

基于水三相点的温度计量器具核查装置的研究与应用

赵泉钦, 杨 敏, 沈 琪, 张 正, 邹 超, 王冰梅

(江苏省气象探测中心, 江苏 南京 210009)

摘要:地面气象数据观测自动化水平、空间密度、时间密度的提高,对自动气象站传感器的计量、核查工作提出了更高的要求。由于计量标准器具实际使用的复杂性,并不能保证其在相邻两次检定/校准过程中计量性能始终维持在准确范围内。因此,以温度计量器具期间核查为例,构建一套水三相点稳定核查装置,利用休哈特控制图对省级二等标准铂电阻温度计在水三相点处实施期间核查,得出省级计量实验室二等标准铂电阻温度计标准器均核查通过的结论,并通过高一等级标准铂电阻温度计验证核查结论。基于二等标准铂电阻在水三相点期间核查的实验数据得出了水三相点瓶保存及测量的最佳时间,相关数据也可作为计量标准稳定性考核的依据。

关键词:温度计量;水三相点;期间核查;控制图

中图分类号:TH71

文章编号:1000-0682(2024)03-0128-07

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.03.023

Research and application of temperature measurement verification device based on water three-phase point

ZHAO Quanqin, YANG Min, SHEN Zhen, ZHANG Zheng, ZOU Chao, WANG Bingmei

(Jiangsu Meteorological Observation Centre, Jiangsu Nanjing 210009, China)

Abstract: The improvement of the automation level, space density and time density of surface meteorological data observation puts forward higher requirements for the measurement and verification work of automatic weather station sensors. Due to the complexity of the measurement standard instrument used in practice, its metrological performance cannot be guaranteed to remain accurate during two consecutive verification/calibration processes. Therefore, taking the period verification of temperature measuring instruments as an example, a set of water triple point stability checking device is constructed. Check the provincial second-class standard platinum resistance thermometer at the triple point of water by using Shewhart control chart. After undergoing testing and calculations, the second-class standard platinum resistance temperature standard in the provincial metrology laboratory has successfully passed verification. This conclusion is also supported by the verification results of a high-grade standard platinum resistance thermometer. Based on the experimental data of the second class standard platinum resistance during the water triple point period verification, the optimal time for the storage and measurement of the water three point bottle is obtained. The relevant data can also be used as the basis for the stability assessment of measurement standards.

Keywords: temperature measurement; water triple point; period verification; control charts

收稿日期:2024-01-19

基金项目:江苏省气象局面上项目(KM202404)

第一作者:赵泉钦(1988—),女,汉族,江苏连云港人,硕士研究生,高级工程师,研究方向为气象仪器计量检定。

0 引言

气象观测量值准确对国民生活有着重要影响。江苏省现有区域级自动气象站 1700 余套,国家级自

动气象站(主、备站)140余套。地面气象数据观测自动化水平、空间密度、时间密度的提高,对自动气象站传感器的计量、核查工作提出了更高的要求。省级实验室气象计量标准器具的准确可靠显得尤为重要。虽然检定证书中明确给出了有效期,但鉴于实际运作的复杂性,如环境变化、搬迁、运输、材料磨损、老化等都可能影响计量性能^[1],并不能确保在有效期内计量器具的性能始终维持在允许范围内。

气象计量标准器具期间核查的方法和频率,因不同计量标准器具的使用场合、使用频率及参考标准等因素的不同而异。实验室对计量标准装置期间核查方法一般采取量传法、比对法、核查标准法等^[2-5]。对计量标准装置测量过程的控制一般采用休哈特控制图法^[6-8]。这些研究仅分别介绍了应用现状,并无详细介绍既能满足计量标准装置的设备核查,又能实现过程控制的应用实例。

因此,以温度计标准器为例,搭建一套基于水三相点的稳定核查装置,利用休哈特控制图法对省级二等标准铂电阻温度计在水三相点处进行期间核查,并通过高一等级计量标准比较法验证期间核查结论。既能通过试验核查温度标准器具,又可以通过时间界限延长的方式,将期间核查控制图转化为控制用控制图,判断测量过程中是否存在异常因素,对计量器具稳定性评价;还可以分析水三相点瓶冻制保存及测量的最佳时间,并采取措施使测量过程重新处于统计控制状态。

1 基于水三相点的核查装置构建与实现

1.1 核查点的选择

期间核查不是重新校准或再校准,不需要对设备的所有测量参数和所有测量范围进行核查。实验室可根据自身的实际情况和实际经验进行选择,一般选择设备的关键测量参数或常用测量点进行期间核查。

鉴于水三相点是 ITS-90 国际温标最重要的定义固定点,具有高复现性和准确度,常用来评价标准铂电阻温度计及其他温度传感器的稳定性^[9],周艺等^[10]选择水三相点对标准铂电阻温度计期间核查。ITS-90 国际温标根据定义的固定点和内插公式来分度铂电阻温度计,而内插公式以铂电阻温度计在温度 T 与水三相点的电阻值作为研究对象。因此,结合 JJG160—2007《标准铂电阻温度计检定规程》^[11]要求,选择水三相点作为期间核查的核查点。

1.2 核查装置的构建

为了复现准确可靠的水三相点,根据 JJF1178—2007《用于标准铂电阻温度计的固定点装置校准规范》^[12],二等标准铂电阻期间核查装置仪器配置表如表 1 所示。

表 1 二等标准铂电阻期间核查装置仪器配置表

序号	名称	型号	数量/个
1	水三相点瓶	DETP-1	1
2	水三相点瓶冻制保存装置	TL-1010SA	1
3	精密测温电桥	microK-ZH500	1
4	一等标准铂电阻	WZPB-2	2

1.3 核查装置在水三相点的量传有效性评价

利用 TL-1010SA 水三相点瓶冻制保存装置,在水三相点瓶内插入二等标准铂电阻温度计,配合 microK-ZH500 精密测温电桥,待温度趋近 -5°C 并已接近稳定时,取出二等铂电阻温度计及过冷的水三相点瓶在手中垂直抖动,可以观察到约有 40% 的过冷水开始结冰成絮状。结冰过程开始后停止摇动保持静止等待结冰过程(3 s ~ 5 s),放回槽内。水三相点瓶冻制完成后,瓶内三相物态已成饱和状态,半小时后已趋于稳定,将支架就位。将 2 支型号为 WZPB-2 的一等标准铂电阻温度计经过预冷 20 min 后,插入冻制好的水三相点瓶中。待温度计与内容层达到热平衡后,核查即可开始。

根据 JJF1178—2007《用于标准铂电阻温度计的固定点装置校准规范》要求,新建及更换的固定点整套装置应进行复现性试验,固定点装置的复现性换算成温度要求小于或等于 1.0 mK(一等标准装置),且作为标准器的铂电阻温度计在固定点的复现值与其上级单位检定结果差值换算为温度差之要求小于或等于 4.0 mK(一等标准装置)。即在水三相点测量不少于 6 次的复现结果的标准偏差按公式(1)计算,其值换算成温度按照公式(2)计算,结果要求标准偏差温度值 $\leq 1.0\text{ mK}$,水三相点复现试验数据原始记录如表 2 所示。

表 2 水三相点复现试验数据原始记录(单位: Ω)

	标准器 161923 读数	标准器 161001 读数
固定点 0.01 $^{\circ}\text{C}$	25.497 91	25.517 82
	25.497 90	25.517 80
	25.497 89	25.517 82
	25.497 89	25.517 80
	25.497 90	25.517 82
	25.497 91	25.517 81
\bar{x} 平均值/ Ω	25.497 9	25.517 8
$s(x)/\Omega$	$8.944\ 3 \times 10^{-6}$	$9.831\ 9 \times 10^{-6}$

$$s(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)} \quad (1)$$

式中: x 为单次复现结果; \bar{x} 为多次复现结果的平均值; n 为复现次数。

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

式中: ΔR 为铂电阻温度计在固定点的复现差值的绝对值; R_p 为铂电阻温度计在水三相点的平均值; $\frac{dW(t)}{dt}$ 为在温度 t 时的电阻比值相对温度变化率。

根据公式(1)计算可得 $s(x)$ 最大值为 $9.8319 \times 10^{-6} \Omega$, 温度和电阻的换算按照公式(2)计算: 在规程附录 E 中查得 0°C 时, $\frac{dW(t)}{dt} = 3.98854 \times 10^{-3}$, 则, $\Delta t = 0.1 \text{ mK} \leq 1.0 \text{ mK}$ 。满足 JJF1178—2007《用于标准铂电阻温度计的固定点装置校准规范》新建及更换的固定点整套装置应进行复现性试验, 固定点装置的复现性换算成温度小于或等于 1.0 mK (一等标准装置) 的要求。

作为期间核查用的一等标准铂电阻温度计两支编号分别为 161923、161001。将这两支一等标准铂电阻温度计送至江苏省计量科学研究院进行校准, 两者在水三相点固定点的复现值与上级单位结果差值换算为温度差值如表 3 所示。满足 JJF1178—2007《用于标准铂电阻温度计的固定点装置校准规范》作为标准器的铂电阻温度计在固定点的复现值与其上级单位检定结果差值换算为温度差之小于或等于 4.0 mK (一等标准装置) 的要求。

表 3 温度计在水三相点的复现值与上级结果的差值

项目	本站读数/ Ω	上级单位结果/ Ω	差值/ mK
标准器 161923	25.497 9	25.498 1	2.0
标准器 161001	25.517 8	25.517 4	4.0

因此, 构建的水三相点核查装置满足 JJF1178—2007《用于标准铂电阻温度计的固定点装置校准规范》中对水三相点量传的要求, 可以开展在水三相点这一固定点的期间核查试验。

2 水三相点处的期间核查方法及试验

江苏省气象仪器计量实验室二等温度计量标准器具(编号 201033)从江苏省计量科学研究院检定合格返回实验室后, 立刻开展期间核查, 核查全过程测量 25 组数据。核查采用二等标准铂电阻温度计(编号 201033)多次测量水三相点电阻值, 每天在水

三相点测量数据 10 次, 取平均值作为测量结果, 进行 25d 读数。采用平均值—标准偏差控制图绘制期间核查控制图 1 和图 2。

当采用平均值—标准偏差控制图时, 需要的统计控制量为: 每个子组的平均值 \bar{x} , 每个子组的标准偏差 s_i , 各子组平均值的平均值 $\bar{\bar{x}}$ 和各子组标准偏差的平均值。将核查的 25 组数据代入公式 $s_i =$

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

得到每个子组的标准偏差 s_i 和平均值控制图中中心线为 $CL = \bar{\bar{x}}$ 。查 GB/T4091—2001 常规控制图表 2, 可得 $A_3 = 0.975$, $B_3 = 0.284$, $B_4 = 1.716$, 代入上警戒限公式 $UCL = \bar{\bar{x}} + A_3 \bar{s}$; 下警戒限公式 $LCL = \bar{\bar{x}} - A_3 \bar{s}$ 。标准偏差控制图中心线为 $CL = \bar{s}$, 上警戒限为 $UCL = B_4 \bar{s}$, 下警戒限为 $LCL = B_3 \bar{s}$ 。

通过计算可得: $\bar{x} = 25.55080 \Omega$, $\bar{s} = 2.25 \times 10^{-5} \Omega$ 。

应用到平均值控制图 1 中: $CL = 25.55080$, $UCL = 25.55082$, $LCL = 25.55078$ 。

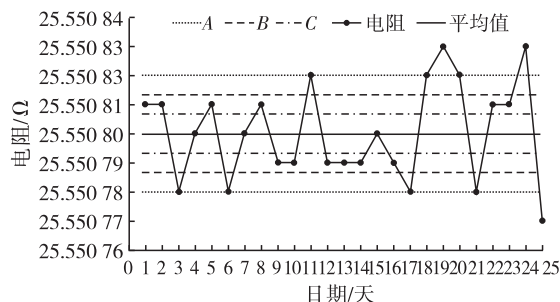


图 1 二等标准铂电阻(编号 201033)在水三相点平均值控制图

应用到标准偏差控制图 2 中: $CL = 2.25 \times 10^{-5}$, $UCL = 3.86 \times 10^{-5}$, $LCL = 0.64 \times 10^{-5}$

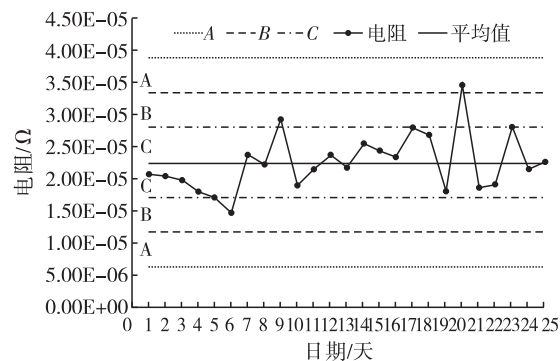


图 2 二等标准铂电阻(编号 201033)在水三相点标准差控制图

以水三相点瓶冻制完成后的当天至第 5 d 为一组,一共 5 组 25 d 测量数据。根据 JJG160—2007《标准铂电阻温度计检定规程》计量性能稳定性要求,二等标准铂电阻两相邻周期检定结果的差值不超过 10 mK,换算成电阻值不超过 0.001 Ω 。查阅江苏省计量科学研究院 H2022-0119669 检定证书结果,编号 201033 二等标准铂电阻温度计在水三相点处的电阻值 $R_p = 25.550\ 8\ \Omega$,所以其稳定范围换算成电阻值为(25.549 8 ~ 25.551 8) Ω 。由平均值控制图分析发现,实际试验的水三相点电阻值最大值为 25.550 83 Ω ,最小值为 25.550 77 Ω ,完全符合规程要求的稳定性两相邻周期检定结果的差值不超过 10.0 mK。因此,编号 201033 二等标准铂电阻温度计在水三相点处期间核查合格。

针对二等标准铂电阻(编号 201033)在水三相点平均值控制图 and 标准差控制图,根据 GB/T4091—2001 常规控制图变差可查明原因的 8 种模式检验分析发现,平均值控制图出现检验 1 准则的问题:有 3 个点落在 A 区以外,分别是第 19、24、25 d,对应的分别是水三相点瓶冻制的第 4、5 d,说明水三相点瓶冻制开始解冻。标准偏差控制图分析发现,出现检验 5 准则的问题:第 1 ~ 6 d 数据,出现连续 6 个点递减。第 6 d 对应第二组水三相点瓶冻制的第 1 d,第一天刚冻制好的水三相点瓶内部应力比较大。所以,水三相点测核查最好选择水三相点瓶冻制好的

第 2、3 d 测量数据。

3 期间核查结果的验证

3.1 验证模型

鉴于,江苏省气象仪器计量站使用的计量标准器具为二等标准铂电阻,属于准确度等级较高且重要的计量标准。选择利用一等标准铂电阻温度计比较法对核查结论进行验证^[13-15]。将一等铂电阻温度计与被核查的二等铂电阻温度计分别插入冻制好的水三相点瓶,待温度稳定后通过测量一等标准铂电阻温度计与被核查的二等铂电阻温度计的电阻值,算出实际温度 y_0, y_1 后计算温度差: $\Delta t = y_1 - y_0$ 。被核查的计量标准(二等铂电阻温度计编号 201033)在水三相点处的扩展不确定度为 $U_1 (k = 2)$,高一等级计量标准(一等标准铂电阻温度计编号 161923)在水三相点处的扩展不确定度为 $U_0 (k = 2)$ 。核查结果应满足公式(7):

$$|y_1 - y_0| \leq \sqrt{U_1^2 + U_0^2} \quad (7)$$

3.2 两支铂电阻温度计在水三相点处的温度值

以省气象仪器计量站一支一等标准铂电阻温度计(编号 161923)核查二等标准铂电阻温度计(编号 201033)为例,待其从江苏省计量科学研究院取回,立刻开展实验室核查。核查数据如表 4 所示。

表 4 两支铂电阻温度计在水三相点电阻值

核查次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值/ Ω
编号 161923	25.498 11	25.498 09	25.498 11	25.498 13	25.498 13	25.498 13	25.498 14	25.498 12	25.498 16	25.498 13	25.498 125
编号 201033	25.550 82	25.550 81	25.550 83	25.550 82	25.550 82	25.550 83	25.550 81	25.550 82	25.550 85	25.550 78	25.550 819

3.2.1 一等标准铂电阻(编号 161923)在水三相点处的温度值 y_0

根据江苏省计量科学研究院最新检定数据,编号 161923 的一等标准铂电阻温度计在水三相点处的电阻值是: $R_p = 25.498\ 1\ \Omega$;实验室水三相点瓶核查试验的实际电阻平均值是: $R = 25.498\ 125\ \Omega$ 。根据 JJG160—2007《标准铂电阻温度计检定规程》温度值的定义及内插方法:

温度值由公式(3)确定:

$$W(t) = R(t) / R(0.01\ ^\circ\text{C}) \quad (3)$$

其中: $W(t)$ 为标准铂电阻温度计在温度 t 的电阻值与水三相点温度(0.01 $^\circ\text{C}$)的电阻值的比值。

在 0 $^\circ\text{C}$ ~ 660.323 $^\circ\text{C}$ 温区的参考函数定义为:

$$W_r(t) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i [(t - 481)/484]^i \quad (4)$$

推导出:

$$t/^\circ\text{C} = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \{ [W_r(t) - 2.64] / 1.64 \}^i \quad (5)$$

式中: t 为温度值; $W_r(t)$ 为参考函数;常数 C_0, C_i, D_0, D_i 在 JJG160—2007《标准铂电阻温度计》附录 C 中可查。

在 0 $^\circ\text{C}$ ~ 660.323 $^\circ\text{C}$ 温区的偏差函数为:

$$\Delta W(t) = W(t) - W_r(t) = a [W(t) - 1] + b$$

$$[W(t) - 1]^2 + c[W(t) - 1]^3 \quad (6)$$

式中:系数 a, b, c 是由标准铂电阻温度计在水三相点、锡凝固点和铅凝固点温度的测量求得的 W 值与对应的参考函数的偏差求得。由江苏省计量科学研究院检定证书可查得,编号 161923 的一等标准铂电阻温度计的系数 $a = a_8 = -0.000\ 221$; $b = b_8 = 0.000\ 012$; c 温区使用不到,所以 $c = 0$ 。其中, $R_p = 25.498\ 1\ \Omega$, $R = 25.498\ 125\ \Omega$ 。由公式(6)计算出 $\Delta W(t) \approx -2.166\ 83 \times 10^{-10}$ 。从而计算出 $W_r(t) = W(t) - \Delta W(t) = 1.000\ 009\ 8$,将所有数值代入公式(5)计算出一等标准铂电阻(编号 161923)在水三相点处的实际温度值: $y_0 = 0.010\ 25\ ^\circ\text{C}$ 。

3.2.2 二等标准铂电阻(编号 201033)在水三相点处的温度值 y_1

根据江苏省计量科学研究院最新检定数据,编号 201033 的二等标准铂电阻温度计在水三相点处的电阻值是: $R_p = 25.550\ 8\ \Omega$; 实验室水三相点瓶核查试验的实际电阻值是: $R = 25.550\ 819\ \Omega$ 。由江苏省计量科学研究院检定证书可查得,编号 201033 的二等标准铂电阻温度计的系数 $a = a_8 = -0.000\ 178$; $b = b_8 = -0.000\ 024$; c 温区使用不到,所以 $c = 0$ 。 $R_p = 25.550\ 8\ \Omega$, $R = 25.550\ 819\ \Omega$ 。由公式(6)计算出 $W_r(t) \approx -1.643\ 39 \times 10^{-10}$ 。从而计算出 $W_r(t) = W(t) - \Delta W(t) = 1.000\ 000\ 743$,将所有数值代入式(5)得出二等标准铂电阻(编号 201033)在水三相点处的实际温度值为 $y_1 = 0.010\ 19\ ^\circ\text{C}$ 。

3.2.3 二等标准铂电阻(编号 201033)和一等标准铂电阻(编号 161923)在水三相处温度差值

在水三相点处,计算二等标准铂电阻(编号 201033)和一等标准铂电阻(编号 161923)温度值之差为: $|y_1 - y_0| = |0.010\ 19\ ^\circ\text{C} - 0.010\ 25\ ^\circ\text{C}| = 0.000\ 06\ ^\circ\text{C} = 6 \times 10^{-5}\ ^\circ\text{C}$ 。

3.3 不确定度分析

3.3.1 一等标准铂电阻温度计(编号 161923)在水三相点处的标准不确定度 u_0

(1)根据贝塞尔公式计算在水三相点处一等标准铂电阻温度计(编号 161923)的重复性。测量时取 10 次读数的平均值^[13],因此重复性引入的标准差 u_{01} :

$$u_{01} = s(\bar{x}) = s(x_i) / \sqrt{10} \approx 7.52 \times 10^{-6}\ \Omega$$

$$\text{利用公式(2),换算成温度值: } t = \frac{\frac{\Delta R}{R_p}}{\left[\frac{dW(t)}{dt}\right]}。$$

其中 $\frac{dW(t)}{dt} = 3.988\ 528\ 49 \times 10^{-3}$, $\Delta R \approx 7.52 \times 10^{-6}\ \Omega$, $R_p = 25.498\ 1\ \Omega$ 。换算成温度值 $t_{01} = 7.39 \times 10^{-5}\ ^\circ\text{C}$ 。

(2)水三相点瓶是由昆明大方自动控制科技有限公司生产的,经江苏省计量科学研院校准,提供扩展不确定度为 $0.8\ \text{mK}$,均匀分布,故由水三相点瓶引起的标准不确定度分量 $u_{02} = 0.462\ \text{mK}$,换算成温度值即 $t_{02} = 4.62 \times 10^{-4}\ ^\circ\text{C}$ 。

(3)电测设备采用的是中环天仪(天津)气象仪器有限公司的精密测温电桥 microK - ZH500,经江苏省计量科学研院校准,提供扩展不确定度为 $3.7 \times 10^{-6}\ \Omega$,其技术说明书最大允许误差为 $1.25 \times 10^{-5}\ \Omega$,均匀分布,由电测设备引入的标准不确定度分量 $u_{03} = 7.10 \times 10^{-5}\ \Omega$,换算成温度值即 $t_{03} = 7.10 \times 10^{-4}\ ^\circ\text{C}$ 。

(4)水三相点瓶冻制保存装置采用的是深圳艾依康公司生产的 TL - 1010SA 精密低温液体恒温槽,经江苏省计量科学研院校准,提供扩展不确定度为 $0.003\ ^\circ\text{C}$,均匀分布,故由液体恒温槽引入的标准不确定度分量 $t_{04} = 1.73 \times 10^{-3}\ ^\circ\text{C}$ 。

(5)铂电阻温度计在测量时,通过的电流为 $1\ \text{mA}$,根据 JJG160—2007《标准铂电阻温度计检定规程》,一等铂电阻在水三相点的自热效应不应超过 $3.0\ \text{mK}$ 。实际工作电流变化不会偏离 $\pm 5\%$,根据耗散功率等于 $I^2 R$,即耗散功率在水三相点的最大变化量为 $\pm 0.3\ \text{mK}$,均匀分布,故自热效应引入的标准不确定度分量 $t_{05} = 0.17 \times 10^{-3}\ ^\circ\text{C}$ 。

由于上述 5 个不确定度之间相互独立,因此合成为:

$$u_0 = \sqrt{t_{01}^2 + t_{02}^2 + t_{03}^2 + t_{04}^2 + t_{05}^2} = 1.94 \times 10^{-3}\ ^\circ\text{C}$$

3.3.2 二等标准铂电阻温度计(编号 201033)在水三相点处的标准不确定度 u_1

(1)根据贝塞尔公式计算在水三相点处二等标准铂电阻温度计(编号 201033)的重复性。测量时取 10 次读数的平均值,因此重复性引入的标准差 u_{11} :

$$u_{11} = s(\bar{x}) = s(x_i) / \sqrt{10} \approx 5.67 \times 10^{-6}\ \Omega$$

$$\text{利用公式(2),换算成温度值: } t = \frac{\frac{\Delta R}{R_p}}{\left[\frac{dW(t)}{dt}\right]}。$$

其中 $\frac{dW(t)}{dt} = 3.988\ 528\ 49 \times 10^{-3}$, $\Delta R \approx 5.67 \times$

$10^{-6} \Omega$, $R_{tp} = 25.550\ 8\ \Omega$ 。换算成温度值 $t_{11} = 5.56 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2)水三相点瓶是由昆明大方自动控制科技有限公司生产的,经江苏省计量科学研究院校准,提供扩展不确定度为 $0.8\ \text{mK}$,均匀分布,故由水三相点瓶引起的标准不确定度分量 $u_{12} = 0.462\ \text{mK}$,换算成温度值即 $t_{12} = 4.62 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3)电测设备采用的是中环天仪(天津)气象仪器有限公司的精密测温电桥 microK-ZH500,经江苏省计量科学研究院校准,提供扩展不确定度为 $3.7 \times 10^{-6} \Omega$,其技术说明书最大允许误差为 $1.25 \times 10^{-5} \Omega$ 均匀分布,由电测设备引入的标准不确定度分量 $u_{03} = 7.10 \times 10^{-5} \Omega$ 换算成温度值即 $t_{03} = 7.10 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(4)水三相点瓶冻制保存装置采用的是深圳艾依康公司生产的 TL-1010SA 精密低温液体恒温槽,经江苏省计量科学研究院校准,提供扩展不确定度为 $0.003\ \text{ }^{\circ}\text{C}$,均匀分布,故由液体恒温槽引入的标

准不确定度分量 $t_{14} = 1.73 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(5)铂电阻温度计在测量时,通过的电流为 $1\ \text{mA}$,根据 JJG160—2007《标准铂电阻温度计检定规程》,二等铂电阻在水三相点的自热效应不应超过 $4.0\ \text{mK}$ 。实际工作电流变化不会偏离 $\pm 5\%$,根据耗散功率等于 $I^2 R$,即耗散功率在水三相点的最大变化量为 $\pm 0.4\ \text{mK}$,均匀分布,故自热效应引入的标准不确定度分量 $t_{15} = 0.23 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

由于上述 5 个不确定度之间相互独立,因此合成成为:

$$u_1 = \sqrt{t_{11}^2 + t_{12}^2 + t_{13}^2 + t_{14}^2 + t_{15}^2} = 1.81 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

3.3.3 合成不确定度

用省气象仪器计量站一等标准铂电阻温度计(编号 161923)在水三相点处核查二等标准铂电阻温度计(编号 201033),标准不确定度分量汇总见表 5。

表 5 水三相点处的标准不确定度分量汇总

标准不确定度	不确定度来源	标准不确定度值	灵敏系数	不确定度充分量
一等			1	$1.94 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$
t_{01}	测量重复性	$7.39 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}$		
t_{02}	水三相点瓶复现	$4.62 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$		
t_{03}	电测设备误差	$7.10 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$		
t_{04}	恒温槽误差	$1.73 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$		
t_{05}	自热效应影响	$0.17 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$		
二等			1	$1.81 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$
t_{11}	测量重复性	$5.56 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}$		
t_{12}	水三相点瓶复现	$4.62 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$		
t_{13}	电测设备误差	$7.10 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$		
t_{14}	恒温槽误差	$1.73 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$		
t_{15}	自热效应影响	$0.23 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$		

因此,在水三相点处,用一等标准铂电阻温度计(编号 161923)核查二等标准铂电阻温度计(编号 201033)的合成不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_0^2} = \sqrt{(1.94 \times 10^{-3})^2 + (1.81 \times 10^{-3})^2} = 2.65 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

则扩展不确定度为 $U = 5.3 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($k = 2$)。

3.4 验证结果

对核查结果的验证,通过用更高一级的计量标准传递比较法进行验证^[14-15],即通过用省气象仪器计量站一等标准铂电阻温度计(编号 161923)在水三相点处核查二等标准铂电阻温度计(编号 201033)。在水三相点处,计算二等标准铂电阻(编号 201033)和一等标准铂电阻(编号 161923)温度

值之差为: $|y_1 - y_0| = 6 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}$;合成标准不确定度 $U = \sqrt{U_1^2 + U_0^2} = 5.3 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($k = 2$)。即满足 $|y_1 - y_0| \leq \sqrt{U_1^2 + U_0^2}$ 。说明被核查的二等标准铂电阻温度计(编号 201033)维持原检定合格状态,验证通过。

4 结论

为了更好地保障气象观测数据的准确,在确保计量标准器具按时按质送检合格的基础上,通过定期核查计量标准器具的性能,及时发现设备周期运行之间是否有异常,避免由于设备性能变化带来的量值传递不准确,确保计量标准器具的性能持续稳定可靠。

文章采用休哈特控制图法对江苏省级计量实验室 3 支二等标准铂电阻温度计标准器进行期间核查,均得到了核查通过的结论,确保其测量过程处于受控状态,并采用高一等级计量标准比较法验证期间核查结论。

基于休哈特控制图法的期间核查,核查结果易于分析,便于计量标准器具质量跟踪和数据质量控制,可以排除干扰因素,剔除异常值。文章通过 25 d 数据试验,每 5 d 为一组,得出了实验室用的水三相点瓶最佳测量时间为第 2、3 d。

期间核查的数据,可为计量建标的稳定性考核提供数据支持。高一等级计量标准核查的方法同样适用于实验室计量标准器具的期间核查,有助于提高气象计量人员的业务水平。后续将持续核查试验,根据大数据分析和长期控制图走势,为评估计量标准器具的稳定周期进一步努力。

参考文献:

- [1] 叶德培,黄耀文,丁跃清. 一级注册计量师基础知识及专业实务[M]. 北京:中国质检出版社,2017.
- [2] 孟祥军,刘垒,吕东平,等. 计量实验室中的期间核查[J]. 中国计量,2020(06):49-52.
- [3] 李琪,李皓,杨栋. 设备期间核查方法适用性研究[J]. 计量与测试技术,2020,47(06):80-83.
- [4] 陈平. 气象计量标准装置期间核查方法研究[J]. 气象水文海洋仪器,2020,4:48-54.
- [5] 赵泉钦,胡帆,杨敏,等. 计量标准装置期间核查的方法和实例[J]. 计量与测试技术,2022,49(08):89-91.
- [6] 况严,黄元媛,黄桂荣,等. 休哈特控制图在透射式烟度计检定装置核查中应用[J]. 计量与测试技术,2023,50(04):71-73.
- [7] 刘洪涛,龚熙. 数字气压计标准装置期间核查的方法和实例[J]. 计量科学与技术,2020(12):66-69.
- [8] 范巧成,郑磊,姜荣华. 一种准确可靠的期间核查方法[J]. 计量学报,2015,36(6):662-665.
- [9] 邱萍,闫小克,汪洪军,等. 金属外壳水三相点容器[J]. 计量学报,2022,43(2):196-200.
- [10] 周艺,关卫军,陈卓. 标准铂电阻温度计期间核查方法的运用[J]. 工业计量,2022,32(3):64-65.
- [11] 标准铂电阻温度计检定规程:JJG160—2007[S]. 2007-12-14.
- [12] 用于标准铂电阻温度计的固定点装置校准规范:JJF1178—2007[S]. 2007-09-14.
- [13] 李文博,颜平江,武灿灿. 气压检定箱校准方法研究[J]. 工业仪表与自动化装置,2023(01):72-76.
- [14] 魏明明,李芬. 二等铂电阻温度计校准装置校准结果的验证[J]. 电子测量技术,2023,46(19):177-181.
- [15] 潘阿娟,陈江波,李卫兵. 二等铂电阻温度计标准装置不确定度评定[J]. 工业计量,2020,30(SI):78-79+103.

(上接第 104 页)

参考文献:

- [1] 俞珊. 一种快速动态响应的 LLC 变换器控制策略[J]. 电子器件,2022,45(02):305-310.
- [2] 高贺. LLC 电路启动及轻载控制策略研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
- [3] 刘志成. 通信电源用的半桥 LLC 谐振变换器研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2019.
- [4] 班鹏程. 磁集成 LLC 谐振变换器的分析和设计[D]. 广州:华南理工大学,2022.
- [5] 张永明,林嘉伟,陈俊尧,等. 计及 DCM 的电动汽车充电机 LLC 谐振变换器参数设计与优化[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(02):150-156.
- [6] 梁康,潘永雄,李健文,等. LLC 变换器谐振腔参数设计方法比较[J]. 电子设计工程,2022,30(19):179-184.
- [7] 屠腾,张方华,余文浩,等. 边界限定条件下的 LLC - DCX 优化设计[J]. 中国电机工程学报,2023,43(12):4748-4758.
- [8] 郑宏,严序文,袁雪凯,等. 基于磁控制的双谐振腔 LLC 谐振变换器[J]. 电子器件,2022,45(03):551-556.
- [9] 朱田华,卓放,赵方舟,等. 基于多谐波阻抗模型的 CLLC 谐振变换器轻载多移相控制分析与设计[J]. 中国电机工程学报,2021,41(01):326-339+422.
- [10] 万芳燕,董纪清. 基于屏蔽-对消技术的 LLC 变换器共模噪声抑制方法研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(21):7956-7965.
- [11] FEI Chao, LEE F C, LI Qiang. High-efficiency high-power-density LLC converter with an integrated planar matrix transformer for high-output current applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11):9072-9082.