

基于 Pignistic 概率函数和相关系数的证据组合方法

杨晓萍, 廉伟健, 李孟杰, 钱志鸿

(吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: D-S 证据理论不能很好地解决证据之间高冲突的情况, 得到的结果与事实相悖, 并且在实际的应用中无法解决“一票否决”的问题。针对上述不足, 提出了一种基于 Pignistic 概率函数和相关系数的新证据冲突衡量标准 (Pcor) 和基于该标准的加权证据组合方法。该方法用 Pcor 来衡量证据间的冲突, 通过建立支持矩阵来确定各证据的支持度, 用加权平均法修正证据, 使用 Dempster 组合规则, 最终得出与事实相符的结果。数值算例表明, 所提方法有效地解决了高冲突证据组合问题, 与相关算法相比, 具有更好的收敛性。

关键词: D-S 证据理论; 冲突衡量; 相关系数; 证据组合; 信任度

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019049

Evidence combination method based on Pignistic function transformation and correlation coefficient

YANG Xiaoping, LIAN Weijian, LI Mengjie, QIAN Zhihong

College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China

Abstract: The situation of high conflict between evidences and one ballot veto cannot be solved by classical D-S rule, and the results obtained from classical D-S rule are contrary to the facts. To solve this problem, a new standard to measure conflicts between evidences was proposed based on the combination of Pignistic function transformation and correlation coefficient, and also a novel kind of weighted combination method which was applied to measure conflicts between evidences was put forward according to the standard. After that, a support matrix was constructed based from which the credibility of evidence was obtained, and the weighted average method was used to revise the evidence. Finally, the combination was accomplished by using Dempster's rule. The result of numerical examples shows that it's effective to solve the combination of conflicting evidence. Compared with other methods, the proposed method has good astringency.

Key words: D-S evidence theory, conflict measure, correlation coefficient, evidence combination, credibility

1 引言

D-S 证据理论 (Dempster-Shafer evidence theory) 作为多传感器信息融合决策层重要方法之一, 具有良好的信息融合能力, 所需要的条件比贝叶斯概率

论更弱些, 在不确定、不知道的情况下可以很好地解决问题, 因此被广泛地应用于决策分析、信息融合^[1-2]、模式识别^[3]、目标识别等领域。然而在一些特殊的情况下, 采用 Dempster 组合规则将信息源的信息进行组合, 会产生与事实相悖的结论, 从而使

收稿日期: 2018-04-23; 修回日期: 2018-08-22

基金项目: 吉林省校共建计划专项基金资助项目 (No.SXGJQY2017-9); 吉林大学高层次科技创新团队建设基金资助项目 (No.2017TD-19); 国家自然科学基金资助项目 (No.61771219); 吉林省科技厅重点科技研究发展基金资助项目 (No.20180201081SF)

Foundation Items: The Special Fund Project of Jilin Province School Co-Construction Plan (No.SXGJQY2017-9), The High-Level Technology Innovation Team Building Project of Jilin University (No.2017TD-19), The National Natural Science Foundation of China (No.61771219), The Science and Technology Research Development Fund of Jilin Provincial Science and Technology Agency (No.20180201081SF)

组合失去意义。国内外研究者认为这种情况是由证据之间高冲突引起的，并提出了大量的改进算法，主要分为 2 类：1) 针对证据理论本身组合存在的问题进行修改，有效地解决了证据之间的高冲突问题，参见文献[4-6]；2) 在经典理论算法的基础上，对存在冲突的证据进行预处理，也有效地解决了证据之间高冲突带来的问题，参见文献[7-8]。这些改进算法从多个方面丰富了 Dempster 组合规则，并推动了其发展，使其更加适合实际应用。

本文在第二类改进算法的基础上，借助 Murthy^[8]思想，在 Pignistic 概率函数^[9-10]的基础上引入相关系数来确立冲突衡量标准，并根据此衡量标准确立各证据权重，使用加权平均思想降低冲突证据在组合中的影响，最后使用 Dempster 组合规则完成证据组合。

2 D-S 的基本概念

D-S 中，用 Θ 表示识别框架， $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ ，其中，对象 $\theta_i (1 \leq i \leq n)$ 是 Θ 的一个子集，且是互不相容的元素。 Θ 包含了所有对象，其幂集定义为 2^Θ ，是 Θ 所有子集的集合。

定义 1 基本概率赋值函数 (BPA, basic probability assignment) ^[11]。设 Θ 为识别框架，如果函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 满足 $m(\varphi) = 0$ 、 $\sum m(A) = 1$ ，则称 m 为 Θ 上的基本概率赋值函数。其中， $m(A)$ 叫作 A 的基本概率赋值，也就是对 A 的支持度， φ 为空集。如果 $\forall A \subseteq \Theta$ 且满足 $m(A) > 0$ ，则称 A 为焦点。将框架 Θ 内给出的 $m(A_1)$ 、 $m(A_2)$ 、 \dots 、 $m(A_2^\Theta)$ 用行向量 \mathbf{m} 表示， $\mathbf{m} = [m(A_1), m(A_2), \dots, m(A_2^\Theta)]$ 。

Dempster 组合规则表达式为

$$m(A) = \frac{1}{1 - k} \sum_{\substack{A_1, A_2, \dots, A_n \subseteq \Theta \\ \bigcap_{i=1}^n A_i = A}} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) \quad (1)$$

其中， $k \in [0, 1]$ 表示证据之间的冲突程度，计算式如式(2)所示。

$$k = \sum_{\substack{A_1, A_2, \dots, A_n \subseteq \Theta \\ \bigcap_{i=1}^n A_i = \varphi}} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) \quad (2)$$

3 证据冲突方法分析

在证据理论中，证据冲突^[12]产生的原因主要有 2 个：1) 因不可抗力 (如人为的放射干扰、雷电等

恶劣天气) 引发传感器收集到的证据与事实存在较大的偏差；2) 因人们对事物认知程度造成证据冲突即辨别框架不全面，导致各传感器给出的报告相互之间冲突较高。因此，冲突衡量标准要有高冲突证据筛选的能力。

3.1 经典的证据衡量方法

经典的证据衡量方法在衡量证据之间的关系时存在一些有悖于事实的情况，通过例 1 来对经典的证据衡量方法进行分析。

例 1 设识别框架 $\Theta = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\}$ ，3 个证据的 BPA 分别为

$$m_1: m_1(\lambda_1) = m_1(\lambda_2) = 0.5$$

$$m_2: m_2(\lambda_1) = m_2(\lambda_2) = 0.5$$

$$m_3: m_3(\lambda_3) = m_3(\lambda_4) = 0.5$$

1) 冲突系数 k

$$k(m_1, m_2) = \sum_{A_i \cap B_j = \varnothing} m_1(A_i) m_2(B_j) \quad (3)$$

其中， A_i 、 B_j 作为证据 m_1 、 m_2 的焦点表示符合识别框架 Θ 的所有子集。

如果 k 作为衡量证据间的冲突程度的参数，可计算出例 1 中的 $k(m_1, m_2) = 0.5$ ， m_1 、 m_2 作为 2 个完全一样的证据本应是无冲突的，但是冲突系数 k 却表明 2 个证据组合是存在冲突，得到与事实相反的结果。

2) Joussemle 距离

$$d_{\text{BPA}}(m_1, m_2) = \sqrt{\frac{1}{2} (\bar{\mathbf{m}}_1 - \bar{\mathbf{m}}_2)^T \mathbf{D} (\bar{\mathbf{m}}_1 - \bar{\mathbf{m}}_2)} \quad (4)$$

其中， $\bar{\mathbf{m}}_i (i=1, 2)$ 为证据的矢量表示形式， \mathbf{D} 为 $2^N \times 2^N$

的矩阵，其内部元素 $d_{ij} = \left| \frac{A_i \cap A_j}{A_i \cup A_j} \right|$ ，任意 A_i 、 A_j 属于识别框架 Θ 内， $i=1, 2, 3, \dots, 2^N$ ， $j=1, 2, 3, \dots, 2^N$ 。

例 1 中的 m_1 与 m_3 是 2 个完全冲突的证据，根据完全冲突的意义来说，证据间求得的 d_{BPA} 值应无限接近于 1，但是使用式(4)计算求得 $d_{\text{BPA}} = 0.707$ ，因此使用 Joussemle 距离也存在与事实相悖的情况。

3) 相关系数

相关系数的计算式如式(5)所示。

$$\text{cor}(m_1, m_2) = \frac{\langle \mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2 \rangle}{|\mathbf{m}_1| |\mathbf{m}_2|} \quad (5)$$

其中， $\langle \mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2 \rangle$ 表示向量的内积， $|\mathbf{m}_1|$ 表示向量的模。

将例 1 的证据代入相关系数计算式当中， $\text{cor}(m_1, m_2) = 1$ ， $\text{cor}(m_1, m_3) = 0$ 符合冲突衡量标准，但证据中若包含非单子集，相关系数无法正确地表达单个子集的冲突程度，不利于证据组合结果的判定。

可以看出，经典的证据冲突方法在某些情况下会出现问题。

3.2 新的证据冲突衡量标准

针对相关系数无法在证据中包含非单子集的情况下正确地判断出冲突程度，加入 Pignistic 概率函数，解决相关系数在此方面的不足。

定义 2 Pignistic 概率函数。设 $m(A)$ 为识别框架 Θ 下的基本概率赋值函数，则 Pignistic 概率函数为

$$\text{BetP}_m(A) = \sum_{B \subseteq \Theta, A \subseteq \Theta} \frac{|A \cap B|}{|B|} \frac{m(B)}{1 - m(\varphi)} \quad (6)$$

其中， A 和 B 是识别框架 Θ 下的子集， $|B|$ 为集合 B 中包含元素的个数， φ 为空集。

定义 3 单子集下的 Pignistic 概率函数^[13]。设识别框架 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 下有 n 个相互独立的证据，则在识别框架内的每一个焦点 A_k 在基本概率赋值函数下的单子集 Pignistic 概率函数为

$$\text{BetP}_m(\theta_i) = \sum_{\theta_j \in A_k} \frac{1}{|A_k|} m(A_k) \quad (7)$$

那么在识别框架 Θ 下，证据 m 经过 Pignistic 概率函数转化后如式(8)所示。

$$m' = (\text{BetP}_m(\theta^1), \text{BetP}_m(\theta^2), \dots, \text{BetP}_m(\theta^n)) \quad (8)$$

定义 4 设 2 个证据的单子集 Pignistic 概率函数为 m_1 、 m_2 ，引入相关系数思想，来表示 m_1 、 m_2 证据之间的冲突程度，用 ρ 表示，

$$\rho(m'_1, m'_2) = \frac{\langle m'_1, m'_2 \rangle}{|m'_1| |m'_2|} \quad (9)$$

从式(9)很容易看出 $\rho \in (0, 1)$ ，这不仅保留了相关系数的能力，还解决了相关系数在非单子集情况下能力不足的问题。下文的例 2 是文献[11]中的具体事例，用来说明 ρ 在衡量证据冲突方面具有的优势。

例 2 设识别框架 $\Theta = \{1, 2, 3, \dots, 20\}$ ，2 个证据的 BPA 分别为如下所示。

$$m_1: m_1(2, 3, 4) = 0.05, m_1(7) = 0.05, m_1(\Theta) = 0.1, m_1(A) = 0.8$$

$$m_2: m_2(1, 2, 3, 4, 5) = 1$$

其中， A 的变化规律为 $\{1\}$ ， $\{1, 2\}$ ， $\{1, 2, 3\}$ ， \dots ， $\{1, 2, 3, \dots, 20\}$ 。表 1 给出当 A 变化时，新的证据冲突程度 ρ 与文献[12]中采用的证据距离 d_{BPA} 和文献[11]中定义的关联系数 r 的对比。

从表 1 可以看出，当 $m_1(A)$ 变化到 $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ 时， $m_1(A)$ 与 $m_2(1, 2, 3, 4, 5)$ 的焦点相同，此时，2 个证据间的冲突是最小的，但随着 A 的变化证据冲突 $k=0.05$ 是不变的，说明 k 不能用来衡量证据间的冲突程度。观察证据距离 d_{BPA} 、关系系数 r 和本文提出的冲突程度 ρ 都是随着 A 的变化而变化，因此 ρ 也可以作为证据冲突衡量标准，该新的证据冲突衡量标准简称为 Pcor。表 1 中的数据表明：证据距离 d_{BPA} 与冲突程度呈正比关系；关系系数 r 的值越大，证据间的冲突程度越小，证据间相似度就越高； ρ 的变化趋势与关系系数 r 相似。显然， r 和 ρ 与 d_{BPA} 的变化趋势相反。为了直观地表达各冲突程度变量的变化趋势，图 1 绘出了表 1 中 d_{BPA} 、 $1-r$ 、 $1-\rho$ 、 k 随着 A 包含元素个数变化的曲线。

表 1 各证据冲突衡量标准之间的比较

A	d_{BPA}	r	k	ρ
{1}	0.785 8	0.331 3	0.05	0.484 3
{1,2}	0.686 6	0.642 2	0.05	0.664 8
{1,2,3}	0.570 5	0.857 9	0.05	0.791 7
{1,2,3,4}	0.423 7	0.929 0	0.05	0.891 1
{1,2,3,4,5}	0.132 3	0.930 8	0.05	0.988 1
{1,2,3,...,6}	0.388 4	0.891 3	0.05	0.910 4
{1,2,3,...,7}	0.502 9	0.701 4	0.05	0.811 1
{1,2,3,...,8}	0.570 5	0.677 3	0.05	0.765 5
{1,2,3,...,9}	0.618 7	0.643 6	0.05	0.728 4
{1,2,3,...,10}	0.655 4	0.606 6	0.05	0.698 5
{1,2,3,...,11}	0.684 4	0.569 8	0.05	0.670 7
{1,2,3,...,12}	0.708 2	0.535 1	0.05	0.647 7
{1,2,3,...,13}	0.728 1	0.503 1	0.05	0.627 6
{1,2,3,...,14}	0.745 1	0.474 0	0.05	0.608 9
{1,2,3,...,15}	0.759 9	0.447 7	0.05	0.598 3
{1,2,3,...,16}	0.773 0	0.424 1	0.05	0.579 8
{1,2,3,...,17}	0.784 6	0.402 7	0.05	0.567 0
{1,2,3,...,18}	0.795 1	0.383 5	0.05	0.555 5
{1,2,3,...,19}	0.804 6	0.366 1	0.05	0.552 4
{1,2,3,...,20}	0.813 3	0.362 7	0.05	0.540 9

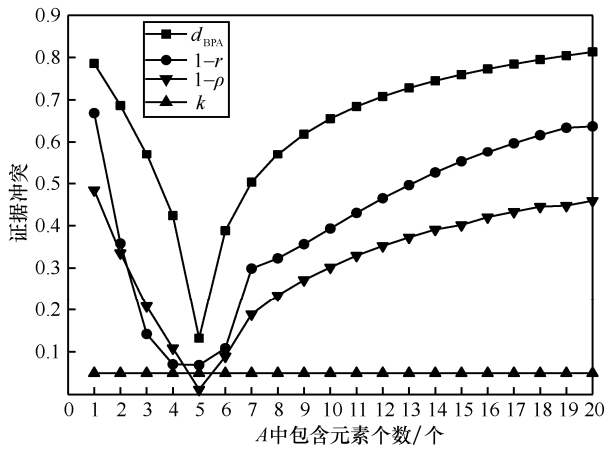


图 1 证据冲突衡量标准的比较

从图 1 可以看出, d_{BPA} 、 $1-r$ 、 $1-p$ 有着相同的变化趋势, 在 A 变化到 $\{1,2,3,4,5\}$ 时, d_{BPA} 、 $1-r$ 、 $1-p$ 的值都降到最小, 并且随着 A 的进一步增加, 三者数值都随着冲突程度变大而相应地升高, 这与客观实际情况相吻合。从变化的趋势来看, $1-p$ 变化趋势更加平滑。从以上的分析可以得出, 本文定义的证据冲突衡量标准 $Pcor$ 可以准确全面地描述证据间的冲突程度。

4 基于 $Pcor$ 的加权证据组合方法

在传感器决策信息融合领域, 一直都秉承着少数服从多数的原则^[13-15], Zadeh^[16]认为在 Dempster 组合规则下组合结果与事实相违背的原因是某个证据或少数证据不相容, 但是对这些少数的证据我们无法规避或清除。为了能使大多数的证据决策保留下来, 在证据合成过程中, 降低一个或少数不相容证据的权重, $Pcor$ 是一个有效的方法, 其利用 ρ 值确定各证据的权重系数^[17-18], 最后利用加权平均的思想进一步弱化不相容证据。

假设在识别框架 Θ 上有 $n(n \geq 3)$ 个相互独立的 BPA, m'_i 和 m'_j 表示其中任意的 2 个 BPA 经过单子集 Pignistic 概率函数变换的形式, 本文方法的详细流程如图 2 所示, 具体步骤如下。

步骤 1 根据式(7)与式(9)计算任意 2 个证据间的 ρ 值, 并根据 ρ 构建支持矩阵 SM , 如式(10)所示。

$$SM = \begin{bmatrix} \rho(m'_1, m'_1) & \rho(m'_1, m'_2) & \cdots & \rho(m'_1, m'_n) \\ \rho(m'_2, m'_1) & \rho(m'_2, m'_2) & \cdots & \rho(m'_2, m'_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho(m'_n, m'_1) & \rho(m'_n, m'_2) & \cdots & \rho(m'_n, m'_n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

容易证明^[19], $\rho(m'_i, m'_j)$ 满足以下条件。

- 1) $0 \leq \rho(m'_i, m'_j) \leq 1$ 。
- 2) $\rho(m'_i, m'_j) = \rho(m'_j, m'_i)$ 。
- 3) $\rho(m'_i, m'_j) = 1 \Leftrightarrow m'_i = m'_j$ 。

步骤 2 计算 m_i 的支持度 $Sup(m_i)$ 为

$$Sup(m_i) = \sum_{j=1, i \neq j}^n \rho(m'_i, m'_j) \quad (11)$$

步骤 3 计算 m_i 的权重 ω_i 为

$$\omega_i = \frac{Sup(m_i)}{\sum_{i=1}^n Sup(m_i)} \quad (12)$$

步骤 4 根据权重 ω_i 对证据源进行加权平均, 得到修正后的证据 m_i'' , 用 Dempster 组合规则进行 $n-1$ 次组合得到最终的组合结果。

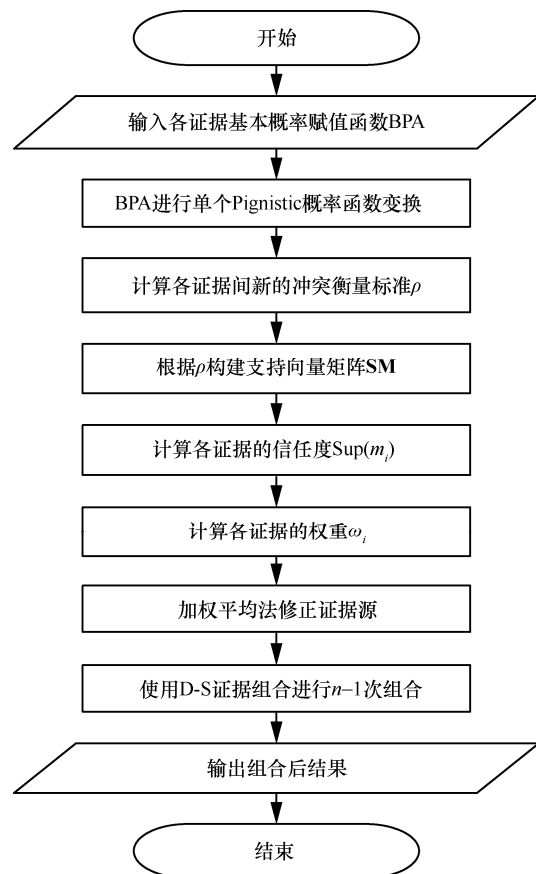


图 2 基于 $Pcor$ 的加权证据组合方法流程

5 仿真算例与分析

通过具体事例, 将一些典型的组合规则与本文提出的组合方法进行对比分析, 说明本文方法能较

好地解决高冲突组合问题。

例 3 设某一识别框架为 $\Theta=\{A, B, C\}$ ，有 5 个传感器的 BPA 分配分别如下所示。

$$\begin{aligned} m_1(A)=0.5, m_1(B)=0.2, m_1(C)=0.3 \\ m_2(A)=0.0, m_2(B)=0.8, m_2(C)=0.2 \\ m_3(A)=0.6, m_3(B)=0.3, m_3(C)=0.1 \\ m_4(A)=0.55, m_4(B)=0.25, m_4(C)=0.2 \\ m_5(A)=0.65, m_5(B)=0.15, m_5(C)=0.2 \end{aligned}$$

从 5 个传感器给出的证据看出， m_1 、 m_3 、 m_4 、 m_5 证据认为 A 发生的可能性较大；证据 m_2 对 B 的支持度较高，相比较而言，证据 m_2 是一条高冲突证据。通过 6 种组合规则对例 3 证据进行组合，其结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出，由于 $m_2(A)=0$ ，Dempster 组合规则无法在更多证据支持 A 的情况下得出一个合理的数值，组合后 $m(A)$ 值始终为 0，显然根据原始的 Dempster 组合规则做出的决策是不符合常理的；Yager 组合规则分析出 Dempster 组合规则存在的问题并进行了相应的改进，把冲突的部分分配给未知

项 X ，随着证据的增加，组合后的 $m(X)$ 逐渐变大，但 $m(A)$ 值仍为 0，Yager 组合规则虽然提高了组合理论分配的合理性，但是仍没有解决 Dempster 组合规则处理高冲突证据带来决策错误的问题；孙全等^[20]对 Yager 组合规则进行了改进，很好地克服了该规则一直以来对 A 的否定，随着加入组合的证据增多， $m(A)$ 值也在增加，只是收敛速度较慢，当第 5 个证据加入组合时， $m(A)=0.236 9$ 、 $m(X)=0.506 7$ ，结果不确定性依然存在，仍不利于决策；Murthy 方法很好地解决了高冲突问题，当第 5 个证据加入组合后， $m(A)=0.809 0$ ，可以准确地做出决策判断，但是 Murthy 组合规则只是对证据间进行了简单的平均，并没有考虑证据之间的相关性与差异，在 $m_2(B)=0.8$ 这一基本概率赋值的干扰下， $m(B)$ 与 $m(C)$ 的组合结果相差较大。

Pcor 组合规则，不仅选取了 Murthy 组合规则中的组合优点，还利用新的证据冲突衡量标准 Pcor 来确定证据间的权重系数，达到对证据的合理分配。如表 2 所示，按照 Pcor 组合规则组合后，各元

表 2 6 种组合规则结果比较

算法名	m_1, m_2	m_1, m_2, m_3	m_1, m_2, m_3, m_4	m_1, m_2, m_3, m_4, m_5
Dempster 组合规则	$m(A)=0$	$m(A)=0$	$m(A)=0$	$m(A)=0$
	$m(B)=0.727 3$	$m(B)=0.888 9$	$m(B)=0.909 1$	$m(B)=0.882 4$
	$m(C)=0.2727$	$m(C)=0.111 1$	$m(C)=0.090 9$	$m(C)=0.117 6$
Yager 组合规则	$m(A)=0$	$m(A)=0$	$m(A)=0$	$m(A)=0$
	$m(B)=0.160 0$	$m(B)=0.048 0$	$m(B)=0.012 0$	$m(B)=0.001 8$
	$m(C)=0.060 0$	$m(C)=0.006 0$	$m(C)=0.001 2$	$m(C)=0.000 2$
	$m(X)=0.780 0$	$m(X)=0.946 0$	$m(X)=0.986 8$	$m(X)=0.998 0$
文献[20]组合规则	$m(A)=0.089 4$	$m(A)=0.170 5$	$m(A)=0.206 2$	$m(A)=0.236 9$
	$m(B)=0.338 8$	$m(B)=0.249 5$	$m(B)=0.205 7$	$m(B)=0.176 9$
	$m(C)=0.149 4$	$m(C)=0.099 0$	$m(C)=0.088 7$	$m(C)=0.092 9$
	$m(X)=0.422 4$	$m(X)=0.481 0$	$m(X)=0.499 4$	$m(X)=0.506 7$
Murthy 组合规则	$m(A)=0.166 7$	$m(A)=0.355 5$	$m(A)=0.545 3$	$m(A)=0.809 0$
	$m(B)=0.666 7$	$m(B)=0.586 8$	$m(B)=0.424 6$	$m(B)=0.178 5$
	$m(C)=0.166 6$	$m(C)=0.057 7$	$m(C)=0.030 1$	$m(C)=0.012 5$
文献[21]组合规则	$m(A)=0.166 7$	$m(A)=0.512 2$	$m(A)=0.743 8$	$m(A)=0.927 5$
	$m(B)=0.666 7$	$m(B)=0.427 6$	$m(B)=0.225 4$	$m(B)=0.063 1$
	$m(C)=0.166 6$	$m(C)=0.060 2$	$m(C)=0.030 8$	$m(C)=0.009 4$
Pcor 组合规则	$m(A)=0.166 7$	$m(A)=0.524 4$	$m(A)=0.758 1$	$m(A)=0.937 3$
	$m(B)=0.666 7$	$m(B)=0.417 9$	$m(B)=0.215 6$	$m(B)=0.054 2$
	$m(C)=0.166 6$	$m(C)=0.057 7$	$m(C)=0.026 3$	$m(C)=0.008 5$

素满足客观规律 $m(A) > m(B) > m(C)$ ，对比 Murthy 组合规则明显缩小 $m(B)$ 与 $m(C)$ 组合结果的差异。随着对 A 支持度高的证据加入，Pcor 组合规则中 $m(A)$ 组合结果越来越大。当第 4 个和第 5 个证据加入时， $m(A)$ 值分别为 0.758 1、0.937 3，比 Murthy 组合规则中的 $m(A)=0.545 3$ 、 $m(A)=0.809 0$ 有明显提高，那么 Pcor 组合规则更加利于决策。对比文献[21]的组合方法，两者在组合效果上都非常不错，但是在相同的条件下，Pcor 组合方法的 $m(A)$ 值是较大的，对最终的判断结果更有利。如图 3 所示（由于 Dempster 组合规则与 Yager 组合规则 $m(A)$ 值一直为 0，2 条线与横轴重合），Pcor 组合规则在第 3 个证据加入组合时 $m(A)$ 数值就很高，这得益于该规则分配权重的合理性，有效地降低证据 m_2 在整个组合过程中的影响，随着证据 m_4 、 m_5 加入，证据 m_2 的影响越来越小。因此 Pcor 组合规则不仅提高了证据组合的可能性，还很好地反映了实际的组合过程，符合实际情况。

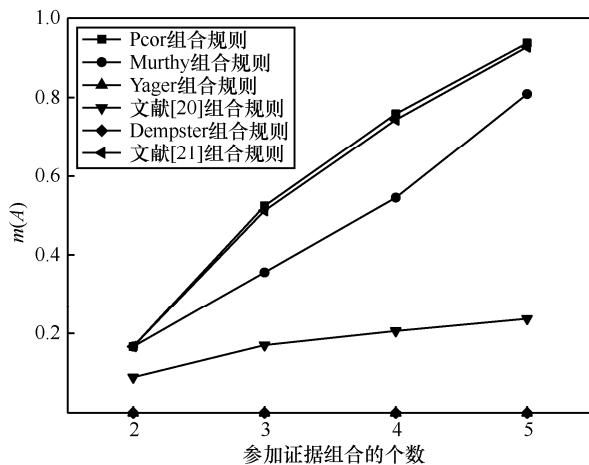


图 3 不同组合规则 $m(A)$ 的收敛性

6 结束语

采用经典证据理论对高冲突证据进行组合时，会产生与事实相悖的结论。本文结合 Pignistic 概率函数变换与相关系数确立新冲突衡量标准 Pcor，在理论与事例两方面验证 Pcor 可以有效地衡量证据间的冲突，并且根据 Pcor 提出了有效的组合规则。算法事例表明，本文提出的 Pcor 组合规则全面结合了证据间的相关性与差异，最大程度降低了高冲突证据带来的组合问题，不仅加快了组合结果的收敛速度，降低了决策风险，还提高了抗干扰能力和证据高冲突时决策的准确性。

参考文献:

- [1] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping[J]. Annals Mathematical Statistical, 1967, 38: 325-339.
- [2] SHAFER G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976.
- [3] 雷蕾, 王晓丹, 邢雅琼, 等. 结合 SVM 和 DS 证据理论的多极化 HRRP 分类研究[J]. 控制与决策, 2013, 28(6): 861-866.
LEI L, WANG X D, XING Y Q, et al. Multi-polarized HRRP classification by SVM and DS evidence theory[J]. Control and Decision, 2013, 28(6): 861-866.
- [4] LEFEVRE E, COLOT O, VANNOORENBERGHE P. Belief function combination and conflict management[J]. Information Fusion, 2002, 3(2): 149-162.
- [5] YAGER R R. On the Dempster-Shafer framework and new combination rules[J]. Information Sciences, 1987, 41(5): 93-138.
- [6] HAN D Q, DENG Y, HAN C Z. Weighted evidence combination based on distance of evidence and uncertainty measure[J]. J Infrared Millim Waves, 2011, 30(5): 396-400.
- [7] LIU Z G, DEZERT J, PAN Q, et al. Combination of sources of evidence with different discounting factors based on a new dissimilarity measure[J]. Decision Support Systems, 2011, 52(1): 133-141.
- [8] MURPHY C K. Combining belief functions when evidence conflicts[J]. Decision Support Systems, 2000, 29(1): 1-9.
- [9] 宋京伟, 王晓丹, 宋亚飞, 等. 基于 Pignistic 概率距离的加权证据组合方法[J]. 电子学报, 2018, 39(1): 117-125.
SONG J W, WANG X D, SONG Y F, et al. Weighted evidence combination method based on power-Pignistic probability distance[J]. Journal on Communications, 2018, 39(1): 117-125.
- [10] 肖建于, 童敏明, 朱昌杰, 等. 基于 Pignistic 概率距离的改进证据组合规则[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(4): 636-645.
XIAO J Y, TONG M M, ZHU C J, et al. Improved combination rule of evidence based on Pignistic probability distance[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(4): 636-645.
- [11] 邓勇, 王栋, 李齐, 等. 一种新的证据冲突分析方法[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(6): 839-844.
DENG Y, WANG D, LI Q, et al. A new method to analyze evidence conflict[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(6): 839-844.
- [12] JOUSSELME A L, GRENIER D, BOSSE E. A new distance between two bodies of evidence[J]. Information Fusion, 2001(2): 91-101.
- [13] 毕文豪, 张安, 李冲. 基于新的证据冲突衡量的加权证据融合方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(1): 73-78.
BI W H, ZHANG A, LI C. Weighted evidence combination method based on new evidence conflict measurement approach[J]. Control and Decision, 2016, 31(1): 73-78.
- [14] 孟光磊, 龚光红. 证据源权重的计算及其在证据融合中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(11): 1365-1368.

MENG G L, GONG G H. Weight co-efficients calculation for evidence sources and its application in evidences fusion[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(11): 1365-1368.

[15] LIU Z G, PAN Q, DEZERT J, et al. Classification of uncertain and based on evidence theory[J]. Neurocomputing, 2014, 133(8): 459-470.

[16] ZADEH L. A simple view of the Dempster-Shafer theory of evidence and its implication for the rule of combination[J]. AI Magazine, 1986, 7(2): 85-90.

[17] 刘准轶, 程咏梅. 基于证据距离和矛盾因子的加权证据组合法[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(12): 1439-1442.

LIU H G, CHENG Y M. Combination of weighted belief functions based on evidence distance and conflicting belie[J]. Control Theory and Applications, 2009, 26(12): 1439-1442.

[18] 蒋雯, 吴翠翠, 贾佳, 等. D-S 证据理论中的基本概率赋值转换概率方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(2): 295-299.

JIANG W, WU C C, JIA J, et al. A probabilistic transformation of basic probability assignment(BPA) in D-S evidence theory[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(2): 295-299.

[19] 宋亚飞, 王晓丹, 雷蕾, 等. 基于相关系数的证据冲突度量方法[J]. 通信学报, 2014, 35(5): 95-100.

SONG Y F, WANG X D, LEI L, et al. Measurement of evidence conflict based on correlation coefficient[J]. Journal on Communications, 2014, 35(5): 95-100.

[20] 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.

[21] 邓勇, 施文康, 朱振福. 一种有效处理冲突证据的组合方法[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(1): 27-32.

DENG Y, SHI W K, ZHU Z F. Efficient combination approach of conflict evidence [J]. J Infrared Millim Waves, 2004, 23(1): 27-32.

[作者简介]



杨晓萍(1963-), 女, 黑龙江鹤岗人, 博士, 吉林大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为网络通信传输技术和多传感器数据融合技术。



廉伟健(1993-), 男, 吉林梅河口人, 吉林大学硕士生, 主要研究方向为多传感器数据融合技术。



李孟杰(1994-), 男, 河北邯郸人, 吉林大学硕士生, 主要研究方向为 WSN 负载均衡多径路由协议。



钱志鸿(1957-), 男, 吉林长春人, 博士, 吉林大学教授、博士生导师, 主要研究方向为基于物联网、D2D、Wi-Fi、RFID 等无线网络与通信技术。