

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.07.003

# 小空间组合喷管推力测量系统 不确定度评定研究\*

魏文权, 陆永华\*

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 针对组合喷管推力测量系统的测量不确定度评定问题, 对组合喷管推力的测量原理进行了介绍, 对传感器测力面的位置和推力的修正系数进行了试验标定, 对推力测量系统的不确定度来源进行了分析。利用 A 类不确定度分量和 B 类不确定度分量对推力测量系统的测量不确定度进行了评定, 采用贝塞尔法对每个通道的 A 类不确定度分量进行了计算, 对推力测量系统各个环节引入的 B 类不确定度分量进行了计算。研究结果表明, 每个通道的 B 类不确定度分量接近, 每个通道合成标准不确定度和扩展不确定度的大小主要由 A 类不确定度分量决定, A 类不确定度分量与喷管的尺寸和内部结构有关。

**关键词:** 测量不确定度; 组合喷管; 推力测量; 推力标定; 误差源

中图分类号: TH73; TB93

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)07-788-06

## Uncertainty evaluation of thrust measurement system for small space combined nozzle

WEI Wen-quan, LU Yong-hua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and  
Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at measurement uncertainty evaluation problem of combined nozzle thrust measurement system, the measurement principle of combined nozzle thrust was introduced, and the location of the sensors load surface and the correction coefficient of thrust were determined by the calibration experiment, and the uncertainty sources of thrust measurement system were analyzed. Its measurement uncertainty was evaluated by using type A uncertainty component and type B uncertainty component, and the type A uncertainty component of each channel was calculated by using the Bessel method, and the type B uncertainty component of each segment of thrust measurement system was calculated. The results indicate that the type B uncertainty component of each channel is close to each other, and the size of synthetic standard uncertainty and expanded uncertainty of each channel is largely determined by type A uncertainty component, which is related to the size and the internal structure of nozzle.

**Key words:** measurement uncertainty; combined nozzle; thrust measurement; thrust calibration; error sources

## 0 引 言

推力测量是喷管力学性能的评判依据, 是飞行器轨道保持和姿态控制的关键环节<sup>[1]</sup>。目前飞行器根

据不同的喷管反作用力组合, 实现其俯仰、偏航和滚转。推力测试方法通常有两类: 一类是喷管固定于测力台架上的方法, 该方法实现喷管真实推力的测量, 但受外部管道和线路影响, 喷管集成后不便测量; 另一类

收稿日期: 2016-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575277)

作者简介: 魏文权(1990-), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 主要从事计算机辅助测控方面的研究. E-mail: wqwei\_4030@126.com

通信联系人: 陆永华, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师. E-mail: nuua\_lyh@nuua.edu.cn

是喷管对准测力探头喷射的方法,该方法测量的是喷管尾流的冲击力,不等同于喷管的真实推力,需要标定测量力<sup>[2]</sup>。

测量是相对准确的,受测量系统、测量方法、环境及其他因素的影响,测量结果存在测量不确定度<sup>[3,4]</sup>。为了表征这种分散性,测量不确定度用标准偏差或置信区间的半宽度表示。一个完整的测量结果,除了应给出被测量的最佳估计值外,还应同时给出测量结果的不确定度<sup>[5]</sup>。

本研究基于喷管对准测力探头喷射的方法,设计并搭建推力测量系统。首先需要通过标定试验确定传感器测力面的位置和推力的修正系数。推力测量系统经过标定之后,需要分析测量系统的误差源,计算其引入的不确定度分量。

## 1 组合喷管推力测量原理

组合喷管推力测量示意图如图1所示。

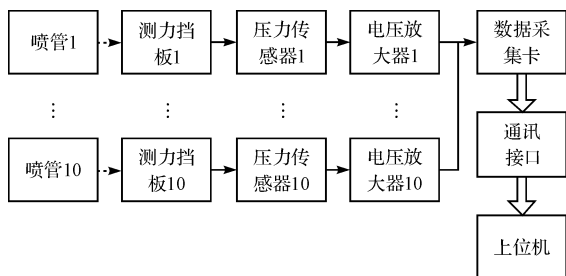


图1 组合喷管推力测量示意图

推力测量系统共需测量10个喷管的推力,每个喷管都有对应的测力挡板、压力传感器和电压放大器。系统测量流程为:首先,在上位机上将测量软件系统初始化,设置信号的采样频率;其次,打开需要接收信号的通道,然后打开相应通道的气阀,使喷管向相应测力挡板喷气,测力挡板接受喷管尾流的冲击力,压力传感器将这个冲击力转化为电信号,经电压放大器放大后,通过数据采集卡将模拟信号转换为数字信号;最后,测量软件根据推力与电压之间的关系及推力的修正系数,计算出推力值。

每个喷管推力值的计算公式如下:

$$F_i = k_i \cdot U_i \cdot \frac{F_s}{U_s} (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (1)$$

式中: $F_i$ —所测推力值, $k_i$ —推力的修正系数, $U_i$ —采集电压值, $F_s$ —压力传感器的量程, $U_s$ —电压放大器的量程。修正系数是通过推力标定试验确定的。

进行测量系统推力标定的装置如图2所示。



图2 测试系统装置图

左边一侧定义为A组,从里到外分别为A1、A2、A3、A4、A5;右边一侧定义为B组,从外到里分别为B1、B2、B3、B4、B5;A1、A5、B1、B5—外侧小喷管,属于同一种类型,对应表1中的喷管I型;A2、A4、B2、B4—内侧大喷管,属于同一种类型,对应表1中的喷管II型;A3、B3—中间大喷管,属于同一种类型,对应表1中的喷管III型

## 2 推力标定过程

在测量系统测量喷管的推力之前,需要对测量力进行标定。首先,需要确定传感器测力面的位置,即测力挡板距喷口的距离;然后,需要以标准值标定测量值,确定推力的修正系数。

### 2.1 传感器测力面位置的确定

本研究对不同尺寸的喷管进行数值计算发现,测力挡板在距喷口一定的距离范围内,受到的冲击力较稳定,并且对喷管内部流场几乎没有影响,因此对测量结果影响很小。在标定试验中,使传感器跟随测力挡板在这个距离范围内移动,找出冲击力相对较大的位置,即为传感器测力面的位置。试验中使用了3种不同尺寸类型的喷管,喷管分类表如表1所示。

表1 喷管分类表

喷管类型	内部结构	相关尺寸/mm	提供推力值/N
喷管 I	弯通	2.6/0.6/2.3	1.5 ~ 1.8
喷管 II	弯通	2.6/1.5/5.1	7.5 ~ 9.1
喷管 III	直通	2.6/1.5/5.1	7.5 ~ 9.1

表1中相关尺寸依次为喷管的入口直径、喉部直径、出口直径。由于喷管的尺寸、结构不同,其推力大小不同,测力挡板所受冲击力最大时传感器测力面的位置也不同。因此,需要分别确定不同喷管的传感器测力面位置。

传感器测力面的位置最终是通过试验的方法确定

的。在喷管推力标定试验中,测力挡板及传感器是可以移动的,通过改变测力挡板与喷口的距离,从而得到不同位置上的测力大小。实际上,对 3 种不同的喷管,测力挡板所受冲击力较稳定的位置区域是不同的。为了统一并兼顾测力挡板合适的位置区域,使测力挡板距喷口分别为 4 mm、6 mm、8 mm、10 mm。通过测力试验,获得不同类型喷管在不同测力位置的推力均值,从而确定测量力最大的位置,即传感器的测力面位置。喷管 I、喷管 II、喷管 III 在不同测力位置的测力值如表 2 所示。

表 2 喷管不同测力面的推力值

距离/mm	喷管 I 测力值/N	喷管 II 测力值/N	喷管 III 测力值/N
4	1.634	8.143	8.629
6	1.584	8.334	8.916
8	1.503	8.236	9.042
10	1.576	8.086	9.195

从表 2 中可以看出,喷管 I 在 4 mm 处产生的冲击力最大,则其测力面位置为测力挡板距喷口 4 mm;喷管 II 在 6 mm 处产生的冲击力最大,则其测力面位置为测力挡板距喷口 6 mm;喷管 III 在 10 mm 处产生的冲击力最大,则其测力面位置为测力挡板距喷口 10 mm。由此可知,不同类型喷管的测力面位置不同。喷管 I 的尺寸较小,喷管本身气流量较小,因此推力尺度是最小的,测力面位置最近;喷管 II 和喷管 III 的尺寸相同,由于喷管 II 属于弯通式内部结构,而喷管 III 属于直通式内部结构,喷管 III 的测力面位置比喷管 II 远。

## 2.2 推力标定系数

在同样气流喷射条件下,本研究对 3 种不同喷管进行现场测力试验。测量过程模仿地面真实过程,对空气进行喷射,利用电子天平测量推力的大小。试验表明,喷管 I 的均值为 1.629 N,喷管 II 的均值为 7.700 N,喷管 III 的均值为 8.074 N,把相应喷管的均值作为标准值。

本研究在推力标定试验中,将测力挡板固定于测力面处,对每个通道的喷管进行单独测试。由于当测力挡板位于测力面时,推力的测量值在所要求的测量精度范围内波动,且每类喷管的标准值固定不变,可以认为修正系数是常数。把测量值与标准值进行比较,得到修正系数。各个通道喷管的推力标定系数表如表 3 所示。由表 3 可知,修正系数接近于 1,说明当测力挡板位于合适的位置时,测量值与标准值很接近,这种测量方式对喷管推力的影响不大。

表 3 喷管推力标定系数表

通道	测量值/N	标准值/N	修正系数
A1	1.683	1.629	0.968
A2	7.579	7.700	1.016
A3	7.401	8.074	1.091
A4	6.981	7.700	1.103
A5	1.733	1.629	0.940
B1	1.603	1.629	1.016
B2	6.924	7.700	1.112
B3	6.728	8.074	1.200
B4	7.347	7.700	1.048
B5	1.773	1.629	0.919

## 3 不确定度来源分析

推力测量系统的测量链由测力挡板、压力传感器、电压放大器、数据采集卡和计算机软硬件组成,从理论上讲,该测量链中所有组成部分引入的误差源,都会对系统的测量不确定度产生影响<sup>[6]</sup>。由测量重复性误差引入的测量不确定度,可作为测量系统的 A 类不确定度分量;由测量链引入的测量不确定度,可作为测量系统的 B 类不确定度分量。由测量环境中温度、压强的变化引入的误差,已反映在测量结果中,不作为不确定度分量考虑。测力挡板与喷管轴线不垂直时导致所测推力比实际推力偏小,引入不确定度分量。压力传感器拾取被测信号,电压放大器实现测量信号的放大,引入的误差源有非线性误差、重复性误差、迟滞误差、灵敏度误差和零点温度误差等;数据采集卡引入的误差源有量化误差、增益误差、调节时间误差和通道间干扰误差等;这些误差源都会引入不确定度分量。而测量数据的处理、结果显示等由计算机软件系统实现,该阶段没有引入不确定度分量<sup>[7]</sup>。

## 4 推力测量系统的不确定度评定

测量不确定度是评定测量结果质量的重要指标,是对测量结果不确定范围的标度,表征测量结果的分散性、准确性和可靠程度。测量不确定度按评定方法的不同分为 A 类不确定度分量和 B 类不确定度分量<sup>[8]</sup>。A 类不确定度分量来源于推力多次重复测量,用统计方法评定;B 类不确定度分量来源于传感器、放大器等仪器本身产生的误差,用非统计方法评定<sup>[9-10]</sup>。

### 4.1 A 类不确定度评定

对于重复性测量引入的不确定度分量,通常采用贝塞尔法评定 A 类不确定度<sup>[11-12]</sup>。推力测量系统总共有 10 个通道,需要评定每个通道的 A 类不确定度分

量。在推力测量试验中,分别单独地对每个通道喷管的推力进行测量,共得到了5组数据,标定后喷管推力作用测试表如表4所示。

表4 标定后喷管推力测试表

通道	$F_{i1}/N$	$F_{i2}/N$	$F_{i3}/N$	$F_{i4}/N$	$F_{i5}/N$
A1	1.687	1.661	1.674	1.658	1.679
A2	7.658	7.649	7.635	7.694	7.613
A3	8.077	8.045	8.016	8.056	8.037
A4	7.984	7.926	7.913	7.942	7.978
A5	1.685	1.671	1.649	1.668	1.659
B1	1.644	1.656	1.621	1.634	1.617
B2	7.705	7.739	7.756	7.741	7.794
B3	8.084	8.066	8.097	8.071	8.045
B4	7.646	7.682	7.624	7.617	7.673
B5	1.641	1.610	1.627	1.632	1.618

用下式求取每个通道喷管推力的平均值:

$$\bar{F}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F_{ij} \quad (n = 5, i = 1, 2, \dots, 10) \quad (2)$$

式中: $F_{ij}$ —实测推力值, $\bar{F}_i$ —推力的算术平均值。

用下式求取单次测量的试验标准差,即为各个通道的A类不确定度分量:

$$U_{Ai} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (F_{ij} - \bar{F}_i)^2}{(n-1)}} \quad (n = 5, i = 1, 2, \dots, 10) \quad (3)$$

式中: $U_{Ai}$ —A类不确定度分量,下标*i*—通道序号,下标*j*—测量组号。

### 4.2 B类不确定度评定

B类不确定度分量包括测力挡板、压力传感器、电压放大器、数据采集卡各自引入的B类分量。测力挡板引入的B类分量涉及喷管尾流的冲击力,因此各个通道并不相同。每个通道所用的压力传感器和电压放大器属于同一类型,且共用一个数据采集卡,所以各个通道由它们引入的B类分量是相同的。

#### 4.2.1 测力挡板引入的B类分量

从理论上讲,测力挡板应与喷管轴线垂直,从喷口喷出的气体垂直击打在测力挡板上,才能真实地反映喷管的推力。但实际上受制造与安装的局限,测力挡板与喷管轴线并不垂直,所测的推力比实际推力偏小。假设测力挡板向左倾斜一定角度,喷管尾流的冲击力简化为集中力,测力挡板倾斜图如图3所示。

用下式求取喷管的实际冲击力:

$$F = \frac{\bar{F}}{k} \quad (4)$$

式中: $k$ —推力的修正系数。

用下式求取测力挡板实际所受冲击力:

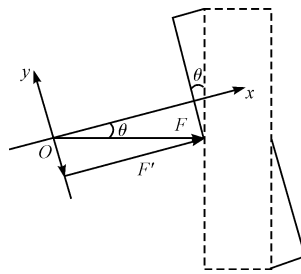


图3 测力挡板倾斜图

以垂直于测力挡板表面的方向为*x*轴,建立直角坐标系;虚线矩形—测力挡板理论位置;实线矩形—测力挡板实际位置; $\theta$ —测力挡板的偏角; $F$ —喷管的实际冲击力; $F'$ —测力挡板实际所受冲击力

$$F' = F \cdot \cos\theta \quad (5)$$

两者之差就是冲击力的变动量。

$$\delta_F = F - F' \quad (6)$$

式中: $\delta_F$ —冲击力的变动量。

在测量中, $\theta$ 的最大估计值为 $3^\circ$ ,对应的 $\delta_F$ 值为冲击力的最大变动量。

若冲击力的最大变动量为 $\delta_{Fmax}$ ,假定冲击力在区间 $(F-\delta_{Fmax}, F)$ 内为正态分布的左函数,取置信因子为2,则测力挡板引入的B类不确定度分量为:

$$U_{B1} = \frac{\delta_{Fmax}}{2} \quad (7)$$

#### 4.2.2 传感器引入的B类分量

DJSX型压力传感器的主要误差源如表5所示,其中灵敏度漂移和零点漂移都与温度有关。

表5 压力传感器的B类分量

误差源	手册数据	误差分布	B类分量/N
非直线性	0.1% F.S.	均匀	0.011 5
重复性	0.1% F.S.	均匀	0.011 5
温度灵敏度漂移	0.03% F.S./ $^\circ C$	均匀	0.003 5
零点温度漂移	0.03% F.S./ $^\circ C$	均匀	0.003 5

测量试验在空调房中进行,温差不超过 $1^\circ C$ 。各误差源对应的B类分量已在表5中给出。压力传感器的误差源之间是不相关的,则其B类不确定度分量<sup>[13-14]</sup>为:

$$U_{B2} = \sqrt{0.011\ 5^2 + 0.011\ 5^2 + 0.003\ 5^2 + 0.003\ 5^2} = 0.017\ 0\ N$$

#### 4.2.3 放大器引入的B类分量

DJKZ-BS型电压放大器的精度为0.1% F.S.,即最大允许误差为0.02 N,服从均匀分布<sup>[15]</sup>,则其B类不确定度分量 $U_{B3} = 0.02/\sqrt{3}\ N = 0.011\ 5\ N$ 。

#### 4.2.4 采集卡引入的B类分量

PCI-9113采集卡的精度为0.01% F.S.,即最大允许误差为0.002 N,服从均匀分布,则其B类不确定

度量分量  $U_{B4} = (0.002/\sqrt{3})\text{N} = 0.0012\text{N}$ 。因此,各个通道的 B 类不确定度分量<sup>[16]</sup>为:

$$U_{Bi} = \sqrt{U_{B1i}^2 + U_{B2}^2 + U_{B3}^2 + U_{B4}^2} \quad (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (8)$$

式中: $U_{B1i}$ —各通道对应的测力挡板引入的 B 类不确定度分量。

#### 4.3 合成不确定度与扩展不确定度

推力测量系统每个通道的合成标准不确定度由下式计算确定<sup>[17-19]</sup>。

$$U_{Ci} = \sqrt{U_{Ai}^2 + U_{Bi}^2} \quad (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (9)$$

取置信概率为 95%, 包含因子  $\mu = 2$ , 用下式计算相应的扩展不确定度<sup>[20]</sup>:

$$U_i = \mu \cdot U_{Ci} \quad (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (10)$$

表 6 测量不确定度统计表

单位: N

通道	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
$\bar{F}$	1.671 8	7.649 8	8.046 2	7.948 6	1.666 4	1.634 4	7.747 0	8.072 6	7.648 4	1.625 6
$F$	1.727 1	7.529 3	7.375 1	7.206 3	1.772 8	1.608 7	6.966 7	6.727 2	7.298 1	1.768 9
$\delta_{F_{\max}}$	0.002 4	0.010 3	0.010 1	0.009 9	0.002 4	0.002 2	0.009 5	0.009 2	0.010 0	0.002 4
$U_A$	0.012 2	0.030 0	0.022 6	0.031 4	0.013 5	0.016 1	0.032 2	0.019 6	0.028 8	0.012 1
$U_{B1}$	0.001 2	0.005 2	0.005 1	0.004 9	0.001 2	0.001 1	0.004 8	0.004 6	0.005 0	0.001 2
$U_{B2}$					0.017 0					
$U_{B3}$					0.011 5					
$U_{B4}$					0.001 2					
$U_B$	0.020 6	0.021 2	0.021 2	0.021 1	0.020 6	0.020 6	0.021 1	0.021 1	0.021 2	0.020 6
$U_C$	0.024	0.037	0.031	0.038	0.025	0.027	0.039	0.029	0.036	0.024
$U$	0.048	0.074	0.062	0.076	0.050	0.054	0.078	0.058	0.072	0.048

用下式求取各通道的平均扩展不确定度:

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (n = 10) \quad (11)$$

其对应的扩展不确定度方差由下式计算确定:

$$D_U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2 \quad (n = 10) \quad (12)$$

经计算, 平均扩展不确定度  $\bar{U} = 0.062\text{N}$ , 扩展不确定度方差  $D_U = 0.00013$ 。推力测量系统各通道的扩展不确定度分布图如图 4 所示。

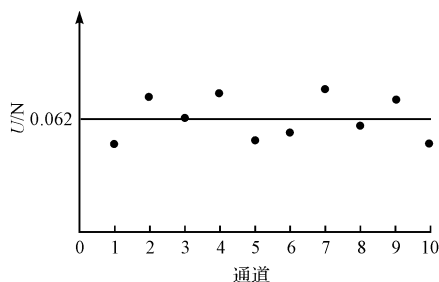


图 4 扩展不确定度分布图

扩展不确定度是确定推力测量结果区间的量, 推力测量值包含于此区间<sup>[21-22]</sup>。将推力测量系统各个通道的不确定度分量及总不确定度的计算结果汇总如表 6 所示。

从表 6 可以看出, 每个通道由测力挡板和采集卡引入的 B 类分量较小, 传感器引入的 B 类分量与各个通道的 B 类不确定度分量较接近, 说明各个通道的 B 类不确定度分量主要由传感器决定, 其次是放大器。因此, 每个通道的 B 类不确定度分量接近。通道 A1、A5、B1、B5 的 A 类不确定度分量较小, 其对应的合成标准不确定度和扩展不确定度也相应较小; 通道 A2、A4、B2、B4 的 A 类不确定度分量较大, 其对应的合成标准不确定度和扩展不确定度也相应较大。这说明每个通道的测量不确定度与喷管的尺寸和内部结构是有关的。

从图 4 可以看出, 对于推力测量系统而言, 各通道的扩展不确定度分布于平均扩展不确定度的两侧, 且相对比较集中; 通道 A3、B3 的扩展不确定度与系统的平均扩展不确定度最接近。

## 5 结束语

通过推力标定试验, 本研究确定了每个通道传感器测力面的位置和推力的修正系数。当喷管的内部结构相同时, 尺寸较小的喷管, 其测力挡板距喷口的距离较近; 当喷管的尺寸相同时, 弯通式喷管, 其测力挡板距喷口的距离较近。传感器测力面的位置确定后, 推力的测量值与标准值很接近, 说明测力挡板没有影响喷口流场, 这种测量方式对喷管推力的影响不大。

本研究在分析推力测量系统不确定度来源的基础上, 评定了推力测量系统的测量不确定度。对于推力测量系统而言, 各通道的扩展不确定度分布较集中。当喷管的内部结构相同时, 尺寸较小的喷管, 其 A 类

不确定度分量、合成标准不确定度和扩展不确定度较小;当喷管的尺寸相同时,直通式喷管,其A类不确定度分量、合成标准不确定度和扩展不确定度较小。每个通道的B类不确定度分量接近,且主要由压力传感器决定,电压放大器也贡献一部分B类不确定度分量。因此,在做推力测量试验时,一定要控制好测量环境的温度,如果温度变化较大,会增大推力测量系统的测量不确定度。

### 参考文献(References):

[1] 洪延姬,周伟静,王广宇. 微推力测量方法及其关键问题分析[J]. 航空学报,2013,34(10):2287-2299.

[2] 岑继文,徐进良. 一种微推力测量的简化处理方法[J]. 航空学报,2008,29(2):297-303.

[3] 陈怀艳,曹芸,韩洁. 基于蒙特卡罗法的测量不确定度评定[J]. 电子测量与仪器学报,2011,25(4):301-308.

[4] WANG H L. Analysis and applications of the measurement uncertainty in electrical testing[J]. **Journal of Power and Energy Engineering**,2015,3(4):297-305.

[5] 连慧芳. 形位误差测量的不确定度评定[D]. 合肥:合肥工业大学仪器科学与光电工程学院,2010.

[6] 王中宇,葛乐矣,杨文平,等. 一种小样本虚拟仪器测量不确定度评定新方法[J]. 计量学报,2008,29(4):387-392.

[7] PERETTO L, SASDELLI R, SCALA E, et al. Uncertainty contribution of the analog conditioning block in DSP-based instruments[J]. **IEEE T. Instrumentation and Measurement**,2007,56(3):1000-1005.

[8] 陈怀艳,曹芸,韩洁. 测量不确定度的发展和应用研究[J]. 宇航计测技术,2014,34(5):65-70.

[9] 崔学林,梁宝龙,黄斌,等. 湿度传感器测量不确定度评定[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(10):1544-1549.

[10] VRATISLAV H. Analysis of basic probability distributions, their properties and use in determining type B evaluation of measurement uncertainties[J]. **Measurement**,2013,46(1):16-23.

[11] 孙流莉,阳祥,赵瑞昌,等. 安全壳冷却试验蒸发特征数不确定度评定方法及其应用[J]. 动力工程学报,

2015,35(8):687-692.

[12] 黄俊钦. 动态不确定度的估算方法和应用实例[J]. 计量学报,2005,26(4):372-375.

[13] 郑飞. 火箭推力原位标定系统的防爆结构优化与不确定度评定[D]. 长春:吉林大学机械科学与工程学院,2015.

[14] TATJANA T, NADA U N, SANDRA B. Estimating measurement uncertainty in high-performance liquid chromatography methods[J]. **Accreditation and Quality Assurance**,2012,17(3):291-300.

[15] GODINA A, ACKO B. Measurement uncertainty analysis for calibration of gauge blocks[J]. **Procedia Engineering**,2014,69(1):191-198.

[16] AWACHAT, P. N. NITIN K, DR. JAJU, S. B. et al. Analysis of measurement uncertainty in hardness testing[J]. **International Journal of Engineering Science and Technology**,2011,3(5):4141-4144.

[17] 宋款. 块状含湿多孔材料当量热工参数实验方法与不确定度研究[D]. 广州:华南理工大学土木与交通学院,2015.

[18] SAMARENDRA B, DIPALI K. Evaluation of measurement uncertainty components associated with the results of complexometric determination of calcium in ceramic raw materials using EDTA[J]. **Accreditation and Quality Assurance**,2013,18(3):235-241.

[19] VICARETTI M., D'EMILIA G., MOSCA S., et al. Evaluation of the measurement uncertainty in automated long-term sampling of PCDD/PCDFs[J]. **Environmental Science and Pollution Research**,2013,20(12):8535-8545.

[20] 邢荣欣. 集成电路静电放电模拟器校准与测量不确定度[J]. 电子测量与仪器学报,2011,25(6):528-532.

[21] 李小燕,钟志锋,王磊,等. 基于第二制冷剂量热器法的压缩机制冷量测量不确定度分析[J]. 流体机械,2015,43(2):32-36.

[22] 钱江波,严晓哲,韩中合,等. 微波谐振腔蒸汽湿度测量系统不确定度分析[J]. 动力工程学报,2014,34(9):701-707.

[编辑:李辉]

### 本文引用格式:

魏文权,陆永华. 小空间组合喷管推力测量系统不确定度评定研究[J]. 机电工程,2016,33(7):788-793.

WEI Wen-quan, LU Yong-hua. Uncertainty evaluation of thrust measurement system for small space combined nozzle[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2016,33(7):788-793.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>