

电子探空仪基测箱校准结果的不确定度 评定方法的研究

郑树芳¹, 刘海珍¹, 温晓辉¹, 马修才¹, 闫平¹, 有思²

(1. 内蒙古自治区大气探测技术保障中心, 呼和浩特 010000;

2. 呼伦贝尔市气象局, 内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘要: 针对电子探空仪基测箱尚缺乏其校准结果不确定度评定方法的研究, 介绍了不确定度的评定方法及合成标准不确定度和扩展不确定度的计算方法, 综合研究了电子探空仪基测箱的温度、气压、湿度、风速、输出电压及电池电压六项校准项目的校准过程及校准过程所使用的主要测量设备, 分析了影响各项校准项目校准结果的不确定因素, 并依据相关的规程规范对 JKZ1-1 型电子探空仪基测箱的各项校准项目进行了校准试验, 并对其校准结果进行了不确定度的分析与评定, 得出每项校准项目的校准结果均符合要求; 该研究成果可为电子探空仪基测箱的实验室校准提供一定的技术依据, 近而为准确评估天气预报、气候分析、科学研究和军工活动、国际探测数据交换等提供一定的数据支撑。

关键词: 电子探空仪基测箱; 各项校准项目; 校准过程; 校准实验; 校准结果; 主要测量设备; 不确定因素; 不确定度的分析与评定

Research on Uncertainty Evaluation Method of Calibration Results of Electronic Sonde Base Test Box

ZHENG Shufang¹, LIU Haizhen¹, WEN Xiaohui¹, MA Xiucui¹, YAN Ping¹, YOU Si²

(1. Inner Mongolia Atmospheric Sounding Technical Support Center, Inner Mongolia Huhhot 010000, China;

2. Hulunbuir Meteorological Bureau, Inner Mongolia Hulunbeir 021000, China)

Abstract: Aiming at the sufficient research on the uncertainty evaluation method of the calibration results of the electronic sonde base test box, an uncertainty evaluation method and calculation method of combined standard uncertainty and extended uncertainty are introduced. The calibration items of temperature, air pressure, humidity, wind speed, output voltage and battery voltage of the electronic sonde base test box and the main measurement equipment used in the calibration process are studied comprehensively, and the uncertain factors affecting the calibration results of each calibration item are analyzed. According to the relevant regulations and specifications, the calibration test is carried out for each calibration item of the JKZ1-1 electronic sonde base test box, the calibration result is analyzed and evaluated uncertainly, and the obtained results of each calibration item meet the requirements. The research results can supply a certain technical basis for the laboratory calibration of the electronic sonde base measurement box, and then provide a certain data support for the accurate assessment such as weather forecast, climate analysis, scientific research and military-industrial activities, and international detection data exchange.

Keywords: electronic sonde base test box; calibration process; uncertainty; analysis and evaluation

0 引言

电子探空仪基测箱应用广泛, 在全国各个高空探测气象台站、部队探空站、科研机构等均有配备使用^[1-4]。电子探空仪基测箱的校准项目繁多, 其测量参数包括有: 温度示值误差、气压示值误差、湿度示值误差、检测室通风速度、输出电压及电池电压; 其校准所使用的计量标准器和

主要配套设备也比较多, 计量标准器包括有: 标准铂电阻温度计、精密露点仪、数字气压计、热球式风速仪、数字多用表; 主要配套设备包括有: 恒温槽、标准温湿度箱(或湿度发生器)、气压发生器、测温电桥(或温度二次仪表)、直流稳压电源。诸多因素给电子探空仪基测箱校准结果的不确定评定工作带来了很大的压力, 目前也无人对电子探空仪基测箱校准结果的不确定度评定进行过全面的

收稿日期: 2022-08-10; 修回日期: 2022-09-06。

基金项目: 内蒙古自治区大气探测技术保障中心科技创新项目(nmdqtckjcx202210)。

作者简介: 郑树芳(1968-), 女, 内蒙古自治区巴彦淖尔人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事气象计量检定和气象观测设备检测方向的研究。

通讯作者: 刘海珍(1991-), 女, 山西吕梁人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事气象计量检定和气象观测设备检测方向的研究。

引用格式: 郑树芳, 刘海珍, 温晓辉, 等. 电子探空仪基测箱校准结果的不确定度评定方法的研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 339-347.

研究。

针对电子探空仪基测箱尚缺乏校准结果不确定度评定方法的研究,也为降低校准人员的工作难度,文章介绍了电子探空仪基测箱的工作原理,介绍了不确定度的评定方法及合成标准不确定度和扩展不确定度的计算方法,综合研究了电子探空仪基测箱各项校准项目的校准过程及所使用的主要测量设备,分析了影响校准结果的不确定因素,并依据相关规程规范对 JKZ1-1 型电子探空仪基测箱的各项校准项目进行了校准试验,并对校准结果进行了不确定度的分析与评定,得出每项校准项目的校准结果均符合要求。该研究成果可为电子探空仪基测箱的实验室校准提供一定的技术依据,近而为准确评估天气预报、气候分析、科学研究和军工活动、国际探测数据交换等提供一定的数据支撑^[5-7]。

1 电子探空仪基测箱基本原理及评定方法

1.1 电子探空仪基测箱

电子探空仪基测箱(以下简称基测箱)是一种综合性检测设备,用于施放前对探空仪温度、湿度、气压地面基值进行测定,使用干湿球法测定测试区标准温度和湿度,使用气压传感器测定放球地点地面气压标准值,使用湿敏电容传感器测定零点测试室的标准湿度值,进而确定探空仪是否符合施放要求^[8-10]。其结构原理如图 1 所示。

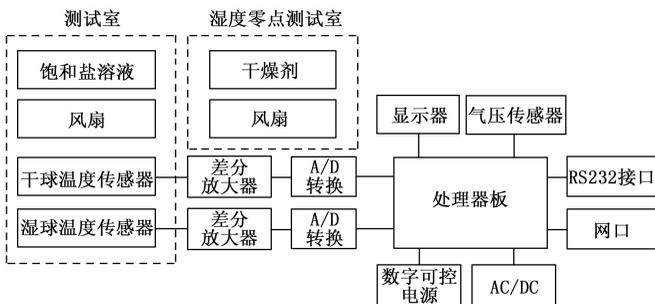


图 1 电子探空仪基测箱结构原理图

1.2 基测箱校准结果的不确定度评定

基测箱测量参数有温度示值误差、气压示值误差、湿度示值误差、检测室通风速度、输出电压及电池电压。因此,基测箱校准结果的不确定度评定分为六部分,即温度校准结果的不确定度评定、气压校准结果的不确定度评定、湿度校准结果的不确定度评定、风速校准结果的不确定度评定、输出电压校准结果的不确定度评定及电池电压校准结果的不确定度评定。

1.2.1 不确定度评定方法

校准结果的不确定度来源基于所采用的测量方法、测量设备、测量条件及被测量的综合分析,不确定度来源主要分为两大类,一类是由被校对象引入的不确定度,一类是由标准装置引入的不确定度^[11-12]。不确定度的评定方法分为 A 类评定方法和 B 类评定方法^[13-14],其中 A 类评定方法利用式(1)计算得到,其中 B 类评定方法利用式(2)

计算得到。不确定度来源中,只有被校对象示值重复性引入的标准不确定度是采用 A 类评定方法,其余分量均采用 B 类评定方法^[15]。

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

式中, x_i 为 n 次重复测量中的第 i 次的测量值, \bar{x} 为 n 次重复测量所得一组值的算术平均值, $s(x)$ 为 n 次重复测量中单次测量值的实验标准偏差, u_A 为测量结果取 m 次重复测量的算术平均值时测量重复性导致的 A 类标准不确定度。

$$u_B = \frac{a}{k} \quad (2)$$

式中, u_B 为 B 类标准不确定度, a 为区间半宽度, k 为包含因子。

1.2.2 合成标准不确定度

计算校准结果的合成标准不确定度时,需先分析各个标准不确定度分量是否具有相关性,若存在相关性,先将具有相关性的两个分量进行比较,保留其中较大分量,舍弃其中较小分量,然后利用式(3)计算得到校准结果的合成标准不确定度^[16]。

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u_i^2} \quad (3)$$

式中, n 为标准不确定度分量个数, u_i 为第 i 个输入分量的标准不确定度, c_i 为第 i 个输入分量的灵敏系数, u_c 为校准结果的合成标准不确定度。

1.2.3 扩展不确定度

取覆盖因子 $k=2$,由式(4)可计算得到校准结果的扩展不确定度^[17]。

$$U = k u_c \quad (4)$$

式中, U 为校准结果的扩展不确定度, u_c 为校准结果的合成标准不确定度, k 为覆盖因子。

2 温度校准结果的不确定度评定

2.1 校准方案

以 JKZ1-1 型基测箱温度传感器(其分辨力为 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$,最大允许误差为 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$)为研究对象,按照中国气象局大气探测技术中心 2008 年 5 月下发的《JKZ1 型探空仪检测校准方法》(以下简称校准方法)的相关要求,在规定的条件下,对其进行校准实验。校准实验的标准器选用二等标准铂电阻温度计,配套设备选用直流测温电桥和液体恒温槽。校准时,将标准器和基测箱温度传感器的温度感应部分同时固定于同一液体恒温槽内中央工作区域的等高位置上,调节液体恒温槽,设定温度校准点,当液体恒温槽内介质的温度达到设定值并稳定后开始读数,分别读取标准器和被校对象的温度示值,每 10 s 读取 1 次,共读取 10 次,将被校对象温度示值减去标准器温度示值得到设定校准点被校对象的温度示值误差,并将其差作为设定校准点被校对象的校准结果。

表 1 被校对象温度示值重复性校准实验数据

°C

校准点	被校对象温度示值误差 ΔT										$\Delta \bar{T}$	$u(T_1)$		
	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04			0.04	0.04
+30	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.001 5
0	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.001 3

2.2 校准数学模型

由其校准方案可知, 被校对象温度示值误差可由式 (5) 得到:

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (5)$$

式中, ΔT 为被校对象的温度示值误差, 单位为 °C; T_1 为被校对象温度示值, 单位为 °C; T_2 为标准器温度示值, 单位为 °C。

对式 (5) 求偏导可得被校对象温度示值的灵敏系数为 1, 标准器温度示值的灵敏系数为 -1。

2.3 误差来源及其标准不确定度

综合分析, 基测箱温度传感器校准结果的不确定度来源主要有被校对象的示值重复性、被校对象的分辨力、标准器在固定点的稳定性、测量电流引起自热效应、直流测温电桥、液体恒温槽内温度波动性及温度不均匀性。

2.3.1 由被校对象的示值重复性引入的标准不确定度

根据其校准方案, 选择具有代表性的 +30 °C、0 °C 点进行校准实验, 利用式 (5) 计算得到各校准点被校对象的温度示值误差 ΔT , 当校准结果取 10 次重复测量得到的被校对象温度示值误差的算术平均值时, 利用式 (1) 计算得到各校准点被校对象的温度示值误差重复性导致的标准不确定度 $u(T_1)$ 。被校对象温度示值重复性校准实验数据如表 1 所示。

2.3.2 由被校对象的分辨力引入的标准不确定度

基测箱温度传感器的分辨力为 0.01 °C, 即区间半宽为 0.005 °C, 按均匀分布, 则由其引入的标准不确定度 $u(T_2)$ 可由式 (2) 计算得到。

2.3.3 标准器在固定点的稳定性引入的标准不确定度

根据 JJG160-2007 标准铂电阻温度计^[18] (以下简称 JJG160-2007) 的要求可知, 二等标准铂电阻温度计在 +30 °C 点的稳定性为 ≤ 0.008 °C, 在 0 °C 点的稳定性为 ≤ 0.01 °C, 即在 +30 °C 点的区间半宽为 0.008 °C, 在 0 °C 点的区间半宽为 0.01 °C, 按均匀分布, 则在各校准点由其引入的标准不确定度 $u(T_3)$ 可由式 (2) 计算得到。

2.3.4 由测量电流引起自热效应引入的标准不确定度

根据 JJG160-2007^[18] 的要求可知, 二等标准铂电阻温度计在水三相点温度测量时, 自热效应换算成温度值最大不超过 0.004 °C, 在 +30 °C 点温度测量时, 由于恒温槽中流动介质的温度较高, 自热影响可以忽略不计, 即在 +30 °C 点的区间半宽为 0 °C, 按均匀分布, 则在各校准点由其引入的标准不确定度 $u(T_4)$ 可由式 (2) 计算得到。

2.3.5 由直流测温电桥引入的标准不确定度

根据 JJG160-2007^[18] 的要求可知, 直流测温电桥的准确

度等级为 0.002 级, 即电阻相对误差不大于 2.0×10^{-5} , 对应的温度相对误差不大于 2.0×10^{-6} , 远优于校准方法的要求, 则在各校准点由其引入的标准不确定度 $u(T_5)$ 可忽略不计。

2.3.6 由液体恒温槽内温度波动性引入的标准不确定度

根据 JJG160-2007^[18] 的要求可知, 液体恒温槽温度波动度 $\leq \pm 0.02$ °C, 即区间半宽度为 0.02 °C, 按均匀分布, 则在各校准点由其引入的标准不确定度 $u(T_6)$ 可由式 (2) 计算得到。

2.3.7 由液体恒温槽内温度不均匀引入的标准不确定度

根据 JJG160-2007^[18] 的要求可知, 液体恒温槽温度均匀度 ≤ 0.02 °C, 即区间半宽度为 0.02 °C, 按均匀分布, 则在各校准测试点由其引入的标准不确定度 $u(T_7)$ 可由式 (2) 计算得到。

2.4 合成标准不确定度

2.4.1 标准不确定度分量汇总

基测箱温度传感器校准时其不确定度来源主要由基测箱温度传感器和标准装置两大类引入的, 这两大类引入的标准不确定度数据汇总如表 2 所示。

2.4.2 合成标准不确定度计算

依据 1.2.2 节中合成标准不确定度计算方法, 可得到基测箱温度传感器校准结果的合成标准不确定度 u_c , 即在 +30 °C 点的 u_c 为 0.017 °C, 在 0 °C 点的 u_c 为 0.018 °C。

2.5 扩展不确定度计算

取覆盖因子 $k=2$, 则基测箱温度传感器校准结果的扩展不确定度 U 可由式 (4) 计算得到, 即在 +30 °C 点的 U 为 0.04 °C、在 0 °C 的 U 为 0.04 °C。

2.6 校准结果的表示与报告

在 +30 °C 点, 其校准结果可表示: $m_t = 0.03$ °C, $U = 0.04$ °C, $k=2$ 。

在 0 °C 点, 其校准结果可表示为: $m_t = 0.06$ °C, $U = 0.04$ °C, $k=2$ 。

根据 JJF1094-2002 测量仪器特性评定^[19] (以下简称 JJF1094-2002) 的相关规定, 基测箱温度传感器在 +30 °C 点和 0 °C 点, 当 $k=2$ 时, 基测箱温度传感器校准结果的扩展不确定度均大于其最大允许误差绝对值的三分之一, 则必须考虑不确定度对符合性评定的影响。此时, 在 +30 °C 点和 0 °C 点, 基测箱温度传感器校准结果的绝对值均不大于其最大允许误差的绝对值与校准结果的扩展不确定度之差, 则基测箱温度传感器的校准结果符合要求。其余测量点的不确定度评定可参考此方法进行。

表 2 不确定度来源数据汇总表

标准不确定度来源		评定方法	包含因子	符号	校准点/℃	标准不确定度数值/℃				
被校对象引入	被校对象的示值重复性	A 类	1	$u(T_1)$	+30	0.001 5				
					0	0.001 3				
	被校对象的分辨力	B 类	$\sqrt{3}$	$u(T_2)$	+30	0.002 9				
					0	0.002 9				
标准装置引入	标准器在固定点的稳定性	B 类	$\sqrt{3}$	$u(T_3)$	+30	0.004 6				
					0	0.005 8				
	工作电流引起的自热效应	B 类	$\sqrt{3}$	$u(T_4)$	+30	0.000 0				
					0	0.002 3				
	直流测温电桥	B 类	$\sqrt{3}$	$u(T_5)$	+30	0.000 0				
					0	0.000 0				
	液体恒温槽内温度波动性	B 类	$\sqrt{3}$	$u(T_6)$	+30	0.011 5				
					0	0.011 5				
					液体恒温槽内温度不均匀性	B 类	$\sqrt{3}$	$u(T_7)$	+30	0.011 5
									0	0.011 5

3 气压校准结果的不确定度评定

3.1 校准方案

以 JKZ1-1 型基测箱气压传感器（其分辨力为 0.01 hPa，最大允许误差为 ±0.3 hPa）为研究对象，按照校准方法的相关要求，在规定的条件下，对其进行校准实验。校准实验的标准器选用标准数字气压计，配套设备选用气压发生器。校准时，将标准数字气压计和电子探空仪基测箱气压传感器同时与同一气压发生器连接，调节气压发生器，设定气压校准点，当气压发生器达到设定值并稳定后开始读数，分别读取标准数字气压计和被校对象的气压示值，每 10 s 读取 1 次，共读取 10 次，将标准数字气压计的气压示值经过修正得到标准气压值，然后将被校对象气压示值减去标准气压值得到设定校准点被校对象的气压示值误差，并将其作为设定校准点被校对象的校准结果。

3.2 校准数学模型

由其校准方案可知，被校对象气压示值误差可由式 (6) 得到：

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (6)$$

式中， ΔP 为被校对象的气压示值误差，单位为 hPa； P_1 为被校对象气压示值，单位为 hPa； P_2 为标准气压值，单位为 hPa。

对式 (6) 求偏导可得被校对象气压示值的灵敏系数为 1，标准气压值的灵敏系数为 -1。

3.3 误差来源及其标准不确定度

综合分析，基测箱气压传感器校准结果的不确定度来源主要有被校对象的示值重复性、被校对象的分辨力、数

字气压计的分辨力、数字气压计的修正值和气压发生器。

3.3.1 由被校对象的示值重复性引入的标准不确定度

根据其校准方案的要求，选择具有代表性的 900 hPa 点进行校准实验，利用式 (6) 计算得到被校对象的气压示值误差 ΔP ，当校准结果取 10 次重复测量得到的被校对象气压示值误差的算术平均值时，利用式 (1) 计算得到设定校准点被校对象的气压示值误差重复性导致的标准不确定度 $u(P_1)$ 。被校对象气压示值重复性校准实验数据如表 3 所示。

3.3.2 由被校对象的分辨力引入的标准不确定度

被校对象的分辨力为 0.01 hPa，即区间半宽为 0.005 hPa，按均匀分布，则由其引入的标准不确定度 $u(P_2)$ 可由式 (2) 计算得到。

3.3.3 由标准数字气压计的分辨力引入的标准不确定度

标准数字气压计的分辨力为 0.000 1%FS，即取测量范围上限点 1 100 hPa，则其分辨力为 0.001 1 hPa，区间半宽为 0.000 55 hPa，按均匀分布，则由其引入的标准不确定度 $u(P_3)$ 可由式 (2) 计算得到。

3.3.4 由标准数字气压计的修正值引入的标准不确定度

标准数字气压计的最大允许误差为 ±0.1 hPa，即区间半宽为 0.1 hPa，按正态分布，则由其引入的标准不确定度 $u(P_4)$ 可由式 (2) 计算得到。

3.3.5 由气压发生器引入的标准不确定度

气压发生器气压值的扩展不确定度为 (0.02~0.04) hPa， $k=2$ ，取最不利值，即区间半宽为 0.04 hPa，则由其引入的标准不确定度 $u(P_5)$ 可由式 (2) 计算得到。

表 3 被校对象气压示值重复性校准实验数据

实验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ΔP	$u(P_1)$
P_1	899.62	899.61	899.62	899.62	899.62	899.62	899.62	899.62	899.62	899.62	899.62	—
P_2	899.72	899.72	899.72	899.72	899.72	899.72	899.72	899.72	899.72	899.72	899.72	—
ΔP	-0.10	-0.11	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	0.001 0

3.4 合成标准不确定度

3.4.1 标准不确定度分量汇总

基测箱气压传感器校准时其不确定度来源主要由基测箱气压传感器和标准装置两大类引入的, 这两大类引入的标准不确定度数据汇总如表 4 所示。

表 4 不确定度来源数据汇总表

标准不确定度来源		评定方法	包含因子	符号	标准不确定度分量数值/hPa
被校对象引入	被校对象的示值重复性	A类	1	$u(P_1)$	0.001 0
	被校对象的分辨力	B类	$\sqrt{3}$	$u(P_2)$	0.002 9
标准装置引入	数字气压计的分辨力	B类	$\sqrt{3}$	$u(P_3)$	0.000 3
	数字气压计的修正值	B类	3	$u(P_4)$	0.033
	气压发生器	B类	2	$u(P_5)$	0.02

3.4.2 合成标准不确定度计算

依据 1.2.2 节中合成标准不确定度计算方法, 可得到基测箱气压传感器校准结果的合成标准不确定度 u_c , 即在 900 hPa 点的 u_c 为 0.039 hPa。

3.5 扩展标准不确定度

取覆盖因子 $k=2$, 则基测箱气压传感器校准结果的扩展不确定度 U 可由公式 (4) 计算得到, 即在 900 hPa 点的 U 为 0.08 hPa。

3.6 测量不确定度报告与表示

在 900 hPa 校准点, 其校准结果可表示为: $m_p = -0.10$ hPa, $U=0.08$ hPa, $k=2$ 。

根据 JJF1094-2002^[19] 的相关规定, 基测箱气压传感器在 900 hPa 点, 当 $k=2$ 时, 基测箱温度传感器校准结果的扩展不确定度小于其最大允许误差绝对值的三分之一, 则不确定度对符合性评定的影响可以忽略不计。此时, 在 900 hPa 点, 基测箱气压传感器校准结果的绝对值小于其最大允许误差的绝对值, 则基测箱气压传感器的校准结果符合要求。其余测量点的不确定度评定可参考此方法进行。

4 湿度校准结果的不确定度评定

4.1 校准方案

以 JKZ1-1 型基测箱湿度感应部分即通风干湿表 (其分辨力为 0.1%RH, 最大允许误差为 $\pm 2\%$ RH) 为研究对象, 按照校准方法的相关要求, 在规定的环境条件下, 对其进行校准实验。校准实验的标准器选用精密露点仪, 配套设备选用温湿度标准箱。校准时, 将基测箱置于温湿度标准箱内, 并将精密露点仪和通风干湿表湿度感应部分同时固定于基测箱测试区的中央工作区域的等高位置上, 调节温湿度标准箱, 设定湿度校准点, 当温湿度标准箱的空气湿

度达到设定值并稳定后开始读数, 分别读取标准器湿度示值和通风干湿表湿度示值, 每 10 s 读取 1 次, 共读取 10 次, 将标准器湿度示值经修正后得到标准湿度值, 然后将通风干湿表湿度示值减去标准湿度值得到通到设定校准点通风干湿表的湿度示值误差, 并将其作为设定校准点被校对象的校准结果。

4.2 校准数学模型

由其校准方案可知, 被校对象湿度示值误差可由式 (7) 得到:

$$\Delta H = H_1 - H_2 \quad (7)$$

式中, ΔH 为被校对象的湿度示值误差, 单位为 %RH; H_1 为被校对象湿度示值, 单位为 %RH; H_2 为标准湿度值, 单位为 %RH。

对式 (7) 求偏导可得被校对象湿度示值的灵敏系数为 1, 标准湿度值的灵敏系数为 -1。

4.3 误差来源及其标准不确定度

综合分析, 基测箱通风干湿表校准结果的不确定度来源主要有被校对象的示值重复性、被校对象的分辨力、精密露点仪的分辨力及准确度、温湿度标准箱内湿度波动性及不均匀性。

4.3.1 由被校对象的示值重复性引入的标准不确定度

根据其校准方案的要求, 选择具代表性的 33%RH 点进行校准实验, 利用式 (7) 计算得到被校对象的湿度示值误差 ΔH , 当校准结果取 10 次重复测量得到的被校对象湿度示值误差的算术平均值时, 利用式 (1) 计算得到设定校准点被校对象的湿度示值误差重复性导致的标准不确定度 $u(H_1)$ 。被校对象湿度示值重复性校准实验数据如表 5 所示。

4.3.2 由被校对象的分辨力引入的标准不确定度

通风干湿表的分辨力为 0.1%RH, 即区间半宽为 0.05%RH, 按均匀分布, 则由其引入的标准不确定度 $u(H_2)$ 可由式 (2) 计算得到。

4.3.3 由精密露点仪的准确度引入的标准不确定度

当环境湿度为 33%RH、环境温度为 20℃及露点为 3.3℃DP 时, 湿度的最大允许误差为 $\pm 1.0\%$ RH, 即区间半宽为 1.0%RH, 按正态分布, 则由其引入的标准不确定度 $u(H_3)$ 可由式 (2) 计算得到。

4.3.4 由精密露点仪的分辨力引入的标准不确定度

精密露点仪的分辨力为 0.01%RH, 即区间半宽为 0.005%RH, 按均匀分布, 则由其引入的标准不确定度 $u(H_4)$ 可由式 (2) 计算得到。

表 5 被校对象湿度示值重复性校准实验数据

实验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\overline{\Delta H}$	$u(H_1)$
被校对象湿度示值 H_1	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	33.7	33.6	33.6	33.6	33.6	—
标准湿度值 H_2	33.12	33.12	33.11	33.11	33.12	33.13	33.13	33.12	33.12	33.11	33.12	—
被校对象湿度示值误差 ΔH	0.48	0.48	0.49	0.49	0.48	0.47	0.57	0.48	0.48	0.49	0.49	0.009

表 6 不确定度来源数据汇总表/℃

标准不确定度来源		评定方法	包含因子	符号	校准点/%RH	标准不确定度数值/%RH
被校对象引入	被校对象的示值重复性	A 类	1	$u(H_1)$	+30	0.009
	被校对象的分辨力	B 类	$\sqrt{3}$	$u(H_2)$	+30	0.029
标准装置引入	精密露点仪的分辨力	B 类	$\sqrt{3}$	$u(H_3)$	+30	0.33
	精密露点仪的准确度	B 类	3	$u(H_4)$	+30	0.003
	温湿度标准箱内湿度不均匀性	B 类	$\sqrt{3}$	$u(H_5)$	+30	0.173
	温湿度标准箱内湿度波动性	B 类	$\sqrt{3}$	$u(H_6)$	+30	0.173

4.3.5 由温湿度标准箱内湿度不均匀性引入的标准不确定度

根据 JJF1564-2016 温湿度标准箱校准规范的要求^[20], 在温湿度标准箱的有效区域内, 湿度均匀度 $\leq 0.3\%RH$ (20℃时), 即区间半宽为 $0.3\%RH$, 按均匀分布, 则由其引入的标准不确定度 $u(H_5)$ 可由式 (2) 计算得到。

4.3.6 由温湿度标准箱内湿度波动性引入的标准不确定度

根据 JJF1564-2016 温湿度标准箱校准规范的要求^[20], 在温湿度标准箱的有效区域内, 湿度波动度 $\leq \pm 0.3\%RH$ (20℃时) 按均匀分布, 即区间半宽为 $0.3\%RH$, 按均匀分布, 则由其引入的标准不确定度 $u(H_6)$ 可由式 (2) 计算得到。

4.4 合成标准不确定度

4.4.1 标准不确定度分量汇总

基测箱通风干湿表校准时其不确定度来源主要由通风干湿表和标准装置两大类引入的, 这两大类引入的标准不确定度数据汇总如表 6 所示。

4.4.2 合成标准不确定度计算

依据 1.2.2 节中合成标准不确定度计算方法, 可得到基测箱通风干湿表校准结果的合成标准不确定度 u_c , 即在 $33\%RH$ 点的 u_c 为 $0.41\%RH$ 。

4.5 扩展标准不确定度

取覆盖因子 $k=2$, 则基测箱通风干湿表校准结果的扩展不确定度 U 可由式 (4) 计算得到, 即在 $33\%RH$ 点的 U 为 $0.9\%RH$ 。

4.6 测量不确定度报告与表示

在 $33\%RH$ 校准点, 其校准结果可表示为: $m_h = 0.49\%RH$, $U=0.9\%RH$, $k=2$ 。

根据 JJF1094-2002^[19] 的相关规定, 基测箱通风干湿表在 $33\%RH$ 点, 当 $k=2$ 时, 基测箱通风干湿表校准结果的扩展不确定度大于其最大允许误差绝对值的三分之一, 则必须考虑不确定度对符合性评定的影响。此时, 在 $33\%RH$ 点, 基测箱通风干湿表校准结果的绝对值小于其最大允许误差的绝对值与校准结果的扩展不确定度之差, 则基测箱

通风干湿表的校准结果符合要求。其余测量点的不确定度评定可参考此方法进行。

5 风速校准结果的不确定度评定

5.1 校准方案

以 JKZ1-1 型基测箱检测室通风速度 (测量范围为 $2.5 \sim 4.0 m/s$) 为研究对象, 按照校准方法的相关要求, 在规定的条件下, 对其进行校准实验。校准实验所用的标准器是热球式风速仪。校准时, 打开检测室开关, 拔出检测室湿球温度传感器, 将热球式风速仪感应探头替换到该位置, 风速仪表头上的标记符应正对风的来向, 待风速稳定后开始读数, 读取热球式风速仪的风速示值, 每 10 s 读取 1 次, 共 10 次, 取 10 次重复读数的算术平均值作为湿球位置的通风速度, 并将其修正后作为湿球位置的校准结果; 将湿球温度传感器复位, 再将热球式风速仪感应探头替换干球温度传感器, 重复上述操作, 得出干球位置的校准结果。

5.2 校准数学模型

由其校准方案可知, 基测箱检测室通风速度的标准值可由式 (8) 得到:

$$W = W_1 + W_2 \tag{8}$$

式中, W 为基测箱检测室通风速度的标准值, 单位为 m/s ; W_1 为热球式风速仪风速示值, 单位为 m/s ; W_2 为热球式风速仪修正值, 单位为 m/s 。

对式 (8) 求偏导可得热球式风速仪风速示值的灵敏系数为 1, 热球式风速仪修正值的灵敏系数为 -1。

5.3 误差来源及其标准不确定度

综合分析基测箱检测室通风速度校准结果的不确定度来源主要有热球式风速仪测基测箱检测室通风速度的示值重复性和热球式风速仪的修正值。

5.3.1 由热球式风速仪的示值重复性引入的标准不确定度

根据其校准方案的要求进行校准实验, 利用式 (8) 计算基测箱检测室通风速度的标准值, 当校准结果取 10 次重复测量的算术平均值时, 利用式 (1) 计算重复性导致的标准不确定度 $u(W_1)$ 。热球风速仪示值重复性校准实验数据如表 7 所示。

表 7 热球风速仪示值重复性校准实验数据

试验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值	$u(W_1)$
湿球标准值	2.86	2.85	2.86	2.87	2.83	2.81	2.84	2.86	2.87	2.89	2.85	0.002 3
干球标准值	2.66	2.67	2.68	2.67	2.65	2.63	2.61	2.62	2.60	2.64	2.64	0.002 8

5.3.2 由热球式风速仪修正值引入的标准不确定度

由于热球式风速仪为 A 级标准, 根据 JJG(建设)0001-1992 热球式风速仪的相关要求可知, A 级标准的准确度优于 5% 满量程, 取最大风速 5 m/s, 即其最大允许误差为 ±0.25 m/s, 即区间半宽为 0.25 m/s, 按正态分布, 则由其引入的标准不确定度 $u(W_2)$ 可由公式(2) 计算得到, 即 $u(W_2)$ 为 0.083 3 m/s。

5.4 合成标准不确定度

5.4.1 标准不确定度分量汇总

基测箱干湿球检测室通风速度校准时其不确定度来源数据汇总如表 8 所示。

表 8 不确定度来源数据汇总表

标准不确定度来源		评定方法	包含因子	符号	标准不确定度数值/(m/s)
湿球检测室	热球式风速仪示值重复性	A 类	1	$u(W_1)$	0.002 3
	热球式风速仪修正值	B 类	3	$u(W_2)$	0.083 3
干球检测室	热球式风速仪示值重复性	B 类	1	$u(W_1)$	0.002 8
	热球式风速仪修正值	B 类	3	$u(W_2)$	0.083 3

5.4.2 合成标准不确定度计算

以上各项标准不确定度分量是互不相关的, 各分量灵敏系数的绝对值均为 1, 由式(3) 计算得到基测箱干湿球检测室通风速度校准结果的合成标准不确定度 u_c 均为 0.08 m/s。

5.5 扩展标准不确定度

取覆盖因子 $k=2$, 由公式(4) 计算得到基测箱干湿球检测室通风速度校准结果的扩展不确定度均 U 为 0.16 m/s。

5.6 测量不确定度报告与表示

在湿球检测室, 其校准结果可表示为: $m_w=2.85$ m/s, $U=0.16$ m/s, $k=2$ 。

在干球检测室, 其校准结果可表示为: $m_w=2.64$ m/s, $U=0.16$ m/s, $k=2$ 。

电子探空仪基测箱干湿球检测室通风速度的校准结果均满足于检测室通风速度测量范围 (2.5~4.0) m/s 的要求。

6 输出电压校准结果的不确定度评定

6.1 校准方案

以 JKZ1-1 型基测箱输出电压 (其分辨力为 0.1 V, 最大允许误差为 ±0.5 V) 为研究对象, 按照校准方法的相关要求, 在规定的条件下, 对其进行校准实验。校准实验所选用的标准器是数字多用表。校准时, 将基测箱供电

输出线正压、负压接线端分别与数字多用表电压通道正压、负压接线端连接, 打开基测箱设置电源界面, 设定输出电压值 (正压和负压), 打开输出电源开关, 分别读取数字多用表电压示值和基测箱输出电压示值, 每 10 s 读取 1 次, 共读取 10 次, 将基测箱输出电压示值减去数字多用表电压示值得到设定校准点基测箱输出电压的示值误差, 并将其作为设定校准点基测箱输出电压的校准结果。

6.2 校准数学模型

由其校准方案可知, 被校对象输出电压的示值误差可由式(9) 得到:

$$\Delta V = V_1 - V_2 \tag{9}$$

式中, ΔV 为被校对象输出电压的示值误差, 单位为 V; V_1 为被校对象输出电压示值, 单位为 V; V_2 为数字多用表电压示值, 单位为 V。

对式(9) 求偏导可得到被校对象输出电压示值的灵敏系数为 1, 数字多用表电压示值的灵敏系数为 -1。

6.3 误差来源及其标准不确定度

6.3.1 被校对象的示值重复性引入的标准不确定度

根据其校准方案的要求, 选择具代表性的 ±12 V 点进行校准实验, 利用式(9) 计算得到被校对象输出电压的示值误差 ΔV , 当校准结果取 10 次重复测量得到的被校对象输出电压示值误差的算术平均值时, 利用式(1) 计算得到被校对象输出电压示值误差重复性导致的标准不确定度 $u(V_1)$ 。被校对象输出电压示值重复性校准实验数据如表 9 所示。

6.3.2 由被校对象的分辨力引入的标准不确定度

基测箱输出电压的分辨力为 0.1 V, 即区间半宽为 0.05 V, 按均匀分布, 则由其引入的标准不确定度 $u(V_2)$ 可由式(2) 计算得到。

6.3.3 由数字多用表引入的标准不确定度

数字多用表的不确定度主要由其准确度、分辨力、噪声误差等所引起的, 而分辨力、噪声误差、上级标准传递的影响等忽略不计, 由上级机构的校准结果得出, 其准确度引起的相对扩展不确定度为 $(0.8-2.0) \times 10^{-6}$, $k=2$, 取最大值 2.0×10^{-6} , 即在校准点 ±12 V 时, 区间半宽为 2.4×10^{-5} V, 则由其引入的标准不确定度 $u(V_3)$ 可由式(2) 计算得到。

6.4 合成标准不确定度

6.4.1 标准不确定度分量汇总

电子探空仪基测箱输出电压在校准时其不确定度来源主要由电子探空仪基测箱和标准装置两大类引入的, 这两大类引入的标准不确定度数据汇总如表 10 所示。

表 9 被校对象输出电压示值重复性校准实验数据

实验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值	$u(V_1)$
被校对象输出电压示值 ΔV	12.0	12.1	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.01	—
标准输出电压值 V_1	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	—
被校对象输出电压示值误差 V_2	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.010

表 10 不确定度来源数据汇总表

标准不确定度来源		评定方法	包含因子	符号	标准不确定度数值/V
被校对对象引入	被校对对象的示值重复性	A 类	1	$u(V_1)$	0.010
	被校对对象的分辨力	B 类	$\sqrt{3}$	$u(V_2)$	0.029
标准装置引入	数字多用表	B 类	2	$u(V_3)$	1.2×10^{-5}

6.4.2 合成标准不确定度计算

依据 1.2.2 节中合成标准不确定度计算方法, 可得到基测箱输出电压校准结果的合成标准不确定度 u_c , 即在 ± 12 V 点的 u_c 为 0.029 V。

6.5 扩展标准不确定度

取覆盖因子 $k=2$, 基测箱输出电压校准结果的扩展不确定度 U 可由式 (4) 计算得到, 即 U 为 0.06 V。

6.6 测量不确定度报告与表示

在 ± 12 V 校准点, 其校准结果可表示为: $m_v=0.01$ V, $U=0.06$ V, $k=2$ 。

根据 JJF1094-2002^[19] 的相关规定, 基测箱输出电压在 ± 12 V 点, 当 $k=2$ 时, 基测箱输出电压校准结果的扩展不确定度小于其最大允许误差绝对值的三分之一, 则不确定度对符合性评定的影响可忽略不计。此时, 在 ± 12 V 点, 基测箱输出电压校准结果的绝对值小于其最大允许误差的绝对值, 则基测箱输出电压的校准结果符合要求。其余测量点的不确定度评定参考此方法进行。

7 电池电压校准结果的不确定度评定

7.1 校准方案

以 JKZ1-1 型基测箱电池电压 (其分辨力为 0.1 V, 最大允许误差为 ± 0.5 V) 为研究对象, 按照校准方法的相关要求, 在规定的条件下, 对其进行校准实验。校准实验所选用的标准器为数字多用表。校准时, 将直流稳压电源正负极分别与数字多用表和基测箱电池电压测量专用线的正负极连接, 设定校准点, 调节直流稳压电源向数字多用表和基测箱输入标准电压值, 待稳定后分别读取并记录数字多用表电压示值和基测箱电池电压示值, 每 10 s 读取 1 次, 共读取 10 次, 将基测箱电池电压示值减去数字多用表电压示值得到设定校准点基测箱电池电压的示值误差, 并将其作为设定校准点基测箱电池电压的校准结果。

7.2 校准数学模型

由其校准方案可知, 被校对对象电池电压的示值误差可由式 (10) 得到:

$$\Delta D = D_1 - D_2 \quad (10)$$

式中, ΔD 为被校对对象电池电压的示值误差, 单位为 V;

D_1 为被校对对象电池电压示值, 单位为 V; D_2 为数字多用表电压示值, 单位为 V。

对式 (10) 求偏导可得被校对对象电池电压示值的灵敏系数为 1, 数字多用表电压示值的灵敏系数为 -1。

7.3 误差来源及其标准不确定度

7.3.1 由被校对对象的示值重复性引入的标准不确定度

根据其校准方案的要求, 选择具代表性的 5 V 和 40 V 校准点进行校准实验, 利用式 (10) 计算得到被校对对象电池电压的示值误差 ΔD , 当校准结果取 10 次重复测量得到的被校对对象电池电压示值误差的算术平均值时, 利用式 (1) 计算得到被校对对象电池电压示值误差重复性导致的标准不确定度 $u(D_1)$ 。被校对对象电池电压示值重复性校准实验数据如表 11 所示。

7.3.2 由被校对对象的分辨力引入的标准不确定度

基测箱电池电压的分辨力为 0.1 V, 即区间半宽为 0.05 V, 按均匀分布, 则由其引入的标准不确定度 $u(D_2)$ 可由式 (3) 计算得到。

7.3.3 由数字多用表引入的标准不确定度

数字多用表的不确定度主要由其准确度、分辨力、噪声误差等所引起的, 而分辨力、噪声误差、上级标准传递的影响等忽略不计, 由上级机构的校准结果得出, 准确度引起的相对扩展不确定度为 $(0.8-2.0) \times 10^{-6}$, $k=2$, 取最大值 2.0×10^{-6} , 即在 5 V 点的区间半宽为 1.0×10^{-5} V, 在 40 V 的区间半宽为 8.0×10^{-5} V, 则其引入的标准不确定度 $u(D_3)$ 可由式 (3) 计算得到。

7.4 合成标准不确定度

7.4.1 标准不确定度分量汇总

基测箱电池电压在校准时其不确定度来源主要由电子探空仪基测箱和标准装置两大类引入的, 这两大类引入的标准不确定度数据汇总如表 12 所示。

7.4.2 合成标准不确定度计算

依据 1.2.2 节中合成标准不确定度计算方法, 可得到基测箱电池电压校准结果的合成标准不确定度 u_c , 即在 ± 12 V 点的 u_c 为 0.029 V。

7.5 扩展标准不确定度

取覆盖因子 $k=2$, 基测箱电池电压校准结果的扩展不确定度 U 可由式 (4) 计算得到, 即在 ± 12 V 点的 U 为 0.06 V。

7.6 测量不确定度报告与表示

在 5 V 校准点, 其校准结果可表示为: $m_d=0.01$ V, $U=0.06$ V, $k=2$ 。

在 40 V 校准点, 其校准结果可表示为: $m_d=0.01$ V, $U=0.06$ V, $k=2$ 。

表 11 被校对对象电池电压示值重复性校准实验数据

校准点	被校对对象电池电压的示值误差 ΔD										$\overline{\Delta D}$	$u(D_1)$
	0.00	0.00	0.00	-0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
5	0.00	0.00	0.00	-0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.010
40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.010

表 12 不确定度来源数据汇总表

标准不确定度来源	评定方法	包含因子	符号	校准点 /V	标准不确定度数值/V
被校对象的示值重复性	A 类	1	$u(D_1)$	5	0.010
				40	0.010
被校对象的分辨力	B 类	$\sqrt{3}$	$u(D_2)$	5	0.029
				40	0.029
数字多用表	B 类	2	$u(D_3)$	5	0.5×10^{-5}
				40	4×10^{-5}

根据 JJF1094-2002^[19] 的规定, 基测箱输出电压在 5 V、40 V 点, 当 $k=2$ 时, 基测箱电池电压校准结果的扩展不确定度小于其最大允许误差绝对值的三分之一, 则不确定度对符合性评定的影响可忽略不计。此时, 在 5 V、40 V 点, 基测箱电池电压校准结果的绝对值均小于其最大允许误差的绝对值, 则基测箱电池电压的校准结果符合要求。其余测量点的不确定度评定可参考此方法进行。

8 结束语

文章综合研究了电子探空仪基测箱各项校准项目的校准过程及所使用的主要测量设备, 分析了影响校准结果的不确定因素, 并依据相关规程规范对 JKZ1-1 型电子探空仪基测箱的各项校准项目进行了校准试验, 并对校准结果进行了不确定度的分析与评定, 得出每项校准项目的校准结果均符合要求。上述评定过程及结果适用于基本满足上述条件的情况, 测量条件基本一致时可直接引用上述评定过程和结果。该研究成果可为电子探空仪基测箱的实验室校准提供一定的技术依据, 近而为准确评估天气预报、气候分析、科学研究和军工活动、国际探测数据交换等提供一定的数据支撑。

参考文献:

[1] 马林, 孙宝京, 郭延松. 通用型探空仪基测箱 [J]. 现代电子技术, 2014, 37 (24): 4.

[2] 陈龙福, 郑俊锦, 陈璐艳, 等. JKZ1-1 型电子探空仪基测箱误差值修正分析 [J]. 海峡科学, 2020 (8): 22-24.

[14] 佟星元, 杨银堂, 朱樟明, 等. 逐次逼近 ADC 无源器件的匹配性与高层次模型 [J]. 西安电子科技大学学报 (自然科学版), 2011, 38 (6): 123-129.

[15] 姚立斌, 陈楠, 韩庆林. 小面积、微功耗增量型 Sigma-Delta ADC 设计 [J]. 红外技术, 2015, 37 (12): 1011-1015.

[16] 田海燕, 李斌, 廖春连. 一种适于 Sigma-Delta ADC 的高增益放大器的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (10): 268-272.

[17] 陈永良. 抗干扰 ADC 的设计研究 [J]. 现在导航, 2015, 4 (2): 121-125, 129.

[18] 陈辉, 何怡刚, 黄姣英. 0.25 μ m COMS 工艺 10 位 150 MHz 流水线型 ADC 设计 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版),

[3] 顾紫伊. 基于电子探空仪的 JKZ3 型基测箱设计 [J]. 海峡科学, 2021 (3): 27-31.

[4] 杭天渊, 王晓蕾, 康钊菁, 等. 电子探空仪基测箱现场校准温湿压观测仪的试验研究 [J]. 计量技术, 2017 (1): 44-48.

[5] 中国气象局. 常规高空气象观测业务规范 [M]. 气象出版社, 2010.

[6] 陈亚军, 重阳, 郭海平, 等. 高空气象观测系统技术保障手册 [M]. 北京: 气象出版社, 2022.

[7] 叶飞. L 波段探空雷达探测高度偏低分析 [J]. 内蒙古气象, 2019, (3): 46-48.

[8] 赵卢霞, 王丽, 张小刚, 等. L 波段高空气象探测系统特殊问题处理方法 [J]. 气象与环境科学, 2009, 32 (9): 347-350.

[9] 苟周梅, 许兵甲. JKZ1 型基测箱的使用方法 [J]. 气象水文海洋仪器, 2015 (32): 103-105.

[10] 中国气象局大气探测技术中心. L 波段高空气象探测系统常见技术问题综合解答 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.

[11] 中国计量测试学会. 一级注册计量师基础知识及专业实务 [M]. 5 版. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[12] 中国计量测试学会. 二级注册计量师基础知识及专业实务 [M]. 5 版. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[13] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1059.1-2012 测量不确定度评定与表示 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.

[14] 魏明明. 蒙特卡洛法与 GUM 评定测量不确定度对比分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018 (11): 17-25.

[15] 刘海珍, 东方, 郑树芳, 等. 气象用玻璃液体温度表校准结果的不确定度评定 [J]. 内蒙古气象, 2021 (2): 34-37.

[16] 李常春. 热球式风速仪测量不确定度的分析与评定 [J]. 国外电子测量技术, 2019 (8): 33-38.

[17] 刘海珍, 郑树芳, 有思. 气象计量标准装置测量不确定度过程的研究 [J]. 内蒙古科技与经济, 2022 (3): 106-107.

[18] 国家质量监督检验检疫总局. JJG160-2007 标准铂电阻温度计检定规程 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2007.

[19] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1094-2002 测量仪器特性评定 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2003.

[20] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1059.1-2016 测量不确定度评定与表示 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2016.

(上接第 275 页)

2010, 37 (8): 45-48.

[19] 巫华菊, 周小方. 基于 ADXRS6XX 陀螺仪高速数据采集系统的研究与设计 [J]. 漳州师范学院学报 (自然科学版), 2013 (4): 35-39.

[20] 周璐, 王浩. 适用于捷联惯导温度补偿的高精度测温系统 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (8): 114-117, 177.

[21] 吴斌, 陶卫, 赵阳, 等. 基于 TVS 的电子设备 ESD 保护方法研究 [J]. 南京师范大学学报 (工程技术版), 2017, 17 (2): 19-23, 29.

[22] 张素萍, 李红刚, 张慧琴, 等. 单精度浮点运算单元的 FPGA 设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (5): 1178-1180, 1183.