

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.08.023

典型热分析仪测量精度不确定度评价方法研究*

吴国新 徐小力 石守娟 张 龙

(北京信息科技大学 现代测控技术教育部重点实验室 北京 100192)

摘要:热分析仪炉腔温度场的精密检测与控制方法是实现热分析精密定量检测分析的核心,具有高度非线性耦合强干扰多等运行模式多变的不确定性特征。采用证据理论的可靠性评估与信息融合技术,利用热传导数学模型和实际数据测量相结合原理,提出一种炉腔内温度场热流分布特征的不确定度评价方法。基于 Pignistic 的指标函数优化算法,建立 Pignistic 向量的证据相似度量模型。通过获得静态修正因子对测量结果进行多次修正,解决系统整体温度场热流瞬态分布的检测和热损失参量化计算的估计。实验验证表明,该方法能够评价热分析仪测量精度的不确定度与准确性。

关键词:热分析仪;温度检测;不确定度评价

中图分类号: TN710; TH831; TB942 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Research on evaluation method for typical uncertainty measurement accuracy of thermal analysis instrument

Wu Guoxin Xu Xiaoli Shi Shoujuan Zhang Long

(Key Laboratory of Modern Measurement & Control Technology of the Ministry of Education, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: The precision detection and control method of the temperature field in the furnace chamber is the core of precision quantitative analysis. It has uncertainty characteristics of operation mode with high nonlinear, strong coupling, multiple disturbance and so on. Based on the reliability evaluation method of evidence theory, this paper presents a method to evaluate the uncertainty of the temperature field heat flux distribution in the furnace by using the information fusion technique. A method of combining heat conduction mathematical model with actual data measurement is established. Based on the Pignistic index function optimization algorithm, the Pignistic vector of the similarity measure method is established. To solve the system temperature field transient distribution of heat flux and the estimation of the thermal loss parameter, the measurement results were corrected several times by acquiring static correction factor. The experimental verification shows that the method can evaluate the uncertainty and accuracy of the measurement accuracy of the thermal analyzer.

Keywords: thermal analysis instrument; temperature measurement; uncertainty evaluation

0 引 言

在热分析仪器的测量中,如何精准实现热流信息获取与分析测量,前提条件就是必须对炉腔温度场实现精密检测与控制^[1-3]。目前采用的控制与测试方法往往都具有高度非线性,其运行模式也存在着多变化、耦合强、

干扰多等不确定性特征,严重影响了测量精度,还无法建立精确的静态测量过程模型^[4-6]。此外,加热炉腔内温度场的热流信号往往会受到测试样品、气氛环境、加热炉丝质量、测热流传感器、升温速度等诸多因素影响而与实际控温不符,出现瞬态失衡现象^[7-8]。目前,不确定度(uncertainty)分析已逐渐取代误差分析,用于对测试结果的评判^[9-10]。针对影响热分析仪炉腔温度场精密检测与

收稿日期:2017-03 Received Date: 2017-03

* 基金项目:国家高技术研究发展计划(2015AA043702)、北京市属高等学校青年拔尖人才培养计划项目(CIT&TCD201404120)、北京市优秀人才培养资助D类项目(2013D005007000009)资助

控制的不确定因素较多现象,可采用 DS 证据理论建立炉腔内温度场热传导数学模型,分析炉腔内热流分布特征,最终建立热分析仪测量精度的不确定度评价体系,解决系统整体温度场热流瞬态分布检测的难题,同时结合实际数据测量可以实现热损失参量化计算的估计与评价^[11-12]。常规的不确定度评价在基本概率分配(BPA)的识别框架上考虑了静态概率分布,如何进行动态信度更新,综合分析影响测量结果的各种因素来源,给出测量结果的全面不确定度分析,可采用信息融合技术,基于 Pignistic 的指标函数优化算法,建立 Pignistic 向量的证据相似度量模型,建立一种影响热分析仪测量精度的缺陷模式不确定度评价方法。采用实验验证的方法,在获得静态修正因子情况下对测量结果进行多次修正,解决系统整体温度场热流瞬态分布的检测和热损失参量化计算的估计^[13-15]。

1 不确定度评价模型

1.1 不确定度定义

目前,对测量不确定度的定义有如下表述:测量不确定度是指“表征合理地赋予被测量之值的分散性,与测量结果相联系的参数”^[16-18]。从以上的定义可以得出,测量结果的有效性、准确性需要有一个定量的评价程度,也就是用定量的某个参数来说明测量结果的质量优劣,用于表征合理地赋予被测量值的分散性。热分析仪器在使用过程中,由于测量环境、人为认知、系统误差等影响,往往所检测的被测量值不可能是同一值,可以客观认为测量结果应该是以一种分散性的概率特性,分布在某个特定区域内。根据其数值评定方法,对说明测量结果是否接近真值这种定量的参数一般可以分为 A 类评定和 B 类评定。A 类评定定义方法:由一系列测量数据的统计分布获得的不确定度,用试验标准差表征。B 类评定定义方法:基于经验或资料及假设的概率分布、用估计的标准差表征^[16-18],本文在 A 类评定定义方法的基础上,结合 Pignistic 的指标函数优化算法建立 Pignistic 向量的证据相似度量方法,通过获得静态修正因子对测量结果进行多次修正,解决系统整体温度场热流瞬态分布的检测和热损失参量化计算的估计。

1.2 自由度定义

自由度往往是指测量计算的总和当中存在独立项的个数,即总项数减去其中受约束的项数值。为了估计所评定的测量不确定度的自由度,按照以下几种情况的自由度定义方式进行分析。

1)对检测数据量 X 进行一次测量, X_1 作为量 X 的估计,为了提高估计的准确度,还独立测得 X_2, X_3, X_4, \dots ,

X_n ,称该 n 个独立样本数据的自由度为 $n - 1$ 。这种情况说明了获取自由度的一个方法:对于一个测量样本,自由度等于该样本数据中 n 个独立测量个数减去待求量个数 1。

2)对某量 X 进行 n 次独立重复测量,在用贝塞尔公式计算实验标准差时,需要计算残差平方和 $\sum (x_i - \bar{x})^2$ 中 n 个残差 $(x_i - \bar{x})$,因 n 个残差满足一个约束条件 $\sum (x_i - \bar{x}) = 0$,故独立残差个数为 $n - 1$,即用贝塞尔公式估计实验标准差的自由度为 $n - 1$ 。

3)按估计相对标准差来定义的自由度称为有效自由度,记为 ν_{eff} ,有时不加区别记为 ν 可得到自由度的另一种估计公式 $\nu = \frac{1}{2} \frac{1}{\left[\frac{\sigma(S)}{S}\right]^2}$,进一步将上述公式推广到

评定 A 类和 B 类标准不确定度的情形,既有 $\nu = \frac{1}{2} \frac{1}{\left[\frac{\sigma(u)}{S}\right]^2}$ 。

1.3 基于 Pignistic 概率的静态修正

若热分析仪炉腔的温度场集为 $\Phi = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p\}$,通过温度场均温区分布模拟试验获先验温度差异信息,可以获得某个点的温度传感器对温度场集 Φ 中各个温度差异模式的监测数据,即观测集 $\delta = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$,且 $n \gg p$ 。那么,对于每一组观测 $\sigma_j \in \delta$,人们就知道该观测是何种温度差异模式 $d_j \in \delta$ 下获得的,并将由该组观测中获取的调整仪器实验炉腔的证据记作 $m\{\delta_j\}$ 。

证据的可靠性反映了使用者对传感器读数的信任度。若设定证据可靠性的修正因子为 α ,则证据的可靠度就是 $1 - \alpha$ 。由该传感器测得的 BPA 可用下式进行修正^[19-20]:

$$m^\alpha(A) = \begin{cases} (1 - \alpha)m(A), & \forall A \subseteq \delta, A \neq \delta \\ \alpha + (1 - \alpha)m(\delta), & A = \delta \end{cases} \quad (1)$$

若传感器的静态修正因子为 α^s ,则可以利用式(1)获得修正后 BPA,即为 $m^\alpha\{\delta_j\}$ 。利用 Pignistic 概率函数 $BetP_m(\theta_i) = \sum_{A \subseteq \delta, \theta_i \in A} \frac{1}{|A|} \frac{m(A)}{1 - m(\varphi)}$, ($m(\varphi) \neq 1, |A|$ 是集合 A 的势),将 $m^\alpha\{\delta_j\}$ 转换成 Pignistic 概率函数,表示成 $BetP^{\alpha^s}\{\delta_j\}$,然后将其与事先设定的温度差异模式 d_j 比较,设指示函数 $\delta_{j,i}$, ($j = 1, \dots, n, i = 1, \dots, p$), 当时 $\theta_i = c_j, \delta_{j,i} = 1$, 否则 $\delta_{j,i} = 0$ 。那么,就可以定义 $BetP^{\alpha^s}\{\delta_j\}$ 与指标函数 $BetP^{\alpha^s}\{\delta_j\}$ 之间的欧氏距离为

$$Dist(\delta_j, \alpha^s) = \sum_{i=1}^p (BetP^{\alpha^s}\{\delta_j\}(\theta_i) - \delta_{j,i})^2, \text{ 则 } n \text{ 组观测与 } \delta_{j,i} \text{ 之间的欧氏距离为 } TotalDist = \sum_{j=1}^n Dist(\delta_j, \alpha^s) =$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^p (BetP^{\alpha^s} \{ \delta_j \} (\theta_i) - \delta_{j,i})^2。$$

TotalDist 是关于 α^s 的距离指标函数,将 TotalDist 进行最小化处理即可得到 α^s 。此时经 α^s 修正后得到的 $BetP^{\alpha^s} \{ \delta_j \}$ 表示在 TotalDist 最小意义下,使得 $BetP^{\alpha^s} \{ \delta_j \}$ 尽可能的接近真实的指标函数 $\delta_{j,i}$,亦即 $m^{\alpha^s}(\delta_j)$ 中对各个温度差异特征情况的 BPA 分布尽可能的反映真实发生的实验仪器炉腔差异。

2 测量精度最小不确定度计算

热分析仪测量精度最小不确定度的计算采用最小化 TotalDist 的方法求解。具体求解热分析仪测量精度最小不确定度的过程如下:假定从炉腔的某点温度传感器的第 j 组观测中获得的 BPA 为 $m \{ \delta_j \}$, 则用静态折扣变量 α 对原证据修正后得到的新证据:

$$m^{\alpha} \{ \delta_j \} (A) = \begin{cases} (1 - \alpha)m(\delta_j)(A), & A \subset \Theta \\ (1 - \alpha)m \{ O_j \} (\Theta) + \alpha, & A = \Theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: A 为证据焦元。由 Pignistic 概率函数 $BetP_m(\theta_i) = \sum_{A \subseteq \delta, \theta_i \in A} \frac{1}{|A|} \frac{m(A)}{1 - m(\varphi)}$, ($m(\varphi) \neq 1$, $|A|$ 是集合 A 的势), 求得原证据的 Pignistic 概率函数为:

$$BetP \{ O_j \} (\theta_i) = \frac{\sum_{A: \theta_i \in A} m \{ O_j \} (A)}{|A|} \quad (3)$$

由式(2)和(3)可得:

$$BetP^{\alpha} \{ O_j \} (\theta_i) = \frac{\sum_{A: \theta_i \in A} m^{\alpha} \{ O_j \} (A)}{|A|} = \sum_{A: \theta_i \in A} (1 - \alpha) \frac{m \{ O_j \} (A)}{|A|} + \frac{\alpha}{p} \quad (4)$$

式中: $p = |\Theta|$ 。定义 $p_{ij} = BetP \{ O_j \} (\theta_i)$, 则可得到:

$$TotalDist = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^p (BetP^{\alpha} \{ O_j \} (\theta_i) - \delta_{j,i})^2 = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^p ((1 - \alpha)p_{i,j} + \frac{\alpha}{p} - \delta_{j,i})^2 \quad (5)$$

当 $\frac{dTotalDist(\alpha)}{d\alpha} = 0$ 时, 式(4)可以取到极值:

$$0 = \frac{dTotalDist(\alpha)}{d\alpha} = 2 \sum_{j,i} ((1 - \alpha)p_{ij} + \frac{\alpha}{p} -$$

$$\delta_{j,i}) (-p_{ij} + \frac{1}{p}) \propto \sum_{j,i} - (1 - \alpha)p_{ij}^2 - \frac{an}{p} + \sum_{j,i} \delta_{j,i} p_{ij} + \frac{(1 - \alpha)n}{p} + \frac{\alpha n}{p} - \frac{n}{p} = \sum_{j,i} - (1 - \alpha)p_{ij}^2 - \frac{\alpha n}{p} + \sum_{j,i} \delta_{j,i} p_{ij} \quad (6)$$

由式(6)求得 $\alpha = \frac{\sum_{j,i} (\delta_{j,i} - p_{ij}) p_{ij}}{\frac{n}{p} - \sum_{j,i} p_{ij}^2}$ 。为了保证 $\alpha^s \in$

$[0,1]$, 将 α^s 进行最小化处理:

$$\alpha^s = \min(1, \max(0, \alpha)) \quad (7)$$

3 不确定度评价实验结果

3.1 评价实验体系构成

热分析仪加热炉腔内部结构复杂,不仅需要考虑加热元件材料,还要考虑均温区分布大小、气氛控制方法、隔热保温措施、消除热应力等测量环境因素。信号的检测主要有控温检测、样品测温检测、气氛热流检测、热传导效能检测、热应力检测等,提出一种基于热传导数学模型和实际数据测量相结合的方法,利用多传感器检测方法获取瞬态多元信息间的相互关联性,检测得到整体温度场瞬态下的热分布。

以典型的差热分析仪加热炉均温区分布缺陷为研究对象,建立的热分析评价实验体系,能够模拟影响温度场的热分布特性的参数变量以及影响形式。在实验过程中,确定合适的微机电系统(MEMS)状态参数测试部位,选择合适传感器并设计加工测试单元,开发数据采集测试系统对功能参数和空间温度信号进行采集与处理。热分析仪炉腔多元信息获取测试与评价实验体系如图1所示。

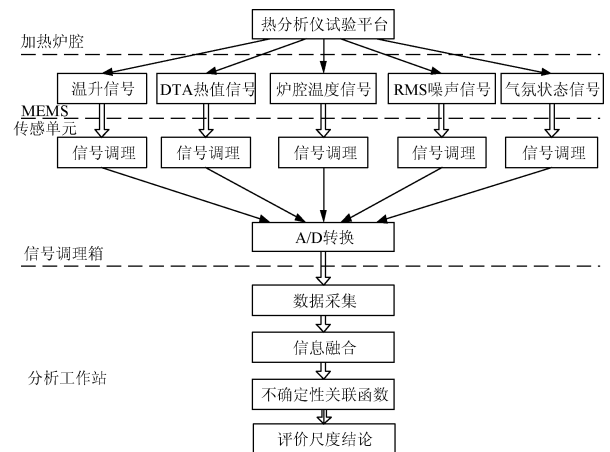


图1 热分析仪信号获取与评价途径

Fig. 1 Signal acquisition and evaluation of thermal analyzer

3.2 不确定度评价实验

不确定度评价实验过程均从 100 °C 开始采样、10 °C/min 加温到 1 000 °C 为测量实验,每 30 °C 记录一组不确定度测量数据。首先,在加热过程中上分别设置正常升温 F_0 、加热丝松弛升温 F_1 、对流气氛环境升温 F_2 、炉

腔非真空升温 F_3 4 种典型影响均温区缺陷模式。利用升温控制 (S_1)、炉腔测温 (S_2)、DTA 测量值 (S_3) 3 种传感器采集加热过程中每一时刻均值作为观测信号 (采样速率 1 000 组/s), 经数据采集测试系统将所采集的信息传输至上微机, 通过上微机数据分析软件获得数据, 记录不同时刻的各传感信号。采用上述方法对获得 3 种传感器信号进行 BPA 修正, 求静态折扣因子。

设均温区缺陷模式集 $\Theta = \{F_0, F_1, F_2, F_3\}$, 通过典型差热分析仪加热炉均温区分布缺陷模拟实验, 获取升温控制、炉腔测温、DTA 测量值 3 种传感器在 4 种均温区缺陷模式下分别获取的 30 组观测值 (表 1 ~ 3 仅列出了 $S_1 \sim S_3$ 在 $F_0 \sim F_3$ 情况下的 4 组样本数据), 取出的 360 组加热炉温度分布缺陷证据作为计算静态折扣因子时的样本。

表 1 S_1 在 $F_0 \sim F_3$ 情况下的 4 组均温区缺陷样本

Table 1 4 groups of S_1 uniform temperature defect samples in the case of $F_0 \sim F_3$

均温区缺陷模式	$m(F_0)$	$m(F_1)$	$m(F_2)$	$m(F_3)$	基本概率分配
F_0	0.348	0.764	0.543	0.275	0.007
	0	0.13	0.494	0	0
	0.396	0.129	0.885	0.275	0.007
	0	0	0.201	0	0.001
F_1	0.178	0.382	0.301	0.031	0
	0.199	0.412	0.332	0.178	0
	0.12	0.288	0.258	0	0
	0	0	0.155	0.019	0
F_2	0.257	0.152	0.787	0.311	0.02
	0.289	0.103	0.782	0.764	0.054
	0.315	0	0.784	0.812	0.034
	0.257	0	0.777	0.161	0.027
F_3	0.155	0	0.203	0.008	0.007
	0.149	0.151	0.35	0	0
	0.151	0.331	0.398	0	0.007
	0.152	0.089	0.447	0	0

表 2 S_2 在 $F_0 \sim F_3$ 情况下的 4 组均温区缺陷样本

Table 2 4 groups of S_2 uniform temperature defect samples in the case of $F_0 \sim F_3$

均温区缺陷模式	$m(F_0)$	$m(F_1)$	$m(F_2)$	$m(F_3)$	基本概率分配
F_0	0.161	0.364	0.741	0.275	0.02
	0	0.132	0.339	0.254	0.034
	0	0.121	0.788	0.275	0.074
	0	0	0.202	0.078	0.115
F_1	0.177	0.182	0.807	0.031	0.034
	0	0.091	0.257	0.005	0.034
	0.009	0.087	0	0.348	0.027
	0	0	0.181	0.019	0
F_2	0.227	0.115	0.177	0.324	0.027
	0.229	0.107	0.255	0.761	0.068
	0.115	0.098	0.554	0.577	0.034
	0.057	0.103	0.697	0.154	0.027
F_3	0.105	0.241	0.321	0.257	0.007
	0.109	0.223	0.258	0.214	0.02
	0	0	0.388	0.231	0.007
	0	0.119	0.421	0.254	0

基于 S_1 在 $F_0 \sim F_3$ 情况下的 120 组诊断证据样本, 由式(5)可得:

$$TotalDist(S_1) = \alpha_1^2 - 0.113 + 1.187 \quad (8)$$

最小化式(8), 得 $\alpha_1 = 0.056$, 由式(7)得 $\alpha_1^8 = 0.056$ 。同理, 对于 S_2 和 S_3 可求得 $\alpha_2^8 = 0.284, \alpha_3^8 = 0.175$ 。由静态折扣因子可以看出传感器 S_1 比传感器 S_2, S_3 可靠。

表3 S_3 在 $F_0 \sim F_3$ 情况下的4组均温区缺陷样本Table 3 4 groups of S_3 uniform temperature defect samples in the case of $F_0 \sim F_3$

均温区缺陷模式	$m(F_0)$	$m(F_1)$	$m(F_2)$	$m(F_3)$	基本概率分配
F_0	0.167	0.315	0.291	0.324	0.014
	0.089	0	0.151	0.258	0.054
	0.299	0.715	0.592	0.324	0
	0.25	0.568	0.543	0	0.014
F_1	0	0.09	0.258	0	0.014
	0.199	0.081	0.236	0	0.02
	0.192	0.112	0.432	0.118	0.007
	0.12	0.225	0.363	0.098	0.014
F_2	0.299	0.104	0.789	0.52	0.007
	0.255	0.201	0.779	0.617	0.034
	0.229	0.114	0.272	0.526	0.007
	0.225	0.2	0.585	0.624	0.061
F_3	0.159	0.203	0.252	0.057	0
	0.145	0.299	0.301	0.105	0
	0.115	0.209	0.356	0.105	0.027
	0.089	0.171	0.359	0.258	0.034

在实际的热分析加热炉腔温度场准确度辨识与验证上,这就要求该系统能够充分利用已有的经验和传感器所测参数,对这些参数进行融合,提取出所需信息,并找出它们与给定温度控制信号之间的关联性,同时系统还要具有相当的泛化能力,能够对未知因素引起的温度变化进行判断。

4 结论

在进行热分析仪炉腔温度场的精密检测与控制的缺陷分析中,引入了信息融合技术,采用基于 Pignistic 概率证据理论,提出一种影响热分析仪测量精度的缺陷模式不确定度评价方法,准确分析炉腔内温度场热流分布特征。针对炉腔均温区的分布缺陷模式,构建了典型差热分析仪加热炉试验平台,建立了热分析仪信号获取与不确定性评价体系,分析得到了影响温度场的热分布特性的参数变量以及影响形式。通过实验验证表明,该方法能够可靠评价热分析仪测量精度的不确定度与准确性。

参考文献

- [1] 宛静. 热分析技术概述及其应用[C]. 第九届长三角科技论坛——航空航天科技创新与长三角经济转型发展分论坛论文集, 2012: 312-320.
- WAN J. Thermal analysis technology and its application[C]. The 9th Yangtze River Delta Forum-the Forum of the Innovation of Aerospace Science and Technology and Development of Yangtze River Delta Economy, 2012: 312-320.
- [2] 池海涛, 刘伟丽, 高峡, 等. 差示扫描量热法及其发展趋势[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(11):

4374-4377.

CHI H T, LIU W L, GAO X, et al. Differential scanning calorimetry and its development trend [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2016, 7(11): 4374-4377.

- [3] LUGINBUEHL M, PRIESTLEY I. A comparison of DSC and radex for the investigation of safety parameters for inhomogeneous systems [C]. IChemE, 2006.
- [4] 高爱华, 周佳伟, 刘卫国. 采用虚拟仪器技术热释电系数自动测量系统[J]. 西安工业大学学报, 2009, 21(1): 8-11.
- GAO AI H, ZHOU J W, LIU W G. Automatic measurement system of pyroelectric coefficient using virtual instrument technology [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2009, 21(1): 8-11.
- [5] 朴玉玲. 热分析技术应用综述[J]. 广东化工, 2012, 39(6): 44-45.
- PIAO Y L. Overview of application of thermal analysis techniques [J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, 39(6): 44-45.
- [6] 薛明德, 向志海. 大型空间结构的热-动力学耦合问题及其有限元分析[J]. 固体力学学报, 2011, 32(S1): 319-330.
- XUE M D, XIANG ZH H. Thermal-dynamic coupling problem of large space structures and its fem analysis [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2011, 32(S1): 319-330.
- [7] 苏里阳, 杨日杰, 姜超, 等. 基于单片机的海洋温深测量装置设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(8): 90-93.
- SU L Y, YANG R J, JIANG CH, et al. Equipment designed for ocean temperature and depth based on single

- chip microcompute [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(8): 90-93.
- [8] 程银宝,陈晓怀,王汉斌,等. 基于精度理论的测量不确定度评定与分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8): 1175-1182.
CHENG Y B, CHEN X H, WANG H B, et al. Measurement uncertainty estimation and analysis based on accuracy theory [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(8): 1175-1182.
- [9] WU G X, XU X L. Multi-objective optimization algorithm for instrument integrated development [C]. International Conference on Frontiers of Manufacturing and Design Science, 2010: 3487-3491.
- [10] 史伟,李志霞,杨莉,等. 测量不确定度与不确定性原理的概念辨析[J]. 物理测试, 2016, 34(3): 58-60.
SHI W, LI ZH X, YANG L, et al. Concept discrimination of measurement uncertainty and uncertainty principle [J]. Physics Examination and Testing, 2016, 34(3): 58-60.
- [11] 张向宇,程强,周怀春. 加热炉断面温度场和固相辐射参数检测研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(2): 287-291.
ZHANG X Y, CHENG Q, ZHOU H CH. Simultaneous measurements of the two-dimensional temperature distribution and solid radiation parameters in a heating furnace [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(2): 287-291.
- [12] VILCHIZ-BRAVO L E, HANDY B E. Heat-flow and temperature control in tian-calvet microcalorimeters: toward higher detection limits [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(11):111-117.
- [13] 叶永伟,陆俊杰,钱志勤,等. 基于LS-SVM的机械式温度仪表误差预测研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 57-66.
YE Y W, LU J J, QIAN ZH Q, et al. Study on the temperature error prediction of mechanical temperature instrument based on LS-SVM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1): 57-66.
- [14] 宋晓瑞,王元钦,郑海昕,等. 一种基于正交处理的角跟踪系统数字校相方法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(10): 41-52.
SONG X L, WANG Y Q, ZHENG H X, et al. Digital phase calibration method in angle tracking system based on I/Q processor [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(10): 41-52.
- [15] 陈鑫,郝魁红,陈肖楠,等. 飞机共晶盐过热探测器电气特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8): 1160-1166.
CHEN X, HAO K H, CHEN X N, et al. Research on electrical characteristics of aircraft eutectic salt type overheat detector [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(8): 1160-1166.
- [16] 王耀南,李树涛. 多传感器信息融合及其应用综述[J]. 控制与决策, 2001, 16(5): 518-521.
WANG Y N, LI SH T. Multisensor information fusion and its application: A survey [J]. Control and Decision, 2001, 16(5): 518-521.
- [17] 徐晓滨,王玉成,文成林. 基于诊断证据可靠性的信息融合故障诊断方法[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(4): 504-510.
XU X B, WANG Y CH, WEN CH L. Information-fusion method for fault diagnosis based on reliability evaluation of evidence [J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(4): 504-510.
- [18] 沈淳,孙凤贤,夏新林,等. 局部多孔壁-内腔结构的气动加热瞬态特性[J]. 宇航学报, 2012, 33(8): 1006-1013.
SHEN CH, SUN F X, XIA X L, et al. Transient characteristics of aerodynamically heating partial porous wall-inner cavity [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(8): 1006-1013.
- [19] SMETS P. Belief functions: The disjunctive rule of combination and the generalized Bayesian theorem [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 1993, 41(9): 1-35.
- [20] YAGMUR L. Multi-criteria evaluation and priority analysis for localization equipment in a thermal power plant using the AHP (analytic hierarchy process) [J]. Energy, 2016, 94(3): 476-482.

作者简介



吴国新,北京信息科技大学副研究员,博士,硕士生导师,主要研究方向为光机电一体化技术、机电装备运行状态检测与故障诊断技术。

E-mail:wgx1977@bistu.edu.cn.com

Wu Guoxin, associate research fellow, Ph. D., M. Sc. supervisor in Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include Opto-Mechatronics Technology, state detection and fault diagnosis technology of mechanical and electrical equipment.



徐小力,北京信息科技大学教授,博士、博士生导师,主要研究方向为机电系统测控技术。

Xu Xiaoli, Ph D., professor and Ph. D. supervisor in Beijing Information and Science Technology University. His main research interests include measurement & control technology of mechanical and electrical system.

E-mail;xuxiaoli@bistu.edu.cn