

# 热敏电阻元件低温校准方法研究

董 雪, 骆明强

(北京航天试验技术研究所, 北京, 100074)

**摘 要:** 介绍了热敏电阻元件低温校准系统的校准原理及校准关键技术, 以 MF5602 型和 MF5604 型负温度系数热敏电阻元件为例, 对校准系统和关键技术、校准方程以及数据拟合方法进行了研究, 提出了火箭发动机用热敏电阻元件在低温环境下的校准方法。

**关键词:** 热敏电阻元件; 低温校准; 校准方法; 数据拟合

**中图分类号:** V44-34   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-9374 (2013) 04-0092-05

## Research on low temperature calibration method of thermistors

DONG Xue, LUO Ming-qiang

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

**Abstract:** The calibration principle and key technology of low temperature calibration system for thermistors are introduced. Taking MF5602 and MF5604 thermistors as examples, thermistor calibration system, key technology, calibration equation and data fitting method were studied. The low temperature calibration method of thermistors applied to rocket engines is proposed.

**Keywords:** thermistor; low temperature calibration; calibration method; data fitting

## 0 引言

热敏电阻元件是以 Mn, Ni, Cu, Fe 及 Co 等过渡金属氧化物在 1 000~1 300 ℃高温烧结而成的尖晶石型半导体陶瓷<sup>[1]</sup>。测温范围为 20~50 K 和 77~120 K 的 MF5602 型和 MF5604 型负温度系数热敏电阻元件 (negative temperature coefficient,

NTC) 具有测量温区合适、灵敏度高、准确度高、稳定性好及自热误差小等优点, 可用于火箭发动机内低温推进剂温度测量<sup>[2]</sup>。热敏电阻元件是火箭发动机试验测温系统中的关键因素, 其性能直接关系到火箭发动机试验中温度测量的可靠性和准确性。科学合理的校准方法可以减少热敏电阻元件的温度偏差, 从而提高以热敏电阻元件为基础的热敏电阻温度传感器的精度。

收稿日期: 2013-03-22; 修回日期: 2013-06-04

作者简介: 董雪 (1985—), 女, 助理工程师, 研究领域为温度计量、传感器研发

1 校准系统与校准原理

1.1 校准系统及工作原理

热敏电阻元件低温校准系统由标准温度计、低温恒温器、温度控制系统、温度测量系统和数据采集系统及热敏电阻元件组成。校准系统原理图如图 1 所示。

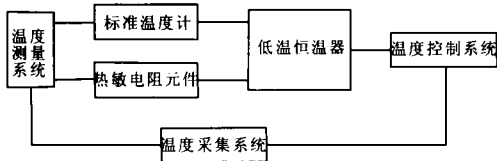


图 1 热敏电阻元件低温校准系统原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of low temperature calibration system for thermistors

校准系统中由低温恒温器提供均匀稳定的温度场，标准温度计作为标准器与被检热敏电阻元件共同放置于低温恒温器中，温度控制系统控制低温恒温器的温度，温度测量系统和数据采集系

统测量并采集校准点的温度 ( $T$ ) 及在该温度下热敏电阻的电阻值 ( $R$ )，数据处理软件计算热敏电阻元件的温度-电阻特性方程，给出被检热敏电阻元件  $R \sim T \sim dR/dT$  分度表。校准系统可用于在 20~120 K 的温度范围内热敏电阻元件的校准，适用于比较法校准 (检定)。

1.2 关键技术

根据 JJF 1170-2007 《负温度系数低温电阻温度计校准规范》及 Q/sd 20-2008 《火箭发动机试验用热敏电阻元件校准规范》要求，MF5602 和 MF5604 型热敏元件应分别在 20~50 K，77~120 K 温度范围内进行分度。低温恒温器应可连续变温，温度波动度小于等于  $\pm 5 \text{ mK}/15 \text{ min}$ ，恒温铜块最大温差小于 5 mK。因此，在热敏电阻元件低温校准系统中，低温恒温器的温度控制是关键技术。

低温恒温器利用真空绝热低温比对原理，由恒温铜块、分子泵真空机组、温控仪、低温广口实验杜瓦及温度控制软件等组成。低温恒温器温度控制原理如图 2 所示。

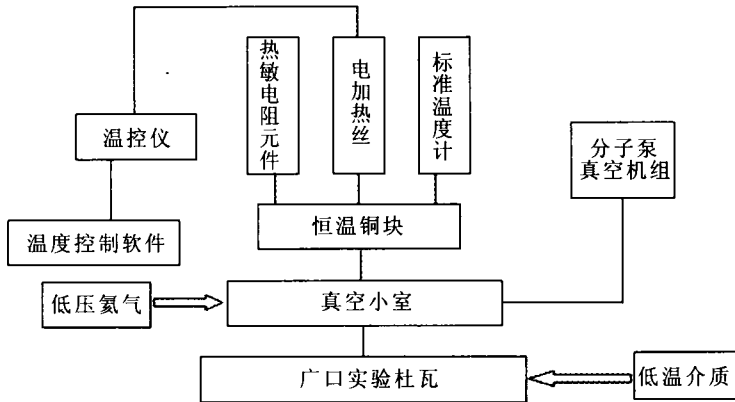


图 2 低温恒温器温度控制原理图  
Fig. 2 Temperature control principle of cryostat

低温广口实验杜瓦中的低温介质作为整个装置的冷源，使装有恒温铜块（铜块上装有被测热敏电阻元件和标准温度计）的真空小室置于低温环境下。为实现在 20~120 K 范围内连续变温的功能，须利用低压氦气作为热交换介质，且使低温恒温器真空小室处于高真空的环境中，才能保证恒温铜块的温度均匀性和稳定性，同时减少低温介质损耗量。利用温控仪控制加热量从而控制

恒温铜块温度，当恒温铜块温度达到设定温度时，通过数据采集系统采集到被检热敏电阻元件与标准温度计的相关数据，从而实现对被检热敏电阻元件的校准。在这种均温且绝热的设计下，热敏电阻元件处于均匀的温场环境中，既能恒温又能避免漏热，从而达到温场的稳定与均匀。本校准系统中低温恒温器具体实现技术指标如下：

- 1) 温区范围为 20~120 K，可实现连续变温；

- 2) 15 min 温度波动度小于 4 mK;
- 3) 恒温铜块最大温差小于 4 mK。

## 2 热敏电阻元件的校准方法

### 2.1 热敏电阻元件的自热效应

在低温温区, 负温度系数热敏电阻元件的电阻值增大, 由热敏电阻自热效应引起的测量误差相应增大。自热效应引起的测量误差可通过式(1)计算:

$$S_H = \frac{R_2 - R_1}{\left[ (I_2/I_1)^2 - 1 \right] dT} \quad (1)$$

式中:  $S_H$  为自热效应引起的测量误差, mK;  $I_1$  和  $I_2$  为测量电流, mA;  $R_1$  和  $R_2$  为电流值为  $I_1$  和  $I_2$  时的被测电阻值, kΩ。

根据 JJF 1170-2007 《负温度系数低温电阻温度计校准规范》及 Q/sd 20-2008 《火箭发动机试验用热敏电阻元件校准规范》要求, 一般情况下, 热敏电阻元件的工作电流为 1~10 μA,  $I_2$  为  $I_1$  的 1.5 倍或 2 倍。在额定工作条件下, 热敏电阻元件允许的由自热效应引起的误差应小于 5 mK。

### 2.2 校准方程的选择

热敏电阻的温度特性存在严重的非线性, 因此, 用在精密测温系统时, 必须对它进行高精度补偿。常用的 NTC 热敏电阻非线性补偿方法有:

- 1) NTC 热敏电阻经验公式法, 在较宽温度范围测量应用时, 测温误差较大且过程复杂;
- 2) 直接多项式拟合法, 在宽温度范围应用时, 需拟合多个关系式, 一旦温区超出, 精度不能保证, 应用较为复杂;
- 3) 硬件电路补偿法, 在一定的温度范围内能得到较满意的补偿效果, 但在宽温度范围使用时存在电路复杂、可靠性和准确度低等不足;
- 4) Steinhart-Hart 方程校正法, 现今已被广泛用于计算 NTC 热敏电阻温度计, 应用 Steinhart-Hart 方程能够提高 NTC 热敏电阻温度计的校准精度<sup>[4]</sup>。

Hoge 采用 Steinhart-Hart 校准方程模拟了

NTC 电阻温度计电阻值和温度之间的关系, 评估的标准是均方根值和残差曲线, 结果表明, 随着拟合校准方程阶数的增加, 温度计的精度随之提高<sup>[5]</sup>。采用 Steinhart-Hart 方程对热敏电阻元件的  $R$ - $T$  特性进行校正, 利用最小二乘法对实测数据进行四次方拟合计算, 得出校准方程的系数, 计算出热敏电阻元件的温度计算值, 进而给出热敏电阻元件的分度表。采用的校准方程如下:

$$1/T = a_0 + a_1 \ln R + a_2 (\ln R)^2 + a_3 (\ln R)^3 + a_4 (\ln R)^4 \quad (2)$$

式中:  $a_0, a_1, a_2, a_3$  及  $a_4$  为常数。

### 2.3 数据处理

$$\text{令: } y = \frac{1}{T}, \quad x = \ln R$$

则

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 \quad (3)$$

将  $T, R$  代入可得如下矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & x_1^3 & x_1^4 \\ 1 & x_2 & x_2^2 & x_2^3 & x_2^4 \\ 1 & x_3 & x_3^2 & x_3^3 & x_3^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & x_n^3 & x_n^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

令: 拟合误差为  $Z, Z = [Z_1 \ Z_2 \ Z_3 \ \cdots \ Z_n]$

温度向量为  $Y, Y = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ \cdots \ y_n]^T$

系数向量为  $A, A = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4]$

$$\text{多项式矩阵 } D, D = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & x_1^3 & x_1^4 \\ 1 & x_2 & x_2^2 & x_2^3 & x_2^4 \\ 1 & x_3 & x_3^2 & x_3^3 & x_3^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & x_n^3 & x_n^4 \end{bmatrix}$$

则

$$Z = DA - Y \quad (5)$$

根据最小二乘原理, 有:

$$D'DA = D'Y \quad (6)$$

解方程即可求出方程系数。

MATLAB 软件以矩阵计算为基础, 集成了数

值计算、数学分析、可视化和编程等功能,在数据曲线拟合上具有很强的功能,可以直观地体现出数据的规律性<sup>[9]</sup>,运用 MATLAB 工具箱的 polyfit ( $R, T, n$ ) 对热敏电阻元件的  $R$ - $T$  特性进行最小二乘法四次方拟合运算,可便捷得出校准方程的系数,最终计算出热敏电阻元件的温度计算值 ( $T_0$ ) 和偏差 ( $d$ )。

3 试验验证

分别用 MF5602 型和 MF5604 型热敏电阻元件进行了低温校准试验,验证热敏电阻元件低温系统及校准方法。

3.1 自热效应

试验中,选取电流  $I_1$  为 5  $\mu\text{A}$ , 电流  $I_2$  为

10  $\mu\text{A}$ , 测得数据如下所示。

MF5602 型热敏电阻:

$$R_1=71.961\ 6\ \Omega$$

$$R_2=142.428\ 8\ \Omega$$

$$T_1=24.751\ 0\ \text{K}$$

$$T_2=24.751\ 5\ \text{K}$$

MF5604 型热敏电阻:

$$R_1=752.707\ 5\ \Omega$$

$$R_2=1497.262\ 6\ \Omega$$

$$T_1=77.426\ 9\ \text{K}$$

$$T_2=77.430\ 0\ \text{K}$$

根据公式 (1) 可得 MF5602 型热敏电阻元件自热效应为 0.14 mK, MF5604 型热敏电阻元件自热效应为 0.24 mK。

3.2 电阻-温度特性

不同温度下, MF5602 型和 MF5604 型热敏电阻元件的温度拟合值以及偏差见表 1 和表 2。

温度拟合曲线与温度偏差曲线如图 3 和图 4 所示。

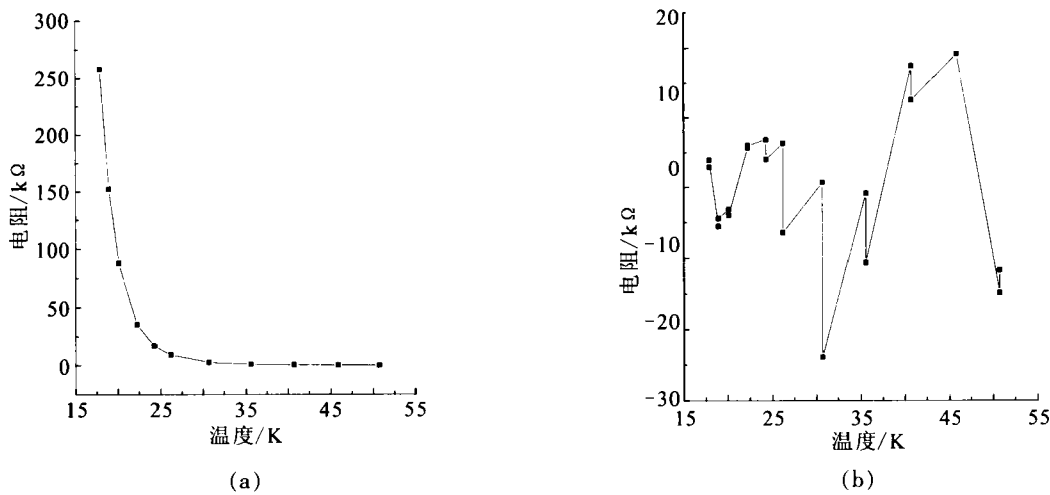


图 3 MF5602 型热敏电阻元件温度拟合曲线与温度偏差曲线  
Fig. 3 Temperature fitting curve and deviation curve of MF5602 thermistor

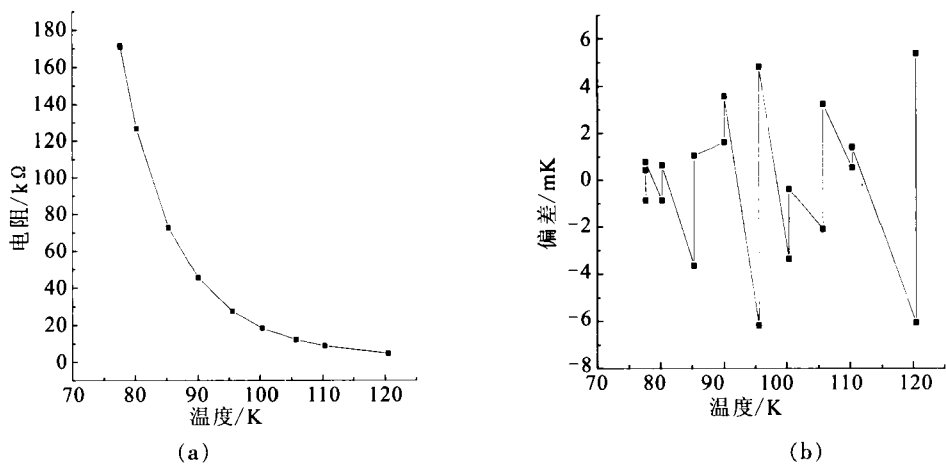


图 4 MF5604 型热敏电阻元件温度拟合曲线与温度偏差曲线  
Fig. 4 Temperature fitting curve and deviation curve of MF5604 thermistor

表 1 MF5602 型热敏电阻元件温度拟合值与偏差

Tab. 1 Temperature fitting value and deviation of MF5602 thermisto				
序号	电阻值/kΩ	温度测量值/K	温度拟合值/K	偏差/mK
1	257.825 3	17.896 7	17.899 6	2.888
2	257.755 7	17.896 2	17.900 1	3.902
3	152.308 2	18.945 3	18.939 7	-5.570
4	152.039 7	18.947 8	18.943 3	-4.455
5	88.081 33	20.110 5	20.107 4	-3.131
6	87.937 49	20.115 0	20.111 0	-4.003
7	35.339 35	22.281 6	22.287 2	5.640
8	35.303 16	22.283 9	22.289 9	5.972
9	16.957 12	24.292 8	24.299 6	6.799
10	17.007 71	24.286 9	24.290 9	3.989
11	9.162 468	26.201 9	26.208 2	6.292
12	9.205 936	26.199 1	26.192 6	-6.461
13	2.735 205	30.717 1	30.717 8	0.668
14	2.750 708	30.717 8	30.693 9	-23.929
15	0.985 739	35.578 0	35.577 1	-0.901
16	0.987 388	35.578 8	35.568 2	-10.643
17	0.413 912	40.730 8	40.748 2	17.399
18	0.414 524	40.725 9	40.738 4	12.515
19	0.204 686	45.837 4	45.856 5	19.119
20	0.115 671	50.748 0	50.733 1	-14.922
21	0.115 626	50.748 4	50.736 7	-11.746

表 2 MF5604 型热敏电阻元件温度拟合值与偏差

Tab. 2 Temperature fitting value and deviation of MF5604 thermistor				
序号	电阻值/kΩ	温度测量值/K	温度拟合值/K	偏差/mK
1	170.945 4	77.653 0	77.652 1	-0.871
2	171.678 3	77.616 0	77.616 4	0.431
3	171.671 0	77.616 0	77.616 8	0.786
4	126.596 0	80.224 0	80.223 1	-0.874
5	126.549 6	80.225 7	80.226 3	0.644
6	72.659 0	85.339 5	85.335 9	-3.638
7	72.622 2	85.339 7	85.340 8	1.055
8	45.515 1	90.043 8	90.045 4	1.616
9	45.502 7	90.044 7	90.048 3	3.576
10	27.534 8	95.577 0	95.570 8	-6.175
11	27.506 6	95.577 8	95.582 6	4.824
12	18.422 6	100.382 0	100.378 6	-3.361
13	18.413 9	100.384 9	100.384 5	-0.390
14	12.196 4	105.720 1	105.718 0	-2.094
15	12.192 4	105.719 2	105.722 4	3.229
16	8.763 7	110.326 1	110.326 6	0.529
17	8.762 8	110.326 7	110.328 1	1.410
18	4.550 1	120.468 9	120.462 8	-6.057
19	4.547 6	120.466 6	120.472 0	5.356

4 结束语

根据火箭发动机低温推进剂温度测量要求，建立了热敏电阻元件低温校准系统，解决了系统中低温温度均匀性、稳定性等关键技术问题，提出了以 Steinhart-Hart 校准方程进行高精度补偿、利用最小二乘法进行四次方拟合计算的校准方法，用 MF5602 型和 MF5604 型负温度系数热敏电阻元件进行了试验验证，表明热敏电阻元件低温校准系统满足计量检定要求，可以提高以热敏电阻元件为基础的温度传感器的测量精度，保证火箭发动机试验中温度测量的可靠性和准确性。

参考文献：

[1] 张惠敏, 常爱民, 赵青. CoMnNiO 系 NTC 热敏半导体陶

瓷烧结特性与电性能研究[J]. 微纳电子技术, 2007 (7): 95-97.  
[2] 管理. 热敏电阻在液体火箭发动机试验中的应用[J]. 低温工程, 2007 (6): 54-58.  
[3] STEINHART I S, HART S R. Calibration curves for thermistors[J]. DeepSea Research, 1968, 15(3): 497-503.  
[4] ALEXANDER M D, MACQUARRE K T B. Toward standard thermistor calibration method and data correction spreadsheets[J]. Ground Water Monitoring&Remediation, 2005, 25(4): 75-81.  
[5] HOGE H J. Useful procedure in least squares, and tests of some equations for thermistors[J]. Review of Scientific Instrument, 1988, 59(8): 975-979.  
[6] 尚宇, 兰玉岐. 低温传感器测量数据基于 MATLAB 的处理与分析[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(2): 197-201.

(编辑：马 杰)