

标准铂电阻温度计自热效应的计算公式

任建平

山西省检验检测中心(山西省标准计量技术研究院), 山西 太原

收稿日期: 2024年1月12日; 录用日期: 2024年3月5日; 发布日期: 2024年3月14日

摘要

标准铂电阻的量值溯源中, 自热效应是非常重要的一项指标。通常使用测温电桥先测量工作电流为1 mA下的温度计的电阻值, 再调节电流为 $\sqrt{2}$ mA并测量温度计的电阻值, 计算前后两次电阻值的差, 利用偏差函数计算的微分电阻比来换算成温度值。但是由于电阻的焦耳热效应, 电流改变后, 其电阻发生了变化(增加), 调节电流后的热效应功率并不是电流改变前的两倍, 因此该计算方式具有一定的误差。在此基础上, 笔者通过公式推导, 提出新的计算公式。

关键词

计量学, 标准铂电阻温度计, 90国际温标, 自热效应, 焦耳热效应

Formula for Calculating the Self-Heating Effect of a Standard Platinum Resistance Thermometer

Jianping Ren

Shanxi Inspection and Testing Center, Ti Yuan Shanxi

Received: Jan. 12th, 2024; accepted: Mar. 5th, 2024; published: Mar. 14th, 2024

Abstract

In the traceability of the magnitude of standard platinum resistance, the self-heating effect is a very important indicator. Generally, a temperature measuring bridge is used to measure the resistance value of the thermometer at 1 mA, then adjust the current to $\sqrt{2}$ mA and measure the resistance value of the thermometer, calculate the difference between the two resistance values before and after, and convert it into the temperature value by using the differential resistance ra-

tio calculated by the deviation function. However, due to the Joule heating effect of the resistor, the resistance of the resistor changes (increases) after the current changes, and the thermal effect power after adjusting the current is not twice as high as before the current changes, so this calculation method has a certain error. On this basis, the author proposes a new calculation formula through formula derivation.

Keywords

Metrology, Standard Platinum Resistance Thermometer, ITS-90, Self-Heating Effect, Joule Heating Effect

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

标准铂电阻温度计是一种重要的测温元件, 具有响应迅速、准确度高、测温范围大等优点[1], 是 90 国际温标(ITS-90)中重要的内插仪器之一[2] [3], 在 T90 温标中, 从 13.8033 K (平衡氢三相点)到 961.78°C (银凝固点)这个区间均是由标准铂电阻温度计来进行复现及溯源, 这个范围几乎涵盖了日常工作中需要的所有温度区间。目前温度传递技术分为定点法和比较法。标准铂电阻温度计的量值溯源通常使用定点法来进行[4] [5] [6]。

铂电阻温度计是利用铂电阻的电阻值随温度变化而变化的特性来测量温度。在电阻值的测量中, 通常会采用恒流源供电, 然后测量电阻两端的电压值, 使用欧姆定律来计算电阻值[7] [8]。在测量过程中, 由于焦耳热效应, 会导致铂电阻自身的温度要高于被测温度值, 造成测量误差, 这也称为自热效应[9] [10] [11]。因此测量铂电阻的自热效应也是标准铂电阻量传递中非常重要的一项工作内容[12]。在 JJG160-2007 《标准铂电阻温度计》检定规程中规定, 工作基准、一等标准、二等标准铂电阻温度计自热效应不得大于 2.0 mK、3.0 mK、4.0 mK [13]。

为了测量自热效应, 会在 1 mA 与 $\sqrt{2}$ mA 电流下分别两次测量温度计的电阻值, 然后计算两次电阻值的差, 并利用偏差函数计算的微分电阻比来计算。具体公式如下:

$$\Delta R = R_2 - R_1 \quad (1)$$

$$\Delta t = (\Delta R / R_{tp}) / [dW(t)/dt] \quad (2)$$

式中:

R_1 : 1 mA 电流下测得标准铂电阻的电阻值。

R_2 : $\sqrt{2}$ mA 电流下测得标准铂电阻的电阻值。

ΔR : 自热效应对铂电阻电阻值得影响。

Δt : 自热效应对铂电阻测温结果的影响。

$dW(t)/dt$: 使用参考函数的 $dW_r(t)/dt$ 代替。

通常中认为, $\sqrt{2}$ mA 电流下电阻的焦耳热效应为 1 mA 电流下的两倍, 但是忽略了在 $\sqrt{2}$ mA 电流下电阻值发生的变化。实际上, 通入 $\sqrt{2}$ mA 后, 由于焦耳热效应, 电阻温度升高, 其电阻值也相应的变大, 导致通入 $\sqrt{2}$ mA 后的焦耳热效应大于 1 mA 电流下两倍, 此公式下计算得到的自热效应值偏大。

为了减小焦耳热效应导致电阻变化带来的测量误差，通过公式推导提出了新的计算公式，同时测量了 26 只标准铂电阻温度计的自热效应，并通过两种计算公式进行对比，数据分析，证实了新公式的必要性。

2. 公式推导及原理

2.1. 自热效应的基本原理

铂电阻的自热效应是由于电流产生的焦耳热，导致铂电阻自身温度高于被测温场造成的。这个温差很小，可以用牛顿冷却定律来表示：

$$\phi = Ah\Delta t \quad (3)$$

式中：

ϕ ：传热功率，当处于热平衡时，这个值等于电流的焦耳热效应

A：传热面积

h：物质的对流传热系数。

2.2. 标准铂电阻温度计自热的测量与计算

对于特定的标准铂电阻温度计，传热面积与对流传热系数可以认为是定值，令： $k = A * h$ 可得：

$$\phi_i = k\Delta t_i = k(t_i - t) = I^2 R_i \quad (4)$$

式中：

R_i ：电流为 I 时标准铂电阻温度计的电阻；

t_i ：电流为 I 时标准铂电阻温度计自身的实际温度；

t ：温场的实际温度。

令电流为 I 时自热效应对标准铂电阻温度计的影响为 ΔR_i ，可得：

$$R_i = R + \Delta R_i \quad (5)$$

式中：

R ：没有通电流时的实际电阻值

由于标准铂电阻温度计的自热效应很小，通常情况下小于 4 mK，因此在被测温场附近，可以认为标准铂电阻温度计的微分电阻比为定值，令： $dW(t)/dt = M$ ，可得：

$$\Delta t_i = M \Delta R_i \quad (6)$$

在电流 I_1 与 I_2 下测量两次标准铂电阻温度计的电阻值 R_{i1} 与 R_{i2}

由公式(4) $\phi_i = k\Delta t_i = k(t_i - t) = I^2 R_i$ ： $k\Delta t_{i1} = I^2 R_{i1}$ ， $k\Delta t_{i2} = I^2 R_{i2}$ ，可得： $\frac{\Delta t_{i1}}{\Delta t_{i2}} = \frac{I_1^2 R_{i1}}{I_2^2 R_{i2}}$

由公式(6) $\Delta t_i = M \Delta R_i$ ： $\Delta t_{i1} = M \Delta R_{i1}$ ， $\Delta t_{i2} = M \Delta R_{i2}$ ，可得： $\frac{\Delta t_{i1}}{\Delta t_{i2}} = \frac{M \Delta R_{i1}}{M \Delta R_{i2}} = \frac{\Delta R_{i1}}{\Delta R_{i2}}$

得到： $\frac{I_1^2 R_{i1}}{I_2^2 R_{i2}} = \frac{\Delta R_{i1}}{\Delta R_{i2}}$

所以： $\Delta R_{i2} = \frac{I_2^2 R_{i2}}{I_1^2 R_{i1}} * \Delta R_{i1}$

由于 $R_i = R + \Delta R_i$ ， $R_{i2} - R_{i1} = (R + \Delta R_{i2}) - (R + \Delta R_{i1}) = \Delta R_{i2} - \Delta R_{i1}$

$$\text{故 } R_{I_2} - R_{I_1} = \Delta R_{I_2} - \Delta R_{I_1} = \frac{I_2^2 R_{I_2}}{I_1^2 R_{I_1}} * \Delta R_{I_1} - \Delta R_{I_1}$$

可得:

$$\Delta R_{I_1} = \frac{I_1^2 R_{I_1}}{I_2^2 R_{I_2} - I_1^2 R_{I_1}} (R_{I_2} - R_{I_1}) \quad (7)$$

式中:

ΔR_{I_1} : 电流为 I_1 时标准铂电阻温度计由于焦耳热效应带来电阻值的增加值;

R_{I_1} : 电流为 I_1 时标准铂电阻温度计的电阻值;

R_{I_2} : 电流为 I_2 时标准铂电阻温度计的电阻值;

I_1 : 测量标准铂电阻的电阻温度计时恒流源供电电流;

I_2 : 调节电流后恒流源的供电电流;

2.3. 标准铂电阻自热的测量与计算

通常在测量过程中,会选择电流为 1 mA 与 $\sqrt{2}$ mA 两种电流工况下分别测量标准铂电阻温度计的电阻值,然后计算其自热效应的情况

当 $I_1 = 1 \text{ mA}$, $I_2 = \sqrt{2} \text{ mA}$ 时,公式(6)可以简化为:

$$\Delta R = \frac{R_1}{2R_2 - R_1} (R_2 - R_1) \quad (8)$$

式中:

ΔR : 电流为 1 mA 时标准铂电阻温度计由于焦耳热效应带来电阻值的增加值;

R_1 : 电流为 1 mA 时标准铂电阻温度计的电阻值;

R_2 : 电流为 $\sqrt{2}$ mA 时标准铂电阻温度计的电阻值;

将得到的 ΔR 带入公式(2),便可得到标准铂电阻自温度计热效应的最终结果:

$$\Delta t = \left(\frac{R_1}{2R_2 - R_1} (R_2 - R_1) / R_p \right) / \left[dW(t)/dt \right] \quad (9)$$

式中:

ΔR : 电流为 1 mA 时标准铂电阻温度计由于焦耳热效应带来电阻值的增加值;

R_1 : 电流为 1 mA 时标准铂电阻温度计的电阻值;

R_2 : 电流为 $\sqrt{2}$ mA 时标准铂电阻温度计的电阻值;

Δt : 自热效应对标准铂电阻温度计测温结果的影响。

$dW(t)/dt$: 被测标准铂电阻的微分电阻比,也可使用参考函数的 $dW_r(t)/dt$ 代替。

使用公式(7),也可以在其他电流工况下进行标准铂电阻温度计自热效应的测量与计算。

3. 新公式与传统公式计算结果的比较

为了验证新公式的合理性,使用了 26 支标准铂电阻温度计在水三相点、锌固定点、锡固定点进行自热效应的测量,使用两种计算公式分别计算该标准铂电阻温度计的自热效应,并使用公式(10)计算两种公式下自热效应的相对差。

$$\Delta t_\delta = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\Delta t_1} * 100\% \quad (10)$$

Δt_{δ} ：两种公式计算出自热效应的相对差

Δt_1 ：传统公式下计算出的自热效应

Δt_2 ：新公式下计算出的自热效应

计算结果如表 1。

Table 1. Two formulas are used to calculate the relative difference of the self-heating effect

表 1. 使用两种公式计算自热效应的相对差

编号	出厂编号	水三相点自热效应的 相对差/%	锌固定点自热效应的 相对差/%	锡固定点自热效应的 相对差/%
1	10031	-0.00135	-0.00070	-0.00092
2	8602	-0.00146	-0.00071	-0.00101
3	10608	-0.00171	-0.00083	-0.00126
4	7381	-0.00090	-0.00056	-0.00081
5	7282	-0.00092	-0.00068	-0.00108
6	7177	-0.00137	-0.00067	-0.00094
7	6434	-0.00145	-0.00070	-0.00096
8	200934	-0.00113	-0.00055	-0.00069
9	200249	-0.00119	-0.00059	-0.00074
10	191533	-0.00116	-0.00059	-0.00082
11	210559	-0.00121	-0.00059	-0.00083
12	181149	-0.00135	-0.00067	-0.00086
13	181067	-0.00118	-0.00061	-0.00083
14	4129	-0.00130	-0.00070	-0.00100
15	5487	-0.00149	-0.00074	-0.00106
16	161451	-0.00137	-0.00070	-0.00100
17	5552	-0.00138	-0.00073	-0.00102
18	5556	-0.00171	-0.00080	-0.00107
19	2160	-0.00106	-0.00061	-0.00081
20	18118	-0.00113	-0.00060	-0.00090
21	89164	-0.00084	-0.00051	-0.00069
22	8501	-0.00124	-0.00068	-0.00105
23	4656	-0.00133	-0.00066	-0.00093
24	DF1598	-0.00132	-0.00073	-0.00098
25	10129	-0.00088	-0.00057	-0.00078
26	10076	-0.00124	-0.00073	-0.00097
平均	/	-0.00126	-0.00066	-0.00092

由表 1 可以看出，使用了新的公式后，计算出来的自热效应要更小一些。在水三相点处，由于测量的自热效应更小，标准铂电阻的阻值也最小，因此相对差更大，范围为-0.00084%~-0.00171%，平均值

为-0.00126%;在锌固定点,由于测量的自热效应值较大,且标准铂电阻的阻值也是三个固定点中最大的,因此相对差更小,范围为-0.00051%~-0.00083%,平均值为-0.00066%。

使用新公式进行自热效应的计算,在没有改变测量方法且不增加工作量的情况下,可以将自热效应的测量精度提高 0.0013%左右,因此是可行的。随着科技的进步,计量技术的发展,通过很多先进的方法,我们可以将测量精度提高到很高的水平,相信在不久的将来,这两种公式的差距可以显著的影响到测量结果,尤其是在测量结果的不确定度评估中。

4. 结论

我国的量值传递系统中,标准铂电阻温度计起到了非常重要的作用。为了保证量值可靠,通常会使用定点法对标准铂电阻进行溯源,溯源过程中,自热效应的测量无疑是非常重要的一项内容。但是传统的计算方法认为电流改变为 $\sqrt{2}$ mA 后,焦耳热效应为电流改变之前的两倍,而忽视了由于热效应导致电阻也变大,实际上电流改变后铂电阻的焦耳热效应大于电流改变之前的两倍,进而造成测量误差。

通过公式推导,本文给出了新的计算公式,同时认为,如果采用其他电流,也可以使用文中给出的公式进行自热效应的计算。

参考文献

- [1] 方院生,王琦,丁诚,等. 标准铂电阻温度计的自热效应研究及零功率修正方法[J]. 测控技术, 2015, 34(1): 9-11.
- [2] Preston-Thomas, H. (1990) The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). *Metrologia*, **27**, 3-10. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/27/1/002>
- [3] 王颖文,张欣,等. -38.8344~156.5985℃温区温标偏差方程外推和内插研究[J]. 计量学报, 2018, 37(6): 816-821.
- [4] 高凯,蒋庆,等. 铂丝位错特性对标准铂电阻温度计稳定性影响的研究[J]. 计量学报, 2020, 41(11): 1352-1357.
- [5] 邓小龙,孙建平,等. 退火对标准铂电阻温度计性能影响的研究[J]. 计量学报, 2015, 36(1): 26-30.
- [6] Sun, J., Zhang, J.T. and Ping, Q. (2013) Improvements in the Realization of the ITS-90 over the Temperature Range from the Melting Point of Gallium to the Freezing Point of Silver at NIM. *International Temperature Symposium on Temperature-Its Measurement*, **1552**, 277-282. <https://doi.org/10.1063/1.4819553>
- [7] 李利峰,李锐,闫小克,等. 镓熔点温坪复现研究[J]. 计量学报, 2020, 41(4): 419-424.
- [8] 于帆,孙建平,等. 新制标准铂电阻温度计退火特性理论模型及验证[J]. 计量学报, 2021, 42(6): 759-764.
- [9] 张洁天,贾宏博,等. 铂电阻温度传感器的自热效应[J]. 传感器技术, 2002, 21(12): 13-15.
- [10] 任建平,孙建平,等. 标准铂电阻温度计自热效应对测量结果的影响[J]. 计量学报, 2021, 42(5): 589-594.
- [11] Steur, P.P.M. and Dematteis, R. (2014) Water Triple-Point Comparisons: Plateau Averaging or Peak Value. *International Journal of Thermophysics*, **35**, 620-627. <https://doi.org/10.1007/s10765-014-1634-0>
- [12] Pearce, J.V., Rusby, R.L., Harris, P.M. and Wright, L. (2013) The Optimization of Self-Heating Corrections in Resistance Thermometry. *Metrologia*, **50**, 345-353. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/4/345>
- [13] 中国计量科学研究院. JJG 160-2007 标准铂电阻温度计[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.