

# NTC 热敏电阻的标定及阻温特性研究

关奉伟, 刘 巨, 于善猛, 江 帆, 杨近松

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘 要:** NTC 热敏电阻的阻值随温度升高而降低, 阻值与温度呈非线性变化关系, 在实际应用中通常需要进行逐只标定以确定阻温特性。本文以航天热试验用 MF501 型热敏电阻器为例, 介绍了一种简易有效的标定及数据处理方法, 通过拟合残差、平均误差、传递误差对标定方法进行评估。结果表明, 在使用温度范围内, 该方法只需标定 3 个点, 就可以使标定误差控制在 0.45 °C 以内, 完全满足使用精度要求。随着适当增加标定点, 标定精度还可以进一步提高。

**关键词:** NTC 热敏电阻; 标定; 阻温特性; 误差分析

**中图分类号:** TP212.11; TN371 **文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI20112807.0069

## Calibration and R-T Characteristics of NTC Thermistor

GUAN Feng-wei, LIU Ju, YU Shan-meng, JIANG Fan, YANG Jin-song

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China)

**Abstract:** The resistance of NTC thermistors is decrease with the increase of temperature, and they generally have nonlinear resistance(R)-temperature(T) behavior. In practice, such thermistor sensor needs to be individually calibrated over the operating temperature range to ascertain the R-T characteristics. The MF501 thermistor applied in spacecraft thermal test was illustrated in this paper to introduce a simple and effective calibration and data processing method. The fitting residual, average error and function transfer error were selected to assess the adequateness of the method. The result showed that the calibration error could be controlled within 0.45 °C based on three-point calibration over the operating temperature range and the precision was fully satisfied. Calibration precision could be improved with increasing the calculated calibration points.

**Keywords:** NTC thermistor; calibration; R-T characteristics; error analysis

## 1 引言

热敏电阻自 1940 年研制成功以来, 发展非常迅速<sup>[1]</sup>, 由于其具有灵敏度高、体积小、结构简单以及响应时间短等优点, 使得其由最初作为通信仪器的温度补偿及自动放大调节装置, 演变为广泛应用于家电、汽车乃至航空航天等各领域的温度传感器。NTC (Negative temperature coefficient) 热敏电阻又称负温度系数热敏电阻器, 其电阻值随温度升高而降低, 与之相反的是正温度系数热敏电阻器, 即 PTC (Positive temperature coefficient) 热敏电阻, 其阻值随温度升高而增加。NTC 热敏电阻器的阻值与温度呈非线性的指数变化关系, 元件的互换性较差, 所以在实际使用中通常都需要进行逐支标定, 以确定每支热敏电阻的阻温特性。本文介绍一种简易有效的 NTC 热敏电阻器标定及相应的数据处理方法。

## 2 热敏电阻标定

热敏电阻的标定是确定电阻值  $R$  与温度  $T$  之间的变化关系, NTC 热敏电阻的  $R$ - $T$  特性曲线如图 1 所示。

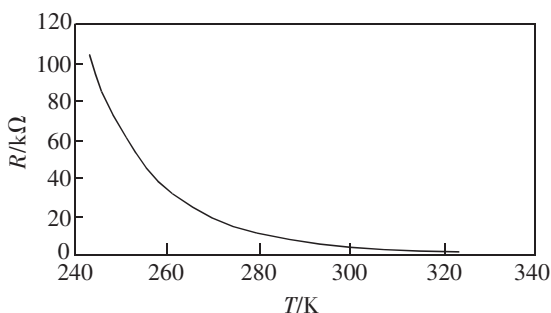


图 1 NTC 热敏电阻的  $R$ - $T$  特性曲线

关于阻值的常用测量手段有单电桥法 (两线制、三线制、四线制)、双电桥法、三引线电位法、四引线电位法、恒流源法、恒压源法、不平衡电桥法、自动平衡电桥法等, 对于精密测量, 多选用电桥法或电位差计法, 工业测量常用不平衡或平衡电桥法以及数显仪表<sup>[1]</sup>。常用的控温设备有酒精槽、水槽、油槽、盐槽、加热炉以及新近发展较快的热管恒温

槽等。温度测量可以采用液体温度计、热电阻温度计等。

目前的测量手段已经可以使热敏电阻的标定精度达到几十 mK 的量级, 但在实际应用中, 很多场合并不需要很高的控温精度, 并且精度高的测量手段相应的实验设备也较复杂, 所以热敏电阻的标定应该在实际使用 (测温/控温) 范围内, 在满足精度要求的基础上, 综合考量人力、时间以及经济成本, 选择适用的标定设备以及适当的数据处理方法。下面以航天热控系统热试验用 MF501 型热敏电阻器的标定为例, 介绍一种简易有效的标定方法。在航天器热控分系统中, 应用的热敏电阻多用于一般的温度监测, 对精度要求不高<sup>[2]</sup>, 通常要求使用范围  $0\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 控温精度  $0.1\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

实验设备包括 DC-2006 型恒温槽 (稳定性  $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、标准水银温度计 ( $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、数字万用表 (精度  $\pm 10\text{ }\Omega$ )、纸胶带、塑料试管若干、真空脱脂棉、数据记录设备等。标定设备使用示意图如图 2 所示。

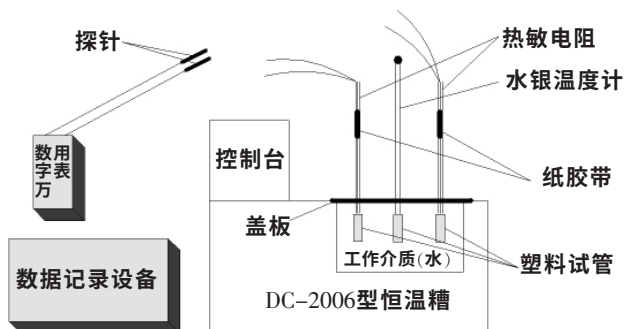


图 2 标定设备使用示意图

将热敏电阻装入塑料试管中, 管口用真空脱脂棉密封。水银温度计装入试管, 同样用脱脂棉密封。恒温槽的盖板开有安装孔, 装有热敏电阻和温度计的试管通过安装孔插入恒温槽工作介质中, 各试管插入深度尽量保持一致, 温度计竖直固定, 热敏电阻的引线规整后固定, 安装孔与热敏电阻以及温度计的间隙用脱脂棉密封。标定点取 7 个, 分别是  $0, 10, 15, 20, 25, 35, 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 通过恒温槽控制热敏电阻温度, 标定温度以水银温度计读数为准, 各

标定点待温度充分稳定后开始测量阻值。使用数字万用表测量各热敏电阻的零功率电阻值, 为避免操作误差, 每只电阻的阻值测量 3 组, 然后取算术平均值。所有数据均做记录存档。

这种标定方法可以实现热敏电阻的批量标定, 并且阻值测量操作简便, 实验中水银温度计与热敏电阻采用相同的处置方式, 可以有效保证测温的准确性。

### 3 标定结果处理方法及误差分析

#### 3.1 处理方法

热敏电阻在实际的工程应用当中, 需要确定整个使用范围内的阻温关系, 采用实验方法逐点标定虽然直接准确, 但是使用时采用查表插值的方法十分不便, 而且这种方法对硬件电路设计和存储器容量都有较高要求, 所以根据热敏电阻的阻温特性选择少数标定点, 再利用合适的分析方法确定电阻器在整个使用范围内的  $R-T$  特性才是一个比较理想的工作思路。

热敏电阻的阻温特性从本质上来说满足指数关系, 航天应用中依据文献[3], 阻值与温度的关系为:

$$R_2 = R_1 e^{B(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1})} \quad (1)$$

其中,  $B$  为热敏指数,  $K$ ;  $T$  为绝对温度,  $K$ ;  $R_1, R_2$  为温度点  $T_1$  与  $T_2$  相应的电阻值,  $k\Omega$ 。

每两组  $(T, R)$  数据, 即可以计算得到一个常数  $B$  值, 实验标定了 7 个点,  $B$  值总数有  $C_7^2$  个, 确定最终的  $B$  值可以采用逐差法、多项式拟合、分段线性拟合、分段多项式拟合等。逐差法利用相邻两点计算  $B$  值, 当相邻间隔点温度差值分别取为 1, 5, 10  $^{\circ}C$  时, 结果表明温度间隔 10  $^{\circ}C$  获得的  $B$  值误差较小<sup>[4]</sup>; 多项式拟合利用多项式描述  $R-T$  特性, 利用多组数据计算确定多项式系数。分段线性拟合在分段区间内  $B$  值取为常数, 分段多项式拟合在各温度区间分别做多项式拟合。分段二次拟合可以达到很高的精度<sup>[4-5]</sup>, 不过计算量较大, 当使用温度范围比较宽时, 分段多项式拟合依然可以很好地控制

拟合误差<sup>[6]</sup>。分段线性拟合的拟合精度比分段多项式拟合低, 但是应用中相对简单一些, 总体来说分段拟合应用起来都会比较繁琐。另外还有变换之后的多项式拟合, 即利用多项式描述  $\ln R_T - 1/T$  之间的关系, 这实际上是对传统的  $R-T$  函数的指数项做的多项式拟合, 二阶多项式拟合效果最好, 三阶以上描述精度不再明显提高而且可能失真<sup>[7]</sup>。文献[8]描述的数学模型也是对  $\ln R_T - 1/T$  关系的拟合, 它有可能获得更高的精确度。如果利用多项式描述  $1/T - \ln R_T$  之间的关系, 即得到所谓的 Steinhart-Hart 公式和 Hoge 方程, 利用 Steinhart-Hart 公式来计算小范围的  $R-T$  对应关系会从系统上增加很大的计算量。在拟合精度方面, 对比指数方程、Steinhart-Hart 公式、Hoge-1、Hoge-2、Hoge-3、Hoge-4、Hoge-5 发现, Hoge-3 方程可以得到相对更为理想的结果<sup>[9]</sup>。除此之外, 对于  $B$  值的模拟还有一种 CM(Combined model)<sup>[10]</sup>, 它是传统的指数函数和 Steinhart-Hart 公式两种方法的结合, 通常拟合精度在 0.03  $^{\circ}C$  以内。

采用何种处理方法应该根据工程应用的实际需求确定, 理想的方法是在使用温度范围内, 能够确定统一的特性曲线、同时又能很好地满足精度要求的处理方法。针对本文采用的 MF501 型热敏电阻提出如下数据处理方法, 首先对 (1) 式做如下变换, 令  $y = \ln \frac{R_1}{R_2}$ ,  $x = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}$ , 方程两边再取对数, 则 (1) 式转化为:

$$\ln y = Bx \quad (2)$$

选取 0, 25, 50  $^{\circ}C$  3 个标定值, 计算得到 3 组  $(x, y)$  数据, 利用最小二乘法 and 公式 (2) 做数据拟合确定  $B$  值:

$$B = \frac{3 \sum_{i=1}^3 y_i x_i - \left( \sum_{i=1}^3 y_i \right) \left( \sum_{i=1}^3 x_i \right)}{3 \sum_{i=1}^3 x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^3 x_i \right)^2} \quad (3)$$

由 (3) 式计算得到的  $B$  值见表 1。

由每只热敏电阻器的 25  $^{\circ}C$  的实验标定值及相应的热敏指数  $B$  估算使用范围内其余各温度点的阻值。

表1 热敏指数B值

| 编号 | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| B值 | 4 006 | 4 015 | 4 052 | 3 956 | 3 995 | 4 050 | 3 999 | 4 020 | 4 053 | 4 016 |

## 3.2 误差分析

## 3.2.1 拟合残差

标定方程的拟合残差定义如下:

$$\Delta E_i = T_i - \hat{T}_i$$

$\Delta E_i$  为方程拟合残差,  $T_i$  是温度预期值,  $\hat{T}_i$  为温度拟合值, 下标  $i$  代表温度, 各标定点分析结果见表 2。

从表 2 可知, 各标定点的拟合残差都在 0.3 °C 以内。

表2 各热敏电阻拟合残差

| 序号 | $\Delta E_0$ | $\Delta E_{10}$ | $\Delta E_{15}$ | $\Delta E_{20}$ | $\Delta E_{25}$ | $\Delta E_{30}$ | $\Delta E_{50}$ |
|----|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1  | 0.13         | 0.20            | 0.22            | 0.05            | 0.04            | 0.06            | 0.18            |
| 2  | 0.08         | 0.24            | 0.23            | 0.07            | 0.02            | 0.10            | 0.29            |
| 3  | 0.12         | 0.01            | 0.07            | 0.01            | 0.04            | 0.06            | 0.16            |
| 4  | 0.08         | 0.06            | 0.13            | 0.01            | 0               | 0.06            | 0.11            |
| 5  | 0.11         | 0.30            | 0.29            | 0.12            | 0.04            | 0.19            | 0.16            |
| 6  | 0.13         | 0.15            | 0.19            | 0.04            | 0.07            | 0.08            | 0.17            |
| 7  | 0.13         | 0.28            | 0.28            | 0.08            | 0.02            | 0.17            | 0.18            |
| 8  | 0.10         | 0.28            | 0.28            | 0.09            | 0.02            | 0.08            | 0.14            |
| 9  | 0.09         | 0.22            | 0.22            | 0.05            | 0.07            | 0.11            | 0.13            |
| 10 | 0.11         | 0.27            | 0.26            | 0.12            | 0.02            | 0.18            | 0.16            |

## 3.2.2 平均误差

标定方程的平均误差定义如下:

$$|\Delta E|_{\text{ave}} = \frac{\sum |\Delta E_i|}{n}$$

平均误差可以反映拟合方程的精确度, 具体分析结果见表 3。

可以看出平均误差都在 0.2 °C 以内, 所以拟合的精确度比较高。

表3 拟合的平均误差

| 编号                        | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $ \Delta E _{\text{ave}}$ | 0.13 | 0.15 | 0.07 | 0.06 | 0.17 | 0.12 | 0.16 | 0.14 | 0.13 | 0.16 |

## 3.2.3 传递误差

实验中各直接测量量的误差通过误差传递会影响间接测量量的误差,  $T-R$  的函数关系为:

$$T = (\ln(R/R_{25})/B + 1/T_{25})^{-1} \quad (4)$$

令  $T = F(R, R_{25}, T_{25}, B)$ ,  $B = F(X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2, Y_3)$

则有  $\Delta T = \frac{\partial F}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial F}{\partial R_{25}} \Delta R_{25} + \frac{\partial F}{\partial T_{25}} \Delta T_{25} + \frac{\partial F}{\partial B} \Delta B$

其中,  $\Delta B = \frac{\partial F}{\partial X_1} \Delta X_1 + \frac{\partial F}{\partial X_2} \Delta X_2 + \frac{\partial F}{\partial X_3} \Delta X_3 + \frac{\partial F}{\partial Y_2} \Delta Y_2 +$

$$\frac{\partial F}{\partial Y_3} \Delta Y_3 = \pm 5K$$

$\Delta R = \Delta R_{25} = \pm 0.01 \text{ k}\Omega$ ,  $\Delta T = \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , 最终经推算得到  $\Delta T = \pm 0.15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

综合直接测量量的传递误差以及数据处理的拟合残差, 最终的标定误差在 0.45 °C 以内, 可以满足 0.1~1 °C 的控温精度要求。

## 4 结 论

对于 NTC 热敏电阻的标定, 本文采用的方法简单有效, 并且便于实现批量标定。利用拟合残差、

平均误差、传递误差对数据处理方法进行评估, 0.15 °C 以内, 综合评估标定误差控制在 0.45 °C 以内, 适当增加标定点的数量可以进一步提高标定精度。

## 参考文献

- [1] 王魁汉. 温度测量实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 张加迅, 王虹, 孙家林. 热敏电阻在航天器上的应用分析[J]. 中国空间科学技术, 2004(6): 54-59.
- [3] QJ1694-89. 热敏电阻温度传感器通用技术条件[S]. 北京: 航天工业部, 1989.
- [4] 徐海英, 董慧媛, 刘英, 等. NTC 热敏电阻 B 常数[J]. 电子器件, 2004, 27(3): 498-500.
- [5] 程双双, 姜平, 肖红升, 等. NTC 热敏电阻分段曲线拟合[J]. 煤矿机械, 2009, 30(10): 41-43.
- [6] 杜西亮, 孙慧明, 聂义祥. NTC 热敏电阻分段多项式拟合非线性补偿[J]. 传感器技术, 2005, 24(8): 13-15.
- [7] 杜以强. NTC 热敏电阻 R-T 特性探讨[J]. 航天返回与遥感, 2002, 23(1): 26-28.
- [8] 邢爱堂, 战立欣. 一种描述热敏电阻 R-T 特性的数学模型[J]. 山东科学, 2000, 13(2): 9-12.
- [9] Chen Chiachung. Evaluation of resistance-temperature calibration equations for NTC thermistors[J]. *Measurement*, 2009, 42: 1103-1111.
- [10] Fraden J. A two-point calibration of negative temperature coefficient thermistors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(4): 1901-1905.

作者简介: 关奉伟 (1984-), 男, 内蒙古通辽人, 硕士, 研究实习员, 2010年于北京航空航天大学获得硕士学位, 主要从事空间光学遥感器热控设计、热分析、热试验等方面的研究。E-mail: buaaguan@sina.com。

## 第一太阳能获 MCS 认证 叩开英国市场“敲门砖”

英国正准备对其上网电价补贴方案进行调整, 而调整后的补贴方案将仅保留住宅屋顶太阳能市场的补贴, 从而使得大规模太阳能项目丧失其经济效益。尽管如此, 福思第一太阳能 (First Solar, NASDAQ:FSLR) 的碲化镉 (CdTe) 薄膜太阳能组件还是通过了英国微型发电产品认证计划 (MCS) 的检测, 获得认证的产品为福思 3 系列组件, 型号为 FS-370 到 FS-385。

此前已有多家薄膜太阳能制造商的产品获得了英国 MCS 认证, 其中就包括另一家采用碲化镉技术的盛产太阳能公司 (Abound Solar)。

“MCS 认证是叩开英国市场的敲门砖,” 福思第一太阳能部件业务部门总裁 TK 卡伦巴赫 (TK Kallenbach) 表示, “通过 MCS 认证意味着我们为终端客户提供的光伏产品符合严格的国际标准。”

英国目前还有若干大规模太阳能项目将赶在上网电价补贴做出调整之前完工。根据已经公布的调整方案, 大规模太阳能项目须在 8 月 1 日前建成且实现并网发电。

目前尚不清楚是否有项目使用了福思第一太阳能的碲化镉组件。