

# 测量审核中湿度传感器测量结果的不确定度评定与分析

陈乾<sup>1,2</sup>, 宋晓雯<sup>3</sup>, 郭少杰<sup>1</sup>, 樊锦涛<sup>1,2\*</sup>, 孟超<sup>1</sup>, 邓丽媛<sup>1</sup>

(1. 陕西省大气探测技术保障中心, 西安 710014; 2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室, 西安 710016; 3. 陕西省气象科学研究所, 西安 710016)

**摘要:** **目的** 本研究旨在介绍湿度传感器测量审核的作业流程, 并详细阐述不确定度的评定过程和测量审核的结果判定, 以为未来申请湿度专业校准实验室的机构和人员提供有益的参考与借鉴。**方法** 申请实验室在湿度传感器检定环境下, 对湿度传感器样机设立 30%RH (relative humidity, 相对湿度)、40%RH、55%RH、75%RH、90%RH 五个湿度测量点进行校准试验, 每个湿度点分别做 10 次重复性测量, 并进行测量结果的不确定度评定, 审核实验室对申请实验室提供的所有材料进行审核后, 完成最终的测量审核, 进行  $E_n$  判定, 并给出测量审核结果。**结果** 湿度传感器在 30%RH、40%RH、55%RH、75%RH、90%RH 五个湿度测量点的  $|E_n|$  值分别为 0.04、0.17、0.13、0.13 和 0.65, 均满足  $|E_n| \leq 1$ 。**结论** 所有湿度测量点均满足  $|E_n| \leq 1$  的条件, 申请实验室的测量结果与参考值之差与不确定度之比在合理的预期范围之内, 因此测量审核结果满足湿度实验室能力验证要求。

**关键词:** 测量审核; CNAS; 不确定度评定; 湿度传感器; 实验室能力验证

## 0 引言

气象计量工作是气象服务的基础性业务, 决定了气象监测数据的准确性和可靠性, 其可靠的量值传递是气象探测和科学研究的前提和基本保障<sup>[1-2]</sup>。中国气象计量业务开始于 20 世纪 50 年代, 为保证气象监测数据的准确性和可靠性作出了巨大贡献<sup>[3-4]</sup>。标准化、规范化的气象计量实验室是气象计量检测的主要载体, 按照中国合格评定国家认可委员会(CNAS)认可准则建设的实验室和质量管理体系, 可有效提升实验室管理水平和技术能力, 获得 CNAS 认可, 相当于得到国家权威机构正式承认<sup>[5-6]</sup>。测量审核在实验室认可体系中是一种关键的能力验证活动形式, 对于确保实验室测量结果的准确性与可靠性具有重要作用<sup>[7]</sup>。在 CNAS 的框架下, 气象计量实验室在申请校准检测项目认可之前, 需对相关领域项目开展测量审核。

目前国内气象部门计量实验室申请 CNAS 认可还很少, 陕西省大气探测技术保障中心作为能力验证的申请实验室, 按照审核实验室中国计量科学研究院要求, 自行准

备并提供湿度传感器样机一件, 并参照 JJG(气象)003—2011《自动气象站湿度传感器检定规程》进行校准实验<sup>[8]</sup>。本研究旨在介绍湿度传感器测量审核的作业流程, 并详细阐述不确定度的评定过程和测量审核的结果判定, 以为未来申请湿度专业校准实验室的机构和人员提供有益的参考与借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与设备

本次测量审核试验选择的标准器和湿度传感器样机的主要参数见表 1。

### 1.2 环境条件

校准试验过程主要配套设备为温湿度检定箱和湿度发生器, 校准试验过程环境条件主要参数如表 2, 整个校准试验过程符合检定规程要求。

### 1.3 测量审核方法

#### 1.3.1 测量审核的申请

在认可范围的湿度专业校准子领域中(干湿球湿度

第一作者: 陈乾, 硕士, 助理工程师, 研究方向为气象探测和气象计量研究。

\* 通信作者: 樊锦涛, 工程师, 所长, 研究方向为气象探测和计量研究。E-mail: 331715202@qq.com

计、毛发湿度计、湿度传感器等)至少选择一项测量仪器参加测量审核<sup>[9]</sup>。本气象计量实验室选用气象行业领域常用仪器湿度传感器送至审核实验室参加测量审核,并向其提交测量审核申请表,内容一般包括申请单位信息、测量审核项目名称、标准器信息、提供样机信息及所依据的技术文件等<sup>[10]</sup>。

### 1.3.2 开展校准试验

开展校准试验前,需确认校准实验室湿度校准设备是否正常工作,湿度标准器检定证书是必须在有效期之内。依据检定规程要求,环境条件需符合环境温度为(23±5)℃,相对湿度小于85%RH。精密露点仪、标准湿度发生器、温度计的测量范围需符合《自动气象站湿度传感器检定规程》要求。

根据审核实验室要求,在湿度传感器检定环境下,按

照《自动气象站湿度传感器检定规程》,对湿度传感器样机设立30%RH、40%RH、55%RH、75%RH、90%RH五个湿度测量点进行校准试验,每个湿度点分别做10次重复性测量,并进行测量结果的不确定度评定<sup>[11-12]</sup>。

### 1.3.3 测量审核的提交

申请实验室测量试验结束后,第一时间与审核实验室联系,按照审核实验室要求,提供测量审核申请表、校准报告、不确定度评定过程报告和校准记录电子版等材料,以扫描电子版形式邮件传递至审核实验室实验人员。审核实验室对申请实验室提供的电子材料进行审核后,若符合规定方法和审核实验室要求,审核实验室将通知申请实验室进行送检,将样机、审核申请表、校准报告、不确定度评定过程材料和校准记录纸质版一并送检至审核实验室完成测量审核,审核实验室最终给出测量审核结果。

表1 标准器和样机主要参数

分类	名称	生产单位	型号	编号	测量范围	最大允差/准确度等级
标准器	精密露点仪	SHINYEY	S-2S-0K	21G09	露点温度(-20~+40)℃	露点温度 MPE: 0.2℃
样机	湿度传感器	华云升达(北京)气象科技有限责任公司	HMP55A	V4320943	(0~100)%RH	±4%RH(≤ 80%RH) ±8%RH(> 80%RH)

表2 校准试验过程环境条件

环境条件	校准开始时	校准结束时	平均值
温度/℃	26.6	26.2	26.4
相对湿度/%RH	57.5	51.5	54.5
气压/hPa	954.4	950.8	952.6

## 2 结果与分析

### 2.1 示值误差的测量

按照《自动气象站湿度传感器检定规程》,进行湿度传感器示值误差的测量,湿度测量点的选择依次为30%RH、40%RH、55%RH、75%RH、90%RH。各湿度点每次测量时,进行5次读数,正反程共10次读数,各测量点标准值和输出值见表3。

根据测量模型计算出被检湿度传感器在各校准点上的示值误差,示值误差测量结果见表4。

示值误差的计算模型为:

$$\Delta H = H - H_w \quad (1)$$

式中,ΔH为被校湿度传感器示值误差;H为被校湿度传感器的湿度示值;H<sub>w</sub>为标准器精密露点仪的湿度示值。

### 2.2 湿度传感器示值误差测量结果的不确定度分析

#### 2.2.1 标准不确定度的来源

①被测湿度传感器测量重复性引入的不确定度分量u<sub>A</sub>; ②标准器引入的不确定度分量u<sub>1</sub>; ③湿度场分布不均

匀引入的不确定度分量u<sub>2</sub>; ④3MS系统采集误差引入的不确定度分量u<sub>3</sub>; ⑤数据修约引入的不确定度分量u<sub>4</sub>。

#### 2.2.2 标准不确定度的评定

(1)湿度传感器测量重复性引入的不确定度分量u<sub>1</sub>

根据贝塞尔公式,得到单次测量试验标准偏差S:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H - H_w)^2} \quad (2)$$

n为各测量点上测量次数(i=1, 2, 3...n),实际测量中,以10次测量的平均值作为测量结果:u<sub>H</sub> = s/√n,计算结果如表5所示。

(2)标准器引入的不确定度分量u<sub>1</sub>

由精密露点仪的技术资料可知,在试验过程中,相对湿度被控制在10%~100%的区间内,最大允许误差为1%RH,最大允许误差导致的不确定度按均匀分布考虑,则区间半宽度a=1%RH,查表确定均匀分布包含因子k=√3,因此标准器引入的标准不确定度分量为:

$$u_1 = a / k = 1\%RH / \sqrt{3} = 0.577\%RH$$

(3)湿度场分布不均匀引入的不确定度分量u<sub>2</sub>

由C4-180温湿度检定箱湿度场分布不均匀所引入的不确定度为反正弦分布,基于湿度检定箱不均匀性技术指标不大于1%RH,则区间半宽度a=1%RH,查表确定反正弦分布的包含因子k=√2,因此湿度场分布不均匀带来的不确定度分量可表示为:

$$u_2 = a / k = 1\%RH / \sqrt{2} = 0.714\%RH$$

(4)气象部门 3MS 系统采集误差引入的不确定度分量  $u_3$  依据自动气象站采集器的技术资料, 3MS 湿度系统的采集误差为 1%RH 以内, 由采集器引起的误差在各湿度测量点上服从均匀分布, 则区间半宽度  $a=1\%RH$ , 查表确

定均匀分布的包含因子  $k=\sqrt{3}$ , 由此引起的标准不确定度分量为:

$$u_3 = a / k = 1\%RH / \sqrt{3} = 0.577\%RH$$

表 3 校准点读数标准值和输出值

校准点 /%RH	测量值	正程 /%RH					反程 /%RH				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
30	标准值	31.1	31.0	31.2	31.1	31.2	32.0	32.1	31.9	32.0	32.0
	测得值	30.2	30.1	30.0	30.1	30.1	31.2	31.1	31.0	31.1	31.2
40	标准值	40.4	40.3	40.4	40.5	40.4	40.7	40.6	40.6	40.4	40.2
	测得值	39.4	39.5	39.6	39.5	39.5	39.5	39.4	39.3	39.5	39.4
55	标准值	55.1	55.0	55.2	55.2	55.3	56.0	56.1	56.2	56.2	56.2
	测得值	54.2	54.1	54.1	54.3	54.2	55.3	55.2	55.3	55.2	55.1
75	标准值	74.1	74.2	74.3	74.3	74.3	74.2	74.3	74.2	74.2	74.1
	测得值	73.8	73.7	73.6	73.7	73.6	73.7	73.8	73.8	73.7	73.8
90	标准值	88.5	88.6	88.5	88.6	88.5	88.8	88.9	89.0	89.1	89.0
	测得值	88.2	88.3	88.4	88.3	88.3	88.5	88.4	88.6	88.7	88.6

表 4 示值误差测量结果

湿度点 /%RH	示值误差 /%RH										均值
	正程					返程					
30	-0.9	-0.9	-1.2	-1.0	-1.1	-0.8	-1.0	-0.9	-0.9	-0.8	-1.0
40	-1.0	-0.8	-0.8	-1.0	-0.9	-1.2	-1.2	-1.3	-0.9	-0.8	-1.0
55	-0.9	-0.9	-1.2	-0.9	-1.1	-0.7	-0.9	-0.9	-1.1	-1.0	-1.0
75	-0.3	-0.5	-0.7	-0.4	-0.7	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.3	-0.5
90	-0.3	-0.3	-0.1	-0.3	-0.2	-0.3	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4

表 5 标准偏差及测量重复性引入的标准不确定度计算结果

设定湿度 /%RH	标准偏差 $s/\%RH$	示值重复性引入的标准不确定度 $u_A/\%RH$
30	0.127	0.040
40	0.185	0.059
55	0.127	0.040
75	0.140	0.044
90	0.113	0.036

(5)数据修约引入的不确定度分量  $u_4$

校准试验中, 标准湿度值经计算机自动化采集并精确至小数点后一位, 数据修约误差上限为 0.05%RH, 且该误差在全量程内对各湿度测量点的影响服从均匀分布, 取区间半宽  $a=0.05\%RH$ , 查表确定均匀分布的包含因子  $k=\sqrt{3}$ , 由数据修约误差引起的标准不确定度为:

$$u_4 = 0.05\%RH / \sqrt{3} = 0.029\%RH$$

2.2.3 标准不确定度分量汇总

标准不确定度分量汇总表 6。

合成标准不确定度的计算公式如下所示, 计算结果见表 8。

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \quad (3)$$

取包含因子  $k=2$ , 扩展不确定度计算公式如式(4)所

示, 计算结果见表 8。

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

表 6 标准不确定度分量汇总

标准不确定度分量	标准不确定度		
	来源	分布	数值 /%RH
$u_A$	测量重复性	正态	各湿度点不一致
$u_1$	标准器自身	均匀	0.577
$u_2$	温湿度检定箱	反正弦	0.714
$u_3$	数据采集	均匀	0.577
$u_4$	数据修约	均匀	0.029

2.2.4 合成标准不确定度  $u_c$  和扩展不确定度  $U$  的评定

由于各分量之间相互不相关, 各标准不确定度分量值如表 7。

表 7 标准不确定度分量

湿度点 /%RH	标准不确定度分量 /%RH				
	$u_A$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$
30	0.040	0.577	0.714	0.577	0.029
40	0.059	0.577	0.714	0.577	0.029
55	0.040	0.577	0.714	0.577	0.029
75	0.044	0.577	0.714	0.577	0.029
90	0.036	0.577	0.714	0.577	0.029

表 8 湿度传感器的合成标准不确定度和扩展不确定度

湿度点 /%RH	合成标准不确定度 $u_c$ /%RH	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ ) /%RH
30	1.086	2.17
40	1.087	2.17
55	1.086	2.17
75	1.086	2.17
90	1.086	2.17

### 2.3 测量审核的结果判定

收到审核实验室中国计量科学研究院《测量审核报

告》, 报告显示测量审核方与本实验室的测量平均值及测量不确定度如表 9, 测量审核满意度判断公式为:

$$E_n = \frac{y - y_0}{\sqrt{U^2 + U_0^2}} \quad (5)$$

当  $|E_n| \leq 1$  为满意。

式中,  $y$  为申请实验室给出的测量值;  $y_0$  为审核实验室给出的参考值;  $U$  为申请实验室评定的与  $y$  值所对应的测量不确定度 ( $k=2$ );  $U_0$  为审核实验室评定的与  $y_0$  所对应的测量不确定度 ( $k=2$ )。

表 9 测量审核满意度评定

测量点 /%RH	审核实验室测量值 /%RH		申请实验室测量值 /%RH		测量 RH 审核满意度 /%
	参考值 $y_0$	参考值 $y_0$ 的不确定度 $U_0$	测量值 $y$	测量值 $y$ 的不确定度 $U$	
30.0	28.9	0.8	29.0	2.17	0.04
40.0	38.6	0.8	39.0	2.17	0.17
55.0	53.7	0.8	54.0	2.17	0.13
75.0	73.2	0.8	73.5	2.17	0.13
90.0	88.1	0.8	89.6	2.17	0.65

## 3 讨论与结论

依据表 9 审核实验室《测量审核报告》的  $E_n$  值判定结果可知, 所有湿度测量点均满足  $|E_n| \leq 1$  的条件, 申请实验室的测量结果与参考值之差与不确定度之比在合理的预期范围之内, 因此测量审核结果满足湿度实验室能力验证要求。

在气象、民航、生态环境等诸多观测领域, 湿度传感器是测量大气湿度的重要气象观测仪器。湿度传感器测量审核是实验室能力验证的有效补充手段, 也是 CNAS 评估实验室湿度传感器校准能力的重要依据。本实验室通过参与本次测量审核活动, 达到了预期目的, 推动了实验室的能力建设, 同时强化了实验室质量管理体系。未来, 本实验室将进一步强化质量管理体系建设和内部管理, 积极建立能力验证工程常态化运行机制。

### 参考文献

- [1] 陈平. 基于数字化网络的气象计量管理系统设计[J]. 气象水文海洋仪器, 2017, 34(4): 72-74+78.
- [2] 徐高静, 王强, 吕林静, 等. 贵州省土壤水分传感器校准方法浅析[J]. 中低纬山地气象, 2022, 46(4): 113-116.

- [3] 贺晓雷, 林冰. 中国气象计量业务的现状与发展[J]. 中国计量, 2017, (2): 38-39.
- [4] 李戟, 夏德奇, 李洪, 等. 气象移动计量校准存在的问题及改进措施探讨[J]. 科技与创新, 2023, (9): 126-128+131.
- [5] 孙贝贝, 李微微, 石瑞岭, 等. 汽车研发实验室 CNAS 认可项目管理方法研究与应用[J]. 中国检验检测, 2019, 27(3): 40-45+59.
- [6] 张艳艳, 韩涛, 丁轲, 等. 实验室认可理念与框架下的实验室建设与管理[J]. 中国现代教育装备, 2015, (5): 31-33.
- [7] 刘颖, 薛靓. 测量审核的实施方法及满意度评定[J]. 中国测试, 2012, 38(S1): 107-110.
- [8] 国家气象计量站. 自动气象站湿度传感器检定规程: JJG(气象)003—2011[S]. 北京: 中国气象局, 2011.
- [9] 尚霜霜. 数字压力计校准在测量审核中的应用[J]. 品牌与标准化, 2023, (2): 57-59.
- [10] 彭冲. F<sub>1</sub> 等级 20 kg 砝码测量审核实践[J]. 铁道技术监督, 2024, 52(1): 22-25.
- [11] 测量不确定度评定与表示. JJF 1059. 1—2012[S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.
- [12] 金锐, 吴云峰, 李丹. CAWS600 型自动气象站湿度传感器检定的不确定度分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2012, 29(2): 40-42+45.