



北京市地方计量技术规范

JJF (京) XXXX-XXXX

精密铂电阻温度计校准规范

Calibration Specification for Precision Platinum Resistance Thermometers

(征求意见稿)

2024-XX-XX 发布

2024-XX-XX 实施

北京市市场监督管理局 发布

精密铂电阻温度计校准规范

Calibration Specification for

Precision Platinum Resistance Thermometers

JJF(京) XX-XXXX

归口单位：北京市市场监督管理局

主要起草单位：北京市计量检测科学研究院

参加起草单位：山东省潍坊市计量测试所

北京奥维泰科技有限公司

北京康斯特科技股份有限公司

本规程委托北京市计量检测科学研究院负责解释

目 录

引 言.....	(11)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语.....	(1)
3.1 精密铂电阻温度计.....	(1)
3.2 定义固定点.....	(1)
3.3 熔化点.....	(1)
3.4 温坪.....	(1)
3.5 固定点法.....	(1)
3.6 比较法.....	(1)
4 概述.....	(2)
5 计量性能.....	(2)
6 校准条件.....	(2)
6.1 环境条件.....	(3)
6.2 校准标准器和其他设备.....	(3)
7 校准项目和校准方法.....	(4)
7.1 校准项目.....	(4)
7.2 校准方法.....	(4)
7.3 校准结果处理.....	(7)
8 校准结果表达.....	(9)
9 复校时间间隔.....	(9)
附录 A 示值误差的不确定度评定示例.....	(10)
附录 B 精密铂电阻温度计校准原始记录格式.....	(17)
附录 C 校准证书内页格式（推荐）.....	(18)

引 言

本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》的规定而制定。

本规范为首次发布。

精密铂电阻温度计校准规范

1 范围

本规范适用于 $-189.3442^{\circ}\text{C}\sim 660.323^{\circ}\text{C}$ （或各分温区） 100°C 时电阻比/温度系数大于等于1.3925 精密铂电阻温度计（以下简称温度计）的校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJG 160-2007	标准铂电阻温度计检定规程
JJF 1178-2007	用于标准铂电阻温度计的固定点装置校准规范
JJF 1001-2011	通用计量术语及定义
JJF 1007-2007	温度计量名词及定义

上述文件为注日期的引用文件，注日期的版本适用于本规范。

3 术语

JJF 1001-1998、JJF 1007-2007 界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1 精密铂电阻温度计 precision platinum resistance thermometer

利用铂的电阻随温度变化的特性测量温度的仪器，其感温元件必须是无应力退过火的铂丝制成，稳定性指标低于二等标准铂电阻温度计， 100°C 时电阻比/温度系数大于等于1.3925。

3.2 定义固定点 defining fixed point

国际温标中所规定的温度固定点。

3.3 熔化点 melting point

晶体物质从固相向液相转变时的平衡温度。

3.4 温坪 plateau

利用某种物质相变的特性，获得的一段温度稳定不变的均匀温度环境。

3.5 固定点法 fixed point method

将被校温度计放入固定点装置中，达到热平衡后直接进行分度的方法。

3.6 比较法 comparison method

将被校温度计与高等级的标准温度计置于同一个均匀的温场内，通过比较进行分度的

方法。

4 概述

温度计是根据金属铂丝的电阻值随温度单值变化的特性来测温的计量器具，可用于精密温度测量和现场校准的工作用温度计的标准器。

温度计的感温元件采用无应力结构，温度变化时感温元件的铂丝能自由膨胀或收缩；温度计的感温元件密封在金属护套内，从感温元件两端各引出两根引线制成四端电阻器，外接电缆线；温度计的长度和直径因测量范围和用途的不同而异。

温度计在水三相点（0.01℃）的标称电阻值 R_{tp} 通常为 100 Ω、25 Ω，不排除有其他标称电阻值。

温度计在温区内的温度值由 1990 年国际温标(ITS-90)规定的参考函数和偏差函数计算得到，即温度特性为 $W(t) = W_r(t) + \Delta W(t)$ 。各温区的参考函数 $W_r(t)$ 和偏差函数 ΔW_t 表达式见附录 D JJG160-2007《标准铂电阻温度计》检定规程 2.1 温度值的定义和内插方法。

对温度计的校准是通过测量温度计在一组规定的定义固定点的电阻值 R_t （即 $W(t) = R_t/R_{tp}$ ，计算 $W(t)$ 与 $W_r(t)$ 的差值，得到一组偏差函数值，经数学运算得到该温度计的偏差函数 ΔW_t 。

5 计量性能

仪器各项计量性能指标见表 1。

表 1 精密铂电阻温度计计量性能指标

计量性能要求	技术指标
R_{tp} 的偏差	$100 \Omega \pm 2 \Omega, 25 \Omega \pm 1 \Omega$
电阻比值	$W_{100} \geq 1.3925$ 以及 $W_{Ga} \geq 1.11807$ 或 $W_{Hg} \leq 0.84424$
自热效应	$\leq 4mk$
绝缘电阻	温度计在常温下外壳与引线之间的电阻不小于 400MΩ

注：以上计量特性要求仅供参考，不作为判定依据

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(18~28)℃。

6.1.2 相对湿度：≤85%。

环境条件应同时满足标准器及电测设备使用的相关要求。

注：如不能满足标准器使用的环境要求，在不确定度评定时应考虑增加标准器不确定度的可能。

6.2 校准标准器和其他设备

校准时所需的标准仪器及配套设备可从表 2 中参考选择。选用的原则为：校准时由标准仪器及配套设备引入的扩展不确定度 $U(k=2)$ 应尽可能小，以满足校准工作的要求。

表 2 标准仪器及配套设备

序号	仪器设备名称	技术要求	用途	备注
1	固定点装置	铝、锌、锡、铟、镓熔点装置, 汞、水三相点装置, 符合一等铂电阻温度计标准装置要求	标准温度源	
2	标准铂电阻温度计	-196℃~+660℃; 一等	参考标准	
3	电测仪器(电桥或可测量电阻的电测仪器)	相对误差不大于 1×10^{-5} ; 测量范围应与标准铂电阻、被校温度计电阻值范围相适应保证测量标准器和被校温度计电阻的分辨力换算成温度后不低于 0.1mK	测量精密铂电阻和标准铂电阻阻值的仪器	符合激励电流提供换向功能的电测仪器
4	四端转换开关	杂散热电势 $\leq 0.4 \mu V$	标准铂电阻和被校温度计测量用转换器	
5	比较测量装置	温度范围 -80℃~300℃; 水平温场 $\leq 0.005^\circ C$; 10min 变化不大于 $0.005^\circ C$	实现温度 t 的恒温装置	含等温块可以提高恒温槽的稳定性和均匀性
6	高温比较测量装置	温度范围 $20^\circ C \sim 550^\circ C$; 水平温场 $\leq 0.01^\circ C$; 10min 变化不大于 $0.01^\circ C$	实现高温 t 的恒温装置。	含等温块可以提高恒温槽的稳定性和均匀性
7	退火炉装置	温度范围 $200^\circ C \sim 700^\circ C$; 温度设定点允差: $\pm 10^\circ C$; 有不小于 60mm 的等温区, 径向温差 不大于 $1^\circ C$		
8	液氮比较仪	温度范围 -196℃; 水平温场 $\leq 5mK$; 10min 变化不大于 2mK	实现 -196℃ 的低温源	亦可用满足要求的低温恒温槽、液氮杜瓦瓶
9	绝缘电阻表	直流电压 500V; 10 级	测量温度计的绝缘电阻	

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

a) 校准项目为: R_{tp} 、 W_{Al} 、 $W_{500^{\circ}C}$ 、 $W_{450^{\circ}C}$ 、 W_{Zn} 、 $W_{300^{\circ}C}$ 、 W_{Sn} 、 $W_{100^{\circ}C}$ 、 W_{In} 、 W_{Ga} 、 W_{Hg} 、 W_{Ar} 。其中, $W_{500^{\circ}C}$ 、 $W_{450^{\circ}C}$ 、 $W_{300^{\circ}C}$ 、 $W_{100^{\circ}C}$ 可通过温度计在其他固定点温度校准后通过计算获得。

上述校准项目与温度计使用温区有关, 见表 3。

表 3 不同使用温区的校准项目一览表

校准项目	使用温区/°C									
	0~660.323	0~500	0~450	0~419.527	0~300	0~231.928	0~156.598 5	-38.8344~ 29.7646	0~29.7646	-189.3442~ 0.01
R_{tp}	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
W_{Al}	+									
$W_{500^{\circ}C}$		+								
$W_{450^{\circ}C}$			+							
W_{Zn}	+	+		+						
$W_{300^{\circ}C}$					+					
W_{Sn}	+	+	+	+	+	+				
W_{In}					+	+	+			
$W_{100^{\circ}C}$	+	+	+	+	+	+	+			
W_{Ga}								+	+	
W_{Hg}								+		+
W_{Ar}										+

注: “+”表示温度计使用温区内应校准的项目, 对于测量上限无法达到固定点温度的可测上限温度时的 W_t 。

b) 检查项目为: 自热效应, 绝缘电阻, 稳定性。

7.2 校准方法

绝缘电阻、自热效应的检查在校准过程中进行, 校准步骤按如下顺序。

7.2.1 绝缘电阻测量

环境温度在 $18^{\circ}C \sim 28^{\circ}C$ 之间, 相对湿度: $<85\%$ 时, 用绝缘电阻表测量温度计金属外壳和引线之间的电阻, 其值不应小于 $400M\Omega$ 。

7.2.2 温度计清洗

温度计在退火前应用无水乙醇将温度计保护管擦洗干净。

7.2.3 退火

使用上限温度高于 450℃(不含 450℃)的温度计在校准前应进行退火,退火温度参考温度计使用说明书要求,时间为 2 小时。温度计在退火后应随炉冷却至 420℃以下方可取出进行水三相点及其它温度点的测量。

7.2.4 R_{tp} 的测量

温度计电阻值的测量均采用四线制测量电阻的方法用相应的电测仪器测量,测量工作电流为 1mA。

R_{tp} 的测量必须在水三相点瓶中进行。水三相点瓶使用前冰套应自由转动,温度计在预冷后才可插入水三相点瓶中,待热平衡后测量温度计的电阻值 R_{tp} 。 R_{tp} 应取测量平均值,其中包括固定点温度测量后的复测值。

7.2.5 自热效应的测量

自热效应应在水三相点瓶中测量。对于工作电流可调的测温电桥先测量工作电流为 1mA 下温度计的 R_{tp1} ,再测量工作电流为 $\sqrt{2}$ mA时的 R_{tp2} ,两者之差绝对值为 R_{tp} 按公式 (1) 计算可获得自热效应 Δt 。

$$\Delta t = |\Delta R_{tp}/R_{tp}|/[dW_r(t)/dt]_{0^{\circ}\text{C}} \quad (1)$$

式中: Δt ——自热效应, mK;

ΔR_{tp} —— $\sqrt{2}$ mA时测得的 R_{tp1} 与 1mA 下测得的 R_{tp2} 之差, Ω ;

$[dW_r(t)/dt]_{0^{\circ}\text{C}}$ ——温度为 0℃时参考函数的电阻比温度变化率, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

7.2.6 W_t 的测量

W_t 的测量首选固定点法,对于传感器过短或没有固定点装置的,也可采用比较法在所校温度点附近用比较法测量。温度计应按使用温区从高温向低温校准。

7.2.6.1 固定点法

a) 测量 R_{Al} 、 R_{Zn} 、 R_{Sn} 、 R_{In}

熔化点温坪的实现:将定点炉温度控制在比凝固点温度低 3.5℃~5℃范围内,保持 2 小时以上,用一支监控用的铂电阻温度计插入固定点容器内观察其温度变化,以每分钟 1.5℃的速度直接升温到高于凝固点温度 0.5℃~1.0℃,等熔化点温坪曲线出现后,将监控温度计取出,平衡后,就可以将被校铂电阻温度计插入固定点炉中。温度计达到热平衡后,可

以开始测量。测量温度计的电阻值 R_t 应不少于两次，取测量的平均值。

b) 测量 R_{Ga}

镓熔点温坪的实现：可参照 JJG160-2007《标准铂电阻温度计》检定规程 5.3.16 测量 W_{Ga} 。

c) 测量 R_{Hg} 、 R_{Ar}

汞三相点温坪和氩三相点温坪的实现：可参照 JJG160-2007《标准铂电阻温度计》检定规程 5.3.18 测量 W_{Hg} 和 5.3.19 测量 W_{Ar} 。

d) 按公式 (2) 计算可获得 W_t

$$W_t = R_t/R_{tp} \quad (2)$$

式中： W_t ——温度计在温度为 t 时的电阻值 R_t 与 R_{tp} 的比值；

R_t ——温度计在温度为 t 时的电阻值， Ω ；

R_{tp} ——温度计在水三相点(0.01℃)时测得的电阻值， Ω 。

e) 允许采用其他满足 6.1 要求的方法实现各凝固点温坪、熔化点温坪及三相点温坪。

7.2.6.2 比较法

a) 将一等标准铂电阻温度计和被校温度计一起放入温度比较装置中，将温度控制在分度点附近，偏离不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，待温度平衡后，先测量标准铂电阻温度计，再依次测量各被校温度计，最后再测量标准铂电阻温度计，如此完成两个测量循环，共 4 遍数据，取标准铂电阻温度计平均阻值 R_t^* 和被校温度计平均阻值 R_t ，再将标准和被校分别放入水三相点中，测得相应的 R_{tp}^* 和 R_{tp} 。

b) 计算 W_t^* 、 W_t'

按公式 (3) 计算可获得一等标准铂电阻的 W_t^* ，并按公式 (4) 计算可获得被校温度计的 W_t' 。

$$W_t^* = R_t^*/R_{tp}^* \quad (3)$$

$$W_t' = R_t/R_{tp} \quad (4)$$

式中： W_t^* ——标准温度计在温度为 t 时的电阻值 R_t^* 与 R_{tp}^* 的比值；

W_t' ——被校温度计在温度为 t 时的电阻值 R_t 与 R_{tp} 的比值；

R_t^* ——标准温度计在温度为 t 时的电阻值, Ω ;

R_t ——被校温度计在温度为 t 时的电阻值, Ω ;

R_{tp}^* ——标准温度计在水三相点(0.01°C) 时测得的电阻值, Ω ;

R_{tp} ——被校温度计在水三相点(0.01°C) 时测得的电阻值, Ω 。

c) 计算 W_t

按公式(5)计算可获得被校温度计在分度点的 W_t 。

$$W_t = W_t' + \Delta W_t^* = W_t' + (W_{rt}^* - W_t^*) \left(\frac{dW_t/dt}{dW_t^*/dt} \right)$$

(5)

其中: $\frac{dW_t/dt}{dW_t^*/dt} \approx 1$, 公式 (5)可简化成公式 (6)。

$$W_t = W_t' + W_{rt}^* - W_t^* \quad (6)$$

式中: ΔW_t^* ——标准温度计在在温度为 t 时的电阻比与证书上分度点 W_{rt}^* 之差;

W_{rt}^* ——标准温度计证书上给出的该分度点的 W_t ;

dW_t/dt ——被校温度计在温度为 t 时的电阻比温度变化率, $^\circ\text{C}^{-1}$;

dW_t^*/dt ——标准温度计在温度为 t 时的电阻比温度变化率, $^\circ\text{C}^{-1}$ 。

7.3 校准结果处理

7.3.1 偏差函数 ΔW_t 的计算

a) $0^\circ\text{C} \sim 660.323^\circ\text{C}$ 温度范围

按公式(7)计算被校温度计的偏差函数。其中, a 、 b 和 c 由温度计分别在铝、锌、锡固定点测得 W_t 计算求得。

$$\Delta W_t = a(W_t - 1) + b(W_t - 1)^2 + c(W_t - 1)^3 \quad (7)$$

式中: a 、 b 、 c ——温度计系数。

b) $0^\circ\text{C} \sim 419.527^\circ\text{C}$ 温度范围

按公式(8)计算被校温度计的偏差函数。其中, a 和 b 由温度计分别在锌、锡固定点测得 W_t 计算求得。

$$\Delta W_t = a(W_t - 1) + b(W_t - 1)^2 \quad (8)$$

c) $0^\circ\text{C} \sim 231.928^\circ\text{C}$ 温度范围

按公式(8)计算被校温度计的偏差函数。其中, a 和 b 由温度计分别在锡、铟固定点测得 W_t 计算求得。

d) 0°C~156.5985°C温度范围

按公式(9)计算被校温度计的偏差函数。其中, a 由温度计在铟固定点测得 W_t 计算求得。

$$\Delta W_t = a(W_t - 1) \quad (9)$$

e) 0°C~29.7646°C温区内

按公式(9)计算被校温度计的偏差函数。其中, a 由温度计在镓固定点测得 W_t 计算求得。

f) -38.8344°C~29.7646°C温区内

按公式(8)计算被校温度计的偏差函数。其中, a 和 b 由温度计分别在镓、汞固定点测得 W_t 计算求得。

g) -189.3442°C~0.01°C温区内

按公式(10)计算被校温度计的偏差函数。其中, a 和 b 由温度计分别在氙、汞固定点测得 $W(T_{90})$ 计算求得。

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b [W(T_{90}) - 1] \ln W(T_{90}) \quad (10)$$

h) 0°C~300°C温度范围

按公式(8)计算被校温度计的偏差函数。其中, a 和 b 由温度计分别在锡、铟固定点测得 W_t 计算求得, 锡固定点以上温度偏差函数可由公式(8)外推获得。

i) 0°C~500°C温区、0°C~450°C温度范围

按公式(8)计算被校温度计的偏差函数。其中, a 和 b 由温度计分别在锌、锡固定点测得 W_t 计算求得, 锌固定点以上温度偏差函数可由公式(8)外推获得。

j) 系数的计算

a、b、c 系数的计算可参照 JJG160-2007 中 5.4 计算公式。

7.3.2 稳定性

复校的温度计应检查其周期稳定性, 计算与上一周期的变化量, 包括各校准温度点的变化, 结果以 mK 为单位。

7.3.3 数据有效位数

校准报告应根据温度计使用的不同温区给出最终结果, 其中, R_{cp} 取到小数点后 4 位 W_{Al} 、

$W_{500^\circ C}$ 、 $W_{450^\circ C}$ 、 W_{Zn} 、 $W_{300^\circ C}$ 、 W_{Sn} 、 W_{In} 、 $W_{100^\circ C}$ 、 W_{Ga} 、 W_{Hg} 、 W_{Ar} 、a、b、c 取到小数点后六位, 自热效应、稳定性结果以 mK 为单位, 取到小数点后 1 位。

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映。校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范偏离的说明；
- n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识以及签发日期；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

其中，“本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明”中应包括标准器的名称、型号规格、测量范围及不确定度(或准确度等级、最大允许误差)、有效日期等说明。

“校准环境的描述”中应包括环境温度、相对湿度和供电的状况。

“校准结果及其测量不确定度的说明”中应给出每个被校温度点对应的电阻比值或电阻值、温度计系数、绝缘电阻、自热效应、年稳定性及扩展不确定度。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔一般不超过一年。复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等因素决定，送校单位也可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。如果仪器经维修、更换重要部件或对仪器性能有怀疑时，应重新校准。

附录 A

示值误差的不确定度评定示例

A.1 概述

A.1.1 测量方法

依据《精密铂电阻温度计》校准规范。

A.1.2 测量标准

一等标准铂电阻温度计：测量范围-189.3442℃~660.323℃。

恒温槽：水平温场 0.005℃；波动度±0.005℃/10min。

盐槽：水平温场 0.01℃；波动度±0.01℃/10min。

电测设备：精密测温电桥及配套设备，最大允许相对误差为： $\pm 1 \times 10^{-5}$ 。

A.1.3 测量对象

精密铂电阻温度计。型号: 5615-12, 测量范围 0℃~420℃。

A.1.4 测量点

锌点 419.527℃、锡点 231.928℃和水三相点 0.01℃。其中,水三相点 0.01℃在水三相点瓶中测得,其余各点在温度比较装置中测得。

A.1.5 测量过程

将标准和被校铂电阻温度计一起放入温度比较装置中,将温度控制在锌点 419.527℃(和锡点 231.928℃)点附近,偏离不超过±0.5℃,待温度平衡后先测得相应的标准铂电阻温度计阻值 R_t^* 和被校铂电阻温度计阻值 R_t ,再测量被校铂电阻温度计和标准铂电阻温度计,如此完成两个测量循环,共 4 遍数据,取平均值。分别测得标准和被校铂电阻温度计的 R_{tp}^* 和 R_{tp} ,计算出电阻比,最后根据公式计算出被校铂电阻温度计锌点和锡点的分度值。

A.2 测量模型

由公式(A1)和(A2)分别计算得到温度为 t ℃时的 W_t^* 和 W_t' 。最后,根据公式(A3)计算出被校的 W_{Zn} 和 W_{Sn} 。

$$W_t^* = R_t^* / R_{tp}^* \quad (A1)$$

$$W_t' = R_t' / R_{tp} \quad (A2)$$

$$W_t = W'_t + \Delta W_t^* = W'_t + (W_{rt}^* - W_t^*) \left(\frac{dW_t/dt}{dW_t^*/dt} \right) \quad (\text{A3})$$

$$\text{其中: } \frac{dW_t/dt}{dW_t^*/dt} \approx 1 \quad ; \quad W_t = W'_t + W_{rt}^* - W_t^* \quad (\text{A4})$$

式中: W_t^* : ——标准温度计在校准温度时的电阻比;

R_t^* ——标准温度计在温度为 t 时的电阻值, Ω ;

R_{tp}^* ——标准温度计在水三相点(0.01°C)时测得的电阻值, Ω ;

W'_t ——被校温度计在校准温度时的电阻比;

R'_t ——被校温度计在温度为 t 时的电阻值, Ω ;

R_{tp} ——被校温度计在水三相点(0.01°C)时测得的电阻值, Ω ;

ΔW_t^* ——标准铂电阻温度计在校定温度时的电阻比与证书上 W_{Zn} 或 W_{Sn} 之差;

W_{rt}^* ——标准铂电阻温度计证书上给出的 W_{Zn} 或 W_{Sn} ;

dW_t/dt ——被校铂电阻温度计在校准温度时的电阻温度变化率, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

dW_t^*/dt ——标准温度计在校准温度时的电阻温度变化率, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

A.3 不确定度来源分析

灵敏系数

对公式(A4)全微分可得

$$dw = \frac{dR'_t}{R_{tp}} - \frac{R'_t}{R_{tp}^2} dR'_{tp} - \frac{dR_t^*}{R_{tp}^*} + \frac{R_t^*}{R_{tp}^{*2}} dR_{tp}^* + dW_{rt}^* \quad (\text{A5})$$

由于不确定度分量各不相关, 因而其合成方差为:

$$u_c^2(W_t) = u^2(W_t) + u^2(W_t^*) + u^2(W_{rt}^*) \quad (\text{A6})$$

$$= c_1^2 \cdot u^2(R'_t) + c_2^2 \cdot u^2(R'_{tp}) + c_3^2 \cdot u^2(R_t^*) + c_4^2 \cdot u^2(R_{tp}^*) + c_5^2 \cdot u^2(W_{rt}^*) + c_6^2 \cdot u^2(W_{R1}) + c_7^2 \cdot u^2(W_{R2})$$

式中: $u(W_{R1})$ ——电测设备带来的标准不确定度;

$u(W_{R2})$ ——简化公式带来的标准不确定度。

因此, 各标准不确定度分量为:

$$u(y_1) = c_1 \cdot u(R'_t)$$

$$u(y_2) = c_2 \cdot u(R'_{tp})$$

$$u(y_3) = c_3 \cdot u(R_t^*)$$

$$u(y_4) = c_4 \cdot u(R'_{tp})$$

$$u(y_5) = c_5 \cdot u(W_{rt}^*)$$

$$u(y_6) = c_6 \cdot u(W_{R1})$$

$$u(y_7) = c_7 \cdot u(W_{R2})$$

其中, $c_1 = \frac{1}{R_{tp}}$; $c_2 = \frac{R'_t}{R_{tp}^2}$; $c_3 = \frac{1}{R_{tp}}$; $c_4 = \frac{R_t^*}{R_{tp}^2}$; $c_5 = 1$; $c_6 = 2$; $c_7 = 1$ 。

A.4 标准不确定度评定

A.4.1 标准不确定度 $u(R'_t)$ 的评定

A.4.1.1 被校的复现性引入的标准不确定度 $u(R'_{t1})$ (A 类)

被校精密铂电阻温度计短期不稳定性引入的标准不确定度可通过对三支稳定的被校温度计一星期内在各温度点附近做多次测量, 合并样本标准 s_p , 由 A 类标准不确定度获得。

$$\text{a) 锌点温度校准时: } S_p = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 S_i^2} = 0.262 \text{m}\Omega$$

实际测量是以 4 次测量值平均值为测量结果, 所以 $u(R'_{t1}) = s_p/\sqrt{4} = 0.131 \text{m}\Omega$, 相当于 1.50mK。

$$\text{b) 锡点温度校准时: } S_p = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 S_i^2} = 0.105 \text{m}\Omega$$

所以 $u(R'_{t1}) = s_p/\sqrt{4} = 0.052 \text{m}\Omega$ (相当于 0.57mK)。

A.4.1.2 自热效应分散性引入的标准不确定度 $u(R'_{t2})$

温度计在校准和测量时, 通过电流均为 1mA, 因此校准结果已包含了自热影响, 只是自热的分散性应予以考虑。试验表明, 温度计在恒温槽中自热的分散性最大不超过 0.8mK, 由此引起的标准不确定度

$$\text{a) 锌点温度校准时: } u(R'_{t2}) = 0.280 \text{m}\Omega \text{ (相当于 } 0.80 \text{mK)}。$$

$$\text{b) 锡点温度校准时: } u(R'_{t2}) = 0.297 \text{m}\Omega \text{ (相当于 } 0.80 \text{mK)}。$$

A.4.1.3 $u(R'_t)$ 的计算

由于上述 2 个不确定度分量相互独立, 因此合成为

$$\text{a) 锌点温度校准时: } u(R'_t) = \sqrt{0.131^2 + 0.280^2} = 0.309 \text{m}\Omega$$

$$\text{b) 锡点温度校准时: } u(R'_t) = \sqrt{0.052^2 + 0.297^2} = 0.302 \text{m}\Omega$$

A.4.2 标准不确定度 $u(R_{tp})$ 的评定

A.4.2.1 被校的复现性引入的标准不确定度 $u(R_{tp1})$ (A 类)

我们采用三支稳定的精密铂电阻温度计在一个星期内在水三相点做多次测量，并合并样本标准 S_p

$$S_p = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 S_i^2} = 0.026 \text{m}\Omega$$

所以 $u(R_{tp1}) = S_p = 0.026 \text{m}\Omega$ (相当于 0.26 mK)。

A.4.2.2 水三相点容器引起的标准不确定度 $u(R_{tp2})$

水三相点瓶中微量残余气体、水中杂质、水分子中氢与氧及同位素成分的影响，静压力修正不准等原因引起不确定度量，我们的采用多个水三相点瓶进行比对，可产生 0.4mK 误差服从矩形分布，则由此引入的标准不确定度 $0.4 \text{mK} / \sqrt{3} = 0.23 \text{mK}$ ，相当于 $u(R'_{tp2}) = 0.023 \text{m}\Omega$ 。

A.4.2.3 由工作基准铂电阻温度计带来的标准不确定度 $u(R_{tp3})$

使用经中国计量科学研究院已经分度的工作基准铂电阻温度计进行考核。原证书给出工作基准铂电阻温度计在水三相点的扩展不确定度为 0.3mK, $k=2$ ，则由此引入的标准不确定度 $0.3/2=0.15 \text{mK}$ ，相当于 $u(R'_{tp2}) = 0.015 \text{m}\Omega$ 。

A.4.2.4 $u(R_{tp})$ 的计算

由于上述 3 个不确定度分量相互独立，因此合成为

$$u(R_t) = \sqrt{0.026^2 + 0.023^2 + 0.015^2} = 0.038 \text{m}\Omega$$

A.4.3 标准不确定度 $u(R_t^*)$ 的评定A.4.3.1 标准的重复性引入的标准不确定度 $u(R_{t1}^*)$ (A 类)

对一等标准铂电阻温度计做了 6 遍短期重复性测量，获得其 A 类标准不确定度。实际测量是以 4 次测量值平均值为测量结果。

a) 锌点温度校准时： $u(R_{t1}^*) = s_p / \sqrt{4} = 0.011 \text{m}\Omega$ (相当于 0.13 mK)。

b) 锡点温度校准时： $u(R_{t1}^*) = s_p / \sqrt{4} = 0.010 \text{m}\Omega$ (相当于 0.10mK)。

A.4.3.2 自热效应引入的标准不确定度 $u(R_{t2}^*)$

一等标准铂电阻温度计在测量时，通过电流均为 1mA，试验表明，在定点炉和流动介质中的自热效应的差异在锌点最大不超过 4mK，在锡点最大不超过 2mK，由此引起的标准不确定度自热效应引起的标准不确定度

a) 锌点温度校准时： $u(R_{t2}^*) = 0.402 \text{m}\Omega$ (相当于 1.15mK)。

b)锡点温度校准时: $u(R_{t2}^*) = 0.215\text{m}\Omega$ (相当于 0.58mK)。

A.4.3.3 温场的均匀性引入的标准不确定度 $u(R_{t3}^*)$

精密铂电阻温度计比较法校准必须使标准和被校温度计的感温部分处于同一水平面,故只需考虑水平温场不均匀性产生的影响。对于温度比较装置添加等温块后,在锌点可保证水平温场为 0.01°C ,在锡点可保证水平温场为 0.005°C ,服从矩形分布,则

a)锌点温度校准时: $0.01^\circ\text{C}/2\sqrt{3} = 2.88\text{mK}$, 相当于 $u(R'_{t3}) = 0.252\text{m}\Omega$ 。

b)锡点温度校准时: $0.005^\circ\text{C}/2\sqrt{3} = 1.44\text{mK}$, 相当于 $u(R'_{t3}) = 0.134\text{m}\Omega$ 。

A.4.3.4 $u(R_t^*)$ 的计算

由于上述 3 个不确定度分量相互独立,因此合成为

a)锌点温度校准时: $u(R_t^*) = \sqrt{0.011^2 + 0.402^2 + 0.252^2} = 0.475\text{m}\Omega$

b)锡点温度校准时: $u(R_t^*) = \sqrt{0.010^2 + 0.215^2 + 0.134^2} = 0.254\text{m}\Omega$

A.4.4 标准不确定度 $u(R_{tp}^*)$ 的评定

A.4.4.1 标准的复现性引入的标准不确定度 $u(R_{tp1}^*)$ (A 类)

我们对一等标准铂电阻温度计一个星期内在水三相点做多次测量,获得其 A 类标准不确定度 $u(R_{tp1}^*) = 0.018\text{m}\Omega$ (相当于 0.18mK)。

A.4.4.2 水三相点容器引起的标准不确定度 $u(R_{tp2}^*)$

水三相点容器引起的标准不确定度 0.23mK , 相当于 $u(R_{tp2}^*) = 0.023\text{m}\Omega$ 。

A.4.4.3 由工作基准铂电阻温度计带来的标准不确定度 $u(R_{tp3}^*)$

使用经中国计量科学研究院已经分度的工作基准铂电阻温度计进行考核。原证书给出工作基准铂电阻温度计在水三相点的扩展不确定度为 0.3mK , $k=2$, 则由此引入的标准不确定度 $u(R'_{tp2}) = 0.3/2 = 0.15\text{mK}$, 相当于 $0.015\text{m}\Omega$ 。

A.4.4.3.4 $u(R_{tp}^*)$ 的计算

由于上述 3 个不确定度分量相互独立,因此合成为

$$u(R_{tp}^*) = \sqrt{0.018^2 + 0.023^2 + 0.015^2} = 0.033\text{m}\Omega$$

A.4.5 标准不确定度 $u(W_{rt}^*)$ 的评定

一等标准铂电阻温度计传递可引入不确定度

a)锌点温度校准时: 一等标准铂电阻温度计扩展不确定度 $U=4.2\text{mK}$, $k=2$, 则 $4.2\text{mK}/2=2.10\text{mK}$, 相当于 $u(W_{rt1}^*) = 7.34 \times 10^{-6}$ 。

b)锡点温度校准时: 一等标准铂电阻温度计扩展不确定度 $U=3.3\text{mK}$, $k=2$, 则

$3.3\text{mK}/2=1.70\text{mK}$, 相当于 $u(W_{rt2}^*) = 6.13 \times 10^{-6}$ 。

A.4.6 电测设备引起的标准不确定度 $u(W_{R1})$

精密铂电阻温度计测量采用测温电桥及配套标准电阻, 电桥的不确定度, 测量时标准电阻随温度的变化, 各类干扰以及人员读数误差, 以及交直流电桥的差异均引入的不确定度。

a) 锌点温度校准时: 电测设备引起的标准不确定度半宽 $a=0.4\text{mK}$, 服从矩形分布, 则包含因子 $k = \sqrt{3}$, 故标准不确定度 $(0.4\text{mK}/\sqrt{3} = 0.23\text{mK}$, 相当于 $u(W_{R1}) = 0.80 \times 10^{-6}$ 。

b) 锡点温度校准时: 电测设备引起的标准不确定度半宽 $a=0.2\text{mK}$, 服从矩形分布, 则包含因子 $k = \sqrt{3}$, 故标准不确定度 $0.2\text{mK}/\sqrt{3} = 0.12\text{mK}$, 相当于 $u(W_{R1}) = 0.45 \times 10^{-6}$ 。

A.4.7 简化公式引起的标准不确定度 $u(W_{R2})$

引入简化公式计算精密铂电阻温度计的分度值可引入不确定度。

a) 锌点温度校准时: 采用简化公式引起的标准不确定度半宽 $a=0.60\text{mK}$, 服从矩形分布, 则包含因子 $k = \sqrt{3}$, 故标准不确定度 $0.60\text{mK}/\sqrt{3} = 0.35\text{mK}$, 相当于 $u(W_{R2}) = 1.23 \times 10^{-6}$ 。

b) 锡点温度校准时: 采用简化公式引起的标准不确定度半宽 $a=0.30\text{mK}$, 服从矩形分布, 则包含因子 $k = \sqrt{3}$, 故标准不确定度 $(0.30\text{mK}/\sqrt{3} = 0.18\text{mK}$, 相当于 $u(W_{R2}) = 0.67 \times 10^{-6}$ 。

A.5 合成不确定度

取包含因子 $k=2$, 相应的扩展不确定度为: $U(\Delta X) = k \times u(\Delta X) = 0.22$

各温度点标准不确定度分量汇总见表 4。

表 4 各温度点标准不确定度汇总表

标准不确定度 $u(y_i)$	不确定度来源	灵敏系数 c_i / Ω^{-1}	锌点 $u(R_{ti})$		灵敏系数 c_i / Ω^{-1}	锡点 $u(R_{ti})$	
			(mK)	(m Ω)		(mK)	(m Ω)
$c_1 u(R'_t)$	短期复现性	0.040	1.50	0.131	0.040	0.57	0.052
	自热效应引起		0.80	0.280		0.80	0.297
	合成	0.040	0.309		0.040	0.302	
			12.36×10^{-6}			12.08×10^{-6}	
$c_2 u(R_{tp})$	短期复现性	0.103	0.26	0.026	0.076	0.26	0.026
	水三相点容器引起		0.23	0.023		0.23	0.023
	工作基准铂电阻温度计传递引起		0.15	0.015		0.15	0.015
	合成	0.103	0.038		0.076	0.038	
			3.88×10^{-6}			2.87×10^{-6}	

$c_3u(R_t^*)$	重复性	0.040	0.13	0.011	0.040	0.10	0.010
	自热效应引起		1.15	0.402		0.58	0.215
	温度均匀性		2.88	0.252		1.44	0.134
	合成	0.040	0.475		0.040	0.254	
			19.00×10^{-6}			10.16×10^{-6}	
$c_4u(R_{tp}^*)$	短期复现性	0.103	0.18	0.018	0.076	0.18	0.018
	水三相点容器引起		0.23	0.023		0.23	0.023
	工作基准铂电阻温度计传递引起		0.15	0.015		0.15	0.015
	合成	0.103	0.033		0.076	0.033	
			3.37×10^{-6}			2.49×10^{-6}	
$c_5(W_{rt}^*)$	一等标准铂电阻温度计传递引起		7.34×10^{-6}			6.13×10^{-6}	
$c_6u(W_{R1})$	电测设备引起		1.60×10^{-6}			0.90×10^{-6}	
$c_7u(W_{R2})$	简化公式引起		1.23×10^{-6}			0.67×10^{-6}	
$u_c(W_t)$	合成标准不确定度		24.46×10^{-6}			17.39×10^{-6}	
U	扩展不确定度		$U=49 \times 10^{-6}$ 相当于 $U=15\text{mK}, k=2$			$U=35 \times 10^{-6}$ 相当于 $U=10\text{mK}, k=2$	

由于各不确定度分量之间相互独立，因此，不确定度合成为

a) 锌点温度校准时： $u_c(W_{Zn}) = 24.46 \times 10^{-6}$ 。

b) 锡点温度校准时： $u_c(W_{Sn}) = 17.39 \times 10^{-6}$ 。

A. 6 扩展不确定度

取 $k=2$ ，扩展不确定度 $U = k \times u_c$

a) 锌点温度校准时： $U(W_{Zn}) = 4.9 \times 10^{-5}$ ， $k=2$ ；相当于 $U=15\text{mK}$ ， $k=2$ 。

b) 锡点温度校准时： $U(W_{Sn}) = 3.5 \times 10^{-5}$ ， $k=2$ ；相当于 $U=10\text{mK}$ ， $k=2$ 。

附录 B

精密铂电阻温度计校准原始记录格式

委托单位:		校准证书编号:	
仪器名称:	型号/规格:	出厂编号:	
制造单位:		仪器状况:	
校准地点:		环境温度:	℃湿度: %RH

校准用主要计量标准器具

名称	型号规格	准确度	仪器编号	证书号	有效期

分度结果:

$R_{tp} (\Omega)$	W_{Al}	W_{Zn}	W_{Sn}	W_{In}	$W_{100^\circ C}$	W_{Ga}	W_{Hg}	W_{Ar}
$W_{上限}$	a	b	c	绝缘电阻(M Ω)		自热效应(mK)		

年稳定性(mK):

水三相点	汞三相点	汞三相点	镓融化点	铟凝固点	锡凝固点	锌凝固点	铝凝固点	上限温度点

测量数据及结果

定 点 法 测 量	项目	W_{Al}		W_{Zn}		W_{Sn}		W_{In}	
	次数	$R_{Al} (\Omega)$	$R_{tp} (\Omega)$	$R_{Zn} (\Omega)$	$R_{tp} (\Omega)$	$R_{Sn} (\Omega)$	$R_{tp} (\Omega)$	$R_{In} (\Omega)$	$R_{tp} (\Omega)$
	1								
	2								
	平均值(Ω)								
	W								
	项目	W_{Ga}		W_{Hg}					
	次数	$R_{Ga} (\Omega)$	$R_{tp} (\Omega)$	$R_{Hg} (\Omega)$	$R_{tp} (\Omega)$				
	1								
	2								
平均值(Ω)									
W									
比 较 法 测 量	项目	W_{Ar}		项目	W_t				
	次数	标准	被校	次数	标准	被校			
	1			1					
	2			2					
	3			3					
	4			4					
	平均值(Ω)			平均值(Ω)					
	$R_{tp} (\Omega)$			$R_{tp} (\Omega)$					
	W			W					
	W_{Ar}			W_t					

附录 C

校准证书内页格式(推荐)

校准结果			
项目	结果	不确定度 U/mK, k=2	_年稳定性/mK
外观		---	---
绝缘电阻	MΩ	---	---
R_{tp}	Ω		
W_{Ar}			
W_{Hg}			
W_{Ga}			
$W_{100^{\circ}C}$			
W_{In}			
$W_{300^{\circ}C}$			
W_{Sn}			
W_{Zn}			
$W_{450^{\circ}C}$			
$W_{500^{\circ}C}$			
W_{Al}			
a	$\times 10^{-3}$	---	---
b	$\times 10^{-3}$	---	---
c	$\times 10^{-3}$	---	---
自热效应/mK		-----	---

1. 温度计的测量范围;
2. 经校准, 温度计的偏差函数 $\Delta W_t =$
3. 温度计按 1990 年国际温标分度;
4. R_{tp} 为温度计在水三相点的电阻值; $W_t = R_t / R_{tp}$;
5. 分度时通过温度计的电流为 1mA;
6. 自热效应是水三相点时的测量值。