Multisensor Explosion Discrimination Method Based on D-S Evidence Theory*

LU Qiaofeng, YE Weitao, YANG Suijun, WANG Zhiyu, WANG Xiaona, YE Shuliang*
(Institute of Industry and Trade Measurement Technology, China Jiliang University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: The key to measuring the delay period and calculating the parameters of explosion point is to accurately distinguish the state of explosion. Due to the poor discriminant effect of single sensor and conflicting discriminant results among multiple sensors, D-S (Dempster-Shafer) evidence theory is used to jointly discriminate conflicting evidences. Firstly, according to the explosion characteristics of energetic materials and the test principle of explosion point, a temperature and sound-based joint discrimination device is designed. Based on the experimental data, the temperature eigenvalue is extracted by using the model fitting method, with the maximum value of sound signal as sound eigenvalue. Secondly, basic probability assignment (BPA) function is solved by Sigmoid model, and the value of the BPA function with potential conflicts is preprocessed by reliability entropy. Finally, D-S evidence theory is used to make joint judgements of explosion state. The experimental results show that the robustness of the experimental device and the confidence probability of state discrimination are effectively improved, with explosion discrimination accuracy of 96.5%, which is better than the discriminatory effect of single sensor, such as temperature and sound sensor.

Key words: data fusion; deflagration identification; D-S evidence theory; conflict evidence fusion
EEACC: 7320T **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.01.015

基于 D-S 证据理论的多传感器燃爆判别方法*

卢峭峰, 叶魏涛, 杨遂军, 王志宇, 王晓娜, 叶树亮*
(中国计量大学工业与商贸计量技术研究所, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 准确判别燃爆状态是测量燃爆延滞期并计算爆发点参数的关键。针对单一传感器判别效果不佳、多个传感器判别结果相互冲突的问题, 利用 D-S(Dempster-Shafer)证据理论对冲突证据进行联合判别。首先根据含能材料燃爆特性和爆发点测试原理, 设计了基于温度和声音的联合判别装置; 从实验数据出发, 采用模型拟合提取温度特征值, 以及声音信号最大值为声音特征值。其次, 根据 Sigmoid 模型求解出 BPA(Basic Probability Assignment)函数, 并通过信度熵对可能存在冲突的 BPA 函数值进行预处理; 最终, 利用 D-S 证据理论进行燃爆状态联合判别。实验结果表明, 所提方法有效提高了实验装置的鲁棒性和状态判别的置信概率, 燃爆判别准确率达到了 96.5%, 优于温度、声音等单一传感器的判别效果。

关键词: 数据融合; 燃爆状态判别; D-S 证据理论; 冲突证据融合
中图分类号: TP216.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)01-0122-06

含能材料广泛应用于国防工业、航天事业和民用爆破等领域, 准确评价含能材料热安定性是其安全生产、运输、使用和存储的基础。爆发点是含能材料在一定延滞期下发生燃爆的温度[1-2], 是热安定性评价的重要指标。燃爆状态判别是测定燃爆延滞期并计算爆发点参数的关键, 也是研制自动爆发点测试装置的重要技术基础。

含能材料燃爆反应机理复杂, 不同参比、种类的含能材料燃爆现象具有较大的差异, 且测试环境存在较大的干扰, 使得单一温度传感器、声音传感器、触点检测器[3]的燃爆判别准确率较低。现有基于声音传感器和触点检测的多传感器联合判别系统[4], 触点传感器和声音传感器共同依赖于样品燃爆时产生的剧烈气压波动, 具有很强的关联性; 并且当声音传感器与触点传感器存在判决冲突时, 会导致燃爆状态判别准确率低。所以单一传感器和现有的多传感器联合判别方法已不能满足准确、可靠的要求。如何预处理冲突证据, 并利用数据融合算法进行联合判别, 已成为主流和发展趋势[5-7], 也是该领域研究的焦点和重要课题。

D-S 证据理论是 Dempster[8] 于 1967 年首先提出, 后由他的学生 Shafer[9] 在 1976 年进一步发展起

项目来源: 浙江省基础公益研究计划项目(LQ23E070003)
收稿日期: 2023-05-08 修改日期: 2023-06-21

来。针对冲突证据的预处理问题,Murphy[10]提出的一种修改模型而不改变 D-S 合成规则的方法,Liu 等[11]定义了一种适用于 D-S 证据理论框架的信度熵计算方法,对证据理论进行了补充,形成了一套有效、可靠的不确定、冲突证据的联合判别理论[12]。

本文针对爆发点测试仪燃爆状态自动判别困难的问题,通过距离加权的模型拟合法,模拟出无样品放热的基础温度曲线,进行温度特征值提取;利用 D-S 证据理论对模糊证据不确定性推理的能力,通过预处理和 D-S 证据理论对冲突证据进行联合判别。该燃爆判别方法相比于传统单一传感器判别方法具有较明显的优势,是自动爆发点测试仪研制的关键技术。

1　D-S 证据理论基础

1.1　冲突 BPA 函数预处理

BPA 函数可将特征值转换为信赖程度,是进行 D-S 证据理论联合判别的前提。为了防止 BPA 函数冲突导致 D-S 证据理论合成规则失效,通过量化信度熵构建的权重因子[13-14],对 BPA 函数进行预处理。

识别框架是所有可能假设组成的穷举集合,并且所有假设互斥。令 m_i 是识别框架 $\boldsymbol{\theta}$ 中命题 A 的 BPA 函数,当命题为单子集命题时,即该命题只有一个元素时,BPA 函数的信度熵可表示为:

$$E_x(m_i)=-\sum_{A\subseteq\boldsymbol{\theta}} m(\boldsymbol{A})\log_2[m(\boldsymbol{A})] \tag{1}$$

式中:$i=1,2,\cdots,n$;$E_x(m_i)$ 为信度熵。

为避免冲突证据导致信度熵 $E_x(m_i)$ 为零的情况,对信度熵进行处理,确定信息含量 IV_i:

$$\mathrm{IV}_i=\mathrm{e}^{E_x(m_i)} \tag{2}$$

然后,对信息含量 IV_i 进行归一化,计算出权重因子 ω_i:

$$\omega_i=\frac{\mathrm{IV}_i}{\sum_{j=1}^{n}\mathrm{IV}_i} \tag{3}$$

最后,根据 ω_i 对 BPA 函数进行加权平均处理:

$$m'(A)=\sum_{i=1}^{n}\omega_i m_i(A) \tag{4}$$

式中:$m'(A)$ 为冲突 BPA 函数 $m_i(A)$ 预处理后的 BPA 函数值。

1.2　D-S 证据理论合成规则

D-S 证据理论合成规则是反应证据联合作用的一个法则[8]。在同一识别框架上基于不同证据的 BPA 函数,可通过该法则合成一个新的 BPA 函数,则该函数值被称为原来的正交和。假设 m_1 和 m_2 是一识别框架 $\boldsymbol{\theta}$ 上的两组 BPA 函数,则其正交和为 m_{12},记为:$m_{12}=m_1\oplus m_2$,计算方法如式(5)所示:

$$(m_j\oplus m_l)(\boldsymbol{C})=\frac{1}{1-K}\sum_{\boldsymbol{A}_j\cap\boldsymbol{B}_l=\boldsymbol{A}} m_1(\boldsymbol{A}_j)m_2(\boldsymbol{B}_l) \tag{5}$$

式中:

$$K=\sum_{\boldsymbol{A}_j\cap\boldsymbol{B}_l=\boldsymbol{\phi}} m_1(\boldsymbol{A}_j)m_2(\boldsymbol{B}_l) \tag{6}$$

式中:K 为冲突系数,$\boldsymbol{C}$ 表示命题$\{\boldsymbol{A}_j\}$和命题$\{\boldsymbol{B}_l\}$之间的交集,$j=1,2\cdots2^n$,$l=1,2\cdots2^n$。如果 $K=1$,表示这两个证据冲突;若 $K\neq1$,那么正交和是一个新的 BPA 函数。

2　燃爆检测判别方法

2.1　测试装置与判别原理

爆发点测试原理为在一定试验条件下,对定量含能材料进行加热,经过一定的延滞期后,发生燃烧或爆炸,根据燃爆状态判别获得的延滞期与温度的关系式,求出试样的爆发点,关系式如式(7)所示[1]。燃爆现象为:快速释放大量热量,使雷管壳周围的合金液升温;同时雷管壳中产生较大气压将雷管塞冲出,并发出声响。即在爆发点实验中的燃爆现象主要体现在温度和声音的变化。

$$\ln t=\frac{E}{RT}+\ln C \tag{7}$$

式中:t 为爆发点延滞期,单位为 s;C 为与试样成分有关的常数;E 为试样的表观活化能,单位为 J/mol;R 为摩尔气体常数,值为 8.314 J/(mol·K);T 为爆发温度,单位为 K。

结合爆发点实验原理和燃爆现象,设计了基于温度和声音的爆发点测试装置,如图 1 所示。热铜块位于加热炉中心,为测试提供恒定的温度环境;加热棒位于热铜块内部,为装置提供热源;两支热电偶插于热铜块内部,上方的用于检测样品燃爆现象,下

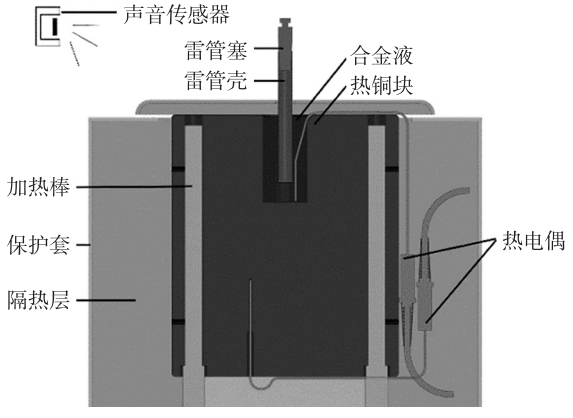


图 1　爆发点测试装置

方的用于测量热铜块实时温度;合金液位于热铜块顶部开槽处,填充在雷管壳和热铜块中间,当室温的雷管放入合金液时,可快速地进行热量传递,加热样品;热铜块外侧为隔热层和保护套,能够减少热量的散失。

爆发点测试装置采用响应时间低于 1 ms、灵敏度为-42 dBV/Pa 的 MEMS 模拟声音传感器[15];采用 Omega 公司响应时间约 0.25 s 的超细 K 型热电偶,紧靠于雷管壳外壁放置,可敏感地检测样品燃爆放热。当燃爆放热难以被温度传感器捕获或燃爆声音较小而造成漏判时,所述传感器能相互补充,提高燃爆现象检测概率。

结合爆发点测试装置,提出了多传感器联合判别方法,如图 2 所示。首先,利用声音传感器和温度传感器采集燃爆数据;然后,通过模型拟合提取温度数据的特征值,以及提取声音数据的最大值为声音特征值;其次,将特征值分别代入 BPA 函数,计算出 BPA 函数值。由于 BPA 函数值可能存在冲突的情况,故需通过加权平均的数据融合方法进行预处理。最后,根据 D-S 证据理论得出最终的判别结论,如若判别结果为燃爆,则记录下样品燃爆的时间,并计算出燃爆延滞期。

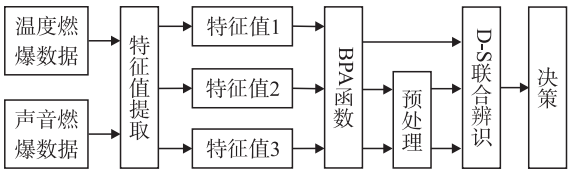


图 2 判别系统框图

2.2 测试现象与特征提取

在实验开始时,将装有样品的雷管壳放入合金液,雷管壳周围合金液的温度和声音变化情况为:当冷的雷管壳放入高温合金液中时,会迅速吸收周围合金液热的量,导致合金液温度骤降;然后由于热铜块的热传导,合金液温度逐步升高至初始值;同时,样品燃爆伴随着放热、发声等现象,如图 3 所示。

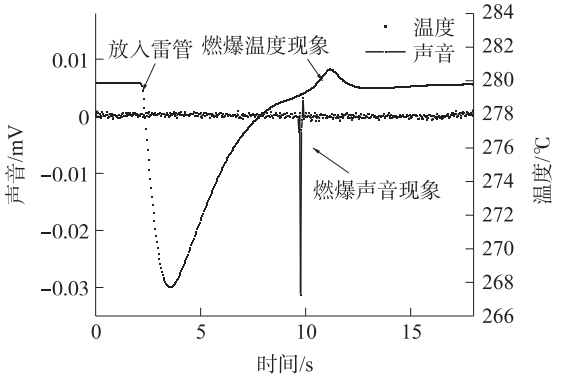


图 3 典型燃爆过程温度和声音曲线

特征值提取是 D-S 证据理论的关键步骤,它将原始数据转换为具有更明显区分性的特征值,能提高证据推理的准确性和可靠性,特征值如图 4 所示。为了适用快速燃爆的实验现象,以及减小样品放热对模型拟合的干扰,通过加权最小二乘拟合进行温度特征值的提取。首先,对合金液温度逐步恢复至预设值的实验温度曲线进行距离加权的模型拟合,得到消除样品燃爆放热影响的基础温度曲线;然后,将实验温度曲线与基础温度曲线作差,得到温度差数据,进而将最大温差以及温差在时间上的积累值分别作为特征值 1 和特征值 2;声音特征值为特征值 3,是样品实验过程中声音的最大值。

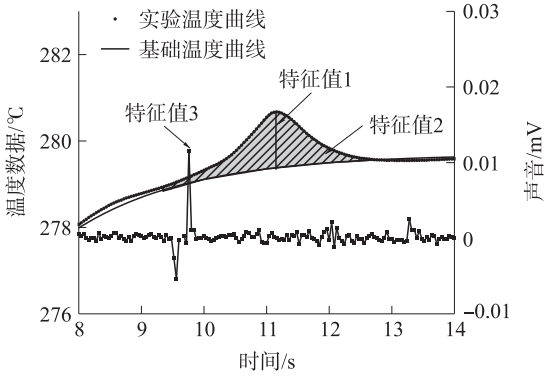


图 4 典型燃爆过程温度、声音特征值

2.2.1 基础温度曲线的获取

为了提高基础温度曲线的拟合精度,准确地获取温度特征值,对温度骤降后合金液的升温过程进行建模;为了减小样品燃爆放热对模型拟合的影响,根据数据与拟合曲线之间的距离计算出每个数据点的权重值,然后对升温过程进行加权模型拟合,具体实现方法为:

首先对升温过程进行建模,由牛顿冷却定理可得:

$$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}=-hA(T-T_{\mathrm{env}}) \tag{8}$$

式中:Q 表示雷管吸收的热量;t 表示雷管放入合金液的时间;h 表示雷管壳与合金液之间的导热系数;A 表示雷管壳与合金液的接触面积;T 表示雷管的实时温度;T_{env} 表示合金液的实时温度。

将吸热量与温升之间的关系,$Q=cm(T-T_{\mathrm{env}})$ 代入式,可得:

$$\frac{\mathrm{d}(T-T_{\mathrm{env}})}{(T-T_{\mathrm{env}})}=-\frac{hA}{cm}\mathrm{d}t \tag{9}$$

式中:c、m 为雷管的比热容和质量。

对等式(10)两侧取积分可得:

$$\int_{T_0-T_{\mathrm{env}}}^{T-T_{\mathrm{env}}}\frac{1}{T-T_{\mathrm{env}}}\mathrm{d}(T-T_{\mathrm{env}})=-\frac{mc}{hA}\int_0^t\mathrm{d}t \tag{10}$$

式中:T_0 为雷管的初始温度。

将式进行化简,可得合金液的升温过程模型:

$$\hat{T}=T_{\text{env}}+(T_0-T_{\text{env}})\,\mathrm{e}^{-\frac{mc}{hA}t} \tag{11}$$

然后,确定各个温度数据的权重值并进行最小二乘模型拟合。根据 Bisquare 公式,计算出各个温度数据点的权重值:

$$w_i=\begin{cases}\left[1-\left(\dfrac{r_i}{M}\right)^2\right]^2 & |u_i|<1\\ 0 & |u_i|\geqslant 1\end{cases} \tag{12}$$

式中:r_i 是数据与拟合曲线之间的残差值,M = 4.685,是一个调整常数[16]。

最后,结合式(12)的权重值,进行最小二乘拟合[17],得到基准温度曲线:

$$\min\left\{\sum_{i=1}^{n} w_i(T_i-\hat{T}_i)^2\right\} \tag{13}$$

式中:T_i 为实验数据值,$\hat{T}_i$ 为由式(11)计算出的基准温度曲线值。

本文随机选取了一组实验数据,对两种不同温度特征值的提取方式进行比较,如图 5 所示。图中实线为加权模型拟合获得的基础温度曲线,计算出的特征值 1 为 1.31 ℃,特征值 2 为 1.68 ℃·s;虚线为未加权模型拟合获得的基础温度曲线,计算出的特征值 1 为 1.10 ℃,特征值 2 为 1.10 ℃·s,特征值分别增加了 19.1%和 52.7%,更加贴近真实值。

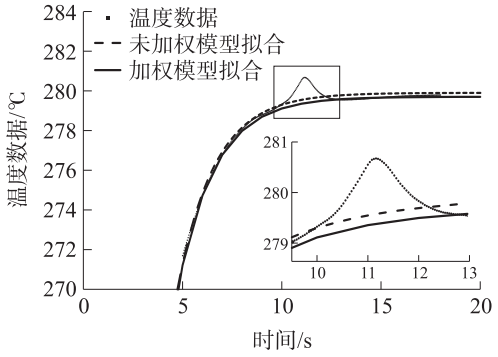


图 5　提取温度数据特征值

2.3　BPA 函数获取

将统计获得的干扰特征值,进行 Sigmoid 模型求解,从而定量构建 BPA 函数[18]。模型求解方法为,根据两个数据点对 Sigmoid 模型中两个常数系数进行求解。一个为初始数据点,即当特征值为 0 时,BPA 函数值趋向 0;另一个数据点为,最大干扰特征值对应的 BPA 函数值为 0.4。

本文通过改变燃爆激励源温度和样品质量改变燃爆速率、产热量、放气量,进行 200 次重复实验,确定最大干扰特征值,干扰特征值的统计结果如表 1 所示。

表 1　干扰特征值统计

特征值	干扰范围	次数
特征值 1	0~0.3 ℃	189
	0.3 ℃以上	11
特征值 2	0~1 ℃·s	187
	1 ℃·s 以上	13
特征值 3	0~5 μV	170
	5 μV 以上	30

由干扰特征值统计结果可知,模型拟合以及控温波动造成的最大干扰误差为 0.53 ℃和 1.3 ℃·s,环境噪声造成的最大干扰为 8 μV,以此可求解出各个特征值的 BPA 函数。

2.4　冲突 BPA 函数预处理及联合判别

BPA 函数的预处理能有效处理冲突证据导致 D-S 证据理论合成规则失效的问题,预处理效果如表 2 所示。

表 2　冲突 BPA 函数燃爆判别

识别框架	m_1	m_2	m_3	m_{23}	预处理后合成	无预处理合成
燃爆	0.8	1	0	0.5	0.8	无法判别
未燃爆	0.2	0	1	0.5	0.2	

表 2 中,m_2、m_3 为冲突 BPA 函数值,若无预处理,根据式(6)计算出的冲突系数 K 为 1,导致式(5)进行 D-S 证据理论合成时分母为零,使合成规则失效;若先进行预处理,即 m_2、m_3 通过式(2)至式(4)进行预处理得到新的 BPA 函数值 m_{23},然后通过 D-S 证据理论对 m_1 和 m_{23}进行合成,避免了冲突系数 K 为 1 的情况,使 D-S 证据理论合成规则成立。

3　燃爆状态判别测试

3.1　方法可行性验证

为了验证本文燃爆状态联合判别方法的通用性,选取了几种典型的燃爆实验数据进行分析,如表 3 所示。1 号为正常的燃爆数据,2 号为合金液温升较小的燃爆数据,3 号为声音较小的燃爆数据,4 号为存在噪声干扰的未燃爆数据。

表 3　典型燃爆实验数据

序号	特征值 1	特征值 2	特征值 3
1	0.81	1.99	12.88
2	0.60	1.16	12.88
3	0.81	1.99	0.80
4	0.31	0.63	12.88

在爆发点实验中,样品燃爆状况包括燃爆与未燃爆两种情况,即识别框架包括燃爆与未燃爆两种

互斥元素。将表 3 中的特征值代入 BPA 函数,计算出判别结果为燃爆的可能程度,用 1 减去燃爆的可能程度为未燃爆的可能程度,计算结果如表 4 所示。表中 m_{23}为特征值 2 和特征值 3 预处理后的 BPA 函数值,m_{123}为合成 BPA 函数值。

表 4 典型燃爆状态的联合判别

序号	识别框架	m_1	m_2	m_3	m_{23}	m_{123}	结论	判别结果
1	燃爆	0.86	0.86	0.90	0.88	0.98	燃爆	正确
	未燃爆	0.14	0.14	0.10	0.12	0.02		
2	燃爆	0.54	0.30	0.90	0.54	0.58	燃爆	正确
	未燃爆	0.46	0.70	0.10	0.46	0.42		
3	燃爆	0.86	0.86	0.02	0.54	0.86	燃爆	正确
	未燃爆	0.14	0.14	0.98	0.46	0.14		
4	燃爆	0.11	0.07	0.90	0.51	0.11	未燃爆	正确
	未燃爆	0.89	0.93	0.10	0.49	0.89		

对实验数据进行燃爆状态判别时,选择较大的合成 BPA 函数值所对应的识别框架元素为最终的判别结果。由表 4 中燃爆判别结果可知,本方法对四种典型的燃爆现象都能进行正确的燃爆判别。

3.2 判别效果测试验证

为了验证本文燃爆状态联合判别方法在爆发点实验中的判别效果。对成分为 16∶5∶4 的氯酸钾、二氧化锰、硫磺混合物进行燃爆状态判别实验。测试时环境温度为 15 ℃,环境湿度为 60%;颗粒度在 1 mm~3 mm 之间。通过改变燃爆激励源温度和样品质量改变燃爆速率、产热量、放气量。进行重复测试,并记录下单一传感器判别结果和多传感器联合判别结果,如表 5 所示。

表 5 燃爆判别结果对比

	1	2	3	4	平均
样品质量/mg	10	10	20	20	
炉体温度/℃	200	220	200	220	
实验次数	50	50	50	50	
温度判别准确率/%	96	82	98	94	93
声音判别准确率/%	38	54	96	100	72
本方法判别准确率/%	98	94	98	96	96.5
温度判别虚警率/%	4	4	2	4	3.5
声音判别虚警率/%	2	0	4	0	1.5
本方法判别虚警率/%	0	0	0	0	0

由表 5 可总结出,随着燃爆激励源温度的降低和样品质量的减小,燃爆声音现象逐渐微弱;随着激励源温度的提高,燃爆现象愈加剧烈,使燃爆产生的高温气体冲出雷管,导致温度判别准确率下降,但是本文方法在这两种情况下的判别准确率并未出现明显降低。在第二组燃爆判别实验中,温度传感器的判别准确率为 82%,声音传感器的判别准确率为 54%,本方法判别准确率达到了 94%,明显优于单一传感器的判别效果。

综上所述,本文多传感器联合判别方法的判别平均准确率达到了 96.5%,平均虚警率从 3.5%、1.5%降低至 0%,优于传统单一传感器的判别效果。

4 结论

针对爆发点测试中燃爆判别存在的问题,本文提出了一种多传感器联合判别方法。通过距离加权的模型拟合法,模拟出准确的基础温度曲线,提高了温度特征值的精度;利用信度熵的加权融合方法,对冲突 BPA 函数进行预处理,使其适用于 D-S 证据理论合成规则;研制了含能材料爆发点测试仪,对本文方法进行实验验证,实验结果表明本方法判别准确率达到了 96.5%,具有良好的鲁棒性和判别能力,为自动爆发点测试仪的研制提供了技术支持。

参考文献:

[1] 中国兵器工业总公司. GJB 772A—1997 炸药试验方法[S]. 北京:兵器工业出版社,1997.

[2] 田德余,赵凤起,刘剑洪. 含能材料及相关物手册[M]. 北京:国防工业出版社,2011:7-8.

[3] 刘军. 一种多工位爆发点自动测试仪[S]. 北京:兵器工业出版社,1997.

[4] 韩芳,衡淑云,岳璞,等. 自动化爆发点测试仪器:CN10233144113[P]. 2013-01-02.

[5] 刘洋,杨遂军,王志宇,等. 敞口体系燃爆状态多传感器联合辨识方法研究[J]. 传感技术学报,2021,34(5):615-620.

[6] 马晓剑,李梦娜,王金凤. 基于 D-S 可信度加权模型的高密度脉冲噪声识别算法[J]. 传感技术学报,2022,35(6):769-777.

[7] 沈静华,裴东兴,张瑜. 基于多传感器数据融合的准静态校准数据处理方法[J]. 传感技术学报,2017,30(7):1040-1043.

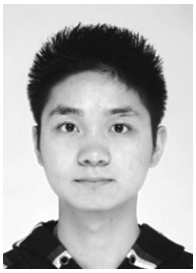
[8] Dempster A P. Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping[J]. The Annals of Mathematical Statistics,1967,38(2):325-339.

[9] Shafer G A. A Mathematical Theory of Evidence[J]. Technometrics,1976,20(1):10-40.

[10] Murphy C K. Combining Belief Functions When Evidence Conflicts[J]. Decision Support Systems,2000,29(1):1-9.

[11] 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.
[12] 杨风暴,王肖霞. D-S 证据理论的冲突证据合成方法[M]. 北京:国防工业出版社,2010:64-78.
[13] 谢保林. 基于 DS 证据理论的多传感器数据融合方法研究[D]. 郑州:河南大学,2022.
[14] Li J W,Xie B L,Jin Y,et al. Weighted Conflict Evidence Combination Method Based on Hellinger Distance and the Belief Entropy[J]. IEEE Access,2020,8:225507-225521.
[15] 孔春秀,李欣宁,赵俊庆,等. 基于 MEMS 声振传感器的电子听诊器[J]. 传感技术学报,2021,34(8):1139-1142.
[16] Dumouchel W,O'Brien F. Integrating a Robust Option into a Multiple Regression Computing Environment[C]// IMA 1989 Summer Program of Rubustness,Diagnosis,Computering and Graphics in Statistics,Minneapolis,MN,USA,1989:41-48.
[17] 陈昊,鞠昱,韩立,等. 相对误差最小二乘法的 TDLAS 气体浓度标定曲线拟合[J]. 光谱学与光谱分析,2021,41(5):1580-1585.
[18] 王俊林,张剑云. 基于统计证据的 Mass 函数和 D-S 证据理论的多传感器目标识别[J]. 传感技术学报,2006,19(3):862-864.



卢峭峰(1998—),男,中国计量大学计量测试工程学院硕士研究生,主要研究领域为多传感器信号处理技术、含能材料热安定性自动测试技术与仪器,qiaofenglu1@163.com;

叶树亮(1973—),男,博士,教授,本文通讯作者,主要研究方向为化工产品安全测试技术与仪器、工业零部件缺陷检测技术与设备、精密测量中部件信号处理与误差分析技术,itmt_paper@126.com。