

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314191

二等铂电阻温度计标准装置校准结果的验证*

魏明明 李芬

(江西省气象探测中心 南昌 330096)

摘要: 针对气象用温度计量标准,量值传递的准确性与可靠性偏低问题。设计了二等铂电阻计量标准装置的校准结果的验证方案。该方案以某省级二等铂电阻计量标准装置的校准结果为例,通过传递比较法和同级比对法进行了验证。结果显示,该装置与高等级计量标准装置,对应校准结果的绝对偏差值均小于 $0.019\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足传递比较法的要求;该装置与参与比对的4项计量标准装置,对应校准结果的加权算数平均值的绝对偏差均小于 $0.007\text{ }^{\circ}\text{C}$,也满足同级比对法的要求。因此,两种方法均验证通过。结果表明,该二等铂电阻计量标准装置能获得准确的量值传递数据,该方案能确保气象用温度计量标准,量值传递的准确性与可靠性。

关键词: 温度;标准装置;校准结果;不确定度;计量验证

中图分类号: TN06;TB9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Verification of the calibration results of the second grade platinum resistance thermometer standard device

Wei Mingming Li Fen

(Jiangxi Provincial Meteorological Detection Center, Nanchang 330096, China)

Abstract: In response to the low accuracy and reliability of temperature measurement standard for meteorological purposes, the accuracy and reliability of quantity value transmission are low. A verification scheme for the calibration result of the second-grade platinum resistance measurement standard device has been designed. This scheme takes the calibration result of a provincial second-grade platinum resistance measurement standard device as an example and verifies it through transfer comparison method and peer comparison method. The results show that the absolute deviation values of the corresponding calibration results between the device and the high-level measurement standard device are both less than $0.019\text{ }^{\circ}\text{C}$, meeting the requirement of the transfer comparison method. The absolute deviation of the weighted arithmetic mean of the corresponding calibration results between this device and the four measurement standard devices participating in the comparison is less than $0.007\text{ }^{\circ}\text{C}$, which also meets the requirements of the peer comparison method. Therefore, both methods have been validated. The results indicate that the second-grade platinum resistance measurement standard device can obtain accurate quantity transfer data, This scheme can ensure the accuracy and reliability of meteorological temperature measurement standard and quantity value transmission.

Keywords: temperature; standard device; calibration results; uncertainty; metrological verification

0 引言

计量标准在计量工作中起着传递量值、承上启下的作用,是确保国家计量单位制的统一和量值准确可靠的物质基础。随着科学技术的进步和国民经济的发展,温度计量变得越来越重要,近年来,为了规范气象温度计量工作,保证计量单位的统一和量值传递的一致性、准确性。省级气象计量检定机构一般都建立了二等铂电阻计量标准装置。

为了确保该装置的可靠性,需对其检定或校准结果进行验证。目前常见的方法有传递比较法、同级比对法^[1-2]。传递比较法需要将二等铂电阻计量标准装置对一稳定的被测对象进行测量,然后将该对象用高级别的计量标准进行测量,最后将二者的校准结果进行某种相关性的验证。而同级比对法则是将该二等铂电阻计量标准装置对一稳定的被测对象进行测量,然后将该对象送至其他同级计量检定机构进行校准,最后由多个机构得到校准结果一同参与验

收稿日期:2023-07-24

* 基金项目:国家自然科学基金(42065011)、江西省自然科学基金(20232BAB203074)、江西省气象科技软科学项目(JX2022R01)资助

证。本研究将采用传递比较法和同级比较法对二等铂电阻计量标准装置的校准结果进行验证。

目前关于计量标准校准结果验证的研究,在电能表标准装置和天然气流量标准装置领域已取得了一定的成效^[3-4]。前期关于气象计量标准校准结果的验证虽然取得了一定的进展^[5-9]。然而与温度相关的计量标准校准结果验证的研究则鲜见报道,虽然 Duda 等^[10]对温度热通量及传热系数的校准结果进行了验证,但由于其研究内容所涉及的工作原理与测量方法与温度相关的计量标准校准有较大差距,无法为本研究提供有效的借鉴。邓艳琴等^[11]对二等标准水银温度计校准能力进行了验证,虽然水银温度计属于温度相关计量标准,但它与二等铂电阻计量标准装置的测温机理存在明显差异,因此为本研究提供的借鉴也较为有限。另外,无论是传递比较法还是同级对比法,均涉及到对测量不确定度的评定。然而在二等铂电阻温度计标准装置测量不确定度评定的现有研究中^[12-15],基本都集中在工业计量领域,其对应的测温范围较广,相应的测量不确定度评定方案对于本研究也缺乏针对性。

本研究通过采用传递比较法和同级比较法对二等铂电阻计量标准装置的校准结果进行验证。首先,介绍二等铂电阻温度计标准装置的工作原理和校准方法,然后,选取一支稳定的高精度温度传感器用本计量标准进行校准,并对该计量标准的测量结果进行不确定度评定;最后,再把该高精度温度传感器依次送至上级计量检定机构进行量值溯源及同级计量检定机构进行校准,得到对应的校准结果,并通过传递比较法和同级对比法分别对该计量标准进行验证。通过以上研究将有效确保该计量标准装置校准结果的准确性与可靠性,为提升温度气象观测数据的准确性提供可靠的技术支撑。

1 计量标准的工作原理

二等铂电阻温度计标准装置由二等标准铂电阻温度计

(简称标准温度计)、高精度直流测温电桥(简称电桥)及恒温槽等组成,其中电桥将标准温度计的电阻值转化为对应的温度值。其工作原理为,选用一支高精度温度传感器(简称温度传感器)做为被测温度计量器具,通过将它与标准温度计进行示值比对,来确定被测温度计量器具的示值误差。工作时标准器和被测温度计量器具在同一恒温槽内,且恒温槽工作区域内的液态导热介质能维持温度一致。其工作原理如图 1 所示。

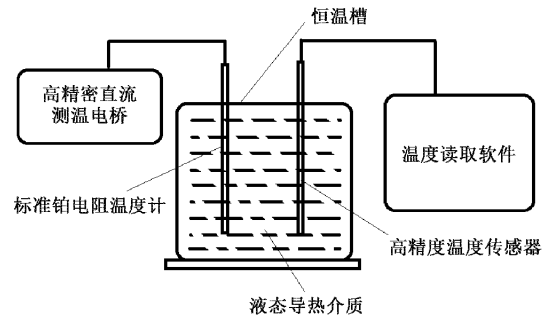


图 1 标准装置工作原理示意图

2 校准实验

被测温度计量器具选取一支稳定的高精度温度传感器(编号为 18066 的 RCY-1G 型自校式铂电阻测温仪)参照气象行业温度计量检定规程^[16],采用二等铂电阻温度计标准装置进行校准,选取 0℃、-10℃、20℃、50℃为温度校准点,每个校准点进行 10 次独立重复测量,各温度校准点的示值误差和实验标准偏差的数据如表 1 所示,测量结果以示值误差的形式体现,其示值误差计算如式(1)所示。

$$\Delta T = T' - T_s \quad (1)$$

其中, ΔT 为温度传感器的示值误差, T' 为被温度传感器的示值, T_s 为标准温度计示值。

表 1 各温度校准点的示值误差和实验标准偏差

校准点	示值误差										实验标准偏差	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		均值
-10	0.02	0.03	0.02	0.04	0.01	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.026	0.009 6
0	0.04	0.04	0.05	0.02	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03	0.05	0.036	0.010 8
20	0.03	0.04	0.02	0.03	0.05	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03	0.035	0.009 7
50	0.05	0.07	0.06	0.05	0.04	0.06	0.07	0.05	0.04	0.04	0.053	0.011 6

3 不确定度的评定

基于国际计量指南联合委员会(Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM)给出的 JCGM 100:2008“不确定度评定指南法”(guide to the expression of uncertainty in measurement, GUM)方法,并结合校准实验来进行不确定

度评定,具体的评定流程如图 2 所示。

不确定度评定中测量不确定度来源包括:1)重复性引入的不确定度;2)由标准温度计年变化引入的不确定度;3)由电桥测量标准温度计的电阻引入的不确定度;4)恒温槽的均匀性所引入的不确定度;5)恒温槽的波动性所引入的不确定度;6)由万用表测量温度传感器的电阻引入的不

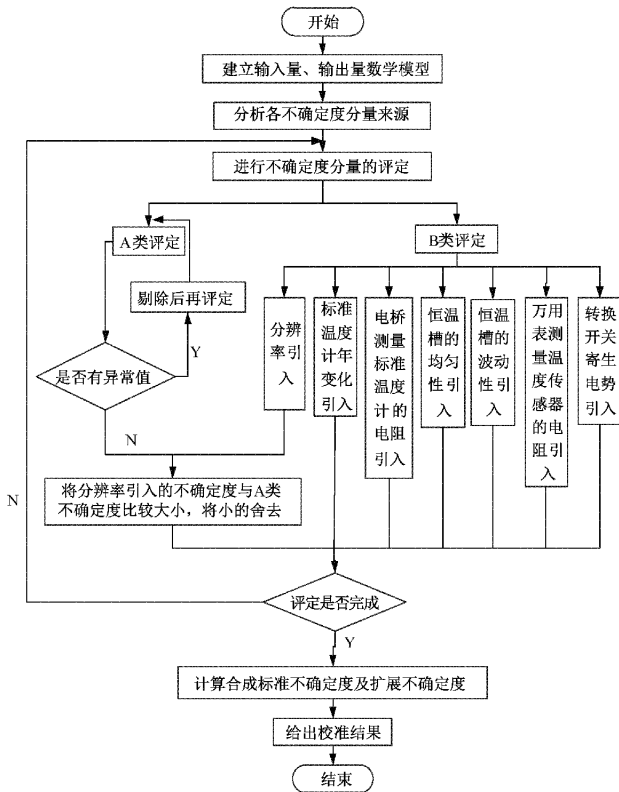


图2 GUM法评定测量不确定度实施流程

确定度;7)温度传感器的分辨力所引入的不确定度;8)由转换开关寄生电势引入的不确定度。

3.1 A类标准不确定度评定

A类标准不确定度由重复性测量引入,其评定方法为:首先,对各校准点的10次独立重复性测量数据(如表1所示)进行异常值的判定(一般采用格拉布斯准则);然后,将每个校准点10次示值误差的平均值,作为该校准点示值误差的最佳估计值,并计算其对应的试验标准差,最后,计算对应的合并标准偏差(如式(2)所示),该值即为A类标准不确定度 u_A 。

$$u_A = S_p / \sqrt{N} \quad (2)$$

其中, S_p 为合并样本标准偏差, N 为校准过程中各检定点的数据读取次数,其中合并样本标准偏差 S_p 如式(3)所示。

$$S_p = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{m(n-1)}} \quad (3)$$

其中, n 为每个校准点的测量次数, m 为校准点总数, \bar{x}_j 为第 j 个校准点示值误差均值, x_{ij} 为第 j 个校准点第 i 次测量的示值误差。通过温度校准点的示值误差和实验标准偏差的数据(表1)计算得出 $S_p=0.01\text{ }^\circ\text{C}$,由于检定规程要求每个温度点读取4次测量数据,因此 $N=4$,故 $u_A=0.01\text{ }^\circ\text{C}/2=0.005\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 B类标准不确定度评定

1)由标准温度计年变化引入的不确定度 u_1

通过查询标准铂电阻温度计检定规程^[16]及检定系统表^[17]得知,二等标准铂电阻温度计在水三相点及铝熔点的年变化不大于10 mK,服从均匀分布,因此其对应的标准不确定度为: $u_1=0.01\text{ }^\circ\text{C}/1.732=0.006\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2)由电桥测量标准温度计的电阻引入的不确定度 u_2

通过查询标准铂电阻温度计检定规程^[18]得知,当测温范围 $-30\text{ }^\circ\text{C}\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 时,对应的电桥在15~35 Ω 量程。通过查询电桥的校准证书得知,其对应量程的相对扩展不确定度为 $U_{rel}=4\times 10^{-6}$, $k=2$,则当校准 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时,转换成温度的标准不确定度: $u_2=0.0002\text{ }^\circ\text{C}/2=0.0001\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3)恒温槽的均匀性所引入的不确定度 u_3

恒温槽的工作区最大温度偏差为0.008,处于 $[-0.004\text{ }^\circ\text{C}, 0.004\text{ }^\circ\text{C}]$ 区间内均匀分布,因此对应的标准不确定度为: $u_3=0.004\text{ }^\circ\text{C}/1.732=0.0023\text{ }^\circ\text{C}$ 。

4)恒温槽的波动性所引入的不确定度 u_4

恒温槽的波动性为 $0.006\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ min}$,处于 $[-0.003\text{ }^\circ\text{C}, 0.003\text{ }^\circ\text{C}]$ 区间内反正弦分布,因此对应的标准不确定度为: $u_{B4}=0.003\text{ }^\circ\text{C}/1.414=0.0028\text{ }^\circ\text{C}$ 。

5)由万用表测量温度传感器的电阻的不确定度 u_5

通过查询气象行业温度计量检定规程^[16]得知,在测温范围 $-30\text{ }^\circ\text{C}\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 时,对应的万用表在100 Ω 量程,其对应的量程的相对扩展不确定度为 $U_{rel}=0.002\%$, $k=2$,则当校准 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时,转换成温度的标准不确定度: $u_5=0.001\text{ }^\circ\text{C}/2=0.0005\text{ }^\circ\text{C}$ 。

6)温度传感器的分辨力所引入的不确定度 u_6

由于温度传感器的分辨力为 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$,满足 $[-0.005\text{ }^\circ\text{C}, 0.005\text{ }^\circ\text{C}]$ 区间内均匀分布,对应的标准不确定度为: $u_6=0.005/1.732=0.00289\text{ }^\circ\text{C}$ 。

7)由转换开关寄生电势引入的不确定度 u_7

转换开关的寄生电势不大于 $0.2\text{ }\mu\text{V}$,考虑该接触电势对最终影响很小,因此忽略不计。

3.3 合成标准不确定度评定

通过对以上各不确定度来源进行分析与评定,其具体信息如表2所示。

根据GUM的规定,由于测量模型为一阶线性模型,因此其对应的合成标准不确定度 u_c ,可按式(4)计算:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2} \quad (4)$$

式(4)中, N 为标准不确定度的数量, u_i 为标准不确定度,由于重复性引入的不确定度 u_A 与分辨力引入的不确定度 u_6 彼此之间互容关系,且 $u_6 < u_A$,故仅舍弃分辨力引入的不确定度 u_6 ,将其它各标准不确定度代入式(4)进行计算,得出合成标准不确定度 $u_c=0.0084\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.4 扩展不确定度评定

扩展不确定度 U 由合成标准不确定度 u_c 乘包含因子

表 2 标准不确定度信息

符号	不确定度分量	分布类型	包含因子	区间半宽度/℃	标准不确定度/℃
u_A	重复性测量引入的不确定度引入	正态分布	—	—	0.005
u_1	标准温度计年变化引入	正态分布	2	0.01	0.006
u_2	电桥测量标准温度计的电阻引入	正态分布	2	0.000 2	0.000 1
u_3	恒温槽的均匀性所引入	均匀分布	1.732	0.004	0.002 3
u_4	恒温槽的波动性所引入	反正弦分布	1.414	0.003	0.002 8
u_5	万用表测量温度传感器的电阻引入	均匀分布	1.732	0.001	0.000 5
u_6	温度传感器的分辨力所引入	均匀分布	1.732	0.005	0.002 89
u_7	由转换开关寄生电势引入	正态分布	—	—	—

k 得到,按式(5)计算:

$$U = k u_c \quad (5)$$

$$\text{取 } k=2, U=2 \times 0.008 4 \text{ } ^\circ\text{C}=0.017 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4 校准结果的验证

分别采用传递比较法和同级比对法对二等铂电阻计量标准装置的校准结果进行验证,即将以上校准实验所用的温度传感器依次送至上级计量检定机构进行量值溯源

及同级计量检定机构进行校准,得到对应的校准结果(如表 3 所示);然后将该计量标准得到的校准结果与上级计量检定机构进行量值溯源得到的校准结果,通过传递比较法的验证公式进行计算,可得到传递比较法的验证结果;并将该计量标准得到的校准结果与同级计量检定机构得到的校准结果代入同级比对法的经验公式进行计算,可得到同级比对法的验证结果。

表 3 各计量检定机构的校准结果

℃

校准点	被考核计量标准		上级计量检定机构		同级计量检定机构 A		同级计量检定机构 B		同级计量检定机构 C	
	被测量	U	被测量	U	被测量	U	被测量	U	被测量	U
-10	0.026	0.017	0.028	0.008	0.025	0.012	0.020	0.018	0.026	0.020
0	0.036	0.017	0.033	0.008	0.034	0.012	0.032	0.018	0.035	0.020
20	0.035	0.017	0.032	0.008	0.030	0.012	0.033	0.018	0.035	0.020
50	0.053	0.017	0.051	0.008	0.048	0.012	0.049	0.018	0.052	0.020

4.1 传递比较法

根据传递比较法验证时的要求,校准结果在包含因子近似相等的前提下应满足式(6)的要求,则表明通过传递比较法的验证,被考核的计量标准可以开展量值传递工作。

$$|y_{lab} - y_{ref}| \leq \sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2} \quad (6)$$

其中, y_{lab} 为被考核计量标准的校准结果; y_{ref} 为高等级计量标准的校准结果, U_{lab} 为被考核计量标准校准时的扩展不确定度, U_{ref} 为高等级计量标准校准时的扩展不确定度。

通过计算, $|y_{lab} - y_{ref}|$ 在校准点为 $-10 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,分别为 $0.002 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $0.003 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $0.003 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $0.002 \text{ } ^\circ\text{C}$,而 $\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}$ 为 $0.019 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。以上数据代入式(6)成立,所以被考核计量标准的校准结果通过传递比较法的验证。

4.2 同级比对法

根据同级比对法验证的要求,当多个同级计量标准的校准结果(包括被考核计量标准和同级计量检定机构 A、B 和 C 的计量标准,共计 4 个计量标准),在包含因子近似相

等的前提下应满足式(7)的要求,则表明通过同级比对法的验证,被考核的计量标准可以开展量值传递工作。

$$|y_{lab} - \bar{y}| \leq \sqrt{\frac{n-1}{n}} U_{lab} \quad (7)$$

其中, y_{lab} 为被考核计量标准的校准结果, U_{lab} 为其测量不确定度, \bar{y} 为各计量标准校准结果的加权算数平均值,其计算方法为:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{U_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{U_i}} \quad (8)$$

其中, n 为同级比对法验证的计量标准数量, y_i 为第 i 个计量标准的校准结果, U_i 为 y_i 对应的测量不确定度。

通过计算,参与比对的 4 家单位在校准点为 $-10 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,对应的加权算数平均值 \bar{y} 分别为 $0.026 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $0.033 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $0.032 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$,对应的 $|y_{lab} - \bar{y}|$ 分别为 $0.002 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $0.001 \text{ } ^\circ\text{C}$,而 $\sqrt{\frac{n-1}{n}} U_{lab} = 0.007 \text{ } ^\circ\text{C}$,以上数据代入式(7)成立,所以所

建计量标准的校准结果通过同级比对法的验证。

5 结 论

为了规范气象用温度计量工作,确保计量单位的统一和量值传递的一致性、准确性。该研究通过传递比较法和同级比对法对该省级二等铂电阻计量标准装置的校准结果进行了验证,结果显示,无论是传递比较法还是同级比对法,该计量标准的校准结果均通过了验证,表明该二等铂电阻计量标准装置能获取准确的量值传递数据。该研究通过两种验证方法对该计量标准装置进行验证,为保证温度计量单位的统一和量值传递的一致性、准确性提供有力的技术支持,进而为提升温度气象观测数据的准确性提供可靠的技术支撑。为了进一步提升验证方案执行效率,未来可开展参与验证的计量标准的等级对验证结果的影响,以及在验证方法中采用蒙特卡洛法进行测量不确定度评定等相关研究。

参考文献

- [1] 全国法制计量管理计量技术委员会. JJF1033-2016 计量标准考核规范[S]. 北京:中国质检出版社,2016:12.
- [2] 张佳佳,梁如意,朱庚华等. 检定或校准结果的能力验证方法及实例分析[J]. 气象水文海洋仪器,2019,36(3):31-33.
- [3] 刘莉. 0.01级三相电能表标准装置检定或校准结果的不确定度评定实例分析[J]. 电力设备管理,2018(6):45-47,66.
- [4] 杨蒙,牛锦皓,伍开成,等. 标准表法天然气流量标准装置校准结果验证方法的应用探讨[J]. 中国测试,2018,44(S1):32-36.
- [5] WEI M, WEN C, LI C. Evaluation of measurement uncertainty of HMP155A humidity sensor based on correlation analysis of input quantities[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022, 2226(1): 012011.
- [6] WEI M, ZENG Y, WEN C, et al. Comparison of MCM and GUM method for evaluating measurement uncertainty of wind speed by pitot tube[J]. MAPAN, 2019,34: 345-355.
- [7] WEI M, ZENG Y, ZOU L, et al. Analysis of the influence of water-vapor correction term on the measurement uncertainty of wind speed[J]. MAPAN, 2019,34: 333-343.
- [8] 魏明明. 皮托管测量风速时 GUM 评定不确定度的偏差修正[J]. 仪器仪表学报,2019,40(6):146-154.
- [9] 李文博,颜平江,武灿灿. 一种叶轮式风速仪的校准方法[J]. 国外电子测量技术,2020,39(8):129-133.
- [10] DUDA P, KONIECZNY M. Experimental verification of the inverse method of the heat transfer coefficient calculation[J]. Energies, 2020, 13(6): 1440. DOI: 10.3390/en13061440.
- [11] 邓艳琴,殷鸣. 二等标准水银温度计校准能力验证结果分析[J]. 江苏电机工,2010,29(3):48-49,53.
- [12] 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(S1):78-79,103.
- [13] 谢海营,刘春艳,谭佳丽,等. 二等标准铂电阻温度计标准装置不确定度评定[J]. 计量与测试技术,2017,44(12):95-96,98.
- [14] 钱建良,钟青,李欣. 二等铂电阻温度计标准装置的不确定度评定[J]. 电子世界,2013,416(2):99-101.
- [15] 邵炳芳. 二等标准铂电阻温度计标准装置不确定度分析[J]. 计量与测试技术,2017,44(2):109-111.
- [16] 自动气象站铂电阻温度传感器: JJG(气象)002-2015[S]. 中国气象局,2015.
- [17] 标准铂电阻温度计: JJG160-2007[S]. 国家质量监督检验检疫总局,2007.
- [18] 温度计量器具: 13.81~273.15 K[S]. 国家技术监督局,1990.

作者简介

魏明明,高级工程师,主要从事气象观测仪器的计量检定工作。

E-mail: weimingming@yeah.net

李芬(通信作者),正研级高工,主要从事综合气象观测及气象信息技术应用业务。

E-mail: 413563706@qq.com