

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306778

风速传感器实测风速不确定度评定对比研究*

雷晓妹¹ 党选发¹ 张海韬² 潘卓卓²

(1. 甘肃省气象信息与技术装备保障中心 兰州 730020; 2. 甘肃省气象服务中心 兰州 730020)

摘要:在风速传感器实测风速不确定度的评定中,传统方法是将实测风速测量模型简化后采用GUM(guide to the expression uncertainty in measurement)进行评定。但GUM并不适用于复杂模型,为了研究实测风速不确定度评定的可靠方法,对风速传感器分别采用GUM和MCM(Monte Carlo method)进行不确定度评定,对比分析评定结果,并利用MCM评定结果验证GUM的适用性。结果表明,简化模型下GUM和MCM评定结果差异较小,但只有标准不确定度取一位有效数字时,GUM评定方法通过验证,评定结果一致性好;实测模型下MCM和简化模型下GUM评定结果对比得到,两者包络形状相似,但实测风速最佳估计值明显偏大,GUM评定方法不能通过验证;改变部分输入量分布时,两种方法得到实测风速最佳估计值非常接近,但GUM评定得到包含区间比MCM明显增宽,概率分布相差较大,GUM评定方法不能通过验证。因此,应当根据模型的复杂程度、输入量分布情况以及测量结果准确度的要求选择合适的评定方法,如果输入量分布均服从正态分布且对测量准确度要求不高,可使用GUM进行评定,反之建议使用MCM评定以提高观测结果的准确性和可靠性。

关键词:风速传感器;实测风速;GUM;MCM;不确定度评定

中图分类号: TP216; TN99

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 410.55; 460.40

Comparative study on uncertainty evaluation of measured wind speed of wind speed sensor

Lei Xiaomei¹ Dang Xuanfa¹ Zhang Haitao² Pan Zhuozhuo²

(1. Gansu Meteorological Information and Technical Equipment Support Center, Lanzhou 730020, China;

2. Gansu Meteorological Service Center, Lanzhou 730020, China)

Abstract: In the uncertainty evaluation of wind speed measured by wind speed sensors, the traditional method is to simplify the measured wind speed model and use guide to the expression uncertainty in measurement (GUM) to evaluate. However, GUM is not suitable for complex model. In order to study reliable method for the uncertainty evaluation of measured wind speed, GUM and Monte Carlo method (MCM) were used for uncertainty evaluation. On the basis of comparative analysis of results, the applicability of GUM was verified using MCM evaluation. The results show that under the simplified model, the difference between GUM and MCM evaluation is small, but only when the standard uncertainty is taken as one significant digit, GUM evaluation method is verified and evaluation is consistent; MCM evaluation under the actual measurement model are similar in envelope shape compared to GUM evaluation under simplified model, but the best estimate of measured wind speed is significantly larger, GUM evaluation method cannot be validated; When changing the distribution of some input variables, the two methods evaluated best estimated values of measured wind speed are very close. However, the inclusion interval of GUM evaluation is significantly wider than that of MCM, the probability distribution difference is significant, and GUM evaluation method cannot be validated. Therefore, appropriate evaluation methods should be selected according to the complexity of model, the distribution of input quantities and accuracy of measurement. If the distribution of input quantities follows normal distribution and measurement accuracy is not high, GUM can be used for evaluation. On the contrary, MCM is recommended to evaluate to improve the accuracy and reliability of observation results.

Keywords: wind speed sensor; measured wind speed; GUM; MCM; uncertainty evaluation

收稿日期: 2023-07-27 Received Date: 2023-07-27

* 基金项目: 甘肃省自然科学基金(23JRR845)、甘肃省信息中心2023年度科技创新基金(Ms202305)项目资助

0 引言

不确定度是对测量结果受测量误差影响不确定程度的科学描述,体现了测量结果的分散性,不确定度评定的合理与否直接影响测量结果的可靠性和可信程度,近几年的全国计量检定站量值比对结果可以看出,各机构对测量结果的不确定度评定能力层次不齐,直接影响机构的计量能力,进而影响气象计量保障能力。因此,不确定度评定是计量检定领域一项非常重要且具有挑战的工作。

为了评定测量不确定度,国家组织制定了 JJF 1059 规范,该规范分为两部分:JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》,又称 GUM^[1];JJF 1059.2-2012《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》,又称 MCM^[2]。GUM 是评定测量不确定度的传统方法,可以应用于一些简单的测量模型,对不确定度的引入分量考虑并不全面,应用范围有限。MCM 不用考虑各分量之间的相关性,不需为简化评定过程而忽略某些影响因素,作为 GUM 方法的重要补充,可有效地解决测量模型非线性等诸多不确定度评定问题^[3-4],可应该于在机械、生物、工程科学等领域^[5-7]。

在气象计量领域,主流的不确定度评定方法为 GUM,褚进华等^[8]、丁红英等^[9]、冯慧等^[10]分别基于 GUM 分析评定了能见度仪校准系统、气压传感器以及湿度传感器等各类气象用装置的扩展不确定度。李常春^[11]研究了热球式风速仪不确定度的评定,曾涛等^[12]基于省级风洞实验平台评定了气象用风杯式传感器的测量不确定度,李松奎等^[13]分析了螺旋桨测风仪的不确定度,验证了风速校准测试方法是可行的。但针对 MCM 评定不确定度的研究较少,导致对气象自动站各类传感器的不确定度的评定结果适用性缺乏验证,影响测量结果的可靠性;同时也缺乏对 GUM 和 MCM 评定结果的对比研究,尤其在测量模型比较复杂时,如何准确科学地选择不确定度的评定方法也是急需解决的问题。本文基于 GUM 和 MCM 分别评定自动气象站风速传感器实测风速的不确定度,研究了不同测量模型和不同输入量概率分布下,两种评定方法的一致性和差异性,并利用 MCM 评定结果验证 GUM 的适用性,结合实际情况给出了不确定度评定方法的选择建议,为行业从业人员提供技术参考。

1 测量

1.1 测量模型

采用省级风洞实验室的风速表自动检定系统^[14-15],

如图 1 所示,包括 DZS-II 型风洞、数字变频器、D8L600 型二等标准皮托管、CPG2500 型数字压力计、气象用温、湿、压传感器、数据采集器以及计算机等组成,数据采集器连接环境数值采集传感器,并将采集到的读数实时地传输到计算机自动检定系统中,依据规定的实测风速计算公式得到实时的风速值。根据 JJG(气象)004-2011《自动气象站风向风速传感器》检定规程,实测风速的实际测量公式如式(1)所示:

$$v = 2.396 \sqrt{p\xi \frac{273.15 + t}{P - 0.378e}} \quad (1)$$

其中, v 、 p 、 ξ 、 t 、 P 、 e 分别表示实测风速值(m/s)、数字压力计示值(Pa)、皮托管系数、温度(°C)、大气压力(hPa)、以及温度为 t 时的水汽压(hPa)。其中, $e = 10^{\frac{10.286(273.15+t) - 2148.4909}{(273.15+t) - 35.85} 100r}$, r 为相对湿度(%RH)。

水汽修正项 $0.378e$ 较小,在可以忽略的情况下,可将式(1)所示的实际测量模型简化为简化模型,如式(2)所示:

$$v = 2.396 \sqrt{p\xi \frac{273.15 + t}{P}} \quad (2)$$

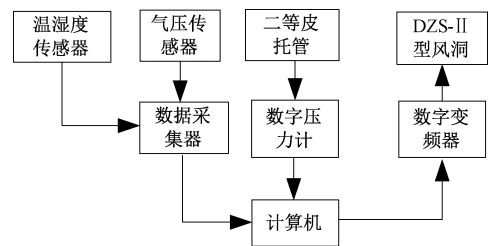


图 1 风速表自动化检定系统

Fig. 1 Automatic verification system for anemometers

1.2 测量数据

依据 JJG(气象)004-2011《自动气象站风向风速传感器》检定规程,取检定开始前和检定结束后的平均环境条件:温度为 25.3 °C、湿度为 33% RH、气压为 845.2 hPa,在自动化检定系统设置检定点为 2、5、10、20、30 m/s 进行测量,得到的数字压力计读数和对应的实测风速值,如表 1 所示。

表 1 检定点对应的测量数据

Table 1 Measurement data of verification point

检定点/(m·s ⁻¹)	数字压力计读数/Pa	实测风速值/(m·s ⁻¹)
2	2.23	2.129 344
5	12.64	5.069 520
10	50.88	10.171 076
20	206.53	20.492 026
30	466.64	30.802 382

2 风速传感器实测风速不确定度的评定

2.1 GUM 法

通过分析实际测量时引入不确定度的影响因素,然后将各不确定度引入分量按照合成公式进行合成,从而得到被测量估计值的扩展不确定度。在实际应用中必须结合测量装置、测量数学模型以及测量方法具体分析,才能准确得出影响测量结果不确定度分量的来源。GUM 评定不确定度^[16-18]的流程如图 2 所示。

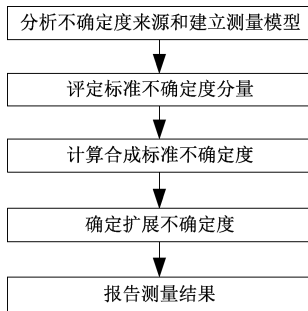


图 2 GUM 评定不确定度流程

Fig. 2 Flow chart for GUM uncertainty evaluation

2.2 GUM 评定实例

在不确定度的评定中,需要科学分析一切可导致测量结果存在偏差的影响量,根据各影响量技术资料给出的最大允许误差、仪器准确度等级或者校准证书给出的扩展不确定度等关键信息,确定测量结果区间半宽,根据对应的扩展因子,计算得到标准偏差分量。

1) 不确定度分量

从式(1)所示的实测风速实际模型可以看出温度为 t 时的水气压 e 为指数函数计算形式复杂,很难通过偏导计算出对应的灵敏度系数,同时水汽修正项 $0.378e$ 较小,对最终实测风速的影响可以忽略。因此,采用简化模型分析实测风速的输入量不确定度来源。

(1) 温度引入的不确定度分量

采用 VAISALA 厂家的 HMP45D 温湿度传感器^[19] 测量温度,检定过程温度变化小,取平均温度为 $25.3\text{ }^\circ\text{C}$,操作说明书给出的最大允许误差为 $(\pm 0.2)\text{ }^\circ\text{C}$ 。对于流场温度测量误差引入的不确定分量假设为正态分布,由校准证书得出区间半宽为 0.2 ,包含因子为 2 ,引入的相对标准不确定度分量为:

$$u_{r1} = \frac{0.2}{(25.3 + 273.15) \times 2} = 0.000\ 335$$

(2) 大气压力引入的不确定度分量

风洞采用 VAISALA 厂家生产的 PTB220 气压传感器测量气压,技术手册给出的最大允许误差为 $\pm 0.25\text{ hPa}$,

检定过程中大气压力较为稳定,平均大气压力为 845.2 hPa 。假设流场气压传感器测量不准引入的不确定分量服从正态分布,区间半宽为 0.25 hPa ,包含因子为 2 ,引入相对不确定度分量为:

$$u_{r2} = \frac{0.25}{845.2 \times 2} = 0.000\ 148$$

(3) 皮托管引入的不确定度分量

测量实际风速采用的皮托管为 L 型二等标准皮托管^[15],经国家气象计量站校准得到,皮托管系数为 $p = 1.003$,相对扩展不确定度为 0.5% ,包含因子为 2 。假设皮托管引入的不确定度分量服从正态分布,引入的相对标准不确定度分量为:

$$u_{r3} = \frac{0.5\%}{2} = 0.25\%$$

(4) 数字压力计引入的不确定度分量

测量标准采用 Mensor 生产的型号为 CPG2500 的 0.01 级数字压力计,相对不确定度为 0.01% ,假设数字压力计测量不准引入不确定度分量服从正态分布,包含因子取 2 ,引入的相对不确定度分量为:

$$u_{r4} = \frac{0.01\%}{2} = 0.005\%$$

2) 评定结果

根据分量相乘时合成不确定度的计算公式,即当测量模型为 $Y = A(X_1^{p_1} X_2^{p_2} \dots X_N^{p_N})$ 且各输入量不相关时,合成不确定 $u_c(y)$ 如式(3)所示:

$$\frac{u_c(y)}{|y|} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [p_i u(x_i) / x_i]^2} \tag{3}$$

根据测量简化模型可将式(2)等价表达为式(4):

$$v = 2.396p^{\frac{1}{2}} \xi^{\frac{1}{2}} P^{-\frac{1}{2}} (273.15 + t)^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

由于各项不确定分量相互独立,互不相关,依据式(3)得到实测风速的相对合成不确定度,如式(5)所示:

$$\frac{u_c}{v} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}u_{r1}\right)^2 + \left(-\frac{1}{2}u_{r2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}u_{r3}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}u_{r4}\right)^2} \tag{5}$$

将以上计算得到的 u_c 乘以包含因子得到展不确定度 U ,如式(6)所示:

$$U = k u_c \tag{6}$$

为了方便与 MCM 评定结果之间进行对比分析,包含概率均取 95% ,包含因子 $k = 1.96$,得到各检定点对应的扩展不确定度以及包含区间,如表 2 所示。

2.3 MCM 评定不确定度

1) MCM 法

MCM 是在测量模型的基础上,分析模型中相关参数的概率分布,对每个参数对应的输入量采用计算机编程模拟产生 M 个随机数。为了充分的模拟实际测量过程,

表 2 GUM 评定结果

Table 2 GUM evaluation results

(m/s)

检定点	合成不确定度	扩展不确定度	实测风速	包含区间
2	0.002 527	0.004 953	2.129 344	[2.124 390, 2.134 297]
5	0.006 318	0.012 383	5.069 520	[5.057 137, 5.081 903]
10	0.012 636	0.024 766	10.171 076	[10.146 309, 10.195 842]
20	0.025 272	0.049 533	20.492 026	[20.442 493, 20.541 559]
30	0.037 908	0.074 299	30.802 382	[30.728 083, 30.876 682]

一般取 $M = 1\ 000\ 000$, 编程实现测量模型公式, 可以得到 M 个随机的测量结果, 并将 M 个测量值按照递增顺序排列, 进一步获得测量结果的最佳估计值、标准不确定度以及取特定包含概率时对应的包含区间。MCM 评定不确定度^[20-21]框图如图 3 所示。

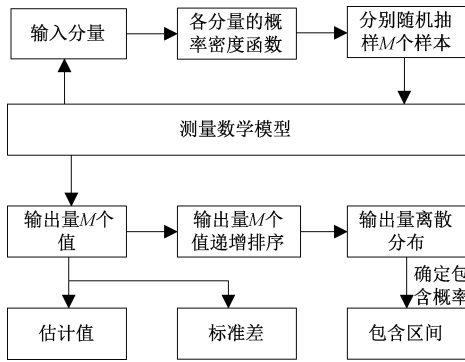


图 3 MCM 评定框图

Fig. 3 Block diagram for MCM evaluation

2) 输入量概率分布分析

相比于 GUM, MCM 不需要进行灵敏度的计算, 省去了大量复杂偏导数的求解过程。实测风速的测量模型和 GUM 保持一致, 选用不含水汽修正项的简化模型, 如式 (2) 所示。依据相关技术资料, 在温度为 25.3 °C、湿度为 33% RH、气压为 845.2 hPa 的检定环境下, 计算不同检定点各输入量对应的标准不确定度, 结合表 1 所示的数字压力计读数, 假设各输入量引入不确定分量均服从正态分布, 得到各输入量在对应检定点的概率密度函数如表 3 所示。

3) Python 实现 MCM 评定

确定 MCM 试验样本大小 $M = 1\ 000\ 000$, 利用 numpy 数据库, random 数据库, math 数据库, 依据各分量对应的概率分布, Python 编程实现各检定点对应的最佳估计值、标准不确定度以及包含区间。以 2 m/s 检定点为例, 假设简化模型中相关参数对应的输入量概率分布均服从正态分布, 相应的代码如下所示:

表 3 输入量概率密度函数

Table 3 Probability density function of inputs

检定点/(m·s ⁻¹)	温度传感器引入	气压传感器引入	皮托管系数引入	数字压力计引入
2				$N(2.23, 2.23 \times 0.005\%)$
5				$N(12.64, 12.64 \times 0.005\%)$
10	$N(25.3 + 273.15, 0.1)$	$N(845.2, 0.125)$	$N(1.003, 1.003 \times 0.0025)$	$N(50.88, 50.88 \times 0.005\%)$
20				$N(206.53, 206.53 \times 0.005\%)$
30				$N(466.64, 466.64 \times 0.005\%)$

#温度分量

$t = \text{numpy.random.normal}(25.3, 0.1)$

#大气压力分量

$q = \text{numpy.random.normal}(845.2, 0.125)$

#皮托管分量

$s = \text{numpy.random.normal}(1.003, 1.003 \times 0.0025)$

#数字压力计量

$w = \text{numpy.random.normal}(2.23, 2.23 \times 0.0005)$

#实测风速计算

$v = 2.396 \times \text{math.sqrt}(w \times s \times (273.15 + t) / q)$

取包含概率 95%, 运行程序得到 2、5、10、20、30 m/s 对应的估计值、标准不确定度以及包含区间如表 4 所示。

导入 matplotlib 画图数据库, 统计得到测量结果的频数分布直方图, 检定点为 10 m/s 时, 分布图如图 4 所示。可以直观看出测量结果包络服从正态分布, 与简化模型下 GUM 评定结果概率分布相似。但评定结果是否一致, 还需要进一步计算验证。

表 4 MCM 评定结果

Table 4 MCM evaluation results (m/s)

检定点	估计值	标准不确定度	包含区间
2	2.129 343	0.002 689	[2.124 059, 2.134 615]
5	5.069 521	0.006 401	[5.056 914, 5.082 068]
10	10.171 071	0.012 851	[10.145 853, 10.196 169]
20	20.492 002	0.025 910	[20.441 213, 20.542 762]
30	30.802 351	0.038 941	[30.725 963, 30.878 594]

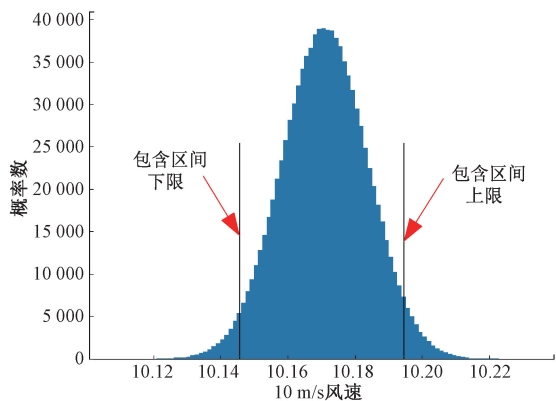


图 4 10 m/s 检定点概率分布

Fig. 4 Probability distribution of 10 m/s checkpoint

4) 评定结果验证

利用 MCM 评定结果对 GUM 的可靠性进行验证,步

骤为:(1)应用 GUM 评定得到 95% 包含概率时实测风速对应的包含区间 $y \pm U$; (2)运用 MCM 评定得到实测风速的标准不确定度、实测风速最佳估计值以及 95% 包含概率时对应的包含区间 $[y_l, y_h]$; (3)确定由 GUM 及 MCM 获得的包含区间在约定的数值容差下是否一致。

具体验证过程为:(1) MCM 得出的标准不确定度分别取 1 位、2 位有效数字时计算对应的数值容差 δ 、 δ' ; (2)计算 GUM 和 MCM 获得的包含区间对应端点差的绝对偏差,区间下限端点差为: $d_l = |y - U - y_l|$, 上限端点差为 $d_h = |y + U - y_h|$; (3)判断端点差是否满足式(7),若满足,则通过验证。

$$d_l \leq \delta \text{ 且 } d_h \leq \delta \tag{7}$$

各检点对应的下限端点绝对偏差 d_l 和上限端点绝对偏差 d_h 以及标准不确定度取不同有效数字位数对应的数值容差如表 5 所示。

表 5 验证结果

Table 5 Validation results

(m/s)

检定点	标准不确定度	下限端点差 d_l	上限端点差 d_h	δ (1 位)	δ' (2 位)	是否通过(1 位)	是否通过(2 位)
2	0.002 689	0.000 331	0.000 318	0.000 5	0.000 05	是	否
5	0.006 401	0.000 223	0.000 165	0.000 5	0.000 05	是	否
10	0.012 851	0.000 456	0.000 327	0.005	0.000 5	是	是
20	0.025 910	0.001 281	0.001 203	0.005	0.000 5	是	否
30	0.038 941	0.002 121	0.001 913	0.005	0.000 5	是	否

可以看出,当标准不确定度保留 1 位有效数字时,各检点对应的数值容差 δ 均大于下限端点差和上限端点差,GUM 方法评定结果通过了 MCM 的验证,表明在对实测风速准确度要求不高时,在简化模型下可以利用 GUM 代替 MCM 评定测量结果不确定度;但当标准不确定度保留两位有效数字时,只有 10 m/s 检定点满足验证式(7),其他检定点 2、5、20、30 m/s 均不满足验证公式,GUM 无法通过验证,表明在对实测风速准确度要求较高时,在简化模型下不能利用 GUM 代替 MCM 评定测量结果不确定度,需要采用 MCM 进行评定,以确保测量结果的准确和可靠。

3 实际模型下 MCM 和 CUM 对比分析

3.1 MCM 评定结果

在实测风速的实际模型中,水汽修正项含有温度和湿度两个参数的指数,形式非常复杂,对参数求偏导困难,无法计算对应的灵敏度系数,导致无法用 GUM 对其进行不确定度的评定,因此在 GUM 评定时常采用的是不含水汽修正项的简化模型。为了研究水汽修正项对不确定度评定结果的影响,在实际测量模型下采用 MCM 进行评定,加入湿度传感器测量不准引入的不确定度分量,其

他参数不变,如表 6 所示。HMP45D 温湿度传感器测量湿度最大允许误差为 $\pm 4\%$ RH,假设服从正态分布,标准不确定度为对应的 Python 代码为:

$$r = \text{numpy.random.normal}(33, 2)$$

通过 Python 编程实现 MCM 评定过程,得到 2、5、10、20 和 30 m/s 对应的实测风速估计值、标准不确定度以及包含概率取 95% 时包含区间如表 6 所示。

表 6 实际模型下 MCM 评定结果

Table 6 MCM evaluation results under actual model

(m/s)

检定点	估计值	标准不确定度	包含区间
2	2.129 903	0.002 691	[2.124 617, 2.135 178]
5	5.070 825	0.006 412	[5.058 239, 5.083 358]
10	10.173 709	0.012 855	[10.148 484, 10.198 917]
20	20.497 355	0.025 906	[20.446 464, 20.548 222]
30	30.810 317	0.038 883	[30.733 903, 30.886 415]

将表 2 和 6 对比分析,可以看出,简化模型下得到的风速估计值小于实际模型下的风速估计值,可见忽略水汽修正项会导致实测风速减小;由 GUM 评定得到的合成不确定度小于 MCM 评定得到的标准不确定度,意味着简化模型下测量风速的区间半宽小于实测模型下风速的区间半宽,使得实测风速的分布区间变小。

3.2 实际模型下 MCM 验证简化模型下 GUM

利用表 6 所示的实际模型下 MCM 评定结果,对表 2 所示的简化模型下 GUM 评定的结果进行验证,各检定点对应的下限端点绝对偏差和上限端点绝对偏差以及标准不确定度取一位有效数字时对应的数值容差 δ ,如表 7 所示。

表 7 实际模型下验证结果

Table 7 Validation results under actual model

(m/s)				
检定点	下限端点差	上限端点差	容差	是否通过
2	0.000 227	0.000 881	0.000 5	是
5	0.001 102	0.001 455	0.000 5	否
10	0.002 175	0.003 075	0.005	是
20	0.003 970	0.006 664	0.005	否
30	0.005 820	0.009 733	0.005	否

由表 7 可以看出,只有 2、10 m/s 检定点的数值容差均大于下限端点差和上限端点差,GUM 通过验证,其他检定点均不满足验证公式,GUM 方法无法通过验证,表明在考虑水汽修正项的实际模型下测量风速时,不能采用 GUM 进行不确定度评定,应使用 MCM 进行实测风速不确定度的评定。

为了更直观地呈现两种评定方法得到的结果,在 10 m/s 检定点,利用 Python 编程实现 GUM 评定结果的概率密度分布,如图 5 中曲线所示,以及 MCM 评定结果的离散概率分布,如图 5 中阴影部分所示。可以看出分布图轮廓非常相似,且具有正态分布的形态,但是 GUM 得到的曲线比 MCM 到的直方图明显向左偏移,表明实测风速最佳估计值和分布区间存在一定差异。

4 改变输入量分布时 MCM 和 GUM 对比分析

在以上的评定中,假设各个不确定度分量的概率密

表 8 改变输入量分布时 GUM 评定结果

Table 8 GUM evaluation results after changing input distribution

(m/s)				
检定点	合成不确定度	扩展不确定度	实测风速	包含区间
2	0.005 207	0.010 206	2.129 344	[2.119 138, 2.139 549]
5	0.013 017	0.025 514	5.069 520	[5.044 006, 5.095 034]
10	0.026 035	0.051 028	10.171 076	[10.120 048, 10.222 103]
20	0.052 069	0.102 056	20.492 026	[20.389 970, 20.594 082]
30	0.078 104	0.153 084	30.802 382	[30.649 299, 30.955 466]

4.2 MCM 评定结果

为了只研究输入量分布改变时评定结果的变化,因此,选择与 GUM 评定相同的简化模型。温度传感器、气

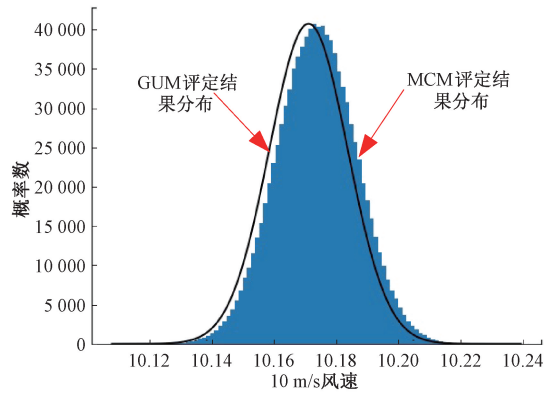


图 5 10 m/s 检定点 GUM 和 MCM 评定结果分布
Fig. 5 Probability distribution of GUM and MCM evaluation results at 10 m/s

度函数均服从正态分布,然而在实际评定时,由于测量采用的设备差异,对应的概率密度函数分布存在变化。风速表自动检定系统采用 HMP45D 温湿度传感器和 PTB220 气压传感器,其技术参数为最大允许误差,一般可假设为均匀分布,包含因子为 $\sqrt{3}$ 。在此基础上,分别进行 GUM 和 MCM 评定,为了对得到的评定结果进行对比分析,均在简化模型下进行评定。

4.1 GUM 评定结果

当流场温度测量误差引入的不确定分量服从均匀分布时,引入的相对标准不确定度分量变为:

$$\frac{0.2}{(25.3 + 273.15) \times \sqrt{3}} = 0.004 564$$

当流场气压测量误差引入的不确定分量假设服从均匀分布时,引入相对标准不确定度分量变为:

$$\frac{0.25}{845.2 \times \sqrt{3}} = 0.000 171$$

其他分量概率密度函数均不变,依据合成不确定度计算公式(5)以及扩展不确定度计算公式(6),取包含因子 $k = 1.96$,得到 GUM 评定结果如表 8 所示。

压传感器测量不准引入的不确定度分量服从均匀分布时,各检定点参数对应的 Python 代码变为:

#温度分量

$t = 25.3 + 0.2 \times 2 \times (\text{numpy.random.random}() - 0.5)$

#大气压力分量

$j = 845.2 + 0.25 \times 2 \times (\text{numpy.random.random}() - 0.5)$

运行程序得到检定点 2、5、10、20、30 m/s 对应的估计值、标准不确定度以及包含概率为 95% 时包含区间如表 9 所示。

表 9 改变输入量分布时 MCM 评定

Table 9 MCM evaluation results after changing input distribution (m/s)

检定点	估计值	标准不确定度	包含区间
2	2.1293 43	0.002 689	[2.124 047, 2.134 627]
5	5.069 521	0.006 401	[5.056 895, 5.082 078]
10	10.171 071	0.012 851	[10.145 738, 10.196 351]
20	20.492 002	0.025 910	[20.440 995, 20.542 874]
30	30.802 351	0.038 941	[30.725 790, 30.878 876]

对比表 8 和 9 可以看出,在温度传感器、气压传感器概率分布假设为均匀分布时,实测风速最佳估计值非常接近,但 GUM 评定得到的不确定度取值明显大于 MCM 评定得到的标准不确定度;GUM 评定结果的包含区间下线端点值要比 MCM 下线端点值要小,上线端点值要比 MCM 上线端点值要大,导致 GUM 评定的包含区间比 MCM 得到的区间明显增大。

4.3 结果验证

利用简化模型下,温度传感器、气压传感器概率分布假设为均匀分布时,利用 MCM 对 GUM 评定的结果进行验证,各检定点对应的下限端点绝对偏差和上限端点绝对偏差以及标准不确定度取一位有效数字时对应的数值容差,如表 10 所示。

表 10 改变输入量分布时验证结果

Table 10 Validation results after changing input distribution (m/s)

检定点	标准不确定度	下限端点差	上限端点差	数值容差	是否通过
2	0.002 689	0.004 909	0.004 922	0.000 5	是
5	0.006 401	0.012 889	0.012 956	0.000 5	否
10	0.012 851	0.025 691	0.025 753	0.005	否
20	0.025 910	0.051 024	0.051 208	0.005	否
30	0.038 941	0.076 491	0.076 590	0.005	否

由表 10 可以看出,改变温度传感器、气压传感器测量不准引入的不确定度分量服从均匀分布时,只有在 2 m/s 检定点,数值容差均大于上限和下限端点差,GUM 通过 MCM 评定的验证;其他检定点均未通过验证,无法采用 GUM 进行实测风速不确定度的评定,应使用 MCM 进行评定。

为了更直观地呈现两种评定方法得到的结果,利用 Python 编程实现 GUM 评定结果的概率密度分布以及 MCM 评定结果的离散概率分布,10 m/s 处概率分布如

图 6 所示。可以看出改变部分输入量分布为均匀分布时,两种方法得到的概率分布与正态分布相似,对称轴也基本吻合,但 GUM 得到的曲线跨度明显比 MCM 到的直方图要大,表明两种方法得到的最佳估计值接近,但不确定度相差较大。

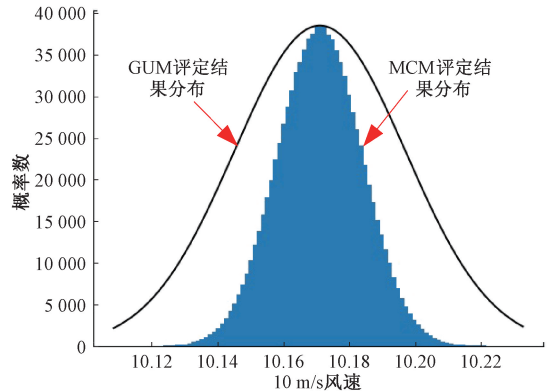


图 6 10 m/s 处改变输入分布时 GUM 和 MCM 评定结果分布
Fig. 6 Probability distribution of GUM and MCM at 10 m/s after changing input distribution

5 结论

气象用自动站传感器测量不确定度的评定结果直接影响气象观测数据的准确性,在实际评定时,需要根据测量模型的复杂性、测量结果的准确度要求以及输入量的分布类型等选取适合的评定方法。本文分别利用 GUM 和 MCM 对风速传感器实测风速的不确定度进行评定,采用 MCM 验证了简化模型、实际模型以及不同输入量分布下 GUM 评定不确定度的适用性,并对测量结果进一步对比分析,得到如下结论:

简化模型下,GUM 和 MCM 评定结果差异较小,但只有在标准不确定度取一位有效数字时,GUM 评定方法通过验证,评定结果一致性好;但当标准不确定度保留两位有效数字时,两种评定方法产生结果差异较大,不能采用 GUM 进行评定,需要采用 MCM 进行评定,以确保测量结果的准确和可靠。

将实际模型下 MCM 和简化模型下 GUM 的评定结果对比分析,得到实际模型下风速估计值大于简化模型下的风速估计值,可见忽略水汽修正项会导致实测风速减小;虽然两种评定方法得到包络形状相似,但 MCM 评定得到实测风速最佳估计值明显偏大,包含区间右移,GUM 评定方法不能通过验证,表明在考虑水汽修正项的实际模型下进行测量风速时,不能采用 GUM 进行不确定度评定,应当采用 MCM 进行实测风速不确定度的评定。

改变温度传感器、气压传感器概率分布为均匀分布

时,在简化模型下将 GUM 和 MCM 评定结果对比分析,得到两者实测风速最佳估计值非常接近,但 GUM 包含区间比 MCM 得到的区间明显增宽,GUM 无法通过 MCM 的验证,应当采用 MCM 进行不确定度评定。

因此,在自动气象站传感器不确定度的评定中,应当根据模型的复杂程度、输入量分布情况以及测量结果准确度的要求选择合适的评定方法,如果输入量分布均服从正态分布且对测量结果准确度要求不高,可使用 GUM 进行评定,反之建议使用 MCM 评定,可以将影响因素尽可能都考虑进来获得更加准确的不确定度评定结果,以提高自动气象站观测结果的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1059. 1-2012 测量不确定度评定与表示[S].
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJF 1059. 1-2012 evaluation and expression of measurement uncertainty[S].
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1059. 2-2012 用蒙特卡洛法评定测量不确定度[S].
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJF 1059. 2-2012 evaluation of measurement uncertainty by Monte Carlo method[S].
- [3] 陈怀艳,曹芸,韩洁. 基于蒙特卡罗法的测量不确定度评定[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(4): 301-308.
CHEN H Y, CAO Y, HAN J. Evaluation of measurement uncertainty based on Monte Carlo method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2011, 25(4): 301-308.
- [4] 凌明祥,李会敏,黎启胜. 含相关性的测量不确定度拟蒙特卡罗评定方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1385-1393.
LING M X, LI H M, LI Q SH. Quasi Monte Carlo evaluation method of measurement uncertainty with correlation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 1385-1393.
- [5] 马宏伟,李赫. 温升法测量压气机等熵效率的不确定度[J]. 航空动力学报, 2022, 37(10): 2242-2252.
MA H W, LI H. Uncertainty in measuring isentropic efficiency of compressors using temperature rise method[J]. Journal of Aerodynamics, 2022, 37(10): 2242-2252.
- [6] 宋君,常丽娟,张富丽. 采用蒙特卡洛法评定转基因水稻样品中 NOS 终止子的测量不确定度[J]. 计量学报, 2019, 40(1): 164-171.
SONG J, CHANG L J, ZHANG F L. Evaluation of measurement uncertainty of NOS terminator in genetically modified rice samples by Monte Carlo method[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(1): 164-171.
- [7] 刘伟,张秀凤,张威. 基于蒙特卡洛法的实船功率性能试验不确定度分析[J]. 船海工程, 2021, 50(1): 25-29, 33.
LIU W, ZHANG X F, ZHANG W. Uncertainty analysis of real ship power performance test based on Monte Carlo method[J]. Marine Engineering, 2021, 50(1): 25-29, 33.
- [8] 褚进华,唐修雄,矫健等. 能见度仪校准系统的不确定度评定分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(2): 180-187.
CHU J H, TANG X X, JIAO J, et al. Uncertainty evaluation analysis of visibility instrument calibration system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(2): 180-187.
- [9] 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.
DING H Y, YU H J, LI J Y. Evaluation of measurement uncertainty of pressure sensor indication error[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(5): 63-66.
- [10] 冯慧,李松奎. 湿度传感器现场检定和实验室检定结果的不确定度对比分析[J]. 电子测量技术, 2020, 43(11): 49-52.
FENG H, LI S K. Comparative analysis of uncertainty in on-site and laboratory calibration results of humidity sensors[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(11): 49-52.
- [11] 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, 38(8): 33-38.
LI CH CH. Analysis and evaluation of measurement uncertainty of hot bulb anemometer[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(8): 33-38.
- [12] 曾涛,龚熙,边泽强. 自动气象站风速传感器测量不确定度评定[J]. 电子测量技术, 2018, 41(15): 96-99.
ZENG T, GONG X, BIAN Z Q. Evaluation of measurement uncertainty of wind speed sensor in automatic weather station[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(15): 96-99.
- [13] 李松奎,贺晓雷,边泽强等. 螺旋桨测风仪风洞测试及不确定度分析[J]. 气象科技, 2021, 49(4): 524-528.
LI S K, HE X L, B Z Q, et al. Wind tunnel testing and uncertainty analysis of propeller anemometers[J].

- Meteorological Science and Technology, 2021, 49(4): 524-528.
- [14] 雷晓妹, 吴丽娜, 韩玉婷. 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.
LEI X M, WU L N, HAN Y T. Impeller digital anemometer based on GUM uncertainty analysis and evaluation [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(3): 30-34.
- [15] 王贺, 陈蕻峰, 熊敏. 融合 CEEMDAN 和 ICS-LSTM 的期风速预测建模[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 17-23.
WANG H, CHEN H F, XIONG M. The phase of integrating CEEMDAN and ICS-LSTM wind speed prediction modeling [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 17-23.
- [16] 李常春, 魏明明. 光电式风向传感器测量不确定度的分与评定[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(5): 150-156.
LI CH CH, WEI M M. Analysis of measurement uncertainty of photoelectric wind direction sensor evaluation [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(5): 150-156.
- [17] 李文博, 颜平江, 武灿灿. 一种叶轮式风速仪的校准方[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(8): 129-133.
LI W B, YAN P J, WU C C. A calibration method for blade wheel anemometers [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(8): 129-133.
- [18] 张昌尧, 吴清锋, 张秋怡. 工业机器人位置稳定时间不确定度的研究分析[J]. 电子测量技术, 2023, 46(8): 148-153.
ZHANG CH Y, WU Q F, ZHANG Q Y. The position stability time of industrial robots is not accurate research and analysis of calibration [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(8): 148-153.
- [19] 凌明, 凌四营, 张衡, 等. 环境温度对双滚轮-导轨式渐开线测量仪的影响[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 104-111.
LING M, LING S Y, ZHANG H, et al. The influence of environmental temperature on the double roller guide rail involute measuring instrument [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 104-111.
- [20] 严玲玲, 程银宝, 陈晓怀. 蒙特卡洛法验证不确定度 A 类 评定方法[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 17-20, 3.
YAN L L, CHENG Y B, CHEN X H. Monte Carlo method to verify uncertainty a evaluation method [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 39(5): 17-20, 3.
- [21] 仝如松. 基于蒙特卡洛法计量校准不确定度评定方法的研究[D]. 保定: 河北大学, 2013.
TONG R S. Evaluation method of uncertainty in metrological calibration based on Monte Carlo method [D]. Baoding: Hebei University, 2013.

作者简介



雷晓妹(通信作者), 2017 年于兰州交通大学获得硕士学位, 现为甘肃省气象信息与技术装备保障中心工程师, 主要研究方向为气象计量检定、装备可视化处理。

E-mail: 1530194583@qq.com

Lei Xiaomei (Corresponding author) received her M. Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2017. Her main research interests include meteorological metrology verification and equipment visualization processing.