

工业铂电阻测量结果的不确定度评定

Evaluation of Uncertainty in Measurement of Indication Platinum Resistance

杨溢

Yi Yang

中原油田分公司技术监测中心 中国·河南 濮阳 457001

Zhongyuan Oilfield Branch Technical Monitoring Center, Puyang, Henan, 457001, China

摘要: 论文按照 JJG 229—2010《工业铂、铜热电阻检定规程》的要求, 对企业常用的工业铂电阻测量结果的不确定性进行了分析和评定, 为工业铂电阻的校准提供了依据和参考, 有利于提高工业铂电阻的准确度和可靠性。

Abstract: In this paper, according to the requirements of JJG 229—2010 *Verification Regulation of Industrial Platinum and Copper Resistance Thermal*, the uncertainty of commonly used industrial platinum resistance measurement results in enterprises has been analyzed and evaluated, providing a basis and reference for the calibration of industrial platinum resistance, which is conducive to improving the accuracy and reliability of industrial platinum resistance.

关键词: 工业铂电阻; 测量结果; 不确定度

Keywords: platinum resistance thermometer; uncertainty; resistance value

DOI: 10.12346/etr.v6i1.8959

1 引言

温度和人们的生活息息相关, 各行各业都离不开温度的检测。温度计量是直接为生产、科研、外贸服务的主要手段, 是为了保证温度计量仪表的准确性, 提供可靠的根据, 从而使计量数据准确, 保证公平交易, 确保产品质量, 从而提高经济效益, 而测量不确定度是与测量结果关联的一个参数, 用于表征合理赋予被测量的值的分散性, 是定量说明测量结果的一个参数, 故对铂电阻的测量结果有必要分析其不确定度。根据 JJG 229—2010《工业铂、铜热电阻检定规程》研究工业铂电阻温度计的不确定来源, 并对其不确定度进行评定。

2 概述

2.1 评定依据

JJG 229—2010《工业铂、铜热电阻检定规程》。

2.2 测量标准

二等标准铂电阻温度计。

2.3 被测对象

B 级铂热电阻, 测量点分别为 0℃、100℃。

2.4 测量参数与测量方法

测量参数为 R_0 、 R_{100} , 用比较法进行测量。比较法的操作

方法是二等标准铂电阻温度计和铂热电阻共同置于制冷恒温槽和恒温油槽中, 当其温度稳定后, 便测定标准值和待测值, 然后根据标准值推算出实际的温度, 用公式计算出待测的真实值 $R_{(t)}$ 。整个过程由智能化热工仪表检定系统完成。

标准热电阻和被测热电阻通过信号线连接到控制器, 由计算机负责操控检定系统的每个步骤并数据处理。通过 GPIB 接口和 RS232 串行口进行相关设备的过程控制、数据处理, 被测热电阻信息经数字万用表传送到计算机, 由计算机计算、记录并保存测得数值, 自动储存并打印输出。

3 建立数学模型

0℃点, 测量误差数学模型:

$$\Delta t_0 = \frac{R_t - R_0}{(dR/dt)_{t=0}} - \frac{W_t^s - W_0^s}{(dW_t^s/dt)_{t=0}} = \Delta t_t - \Delta t_t^s$$

式中: R_t ——被校铂热电阻在 0℃的测得电阻值, Ω ;

R_0 ——被校铂热电阻在 0℃的实际电阻值, Ω ;

$(dR/dt)_{t=0}$ ——当温度为 0℃时, 被校铂热电阻的电阻值的变化速度随温度变化, $\Omega/^\circ\text{C}$;

W_t^s ——用测量方法确定的制冷恒温槽与水三相点位置上的标准铂电阻电阻比值;

【作者简介】杨溢 (1989-), 女, 中国湖北广水人, 本科, 助理工程师, 从事温度、电量、气体报警仪计量检定研究。

W_0^s ——标准铂电阻 0 °C 时的电阻比值；

$(dW_i^s/dt)_{t=0}$ ——当温度变化时，标准铂电阻在 0 °C 的电阻比值的

变化速度；
 Δt_i ——由被校热电阻在制冷恒温槽中测得偏离 0 °C 的差，°C；

Δt_i^* ——在制冷恒温槽里，标准铂电阻温度计测得的温度偏差，°C。

100 °C 点，测量误差数学模型：

$$\Delta t_{100} = \frac{R_h - R_{100}}{(dR/dt)_{t=100}} - \frac{W_h^s - W_{100}^s}{(dW_i^s/dt)_{t=100}} = \Delta t_h - \Delta t_h^*$$

式中： R_h ——被校铂热电阻在约 100 °C 的测得电阻值，Ω；

R_{100} ——被校铂热电阻在 100 °C 的实际电阻值，Ω；

$(dR/dt)_{t=100}$ ——当温度达到 100 °C 时，被校铂热电阻的电阻值变化率，Ω/°C；

W_h^s ——标准铂电阻在约 100 °C 测得的电阻值之比；

W_{100}^s ——标准铂电阻 100 °C 时的电阻比值；

$(dW_i^s/dt)_{t=100}$ ——标准铂电阻 100 °C 时的电阻比值随温度的变化率；

Δt_h ——从在 100 °C 恒定温度的油槽中测试的被校热电阻，获取其与 100 °C 产生的偏差值，°C；

Δt_h^* ——标准铂电阻温度计在 100 °C 恒温油槽中测得偏离 100 °C 的差，°C。

从数学模型中可以观察到，0 °C 校准点的输入量有：

R_i ， R_i^* ， R_p^* 和 W_0^s ；100 °C 校准点的输入量有： R_h ， R_h^* ， R_p^* 和 W_{100}^s 。

$(dR/dt)_{t=0}$ ， $(dR/dt)_{t=100}$ ， $(dW_i^s/dt)_{t=0}$ ， $(dW_i^s/dt)_{t=100}$ 的不确定度很小，可以忽略不计^[1]。

4 不确定度评定

4.1 输入量 Δt_i 、 Δt_h 的标准不确定度 $u(\Delta t_i)$ 和 $u(\Delta t_h)$ 的评定

有 4 个主要不确定度来源： R_i 、 R_h 的测量重复性，孔位之间的温度差异，电测量设备以及由测定电流引起的自热^[2]。

4.1.1 由测量的重复性 $u(R_{i1})$ 、 $u(R_{i2})$ 引入的不确定度

采用 A 类标准不确定度来衡量由重复性测试导致的标准不确定度。以 B 级铂热电阻为例：

在 0 °C 测量重复性引入的标准不确定度 $u(\Delta t_{i1})$ 。测得一系列数据，即 99.947 Ω、99.948 Ω、99.947 Ω、99.946 Ω、99.946 Ω、99.945 Ω、99.947 Ω、99.946 Ω、99.945 Ω、99.945 Ω^[3]。

可得公式：

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 99.9462 \Omega$$

单次实验标准差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} = 0.0010 \Omega$$

$$u(\Delta t_{i1}) = s = 0.0010 \Omega$$

换算成温度：

$$u(\Delta t_{i,1}) = \frac{0.001}{0.391} = 0.003 \text{ °C}$$

在 100 °C 测量重复性引入的标准不确定度 $u(\Delta t_{h1})$ 。测得一系列数据，即 138.475 Ω、138.473 Ω、138.475 Ω、138.474 Ω、138.473 Ω、138.474 Ω、138.472 Ω、138.475 Ω、138.475 Ω、138.472 Ω。

可得公式：

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 138.4738 \Omega$$

单次实验标准差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} = 0.0012 \Omega$$

$$u(\Delta t_{h1}) = s = 0.0012 \Omega$$

换算成温度：

$$u(\Delta t_{h1}) = \frac{0.0012}{0.379} = 0.003 \text{ °C}$$

4.1.2 由孔位之间的温度差异引入的标准不确定度 $u(\Delta t_{i2})$ 、 $u(t_{i2})$ 、 $u(\Delta t_{i3})$ 、 $u(\Delta t_{i3})$

①我们用 B 类的标准不确定度来对制冷恒温槽与恒温油槽的温度场均匀性所产生的标准不确定度进行判定。制冷恒温槽和恒温油槽的温场均匀性不超过 0.01 °C，按均匀分布处理，半区间为 0.005 °C^[4]。

$$u(\Delta t_{i2}) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003 \text{ °C}$$

$$u(\Delta t_{h2}) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003 \text{ °C}$$

②我们采用 B 类标准不确定度对产生于制冷恒温槽及恒温油槽的温场波动度标准不确定度进行测定。保证制冷恒温槽的温度场波动量在 ±0.01 °C / 10 分钟内，按均匀分布的方式进行处理，其半区间为 0.005 °C。

$$u(\Delta t_{i3}) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003 \text{ °C}$$

保证恒温油槽的温场波动量在 ±0.007 °C / 10 min 内，按均匀分布处理，半区间为 0.0035 °C。

$$u(\Delta t_{h3}) = \frac{0.0035}{\sqrt{3}} = 0.002 \text{ °C}$$

4.1.3 由电测量设备引入的标准不确定度 $u(\Delta t_{i4})$ 、 $u(\Delta t_{h4})$

数字万用表的测量误差是主要的不确定度来源，而地电势扫描器引起的不确定度相对而言较为微小（换算成电阻不超过 1 m Ω），可以忽略不计。用 B 类标准不确定度来评定。

数字万用表最大允许误差为：

$$\Delta = \pm (0.0060\% \times \text{读数} + 0.0002\% \times \text{量程})$$

0 °C 时，被测电阻阻值应在 100.00 Ω 左右，数字万用表用 100 Ω 档，由电测设备带入的误差限为：

$$\Delta = \pm (0.0060\% \times 100.00 + 0.0002\% \times 100) = \pm 0.0062 \Omega$$

对应的温度误差是 ±0.016 °C，将该误差按均匀分布处理。可得：

$$u(\Delta t_{i4}) = \frac{0.016}{\sqrt{3}} = 0.009 \text{ °C}$$

100 °C 时，被测电阻阻值应在 138.51 Ω 左右，数字万用表用 1k Ω 档，由电测设备带入的误差限为：

$$\Delta = \pm (0.0060\% \times 138.51 + 0.0002\% \times 1000) = \pm 0.0103 \Omega$$

对应的温度误差是 ±0.028 °C，将该误差按均匀分布处理。可得：

$$u(\Delta t_{i4}) = \frac{0.028}{\sqrt{3}} = 0.016 \text{ °C}$$

4.1.4 由热电阻自热效应引入的标准不确定度 $u(\Delta t_{i5})$ 、 $u(\Delta t_{h5})$

电测设备供感温元件的测量电流为 1mA，根据实际经验，感温元件经常会产生大概 2mΩ 的效应，采用 B 类标准不确定度作为评判准则，并将这种效应视为均匀分布。可得：

$$u(R_s) = u(R_{s5}) = 1.15 \times 10^{-3} \Omega$$

换算成温度：

$$u(\Delta t_{i5}) = 0.003 \text{ °C}$$

$$u(\Delta t_{h5}) = 0.003 \text{ °C}$$

4.1.5 $u(\Delta t_i)$ 和 $u(\Delta t_h)$ 的计算

因以上各不确定因素彼此独立，因此合成为：

$$u(\Delta t_i) = \sqrt{0.003^2 + 0.003^2 + 0.003^2 + 0.009^2 + 0.003^2} = 0.011 \text{ °C}$$

$$u(\Delta t_h) = \sqrt{0.003^2 + 0.003^2 + 0.002^2 + 0.016^2 + 0.003^2} = 0.017 \text{ °C}$$

4.2 输入量 Δt_i^* 、 Δt_h^* 的标准不确定度 $u(\Delta t_i^*)$ 和 $u(\Delta t_h^*)$ 的评定

不确定度的来源主要有四个方面：标准铂电阻的复现性和电阻比值的周期稳定性，电测设备的测量误差以及测量电流引起的自热。

4.2.1 由二等标准铂电阻复现性引入的标准不确定度 $u(\Delta t_{i1}^*)$ 和 $u(\Delta t_{h1}^*)$

按照 B 类标准不确定度的评定，依据规定，水三相点处 $U_{99} = 5 \text{ mK}$ ， $k = 2.58$ ；在水沸点附近为 $U_{99} = 3.4 \text{ mK}$ ， $k = 2.58$ 。因此， $u(\Delta t_{i1}^*) = 0.002 \text{ °C}$ ； $u(\Delta t_{h1}^*) = 0.001 \text{ °C}$ 。

4.2.2 电测设备引入的标准不确定度 $u(\Delta t_{i2}^*)$ 和 $u(\Delta t_{h2}^*)$

R_i^* 由电测设备测量，而 R_p^* 直接引用检定证书中的给出值时的不确定度评定 $W_i^* = \frac{R_i^*}{R_p^*}$ ，当使用电子测试设备进行测

量并直接应用校验证书所给予的值进行不确定度评定时，由于使用的电子测试设备不同，测量误差之间无关联^[5]。因此，我们可以采用方差合成的方法进行计算：

$$\begin{aligned} (dW_i^*)^2 &= \left(\frac{dR_i^*}{R_p^*}\right)^2 + \left(\frac{R_i^* \cdot dR_p^*}{R_p^{*2}}\right)^2 \\ &= \left[\frac{1}{R_p^*}(0.01\%R_i^* + 0.001)\right]^2 + \left[\frac{W_i^*}{R_p^*} \cdot \Delta t_p \cdot R_p^* \cdot \left(\frac{dW_i^*}{dt}\right)\right]^2 \end{aligned}$$

$\Delta t_p = 10 \text{ mK}$ 为检定周期内 R_p 的稳定性。按上述得到的是 W_i^* 测量的最大误差，按均匀分布考虑。

0 °C 时：

$$u(\Delta t_{i2}^*) = \frac{\sqrt{0.000141^2 + (0.00999960 \times 0.00398648)^2}}{0.003987839\sqrt{3}} = 0.021 \text{ °C}$$

100 °C 时：

$$u(\Delta t_{h2}^*) = \frac{\sqrt{0.000181^2 + (0.01392704 \times 0.00398648)^2}}{0.0038675\sqrt{3}} = 0.028 \text{ °C}$$

4.2.3 测量电流引起自热带来的标准不确定度 $u(\Delta t_{i3}^*)$ 和 $u(\Delta t_{h3}^*)$

二等标准铂电阻温度计在制冷恒温槽的检定过程中自热最大不超过 4 mK，用 B 类标准不确定度来评定，按均匀分布考虑。可得：

$$u(\Delta t_{i3}^*) = \frac{4}{\sqrt{3}} = 0.002 \text{ °C}$$

在进行 100 °C 的校准过程中，由于我们是在恒温油槽中对高温流动介质进行校准，因此自身的加热效应可以不予考虑。可得：

$$u(\Delta t_{h3}^*) = 0.000 \text{ °C}$$

4.2.4 标准铂电阻温度计 W_0^s 和 W_{100}^s 引入的标准不确定度 $u(\Delta t_{i4}^*)$ 和 $u(\Delta t_{h4}^*)$ 的评定

由于二等标准铂电阻温度计检定证书里面有 W_0^s 和 W_{100}^s 的数据，因此，我们能通过评定周期的稳定性来确定温度的不确定性。这个不确定性用 B 类标准不确定度来评定，并且其具体数值为 10 mK 和 14 mK，这些数值按均匀分布考虑。可得：

$$u(\Delta t_{i4}^*) = 0.006 \text{ °C}$$

$$u(\Delta t_{h4}^*) = 0.008 \text{ °C}$$

4.2.5 $u(\Delta t_i^*)$ 和 $u(\Delta t_h^*)$ 的计算

由于上述 4 个不确定度之间相互独立，因此合成为：

$$u(\Delta t_i^*) = \sqrt{0.002^2 + 0.021^2 + 0.002^2 + 0.006^2} = 0.022 \text{ °C}$$

100 °C 时：

$$u(\Delta t_h^*) = \sqrt{0.001^2 + 0.028^2 + 0.000^2 + 0.008^2} = 0.029 \text{ °C}$$

5 合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总表 1 和表 2。

表 1 0℃测量的标准不确定度分量汇总

| 标准不确定度 $u(x_i)$ | 不确定度来源 | 标准不确定度值/℃ | 灵敏系数 C_i | 不确定度分量 $ c_i u(x_i)$ |
|--------------------|----------|-----------|------------|----------------------|
| $u(\Delta t_1)$ | / | 0.011 | 1 | 0.011 |
| $u(\Delta t_{11})$ | 测量重复性 | 0.003 | / | 0.003 |
| $u(\Delta t_{12})$ | 温场均匀性 | 0.003 | / | 0.003 |
| $u(\Delta t_{13})$ | 温场波动度 | 0.003 | / | 0.003 |
| $u(\Delta t_{14})$ | 电测设备误差 | 0.009 | / | 0.009 |
| $u(\Delta t_{15})$ | 自热影响 | 0.003 | / | 0.003 |
| $u(\Delta t_{16})$ | / | 0.022 | -1 | 0.022 |
| $u(\Delta t_{17})$ | 标准铂电阻复现性 | 0.002 | / | 0.002 |
| $u(\Delta t_{18})$ | 电测设备误差 | 0.021 | / | 0.021 |
| $u(\Delta t_{19})$ | 自热影响 | 0.002 | / | 0.002 |
| $u(\Delta t_{20})$ | 标准铂电阻稳定性 | 0.006 | / | 0.006 |

表 2 100℃测量的标准不确定度分量汇总

| 标准不确定度 $u(x_i)$ | 不确定度来源 | 标准不确定度值/℃ | 灵敏系数 C_i | 不确定度分量 $ c_i u(x_i)$ |
|--------------------|----------|-----------|------------|----------------------|
| $u(\Delta t_1)$ | / | 0.017 | 1 | 0.017 |
| $u(\Delta t_{11})$ | 测量重复性 | 0.003 | / | 0.003 |
| $u(\Delta t_{12})$ | 温场均匀性 | 0.003 | / | 0.003 |
| $u(\Delta t_{13})$ | 温场波动度 | 0.002 | / | 0.002 |
| $u(\Delta t_{14})$ | 电测设备误差 | 0.016 | / | 0.016 |
| $u(\Delta t_{15})$ | 自热影响 | 0.003 | / | 0.003 |
| $u(\Delta t_{16})$ | / | 0.029 | -1 | 0.029 |
| $u(\Delta t_{17})$ | 标准铂电阻复现性 | 0.001 | / | 0.001 |
| $u(\Delta t_{18})$ | 电测设备误差 | 0.028 | / | 0.028 |
| $u(\Delta t_{19})$ | 自热影响 | 0.000 | / | 0.000 |
| $u(\Delta t_{20})$ | 标准铂电阻稳定性 | 0.008 | / | 0.008 |

鉴于不确定度的各个分量是彼此独立的。所以不确定度合成为：

0℃时：

$$u_c(\Delta t_0) = \sqrt{0.011^2 + 0.022^2} = 0.025 \text{ } ^\circ\text{C}$$

100℃时：

$$u_c(\Delta t_{100}) = \sqrt{0.017^2 + 0.029^2} = 0.034 \text{ } ^\circ\text{C}$$

6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则：

0℃时：

$$U = 0.025 \times 2 = 0.05 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (k=2)$$

100℃时：

$$U = 0.034 \times 2 = 0.07 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (k=2)$$

7 结语

论文依据 JJG 229—2010《工业铂、铜热电阻检定规程》，从测量重复性、温场均匀性和标准铂电阻稳定性等九个方面对工业铂电阻测量结果不确定度进行分析和评定，计算得到的扩展不确定度均不大于允许误差绝对值的 1/4，为工业铂电阻的校准提供了依据和参考，有利于提高工业铂电阻的准确度和可靠性。

参考文献

- [1] JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示[S].
- [2] 吴文辉,王榕,王德勇,等.工业铂热电阻测量值的不确定度评定[J].计量与测试技术,2017,44(4):74-75.
- [3] JJG 229—2010 工业铂、铜热电阻检定规程[S].
- [4] 郭沈辉,戚晓红,王林虎.恒温槽的校准及不确定度的评定[J].中国测试技术,2007,36(7):87.
- [5] 徐兴业,李颖,马嫣,等.关于二等标准铂电阻温度计分度结果不确定度评定中的几个问题[J].工业计量,2017(S2):95-96.