

# 低温热敏电阻温度计校准装置不确定度的评定

董雪, 杨晓阳, 兰玉岐

(北京航天试验技术研究所, 北京, 100074)

**摘要:** 根据测量不确定度的评定方法, 分析和计算低温热敏电阻温度计校准装置的测量不确定度。通过校准结果的不确定度评定, 掌握校准装置的计量性能及误差来源, 为国防计量标准的建立、实行与考核提供不确定度评定的依据。

**关键词:** 低温热敏电阻温度计; 不确定度评定; 校准装置

**中图分类号:** V423-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2012) 02-0075-04

## Uncertainty evaluation for calibration system for cryogenic thermistor thermometers

DONG Xue, YANG Xiao-yang, LAN Yu-qi

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The measurement uncertainty of a calibration system for cryogenic thermistor thermometers applied to rocket engines is analyzed and computed according to the evaluation method of measurement uncertainty. Through the uncertainty evaluation of calibration results, the performance and error of the calibration system for cryogenic thermistor thermometers applied to rocket engines were mastered, and the gist of uncertainty evaluation was provided for the establishment, effectuation and examination of the metrological standard in national defense.

**Keywords:** cryogenic thermistor thermometers; uncertainty evaluation; calibration system

## 0 引言

计量标准的不确定度是衡量计量检定工作可靠性的指标, 也是衡量被检器具溯源结果的主要依据。火箭发动机用低温热敏电阻温度计校准装置是国内研制的深冷控温系统, 依照国家、

航天标准建立的一套校准火箭发动机用热敏电阻温度计的测量系统。根据业务特点, 需建立校准低温热敏电阻温度计的国防计量标准, 以满足试验用需求, 本文根据国家相关规范<sup>[1-3]</sup>, 对火箭发动机用低温热敏电阻温度计校准装置的不确定度进行分析与评定, 给出了扩展不确定度, 为通过计量标准考核提供了有力的数据支持。

收稿日期: 2012-01-05; 修回日期: 2012-02-25

作者简介: 董雪 (1985—), 女, 助理工程师, 研究领域为温度计量技术

## 1 不确定度的定义及来源

测量结果的不确定度是对测量结果的不可信程度或对测量结果有效性的怀疑程度<sup>[4]</sup>。测量不确定度一般分为两大类：用对观测列进行统计分析的方法来评定标准不确定度，称为 A 类评定；用不同于对观测列进行统计分析的方法来评定标准不确定度，称为 B 类评定<sup>[5]</sup>。它们都可以用实验标准偏差或方差来表征。

热敏电阻温度计具有灵敏度高、稳定性强、工作温区广、体积小、使用方便等优点，早在 20 世纪 70 年代初期就已广泛应用于我国航天领域<sup>[6-7]</sup>。MF5602 型负温度系数热敏电阻元件采用传统工艺生产的氧化物复合陶瓷珠粒电阻，测温区间可覆盖 20~50 K，主要用于航天领域低温介质的温度测量和液位测量<sup>[8-10]</sup>。

利用对 MF5602 型负温度系数热敏电阻元件的一系列试验数据对火箭发动机用低温热敏电阻温度计校准装置的不确定度进行分析。其中对于 MF5602 型负温度系数热敏电阻元件测量结果不确定度的来源，有以下影响因素：

- 1) 标准器（标准套管铂电阻温度计）引入的不确定度；
- 2) 标准器（标准套管铂电阻温度计）的电测设备引入的不确定度；
- 3) 被检热敏元件电测设备引入的不确定度；
- 4) 低温恒温器温度波动带来的影响引入的不确定度；
- 5) 低温恒温器温度不均匀带来的影响引入的不确定度；
- 6) 数据拟合引入的不确定度。

## 2 不确定度的评定

### 2.1 MF5602 型负温度系数热敏电阻元件测量结果不确定度分量的评定

根据 6 个影响测量 MF5602 型负温度系数热敏电阻元件结果的不确定度的来源来分别对各分量作出评定。

#### 2.1.1 主标准器引入的不确定度 $u_1$

根据规范的要求，工作基准传递引入的不确定度分量可用 B 类方法评定，采用标准套管铂电阻温度计作为主标准器，由检定证书知，在 13.803 3~273.160 K 温度范围内，其扩展不确定度： $U=10\text{ mK}$  ( $k=2$ ,  $p=0.95$ )。

则相应的标准不确定度为：

$$u_1=U/k=10/2=5\text{ mK}$$

#### 2.1.2 主标准器的电测设备引入的不确定度 $u_2$

采用美国 FLUKE 公司 1590 超级电阻测温仪测量主标准器的电阻值，在  $0\ \Omega\sim 25\ \Omega$  输入，采用  $10\ \Omega$  的内部参考电阻和  $1\text{ mA}$  的测试电流时，电阻准确度为  $0.000\ 15\ \Omega$ 。对于主标准器来讲在温度 77 K ~120 K 范围内  $dT/dR$  值变化很小。取  $dT/dR$  最大值做不确定度评定，电阻测量标准不确定度为（按均匀分布）：

$$u_2=0.000\ 15(dT/dR)/\sqrt{3}=0.000\ 15\times 53/\sqrt{3}=5\text{ mK}$$

#### 2.1.3 校准 MF5602 型热敏电阻元件的电测设备引入的不确定度 $u_3$

MF5602 型负温度系数热敏电阻元件测量范围为 20~50 K，相对灵敏度为 10%。采用美国 FLUKE 公司 1590 超级电阻测温仪及 2590 扫描开关测量标准套管铂电阻温度计（主标准器）的电阻值，在  $100\ \Omega\sim 500\ \text{k}\Omega$  输入，采用  $10\ \text{k}\Omega$  的内部参考电阻和  $0.002\text{ mA}$  的测试电流时，电阻准确度为  $120\times 10^{-6}$ 。考虑到校准过程中采用的最小测试电流为  $0.001\text{ mA}$ ，故计算时假设在测试电流为  $0.001\text{ mA}$  比测试电流在  $0.002\text{ mA}$  时电阻准确度降低 10 倍，测试电阻测量不确定度为（按均匀分布）：

$$u_3=(10\times 120\times 10^{-6} R/10\%R)/\sqrt{3}=8\text{ mK}$$

#### 2.1.4 低温恒温器温度波动带来的影响引入的不确定度 $u_4$

由测试得知，低温恒温器在 20~50 K 之间在典型点的最大温度波动度分别为  $\pm 3\text{ mK}/30\text{ min}$ ，实际分度过程中采用  $\pm 20\text{ mK}$  做不确定度评定。则温度波动引入的不确定度为：

$$u_4=20/\sqrt{2}=14\text{ mK}$$

2.1.5 低温恒温器温度不均匀带来的影响引入的不确定度  $u_5$

根据低温恒温器的设计原理、使用经验及检定证书得知低温恒温器最大温差小于 5 mK, 按均匀分布计算, 因此温度不均匀引入的不确定度为:

$$u_5=5/\sqrt{3} \approx 3 \text{ mK}$$

2.1.6 数据拟合引入的不确定度  $u_6$

在热敏元件的校准过程中, 需在一系列温度点上与标准温度计做比较测量, 测量的温度值和电阻值数据, 采用 5 次方的最小二乘法拟合, 公式为:

$$\frac{1}{T}=a_0+a_1(\ln R)+a_2(\ln R)^2+a_3(\ln R)^3+\cdots$$

由编号为 142 的 MF5602 型负温度系数热敏电阻元件测量值求出的电阻、温度和电阻灵敏度值如表 1 所示。

表 1 MF5602 在各温度点的电阻值、温度计算值和电阻灵敏度

Tab. 1 Values of resistance, temperature and resistance sensitivity of MF5602 at each temperature point

测点 序号	标准器温度 测量值/K	电阻值 /kΩ	温度计 算值/K	偏差 ΔT/mK
1	20.326 4	65.542 2	20.328 1	1.7
2	20.440 1	63.115 3	20.438 7	-1.4
3	21.841 2	39.770 1	21.840 0	-1.2
4	23.556 1	23.548 4	23.557 0	0.9
5	25.029 8	15.568 4	25.031 7	1.9
6	26.676 1	10.193 9	26.672 3	-3.8
7	28.132 6	7.200 4	28.134 9	2.3
8	30.168 7	4.623 6	30.172 8	4.1
9	32.580 6	2.895 3	32.570 6	-10.0
10	35.018 6	1.885 8	35.021 6	3.0
11	37.562 2	1.264 2	37.561 4	-0.8
12	40.012 3	0.889 9	40.023 1	10.8
13	45.060 5	0.476 7	45.048 6	-11.9
14	49.899 0	0.287 5	49.903 4	4.4

利用最小二乘法公式拟合出的标准偏差作为数据拟合引入的不确定度:

$$u_6=S_{14}(\Delta T_i)=6 \text{ mK}$$

考虑到在实际测量过程中, 拟合偏差会因所取测量点的数量和测量点间的温度差异程度、实测结果和拟合方程次数而有所改变, 因此在实际评定过程中可将此不确定度分量稍做扩大, 因此可取  $u_6=8 \text{ mK}$

对影响测量 MF5602 型负温度系数热敏电阻元件的结果的 6 个不确定度分量作出评定, 如表 2 所示。

表 2 不确定度分量的评定

Tab. 2 Evaluation of uncertainty components

分量	不确定度来源	评定方法	k 值	不确定度/mK
$u_1$	主标准器引入	B 类	2	5
$u_2$	主标准器的电测设备引入	B 类	1.732	5
$u_3$	校准热敏电阻元件的电测设备	B 类	2	8
$u_4$	恒温器温度波动	B 类	1.414	4
$u_5$	恒温器温度不均匀	B 类	1.732	3
$u_6$	数据拟合引入	B 类	-	8

2.2 MF5602 型负温度系数热敏电阻元件合成标准不确定度的评定

由 6 个不确定度分量可以得出合成标准不确定度为:

$$u_c=\sqrt{u_1^2+u_2^2+u_3^2+u_4^2+u_5^2+u_6^2}=15 \text{ mK}$$

2.3 MF5602 型负温度系数热敏电阻元件扩展不确定度的评定

在测量中始终存在误差, 当系统误差做了修正, 但误差仍然存在, 测量结果的置信概率一般取值为 95%, 则置信因子  $k=2$ 。那么火箭发动机用低温热敏电阻温度计校准装置总不确定度为:

$$U=ku_c \text{ (当置信因子 } p=95\% \text{ 时, } k=2)$$

$$U=2\times u_c=30 \text{ mK}$$

### 3 结论

对火箭发动机用低温热敏电阻温度计校准装置进行了不确定度的分析和评定,认为主标准器、主标准器以及被检温度传感器的电测设备、低温恒温器的温度波动度及不均匀性、数据拟合等对不确定度的影响较大。火箭发动机用低温热敏电阻温度计校准装置的测量结果不确定度为 30 mK,满足火箭发动机试验过程中对热敏电阻温度计校准的技术要求。综上所述,北京航天试验技术研究所建立的火箭发动机用低温热敏电阻温度计校准装置的测量不确定度符合考核评审要求,可以进行重复性和稳定性的评定,并进一步验证,建立国防计量标准。

#### 参考文献:

- [1] 国家质量技术监督局. JJF1059-1999 测量不确定度评定与表示[S]. 北京:中国计量出版社, 1999.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1094-2002 测量仪器特性评定[S]. 北京:中国计量出版社, 2003.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1170-2007 负温度系数

低温电阻温度计校准规范 [S]. 北京:中国计量出版社, 2007.

- [4] 龙包庚. 国防计量标准的建立运行与考核指南[M]. 北京:中国计量出版社, 2003.
- [5] 林景星, 陈丹英. 计量基础知识[M]. 北京:中国标准出版社, 2005.
- [6] 王忠兵, 吴蕾, 赵肃莹, 等. 掺杂对 Ni-Mn-O 系 NTC 热敏陶瓷及其电学性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2009 (6): 927-931.
- [7] HOGE H J. Useful procedure in least squaresm and tests of some equations for thermistors[J]. Review of Scientific Instrument, 1988, 59(11): 975-979.
- [8] 兰玉岐, 妥万禄, 常爱民, 等. SrCoO<sub>3-δ</sub> 陶瓷材料的导电机理和低温热敏特性 [J]. 电子元件与材料, 2006, (10): 44-46.
- [9] 中华人民共和国电子行业军用标准. SJ 50601/1-1998 MF5602 型、MF5604 型低温热敏电阻器详细规范 [S].北京:中国计量出版社, 1998.
- [10] 兰玉岐, 姜迎春, 陈光明, 等. MF5602 型低温热敏电阻计的特性研究[J]. 低温工程, 2011 (4): 57-59.
- [11] 芳侠, 邵坤鹏, 刘迪. 计量标准测量过程的统计控制的应用[J]. 电子设计工程, 2011, 19(17): 84-87.
- [12] 张晓光, 刘艳, 艾澜, 等. 通信开关电源的电磁兼容性 [J]. 现代电子技术, 2011, 34 (20): 187-189.

(编辑: 马 杰)

(上接第 19 页)

### 3 结论

1) 蓄热材料、蓄热阵设计技术、超高温阀和预热燃烧器等是蓄热式加热器研制的主要难点,也是当前亟待解决的工程问题。

2) 在蓄热式加热器研制时需结合我国陶瓷材料的水平,充分借鉴国外的设计、建设与使用经验,研制初期重点研究纯刚玉陶瓷材料的性能,完成 Ma 6 的蓄热阵加热器。

#### 参考文献:

- [1] 约翰·霍普金斯大学应用物理实验室编. 冲压发动机技术(下册) [M]. 李存杰, 司徒明, 译. 北京:国防工业出版社, 1980.

- [2] ROGERS R C. Effects of test facility contaminants on supersonic hydrogen-air diffusion flames[C]// Proceedings of 23rd JANNAF Combustion Meeting. Tipo de recurso: Johns Hopkins University, 1986: 377-390.
- [3] PELLET Gerald. Review of air vitiation effects on scram-jet ignition and flameholding combustion processes, AIAA-2002-3880 [R]. USA: AIAA, 2002.
- [4] MCDANIEL J C, Jr., KRAUSS R H. Test gas vitiation effects in a dual-mode combustor, AIAA-2003-6960 [R]. USA:AIAA, 2003.
- [5] 罗飞腾, 宋文艳, 刘昊. 污染空气对氢燃料超声速燃烧室性能的影响[J]. 推进技术, 2010, 31(4): 401-405.
- [6] HEDRICK W S, DECOURSIN D G. Storage heater design study for the hypersonic true temperature tunnel, AEDC-TDR-64-48 (AD442305) [R]. [S.l.]: Fluidyne Engineering Corp., 1964.

(编辑: 王建喜)