

刘希林,梁振清,晏敏,等. EL15-1CH 型加热风速传感器校准结果不确定度评定分析[J]. 气象研究与应用,2022,43(2):74-79.
Liu Xilin,Liang Zhenqing,Yan Min,et al. Uncertainty analysis of calibration results of EL15-1CH heating wind speed sensor[J].
Journal of Meteorological Research and Application,2022,43(2):74-79.

EL15-1CH 型加热风速传感器校准结果不确定度评定分析

刘希林, 梁振清, 晏 敏, 李 强

(广西壮族自治区气象技术装备中心, 南宁 530022)

摘要: 为确保 EL15-1CH 型加热风速传感器所测风速准确可靠,合理表征传感器的量值,需要对校准结果进行不确定度评定。基于 GUM 方法,建立数学评定模型,首先对各类输入量引起的不确定度分量进行评定,再计算合成标准不确定度以及扩展不确定度。结果表明,在数学模型中引入风速传感器重复性、读数分辨力、计量标准数字压力计、计量标准皮托静压管、空气密度变化、风洞流场稳定性与均匀性等 7 种不确定度分量,推算出的合成标准不确定度以及扩展不确定度分析评定,经过传递比较法对测试数据分析验证结果是可信的。

关键词: 风速传感器;GUM;不确定度

中图分类号: P414.7

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.2.13

引言

风的观测资料在气象科学研究、风能利用、水文、农业生产、防灾减灾等方面有着重要的运用,因此需要对风进行准确的测量。普通三杯风向风速表是较为常见的风速测量仪器,但在沙漠、海洋、高山等恶劣气候条件下,不能满足气象、航海、风能、漂流站、核电等科学考察领域对风的全天探测。而 EL15-1CH 型加热风速传感器具有极强的耐风沙、耐海水侵蚀的性能,采用的材料在低温时不脆化、高温时不变形不软化的物理性能,其电子电路设计具有电压极性防反接保护、耐温度变换、抗电磁干扰、抗腐蚀、自动控温除霜(冻)等特殊功能,能实现恶劣气候条件下对风的探测。为了能准确反应风的速度,需要定期对仪器进行检定或校准。对测风仪器的校准可以通过不确定度的大小来决定校准结果的可靠性和可依赖程度^[1]。任何的校准结果都存在着不确定度,需要正确分析评估测量不确定度分量,得出的校准结果才更具有可信度^[2]。有关学者通过对典型的 DHS-500×500/700×700-Ⅱ 风洞进行不确定度评定,得出风洞的不确定度评定的分量有皮托静压管、电子微

压计、温湿度传感器、大气压力、流场的均匀性、稳定性和被检风速仪的读数重复性。丁红英等^[8]对气压传感器示值误差的测量进行了不确定度评定,验证了气压传感器是否合格。李仁杰等^[9]理论推导了 TDLAS 测温系统的不确定度评定公式。杜文辉等^[10]通过对实验室低温及高温工况校准数据不确定度的评定,表明气候环境实验室温度性能校准方法可实现对超大空间实验室温度性能的校准。张正等^[11]为了自动气象站风向传感器能获取准确、可靠的观测数据,针对自动气象站风向传感器测量结果进行了不确定度评定。王宇等^[12]通过能谱分析测量的不确定度研究,得出了影响检测结果不确定度的主要因素。栾松年等^[13]为确认在线温度变送器(配热电阻)的可靠性和准确性,对其进行了在线校准方法研究和不确定性评定。吴志峰等^[14]的分析结果表明,在不考虑光谱光源的关联情况下,其色温的不确定度与波长间隔的平方根接近正比。其他关于仪器测量是否准确的研究,运用了不确定度对检定结果进行了评定^[15]。吴宇等^[16]和胡苍龙等^[17]虽然开展了轻便三杯风向风速表传感器示值误差不确定度研究,但没有对实验结果进行分析和总结,关于 EL15-1CH 型

收稿日期: 2022-04-24

基金项目: 广西气象科研计划项目(桂气科 2022M18)、广西壮族自治区气象技术装备中心自立科研项目(ZBKY202202)

作者简介: 刘希林(1973—),男,广西藤县人,高级工程师,从事气象仪器检定校准工作。E-mail:75691369@qq.com

加热风速传感器校准结果不确定度分析更是鲜有报道。因此,本文通过对 EL15-1CH 型加热风速传感器进行校准实验,运用 GUM 法给出不确定性来源分析,对校准实验结果进行了不确定度分析和评定,以期给相关领域的研究、业务人员进行 EL15-1CH 型加热风速传感器不确定度及其来源评定提供参考。

1 测量依据

EL15-1CH 型加热风速传感器的测量原理与基本结构与常用的风速传感器基本相同,只是添加了自动加热装置,其制作材料存在差异。本文的测量依据《JJG(气象)004-2011 自动气象站风向风速传感器检定规程》,在温度 20~25℃,相对湿度 50%~60% RH 的环境条件下,对 EL15-1CH 型加热风速传感器进行了校准,并对校准结果进行了不确定分析和评定。标准器采用的是皮托静压管和数字压力计,直流风洞为检定设备,使用数据采集器进行读数。

2 测量流程与方法

2.1 测量流程与实验方法

实验采用 GUM 方法^[1,16],测量不确定度流程如图 1 所示,这是用不确定度传播率计算合成标准不确定度而得到的被测量估计值的测量不确定度。具体的测量操作流程如下:先通过调整风速校准点,当风速点调好以后,待稳定 1min 以后,运用风速参数数据采集器可以自动采集微压计的实测风压值(Pa)、流场温度值(℃)、流场湿度值(%RH)和室内大气压力值(hPa),再通过数据采集器对被检风速传

感器的输出值进行读取,利用实测风速计算公式,计算出各风速校准点上的实测风速值。

2.2 评定模型

测量结果示值误差计算模型:

$$\Delta v = v' - v \quad (1)$$

式中: Δv 为被测风速传感器在某一点的示值误差值; v' 为被测风速传感器在该点的示值。

测量结果的数学模型如式(2)所示:

$$\begin{aligned} \Delta v &= v' - v + \Delta I_1 + \Delta I_2 \\ &= v' - \sqrt{\frac{2P_v \xi}{\rho}} + \Delta I_1 + \Delta I_2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ΔI_1 为由流场稳定性引入的测量误差;

ΔI_2 为由流场均匀性引入的测量误差。

按相对标准不确定度进行评估,灵敏系数设为 1,所以各分量的灵敏系数如下:

$$c_v = \frac{\partial \Delta v}{\partial v'} = 1 \quad (3)$$

$$c_{\Delta I_1} = \frac{\partial \Delta v}{\partial \Delta I_1} = 1 \quad (4)$$

$$c_{\Delta I_2} = \frac{\partial \Delta v}{\partial \Delta I_2} = 1 \quad (5)$$

2.3 不确定度分量来源

从上述测量依据、测量方法、测量流程、评定模型等内容可以分析出,不确定度分量主要有以下几个方面组成:风速传感器重复性引入的不确定度分量,该项分量与风洞的流场均匀性和稳定性有直接关系;被校准传感器的读数分辨力引入的相对标准不确定度分量;计量标准数字压力计引入的不确定度分量,风速的测量需要数字压力计计量标准测量的给定值计算得出;计量标准皮托静压管引入的不确定度分量,风速的测量也需要皮托静压管计量标准的给定值计算得出;空气密度变化引起的不确定度分量;风洞流场稳定性引入的不确定度分量;风洞流场均匀性引入的不确定度分量;其他因素的影响暂时忽略。

3 各类输入量引起的不确定度分量的评定

3.1 风速传感器重复性引入的不确定度分量

在风速传感器的校准中,被测风速传感器的重复性是以被测表示值误差的重复性进行评定的^[18-20]。编号为 21080712033 的风速传感器,采用 A 类评定方法,根据被校准风速传感器在 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速校准

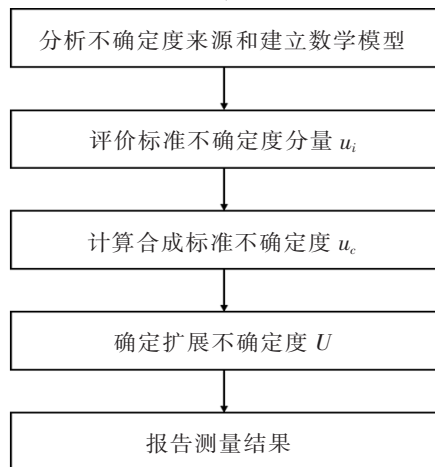


图 1 GUM 法测量不确定度流程^[1,16]

点进行 4 次重复测量数据, 可以计算出各点不确定度分量如表 1:

表 1 重复性不确定度分量

校准点 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	对应标准差	$u(v)$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
2	0.007	0.004
5	0.007	0.004
10	0.016	0.0092
15	0.016	0.0092
20	0.019	0.0109
25	0.019	0.0109
30	0.021	0.0121

3.2 被检传感器的读数分辨力引入的相对标准不确定度分量

用 B 类方法评定, 被校准风速传感器在 $0 \sim 30 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, 分辨力为 $0.1 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 则不确定度区间半宽应为 $0.05 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 按均匀分布处理, 故读数分辨力引入的相对标准不确定度为:

$$u(v) = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03 \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6)$$

由于被校准风速传感器读数分辨力引入的相对标准不确定度分量要比重复性引入的相对标准不确定度分量大, 因此选用读数分辨力引入的相对标准不确定度分量来进行计算合成不确定度。

3.3 数字压力计相对标准不确定度 $u_r(P_v)$

由于计量校准数字压力计的准确度为 0.01 级且量程为 2500Pa, 因此数字压力计的最大允许误差为 0.5Pa, 按均匀分布, 故由数字压力计引入的相对不确定度分量为:

$$u_r(P_v) = \frac{\delta}{P_v} = \frac{0.5/\sqrt{3}}{P_v} \times 100\% = \frac{29}{P_v}\% \quad (7)$$

依据上述方法可算出不同校准点由数字压力计引入的标准不确定度分量如表 2 所示。

表 2 数字压力计引入的标准不确定度分量

校准点 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	对应差压 (Pa)	$u_r(P_v)$ (%)
2	2.34	12.4
5	13.60	2.13
10	54.30	0.53
15	122.00	0.23
20	213.28	0.14
25	335.20	0.09
30	478.50	0.061

3.4 标准皮托静压管相对标准不确定度 $u_r(\xi)$

因为二等标准皮托静压管校准系数的校准结果扩展不确定度为 0.5%, 包含因子=2, 置信概率取 95%, 则其相对标准不确定度为:

$$u_r(\xi) = \frac{\delta}{k} = \frac{0.5\%}{2} = 0.25\% \quad (8)$$

3.5 空气密度变化引入的相对标准不确定度 $u_r(\rho)$

空气密度 ρ 测量结果的标准不确定度, ρ 测量结果的标准不确定度可按下式计算:

$$u(\rho) = \sqrt{u_H^2(\rho) + u_r^2(\rho) + u_p^2(\rho)} \quad (9)$$

计算结果为 $0.0017 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 在标准状态下, 空气密度为 $1.2 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 故由 ρ 引入的相对标准不确定度分量为:

$$u_r(\rho) = \frac{0.0017}{1.2} = 0.15\% \quad (10)$$

3.6 风洞试验段流场稳定性的标准不确定度 $u_r(\Delta I_1)$

所采用的风洞的流场稳定性为 1%, 由于均匀分布, 则风洞流场稳定性引入的标准不确定度估算为:

$$u_r(\Delta I_1) = \frac{1\%}{2} \times 100\% = 0.50\% \quad (11)$$

$$u(\Delta I_1) = u_r(\Delta I_1) \times v \quad (12)$$

依据上式可算出不同校准点由流场稳定性引入的标准不确定度分量如表 3 所示。

表 3 流场稳定性引入的标准不确定度

校准点 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$u(\Delta I_1)$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
2	0.010
5	0.025
10	0.050
15	0.067
20	0.100
25	0.126
30	0.150

3.7 风洞试验段流场均匀性的标准不确定度 $u_r(\Delta I_2)$

所采用的风洞流场均匀性为 1%, 但本次校准要求将标准皮托静压管及被测表安装在中心区域固定位置, 取该区域均匀性指标为整个试验均匀区均匀性的 $\frac{1}{2}$, $k=2$, 则流场均匀性引入的标准不确定度分量估算为:

$$u_r(\Delta I_2) = \frac{\delta}{k} = \frac{0.5\%}{2} \times 100\% = 0.25\% \quad (13)$$

$$u(\Delta I_2) = u_r(\Delta I_2) \times v \quad (14)$$

依据上式可算出不同校准点由流场均匀性引入的标准不确定度分量如表 4 所示。

表 4 流场均匀性引入的标准不确定度

校准点 (m · s ⁻¹)	$u(\Delta E)$ (m · s ⁻¹)
2	0.005
5	0.013
10	0.025
15	0.032
20	0.050
25	0.059
30	0.075

3.8 合成标准不确定度的评定

合成标准不确定度计算，将 3 个相对标准不确定度值 $u_r(P_v)$ 、 $u_r(\xi)$ 、 $u_r(\rho)$ 代入下式，可以求出不确定度 $u_r(v)$ ，即可进一步求得 $u(v)$

$$u_r(v)=\sqrt{\left(\frac{1}{2}u_r(P_v)\right)^2+\left(\frac{1}{2}u_r(\xi)\right)^2+\left(-\frac{1}{2}u_r(\rho)\right)^2} \quad (15)$$

$$u(v)=v\times u_r(v) \quad (16)$$

依据上式可算出不同校准点的标准不确定度分量 $u(v)$ 如表 5 所示。

表 5 标准不确定度分量 $u(v)$

校准点 (m · s ⁻¹)	$u(v)$ (m · s ⁻¹)
2	0.106
5	0.048
10	0.028
15	0.029
20	0.032
25	0.039
30	0.045

将各标准不确定度值代入下式，得出合成标准不确定度。

$$u^2(\Delta v)=[c_{v'}\times u(v')]^2+[u(v)]^2+[c_{\Delta I_1}\times u(\Delta I_1)]^2+[c_{\Delta I_2}\times u(\Delta I_2)]^2 \quad (17)$$

通过代入计算，可得出各个校准点的合成标准不确定度如表 6 所示。

表 6 各个校准点的合成标准不确定度

校准点 (m · s ⁻¹)	$u(\Delta v)$ (m · s ⁻¹)
2	0.111
5	0.063
10	0.069
15	0.081
20	0.120
25	0.146
30	0.176

3.9 扩展不确定度的评定

在置信概率为 P_{95} 下，包含因子 $k=2$ ，根据下式计算扩展不确定度。

$$U_{95}(\Delta v)=k\times u(\Delta v)=2\times u(\Delta v) \quad (18)$$

通过代入计算，可得出各个校准点的测量结果扩展不确定度如表 7 所示。

表 7 测量结果扩展不确定度

校准点 (m · s ⁻¹)	$U_{95}(\Delta v)$ (m · s ⁻¹)
2	0.22
5	0.12
10	0.14
15	0.16
20	0.24
25	0.29
30	0.35

3.10 实验验证

测量不确定度的验证采用传递比较法，将该台风速传感器，分别送上一级计量部门的一级风洞中和本级风洞进行同风速点测试，用两个风速测试装置测试的结果如表 8。

表 8 同一台风速仪(传感器)在不同风洞中的测试结果(单位:m·s⁻¹)

实测风速	上级风洞测试结果	本级风洞测试结果	各风速点测量误差
2.03	1.91	1.88	-0.03
5.00	5.06	5.00	-0.06
10.00	10.08	10.10	0.02
15.00	15.48	15.60	0.12
19.94	20.56	20.62	0.06
24.91	25.55	25.68	0.13
29.94	30.71	30.80	0.09

根据公式 $|y-y_0| \leq \sqrt{U^2+U_0^2}$, 对两组数据的比较结果进行验证。由于上级风洞的技术指标比本级风洞高一个数量级, 因此 $|y-y_0| \leq U$ 。由表中测试数据可知:

当风速在 $2.00\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 段时: $|y-y_0|=0.03(\text{m}\cdot\text{s}^{-1}) \leq U=0.22\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 当风速在 $5.00\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 段时: $|y-y_0|=0.06(\text{m}\cdot\text{s}^{-1}) \leq U=0.12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 当风速在 $10.00\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 段时: $|y-y_0|=0.02(\text{m}\cdot\text{s}^{-1}) \leq U=0.14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 当风速在 $15.00\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 段时: $|y-y_0|=0.12(\text{m}\cdot\text{s}^{-1}) \leq U=0.16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 当风速在 $20.00\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 段时: $|y-y_0|=0.06(\text{m}\cdot\text{s}^{-1}) \leq U=0.24\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 当风速在 $25.00\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 段时: $|y-y_0|=0.13(\text{m}\cdot\text{s}^{-1}) \leq U=0.29\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 当风速在 $30.00\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 段时: $|y-y_0|=0.09(\text{m}\cdot\text{s}^{-1}) \leq U=0.35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

通过测试数据分析, 认为以上对测量不确定度的分析评定是可信的。

4 结论

通过运用 GUM 法, 建立合理的数学模型, 找出了影响 EL15-1CH 型加热风速传感器测量结果的不确定分量为重复性、被检传感器的读数分辨力、数字压力计、标准皮托静压管、空气密度变化、流场稳定性、流场均匀性等因素, 在此基础上, 对校准结果不确定度进行分析评定, 并通过传递比较法对测试数据进行分析验证, 认为 EL15-1CH 型加热风速传感器的校准结果是可信的。EL15-1CH 型加热风速传感器作为特殊环境使用的测风仪器, 所测的风速资料能够为科学理论研究与业务开展提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 雷晓妹, 吴丽娜, 韩玉婷, 等. 基于 GUM 的叶轮数字风速仪不确定度分析与评定[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(3): 30-34.
- [2] 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对比分析[J]. 气象科技, 2020, 48(1): 76-80.
- [3] 赖法全, 王龙. 低速风洞关键结构设计及不确定度评定

研究[J]. 中国计量, 2020(1): 95-96.

- [4] 晏敏, 柳鸣, 刘希林, 等. 铂电阻温度传感器检定结果的不确定度评定[J]. 气象研究与应用, 2017, 38(1): 140-143, 155.
- [5] 晏敏, 柳鸣. 区域自动气象站校准工作的思考和实现[J]. 气象研究与应用, 2018, 39(2): 86-89.
- [6] 陶伟, 张喜鸿. 广西自动气象站计量检定智能平台的研制[J]. 气象研究与应用, 2015, 36(4): 94-96.
- [7] 侯江生, 段利军, 韦继忠. 区域自动气象站校准实验室校准方法技巧[J]. 气象研究与应用, 2016, 37(2): 81-82, 93.
- [8] 丁红英, 于贺军, 李建英. 气压传感器示值误差的测量不确定度评定[J]. 电子测量技术, 2020, 43(5): 63-66.
- [9] 李仁杰, 李飞, 林鑫, 等. TDLAS 技术温度测量的不确定度分析方法研究[J]. 测控技术, 2020, 39(9): 10-14, 19.
- [10] 杜文辉, 李冬梅, 吴敬涛. 气候环境实验室的温度校准及不确定度评定[J]. 装备环境工程, 2020, 17(5): 77-81.
- [11] 张正, 杨敏, 邹超, 等. 自动气象站风向传感器校准结果不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2020, 47(8): 105-106.
- [12] 王宇, 张斌. 能谱仪测定钛合金中钛元素含量不确定度评定[J]. 分析仪器, 2020(1): 66-69.
- [13] 栾松年, 高洁, 王海龙, 等. 在线温度变送器(配热电阻)的校准方法研究和不确定度评定[J]. 中国计量, 2019(6): 115-117.
- [14] 吴志峰, 代彩红, 李玲, 等. 相关色温测量不确定度分析[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 94-98.
- [15] 李强, 张晓英, 薛勇. 示波器检定装置的不确定度评定[J]. 中国计量, 2019(8): 110-111.
- [16] 吴宇, 黄新迪, 吴媚, 等. 轻便三杯风向风速表示值误差测量不确定度分析[J]. 工业计量, 2016, 26(S2): 56-57.
- [17] 胡苍龙, 郑旭. 轻便三杯风向风速表示值误差不确定度分析[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(4): 109-110.
- [18] 邹轶, 胡彪, 曾麟, 等. 气象用通风干湿表的特点及其检定结果的不确定度评定[J]. 工业计量, 2020, 30(3): 59-61, 63.
- [19] 中国计量测试学会. 一级注册计量师基础知识及专业实务第 2 版[M]. 北京: 中国质检出版社, 2011.
- [20] 蒋冬雁, 李伟雄, 陈平. 从计量角度探讨自动气象站观测数据的质量[J]. 气象研究与应用, 2018, 39(4): 71-73.

Uncertainty analysis of calibration results of EL15-1CH heating wind speed sensor

Liu Xilin, Liang Zhenqing, Yan Min, Li Qiang

(Guangxi Meteorological Technical Equipment Center, Nanning 530022, China)

Abstract: To ensure the accuracy and reliability of the wind speed measured by the EL15-1CH heating wind speed sensor and the reasonable characterization of the sensor value, it is necessary to evaluate the uncertainty of the calibration results. In this paper, a mathematical evaluation model was established based on the GUM method. Firstly, the uncertainty components caused by various inputs were evaluated, and then the combined standard uncertainty and expanded uncertainty are calculated. Seven kinds of uncertainty components were introduced into the mathematical model, such as the repeatability of the wind speed sensor, the reading resolution, the measurement standard digital pressure gauge, the measurement standard Pitot static pressure tube, the change of air density, and the stability and uniformity of the wind tunnel flow field. The calculated synthetic standard uncertainty and the expanded uncertainty were analyzed and evaluated. The test data were analyzed and verified by the transfer comparison method, and the results were reliable.

Key words: wind speed sensor; GUM; uncertainty