-1578-06

An Improved D-S Algorithm Under the New Measure Criteria of Evidence Conflict

HU Chang-hua¹, SI Xiao-sheng¹, ZHOU Zhi-jie^{1,2}, WANG Peng¹

(1. Unit 302, Xi'an Institute of Hi-Tech, HongQing Town, Xi'an, Shaanxi 710025, China;

2. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To overcome the shortcomings of conventional measure criterion of evidence conflict and solve the invalidation problem of Dempster-Shafer evidence combination rule with high conflict, a novel measure criterion of evidence conflict is defined through pignistic transformation. Based on this definition, a new improved D-S algorithm is proposed in this paper. According to the decision idea that the minority is subordinate to the majority, the proposed algorithm first preprocesses evidence through introducing weight coefficients which represent the importance degree of evidence, then combines preprocessed evidence using Dempster's rule. The numerical study shows that, compared with other methods, the new algorithm has made good performance in dealing with evidence conflict and can accelerate convergence and reduce the decision risk.

Key words: D-S theory; evidence conflict; combination rule; pignistic transformation; information entropy

1 引言

在现实生活中, 无论是军事领域还是非军事领域, 不确定情况下的决策问题十分常见, 而不确定推理方法则为处理不确定、不精确、不完善信息提供了有效途径. 不确定推理方法较多且各有优势, 但因证据理论 (简称 D-S 理论)^[1,2] 具有良好的理论基础, 能够很好地表示“不确定性”及“无知”等重要概念, 尤其在不确定性的表示、量测和组合方面具有一定的优势, 适合于无先验信息的融合, 已广泛应用于决策分析^[3]、信息融合^[4]和模式识别^[5]等领域.

证据组合规则是 D-S 理论的核心, 它来自不同信息源的独立证据信息组合, 产生更可靠的证据信息. 但是在某些情况下, 证据组合会产生与直觉相悖的结

论^[6], 许多学者认为这是由证据冲突造成的, 并对组合规则加以改进^[7-13], 效果不是十分理想. 目前, 主要是在已经识别冲突的情况下对组合规则进行改进, 而对如何识别证据冲突研究很少^[14]; 再者, 许多学者针对高冲突下的证据组合问题, 提出了相应的改进方法, 但是, 在实际应用中, 就涉及到组合规则的选择问题^[15], 因此建立一种证据冲突的衡量标准就显得十分必要.

本文首先较为详细的分析了传统证据冲突识别方式存在的问题, 引入了 pignistic 变换^[16]的概念, 定义了新的证据冲突衡量标准, 通过实例论证了新标准的合理性. 基于此, 在证据的合成过程中引入了描述证据重要程度的权重系数, 提出了改进的证据组合算法, 并根据少数服从多数的决策思想, 引入信息熵, 确定了权重系数. 仿真算例表明, 改进算法可以有效处理证据冲突.

2 D-S 证据理论

D-S 证据理论首先定义一个空间 Ω , 称为识别框架, 是由相互排斥的命题组成的有限完备集. Ω 的幂集表示为 2^Ω , 是 Ω 所有子集的集合.

对于 2^Ω 中的任何命题 A , 定义映射 $m: 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$ 为基本概率分配函数 (Basic Probability Assignment, BPA), 也称 BPA 函数, m 满足:

- (1) $0 \leq m(A) \leq 1$
- (2) $m(\emptyset) = 0$, \emptyset 表示空集, 即不可能的命题;
- (3) $\sum_{A \subseteq \Omega} m(A) = 1$

如果 $A \subseteq \Omega$, 且 $m(A) > 0$, 则称 A 为焦点 (focal element). 在证据理论中, 对于命题 A 的描述采用信任区间 $[Bel(A), Pl(A)]$, Bel 和 Pl 分别称为信任函数和似真函数^[2].

证据理论的核心是 Dempster 规则, 通过 Dempster 规则来融合不同信息源产生的证据, 该规则是在假设信息源独立的条件下进行的. 对于独立的多个证据, 组合运算可以通过正交和表述如下:

$$m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n \quad (1)$$

\oplus 表示组合运算. 对于 n 个 BPA 函数 $m_i, i = 1, 2, \dots, n$, Dempster 组合规则定义如下:

$$m(A) = \begin{cases} 0, & A = \emptyset \\ \frac{\sum_{A_i=A} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)}{\sum_{A_i \neq \emptyset} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)}, & A \neq \emptyset \end{cases} \quad (2)$$

令 $m \ominus(\emptyset) = \frac{\sum_{A_i=\emptyset} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)}{\sum_{A_i \neq \emptyset} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)}$, 表示融合过程中各证据之间冲突程度, $1 - m \ominus(\emptyset)$ 称为归一化因子, 避免在组合过程中将非零的概率分配给空集.

已经证明 Dempster 组合规则满足结合律和交换律^[2], 即(1) 结合律: $(m_1 \oplus m_2) \oplus m_3 = m_1 \oplus (m_2 \oplus m_3)$; (2) 交换律: $m_1 \oplus m_2 = m_2 \oplus m_1$. 这两个性质表明证据组合结果与组合顺序无关, 因此在对多个 BPA 函数进行组合时, 可以通过两两组合的方式进行.

3 一种新的证据冲突衡量标准

自从 Zadah 悖论^[6]提出以后, 对证据冲突条件下的组合规则研究成为了证据理论研究的热点问题, 尤其是在信息融合、多属性决策等领域. 这些研究主要集中在假设已经识别冲突的情况下, 如何对冲突证据进行处理. 然而对于如何识别冲突, 目前研究较少.

3.1 传统证据冲突衡量标准存在的问题

目前, 主要用 $m \ominus(\emptyset)$ 来表示组合过程中证据之

间的冲突程度^[2], 即组合后分配给空集的基本概率分配 (未进行归一化的). 然而用 $m \ominus(\emptyset)$ 描述证据冲突存在以下两个问题:

(1) 对于一致证据的“误判”

例 1 假设识别框架 $\Omega = \{w_1, w_2, w_3\}$, 获得如下两个 BPA 函数:

$$m_1(\{w_1\}) = 0.9, m_1(\{w_2\}) = 0.1, m_1(\{w_3\}) = 0$$

$$m_2(\{w_1\}) = 0, m_2(\{w_2\}) = 0.1, m_2(\{w_3\}) = 0.9$$

应用 Dempster 组合规则得到组合后的基本概率分配 $m(\{w_2\}) = 1.0, m \ominus(\emptyset) = 0.99$.

例 2 假设识别框架 $\Omega = \{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5\}$, 获得如下两个 BPA 函数:

$$m_1(\{w_1\}) = 0.2, m_1(\{w_2\}) = 0.2, m_1(\{w_3\}) = 0.2,$$

$$m_1(\{w_4\}) = 0.2, m_1(\{w_5\}) = 0.2, m_2(\{w_1\}) = 0.2,$$

$$m_2(\{w_2\}) = 0.2, m_2(\{w_3\}) = 0.2, m_2(\{w_4\}) = 0.2,$$

$$m_2(\{w_5\}) = 0.2$$

应用 Dempster 组合规则得到组合后的基本概率分配 m 与 m_1 是相同的, $m \ominus(\emptyset) = 0.8$.

对例 1, $m \ominus(\emptyset) = 0.99$ 表示存在严重的冲突, 而且组合的结果确实违背直觉, 这似乎说明 $m \ominus(\emptyset)$ 可以作为冲突程度的度量标准. 然而对于例 2, 若是采用 $m \ominus(\emptyset)$ 来度量冲突, 则有 $m \ominus(\emptyset) = 0.8$, 表示存在严重冲突, 不适合用 Dempster 规则进行组合, 这显然是错误的, 尽管每个可能的命题有较低的信度, 但这两个证据相互是完全一致的, 不存在冲突. 因此用 $m \ominus(\emptyset)$ 来度量冲突, 存在对于一致证据的“误判”问题.

(2) 证据源数目的增加导致证据冲突的产生

当需要组合的证据源数目较大时, 会导致证据冲突的产生, 例如根据文[8]的思路, 对 n 个具有下面 BPA 函数的证据进行组合.

例 3 假设识别框架 $\Omega = \{w_1, w_2\}$, 获得 n 个 BPA 函数如下:

$$m_j(\{w_1\}) = 0.85, m_j(\{w_2\}) = 0.1, m_j(\{\emptyset\}) = 0.05$$

应用 Dempster 规则进行组合, 图 1 表示 $m \ominus(\emptyset)$ 随组合的证据源数目的变曲线, 可以看出当证据数目 $n = 2$ 时, $m \ominus(\emptyset)$ 不到 20%, 但是当 $n = 20$ 时, $m \ominus(\emptyset)$ 接

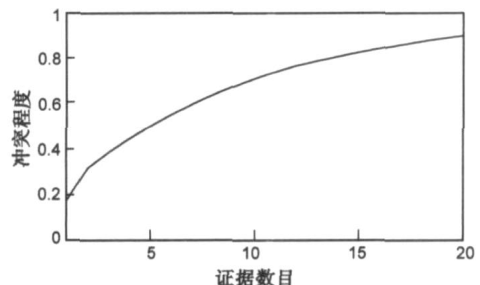


图 1 冲突程度与证据源数目的关系图

近了 90%，产生了较大的冲突. 对于这种情况, 用 $m_{\odot}(\emptyset)$ 来衡量证据冲突显然是不合理的.

通过上面的分析, 不难看出并不是 $m_{\odot}(\emptyset)$ 值越大, 冲突就越严重. 因此 $m_{\odot}(\emptyset)$ 不足以作为证据之间冲突程度的衡量标准, 需要寻找其他的衡量标准.

3.2 基于 pignistic 变换的证据冲突衡量标准

定义 1^[16] 假设 m 为识别空间 Ω 上的 BPA 函数, 与之相关的 pignistic 概率函数 $BetP_m: [0, 1]$ 定义为

$$BetP_m(A) = \sum_{B \subseteq A} \frac{|A \cap B|}{|B|} \frac{m(A)}{1 - m(A)}, \forall A \quad (3)$$

其中 $|A|$ 表示子集 A 的势, 即集合 A 中包含的元素数目. $BetP_m$ 描述了基本概率分配 m 对幂集 2^Ω 上各个命题子集的支持程度, 因此 $BetP_m(A)$ 描述了 m 支持命题子集 A 为真的全部概率值, 因此 $BetP_m$ 又称概率期望函数^[17] 或 pignistic 概率函数.

对于例 1, 令 $A = \{w_1\}$, 则焦点 A 在 m_1 中具有最高的 BPA 值, 在 m_2 中具有最小的 BPA 值, 则 A 对应于 m_1, m_2 的 pignistic 概率值为: $BetP_{m_1}(A) = 0.9, BetP_{m_2}(A) = 0$, 他们之间的差异为: $|BetP_{m_1}(A) - BetP_{m_2}(A)| = 0.9$, 其值比较高, 表明这两个证据在相信命题 A 为真的事件上存在很大的差异, 同时 $m_{\odot}(\emptyset) = 0.99$ 也很高, 说明本例 pignistic 概率值的差异与 $m_{\odot}(\emptyset)$ 是一致的; 对于例 2, 令 $A = \{w_1\}$, 其对应的 BPA 函数的 pignistic 概率值之间的差异为: $|BetP_{m_1}(A) - BetP_{m_2}(A)| = 0.2 - 0.2 = 0$, 表明这两个证据在相信命题 A 为真的事件没有差异, 而 $m_{\odot}(\emptyset) = 0.8$, 显然本例用 pignistic 概率值的差异来描述冲突程度更符合实际情况.

综合上面的分析, 定义新的证据冲突的度量标准如下.

定义 2 假设 m_1, m_2 为识别框架 Ω 上的 BPA 函数, $BetP_{m_1}, BetP_{m_2}$ 为对应的 pignistic 变换后的概率函数, 那么, 式

$$difBetP_{m_i}^{m_j} = \max_{A \subseteq \Omega} (|BetP_{m_1}(A) - BetP_{m_2}(A)|) \quad (4)$$

就用来衡量证据冲突的程度.

显然 $0 \leq difBetP_{m_i}^{m_j} \leq 1$, $difBetP_{m_i}^{m_j}$ 越大, 表示 m_1 与 m_2 之间的冲突越大. 若用 $difBetP_{m_i}^{m_j}$ 来描述证据冲突, 对于例 3, 随着证据数目的增加, 证据冲突最大不超过 0.125, 比较合理的描述了证据的冲突情况, 符合实际.

通过上面的比较分析可见, 新的冲突衡量标准能很好解决传统方法存在的问题, 合理的反映了实际情况, 下面在新的证据冲突度量标准的基础上, 对 Dempster 组合规则进行改进, 以增强其对冲突证据的处理能力, 提高组合结果的可靠性.

4 改进的 D-S 组合算法

在证据完全冲突的情况下, Dempster 组合公式失

效, 当证据之间发生严重冲突时, 合成结果往往与实际情况不相符合. 鉴于此, 国内外学者对证据组合方法进行了大量研究, 主要可以概括为两大类^[8]: 一是基于修改 Dempster 组合规则的方法, 主要解决如何将冲突重新分配和管理的问题; 二是基于修改原始证据源的方法, 认为 Dempster 组合规则本身没有错. 在证据高度冲突时, 首先对冲突证据进行预处理, 然后再用证据组合规则融合证据. 如对于不可靠的信息源, 折扣系数法^[8] 和简单平均法^[9] 就是可行的方法, 且无需修改组合规则.

本文从 Haenni^[18] 的观点出发, 考虑到证据源由于自身条件和工作环境的影响, 认为它们所提供的证据在合成过程中的重要程度是不一样的, 因此在证据的合成过程中引入了描述证据重要程度的权重系数, 对证据进行预处理后再采用 Dempster 规则进行组合, 这样不仅保持了 Dempster 规则具有结合性和交换性的良好性质, 而且提高了证据组合的可靠性.

设在证据合成过程中 n 个证据源同时提供证据, 其证据集为 $E = (E_1, E_2, \dots, E_n)$.

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (5)$$

其中 $w_i \in [0, 1]$ 且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$. 权重系数描述了证据源提供的证据在合成过程中的重要程度以及对于合成结果的影响程度, 其确定方法将在下一节详细介绍. 在 Dempster 规则的基础上, 把权重系数引入合成公式, 方法如下:

Step1 根据证据源提供的证据, 给识别框架各命题分配 BPA 值, 建立证据源的权重向量:

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$$

Step2 设 $w_{\max} = \max\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, 可获得相对

权重向量 $W^* = \frac{(w_1, w_2, \dots, w_n)}{w_{\max}}$, 由此可确定证据的基本概率分配值的“折扣率”^[8] $\alpha_i = w_i / w_{\max}, i = 1, 2, \dots, n$. 令 m_i 表示利用“折扣率” α_i 对证据 E_i 调整后的 BPA 值, 方法如下:

$$m_i(A) = \alpha_i m_i(A)$$

$$m_i(\emptyset) = 1 - \alpha_i + \alpha_i m_i(\emptyset)$$

$$\forall A \subseteq \Omega \quad (6)$$

容易证明 m 满足 BPA 函数定义的三个条件. 且 $0 \leq \alpha_i \leq 1, \alpha_i = 0$ 表示证据源 E_i 是完全不可靠的; $\alpha_i = 1$ 表示证据源 E_i 是完全可靠的.

Step3 将调整后的 BPA 值 m_i 代入 Dempster 组合规则, 计算最终的融合结果:

$$m(A) = \begin{cases} 0, & A = \emptyset \\ \frac{\prod_{i=1}^n m_i(A_i)}{1 - \prod_{i=1}^n m_i(\emptyset)}, & A \neq \emptyset \end{cases} \quad (7)$$

其中 A_i 表示证据 E_i 的焦元。

改进的 D-S 组合算法既继承了 Dempster 合成公式的优点,又充分考虑了各证据在合成过程中的重要程度,增加了合成结果的可靠性,符合实际。

5 权重系数的确定方法

在信息融合、决策等领域,少数服从多数的思想广泛应用^[9,14],而且 Zadel^[6]认为证据之间发生的严重冲突或完全冲突往往是由某个或少数证据的严重不相容性引起的,进一步 Yamada^[19]指出,证据组合规则的组合结果能够保证大多数意见是组合规则应当具有的一个特性。受少数服从多数的决策思想的启示,在证据合成过程中,引起严重冲突或完全冲突的某个或少数证据的影响作用较小,所以其权重系数就小。本文在新的冲突衡量标准的基础上,利用信息论中熵^[20]的概念来衡量各个证据在合成过程中的重要程度,若某个证据与其他证据的冲突越大,信息熵就越大,则权重就越小;反之,冲突越小,信息熵就越小,则该证据的权重就越大,由此来确定权重向量。

设在证据合成过程中 n 个证据源同时提供证据,其证据集为 $E = \{ E_1, E_2, \dots, E_n \}$, 证据 E_i 的权重系数为 w_i , 则所有的权重系数组成的权重向量为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, 计算方法如下:

Step1 计算证据集 E 中证据 E_i 与其他证据 E_j ($j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, n$) 之间的冲突程度 $difBetP_i^j$, 可构成证据 E_i 的冲突向量

$$difBetP_i = (difBetP_i^1, difBetP_i^2, \dots, difBetP_i^{i-1}, difBetP_i^{i+1}, \dots, difBetP_i^n) \quad (8)$$

其中 $difBetP_i^j = \max_{A \subseteq \Omega} (|BetP_{m_i}(A) - BetP_{m_j}(A)|)$, 冲突向量描述证据 E_i 与其他证据之间的冲突大小关系。

Step2 对冲突向量 $difBetP_i$ 进行归一化处理

$$difBetP_i = \frac{(difBetP_i^1, difBetP_i^2, \dots, difBetP_i^{i-1}, difBetP_i^{i+1}, \dots, difBetP_i^n)}{\sum_{j=1, j \neq i}^n difBetP_i^j}$$

$$= (difBetP_i^1, difBetP_i^2, \dots, difBetP_i^{i-1}, difBetP_i^{i+1}, \dots, difBetP_i^n) \quad (9)$$

Step3 计算归一化后冲突向量 $difBetP_i$ 的熵值

$$En_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{difBetP_i^j}{\sum_{j=1, j \neq i}^n difBetP_i^j} \ln(\frac{difBetP_i^j}{\sum_{j=1, j \neq i}^n difBetP_i^j}), (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

Step4 取熵值的倒数

$$En_i^{-1} = 1/En_i \quad (11)$$

Step5 计算证据 E_i 的权重系数

$$w_i = En_i^{-1} / \sum_{j=1}^n En_j^{-1} \quad (12)$$

如此便可确定各证据的权重系数组成的权重向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$. 权重向量确定后,可以对证据识别框架内各命题的 BPA 按式(6)进行“折扣”调整,最后利用式(7)进行证据合成。

通过第 4、5 节可以看出,在改进证据组合公式(7)中, $A_i = \emptyset$ $\sum_{i=1}^n m_i(A_i)$ 实际上就是 $m_{\emptyset}(\emptyset)$ 的一种形式,而且式(7)形式上与 Dempster 组合规则(2)是一致的,这样就继承了 Dempster 组合规则的优点,而权重向量 W 实际上是通过应用 $difBetP_{m_i}^{m_i}$ 来确定的。可见,在本文的组合规则里,综合考虑了 $m_{\emptyset}(\emptyset)$ 和 $difBetP_{m_i}^{m_i}$: 采用 $1 - \sum_{i=1}^n m_i(A_i)$ 归一化,可以避免把信度分配给空集,保证组合结果中 $m(\emptyset) = 0$; 采用 $difBetP_{m_i}^{m_i}$, 可以有效准确地识别冲突,克服 $m_{\emptyset}(\emptyset)$ 作为冲突衡量标准存在的问题,量化证据之间的不一致程度,从而得到权重向量 W 。

6 仿真算例

证据理论在信息融合、目标识别和决策分析等领域得到了泛的应用^[21,22]。下面通过文献[12]的实例来对比几种典型的证据组合规则,说明本文方法的有效性。

例 4 空中目标识别分析,识别框架为 $\Omega = \{ A = \text{轰炸机}, B = \text{民航客机}, C = \text{战斗机} \}$, 各传感器证据源获取的基本概率分配如下:

$$m_1(A) = 0.5, m_1(B) = 0.2, m_1(C) = 0.3$$

$$m_2(A) = 0, m_2(B) = 0.9, m_2(C) = 0.1$$

$$m_3(A) = 0.6, m_3(B) = 0.1, m_3(C) = 0.3$$

$$m_4(A) = 0.8, m_4(B) = 0.1, m_4(C) = 0.1$$

按照权重系数的确定方法来计算本文合成方法中的权重向量 W , 计算得到归一化的冲突向量和权重系数如表 1 所示。

表 1 归一化的冲突向量与权重系数

证据	冲突向量	归一化冲突向量	权重系数
m_1	(0.7 0.1 0.3)	(0.6364 0.0909 0.2727)	0.2600
m_2	(0.7 0.8 0.8)	(0.3043 0.3478 0.3478)	0.2039
m_3	(0.1 0.8 0.2)	(0.0909 0.7273 0.1818)	0.2944
m_4	(0.3 0.8 0.2)	(0.2308 0.6154 0.1538)	0.2417

由表 1 可见,证据 2 与证据 1、3、4 有较大冲突,其冲突程度达到了 0.7、0.8、0.8; 其他证据之间的冲突程

度较小,都在 0.3 以下.因此在证据合成过程中,证据 2 的权重系数相对其他的证据就较小,其他证据的权重系数相差不大,表 1 证明了这一点.

下面应用一些典型的组合规则和本文提出的方法对上述实例进行组合并对比分析,组合结果如表 2.

由表 2 可见, Dempster 规则不能对有冲突的证据进行有效处理,一旦有一证据对某一命题支持度为 0,无论再出

现对该命题多大的支持证据,组合结果总为 0,这显然是不合情理的; Yager^[7]方法过于保守,将证据冲突的那部分概率全部分配给未知项 $m(\cdot)$ 的数值随证据的增加不断增大,组合结果的不确定性增加,不符合不确定性推理的目的;基于全局冲突分配的孙全^[10]的方法,分配精度不够,收敛速度较慢,收集到 4 个证据时,仍然不能正确作出决策;张山鹰^[11]、郭华伟^[12]的方法在收集到 4 个证据时才能正确作出决策,收敛速度较慢; Murphy 方法没有考虑证据之间的相关性,是对证据的简单平均,有些情况下需要更多的证据才可以组合出正确的结果,本例中当证据达到 4 个时才能正确识别目标;基于传统冲突衡量标准对冲突概率再分配的叶清^[13]方法,收敛速度慢,在较少的证据下决策风险大.

本文的方法是在建立证据冲突新的衡量标准的基础上,通过引入描述证据在合成过程中的重要程度的权重系数,对冲突概率进行重新分配,有效的消除了不利证据 2 对组合结果的影响,从结果可见,本文的改进方法最后合成结果中命题 A 的 BPA 值最大,达到了 0.8240,而且在收集了 3 个证据时就能收敛到正确的结果.综合 4 个证据可以看出,证据 2 可能是干扰证据,它与系统的其他证据存在较大差异,改进的 D-S 算法降低了干扰证据的影响,具有抗干扰能力强、收敛速度快、决策风险低的特点,提高了证据组合结果的可信性.而且从结果还可以看出,随着对 A 命题支持的证据数目的增加, $m(A)$ 值稳定提高,很好的反映了实际情况下的信息融合过程.

表 2 证据组合结果

方法	m_1, m_2	m_1, m_2, m_3	m_1, m_2, m_3, m_4
Dempster 规则 ^[1]	$m(A) = 0, m(B) = 0.8571$ $m(C) = 0.1429, m(\cdot) = 0$	$m(A) = 0, m(B) = 0.6667$ $m(C) = 0.3333, m(\cdot) = 0$	$m(A) = 0, m(B) = 0.6667$ $m(C) = 0.3333, m(\cdot) = 0$
Yager ^[7]	$m(A) = 0, m(B) = 0.18$ $m(C) = 0.03, m(\cdot) = 0.89$	$m(A) = 0, m(B) = 0.018$ $m(C) = 0.009, m(\cdot) = 0.973$	$m(A) = 0, m(B) = 0.0018$ $m(C) = 0.0009, m(\cdot) = 0.9973$
孙全 ^[10]	$m(A) = 0.1331, m(B) = 0.4727$ $m(C) = 0.1364, m(\cdot) = 0.2578$	$m(A) = 0.2448, m(B) = 0.2851$ $m(C) = 0.1648, m(\cdot) = 0.3053$	$m(A) = 0.3341, m(B) = 0.2304$ $m(C) = 0.1416, m(\cdot) = 0.2939$
张山鹰 ^[11]	$m(A) = 0.1684, m(B) = 0.7020$ $m(C) = 0.1296, m(\cdot) = 0$	$m(A) = 0.3752, m(B) = 0.4496$ $m(C) = 0.1752, m(\cdot) = 0$	$m(A) = 0.5846, m(B) = 0.2915$ $m(C) = 0.1239, m(\cdot) = 0$
郭华伟 ^[12]	$m(A) = 0.2024, m(B) = 0.6851$ $m(C) = 0.1125, m(\cdot) = 0$	$m(A) = 0.4419, m(B) = 0.3896$ $m(C) = 0.1865, m(\cdot) = 0$	$m(A) = 0.6324, m(B) = 0.2427$ $m(C) = 0.1249, m(\cdot) = 0$
Murphy ^[9]	$m(A) = 0.1543, m(B) = 0.7469$ $m(C) = 0.0988, m(\cdot) = 0$	$m(A) = 0.3912, m(B) = 0.5079$ $m(C) = 0.1008, m(\cdot) = 0$	$m(A) = 0.7996, m(B) = 0.1752$ $m(C) = 0.0251, m(\cdot) = 0$
叶清 ^[13]	$m(A) = 0.0884, m(B) = 0.74089$ $m(C) = 0.1658, m(\cdot) = 0.0049$	$m(A) = 0.2865, m(B) = 0.4426$ $m(C) = 0.2703, m(\cdot) = 0.0005$	$m(A) = 0.7628, m(B) = 0.1472$ $m(C) = 0.0900, m(\cdot) = 0$
本文方法	$m(A) = 0.2627, m(B) = 0.4590$ $m(C) = 0.2088, m(\cdot) = 0.0695$	$m(A) = 0.5938, m(B) = 0.1575$ $m(C) = 0.2487, m(\cdot) = 0$	$m(A) = 0.8240, m(B) = 0.0682$ $m(C) = 0.1078, m(\cdot) = 0$

7 结论

(1) 本文通过分析传统证据冲突衡量标准存在的问题,通过 pignistic 变换定义了新的冲突衡量标准并论证了其合理性.

(2) 本文提出的 D-S 改进算法考虑了组合过程中证据的重要度,基于新的证据冲突衡量标准,利用信息熵确定了权重系数.

(3) 仿真算例表明,本文的算法可以有效处理证据冲突,而且在证据较少的情况下就可以收敛到正确的结果,加快了收敛速度,降低了决策风险,提高了在证据冲突时融合结果的可靠性.

(4) 算例表明,本文定义的证据冲突衡量标准 $dif-Bet P_{m_i}^{n_2}$ 对于证据的信度分配在单一命题的焦元和上的情况,可以有效地识别冲突,而对于信度可以分配到任一子集的情况,有待进一步的探讨.

参考文献:

- [1] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping[J]. Annals Math Statist, 1967, 38(2): 325-339.
- [2] Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence[M]. Princeton University Press, 1976.
- [3] Fabre S, Appriou A, Briottet X. Presentation and description of two classification methods using data fusion based on sensor management[J]. Information Fusion, 2001, 2(1): 49-71.

- [4] Denoeux T, Masson M. EVCLUS: Evidential clustering of proximity data[J]. IEEE Trans Syst. Man Cyber., Part B: Cybernetics, 2004, 34(1): 95 - 109.
- [5] Yang J B, Xu D L. On the evidential reasoning algorithm for multiple attribute decision analysis under uncertainty[J]. IEEE Trans Syst. Man Cyber., Part A: System and Human, 2002, 32(3): 289 - 304.
- [6] Zadeh L A. Review of Shafer's a mathematical theory of evidence[J]. Artificial Intelligent Magazine, 1984, 5(3): 81-83.
- [7] Yager R R. On the Dempster-Shafer framework and new combination rules[J]. Information Science, 1989, 41(2): 93 - 137.
- [8] Lefevre E, Colot O. Belief function combination and conflict management[J]. Information Fusion, 2002, 3(2): 149 - 162.
- [9] Murphy K. Combing belief functions when evidence conflicts [J]. Decision Support System, 2000, 29(1): 1 - 9.
- [10] 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(8): 117 - 119.
Sun Q, Ye X Q, Gu W K. A new combination rules of evidence theory[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(8): 117 - 119. (in Chinese)
- [11] 张山鹰, 潘全, 张洪才. 证据推理冲突问题研究[J]. 航空学报, 2001, 21(4): 369 - 372.
Zhang S Y, Pan Q, Zhang H C. Conflict problem of Dempster-Shafer evidence theory[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 21(4): 369 - 372. (in Chinese)
- [12] 郭华伟, 施文康, 刘清坤等. 一种新的证据组合规则[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(11): 1895 - 1900.
Guo H W, Shi W K, Liu Q K et al. A new combination rule of evidence [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(11): 1895 - 1900. (in Chinese)
- [13] 叶清, 吴晓平, 宋业新. 基于权重系数与冲突概率重新分配的证据合成方法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(7): 1014 - 1016.
Ye Q, Wu X P, Song Y X. Evidence combination method based on the weight coefficients and the confliction probability distribution[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(7): 1014 - 1016. (in Chinese)
- [14] Weiru L. Analyzing the degree of conflict among belief functions[J]. Artificial Intelligent, 2006, 170: 909 - 924.
- [15] Smets P. Analyzing the Combination of Conflicting Belief Functions[R]. Technical Report, IRIDIA, University Libre de Bruxelles, 2004.
- [16] Smets P. Decision making in the TBM: the necessity of pignistic transformation[J]. International Journal of Approximation Reasoning, 2004, 38: 133 - 147.
- [17] Josang A. The consensus operator for combining beliefs[J]. Artificial Intelligent, 2002, 141(1 - 2): 157 - 170.
- [18] 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(3): 237 - 239.
- [19] Yamada K. A new combination of evidence based on compromise[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2008, 159(13): 1689 - 1708.
- [20] 陈雷, 王延章. 基于熵权系数与 TOPSIS 集成评价决策方法的研究[J]. 控制与决策, 2003, 18(4): 456 - 459.
Chen L, Wang Y Z. Research on TOPSIS integrated evaluation and decision method based on entropy coefficient[J]. Control and Decision, 2003, 18(4): 456 - 459. (in Chinese)
- [21] Smets P. Analyzing the combination of conflicting belief functions[J]. Information Fusion, 2007, 8: 387 - 412.
- [22] 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.
Xu C F, Geng W D, Pan Y H. Review of Dempster-Shafer method for data fusion [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(3): 393 - 396. (in Chinese)

作者简介:



胡昌华 男, 1966 年 6 月生于湖北罗田。

1996 年于西北工业大学获工学博士学位, 现为第二炮兵工程学院导航制导与控制国家重点学科教授、博士生导师、学术带头人。国家自然科学基金评委, 中国自动化学会技术过程故障诊断与安全性学会副主任委员, 中国自动化学会理事, 中国自动化学会系统仿真学会委员。先后获国家和军队科技进步一、二等奖 9 项, 获国家专利 4 项, 出版专著 2 部, 编著 3 部, 发表学术论文 100 余篇, 被 SCI 检索 6 篇, EI 检索 58 篇。先后被评为全国高等院校优秀骨干教师, 中国科协“求是”杰出青年实用工程奖, 全军爱军习武标兵, 第二炮兵十大砺剑尖兵, 军队院校育才奖金奖, 陕西省“三五”人才, 荣立二等功 1 次, 享受政府特殊津贴。国内外重要学术刊物 IEEE T SMC - A, JSSC、《自动化学报》、《自然科学进展》、《控制理论与应用》、《兵工学报》、《系统工程学报》等受邀审稿专家。主要研究方向: 控制系统故障诊断与容错控制、复杂系统可靠性与安全性分析、控制理论及应用、系统仿真等。
E-mail: hch6603 @263. net



司小胜 男, 1984 年 10 月生于甘肃通渭。

2006 年、2009 年分别于第二炮兵工程学院导航制导与控制国家重点学科获得学士学位和硕士学位, 现为第二炮兵工程学院博士研究生, 研究方向为信息融合、故障诊断、可靠性工程。

Email: sixiaosheng @126. com

周志杰 男, 1978 年 11 月生于山西朔州, 清华大学博士研究生, 研究方向为动态系统的故障预报技术。

Email: zhouzj04 @mails. tsinghua. edu. cn

王鹏 男, 1984 年生于湖北枣阳, 第二炮兵工程学院硕士研究生, 研究方向为图像处理。