

摘要: 针对传统工业铂热电阻任意温度点检定过程中计算繁琐的问题, 提出一种新型的恒温槽温度偏离值计算方法。首先研究了标准铂电阻温度计的温标内插公式与其反函数之间的误差值。再从标准铂电阻温度计的不同温度范围的温标内插公式以及差值函数出发, 推导出标准铂电阻不同电阻所对应温度的函数表达式。最后使用 FLUKE 1529 四通道便携测温仪的温度显示值作为标准值, 通过实验值与理论值的对比验证了内嵌算法误差, 并结合具体实际应用对改进方法的不确定度进行了评定, 满足检定要求。

关键词: 铂热电阻; 参考函数; 内插公式; 温度; 标准铂电阻温度计

中图分类号: TH811

文献标识码: A

文章编号: 1006-883X(2017)11-0034-05

收稿日期: 2017-08-29

# 工业铂热电阻全量程检测恒温槽偏离值的求解算法及测量结果的不确定度评定

黄元津 杜文岚

台州市计量技术研究院, 浙江台州 318000

## 一、引言

工业铂热电阻具有测温范围宽、测温精度高、稳定性好、便于实现温度控制等优点, 在各行业中有着极为广泛的应用。

我们在工业铂热电阻的日常检定工作中, 主要依据 JJG229-2010《工业铂、铜热电阻检定规程》对其进行检定/校准。随着检定技术的不断发展和成熟, 出现了各式各样针对工业铂热电阻的自动检定装置, 不过这些计算机软件大多数都只是针对 0℃、100℃这两个点, 但是在实际工作中很多客户需要检测特殊温度点。对这些特殊点进行数据处理是件十分头疼的问题, 不但计算过程复杂, 而且还很容易出错, 一旦出错会给客户带来极大的麻烦。传统计算方法为了解决这个问题, 往往需要计算  $W(t)$ 、 $dW(t)/dt$ , 而计算  $W(t)$  的理论值程序比较复杂, 尤其在负温段需采用隐函数, 无法直接得到  $W(t)$  的计算表达式, 只能采用“逐次逼近计算”的方法计算得到<sup>[1]</sup>。

本文从差值函数出发, 结合标准铂电阻温度计的温标内插公式的反函数, 推导出标准铂电阻的温度

与电阻之间的函数关系式, 并同时研究标准铂电阻温度计的温标内插公式与其反函数之间的误差值, 并进一步修正标准铂电阻的温度与电阻之间关系的表达式, 从而将测出的恒温槽温度的电阻值代入表达式得到恒温槽的实际温度, 继而得到恒温槽实际温度偏离名义温度的温度值。而在实际操作中, 由于本文采用 FULKE 1529 四通道便携测温仪, 内嵌算法, 只要输入二等标准铂电阻温度计相关的温度系数, 可直接显示温度值, 则可认为该温度值即为实际温度值, 再减去恒温槽的名义温度, 即可得恒温槽偏离温度值。该过程避免了计算不同温度下的  $W(t)$ 、和  $dW(t)/dt$ 。

## 二、二等标准铂电阻温度计的计算

### 1、参考函数以及反函数

温度范围 (-189.3442~+0.01)℃ 下温标定义的参考函数为:

$$\ln W_r(T) = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left( \frac{\ln(T/273.16) + 1.5}{1.5} \right)^i \quad (1)$$

其反函数为:

$$T/273.16 = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left( \frac{W_r(T)^{1/6} - 0.65}{0.35} \right)^i \quad (2)$$

偏差函数为:

$$\Delta W(T) = W(T) - W_r(T) = a_4(W(T)-1) + b_4(W(T)-1) \ln W(T) \quad (3)$$

温度范围 (0.01~419.527)°C 下的温标定义的参考函数为:

$$W_r(t) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left( \frac{t-481}{481} \right)^i \quad (4)$$

其反函数为:

$$t = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left( \frac{W_r(t) - 2.64}{1.64} \right)^i \quad (5)$$

偏差函数为:

$$\Delta W_s(t) = W(t) - W_r(t) = a_8(W(t)-1) + b_8(W(t)-1)^2 \quad (6)$$

在式 (1) ~ (6) 中  $A_0$ 、 $A_i$ 、 $B_0$ 、 $B_i$ 、 $C_0$ 、 $C_i$ 、 $D_0$ 、 $D_i$  为温标内插公式的常数, 可查阅参考文献 [2];  $a_4$ 、 $b_4$ 、 $a_8$ 、 $b_8$  为二等标准铂电阻温度计的相关技术参数, 可根据检定证书得到, 本文的二等标准铂电阻温度计的技术参数如表 1 所示;  $T$  表示热力学温度, 单位为 K;  $t$  表示摄氏温度, 单位为 °C。

表 1 标准铂电阻温度计的相关技术参数

| $R_{tp} (\Omega)$ | $a_4$    | $b_4$    | $a_8$     | $b_8$     |
|-------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| 26.3631           | 0.000045 | 0.000047 | -0.000043 | -0.000024 |

## 2、反函数与参考函数的函数偏差计算

因为检定二等标准铂电阻温度计时固定点的  $W_r(t)$  值是通过式 (1) 和式 (4) 计算出来的, 而本文后续的计算方法采用的公式为式 (2)、式 (5), 为了确保其精度, 故此对式 (1) 与式 (2) 以及式 (4) 与式 (5) 的函数偏差进行研究分析。

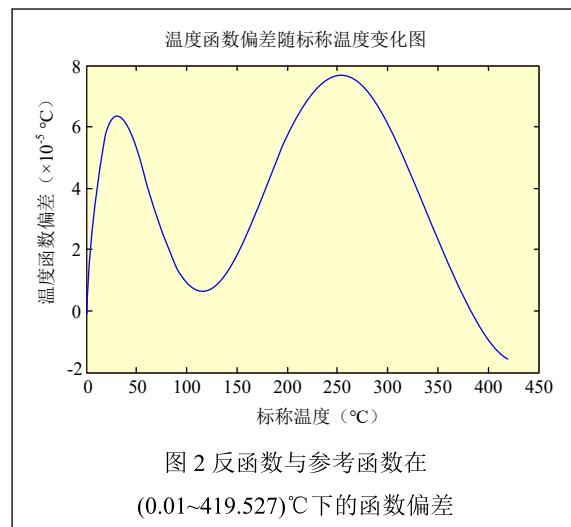
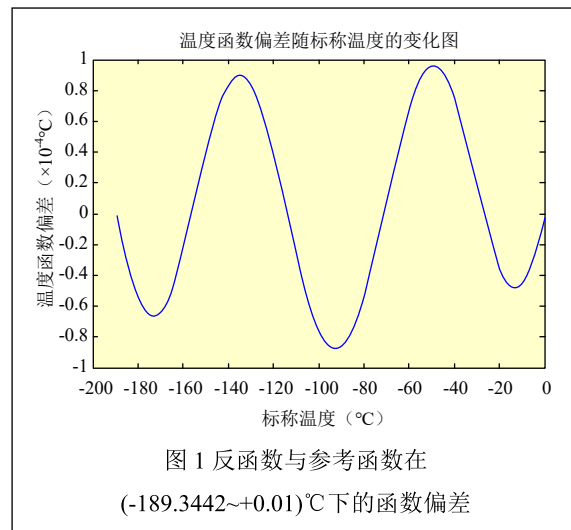
首先将各标称温度下式 (1) 的计算结果  $W_r(T)$  代入式 (2), 可得到相应的  $T$ , 再减去标称温度即可得式 (1) 与式 (2) 的函数偏差, 如图 1 所示。同理结合式 (4) 与式 (5) 可得到式 (4) 与式 (5) 函数偏差情况如图 2 所示。

从结果中可发现在温度范围为 (-189.3442~+0.01)°C 的温标反函数与参考函数的偏差中绝对值最大为  $9.561 \times 10^{-5}$ °C, 而在温度范围为 (0.01~419.527)°C 的温标反函数与参考函数的偏差中绝对值最大为  $7.684 \times 10^{-5}$ °C, 对工业铂电阻的检定结果的影响很小, 可忽略。

## 三、工业铂电阻恒温槽偏离值计算

### 1、恒温槽偏离值计算

假设二等标准铂电阻温度计测得的电阻值为  $R$ , 则  $W(t) = R/R_{tp}$ , 再结合设定温度情况可将  $W(t)$  代入式 (3) 或式 (6) 中, 得到相应的  $W_r(t)$  的值, 再将所得



的  $W_r(t)$  的值代入式 (2) 或式 (5) 中得到恒温槽的实际温度, 减去恒温槽的标称温度, 即为恒温槽偏离值。

整个计算过程看似繁琐, 包含了多系数的求和, 然而由于本文采用的是 FLUKE 生产的型号为 Fluke 1529 的四通道便携测温仪, 其内嵌 ITS-90 转换方式, 只要将检定证书内标准铂电阻的  $R_p$  以及相关系数 (如表 1 所示) 输入, 可将测得的电阻值直接计算出温度值, 显示在面板上。而又考虑到相同条件下用上级证书  $R_p$  值的检定结果不确定度比自测  $R_p$  值时小得多<sup>[3]</sup>, 故本文直接采用四通便携测温仪显示的温度值作为恒温槽的实际温度值, 则可得恒温槽偏离值的计算公式如下:

$$\Delta t^* = t - t_{nomi} \quad (7)$$

其中,  $\Delta t^*$  — 恒温槽实际温度偏离设定温度的温度值,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t$  — 标准铂电阻温度计测得恒温槽温度通过四通便携测温仪的显示值,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{nomi}$  — 恒温槽的名义温度,  $^{\circ}\text{C}$

## 2、四通便携测温仪内嵌算法实验验证

上述恒温槽偏离值的计算公式基于该测温仪测量电阻精度满足要求以及内嵌算法准确的基础上得到的。测量电阻的精度是否满足要求, 可通过相应检定得到, 在此不再累述。而为了进一步研究其内嵌算法的准确性, 本文利用  $(-80\sim+95)^{\circ}\text{C}$  的制冷恒温槽以及  $(50\sim550)^{\circ}\text{C}$  的标准黑体炉作为源, 将二等标准铂电阻温度计 (相关技术参数如表 1 所示) 插入其中, 在温度变化过程中,

表 2 各电阻下的显示值与计算值

| 电阻值 $R$<br>( $\Omega$ ) | 显示温度 $t$<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 计算温度 $t_2$<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 函数误差 $\Delta f(t)$<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| 20.2594                 | -50.050                            | -50.05041                            | 0.0001                                       |
| 22.3324                 | -28.812                            | -29.81172                            | 0.00001                                      |
| 23.6506                 | -16.874                            | -16.87425                            | -0.00004                                     |
| 25.3636                 | 0.014                              | 0.01494                              | 0.00000                                      |
| 32.1296                 | 67.595                             | 67.59511                             | 0.00003                                      |
| 40.7808                 | 156.102                            | 156.10194                            | 0.00002                                      |
| 45.0568                 | 200.762                            | 200.76151                            | 0.00006                                      |
| 51.2995                 | 267.103                            | 267.10289                            | 0.00008                                      |
| 55.0608                 | 307.755                            | 307.75490                            | 0.00006                                      |
| 60.0180                 | 362.152                            | 362.15143                            | 0.00001                                      |
| 64.9706                 | 417.475                            | 417.47566                            | -0.00001                                     |

利用相机拍下四通道显示值 (包括电阻值  $R$  以及温度值  $t$ ), 利用测得的电阻值  $R$  根据恒温槽偏离值计算方法可计算出所对应的计算温度  $t_2$ , 同时结合二等标准铂电阻温度计反函数与参考函数的函数偏差计算方法, 可计算出反函数与参考函数之间的函数误差  $\Delta f(t)$ , 如表 2 所示。

从表 2 中可发现, 函数误差  $\Delta f(t)$  很小, 对于分辨率为  $0.001^{\circ}\text{C}$  的 4 通道便携测温仪的影响基本可忽略, 故此时计算温度  $t_2$  即可作为理论实际温度, 而从表中发现显示温度  $t$  与计算温度  $t_2$  温度一致, 该四通便携测温仪的内置算法满足使用要求, 算法误差控制在  $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$  内。

## 四、工业铂热电阻测量结果不确定度评定

本文提出工业铂热电阻的检定方法, 与 JIG 229-2010《工业铂、铜热电阻检定规程》一致, 只是在恒温槽偏离值的方法上有所区别, 为了判别本文的偏离值的计算是否满足工业铂热电阻的检定要求, 故对改进方法的工业铂热电阻测量结果不确定度进行评定。

### 1、测量模型

#### (1) 测量模型

根据上述工业铂热电阻的检定方法, 则可得到工业铂热电阻的测量模型:

$$\Delta t = \frac{R - R_{scale}}{dR/dt} - (t - t_{nomi}) \quad (8)$$

其中:  $\Delta t$  — 工业铂热电阻的测量误差,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$R$  — 工业铂热电阻测得的电阻值,  $\Omega$ ;

$R_{scale}$  — 工业铂热电阻在检定温度点下的分度表对应的电阻值,  $\Omega$ ;

$dR/dt$  — 工业铂热电阻在检定温度下的电阻值对温度的变化率,  $\Omega/^{\circ}\text{C}$ 。

#### (2) 灵敏度系数

式 (8) 中  $dR/dt$  的不确定度很小, 可忽略, 而  $R$ 、 $t$  虽然是同一台四通便携测温仪测量, 但考虑到 2 个量值的测量属于该设备独立的 2 个通道, 且独立显示电阻值, 可认为相互独立处理, 则可得灵敏度系数如下:

$$c_1 = \frac{\partial \Delta t}{\partial R} = \frac{1}{dR/dt}, c_2 = \frac{\partial \Delta t}{\partial t} = -1 \quad (9)$$

2、由输入量  $R$  引入的标准不确定度  $u(R)$ 

主要有以下不确定来源：测量重复性、恒温槽均匀性、恒温槽波动性、电测设备误差以及测量电流引起的自热。

(1) 测量重复性引入的标准不确定度  $u(R_1)$ 

对工业铂热电阻作 10 次独立重复测量，以  $0^\circ\text{C}$  为例，其测量结果如下，单位为  $^\circ\text{C}$ ：100.2147，100.2156，100.2163，100.2158，100.2173，100.2169，100.2153，100.2164，100.2142，100.2153，则可得到实验标准偏差  $s$  如下：

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} = 9.65 \times 10^{-4} \Omega \quad (10)$$

实际测量中采用 6 次测量的平均值，则有：

$$u(R_1) = \frac{s}{\sqrt{6}} = 5.57 \times 10^{-4} \Omega \quad (11)$$

(2) 恒温槽均匀性引入的标准不确定度  $u(R_2)$ 

恒温槽均匀性不超过  $0.01^\circ\text{C}$ ，服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则有：

$$u(R_2) = \frac{0.01}{\sqrt{3}} \cdot \frac{dR}{dt} = 2.26 \times 10^{-3} \Omega \quad (12)$$

(3) 恒温槽的波动性引入的不确定度  $u(R_3)$ 

恒温槽的温度波动度不超过  $\pm 0.01^\circ\text{C} / 30\text{min}$ ，取其半宽为  $0.01^\circ\text{C}$ ，服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则有：

$$u(R_3) = \frac{0.01}{\sqrt{3}} \cdot \frac{dR}{dt} = 2.26 \times 10^{-3} \Omega \quad (13)$$

(4) 电测设备误差引入的不确定度  $u(R_4)$ 

本文使用的四通道便携测温仪在  $(0\sim 20)\Omega$  时准确度为  $\pm 0.0005\Omega$ ； $(20\sim 400)\Omega$  时准确度为  $\pm 25\text{ppm}$  of RGD。则在  $0^\circ\text{C}$  时该设备的最大允许误差为  $\pm 0.0026\Omega$ ，取其半宽为  $0.0026\Omega$ ，服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则有：

$$u(R_4) = \frac{0.0026}{\sqrt{3}} = 1.5 \times 10^{-3} \Omega \quad (14)$$

(5) 自热引入的标准不确定度  $u(R_5)$ 

电测设备提供感温元件的测量为  $1\text{mA}$ ，根据实际经验感温元件有约  $2\text{m}\Omega$  的影响，可作均匀分布处理， $k = \sqrt{3}$ ，则有：

$$u(R_5) = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 1.15 \times 10^{-3} \Omega \quad (15)$$

(6) 计算  $u(R)$ 

考虑到各个分量之间相互独立，则可得到：

$$u(R) = 3.76 \times 10^{-3} \Omega \quad (16)$$

3、由输入量  $t$  引入的标准不确定度  $u(t)$ 

主要有以下不确定来源：标准铂电阻温度计的溯源以及周期性复现性、电测设备测量误差、电测设备内嵌算法误差、测量电流引起的自热。

(1) 标准铂电阻温度计溯源引入的标准不确定度  $u(t_1)$ 

使用的标准铂电阻温度计的不确定度为  $2\text{mK}$ ， $k=2$ ，则：

$$u(t_1) = 1\text{mK} \quad (17)$$

(2) 标准铂电阻温度计的周期性复现引入的标准不确定度  $u(t_2)$ 

按规程要求，水三相点处为  $U_{99}=5\text{mK}$ ， $k=2.58$ ，因此有：

$$u(t_2) = 2.0\text{mK} \quad (18)$$

(3) 电测设备测量误差引入的不确定度  $u(t_3)$ 

如前所述，本文采用的四通道测量仪在  $0^\circ\text{C}$  时最大允许误差为  $\pm 0.000734\Omega$ ，则近似可看作  $(25.3631 \pm 0.000734)\Omega$ ，利用恒温槽偏离值计算方法可分别算出上、下限的温度为  $0.01726^\circ\text{C}$ 、 $0.00274^\circ\text{C}$ ，取两者与  $0.01^\circ\text{C}$  偏差大者作为半宽，则半宽为  $0.00726^\circ\text{C}$ ，服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则有：

$$u(t_3) = \frac{0.00726}{\sqrt{3}} = 4.2\text{mK} \quad (19)$$

(4) 电测设备内嵌算法误差引入的标准不确定度  $u(t_4)$ 

如前所述，经过实验验证，得到本文使用的电测设备内嵌算法准确度为  $\pm 0.001^\circ\text{C}$ ，则取半宽为  $0.001^\circ\text{C}$ ，服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则有：

$$u(t_4) = \frac{0.001}{\sqrt{3}} = 0.6\text{mK} \quad (20)$$

(5) 测量电流自热引入的标准不确定度  $u(t_5)$ 

二等标准铂电阻温度计自热最大不超过  $4\text{mK}$ ，可作均匀分布处理， $k = \sqrt{3}$ ，则有：

$$u(t_5) = \frac{0.004}{\sqrt{3}} = 2.3\text{mK} \quad (21)$$

(6) 计算  $u(t)$

考虑到各个分量之间相互独立, 则可得到:

$$u(t)=5.32\text{mK} \quad (22)$$

4、合成不确定度

由于各个分量相互之间独立, 则不确定度合成为:

$$u_c(\Delta t)=\sqrt{c_1^2 u^2(R)+c_2^2 u^2(t)}=11\text{mK} \quad (23)$$

5、扩展不确定度

取  $k=2$  检定  $0^\circ\text{C}$  时, 本文采用的改进方法测量结果的扩展不确定度为:  $U=k \cdot u_c(\Delta t)=22\text{mK}$

同理可得  $100^\circ\text{C}$  时, 本文采用的改进方法测量结果的扩展不确定度为:  $U=31\text{mK}, k=2$

## 五、结论

本文利用 FLUKE 1529 四通道便携测温仪实现了工业铂热电阻全量程检测恒温槽偏离值简化求解。为了验证该方法的正确性, 计算了温度范围  $(-189.3442\sim+419.527)^\circ\text{C}$  二等标准铂电阻温度计的温度与电阻之间的关系, 并计算各温度范围内反函数与参考函数的函数误差, 同时通过实验值与计算值得到了该测温仪内嵌算法的准确度, 并进一步结合实际对测量结果不确定度进行了评定, 测量结果扩展不确定度满足要求。该方法大大简化了工业铂电阻检定/校准过程中的计算, 大大提高了工业铂热电阻检测效率。

## 参考文献

- [1] 方信昀, 陈如冰, 郁龙水, 等. 工业铂电阻全量程检测数据处理软件的设计与实现 [J]. 江苏现代计量, 2013, (11):30-34.
- [2] JJG 160-2007, 标准铂电阻温度计检定规程 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007
- [3] 陈桂生, 付志勇, 朱育红, 赵晶, 杨锐. 工业铂热电阻不同检定方法检定结果可信度研究 [J]. 中国测试, 2014, 40(6):17-21

**An error calculation method for industrial platinum resistances measuring thermostatic baths at full temperature range and uncertainty evaluation of the measuring results**

HUANG Yuan-jin, DU Wen-lan

*Taizhou Institute of Metrology and Technology, Taizhou 318000, China)*

**Abstract:** Aiming at the complex calculation problem in temperature verification process of platinum resistances at arbitrary temperature point in traditional industries, a new method for calculating the temperature deviation values of thermostatic baths is put forward. Firstly, the error between the thermometric scale interpolation formula and its inverse function of standard Pt RTDs is studied. And then, the function expression of the resistances corresponding to the temperatures is derived from the temperature scale interpolation formula and difference function of standard Pt RTDs at different temperature ranges. Finally, the error of the embedded algorithm is verified by the comparison between the experimental values and theoretical values with the temperature display values of a four channel portable thermometer FLUKE 1529 as the standard. Combined with the actual conditions, the uncertainty of the improved method is evaluated and meets the requirements of the calibration.

**Keywords:** platinum resistance; reference function; interpolation formula; temperature; standard Pt RTD

## 作者简介

黄元津, 台州市计量技术研究院, 高级工程师, 研究方向: 无线电半导体

通讯地址: 台州市中心大道 399 号

邮编: 318000

邮箱: [hyj5959@163.com](mailto:hyj5959@163.com)

杜文岚, 台州市计量技术研究院, 工程师, 研究方向: 辐射测温