

# 深低温区标准电阻温度计自热效应修正测量方法比较研究

孔祥杰<sup>1,2,3</sup>, 张海洋<sup>1,2\*</sup>, 刘思琦<sup>1,2,4</sup>, 宋耀楠<sup>1,2</sup>, 高波<sup>1,2,3\*</sup>, PITRE Laurent<sup>1,5</sup>

- (1. 中国科学院理化技术研究所 低温科学与技术重点实验室, 北京 100190;  
2. 中国科学院理化技术研究所 中法低温计量科学与技术国际联合实验室, 北京 100190;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 东北大学 冶金学院, 沈阳 110819; 5. 法国国家计量院-  
法国国立科学技术与管理学院, 法国 拉普莱纳-圣德尼 F93210)

**摘要:** 标准电阻温度计是深低温区重要的温度计量器具, 在测量中存在由激励电流热效应导致的温度计温度高于实际被测温度的现象, 即自热效应, 该效应的精准测量和修正对标准电阻温度计测量的准确性至关重要。介绍了自热效应测量的二电流法、多电流法和参考温度计法, 并在 5 K 温度下通过实验研究了这些方法对标准铱铁电阻温度计自热效应测量的效果。结果表明, 二电流法中对两个激励电流的优化配置可有效降低自热效应测量不确定度, 多电流法可进一步降低该不确定度, 但降低的程度随激励电流数增多而逐渐减小; 将上述方法与参考温度计法结合可在不增加测量时间的情况下进一步降低自热效应测量不确定度。综合考虑测量不确定度及测量所需时间, 建议采用普遍二电流法(电流比 1:2)和参考温度计法相结合的方法来测量和修正深低温区标准电阻温度计的自热效应。研究结果可为深低温区基于标准电阻温度计开展的标定、复现、国际比对等高精度温度测量提供参考。

**关键词:** 深低温区; 标准电阻温度计; 自热效应修正; 不确定度; 参考温度计

中图分类号: TB69; TB771

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2024)06-0719-09

DOI: 10.12446/j.issn.1006-7086.2024.06.016

## A Comparative Study of Self-heating Effect Correction Measurement Methods for Standard Resistance Thermometers in Deep Low-temperature Range

KONG Xiangjie<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Haiyang<sup>1,2\*</sup>, LIU Siqi<sup>1,2,4</sup>, SONG Yaonan<sup>1,2</sup>, GAO Bo<sup>1,2,3\*</sup>, PITRE Laurent<sup>1,5</sup>

- (1. Key Laboratory of Cryogenic Science and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. TIPC-LNE Joint Laboratory on Cryogenic Metrology Sciences and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 5. Laboratoire national de m'etrologie et d'essais-Conservatoire national des arts et m'etiers, (LNE-Cnam) F93210, La Plaine-Saint Denis, France)

**Abstract:** The standard resistance thermometer is an important temperature measuring instrument used in deep low-temperature range. However, due to the thermal effect caused by the excitation current, the temperature of the thermometer is usually higher than the actual temperature to be measured, this phenomenon is the self-heating effect. The correction of this

收稿日期: 2024-01-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0210200); 国家自然科学基金(52125602); 中国科学院项目(ZDKYYQ20210001、1A1111KYSB20210024); 北京市科技计划项目(Z221100002722005); 中国科学院青年创新促进会项目(2022028)

作者简介: 孔祥杰, 博士研究生, 主要从事低温温度计测量研究。E-mail: kongxj@mail.ipc.ac.cn

通信作者: 张海洋, 高级工程师, 主要从事低温温度计测量研究。E-mail: zhy110@mail.ipc.ac.cn

高波, 正高级工程师, 主要从事低温温度计测量研究。E-mail: bgao@mail.ipc.ac.cn

引用信息: 孔祥杰, 张海洋, 刘思琦, 等. 深低温区标准电阻温度计自热效应修正测量方法比较研究[J]. 真空与低温, 2024, 30(6): 719-727.

KONG X J, ZHANG H Y, LIU S Q, et al. A comparative study of self-heating effect correction measurement methods for standard resistance thermometers in deep low-temperature range[J]. Vacuum and Cryogenics, 2024, 30(6): 719-727.

effect is crucial for accurate temperature measurements with standard resistance thermometer. The methods for measuring and correcting the self-heating effect are introduced, including two-current method, multi-current method, and reference thermometer method. Through experimental studies at 5 K, the effects of these methods on self-heating effect measurement of the standard rhodium-iron resistance thermometer are investigated. The results show that optimizing the configuration of the two excitation currents in the two-current method can effectively reduce the uncertainty of self-heating effect measurement, and the multi-current method can further reduce the uncertainty, but the degree of reduction gradually decreases with the increasing number of excitation currents. Combining the above methods with the reference thermometer method can further reduce the self-heating effect measurement uncertainty without increasing the measurement time. Considering the correction uncertainty and measurement time required, it is recommended to use the general two-current method (current ratio 1 : 2) combined with the reference thermometer method for measurements of standard resistance thermometer in deep low-temperature range. The research results can provide reference for highly accurate temperature measurements of standard resistance thermometers in the deep low-temperature range, such as temperature calibration, reproduction, and international comparison.

**Key words:** deep low-temperature range; standard resistance thermometers; correction of self-heating effect; uncertainty; reference thermometer

## 0 引言

深低温区 (<24.556 1 K) 温度测量对于大科学装置建设<sup>[1]</sup>、航空航天<sup>[2]</sup>等领域的发展有重要支撑作用。标准电阻温度计主要有3种,即标准铂电阻温度计<sup>[3]</sup>、标准铑铁电阻温度计<sup>[4]</sup>和标准铂钴电阻温度计<sup>[5]</sup>,主要应用于现行国际温标(ITS-90)<sup>[6]</sup>复现和保存<sup>[7]</sup>、温度国际比对<sup>[8-10]</sup>及应用级温度计标定等,是深低温区的重要温度计量器具。标准电阻温度计主要依据其感温体(如高纯铂、铑铁合金等)的电阻值( $R$ )随温度( $T$ )的变化来测量温度,使用前须先标定其 $R$ - $T$ 关系。标定后,在测温中仅需测得其电阻值,通过 $R$ - $T$ 方程即可得到对应的温度。可见,电阻的测量是标准电阻温度计使用的关键。

电阻测量通常基于欧姆定律,施加激励电流测量电压得到电阻值。但激励电流产生的焦耳热会使电阻温度高于被测实际温度,即自热效应,其大小与其自身制造工艺、安装环境和激励电流大小等都有关系,在深低温区通常有亚 mK 至几 mK 大小。作为对比,美国国家标准与技术研究院(NIST)提供的标准电阻温度计在 24.5 K 的标定不确定度约为 0.27 mK<sup>[11]</sup>;而本课题组建立的热力学温度测量装置在 24.5 K 的测量不确定度为 0.17 mK<sup>[12]</sup>。可见,深低温区标准电阻温度计的自热效应大小通常与其要承载的温度数据的不确定度量级相当,因此测量和修正其自热效应,并通过实验研究优化测量方法,对其使用至关重要。

本文针对深低温区标准电阻温度计自热效应修正的测量,以测量不确定度为主要评价指标,通过实验研究,比较使用二电流法、多电流法和参考

温度计法得到的标准铑铁电阻温度计自热效应的测量结果,以寻求最优的自热效应修正测量方法,为深低温区基于标准电阻温度计的高准确度温度测量提供参考。

## 1 标准电阻温度计自热效应修正测量方法及不确定度分析

### 1.1 理想模型

深低温区标准电阻温度计通常为“胶囊型”,如图1所示,感温金属丝缠绕于温度计中的支撑架上,外壳通常为铂壳,顶端由玻璃密封,温度计中充有一定惰性气体(深低温区通常为<sup>4</sup>He气体)以强化感温金属丝与外壳之间的传热。

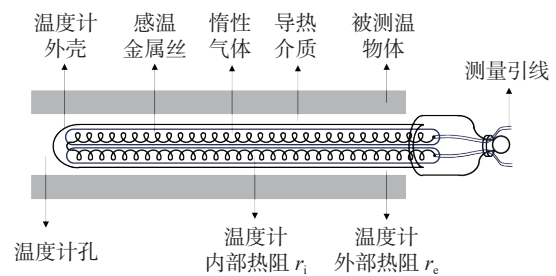


图1 深低温区“胶囊型”标准电阻温度计安装示意图  
Fig. 1 Diagram of the installation of capsule-type standard resistance thermometer

如图1所示,安装于一温度计孔内的标准电阻温度计,温度计孔与温度计外壳之间涂有导热介质。设被测温度为 $T_0$ ,对应的温度计阻值为 $R_0$ ,在激励电流 $I_1$ 作用下,感温金属丝产生的焦耳热依次经温度计内部惰性气体、温度计外壳和温度计外部导热介质传递至被测温物体,并达到平衡。该焦耳热

通常为  $\mu\text{W}$  量级, 故忽略其对被测温物体的影响。此时温度计实际温度为  $T_1$ , 对应的阻值为  $R_1$ 。设温度计内部惰性气体的热阻为  $r_i$ , 温度计外部导热介质的热阻为  $r_e$ , 温度计铂金属外壳导热性较好, 其热阻忽略不计。

温度计产生的焦耳热功率  $P$  为:

$$P = I_1^2 R_1 \quad (1)$$

该功率经过热阻  $r_i$  和  $r_e$  耗散, 产生的温差  $\Delta T$  为:

$$\Delta T = T_1 - T_0 = P(r_i + r_e) = I_1^2 R_1 (r_i + r_e) \quad (2)$$

该温差  $\Delta T$  为由自热效应导致的温度偏差。对于标定过的标准电阻温度计, 其标定温区内任一温度的灵敏度  $s = dR/dT$  可由其标定公式计算得到, 故  $\Delta T$  对应的温度计电阻值偏差  $\Delta R$  为:

$$\Delta R = R_1 - R_0 = s \Delta T = s I_1^2 R_1 (r_i + r_e) \quad (3)$$

在热阻  $r_i$  和  $r_e$  已知的情况下,  $R_1$  可直接由电阻电桥等测量得到, 故可直接由式(2)和式(3)计算得到  $\Delta T$  和  $\Delta R$ 。自热效应修正为:

$$\begin{cases} T_0 = T_1 - \Delta T \\ R_0 = R_1 - \Delta R \end{cases} \quad (4)$$

可见, 电阻温度计自热效应修正的核心是  $\Delta T$  和  $\Delta R$  的测量。自热效应修正可基于温度或电阻值开展, 由于  $\Delta T$  通常为亚 mK 或 mK 量级, 温度计灵敏度  $s$  在如此小的温度变化下为常数, 因此对温度和电阻值的自热效应修正是等价的。

实际测量中难以获得高准确度的  $r_i$  和  $r_e$ , 因此无法使用上述方法进行自热效应计算和修正。实际测量中使用的自热效应测量和修正方法见下文。

## 1.2 二电流法及测量不确定度分析

### 1.2.1 二电流法基本原理

二电流法分别在两个不同激励电流  $I_1$  和  $I_2$  下测量标准电阻温度计的阻值  $R_1$  和  $R_2$ , 其对应温度为  $T_1$  和  $T_2$ , 在微小的温度变化下视  $r_i$  和  $r_e$  为常数。由式(3)可得:

$$\begin{cases} R_1 - R_0 = s I_1^2 R_1 (r_i + r_e) \\ R_2 - R_0 = s I_2^2 R_2 (r_i + r_e) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中两式相除, 由于  $R_1/R_2$  近似为 1, 可得:

$$R_0 \approx \frac{R_1 I_2^2 - R_2 I_1^2}{I_2^2 - I_1^2} \quad (6)$$

故在激励电流  $I_1$  下自热效应导致的电阻值变化为:

$$\Delta R = R_1 - R_0 = \frac{(R_2 - R_1) I_1^2}{I_2^2 - I_1^2} \quad (7)$$

以  $u_{\Delta R}$ 、 $u_{I_1}$ 、 $u_{I_2}$ 、 $u_{R_1}$ 、 $u_{R_2}$  分别表示  $\Delta R$ 、 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $R_1$ 、

$R_2$  的不确定度, 各不确定度分量互相独立, 由不确定度传递关系可得:

$$u_{\Delta R}^2 = \left[ \frac{\partial(\Delta R)}{\partial R_1} u_{R_1} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(\Delta R)}{\partial R_2} u_{R_2} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(\Delta R)}{\partial I_1} u_{I_1} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(\Delta R)}{\partial I_2} u_{I_2} \right]^2 \quad (8)$$

其中:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\Delta R)}{\partial R_1} = \frac{-I_1^2}{I_2^2 - I_1^2} \\ \frac{\partial \Delta R}{\partial R_2} = \frac{-I_1^2}{I_2^2 - I_1^2} \\ \frac{\partial \Delta R}{\partial I_1} = \frac{2(R_2 - R_1) I_1 I_2^2}{(I_2^2 - I_1^2)^2} \\ \frac{\partial \Delta R}{\partial I_2} = \frac{2(R_1 - R_2) I_2 I_1^2}{(I_2^2 - I_1^2)^2} \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可知, 二电流法中自热效应测量不确定度来自电阻测量的标准差(等价于温度测量的标准差)和激励电流的不确定度。电阻的测量不确定度可分为 A 类和 B 类两类不确定度。A 类不确定度是电阻测量的统计误差, 可由测量数据的标准差或标准误差表示, 前者称为保守算法(Conservative Approach), 后者称为综合计算法(Comprehensive Approach)<sup>[13]</sup>, 本文使用保守算法计算电阻测量的 A 类不确定度。B 类不确定度由参考电阻标定不确定度及其温度环境变化、电桥非线性等因素引起<sup>[13]</sup>, 但由于自热效应由电阻值的差值得到, 因此其影响较小, Batagelj 等<sup>[13]</sup> 经计算也发现其自热效应修正测量的不确定度贡献可以忽略不计, 因此本文未将上述因素计入自热效应测量的不确定度评定中。自热效应测量不确定度还与两个激励电流的相对大小有关, 因此可通过调节  $I_1 = I_1/I_2$  来优化自热效应测量。另外激励电流也可通过改变电阻测量的信噪比进而影响电阻测量结果的标准差。

### 1.2.2 普遍二电流法

普遍二电流法不限定 2 个激励电流的相对大小关系, 可从电流大小分配和测量时间分配两个方面寻优。

Batagelj 等<sup>[13]</sup> 比较了水三相点温度下标准铂电阻温度计在  $I_1 = 1 \text{ mA}$ 、 $I_2 = \sqrt{2} \text{ mA}$  和  $I_1 = 1.6 \text{ mA}$ 、 $I_2 = 4 \text{ mA}$  两组电流下的自热效应测量不确定度, 后者为前者的约 40%, 并指出在固定  $I_2 = 4 \text{ mA}$  的情况下,  $I_1$  的最优值为 1.6 mA, 但并未进行理论推导。Pearce 等<sup>[14]</sup> 对二电流法的电流分配进行了理论推导和实验验证, 结论为  $I_1 = 0.5$  是自热效应测量不确定度最小的电流比例, 理论推导中对激励电流大小

和电阻测量标准差做了  $u_{R_2}/u_{R_1}=I_1$  的假设,并在实验测量中验证了该假设。

二电流法的时间分配优化主要基于电阻测量不确定度的综合算法,即不确定度会随着测量时间的增加而减小。Pearce 等<sup>[14]</sup>也对二电流法的时间分配进行了理论推导和实验验证,结论为在总测量时间一定的情况下,  $I_1$  段的测量时间  $t_1$  和  $I_2$  段的测量时间  $t_2$  的比例  $t_1:t_2=8:1$  时,可使自热效应测量不确定度最小。但本文中采用保守算法,电阻测量不确定度不会随测量时间的增长而显著变化,故不对时间分配进行实验研究。

### 1.2.3 常规二电流法

常规二电流法是普遍二电流法的特例,但由于该方法是实际应用中自热效应测量的主要方法,因此单独介绍。在该方法中,限定  $I_2=\sqrt{2}I_1$ ,从而使式(7)简化为  $\Delta R=R_2-R_1$ ,以简化计算。同时常规二电流法的实际应用中通常忽略电流的不确定度(仅限于常规二电流法),故  $(u_{\Delta R})^2=(u_{R_1})^2+(u_{R_2})^2$ 。可见,常规二电流法的自热效应测量不确定度仅由两段电流下的电阻测量不确定度决定,故常规二电流法的自热效应测量优化主要通过减小电阻测量数据的标准差来实现。因此在测量手段上,可通过增大  $I_1$  以提高测量信噪比的方式减小自热效应测量不确定度,但深低温区存在材料热容偏小,界面热阻大等特点,因此为保证测量结果可靠且不影响被测温物体的温度分布,通常将  $I_1$  限制在 1 mA 及以下。另外也可从减小测得温度的波动入手,如提高被测温度的稳定性,或设法减小被测温度波动对自热效应测量的影响。

### 1.3 多电流法

多电流法使用  $n(n\geq 3)$  个激励电流  $(I_1, I_2, \dots, I_n)$  测量标准电阻温度计的自热效应,并通过线性拟合如式(10)的电流平方和电阻  $(R_1, R_2, \dots, R_n)$  或温度  $(T_1, T_2, \dots, T_n)$  的关系,计算得到  $R_0$  和  $\Delta R$  或  $T_0$  和  $\Delta T$ :

$$\begin{cases} R_i = R_0 + aI_i^2 \\ T_i = T_0 + aT_i^2, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (10)$$

该方法可视为多个二电流测量的组合,计算得到的结果本质是多个二电流测量结果的平均,因此理论上可提高自热效应测量结果的可靠性,并减小其不确定度,但也会增加测量时间。

Pearce 等<sup>[14]</sup>在固定最大电流  $I_n$  的前提下,对多电流测量的电流分配  $(I_1, I_2, \dots, I_{n-1})$  进行了理论推导。推导中使用综合算法计算电阻测量不确定

度,通过对加权拟合不确定度极值的推导得到最优电流分配。推导结果为,当  $I_1=I_2=\dots=I_{n-1}\approx 0.5I_n$  时,自热效应测量不确定度最小,与二电流测量的最优电流分配相同,即多电流的最优分配为多电流退化为二电流时。

Batagelj 等<sup>[13]</sup>在水三相点温度下,固定铂电阻温度计最大电流为 4 mA,比较了二电流到五电流的自热效应测量不确定度。使用保守算法计算电阻测量不确定度,多电流测量结果使用不加权拟合方法得到,对应不确定度使用蒙特卡罗方法计算。结论为,三电流测量结果相对二电流有一定提升,但四电流和五电流相对三电流的提升很小。同时该研究也指出,多电流拟合方法还可以用于测量温度计与被测物体之间的热阻,另外如果在拟合中加入时间项,还可消除被测温物体温度随时间的线性漂移对自热效应测量的影响。Li 等<sup>[15]</sup>同样使用保守计算和不加权拟合方法,对深低温区的多电流法测量 Cernox 电阻温度计自热效应的不确定度进行了研究,研究结果表明,三电流法相比二电流法测量不确定度降低 20%。Izquierdo 等<sup>[16]</sup>对铂电阻温度计在室温区的自热效应进行了研究,比较了二电流、多组二电流平均和多电流不加权拟合的自热效应测量结果,指出多电流测量拟合结果优于二电流测量结果。Babita 等<sup>[17]</sup>比较了二电流法和多电流法对铂电阻温度计在水三相点温度下的自热效应修正结果,结果是多电流法的不确定度大于二电流法。

可以看到,上述理论和实验研究结论存在一定的不一致性,且实验研究主要在室温区对铂电阻温度计进行。因此本文将使用多电流法对深低温区标准铯铁电阻温度计的自热效应测量进行研究,并与二电流法等结果进行比较。

### 1.4 参考温度法

电阻测量数据的标准差是自热效应测量不确定度的重要来源。虽然标准电阻温度计通常在被测温物体温度控制稳定的情况下进行测量,但被测温物体可能存在整体稳定但局部波动的情况,这会增大电阻测量数据的标准差进而影响自热效应测量不确定度。任建平<sup>[18]</sup>在 83.805 8 K 以上多个温区对标准铂电阻温度计的自热效应进行了测量,测量中将一支同温度环境下的温度计作为参考温度计,通过将参考温度计与参考温度计的温度测量结果做差来减小温度波动对自热效应测量结果的

影响,该方法即为参考温度计法。对于被测温度计在 $(I_1, \dots, I_n)$ 下测得的 $(T_1, \dots, T_n)$ (此时 $n \geq 2$ ),参考温度计在恒定激励电流 $I_{\text{ref}}$ 下测得的温度对应为 $(T_{\text{ref},1}, \dots, T_{\text{ref},n})$ ,此时拟合 $(I_1^2, \dots, I_n^2)$ 与 $(T_1 - T_{\text{ref},1}, \dots, T_n - T_{\text{ref},n})$ 的关系,并将拟合得到的 $T'_0$ 与参考温度计温度值的平均值相加即可得到 $T_0$ ,如式(11):

$$\begin{cases} T_i - T_{\text{ref},i} = T'_0 + a'I_i^2 \\ T_0 = T'_0 + \frac{\sum_{i=1}^n T_{\text{ref},i}}{n}, i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (11)$$

深低温区标准电阻温度计的自热效应测量同样可能受到温度环境波动的影响,因此本文也通过实验研究参考温度计法对深低温区标准铂电阻温度计的自热效应测量不确定度的影响,并将该方法与上文中的二电流法和多电流法进行结合。

## 2 实验装置及测量方法

本研究在 5 K 温度下研究标准电阻温度计自热效应测量的二电流法、多电流法及参考温度计法,实验装置如图 2 所示。

低温恒温器由两套 GM+<sup>4</sup>He 节流蒸发制冷复合制冷机提供冷量,通过温度波动被动衰减结构设计和 PID 主动温度控制,可在 2~5 K 温区实现核心测量部件压力仓处高稳定的控温稳定性<sup>[19]</sup>。被测温度计和参考温度计均安装于压力仓中的温度计孔中。温度计采用四线制测量,其中被测温度计由 ASL F18 交流电阻电桥测量,其激励电流标称的

相对不确定度为 1%<sup>[20]</sup>,文献中对同型号电桥激励电流的实际测量结果也与该标称值基本一致<sup>[13]</sup>,本研究采用该标称值作为激励电流的不确定度。参考温度计仅用于对参考温度计法的研究,由 ASL CTR9000 交流电阻电桥测量。电阻电桥测量被测电阻和参考电阻的比值,因此测量中需使用阻值稳定的电阻作为参考,本研究中使用油浴型参考电阻,将其置于恒温油槽(293.15 K)中以减小环境温度波动对其电阻值的影响。上述温度计和设备等的具体信息如表 1 所列。其中被测温度计由意大利国家计量院在 4~25 K 温区标定,全温区标定不确定度为 0.78 mK;参考温度计由 NIST 在 0.65~24.556 1 K 温区标定,全温区标定不确定度优于 0.58 mK。两个参考电阻的阻值均由中国计量科学研究院标定。

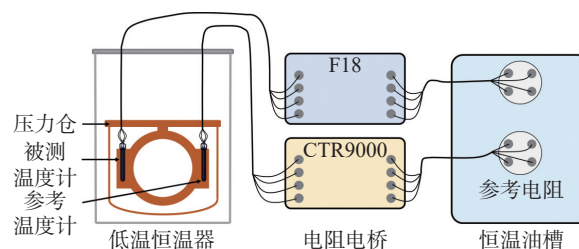


图 2 深低温区自热效应修正测量实验装置示意图  
Fig. 2 Diagram of experimental device for measurement of the self-heating correction

表 1 本研究所用温度计及设备的具体信息

Tab. 1 Specific information on the thermometers and equipment used in this study

| 设备    | 温度计型号       | 电阻电桥    | 参考电阻             | 恒温油槽      |
|-------|-------------|---------|------------------|-----------|
| 被测温度计 | 标准铂电阻温度计    | ASL     | WIKA CER6000 25Ω | MR-5100 L |
|       | 序列号: A66    | F18     | 序列号: 057121-01   |           |
| 参考温度计 | 标准铂电阻温度计    | ASL     | WIKA CER6000 10Ω |           |
|       | 序列号: 201020 | CTR9000 | 序列号: 045068-02   |           |

本研究在恒温器为温度计提供稳定 5 K 温度环境下进行测量。分别使用多个激励电流(依次为 0.20 mA、0.50 mA、0.71 mA、1.00 mA、1.41 mA、1.00 mA、0.71 mA、0.50 mA、0.2 mA),按电流先增大后减小的顺序测量被测温度计的阻值并计算对应温度,每个激励电流下的测量时间至少为 10 min。由于本文对阻值及温度数据的统计误差使用保守算法进行计算,故计算结果与测量时间长短并不直接相关,因此未严格控制不同激励电流下的测量

时间。最大激励电流为 1.41 mA,该电流之外的其他电流均在电流增大和减小的过程测量两次,以验证测量结果的重复性。在被测温度计测量的全过程,同时使用固定的激励电流 0.5 mA 测量参考温度计,以表征 5 K 温度环境的实际温度波动。

## 3 实验结果及讨论

被测温度计和参考温度计的激励电流和测得温度如图 3 所示。基于该测量数据,分别使用二电流法、多电流法计算自热效应修正结果,在多电流

法的计算中,使用各段温度数据的标准差作为温度的不确定度,并以该不确定度为权重进行加权拟合,拟合得到的 $T_0$ 的不确定度 $u_{T_0}$ 由蒙特卡罗方法计算。并在上述两种方法的基础上使用参考温度计法,对获得的结果进行比较。由于不同激励电流的自热效应大小不同,因此直接比较自热效应修正后的温度值 $T_0$ 及修正不确定度 $u_{T_0}$ 。

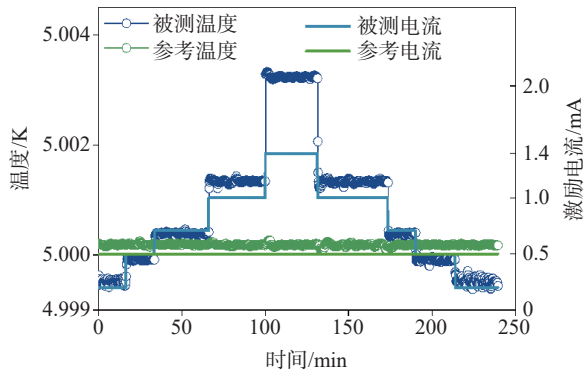


图3 被测温度计和参考温度计的激励电流和测得的温度  
Fig. 3 The excitation current and measured temperature of the tested and reference thermometer

### 3.1 二电流法及参考温度计法实验结果

对于二电流法,固定最大电流为1.41 mA,可获得4组二电流,即(0.20 mA, 1.41 mA)、(0.50 mA, 1.41 mA)、(0.71 mA, 1.41 mA)和(1.00 mA, 1.41 mA),分别编号为2-1到2-4,其中2-4即为常规二电流法所用电流。各组电流在电流增大和减小的测量过程中各得到1组数据,即每组电流可得到2个计算结果。上述4组电流测量的自热效应修正结果如图4所示。

图4中有颜色填充的符号表示不使用参考温度计数据,仅使用被测温度计数据的二电流法计算结果,即无参考。对于 $T_0$ ,随二电流中 $I_1$ 的增大, $T_0$ 呈下降趋势,由2-1到2-4下降15.1  $\mu\text{K}$ ,这可能与 $I_2$ 较大有关。同时升电流过程和降电流过程的 $T_0$ 存在最大14.6  $\mu\text{K}$ 的偏差。 $u_{T_0}$ 先减小后增大,在2-2时达到最小值18.7  $\mu\text{K}$ ,但与2-3结果差别很小,即对于二电流法, $I_2=1.41$  mA时, $I_1$ 在0.5~0.7 mA范围时可使自热效应修正不确定度最小,与Pearce等<sup>[14]</sup>的理论推导结果基本一致。

图4中无颜色填充的符号表示使用参考温度计数据和被测温度计数据的二电流法计算结果,即有参考。可以看到,对于 $T_0$ ,有无参考温度计的测量结果一致性很好,最大偏差为4.3  $\mu\text{K}$ 。而对于 $u_{T_0}$ ,

相对于无参考温度计,2-1和2-2组的不确定度基本不变,2-3和2-4组的不确定度下降5~15  $\mu\text{K}$ ,在2-3时达到最小值14.4  $\mu\text{K}$ 。考虑到深低温区常规二电流法常用2-4进行测量,因此参考温度计法可对减小常规二电流法的不确定度起到很大作用。

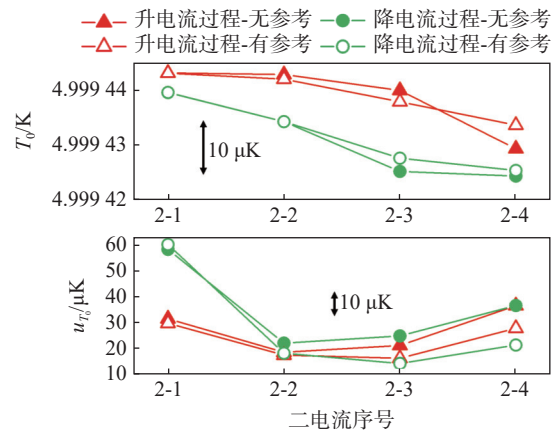


图4 二电流法中有无参考温度计下不同二电流组计算结果

Fig. 4 The results of different two-current groups with and without reference thermometer in the two-current method

### 3.2 多电流法及参考温度计法实验结果

对于多电流法,固定最大电流为1.41 mA,可获得6组三电流,4组四电流和1组五电流,上述各电流组合及其编号如表2所列。

表2 多电流法中的编号及电流组合

Tab. 2 Their corresponding numbers and current combinations in the multi-current method

| 编号  | 电流组合/mA                            |
|-----|------------------------------------|
| 三电流 | 3-1 (0.20, 0.50, 1.41)             |
|     | 3-2 (0.20, 0.71, 1.41)             |
|     | 3-3 (0.20, 1.00, 1.41)             |
|     | 3-4 (0.50, 0.71, 1.41)             |
|     | 3-5 (0.50, 1.00, 1.41)             |
|     | 3-6 (0.71, 1.00, 1.41)             |
| 四电流 | 4-1 (0.20, 0.50, 0.71, 1.41)       |
|     | 4-2 (0.20, 0.50, 1.00, 1.41)       |
|     | 4-3 (0.20, 0.71, 1.00, 1.41)       |
|     | 4-4 (0.50, 0.71, 1.00, 1.41)       |
| 五电流 | 5-1 (0.20, 0.50, 0.71, 1.00, 1.41) |

三电流测量的自热效应修正结果如图5所示。在无参考温度计的情况下,对于 $T_0$ ,不同三电流组

$T_0$  最大偏差为  $9.9 \mu\text{K}$ , 可见三电流相比二电流可提高  $T_0$  的一致性。升电流过程和降电流过程的  $T_0$  存在最大  $13.4 \mu\text{K}$  的偏差。对于  $u_{T_0}$ , 在 3-4 组电流即 (0.50 mA, 0.71 mA, 1.41 mA) 时  $u_{T_0}$  最小, 最小值为  $14.0 \mu\text{K}$ , 较二电流法下降 25%。在有参考温度计的情况下, 对于  $T_0$ , 测量结果最大偏差为  $4.7 \mu\text{K}$ 。对于  $u_{T_0}$ , 相对无参考温度计时各组电流结果均有所下降, 降幅在 5%~40% 之间, 同样在 3-4 组电流时  $u_{T_0}$  最小, 最小值为  $11.4 \mu\text{K}$ 。

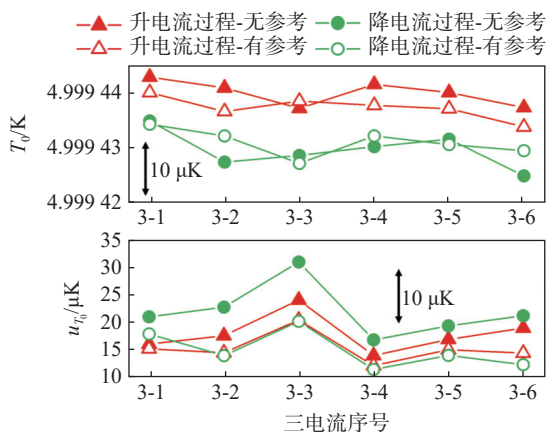


图 5 多电流法中有无参考温度计下不同三电流组计算结果

Fig. 5 The results of different three-current groups with and without reference thermometer in the multi-current method

四电流测量的自热效应修正结果如图 6 所示, 在无参考温度计的情况下, 对于  $T_0$ , 不同四电流组  $T_0$  最大偏差为  $5.7 \mu\text{K}$ 。升电流过程和降电流过程的  $T_0$  存在最大  $12.2 \mu\text{K}$  的偏差。对于  $u_{T_0}$ , 在 4-1 组电流时  $u_{T_0}$  最小, 最小值为  $12.9 \mu\text{K}$ , 较二电流法下降 31%。在有参考温度计的情况下, 对于  $T_0$ , 有无参考温度计的测量结果最大偏差为  $3.8 \mu\text{K}$ 。对于  $u_{T_0}$ , 相对无参考温度计时各组电流结果均有所下降, 降幅在 10%~40% 之间, 在 4-4 组电流时  $u_{T_0}$  最小, 最小值为  $10.2 \mu\text{K}$ 。

五电流测量的自热效应修正结果如图 7 所示, 在无参考温度计的情况下, 对于  $T_0$ , 升电流过程和降电流过程的  $T_0$  存在  $10.5 \mu\text{K}$  的偏差。对于  $u_{T_0}$ , 最小值为  $12.4 \mu\text{K}$ , 较二电流法下降 34%。在有参考温度计的情况下, 对于  $T_0$ , 有无参考温度计的测量结果最大偏差为  $3.4 \mu\text{K}$ 。对于  $u_{T_0}$ , 最小值为  $10.1 \mu\text{K}$ 。

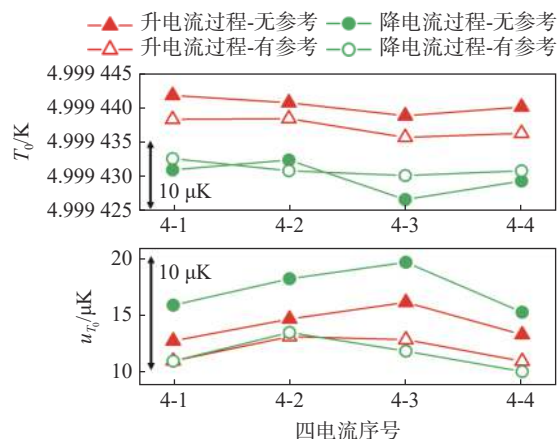


图 6 多电流法中有无参考温度计下不同四电流组计算结果

Fig. 6 The results of different four-current groups with and without reference thermometer in the multi-current method

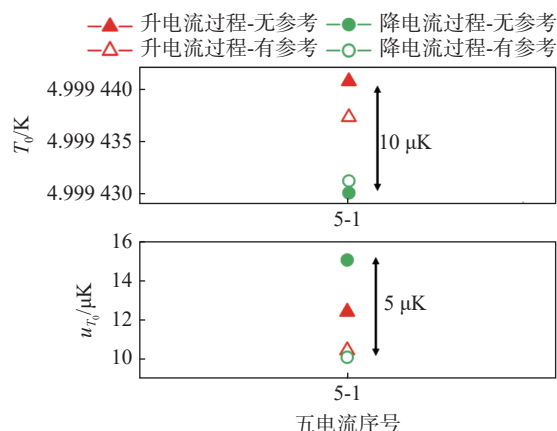


图 7 多电流法中有无参考温度计下五电流组计算结果

Fig. 7 The results of five-current groups with and without reference thermometer in the multi-current method

上述有无参考温度计下二电流法和多电流法计算结果汇总于表 3 中。横向比较无参考温度计时二电流和多电流法结果, 可以看出: 对于  $T_0$ , 多电流法可提高  $T_0$  在不同电流组和升降电流过程时的一致性, 这主要是由于多电流法相较于二电流法引入了额外的测量数据。对于  $u_{T_0}$ , 相较于常规二电流法, 普遍二电流法的测量不确定度下降 48.8%, 多电流法在此基础上有进一步下降, 但下降程度不大, 且随着电流数增多下降程度越来越小。纵向比较有无参考温度计时结果, 可以看出: 对于  $T_0$ , 有无参考温度计的测量结果一致性很好, 偏差均远小于测量不确定度。对于  $u_{T_0}$ , 在不同电流下参考温度计法均实现了可观的下降, 降幅为 18.5%~41.1%。

表 3 有无参考温度计下二电流法和多电流法计算结果

Tab. 3 Results of the two-current method and multi-current method with and without a reference thermometer

| 条件     | 参数                                   | 常规<br>二电流法 | 普遍<br>二电流法 | 多电流法-<br>三电流 | 多电流法-<br>四电流 | 多电流法-<br>五电流 |
|--------|--------------------------------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| 无参考温度计 | 不同电流组 $T_0$ 最大偏差/ $\mu\text{K}$      | /          | 15.1       | 9.9          | 5.7          | /            |
|        | 升降电流过程 $T_0$ 最大偏差/ $\mu\text{K}$     | /          | 14.6       | 13.4         | 12.2         | 10.5         |
|        | $u_{T_0}$ 最小的电流组                     | /          | 2-2        | 3-4          | 4-1          | /            |
|        | $u_{T_0}$ 最小值/ $\mu\text{K}$         | 36.5       | 18.7       | 14.0         | 12.9         | 12.4         |
| 有参考温度计 | 不同电流组 $T_0$ 最大偏差/ $\mu\text{K}$      | /          | 14.1       | 7.1          | 2.7          | /            |
|        | 升降电流过程 $T_0$ 最大偏差/ $\mu\text{K}$     | /          | 10.2       | 11.3         | 7.6          | 6.0          |
|        | $u_{T_0}$ 最小的电流组                     | /          | 2-3        | 3-4          | 4-4          | /            |
|        | $u_{T_0}$ 最小值/ $\mu\text{K}$         | 21.5       | 14.4       | 11.4         | 10.2         | 10.1         |
| 比较     | 无参考与有参考对比 $T_0$ 的最大偏差/ $\mu\text{K}$ | 4.3        | 4.3        | 4.7          | 3.8          | 3.4          |
|        | $u_{T_0}$ 最小值降低百分比/%                 | 41.1       | 23.0       | 18.6         | 20.9         | 18.5         |

图 8 呈现了有无参考温度计时二电流和多电流法中使用不同激励电流数量实现的最小不确定度的结果,可以看出,将常规二电流法中的电流比值  $1:\sqrt{2}$  更改为  $1:2$  可大幅降低自热效应修正不确定度,而增加参考温度计可进一步降低修正不确定度。

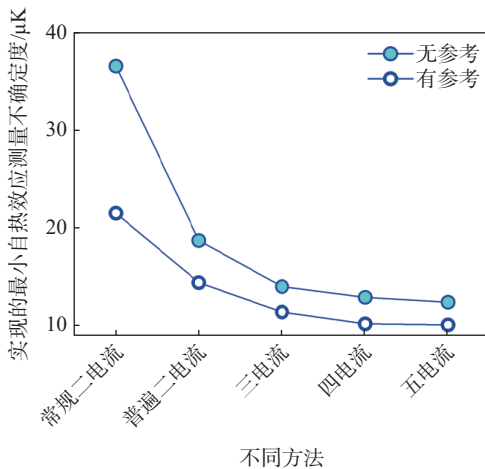


图 8 有无参考温度计下各方法实现的最小自热效应修正不确定度

Fig. 8 The minimum self-heating effect correction uncertainty achieved by each method with and without a reference thermometer

#### 4 结论

本文在 5 K 温度下实验研究了深低温区标准铂电阻温度计自热效应修正测量方法,即二电流法、多电流法和参考温度计法,并对各方法自热效应修正计算结果  $T_0$  及其不确定度  $u_{T_0}$  进行了比较,

其中对于参考温度计法的研究是深低温区首次报道,也是首次将参考温度计法同二电流法和多电流法进行结合和系统性比较。本文主要结论如下:

(1)对于二电流法,在不改变测量电流数量和时间的情况下,将两个电流的比值由常规二电流法中的  $1:\sqrt{2}$  更改为普遍二电流法中的  $1:2$ ,修正不确定度降低约 50%,而增加参考温度计可将修正不确定度降低约 40%,二者结合可降低约 60%。三电流法可在此基础上进一步将自热效应修正不确定度降低 20%,四电流和五电流法相对三电流法仅可降低约 10%。

(2)考虑到使用多电流法会增大测量时间和实验复杂性,本文推荐使用带参考温度计的二电流法进行深低温区标准铂电阻温度计自热效应测量和修正,两激励电流比为  $1:2$ 。

(3)自热效应修正计算结果  $T_0$  在电流增大和电流降低的测量过程中呈现出了一定偏差,对于上述推荐的测量方法,本文测得的偏差为  $10.2 \mu\text{K}$ ,接近此时的不确定度  $14.4 \mu\text{K}$ ,实际计算中可将升降温两者平均值作为最终结果以减小该偏差的可能影响。未来,对于该偏差产生的原因及降低该偏差的方法仍需进一步研究。

本研究结果具有普适性,可进一步推广到深低温区标准铂电阻温度计和标准铂电阻温度计,用于深低温区基于标准电阻温度计开展的标定、复现、国际比对等高准确度温度测量研究。

#### 致谢

感谢中国科学院理化技术研究所张震工程师和马英工程师对本工作的帮助。



## 参考文献:

- [1] BALLE C, CASAS-CUBILLOS J, VAUTHIER N, et al. Calibration of cryogenic thermometers for the LHC[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2008, 985: 965–972.
- [2] ADE P A R, AGHANIM N, ARNAUD M, et al. Planck early results. II. The thermal performance of Planck [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2011, 536: 1-31.
- [3] Bureau international des poids et mesures. Guide to the realization of the ITS-90, platinum resistance thermometry [EB/OL]. [2024-01-10]. [https://www.bipm.org/documents/20126/4177-3843/Guide ITS-90\\_5\\_SPRT\\_2021.pdf/c4bbbe56-4118-ee7f-47cb-3ea234db40b8](https://www.bipm.org/documents/20126/4177-3843/Guide ITS-90_5_SPRT_2021.pdf/c4bbbe56-4118-ee7f-47cb-3ea234db40b8).
- [4] KOWAL A, MANUSZKIEWICZ H, KOŁODZIEJ B, et al. Tests of the stability of Chinese RhFe resistance thermometers at low temperatures[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2017, 38(7): 95.
- [5] 宋耀楠, 刘思琦, 张海洋, 等. 标准铂电阻温度计百次低温温循稳定性研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(6): 133–142.
- [6] PRESTON-THOMAS H. The international temperature scale of 1990[J]. *Metrologia*, 1990, 27: 3–10.
- [7] STEUR P, PAVESE F. The ITS-90: A review of the evolution of the cryogenic ranges since 1990 and a view of its future after the new Kelvin definition[J]. *Measurement*, 2020, 159: 107792.
- [8] RUSBY R, HEAD D, MEYER C, et al. Final report on CCT-K1: Realizations of the ITS-90, 0.65 K to 24.5561 K, using rhodium iron resistance thermometers[J]. *Metrologia*, 2006, 43: 03002.
- [9] STEELE A, FELLMUTH B, HEAD D, et al. CCT-K2: Key comparison of capsule-type standard platinum resistance thermometers from 13.8 K to 273.16 K[J]. *Metrologia*, 2002, 39: 551–571.
- [10] The european association of national metrology institutes. Dissemination of the redefined Kelvin [EB/OL]. [2024-01-10]. <https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/dissemination-of-the-redefined-kelvin>.
- [11] TEW W. Calibration of cryogenic resistance thermometers between 0.65 K and 165 K on the International temperature scale of 1990. NIST special publication 250-91 [EB/OL]. [2024-01-10]. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.250-91.pdf>.
- [12] GAO B, ZHANG H Y, HAN D X, et al. Measurement of thermodynamic temperature between 5 K and 24.5 K with single-pressure refractive-index gas thermometry[J]. *Metrologia*, 2020, 57: 065006.
- [13] BATAGELJ V, BOJKOVSKI J, DRNOVSEK J. Methods of reducing the uncertainty of the self-heating correction of a standard platinum resistance thermometer in temperature measurements of the highest accuracy[J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(12): 2151–2158.
- [14] PEARCE J, RUSBY R, HARRIS P, et al. The optimization of self-heating corrections in resistance thermometry[J]. *Metrologia*, 2013, 50(4): 345–353.
- [15] LI K, ZHOU G, LIU L, et al. Reducing the uncertainty of self-heating in high-accuracy cryogenic temperature measurements [C]//25th International Cryogenic Engineering Conference and the International Cryogenic Materials, 2014.
- [16] IZQUIERDO C, HERNÁNDEZ S, GONZÁLEZ A, et al. Evaluation of the self-heating effect in a group of thermometers used in meteorological and climate applications[J]. *Meteorological Applications*, 2019, 26(1): 117–129.
- [17] BABITA, PANT U, MEENA H, et al. Evaluation of self-heating effect in platinum resistance thermometers[J]. *Measurement*, 2022, 203: 111994.
- [18] 任建平, 孙建平, 李婷, 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.
- [19] 孔祥杰, 刘思琦, 宋耀楠, 等. 超流氦至液氦温区低温恒温系统高稳定性控温研究 [C]//中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议, 2023.
- [20] WIKA Instruments. F18 thermometry bridge handbook [EB/OL]. [2024-01-10]. [http://www.isotechna.com/v/vsp-files/product\\_manuals/asl/F18.pdf](http://www.isotechna.com/v/vsp-files/product_manuals/asl/F18.pdf).

(责任编辑: 郭云)