

一种新的证据推理组合规则*

张山鹰 潘 泉 张洪才
(西北工业大学自动控制系 西安 710072)

摘 要 证据推理是一种不确定推理的人工智能方法。首先研究几种组合规则的改进方法和造成其缺陷的机理,然后从分析冲突的来源入手,利用冲突信息提出一种新的组合规则——吸收法。仿真结果表明,新的组合规则在处理冲突方面的性能得到了明显改进,并且具有较强的鲁棒性。

关键词 证据推理,组合规则,智能决策

分类号 TP 11

A New Kind of Combination Rule of Evidence Theory

Zhang Shanying, Pan Quan, Zhang Hongcai
(Northwestern Polytechnical University)

Abstract Evidence reasoning has good performance in dealing with uncertain information in decision-making system. Some important improved combination rules are firstly reviewed. The reasons of drawbacks of Dempster's rule are analyzed. According to the resource of conflict, a new combination rule, named "absorptive" method, is proposed by employing the information of conflict. As simulation results, this new method has better performance in dealing with conflict than Dempster's rule and other methods.

Key words evidence reasoning, Dempster's rule, intelligence decision

1 引 言

在现实世界中,不确定情况下的决策是十分常见的问题,而不确定推理方法则为处理不确定、不精确、不完整信息提供了有效途径。其主要方法有:贝叶斯推理、证据推理、模糊逻辑推理以及基于规则的推理。虽然每种方法均有各自的优势,但由于证据推理适合于无先验信息的融合,而且在不确定性的表示、量测和组合方面具有一定优势,因此受到广泛重视^[1],被推广到概率范围和模糊集。它既能象贝叶斯推理那样结合先验信息,又能处理象语言一类的模糊概念证据。证据推理在智能决策系统和专家系统中的应用^[2~6]十分有效,它不但具有符合人类推理

的决策过程,而且可以对推理进行合理的信息论解释^[7]。然而在某些情况下,证据推理会产生与直觉相反的结论^[8~10],许多文献认为这是组合规则所造成的,并对此加以改进^[11~17],但效果不是十分理想。

一般说,证据推理更适用于解决高置信度低冲突的情况,而对于高冲突会产生各种不合理现象。主要原因是其组合规则将冲突置信指派值按比例分给两个证据的公共焦点,从而造成不尽合理的结论。另外,证据的冲突信息也是不容忽视的,分析挖掘冲突信息会使组合结果更有效、更合理。因此,本文从分析冲突来源入手,利用冲突信息给出一种更为有效的组合公式——吸收法。可以证明,该组合规则具有较强的鲁棒性。

2 Dempster-Shafer 理论简介

证据推理又称 Dempster-Shafer 理论, 它是建立在辨识框架 Θ 上的理论, 在其上定义基本置信指派函数 m 、置信函数 Bel 和似真函数 $Pl(A)$ 。其中, 基本置信指派 $m(A)$ 表示证据支持命题 A 发生的程度, 而不支持任何 A 的真子集的发生; 置信函数 $Bel(A)$ 表示证据给予命题 A 的全部支持程度; 似真函数 $Pl(A)$ 表示证据不否认命题 A 的程度。 $[Bel(A), Pl(A)]$ 构成证据不确定区间, 表示证据的不确定程度。

定义 1 (Dempster 规则) 假定辨识框架 Θ 上性质不同的两个证据, 其焦点分别为 B_i 和 $C_j (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$, 其基本置信指派函数分别为 m_1 和 m_2 , 则按 Dempster 规则组合, 有

$$m(A) = \frac{m_1(B_i) m_2(C_j)}{m_1(B_i) m_2(C_j) + m_1(B_i) m_2(\emptyset)} \quad (1)$$

$$m(\emptyset) = 0$$

$A \cap C_j = \emptyset, A \subseteq \Theta$

冲突基本信任指派为

$$q_{ij} = m_1(B_i) m_2(C_j), \quad B_i \cap C_j = \emptyset \quad (2)$$

矛盾因子为

$$Q = \frac{m_1(B_i) m_2(C_j)}{m_1(B_i) m_2(C_j) + m_1(B_i) m_2(\emptyset)} \quad (3)$$

于是, 由上面组合规则产生的新基本置信指派函数 m 、置信函数和似真函数, 便构成了组合证据不确定区间, 完成了证据的推理。Dempster 组合规则是反映两个证据联合作用的一个法则。给定几个在同一识别辨识框架下基于不同证据的置信函数, 如果这些证据不是完全冲突的, 那么便可利用 Dempster 组合规则计算出一个置信函数, 而该置信函数则可作为这些证据在联合作用下产生的置信函数。

3 组合规则的几种修改方法

Dempster 组合规则遗弃了独立焦点的每个冲突, 它基于没有任何矛盾的那部分信息构造置信结构。从组合规则中容易看出, 为了归一化而忽视矛盾冲突是一种冒险的做法, 将会产生一些与直觉相反的算例。比较典型的例子如下:

例 1 假设辨识框架为 $\Theta = \{a, b, c\}$, 其中 a, b, c 是相互独立的命题, 证据 1 和证据 2 的基本置信指派分别为:

$$\text{证据 1 } m_1(a) = 0.9, \quad m_1(b) = 0.1$$

$$\text{证据 2 } m_2(b) = 0.1, \quad m_2(c) = 0.9$$

运用 Dempster 规则组合两证据, 得 $m(b) = 1$, 即 b 事件是由组合前的小置信度事件变为必然事件, 这显然是不合理的。这种不合理的直接原因是由证据的组合规则造成的, 它表明 Dempster 规则对这种高冲突证据是不适用的, 同时也说明 Dempster 规则的鲁棒性不强。如何改进上述缺陷对证据推理的理论完善和实际应用都具有极为重要的意义。

为便于说明, 我们把组合后未归一化基本信任指派函数记为

$$\text{Com}(A) = \sum_{B \cap C = A} m_1(B) m_2(C) \quad (4)$$

则 Dempster 组合规则变为

$$m(A) = \text{Com}(A) / [1 - \text{Com}(\emptyset)]$$

Yager 给出一种改进方法^[12], 即把矛盾因子当作未知不确定项加到 $m(\Theta)$ 中, 得到

$$m(A) = \text{Com}(A) \quad (5)$$

$$m(\Theta) = \text{Com}(\Theta) + \text{Com}(\emptyset) \quad (6)$$

这是一种极为保守的做法, 会使证据组合后证据的不确定性增大, 不符合证据推理的目的。

Toshiyuki 在对 Dempster 规则和 Yager 的组合规则评价以后, 将其结合起来得出^[15]

$$m(A) = \{1 + K \text{Com}(\emptyset)\} \text{Com}(A) \quad (7)$$

$$m(\Theta) = \{1 + K \text{Com}(\emptyset)\} \text{Com}(\Theta) +$$

$$\{1 + K \text{Com}(\emptyset) - K\} \text{Com}(\emptyset) \quad (8)$$

其中 $0 < K < 1 / (1 - \text{Com}(\emptyset) - \text{Com}(\Theta))$ 。当 $K = 0$ 时, 上式为 Yager 规则; 当 $K = 1 / (1 - \text{Com}(\emptyset))$ 时, 则为 Dempster 规则。但该组合规则要求对系数 K 进行最优化选择, 而对 K 的选择又没有定律, 并且证据的组合顺序也影响最终结果。

平均法^[6] 将组合规则化为简单的平均运算, 即

$$m(A) = (m_1(A) + m_2(A)) / 2 \quad (9)$$

它没有区分冲突信息和无冲突信息, 虽然对例 1 有合理的解释且减少了计算量, 但对两个独立的证据进行平均都是不合理的, 并且丧失了证据推理的许多性能。如组合后信任度上升, 不确定性减小, 信息量增加等。

加权证据组合法^[14] 定义一个绝对指派函数, 形成加权证据组合法

$$m(A) = \sum_{A=B \cup C} w_i m_i(B) + w_j m_j(C) \quad (10)$$

该组合规则对模式分类是有效的。然而尽管它把问题转化为可调权值, 但对处理冲突问题还停留在 Dempster 和 Yager 的方法上, 同样存在归一化的缺

陷。

另外, Yager 的另一种方法^[6]是假定 $m(\emptyset) = Q (> 0)$, 用来衡量证据冲突, 但这样就改变了证据推理理论的封闭性, 从而带来其它问题。Takahiko 也给出了类似的组合规则的改进方法^[13], 但其命题集合区分 $\{y_1, y_2\}$ 和 $\{y_1, y_2\}$ 却破坏了完备的命题空间。

4 证据冲突的处理

在证据推理中, 辨识框架的子集构成了命题的完备集, 这已成为被广泛接受的优势, 而证据推理的核心——组合规则产生的结果并不总能令人满意。我们认为问题的关键在于组合规则对冲突的处理不当。冲突问题是指在证据组合时, 对交集为空的两个焦元的基本置信指派的处理方法。Dempster 规则为了保持基本置信指派函数的归一性, 在处理矛盾因子时, 使两个证据的每个公共焦元的基本信任指派变为原来的 K^{-1} 倍, 但冲突指派并非所有焦元共同造成的, 也并非基本置信指派大的公共焦元产生冲突的可能性大。文献[7]在解释证据推理过程时指出, 非归一化的推理具有良好的性质, 它可用信息论的方法合理地说明证据的组合, 能使证据的信息量增加。Zadeh 指出了归一化因子的弊端, 并给出这种盲目归一化的反例^[18]。这也是我们研究由证据冲突改进组合规则的原因之一。

我们认为冲突也是一种信息, 它一方面可以说明矛盾双方在某些方面非常近似, 也可以说明是由某方的误操作或某时刻的干扰所致。冲突信息的完全遗弃必然造成信息的损失, 而把冲突信息提取分析后加入组合规则, 则可得出新的组合规则。

尽管上节提到若干改进方法, 但这些方法对冲突信息并未分析提取。Yager 在文献[17]中给出了优先级证据分配冲突方法, 即将冲突基本指派 q_{ij} 分给产生冲突的焦元中优先级高的证据的焦元, 从而解决了一类问题。但实际情况相当复杂, 冲突也并非单个证据焦元所造成, 它可能源于两个证据的误差, 也可能是由于某种未知或不确定原因, 还可能是外部扰动造成的。

在智能信息系统中, 观测往往带有噪声或精度有限。当冲突由噪声(扰动)产生时, 传感器得到的基本置信指派值波动较大。把冲突基本置信指派值 q_{ij} 分给产生冲突焦元中基本置信指派值较大的焦元(与证据可靠性无关), 我们称之为吸收法。这主要

是因为受扰动干扰的焦元一般比未受扰动干扰的焦元的基本置信指派值小, 把冲突置信指派值分给指派值较大的焦元(真值)是合理的。因此, 假设在两个证据的所有焦元中, 具有最高基本置信指派的焦元所表示的命题为真的条件下, 组合规则可转变为

$$m(A) = \sum_{B_i, C_j=A} m_1(B_i) m_2(C_j) + \Delta(A) \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta(A) = \sum_{A=C=\emptyset} m_1(A) m_2(B) \\ m_1(A) > m_2(B) + L, \quad 0 < L < 1 \\ \Delta(A) = \sum_{B=A=\emptyset} m_1(B) m_2(A) \\ m_1(B) < m_2(A) - L \\ \Delta A = \sum_{A=B=\emptyset} m_1(A) m_2(B) / 2 \\ |m_1(A) - m_2(B)| < L \end{array} \right.$$

其中 L 表示指派值的限度, 当两证据在该限度范围内时, 可认为两证据对冲突的产生起同样作用, 所以把冲突基本指派平均加给两者, 从而保证组合后证据的基本置信指派没有大的突变。 L 的大小可根据实际情况对组合结果突变的限制来选取, 随着 L 的增大, 组合结果的突变会随之减小。

新组合规则吸收法具有如下优良性质:

1) 由于没有遗弃任何冲突指派, 因此可保持证据基本置信指派函数的归一性, 无需归一化处理。

2) 该组合公式减小了原证据的不确定性, 并且比 Dempster 规则减小的程度大, 即

$$\frac{m_1(\odot) m_2(\odot)}{\max_i \{m_i(\odot)\}} > \frac{m_1(\odot) m_2(\odot)}{1 - Q} \quad (12)$$

3) 例1用吸收法求解的结果为: $m(a) = 0.495$, $m(b) = 0.01$, $m(c) = 0.495$ 。若把 b 事件作为干扰, 组合后其基本置信指派函数 $m(b)$ 比组合前有大幅下降, 由于两组数据提供等量矛盾因素, 必然使 a, c 事件的基本置信指派下降, 这也较为合理。另外, 吸收法规则的定义决定了它具有较好的抗干扰能力, 且鲁棒性较强。

新组合规则吸收法是在最高基本置信指派的焦元所表示的命题为真的条件下组合的, 该焦元的可靠性决定了融合结果的可靠性。不过式(12)失去了多源数据组合的可交换性, 其结果与组合顺序有关。如果同时有多个数据进行组合, 需加入组合顺序因素, 例如按证据先验的由大到小的顺序组合。

5 数字仿真

基本一致, 因此两证据的冲突很大, 且设一个目标先靠近传感器, 而后又离开它。于是可以得到先增大后减小的证据置信度如图 1、图 2 所示。其中 (a) 为证据 1 是焦点 $\{a\}$ (如判断目标为 1) 的置信度先增后减的过程; (b) 为证据 2 是在噪声干扰下与证据 1 有矛盾

的过程, 即焦点 $\{b\}$ (判断目标为 2) 的置信度先增后减。另外, 对于证据 1 和证据 2 的置信度的时间序列进行了各种组合, 仿真结果见图 1、图 2。其中实线表示 $Bel(a)$, 虚线表示 $Bel(b)$ 。

图 1 表明: 当冲突较大时, Dempster 组合结果

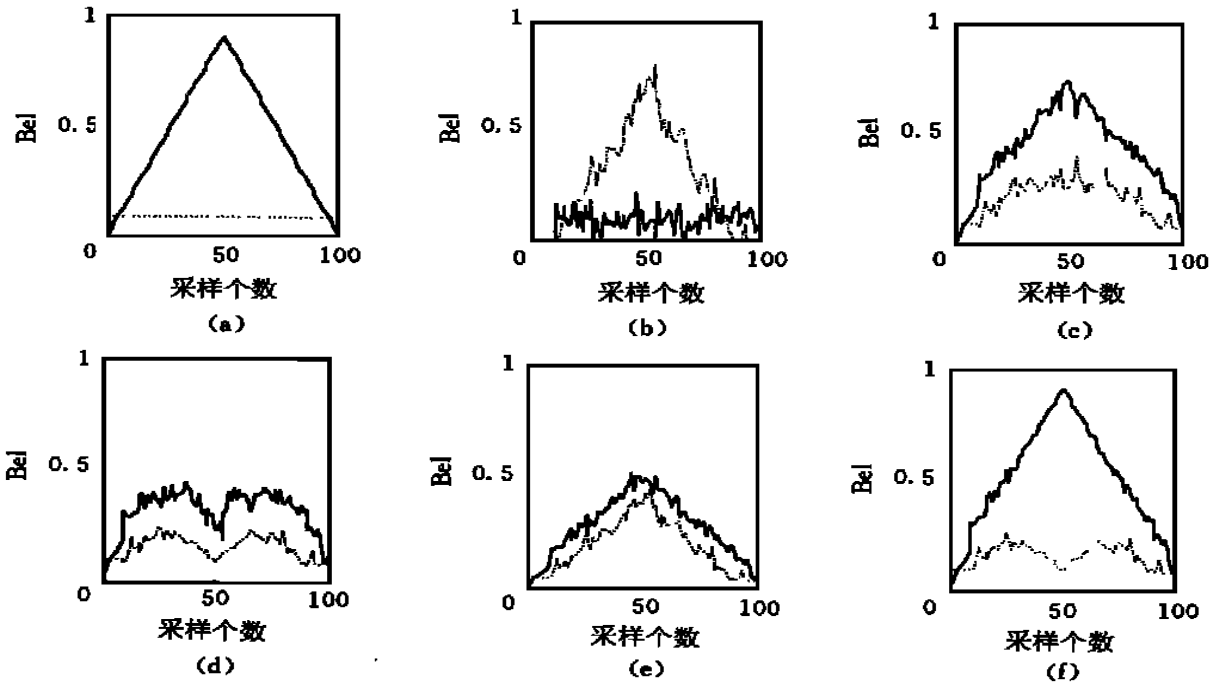


图 1 组合结果的比较

(a) Bel1 (b) Bel2 (c) Dempster (d) Yager (e) 平均法 (f) 吸收法

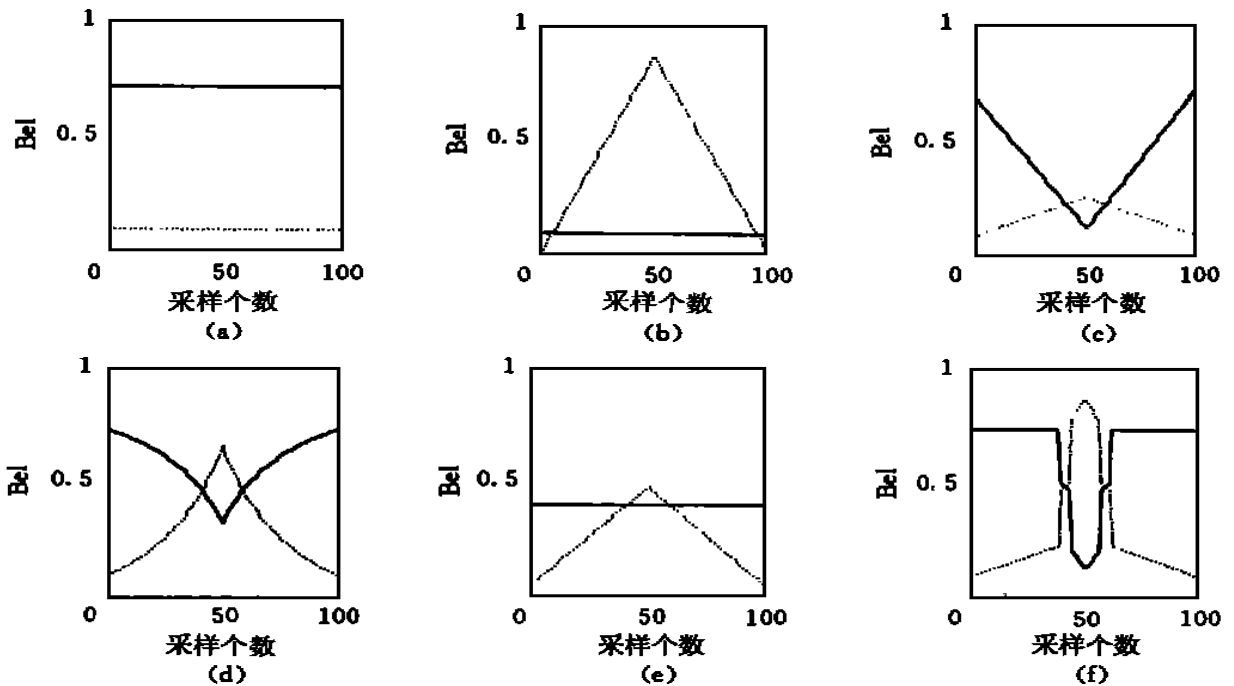


图 2 各组合结果

(a) Bel1 (b) Bel2 (c) Dempster (d) Yager (e) 平均法 (f) 吸收法

(图(c))受干扰的影响很大,这种冲突证据的组合使最终的结果置信度减小;吸收法的结果(图(f))不但较好地保持了证据1的信息,而且置信度的增长较其它规则大,这是因为证据1焦元 a 的置信度通常大于证据2焦元 b 的置信度,所以冲突基本指派多数分给 a 焦元,使吸收法保持了强置信度证据的鲁棒性,从而有利于快速达到最终的决策阈值;其它各图证据1的置信度有不同程度的损失;Yager组合规则(图(d))过于保守,对证据的扰动非常敏感,均值方法(图(e))使信息大量流失,是一种典型的折中算法。

图2表明:证据2由弱变强且超过证据1的最大置信度焦元时,组合结果的对比明显,其中图(f)的吸收法对证据2基本置信指派超过证据1的最大置信指派反应迅速。对于吸收法的这一特点,可以利用其响应快的优点,如果是突变的缺点,则可利用调节 L 值来减少突变。

6 结 论

本文首先总结分析了几种证据推理组合规则的改进方法;然后从分析冲突来源入手,利用冲突信息提出了新的组合规则吸收法;最后对新规则进行了仿真。结果表明,新的证据推理组合规则在处理冲突方面的性能都有明显改进。

参 考 文 献

- 戴冠中,潘泉,张山鹰,等.证据推理及其存在的问题.控制理论与应用,1999,16(4):465~469
- Yang J, Sen P. A general multilevel evaluation process for hybrid MADM with uncertainty. IEEE Trans on Syst, Man and Cybern, 1994, 24(10):1458~1473
- Yang J B, Singh M G. An evidential reasoning approach for multiple-attributed decision making with uncertainty. IEEE Trans on Syst, Man and Cybern, 1994, 24(1):1~18
- Drukopoulos E, Lee C C. Decision rules for distributed decision network with uncertainty. IEEE Trans on Autom Contr, 1992, 37(4):5~14
- Xu Hong, Hsia Y T, Smets P. Transferable belief model for decision making in the evaluation based systems. IEEE Trans on Syst, Man and Cybern, 1996, 26(6):698~712
- Chen L H. An extended rule-based inference for general decision making problem. Information Science, 1997, 102(1/4):111~137
- Xu Hong, Smet P. Some strategies for explanations in evidence reasoning. IEEE Trans on Syst, Man and Cybern, Part A: Systems Human, 1996, 26(5):599~607
- Walley P. Measures of uncertainty in expert system. Artif Intell, 1996, 83(1):1~58
- Fung R M, Chong C Y. Meta-probability and Dempster-Shafer in evidence reasoning. In: Uncertainty in Artif Intell (4). Amsterdam, 1986. 295~302
- Smets P. Construing the pignistic probability function in a context of uncertainty. In: Uncertainty in Artif Intell (5). Amsterdam, 1990. 29~39
- 向阳,史习智.证据理论合成规则的一点修正.上海交通大学学报,1999,33(3):357~360
- Yager R R. On the Dempster-Shafer framework and new combination rules. Information System, 1989, 41(2):93~137
- Horiuchi Takahiko. A new theory of evidence for nonexclusive elementary proposition. Int J of System Science, 1996, 27(10):989~994
- Horiuchi Takahiko. Decision rule for pattern classification by integrating interval feature values. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(4):440~447
- Inagki Toshiyuki. Interdependence between safety-control policy and multiple-sensor schemes via Dempster-Shafer theory. IEEE Trans on Reliability, 1991, 40(2):182~188
- Takashi Matsuyama. Belief formation observation and belief integration using virtual belief space in Dempster-Shafer probability model. In: Proc of the 1994 IEEE on Multisensor Fusion and Integrating for Intelligent System. NV: Los Vegas, 1994. 379~386
- Yager R R. On the aggregation of prioritized belief structure. IEEE Trans on Syst, Man and Cybern, 1996, 26(6):708~719
- Zadeh L. A mathematical theory of evidence (book review). AI Mag, 1984, 5(3):81~83

作 者 简 介

张山鹰 男,1973年生。1999年获西北工业大学工科硕士学位,现为西北工业大学博士研究生。主要研究方向为智能推理理论及应用,信息融合,信号处理,智能控制。

潘泉 男,1961年生。西北工业大学研究生院副院长,教授,博士生导师。主要研究方向为动态系统的建模、估计与控制,信息融合,多目标跟踪等。

张洪才 男,1938年生。西北工业大学目标跟踪研究中心主任,教授,博士生导师。主要研究方向为估计理论,系统辨识,随机控制。