

文章编号: 2096-1618(2022)04-0406-06

气象用温度传感器检定结果的测量不确定度评定与应用

王敏¹, 王毛翠¹, 张世国¹, 方海涛¹, 南雪景²

(1. 安徽省大气探测技术保障中心, 安徽合肥 230031; 2. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要:基于二等铂电阻温度计标准装置,以气象用铂电阻温度传感器为例,详细介绍了温度传感器检定结果的测量不确定度评定方法。通过建立温度传感器的测量模型,分析了测量不确定度来源,展示了各测量不确定度分量的评定过程。结果表明:采用二等铂电阻温度计标准装置检定时,温度传感器检定结果的扩展不确定度 $U=0.03$ ($k=2$)。各不确定度分量中,恒温槽波动性引入的标准不确定度为 $0.012\text{ }^{\circ}\text{C}$,电阻测量仪器引入的标准不确定度分量为 $0.010\text{ }^{\circ}\text{C}$,计量标准器引入的标准不确定度为 $0.004\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

关键词:温度传感器;测量不确定度;二等铂电阻温度计;ITS-90温标

中图分类号:TP212.9

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2022.04.008

0 引言

温度是国家级自动气象站的重要观测要素之一。随着自动化观测业务快速发展,2000年1月1日起铂电阻温度传感器逐步代替水银温度表,成为地温和气温的核心观测设备^[1-3]。目前,中国2300多个国家级自动气象站和几万个区域自动气象站列装了Pt100铂电阻温度传感器,为气象预报和服务提供了丰富的观测资料。众多学者利用自动气象站温度观测数据开展极端气温事件、温度变化特征、模式预估验证等研究^[4-6]。为了确保气象用铂电阻温度传感器观测值的准确性,省级气象计量检定机构依据检定规程,对国家级气象站温度传感器进行周期检定。测量不可避免地带来不确定度,不确定度是测量结果明确而客观的标志,是实验室质量控制的能力指标^[7]。开展气象用温度传感器测量不确定度的评定与分析,对评估测量结果的可靠程度,检验实验室的测量能力具有重要意义。中国已有学者开展了气象用铂电阻温度传感器检定结果的测量不确定度评定研究。袁帅等^[8]评定Pt100型铂电阻温度传感器的测量不确定度时,标准器引入的不确定度取标准器最大允许误差,并按均匀分布进行评定。刘宇等^[9]、龚熙等^[10]评定铂电阻地温传感器的不确定度时,其标准温度计引入的不确定度分量依据标准器校准证书中的扩展不确定度计算得到。在已有研究成果中,计量标准器采用自校式铂电阻温度计,对于标准器引入的不确定度分量基本采用最大允许误差均匀分布法或依据上级计量机构出具的校准结果对不确定度进行评定。目前,省级气象计量机构基本配备了二等铂电阻温度计和测温电桥作为温

度量值溯源的计量标准设备。安徽、福建、贵州等多个气象计量部门已建立二等标准铂电阻温度计标准装置,并开展辖区内自动气象站温度传感器的检定、校准工作。二等铂电阻温度计作为主标准器在温度传感器量值传递中的地位越来越重要,但是利用其作为主标准器检定温度传感器时,检定结果的测量不确定度评定方法还鲜见报道。

铂电阻温度计是利用导体电阻随温度变化而变化的特性来测温的仪器^[11]。1989年9月,国际度量衡委员会通过了国际温标(ITS-90),并于1990年1月1日起生效^[12-13]。ITS-90温标规定在 $-189.3442\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 660.323\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温区内的温度值由一组规定的定义固定点分度的标准铂电阻温度计确定。目前,二等铂电阻温度计检定主要依据JJG160-2007《标准铂电阻温度计》^[14],根据ITS-90温标对温度值的定义,其检定证书中给出的检定数据包括温度计在水三项点的电阻值 R_p ,二等铂电阻温度计在各固定点瓶的电阻值与水三项点温度($0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$)的电阻值的比值及 a 、 b 系数值等。使用时,计量人员将获得的 R_p 和 a 、 b 系数值输入测温电桥中,即可进行温度项目量值传递。由于二等铂电阻温度计检定数据与传统检定数据不同,未给出量值最大允差或测量不确定度等,温度参考值和偏差值可根据使用温度区的参考函数和偏差函数计算获得,对评定测量不确定度也带来一定的难度。针对这个问题,文中以二等铂电阻温度计和精密测温电桥为主标准器,以恒温槽为温度控制装置,依据JJF1059.1-2012《测量不确定度的评定与表示》^[15],提出了二等铂电阻温度计标准装置检定气象用铂电阻传感器时示值误差的测量不确定度评定方法,为今后计量检定机构开展温度项目测量能力的表示、质量认证、计量建标、实验室间比对等提供参考。

收稿日期:2021-09-18

基金项目:安徽省中央引导地方科技发展专项基金资助项目(YDZ X20183400004206)

1 温度传感器检定方法

1.1 二等铂电阻温度计标准装置

气象用铂电阻温度传感器的检定依据为 JJG(气象)002-2015《自动气象站铂电阻温度传感器》^[16]。二等铂电阻温度标准装置采用二等铂电阻温度计作为主标准器,自动测温电桥与二等铂电阻温度计配合使用,将电阻值自动转换为温度值。配套设备分别为恒温槽、电阻测量仪器和转换开关。标准器和配套设备技术要求如表1所示。

表1 二等铂电阻温度计标准装置的标准器和配套设备技术要求

序号	设备名称	技术要求
1	标准铂电阻温度计	准确度等级:二等
2	自动测温电桥	准确度等级:0.0001级
3	恒温槽	测量范围:-50℃~+80℃ 温度均匀性:0.02℃ 温度波动性:0.04℃/10min
4	电阻测量仪器	准确度等级:0.005级 测量范围:50~1500Ω 测量电流:≤1mA 分辨力:1mΩ(检定Pt100时)
5	转换开关	接触电势:≤1.0μV

1.2 检定方法

自动气象站温度传感器按用途分为测量气温与测量地温两类,气温传感器最大允许误差:±0.2℃(-50℃~+50℃),地温传感器最大允许误差:±0.3℃(-50℃~+80℃)。检定项目包括外观检查和测量误差。测量误差检定采用比较法,按照温度传感器的使用温度范围选取检定点。检定方法为将二等铂电阻温度计与被检温度传感器同时插入恒温槽内,使二者感温部分尽可能处于同一水平面。当恒温槽达到设定温度并稳定后,每隔30s读取一次标准器示值和被检传感器示值,共读取4次。根据标准器和被检传感器的示值均值,计算被检传感器在各温度检定点的测量误差。

2 测量不确定度的评定方法

2.1 GUM法评定测量不确定度

1993年,7个国际组织联合发布《测量不确定度表示指南》(guide to the expression of uncertainty in measurement, GUM)。GUM法是通过不确定度传播率计算合成标准不确定度,获得被测量估计值的测量不确定度^[17]。GUM法不确定度评定流程^[15]如图1所示。

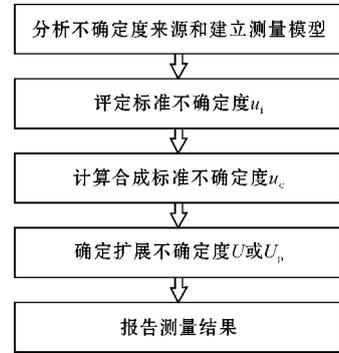


图1 GUM法评定测量不确定度流程

GUM法评定测量不确定度时,首先明确被测量,分析不确定度来源。实际测量中,被测量的定义不完整,复现被测量的测量方法不理想,取样不够代表,环境影响,模拟式仪器人为读数偏移等都可能引入测量不确定度。建立测量结果与其直接测量的量、引用的量以及影响量等有关量之间的数学关系。对每个测量不确定度分量用概率分布的标准偏差估计值表征,分为A类评定方法和B类评定方法。采用A类评定时,可根据独立重复测量次数,分为贝塞尔公式法和极差法。B类评定方法是根据有关信息或经验,判断被测量的可能值区间,得到估计的标准偏差。常用非正态分布的置信因子 k 值^[15]如表2所示。

表2 常用非正态分布的置信因子 k 值

参数	均匀分布	反正弦分布	三角分布	梯形分布 ($\beta=0.71$)	两点分布
k	$\sqrt{3}$	$\sqrt{2}$	$\sqrt{6}$	2	1

2.2 建立测量模型

由 JJG(气象)002-2015《自动气象站铂电阻温度传感器》知,温度传感器的测量误差数学模型为

$$\Delta t = T - T_0 \quad (1)$$

式中, T 为温度传感器的示值(℃), T_0 为标准器的示值(℃)。

由式(1)温度传感器的测量模型知,其测量误差的不确定度来源主要有输入量 T 的标准不确定度和输入量 T_0 的标准不确定度。输入量 T 的标准不确定度包括:示值重复性引入的标准不确定度 $u_1(T)$;电阻测量仪器引入的标准不确定度 $u_2(T)$;采集软件显示分辨力引入的标准不确定度 $u_3(T)$ 。输入量 T_0 的标准不确定度包括:计量标准器引入的标准不确定度 $u_1(T_0)$,包括二等铂电阻温度计复现性引入的标准不确定度、二等铂电阻温度计的自热效应、二等铂电阻温度计电阻比值的周期稳定性及精密测温电桥示值的不准确性引入的标准不确定度;恒温槽温场均匀性引入的标准不确定度 $u_2(T_0)$;恒温槽温场波动性引入的标

准不确定度 $u_3(T_0)$ 。依据 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》对温度传感器检定结果的各输入量引入的标准不确定度进行评定。示值重复性引入的标准不确定度 $u_1(T)$ 采用 A 类标准不确定度评定, 置信因子 $k=1$ 。其他标准不确定度采用 B 类评定方法, 假设为均匀分布, 置信因子 $k=\sqrt{3}$ 。各测量不确定度分量及评定方法见表 3。

表3 温度传感器测量误差的不确定度来源及评定方法

序号	不确定度分量	类型	置信因子 k
1	示值重复性	A 类	1
2	电阻测量仪器	B 类	$\sqrt{3}$
3	采集软件显示分辨率	B 类	$\sqrt{3}$
4	二等铂电阻温度计复现性	B 类	$\sqrt{3}$
5	二等铂电阻温度计自热效应	B 类	$\sqrt{3}$
6	二等铂电阻温度计电阻比值的周期稳定性	B 类	$\sqrt{3}$
7	精密测温电桥示值不准确	B 类	$\sqrt{3}$
8	恒温槽均匀性	B 类	$\sqrt{3}$
9	恒温槽波动性	B 类	$\sqrt{3}$

2.3 输入量 T 的标准不确定度 $u(T)$

2.3.1 示值重复性引入的标准不确定度 $u_1(T)$

依据 JJG(气象)002-2015《自动气象站铂电阻温度传感器》, 检定温度传感器时应按照使用温度范围选取检定点。本实验使用温度范围为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 检定点为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 共 4 个检定点。示值重复性引入的标准不确定度评定方法为: 选取一支中环天仪(天津)气象仪器有限公司生产的铂电阻温度传感器(出厂编号: 19080048), 在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度点上连续进行 10 组独立重复测量, 测试结果见表 4。

表4 被检铂电阻温度传感器的测试结果 单位: $^{\circ}\text{C}$

序号	$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+50\text{ }^{\circ}\text{C}$
1	-9.95	+0.04	+20.03	+50.02
2	-9.94	+0.04	+20.02	+50.02
3	-9.94	+0.04	+20.03	+50.02
4	-9.95	+0.04	+20.02	+50.03
5	-9.94	+0.04	+20.02	+50.03
6	-9.94	+0.04	+20.02	+50.02
7	-9.93	+0.05	+20.02	+50.02
8	-9.94	+0.04	+20.02	+50.03
9	-9.94	+0.04	+20.02	+50.03
10	-9.95	+0.04	+20.02	+50.03
$s(T)$	0.0063	0.0032	0.0042	0.0053

被测铂电阻温度传感器单次测量值的实验标准偏差^[18]为

$$s(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中, $s(T)$ 为实验标准偏差, n 为测量组数, \bar{T} 为 n 次测量结果的平均值。

则被检温度传感器 m 组测量的算术平均值的实验标准偏差可表示为

$$u_1(T) = \frac{s(T)}{\sqrt{m}} \quad (3)$$

式中 m 为测量结果均值的组数。温度传感器检定结果为 4 次测量结果均值, 取 $m=4$ 。在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 点, 铂电阻温度传感器 4 次测量结果均值的标准不确定度 $u_1(T)$ 见表 5。

表5 铂电阻温度传感器检定结果均值的标准不确定度 $u_1(T)$

参数	$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+50\text{ }^{\circ}\text{C}$
$u_1(T)/^{\circ}\text{C}$	0.003	0.002	0.002	0.003

2.3.2 电阻测量仪器引入的标准不确定度 $u_2(T)$

电阻测量仪器采用 Agilent 公司生产的 34401A 型数字多用表, 通过测量铂电阻温度传感器的电阻值, 利用 3MS 采集软件显示温度值。

在 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 电阻-温度关系^[16]为

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (4)$$

在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 电阻-温度关系^[16]为

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3] \quad (5)$$

式中: R_t 为温度 t 时传感器的电阻值(单位: Ω), t 为温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), R_0 为标准电阻值(单位: Ω), 气象用铂电阻温度传感器 $R_0 = 100\text{ }\Omega$, A 、 B 、 C 为常数, $A = 3.9083 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, $B = -5.7750 \times 10^{-7}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$, $C = -4.1830 \times 10^{-12}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-4}$ 。

由式(4)可得

$$\frac{\Delta R}{\Delta t} = R_0(A + 2Bt) \quad (6)$$

由式(6), Δt 可表示为

$$\Delta t = \frac{\Delta R}{R_0(A + 2Bt)} \quad (7)$$

根据式(4), 在 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 电阻 R_t 在 $100.39 \sim 130.90\text{ }\Omega$ 。JJG(气象)002-2015 要求, 电阻测量仪器的准确度等级为 0.005 级, 则电阻小于 $130\text{ }\Omega$ 时, $\Delta R = 130 \times 0.005 \times 10^{-2} = 0.0065\text{ }\Omega$ 。在 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +80\text{ }^{\circ}\text{C}$, Δt 随 t 的变化曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出, 电阻小于 $130\text{ }\Omega$ 时, 在 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta t < 0.0170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。按均匀分布, 电阻测量仪器示值不准确引入的标准不确定度

$$u_2(T) = \frac{0.0170}{\sqrt{3}} = 0.010\text{ }^{\circ}\text{C}。$$

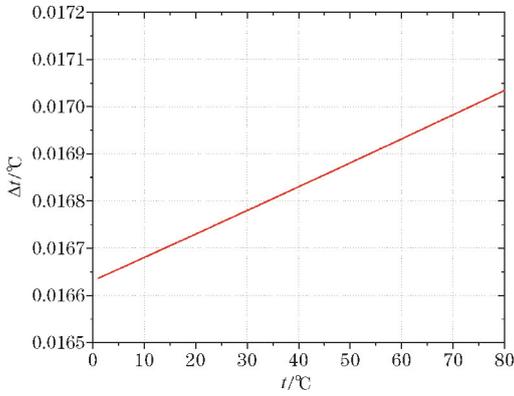


图2 温度测量偏差与温度(0 °C ~ +80 °C)的关系曲线

按照同样的方法,在-50 °C ~ 0 °C,电阻 R_t 在 80.3 ~ 99.6 Ω 。对式(5)求导数,当 $\Delta R = 0.0065 \Omega$ 时, Δt 随 t 的变化曲线如图3所示。从图3可以看出,在-10 °C ~ 0 °C, $\Delta t < 0.0167 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。按均匀分布,电阻测量仪器示值不准确引入的标准不确定度 $u_2(T) = \frac{0.0167}{\sqrt{3}} = 0.010 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

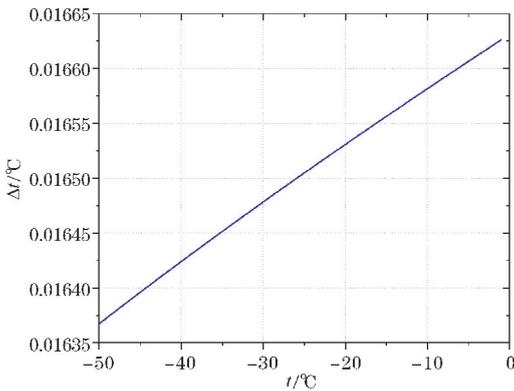


图3 温度测量偏差与温度(-50 °C ~ 0 °C)的关系曲线

2.3.3 分辨力引入的标准不确定度 $u_3(T)$

被检温度传感器采集软件显示温度值的分辨力为 0.01 °C,在 $\pm \frac{0.01}{2}$ 的区间服从均匀分布,其分辨力引入的标准不确定度 $u_3(T) = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} = 0.003 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

由于温度传感器分辨力引入的标准不确定度不小于示值重复性引入的标准不确定度,取两者中的较大者计算输入量 T 的标准不确定度。输入量 T 的标准不确定度 $u(T) = \sqrt{u_2^2(T) + u_3^2(T)} = 0.010 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

2.4 输入量 T_0 的标准不确定度 $u(T_0)$

2.4.1 计量标准器引入的标准不确定度 $u_1(T_0)$

将二等铂电阻温度计与精密测温电桥作为计量标准器。计量标准器引入的标准不确定度的主要来源有二等铂电阻温度计复现性引入的标准不确定度 $u_{1,1}(T_0)$,二等铂电阻温度计的自热效应引入的标准不

确定度 $u_{1,2}(T_0)$,二等铂电阻温度计电阻比值的周期稳定性引入的标准不确定度 $u_{1,3}(T_0)$ 和精密测温电桥示值不准确引入的标准不确定度 $u_{1,4}(T_0)$ 。

(1) $u_{1,1}(T_0)$ 的评定

根据 JJG160-2007《标准铂电阻温度计》,二等铂电阻温度计在水三相点(0.01 °C)处和 S_n 点(231.928 °C)附近,分度多次的差值分别不超过 0.005 °C 和 0.0036 °C。取水三相点处电阻复现的温度偏差 0.005 °C 作为最大温度偏差。在 ± 0.0025 区间,按照均匀分布,则二等铂电阻温度计电阻复现性引入的标准不确定度 $u_{1,1}(T_0) = 0.0025/\sqrt{3} = 0.001 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

(2) $u_{1,2}(T_0)$ 的评定

根据 JJG160-2007 规程,二等铂电阻温度计在冰点槽中自热效应最大为 0.004 °C。在 $\pm 0.002 \text{ } ^\circ\text{C}$ 区间按照均匀分布, $u_{1,2}(T_0) = 0.002/\sqrt{3} = 0.001 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

(3) $u_{1,3}(T_0)$ 的评定

根据 JJG160-2007 规程,二等铂电阻温度计在水三相点处和水沸点附近,两相邻周期检定结果的差值电阻比值不超过 0.010 °C 和 0.014 °C。取水沸点处电阻比值的周期稳定性 0.014 °C 为最大温度偏差。在 ± 0.007 区间,按照均匀分布,则二等铂电阻温度计电阻比值的周期稳定性引入的标准不确定度 $u_{1,3}(T_0) = 0.007/\sqrt{3} = 0.004 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

(4) $u_{1,4}(T_0)$ 的评定

精密测温电桥的电阻值测量误差必然引起温度误差。精密测温电桥采用 ISOTECH 公司生产的 Microk500 型精密测温电桥。根据使用手册,对于内部阻值大于 2.5 Ω 的标准铂电阻温度计,全量程范围内精密测温电桥的温度测量精度为 0.5 mK,即 0.0005 °C。在 $\pm 0.00025 \text{ } ^\circ\text{C}$ 区间按照均匀分布, $u_{1,4}(T_0) = 0.00025/\sqrt{3} = 0.00014 \text{ } ^\circ\text{C} \approx 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

因此,计量标准器引入的标准不确定度 $u_1(T_0) = \sqrt{u_{1,1}^2(T_0) + u_{1,2}^2(T_0) + u_{1,3}^2(T_0) + u_{1,4}^2(T_0)} = 0.004 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

2.4.2 恒温槽均匀性引入的标准不确定度 $u_2(T_0)$

JJG(气象)002-2015 要求恒温槽的均匀性不大于 0.02 °C。在 $\pm 0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$ 区间按照均匀分布处理, $u_2(T_0) = 0.01/\sqrt{3} = 0.006 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

2.4.3 恒温槽波动性引入的标准不确定度 $u_3(T_0)$

JJG(气象)002-2015 要求恒温槽的波动性为 0.04 °C/10 min。在 $\pm 0.02 \text{ } ^\circ\text{C}$ 区间按照均匀分布处理, $u_3(T_0) = 0.02/\sqrt{3} = 0.012 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

由上述可得,输入量 T_0 引入的标准不确定度 $u(T_0) = \sqrt{u_1^2(T_0) + u_2^2(T_0) + u_3^2(T_0)} = 0.014 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

2.5 合成不确定度

式(1)中, T, T_0 互不相关,温度传感器测量误差的

合成不确定度 $u_c(\Delta t)$ 可表示为

$$u_c(\Delta t) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta t}{\partial T}\right)^2 u^2(T) + \left(\frac{\partial \Delta t}{\partial T_0}\right)^2 u^2(T_0)} \quad (8)$$

式中: $u(T)$ 为输入量 T 引入的标准不确定度, $u(T_0)$ 为输入量 T_0 引入的标准不确定度, 灵敏系数 $\frac{\partial \Delta t}{\partial T} = 1, \frac{\partial \Delta t}{\partial T_0} = -1$ 。则式(8)可简化为

$$u_c(\Delta t) = \sqrt{u^2(T) + u^2(T_0)} \quad (9)$$

由 $u(T)$ 、 $u(T_0)$ 计算的 $u_c(\Delta t)$ 结果见表 6。

表 6 标准不确定度分量评定结果及合成不确定度 单位: $^{\circ}\text{C}$

参数	-10 $^{\circ}\text{C}$	0 $^{\circ}\text{C}$	+20 $^{\circ}\text{C}$	+50 $^{\circ}\text{C}$
$u_1(T)$	0.003	0.002	0.002	0.003
$u_2(T)$	0.010	0.010	0.010	0.010
$u_3(T)$	0.003	0.003	0.003	0.003
$u_1(T_0)$	0.004	0.004	0.004	0.004
$u_2(T_0)$	0.006	0.006	0.006	0.006
$u_3(T_0)$	0.012	0.012	0.012	0.012
$u_c(\Delta t)$	0.017	0.017	0.017	0.017

从表 6 可以看出, 在各标准不确定度分量中, 恒温槽波动性引入的标准不确定度分量 $u_3(T_0)$ 为 0.012 $^{\circ}\text{C}$, 对检定结果的影响相对最大。电阻测量仪器引入的标准不确定度分量 $u_2(T)$ 次之, 为 0.010 $^{\circ}\text{C}$ 。气象用铂电阻温度传感器示值重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(T)$ 最小。

2.6 扩展不确定度评定

取包含因子 $k=2$, 被检温度传感器扩展不确定度 $U=ku_c(\Delta t)$, 采用通用修约原则, 计算结果见表 7。二等铂电阻温度计标准装置检定气象用温度传感器时, 检定结果的扩展不确定度 $U=0.03(k=2)$ 。袁帅等^[8] 检定温度传感器时采用数显式测温仪, 标准器引入的不确定度分量评定结果为 0.014, 其检定结果的扩展不确定度 U 在 0.052 ~ 0.054 ($k=2$)。刘宇等^[9] 利用 RCY-1A 自校式铂电阻测温仪作为标准器, 标准器引入的不确定度分量评定结果为 0.015, 其检定结果的扩展不确定度在 0.040 ~ 0.042 ($k=2$)。对比袁帅、刘宇等不确定度评定结果, 采用二等铂电阻温度计作为计量标准器时, 计量标准引入的标准不确定度分量仅为 0.004, 小于自校式铂电阻温度计作为标准器引入的标准不确定度分量。扩展不确定度评定结果也有明显减小, 温度项目的测量能力得到提高。

表 7 铂电阻温度传感器在各检定点的扩展不确定度 $U(k=2)$

参数	-10 $^{\circ}\text{C}$	0 $^{\circ}\text{C}$	+20 $^{\circ}\text{C}$	+50 $^{\circ}\text{C}$
U	0.03	0.03	0.03	0.03

2.7 测量不确定度评定结果验证与应用

2.7.1 评定结果的验证

2020 年 8 月将气象用铂电阻温度传感器(出厂编号: 1908048)送安徽省计量科学研究院进行校准(证书编号: RG2020-2-670473), 在 -10 $^{\circ}\text{C}$ 、0 $^{\circ}\text{C}$ 、+20 $^{\circ}\text{C}$ 和 +50 $^{\circ}\text{C}$ 温度点, 校准结果的测量不确定度均为 $U=0.06$, ($k=2$)。校准证书显示安徽省计量科学研究院校准使用的主要计量标准器具分别为二等标准铂电阻温度计和 FLUKE 型四通道温度表, 其四通道温度表四线制电阻相对误差 $\leq 3 \times 10^{-5}$ 。本实验精密测温电桥的准确度等级为 0.0001 级, 电阻测量准确度高于安徽省计量科学研究院。同时恒温槽的技术性能和计量人员评定方法也将引起评定差异。

2.7.2 测量不确定度的应用

测量不确定度是整个测量过程中的重要环节, 是保证和提高测量准确性的理论依据。测量不确定度可应用到出具校准证书、测量能力验证、实验室建标、实验室认可、规范制定等多个方面。2021 年 4 月, 本实验室参加中国气象局气象探测中心组织的全国范围气象温度测量能力比对实验, 共有 17 个实验室参加, 包括省级气象计量机构、部门计量标准中心、气象仪器生产企业等。比对实验中, 本实验室评定传递标准在 (-30 $^{\circ}\text{C}$ ~ +40 $^{\circ}\text{C}$ 整十温度点的扩展不确定度 U 不超过 0.028 ($k=2$)。经主导实验室计算, 本实验室比对 $|E_n|$ 值 ≤ 0.31 , 实验室的测量能力得到有效验证。比对结果表明, 本实验室建立的二等标准铂电阻温度计标准装置符合计量管理机构授权的准确度等级要求。

3 结束语

二等铂电阻温度计标准装置检定气象用铂电阻温度传感器时, 检定结果的测量不确定度来源主要包括输入量 T 和输入量 T_0 引入的标准不确定度。输入量 T 引入的标准不确定度分量包括示值重复性、电阻测量设备及采集软件分辨力引入的标准不确定度。输入量 T 引入的标准不确定度 $u(T) = 0.010$ $^{\circ}\text{C}$ 。输入量 T_0 引入的标准不确定度分量包括计量标准器、恒温槽均匀性和波动性引入的标准不确定度分量。输入量 T_0 引入的标准不确定度 $u(T_0) = 0.014$ $^{\circ}\text{C}$ 。在 -10 $^{\circ}\text{C}$ 、0 $^{\circ}\text{C}$ 、+20 $^{\circ}\text{C}$ 和 +50 $^{\circ}\text{C}$ 检定点, 温度传感器检定结果的扩展不确定度 $U = 0.03$ $^{\circ}\text{C}$ ($k=2$)。各不确定度分量中, 恒温槽波动性引入的标准不确定度分量相对较大, 电阻测量仪器引入的标准不确定度分量次之。从评定结果来看, 二等铂电阻温度计标准装置的测量能力满足气象用铂电阻温度传感器计量工作要

求,测量结果较为可信。

参考文献:

- [1] 沈玉亮,张元刚,陆斌,等. DZZ3型自动气象站一次地温数据异常的处理过程[J]. 成都信息工程学院学报,2018,33(2):149-154.
- [2] 赵旭,邵长亮,迟晓珠,等. 自动气象站温度传感器检定方法改进研究[J]. 气象与环境学报,2015,31(5):179-183.
- [3] 龚熙,曾涛,李中华,等. 铂电阻温度传感器现场检定的干扰故障及处理方法[J]. 成都信息工程学院学报,2018,33(2):160-163.
- [4] 姜平,刘晓冉,廖代强,等. 重庆城市不同下垫面温度的多时间尺度变化特征[J]. 气象科技,2019,47(4):639-647.
- [5] 詹万志,陈佳,宋雯雯. 近56年遂宁市气温变化特征及成因分析[J]. 成都信息工程学院学报,2018,33(5):585-591.
- [6] 杨倩,陈权亮,陈朝平,等. 全球变暖背景下青藏高原中东部地区温度变化特征[J]. 2020,35(3):352-358.
- [7] 翟建才,翟羽,蒋洪,等. 测量不确定度的评价和实验室质量控制[J]. 现代科学仪器,2007(2):95-97.
- [8] 袁帅,韩啸,李建宇. Pt100型铂电阻温度传感器测量结果不确定度评定[J]. 科技风,2018(27):190.
- [9] 刘宇,张佳佳,刘文忠,等. 铂电阻地温传感器检定不确定度评定[J]. 气象科技,2016,44(5):728-732.
- [10] 龚熙,曾涛,王延东,等. 铂电阻温度传感器现场检定和实验室检定不确定度评定比对分析[J]. 气象科技,2020,48(1):76-80.
- [11] 李潇云,颜鹏津,屠华. 基于非平衡电桥的铂电阻温度特性研究[J]. 河南教育学院学报(自然科学版),2012,21(4):20-22.
- [12] 杨德全. ITS-90,1990年国际实用温标[J]. 海洋通报,1990,9(3).
- [13] 廖军,杜定旭. ITS-90标准铂电阻温度计的计算问题[J]. 四川大学学报(自然科学版),1994,31(3):404-407.
- [14] JJG160-2007,标准铂电阻温度计检定规程[S]. 北京:中国计量出版社,2007.
- [15] JJF1059.1-2012,测量不确定度的评定与表示[S].
- [16] JJG(气象)002-2015,自动气象站铂电阻温度传感器[S].
- [17] 刘园园,杨健,赵希勇,等. GUM法和MCM法评定测量不确定度对比分析[J]. 计量学报,2018,39(1):135-139.
- [18] 李金海. 误差理论与测量不确定度评定[M]. 北京:中国计量出版社,2007:108-158.

Evaluation and Application of Measurement Uncertainty of Calibration Results of Temperature Sensors for Meteorological Applications

WANG Min¹, WANG Maocui¹, ZHANG Shiguo¹, FANG Haitao¹, NAN Xuejing²

(1. Anhui Atmospheric Observation and Technical Support Center, Hefei 230031, China; 2. Atmospheric Observation Technology Centre, CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: Measurement uncertainty is one of the important indexes to evaluate the quality of measurement. Based on the standard device of second-class platinum resistance thermometer, this paper takes the platinum resistance temperature sensor for meteorological application as an example, and introduces in detail the evaluation method of the measurement uncertainty of the verification results of the temperature sensor. By establishing the measurement model of temperature sensor, the source of measurement uncertainty is analyzed, and the evaluation process of each measurement uncertainty component is shown. The results show that the extended uncertainty of the verification results of temperature sensor is $u = 0.03$ ($k=2$) when calibrated with the second-class platinum resistance thermometer standard device. Among the uncertainty components, the standard uncertainty introduced by the fluctuation of the constant temperature tank is $0.012\text{ }^{\circ}\text{C}$, the standard uncertainty component introduced by the resistance measuring instrument is $0.010\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the standard uncertainty introduced by the measuring standard is $0.004\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Keywords: temperature sensor; measurement uncertainty; second standard platinum resistance thermometer; international temperature scale of 1990