

北京航空航天大学学报

*Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*

ISSN 1001-5965, CN 11-2625/V

## 《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目: 面向冲突证据的改进 DS 理论算法研究  
作者: 张欢, 陆见光, 唐向红  
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0264  
收稿日期: 2019-05-28  
网络首发日期: 2019-09-30  
引用格式: 张欢, 陆见光, 唐向红. 面向冲突证据的改进 DS 理论算法研究. 北京航空航天大学学报. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0264>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 面向冲突证据的改进 DS 理论算法研究

张欢<sup>1</sup>, 陆见光<sup>1,2,✉</sup>, 唐向红<sup>1,3</sup>

(1. 贵州大学 现代制造技术教育部重点实验室, 贵阳 550025; 2. 公共大数据国家重点实验室, 贵阳 550025;

3. 贵州大学 机械工程学院, 贵阳 550025)

✉通信作者 陆见光 E-mail: jglu@gzu.edu.cn

**摘要** DS 证据理论在处理不确定信息上的优势, 得到了各个领域的广泛应用。本文针对传统 DS 存在的证据冲突问题, 提出了一种改进的 DS 证据理论方法。结合皮尔逊相关系数的相关性限制和融合过程零因子的修正, 较大程度上减少分配与整体非相关证据体的权值, 修正证据体的整体重要程度, 最后按照修正后的基本概率分布(BPA)进行 DS 组合规则计算, 得到融合结果。在解决常见冲突证据和证据体融合数量等方面与其他改进 DS 的方法进行比较, 收敛速度更快, 融合的可信命题基本概率结果更高, 因而验证了本文方法的有效性。

**关键词** DS 证据理论; 证据冲突; 组合规则; 信息融合; 皮尔逊相关系数

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0264

## Research on an improved DS theory algorithm for conflict evidences

ZHANG Huan<sup>1</sup>, LU Jianguang<sup>1,2,✉</sup>, TANG Xianghong<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of the Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. State Key Laboratory of Public Big Data, Guiyang 550025, China;

3. College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

✉LU Jianguang; E-mail: jglu@gzu.edu.cn

**Abstract** The advantages of DS evidence theory in dealing with uncertain information have been widely used in various fields. This paper proposes an improved method of DS evidence theory for the existence of evidence conflicts in traditional DS. Combined with the correlation limitation of Pearson correlation coefficient and the correction of zero factor of fusion process, the weight of distribution and the overall unrelated evidence body is greatly reduced, the overall importance of the evidence body is corrected. And finally, the DS combination rule calculation is performed to corrected basic probability assignment (BPA) to obtain the fusion result. Compared with other improved methods of DS in solving common conflict evidence and the number of evidence body fusion, this paper got the faster convergence rate and higher fusion BPA on credible proposition, which proves the effectiveness of the improved method.

**Key words** DS evidence theory; evidence conflict; combination rule; information fusion; Pearson correlation coefficient

收稿日期: 2019-05-28

基金项目: 贵州省重大基础研究项目([2013]6019); 贵州省留学回国人员科技活动择优资助项目(2018.0002); 国家留学基金委项目(201806675013); 贵州省公共大数据重点实验室开放基金(2017BDKFJJ019); 贵州大学引进人才基金(贵大人基合字(2016)13号)

作者简介: 张欢 男, 硕士研究生。主要研究方向: 多源数据融合与故障诊断。陆见光 男, 博士, 硕士生导师。主要研究方向: 机器学习与智能制造。唐向红 男, 博士, 教授, 硕士生导师。主要研究方向: 数据挖掘与故障诊断

Fund: Science and Technology Major Project of Guizhou Province ([2013]6019); Project of Guizhou High-Level Study Abroad Talents Innovation and Entrepreneurship (2018.0002); Project of China Scholarship Council (201806675013), Open Fund of Guizhou Provincial Public Big Data Key Laboratory (2017BDKFJJ019); and Guizhou University Foundation for the introduction of talent ((2016) No. 13).

网络首发时间: 2019-09-30 16:04:10 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20190930.1112.002.html>

## 1. 引言

DS (Dempster-Shafer) 证据理论由 Dempster 于 1967 年首先提出, 之后由他的学生 Shafer 进行完善而得到的一种不确定性推理计算方法<sup>[1]</sup>。随着信息多源化的发展, 多源信息融合技术在目标识别<sup>[2]</sup>、状况评估<sup>[3]</sup>、故障诊断<sup>[4]</sup>等领域的应用需求愈加强烈, 同时也受到越来越多的学者关注<sup>[5][6]</sup>。

但是 DS 证据理论在实际应用过程中也存在的一些不足之处, 即传统融合规则无法解决的证据冲突问题<sup>[7]</sup>。文献[8]通过平均化冲突系数进行证据体权重分配和改进的融合规则进行融合计算, 与传统 DS 方法进行了一组数据融合比较, 取得了优于传统方法的结果。文献[9]引入 pignistic 变换, 定义新的证据冲突衡量标准, 引用信息熵确定权重系数, 并提出新的证据组合规则, 实验证明方法在处理冲突证据的有效性。文献[10]通过计算证据体的 1-范数距离评估证据体的相似程度, 根据相似程度进行证据体的权重分配, 再结合改正的组合规则在四种常见悖论中, 三种取得了优于其他经典改进方法的结果。很多研究人员在改进 DS 理论时也把目标放在了组合规则的修正上<sup>[11]-[14]</sup>, 针对融合规则的修正在解决冲突问题上固然有一定的效果, 但在实际的应用中, 更多需要关注的是如何评价证据体的权重, 尤其是冲突问题出现时, 如何进行权重的计算和分配才是解决冲突问题的关键。

针对以上问题, 本文首先具体分析传统证据理论无法解决的四种悖论问题。利用皮尔逊相关系数计算证据体之间的相关关系, 并由此定义证据体整体重要程度的权重系数。然后, 基于得到的证据权重系数对原始证据的基本概率分布函数 (Basic Probability Assignment) 进行修正, 最后对修正后的 BPA 进行零因子修正并按照 DS 证据理论组合规则进行所有证据体融合计算。多组仿真算例实验对比表明, 改进的算法在处理证据冲突的问题上收敛速度快且具有明显的有效性。

## 2. 经典 DS 证据理论及其存在的缺陷

### 2.1 DS 证据理论

关于 DS 证据理论的基本概念下面做简单介绍:

#### 1) 识别框架

在证据理论中, 证据的推理建立在一个非空有限集合的样本空间上, 这个样本空间被称为识别框架 (Frame of Discriminate), 若  $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  为可能发生事件的所有集合,  $A_i$  即为识别框架  $\Theta$  的一个子集。 $\Theta$  中的子集两两互相排斥, 包含识别框架的全部识别对象, 常用  $2^\Theta$  表示。

#### 2) 基本概率分布

对于  $2^\Theta$  中的任何命题  $A$ , 定义映射  $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  为基本概率分布 (Basic Probability Assignment, BPA), 即为 BPA 函数,  $m$  满足以下条件:

$$\begin{cases} 0 \leq m(A) \leq 1 \\ m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

$\emptyset$  表示空集, 即不可能发生的命题,  $m(A)$  反映了证据对于命题  $A$  的支持程度。

#### 3) 组合规则

作为证据理论的核心内容, DS 证据理论融合的基本策略就是将多个证据体的概率函数进行正交运算, 一般用  $\oplus$  表示组合运算, 如下:

$$m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_i \quad (2)$$

对于两个证据体  $A_i, B_j$  的 Dempster 组合规则定义如下:

$$m(A) = m_1(A_i) \oplus m_2(B_j) = \begin{cases} \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) * m_2(B_j)}{1 - k}, & \forall A \subset \Theta, A \neq \emptyset \\ 0, & A = \emptyset \end{cases} \quad (3)$$

$$k = \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) * m_2(B_j)$$

(4)

同理，Dempster 组合规则在多证据体的情况下进行如下计算：

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

(5)

$$k = \sum_{\cap A_i = \emptyset} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)$$

(6)

公式(6)中  $k$  反应证据体  $X_i, Y_i$  之间冲突程度的大小，称为冲突系数，冲突系数值越大，证据体之间的冲突越大，范围在[0,1]之间。 $1/(1-k)$ 称为归一化因子。另外，Dempster 组合规则满足数学中的结合律和交换律，即多证据组合运算的结果与计算顺序无关。

2.2 经典 DS 理论存在的缺陷

上一节中，DS 证据理论中有一个反应证据体之间冲突大小的系数  $k$ ，对于冲突值较小的证据体，DS 组合规则可以达到较好的融合结果，但是对于冲突较大或者完全对立的命题，传统 DS 证据理论就无法正确得到融合结果。

例如对于识别框架  $\Theta=\{A, B\}$ ，有两条证据：

证据体 1:  $m_1(A)=0, m_2(B)=1$ ；

证据体 2:  $m_1(A)=1, m_2(B)=0$ 。

计算则得到  $k=1$ ，两个证据体完全冲突，组合公式(3)则得到分母为 0，公式失效，无法实现组合计算的目的。另外，对于高冲突的证据体，DS 理论的融合结果也常常违背常理，目前，四种常见研究的冲突证据的基本概率分布如表 1 所示。

表1 四种常见冲突证据的基本概率分布<sup>[11]</sup>  
Table 1 Basic probability assignment of four common conflict evidences<sup>[11]</sup>

| 冲突类型   | 证据体   | 命题   |      |      |      |      |
|--------|-------|------|------|------|------|------|
|        |       | A    | B    | C    | D    | E    |
| 完全冲突   | $m_1$ | 1    | 0    | 0    | \    | \    |
|        | $m_2$ | 0    | 1    | 0    | \    | \    |
|        | $m_3$ | 0.8  | 0.1  | 0.1  | \    | \    |
|        | $m_4$ | 0.8  | 0.1  | 0.1  | \    | \    |
| 0 置信冲突 | $m_1$ | 0.5  | 0.2  | 0.3  | \    | \    |
|        | $m_2$ | 0.5  | 0.2  | 0.3  | \    | \    |
|        | $m_3$ | 0    | 0.9  | 0.1  | \    | \    |
|        | $m_4$ | 0.5  | 0.2  | 0.3  | \    | \    |
| 1 置信冲突 | $m_1$ | 0.9  | 0.1  | 0    | \    | \    |
|        | $m_2$ | 0    | 0.1  | 0.9  | \    | \    |
|        | $m_3$ | 0.1  | 0.15 | 0.75 | \    | \    |
|        | $m_4$ | 0.1  | 0.15 | 0.75 | \    | \    |
| 高冲突    | $m_1$ | 0.7  | 0.1  | 0.1  | 0    | 0.1  |
|        | $m_2$ | 0    | 0.5  | 0.2  | 0.1  | 0.2  |
|        | $m_3$ | 0.6  | 0.1  | 0.15 | 0    | 0.15 |
|        | $m_4$ | 0.55 | 0.1  | 0.1  | 0.15 | 0.1  |
|        | $m_5$ | 0.6  | 0.1  | 0.2  | 0    | 0.1  |

以上四种证据冲突情况下 DS 证据理论融合结果如表 2 所示。

表2 DS证据理论冲突证据融合结果  
Table 2 DS evidence theory fusion results of conflict evidences

|        | $k$    | 融合后命题 BPA |        |        |     |        | DS  | 常理  |
|--------|--------|-----------|--------|--------|-----|--------|-----|-----|
|        |        | $A$       | $B$    | $C$    | $D$ | $E$    |     |     |
| 完全冲突   | 1      | \         | \      | \      | \   | \      | 无效  | $A$ |
| 0 置信冲突 | 0.99   | 0         | 0.727  | 0.273  | \   | \      | $B$ | $A$ |
| 1 置信冲突 | 0.9998 | 0         | 1      | 0      | \   | \      | $B$ | $C$ |
| 高冲突    | 0.9999 | 0         | 0.3571 | 0.4286 | 0   | 0.2143 | $C$ | $A$ |

完全冲突：上述实例已经说明  $k=1$  时，DS 组合公式分母为 0，融合方法因失效而无法完成融合。

0 置信冲突：冲突系数  $k$  计算可以得到为 0.99，虽然  $m_1$ 、 $m_2$  和  $m_4$  都支持  $A$  命题，但由于  $m_3=0$  完全否定了  $A$  命题，所以在这种情况下，DS 组合规则下计算得到的  $A$  命题的基本概率将始终是 0，也将导致融合失败。

1 置信冲突：冲突系数  $k$  经计算可以得到为 0.9998，对于  $A$ 、 $B$  和  $C$  的 DS 融合基本概率分布如表 2 所示，常理认为原始 BPA 中融合后应指向命题  $C$ ，而由于所有证据在  $B$  命题存在概率置信，而其他命题存在 0 概率的情况，所以导致 DS 组合规则完全置信于  $B$  并否定其他命题。

高冲突冲突：计算得到  $k=0.9999$ ，由于多证据体之间的高冲突问题，导致虽然存在多证据体支持命题  $A$  的情况下，经典 DS 组合计算规则仍没有置信与常理相同的命题。

由于某些命题 BPA 的特殊性，冲突命题的存在，导致经典 DS 融合的失败，很多学者在改进 DS 组合规则上提出自己的组合规则改进方法，取得了一定的效果。但是，很多忽略了原始命题中的基本概率分布存在的意义，所以，本文从原始证据体的 BPA 进行分析和改进，再利用 DS 组合规则进行融合，保证了改进后 DS 证据理论的完整性。

### 3.基于皮尔逊相关系数的改进 DS 证据理论

本文提出一种基于皮尔逊相关性系数改进 DS 证据理论的方法。考虑到实际完备的识别框架中，各证据体存在着相关关系，所以，不同证据体对于命题的评估差异必然引起证据体在识别框架中的权重比例。因此，通过皮尔逊相关性系数计算和分配各个证据体的整体权重比例是本文方法的研究重点。

具体方法流程如图 1 所示。



图1 改进 DS 证据理论算法流程图  
Fig.1 Improved DS evidence theory algorithm flow chart

①根据皮尔逊相关性系数计算证据体之间的相关性，如证据体  $m_1$  与证据体  $m_2$  的相关性系数  $s_{12}$ ，计算如下所示，

$$s_{12} = \frac{cov(m_1, m_2)}{\sigma_{m_1} \sigma_{m_2}} = \frac{E((m_1 - \mu_{m_1})(m_2 - \mu_{m_2}))}{\sigma_{m_1} \sigma_{m_2}} \quad (7)$$

其中,  $cov$  表示协方差,  $E$  表示数学期望, 计算方式如下,

$$\mu_{m_i} = E(m_i) \quad (8)$$

$$\sigma_{m_i}^2 = E(m_i^2) - E^2(m_i) \quad (9)$$

多证据体的情况下, 相互计算两两证据体之间的相关性系数, 并构成证据体相关性矩阵  $s_{ij}$ 。

$$s_{ij} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

②由于皮尔逊相关性系数的范围在 $[-1,1]$ 之间, 负值表示负相关, 负值越小是说明负相关程度越高, 为了控制非正相关的证据体在识别框架中的权值比重和可信度计算, 以及考虑克服组合规则中的 0 置信问题和尽量减少对于整体识别框架的基本概率影响, 这里将相关性结果小于等于 0 的赋值为 0.001。定义证据体  $m_i$  的可信度为  $cred(m_i)$ ,  $cred(m_i) \in [0,1]$  且  $\sum_{i=1}^n cred(m_i) = 1$ 。

$$cred(m_i) = \frac{\sum_{j=1, i \neq j}^n s_{ij}(m_i, m_j)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n s_{ij}(m_i, m_j)} \quad (11)$$

③使用得到的证据体可信度对原始 BPA 进行修正, 定义修正后的 BPA 为  $m_i^*(X)$ 。

$$m_i^*(X) = m_i(X) * cred(m_i) \quad (12)$$

④得到新的 BPA 矩阵, 同样为了避免传统组合规则计算中的 0 置信问题, 这里再一次对基本概率分布中为 0 的值进行修正, 修正方法为从每个证据体的命题最高值取 0.001 替换命题为 0 的项, 若存在最高概率值相同的多项命题, 则平均取值, 若存在多个 0 命题项, 则同样从最高命题中取 0.001。得到  $m_i^\#(X)$ , 以上取值规则满足且保证每个证据体  $\sum_{X=A,B,\dots} m_i(X) = 1$  不变。

⑤按照公式 (5) (6) 的 DS 组合规则对修正后的  $m_i^\#(X)$  进行计算, 得到最后的命题支持度值。

## 4. 实验仿真分析

本节中, 将从传统 DS 理论的四个常见证据冲突问题的解决、证据体数量对于结果的影响和使用皮尔逊相关性系数进行权重计算的改进三个方面对本文提出的改进方法进行分析比较, 阐明本文方法的多方面特性。

### 4.1 四种常见证据冲突分析

四种常见证据冲突的类型在 2.2 已经详细介绍, 本节实验使用表 1 的数值, 数据来自文献[11], 对比对象为较为经典的改进 DS 证据理论的四种方法, 分别为文献[12]、文献[13]、文献[14]和文献[15]。组合计算对比结果如表 3 所示。



表3 四种常见冲突类型融合结果  
Table 3 Fusion results of four common conflict types

| 冲突类型   | 方法     | 命题       |          |          |          |          |          |
|--------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|        |        | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>D</i> | <i>E</i> | $\Theta$ |
| 完全冲突   | 文献[12] | 0        | 0        | 0        | \        | \        | 1        |
|        | 文献[13] | 0.0917   | 0.0423   | 0.0071   | \        | \        | 0.8589   |
|        | 文献[14] | 0.8204   | 0.1748   | 0.0048   | \        | \        | 0        |
|        | 文献[15] | 0.8166   | 0.1164   | 0.0670   | \        | \        | 0        |
|        | 本文方法   | 0.99994  | 0.00001  | 0.00005  | \        | \        | 0        |
| 0 置信冲突 | 文献[12] | 0        | 0.7273   | 0.2727   | \        | \        | 0        |
|        | 文献[13] | 0.0525   | 0.0597   | 0.0377   | \        | \        | 0.8501   |
|        | 文献[14] | 0.4091   | 0.4091   | 0.1818   | \        | \        | 0        |
|        | 文献[15] | 0.4318   | 0.2955   | 0.2727   | \        | \        | 0        |
|        | 本文方法   | 0.97815  | 0.01589  | 0.00596  | \        | \        | 0        |
| 1 置信冲突 | 文献[12] | 0        | 1        | 0        | \        | \        | 0        |
|        | 文献[13] | 0.0388   | 0.0179   | 0.0846   | \        | \        | 0.8587   |
|        | 文献[14] | 0.1676   | 0.0346   | 0.7978   | \        | \        | 0        |
|        | 文献[15] | 0.1388   | 0.1318   | 0.7294   | \        | \        | 0        |
|        | 本文方法   | 0.00001  | 0.00011  | 0.99988  | \        | \        | 0        |
| 高冲突    | 文献[12] | 0        | 0.3571   | 0.4286   | 0        | 0.2143   | 0        |
|        | 文献[13] | 0.0443   | 0.0163   | 0.0163   | 0.0045   | 0.0118   | 0.9094   |
|        | 文献[14] | 0.7637   | 0.1031   | 0.0716   | 0.0080   | 0.0538   | 0        |
|        | 文献[15] | 0.5324   | 0.1521   | 0.1462   | 0.0451   | 0.1241   | 0        |
|        | 本文方法   | 0.99884  | 0.00053  | 0.00032  | 0        | 0.00031  | 0        |

在 2.2 节表 2 中按照常理四种证据冲突的命题应为 *AACA*，本文方法的融合结果按照最大基本概率分布指认对应命题，结果与常理一致，对于四种冲突皆有效。文献[12]和文献[13]通过将冲突转移到识别框架  $\Theta$  的方式避免证据的冲突，但同时也增加了是识别框架  $\Theta$  的不确定性，且这两种方法在四种冲突类型的融合问题解决上并未得到合理的结果。对比文献[14]、文献[15]和本文方法可以看到，文献[14]在 0 置信冲突中对于命题 *A* 和命题 *B* 的结果一样，无法判断。其他冲突类型，这三种方法在识别效果上都得到了合理的结果。融合后 *BPA* 值越大的命题，融合结果对于该命题的指认程度越高，也就是置信度最高。对比表 3 方法得到的 *BPA* 可以看出，本文在所有方法中对于合理命题的指认 *BPA* 皆是最高的，证明本方法在解决四种冲突上的表现优于其他方法。

#### 4.2 多证据融合比较

证据体的数量是影响融合理论的重要因素之一，对于不同数量证据体的合理有效融合计算是评价方法好坏的一个重要角度。本节选择文献[15]的数据与传统 *DS*、文献[12]、文献[13]、文献[14]和文献[15]进行对比分析。数据如下： $m_1 = [0.5, 0.2, 0.3]$ ， $m_2 = [0, 0.9, 0.1]$ ， $m_3 = [0.55, 0.1, 0.35]$ ， $m_4 = [0.55, 0.1, 0.35]$ ， $m_5 = [0.55, 0.1, 0.35]$ 。以上 4 个证据体，将组成 4 组进行实验，分别为  $m_1, m_2$ ， $m_1, m_2, m_3$ ， $m_1, m_2, m_3, m_4$  和  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$ ，下面称为第一至第四组。由于  $m_2$  对于 *B* 命题的大概率指认，所以仅  $m_1, m_2$  组合，常理也应是信任 *B* 命题，但在增加证据的过程中发现证据体 2 犯错的可能性极大，所以按照常理四组证据体融合对应的命题应该为 *BAAA*，下面对所列文献进行对比分析。

表4 不同数量证据体的融合结果  
Table 4 Fusion results of different quantitative evidences

| 方法     | $m_1, m_2$    | $m_1, m_2, m_3$ | $m_1, m_2, m_3, m_4$ | $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$ |
|--------|---------------|-----------------|----------------------|---------------------------|
| 传统 DS  | $m(A)=0$      | $m(A)=0$        | $m(A)=0$             | $m(A)=0$                  |
|        | $m(B)=0.8571$ | $m(B)=0.6316$   | $m(B)=0.3288$        | $m(B)=0.1228$             |
|        | $m(C)=0.1429$ | $m(C)=0.3684$   | $m(C)=0.6712$        | $m(C)=0.8772$             |
| 文献[12] | $m(A)=0$      | $m(A)=0$        | $m(A)=0$             | $m(A)=0$                  |
|        | $m(B)=0.18$   | $m(B)=0.018$    | $m(B)=0.0018$        | $m(B)=0.00018$            |
|        | $m(C)=0.03$   | $m(C)=0.0105$   | $m(C)=1.00368$       | $m(C)=0.00129$            |
| 文献[13] | $m(A)=0.090$  | $m(A)=0.160$    | $m(A)=0.194$         | $m(A)=0.211$              |
|        | $m(B)=0.377$  | $m(B)=0.201$    | $m(B)=0.160$         | $m(B)=0.138$              |
|        | $m(C)=0.102$  | $m(C)=0.125$    | $m(C)=0.137$         | $m(C)=0.144$              |
| 文献[14] | $m(A)=0.1543$ | $m(A)=0.3500$   | $m(A)=0.6027$        | $m(A)=0.7958$             |
|        | $m(B)=0.7469$ | $m(B)=0.5224$   | $m(B)=0.2627$        | $m(B)=0.0932$             |
|        | $m(C)=0.0988$ | $m(C)=0.1276$   | $m(C)=0.1346$        | $m(C)=0.1110$             |
| 文献[15] | $m(A)=0.1543$ | $m(A)=0.5816$   | $m(A)=0.8060$        | $m(A)=0.8909$             |
|        | $m(B)=0.7469$ | $m(B)=0.2439$   | $m(B)=0.0482$        | $m(B)=0.0086$             |
|        | $m(C)=0.0988$ | $m(C)=0.1745$   | $m(C)=0.1458$        | $m(C)=0.1005$             |
| 本文方法   | $m(A)=0.0047$ | $m(A)=0.6368$   | $m(A)=0.9887$        | $m(A)=0.9978$             |
|        | $m(B)=0.8531$ | $m(B)=0.2294$   | $m(B)=0.0037$        | $m(B)=0.0003$             |
|        | $m(C)=0.1422$ | $m(C)=0.1338$   | $m(C)=0.0076$        | $m(C)=0.0019$             |

由于证据体 2 对于 A 的指正 BPA 为 0，所以由于传统 DS 的“一票否决”（0 置信）问题，导致无论增加多少证据体，融合结果对于命题 A 的基本概率一直为 0，导致融合失败。文献[12]和文献[13]将冲突转移至识别框架  $\Theta$  的方式在多证据融合的结果上仍然没有发挥作用，无论证据体的多少，这两种方法都将绝大部分基本概率分配给识别框架，并未识别到合理的命题。文献[14]在第一组的组合计算结果较为合理，但在第二组增加  $m_3$  的情况下，仍然没能是识别出证据体 2 的错误， $m_2$  对 B 命题的大概率指认继续作用，导致文献[14]方法的不合理融合，直到继续增加对于命题 A 大概率指认的  $m_4$  和  $m_5$  出现，文献[14]的方法才开始纠正融合基本概率对于命题 A 的指认。文献[15]与本文方法都得到了与常理一致的结果，但是本文方法在对于合理命题的融合基本概率上都优于文献[15]，为了比较本文方法在合理命题基本概率的融合结果，如图 2 所示。

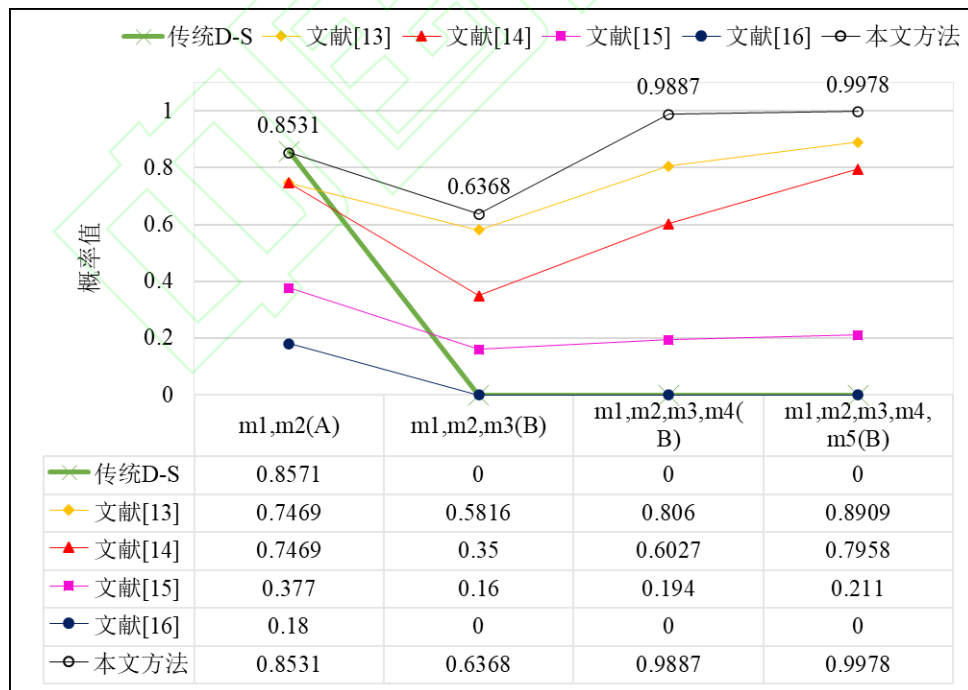


图2 不同数量证据体下合理命题的融合 BPA 比较  
Fig.2 Comparison of BPA of reasonable propositions under different quantitative evidences

显然，如图 2 所示，在四组数据的结果与其他方法相比，对于合理命题的基本概率的融合结果都



达到了较高的值，为所比较文献中结果最佳。

#### 4.3 皮尔逊相关性系数改进 DS 比较

调研发现，文献[16]也曾将皮尔逊相关性系数应用到 DS 理论中对于证据体权重的改正，与本文不同的是，文献[16]未使用原始 DS 组合计算方法，继承文献[17]的合成公式进行融合计算，把证据冲突按各个命题的平均支持程度加权进行分配。本文则应用皮尔逊相关性计算证据体之间的相关程度，进行不同证据体的在整体识别框架中的重要程度进行权重分配，另外，采用完整的原始 DS 组合规则进行融合计算，保证改进 DS 后，方法上的完整性。下面，将对文献[16]的实验数据进行本文方法的实验对比分析。

表 5 为正常证据体情况下的数据分布，各个证据体都对于命题 A 有着最高的支持度，且不存在“一票否决”现象，表 6 是冲突证据一的数据分布，冲突证据体为  $m_2$  对于命题 A 的完全否定，表 7 是冲突证据二的数据分布，冲突证据也是  $m_2$  对于 A 命题的完全否定。

表5 数据正常情况下证据模型的焦元分布

Table 5 Focal element distribution of evidence model under normal data

| 证据体   | A    | B    | C    |
|-------|------|------|------|
| $m_1$ | 0.90 | 0.00 | 0.10 |
| $m_2$ | 0.88 | 0.01 | 0.11 |
| $m_3$ | 0.50 | 0.20 | 0.30 |
| $m_4$ | 0.98 | 0.01 | 0.01 |
| $m_5$ | 0.90 | 0.05 | 0.05 |

表6 冲突证据数据一

Table 6 Conflict evidences data 1

| 证据体   | A    | B    | C    |
|-------|------|------|------|
| $m_1$ | 0.98 | 0.01 | 0.01 |
| $m_2$ | 0.00 | 0.01 | 0.99 |
| $m_3$ | 0.50 | 0.20 | 0.30 |
| $m_4$ | 0.98 | 0.01 | 0.01 |
| $m_5$ | 0.90 | 0.05 | 0.05 |

表7 冲突证据数据二

Table 7 Conflict evidences data 2

| 证据体   | A    | B    | C    |
|-------|------|------|------|
| $m_1$ | 0.98 | 0.01 | 0.01 |
| $m_2$ | 0.00 | 0.01 | 0.99 |
| $m_3$ | 0.90 | 0.00 | 0.10 |
| $m_4$ | 0.90 | 0.01 | 0.01 |

对于以上三组数据，文献[16]与本文的融合计算结果如表 8、表 9 和表 10 所示。

表8 数据正常情况下证据合成结果

Table 8 Data fusion results under normal conditions

| 方法     | $m_1, m_2$       | $m_1, m_2, m_3$           | $m_1, m_2, m_3, m_4$     | $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$ |
|--------|------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 文献[16] | $m(A)=0.96733$   | $m(A)=0.8523845$          | $m(A)=0.8853891$         | $m(A)=0.889182$           |
|        | $m(B)=0.000985$  | $m(B)=0.04143542$         | $m(B)=0.03264323$        | $m(B)=0.03395038$         |
|        | $m(C)=0.031685$  | $m(C)=0.1043324$          | $m(C)=0.0777387$         | $m(C)=0.07212327$         |
|        | $m(\emptyset)=0$ | $m(\emptyset)=0.00184768$ | $m(\emptyset)=0.0042289$ | $m(\emptyset)=0.0017443$  |
| 本文方法   | $m(A)=0.98628$   | $m(A)=0.99172$            | $m(A)=0.99991$           | $m(A)=0.999995$           |
|        | $m(B)=0.00002$   | $m(B)=0.00002$            | $m(B)=0$                 | $m(B)=0$                  |
|        | $m(C)=0.01370$   | $m(C)=0.00826$            | $m(C)=0.00008$           | $m(C)=0.000005$           |
|        |                  |                           |                          |                           |

表9 冲突证据数据一合成结果  
Table 9 Fusion results of conflict evidences data 1

| 方法     | $m_1, m_2$      | $m_1, m_2, m_3$     | $m_1, m_2, m_3, m_4$   | $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$ |
|--------|-----------------|---------------------|------------------------|---------------------------|
| 文献[16] | $m(A)=0.40545$  | $m(A)=0.5978023$    | $m(A)=0.758134$        | $m(A)=0.8019236$          |
|        | $m(B)=0.004505$ | $m(B)=0.0571966$    | $m(B)=0.02902133$      | $m(B)=0.02697639$         |
|        | $m(C)=0.590045$ | $m(C)=0.1756906$    | $m(C)=0.05264324$      | $m(C)=0.03020729$         |
|        | $m(\Theta)=0$   | $m(\Theta)=0.16931$ | $m(\Theta)=0.16020142$ | $m(\Theta)=0.1408926$     |
| 本文方法   | $m(A)=0.01785$  | $m(A)=0.95279$      | $m(A)=0.99986$         | $m(A)=0.999996$           |
|        | $m(B)=0.00019$  | $m(B)=0.00001$      | $m(B)=0$               | $m(B)=0$                  |
|        | $m(C)=0.98195$  | $m(C)=0.04720$      | $m(C)=0.00014$         | $m(C)=0.000004$           |
|        |                 |                     |                        |                           |

表10 冲突证据数据二合成结果  
Table 10 Fusion results of conflict evidences data 2

| 方法     | $m_1, m_2$     | $m_1, m_2, m_3$       | $m_1, m_2, m_3, m_4$   |
|--------|----------------|-----------------------|------------------------|
| 文献[16] | $m(A)=0.4851$  | $m(A)=0.9337065$      | $m(A)=0.9683049$       |
|        | $m(B)=0.01$    | $m(B)=0.0005023976$   | $m(B)=0.000206358$     |
|        | $m(C)=0.5049$  | $m(C)=0.0145743$      | $m(C)=0.002402914$     |
|        | $m(\Theta)=0$  | $m(\Theta)=0.0512168$ | $m(\Theta)=0.02908585$ |
| 本文方法   | $m(A)=0.16388$ | $m(A)=0.99895$        | $m(A)=0.99997$         |
|        | $m(B)=0.00836$ | $m(B)=0$              | $m(B)=0$               |
|        | $m(C)=0.82776$ | $m(C)=0.00105$        | $m(C)=0.00003$         |
|        |                |                       |                        |

从表 8 中可以看出,对于正常数据,文献[16]在两个证据体的情况下对于命题 A 的融合基本概率最高,随着证据体的增加,融合结果对于命题 A 的概率虽然仍是所有命题中最高,但在增加的证据体也是对 A 进行指认的情况下,融合概率并未增加,明显新增证据体并未发挥其作用,存在一定的不合理性。本文方法的结果不仅合理指认命题 A,在命题 A 的融合基本概率上也高于文献[16],另外在增加证据体的过程中,对于命题 A 的支持度也不断增加,更具合理性。

表 9 和表 10 的两组冲突数据融合结果可以看出,文献[16]将一部分冲突转移至识别框架  $\Theta$ ,增加计算不确定性的同时也减少了融合方法对于合理命题指认。与本文方法的计算结果相比,两组冲突证据数据情况下,基本概率的融合计算,本文都高于文献[16],且随着证据体数量的增加,本文合理命题的基本概率计算上收敛速度更快,精度更高。

5.结论

本文从证据体权重和 BPA 中零因子的修正角度对 DS 理论存在的证据冲突问题进行改进,得到一种新的改进 DS 融合方法。实验对比主要结论如下:

- 1)对非相干证据体占据整体权重的限制,能够提高融合方法对于合理命题的信任程度。
- 2)融合过程零因子的修正,可以在改善证据冲突的问题。
- 3)结合皮尔逊的相关性限制,维持传统 DS 的组合规则进行计算,与改进融合规则的其他方法相比,在不同多个证据体数量上融合都表现更高的合理命题信任度。
- 4)与引入皮尔逊改进的方法相比,本文方法在增加证据体的情况下收敛性更好,收敛速度更快。

参考文献 (References)

[1] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping[J]. Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38.

[2] SIKAI L, JUN Y. A satellite-borne SAR target recognition method based on supplementary feature fusion[C]. 2018 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA). IEEE, 2018: 326-330.

[3] JIA R S, LIU C, SUN H M, et al. A situation assessment method for rock burst based on multi-agent information fusion[J]. Computers & Electrical Engineering, 2015, 45: 22-32.

[4] XU X B, ZHENG J, XU D L, et al. Information fusion method for fault diagnosis based on evidential reasoning rule[J]. J. Control Theory Appl., 2015, 32: 1170-1182.

[5] 丁怡洁, 王社良, 赵歆冬. 基于改进证据理论的结构损伤识别研究[J]. 振动与冲击, 2018.

DING Y J, WANG S L, ZHAO X D. Structural damage detection based on improved evidence theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018 (in Chinese).

[6] 席在芳, 令狐强, 易畅, 等. 基于改进冲突系数的证据理论组合新方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, v. 49; No. 287 (07): 134-143.

XI Z F, LINGHU Q, YI C, et al. A novel combination of evidence theory based on improved conflict coefficient[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, v.49; No.287(07):134-143(in Chinese).

[7] ZADEH L A. Review of a mathematical theory of evidence[J]. AI magazine, 1984, 5(3): 81-81.

[8] SUN R, HUANG H Z, MIAO Q. Improved information fusion approach based on DS evidence theory[J]. Journal of mechanical science and technology, 2008, 22(12): 2417-2425.

- [9] 胡昌华, 司小胜, 周志杰, 等. 新的证据冲突衡量标准下的 D-S 改进算法[J]. 电子学报, 2009, 37(7).  
HU C H, SI X S, ZHOU Z J, et al. An improved D-S algorithm under the new measure criteria of evidence conflict[J]. Acta Electronica Sin. 2009, 37(7) (in Chinese).
- [10] SHAOBO L, GUOKAI L, XIANGHONG T, et al. An Ensemble Deep Convolutional Neural Network Model with Improved D-S Evidence Fusion for Bearing Fault Diagnosis[J]. Sensors, 2017, 17(8):1729-.
- [11] LI Y, CHEN J, YE F. The improvement of D-S evidence theory and its application in IR/MMW target recognition[J]. Journal of Sensors, 2016, 2016.
- [12] YAGER RONALD R. On the Dempster-Shafer framework and new combination rules [J]. Information Sciences, 1987, 41(2):93-137.
- [13] 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, GU, W K. A New Combination Rules of Evidence Theory[J]. Acta Electron. Sin. 2000, 28, 117-119(in Chinese).
- [14] Murphy Catherine K. Combining belief functions when evidence conflicts[J]. Decision Support Systems, 2000, 29(1):1-9.
- [15] 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]. Journal Infrared Millimeter and Waves, 2004, 23, 27-32(in Chinese).
- [16] 魏永超. 基于皮尔逊系数的冲突证据合成新方法[J]. 电讯技术, 2012, 52(4).  
WEI Y C. A Novel D-S Combination Method of Conflicting Evidences Based on Pearson Correlation Coefficient[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(4) (in Chinese).
- [17] 李弼程, 王波, 魏俊, 等. 一种有效的证据理论合成公式[J]. 数据采集与处理, 2002, 17(1): 33-36.  
LI B C, WANG B, WEI J, et al. An Efficient Combination Rule of Evidence Theory[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2002, 17(1):33-36(in Chinese).