

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905036

# 皮托管测量风速时 GUM 评定不确定度的偏差修正\*

魏明明

(江西省大气探测技术中心 南昌 330096)

**摘要:**针对不确定度表示指南法(GUM)进行皮托管测量风速值的不确定度评定时,测量结果存在偏差的现状,为确认该方法的适用性,并获取其偏差的修正值,首先采用 GUM 和蒙特卡洛法(MCM)对皮托管测量风速值的不确定度进行评定;然后,通过 JCGM 101:2008 GUM supplement 1 给出的方法,对 GUM 的适用性进行验证;最后,将 GUM 与 MCM 获取的风速测量结果进行对比。结果表明,GUM 方法依然适用于皮托管进行风速测量时的不确定度的评定;GUM 评定的结果标准不确定度产生了负偏差,其相对于实测风速值的偏差率为 $-0.611 \times 10^{-5}$ ,对应的修正值为“ $0.611 \times 10^{-5} \times$ 实测风速值”,由于该值相对于实测风速值较小,因此,在应用时可根据实际情况,决定是否对其进行修正。

**关键词:** 计量;不确定度;风速;皮托管;MCM;GUM

**中图分类号:** TH89 TB9      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 410.55

## Deviation correction of GUM evaluation uncertainty in the wind speed measurement by pitot tube

Wei Mingming

(Jiangxi Provincial Atmospheric Observation and Technical Center, Nanchang 330096, China)

**Abstract:** When guidelines for uncertainty method (GUM) are utilized to evaluate the uncertainty of the pitot tube measuring wind speed, the measurement results often contain deviation. To confirm the applicability of this method and modify the deviation, GUM and Monte Carlo method (MCM) are firstly adopted to evaluate the uncertainty of the measured wind speed. Then, the applicability of GUM is verified by the methods given by JCGM 101:2008 GUM supplement 1. Finally, the wind speed measurement results obtained by GUM and MCM are compared. Results show that GUM method is still suitable for the uncertainty evaluation of wind speed measurement using pitot tube. The standard uncertainty of GUM evaluation results generates a negative deviation. The deviation rate relative to its measured wind speed value is  $-0.611 \times 10^{-5}$ . The modified value is “ $0.611 \times 10^{-5}$  the measured wind speed value”. This value is smaller than the measured wind speed. For the practical application, it can help decide whether to modify it according to the actual situation.

**Keywords:** metrology; uncertainty; wind speed; pitot tube; MCM; GUM

## 0 引言

风速是指空气相对于地球某一固定地点的运动速率,它是描述大气状态的重要参数,对于分析大气运动、预报天气、开发风能资源等有着重要的意义。为确保风速探测数据的准确性,需对其探测设备进行有效的量值溯源,由于 L 型皮托管结构简单、使用方便、坚固耐用、依据经典流体力学理论,对于风速测量较为稳定,因此在风

速探测设备进行量值溯源时,通常用其做为标准器。

测量不确定度是与测量结果关联的一个参数,它用于表征合理赋予被测量的值的分散性,是衡量测量过程是否持续受控、测量结果是否能保持稳定一致的重要指数<sup>[1]</sup>。为了确保皮托管测量的风速值的准确性和可靠性,需对其测得的风速值进行不确定度的评定。传统的皮托管测量风速时的不确定度评定方法,采用的是 JCGM 100:2008 给出的不确定度表示指南法(guidelines for uncertainty method, GUM),即 GUM 法<sup>[2]</sup>,例如黄健等<sup>[3]</sup>、

何宝林<sup>[4]</sup>、孙志强等<sup>[5-6]</sup>、刘宇等<sup>[7]</sup>采用 GUM 对皮托管测量的风速值进行了不确定度评定,并分析了校准装置、检定环境等因素对评定结果的影响。郭金良等<sup>[8]</sup>、闫选利等<sup>[9]</sup>、朱乐坤等<sup>[10]</sup>以皮托管做为标准器,在风速传感器进行校准时,采用 GUM 对其测得的风速值不确定度进行了评定。以上学者均取得了不错的研究成果。但是,GUM 法应用时,需进行复杂的灵敏度系数的计算,而皮托管的风速测量模型较复杂,为了完成 GUM 的评定,需将风速测量模型中影响较小的分量(即水汽修正项)省去,以使得到的评定结果存在偏差。

JCGM 101 : 2008 GUM supplement 1 给出基于概率分布传播的不确定度评定方法<sup>[11]</sup>,即蒙特卡诺(Monte Carlo method, MCM)方法,它以实际测量过程为基础,采用真实的模拟策略,无需省略部分分量。因此,评定的结果更加真实可靠,适合复杂的非线性模型,能有效的弥补 GUM 法的不足<sup>[12-16]</sup>。同时,JCGM 101 : 2008 GUM supplement 1 还给出了 MCM 验证 GUM 适用性的方法,可对 GUM 法的适用性进行验证。Kang 等<sup>[17]</sup>、Adefila 等<sup>[18]</sup>采用 MCM 分析出了俯仰角和偏航角的偏差等因素对皮托管不确定度的性能影响。刘园园等<sup>[19]</sup>采用 MCM 和 GUM 分别对皮托管不确定度进行评定,通过对比得出 MCM 评定结果更加完整合理的结论。但是,这些方法均未涉及采用 MCM 验证 GUM 的适用性;同时,针对 GUM 获得的不确定度的偏差缺乏定量的分析。

针对现有研究的不足,本文将皮托管测量风速为研究对象,首先,对其测风原理和测量模型进行介绍,并设计相应的试验方案;然后,分别对 GUM 方法和 MCM 方法评定不确定度的机理和具体步骤流程进行阐述;最后,在试验部分,将采用 GUM 和 MCM 对其风速测量值的不确定度进行评定,通过 MCM 来验证 GUM 的适用性;并针对 GUM 方法获得风速测量不确定度的偏差,对其测量结果进行修正。

## 1 皮托管测风原理、模型及试验方案

### 1.1 皮托管测风原理

皮托管是一种通过测量气流总压和静压以确定气流速度的管状装置(如图 1 所示)。皮托管实际上是一个弯成直角的金属管装置,该装置在侧壁周围有静压孔,顶端有一个正对气流的总压孔。皮托管的总压输出端口和静压输出端口通过软胶管分别连至数字微压计的总压和静压输入端口,这样便组成了皮托管微压计测量系统,可根据数字差压计上显示出的动压值来确定空气流场中的气流流速。在进行风速传感器量值溯源时,皮托管一般做为标准器来进行风速值的测量,其在环形风洞内进行风速测量的效果如图 2 所示。

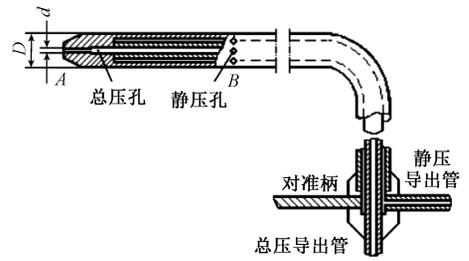


图 1 皮托管  
Fig.1 Pitot tube



图 2 测量风速实景图  
Fig.2 Real picture of wind speed measurement

### 1.2 测量模型

根据文献[10]建立了皮托管测量风速的原始模型  $v_i$  为:

$$v_i = \sqrt{\frac{1\ 013.25 \cdot (273.15 + t)}{288.15 \cdot (p - 0.378 u_{e_w})}} \cdot \sqrt{r_i \zeta k_c} \cdot 1.278 \sqrt{p_e} \quad (1)$$

式中: $t$ 、 $p$ 、 $u$ 、 $e_w$  分别表示温度、气压、湿度、饱和水汽压; $r_i$ 、 $\zeta$ 、 $k_c$  分别表示数字式微压计内部液体修正系数、皮托管系数、微压计系数; $p_e$  表示数字微压计的实测风压。其中 $-0.378u_{e_w}$  为水汽修正项, $e_w$  为饱和水汽压, $e_w$  如式(2)所示。

$$e_w = k \times e^{[A \times T^2 + B \times T + C + \frac{D}{T}]} \quad (2)$$

式中: $k = 1\text{ Pa}$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  均为常数,分别为  $A = 1.237\ 884\ 7 \times 10^{-5}\text{ K}^{-2}$ 、 $B = -1.912\ 131\ 6 \times 10^{-2}\text{ K}^{-1}$ 、 $C = 33.937\ 110\ 47$ 、 $D = -6.343\ 164\ 5 \times 10^3\text{ K}$ ; $e = 2.718\ 28$ 。其中  $T = 273.15 + t$ , $t$  为试验气流场的摄氏温度, $T$  为对应的热力学温度(开氏温度)。根据需求,将风速模型舍弃水汽修正项 $-0.378u_{e_w}$  后的简化模型,如式(3)所示。

$$v_i = \sqrt{\frac{1\ 013.25 \cdot (273.15 + t)}{288.15 \cdot p}} \cdot \sqrt{r_i \zeta k_c} \cdot 1.278 \sqrt{p_e} \quad (3)$$

试验将采用上海雷若仪表科技有限公司生产的 L 型皮托管静压管进行测试,仪器的技术参数为: $t$ 、 $p$ 、 $u$  对应的传感器的扩展不确定度  $U$  分别为  $0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0.2\text{ hPa}$ 、 $2\%$

RH; $\zeta$ 、 $r_i$ 、 $k_c$  的值均为 1.0,且对应的扩展不确定度  $U$  均为 0.2%;微差压计的  $U=0.01\%$  Pa。

### 1.3 试验方案

试验在温度为 20℃、湿度为 80% RH、气压为 1 012 hPa 的环境下,测试时选择 HDF500 型回路风洞,将皮托管安装于风洞试验段内,并参照 JJG(气象)004-2011《自动气象站风向风速传感器检定规程》的要求,选取 2.0、5.00、10.00、15.00、20.00、30.00 m/s 为风速测量点依此进行。各风速测量点对应的微压计的实测风压值  $p_i$  和由原始模型获得风速值如表 1 所示。

表 1 各风速点对应的实测风压和风速值

Table 1 The measured wind pressure and wind speed corresponding to each wind speed points

风速测量点/(m·s <sup>-1</sup> )	实测风压值/Pa	风速值/(m·s <sup>-1</sup> )
2	2.4	2.005 225 823
5	15.3	5.062 947 026
10	60.2	10.042 825 43
15	134.8	15.028 049 40
20	240.0	20.052 258 23
30	540.0	30.078 387 35

## 2 GUM 方法评定原理及步骤

GUM 法作为一种基于不确定度传播定律 (law of propagation of uncertainty, LPU) 的评定方法,广泛的应用于计量领域,且一直是作为评定不确定度的基本方法。GUM 法对皮托管测量风速值进行不确定度评定时,通过原始模型先获取风速测量值,然后采用舍弃水汽修正项后的简化模型进行不确定度评定,其风速测量结果的概率分布一般由原始模型获得的风速测量值和简化模型对应的扩展不确定度构成的包含区间来表征。该方法作为皮托管测量风速时传统的不确定度评定方法,具体步骤如下。

1) 通过原始模型计算出各风速测量点实测风速值  $v_i$  (即风速最佳估计值)。

2) 分析不确定度的来源,并评定简化测量模型中的各风速测量点对应的输入量的标准不确定度  $u(x_i)$ ,计算灵敏系数  $c_i$ ,各输入量对应输出量的不确定度分量为  $|c_i|u(x_i)$ 。

3) 计算合成标准不确定度  $u_c$ ,如式 4 所示,根据包含概率  $p$  来确定包含因子  $k_p$ ;通过  $k_p$  及合成标准不确定度来计算扩展不确定度  $U_p$ ,如式 5 所示。

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N [ |c_i| u(x_i) ]^2} \quad (4)$$

$$U_p = k_p u_c \quad (5)$$

4) 给出最后的测量结果可表示为  $V = v_i \pm U_p$ ,其表示被测值  $V$  有概率为  $p$  的可能性落在  $[v_i - U_p, v_i + U_p]$  区间内。

GUM 评定的步骤可参见 JCGM 100:2008。

## 3 MCM 方法评定原理及步骤

MCM 是实现概率分布传播的一种数值方法。首先,它通过对输入量的概率密度函数 (probability density function, PDF) 进行离散采样;然后,通过测量模型对输入量的 PDF 进行传播,从而获取输出量 PDF 的随机抽样值;最后,通过输出量 PDF 的随机抽样值可得到其对应的最佳估计值、标准不确定度、约定概率下的最短包含区间的数值 (即输出结果),这些数值能有效地反应被测量值的概率分布情况。

目前主流的 MCM 方法有单批次 MCM 和自适应 MCM 2 种,均可采用计算机程序实现。其中,单批次 MCM 程序简单,操作执行更容易,但是为了获得足够可靠的评定结果,随机抽样值通常取值较大,容易造成有限资源的浪费。而自适应 MCM,通过不断增加采样次数,直到输出结果稳定,能在保证精度的前提下获取相应的测量结果。当采用 MCM 验证 GUM 适用性时,JCGM 101:2008 GUM supplement 1 也推荐自适应 MCM。本文将采用自适应 MCM 对皮托管测量风速值的不确定度进行评定,通过 MATLAB 程序来实现,其步骤如下。

1) 针对皮托管测量风速的原始模型,分析确立各输入量的概率分布类型及相应的特征参数,进而获取各输入量的 PDF。

2) 约定输出结果的最短包含区间概率  $p$  ( $p$  一般选择 95%),设定输出结果的标准不确定度  $u(y)$  的有效位数  $n_{\text{dig}} = 1$  或 2。

3) 初始化循环执行次数  $h = 1$ ,设定批次内 MCM 执行次数  $M$ ,一般  $M = \max(J, 10^4)$ 、其中  $J = 100/(1-p)$ 。

4) 首先执行 2 个批次内 MCM 试验,通过 2 个批次内 MCM 获得相应的样本输出,并通过各自的样本计算出各自输出量的参数值对应的最佳估计值  $y$ 、标准不确定度  $u(y)$ 、约定概率下的最短包含区间的左右端点值  $y_{\text{low}}$  和  $y_{\text{high}}$ 。

5) 通过式 (6) ~ (9) 分别计算出  $y$  平均值的标准偏差  $s_y$ 、 $u(y)$  平均值的标准偏差  $s_{u(y)}$ 、 $y_{\text{low}}$  平均值的标准偏差  $s_{y_{\text{low}}}$  和  $y_{\text{high}}$  平均值的标准偏差  $s_{y_{\text{high}}}$ 。

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{h(h-1)} \sum_{i=1}^h (y^{(i)} - y(h))^2} \quad (6)$$

$$s_{u(y)} = \sqrt{\frac{1}{h(h-1)} \sum_{i=1}^h (u(y^{(i)}) - u_y(h))^2} \quad (7)$$

$$s_{y_{low}} = \sqrt{\frac{1}{h(h-1)} \sum_{i=1}^h (y_{low}^{(i)} - y_{low}(h))^2} \quad (8)$$

$$s_{y_{high}} = \sqrt{\frac{1}{h(h-1)} \sum_{i=1}^h (y_{high}^{(i)} - y_{high}(h))^2} \quad (9)$$

其中,  $y(h) = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h y^{(i)}$ 、 $u_y(h) = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h u(y^{(i)})$ 、

$$y_{low}(h) = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h y_{low}^{(i)}、y_{high}(h) = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h y_{high}^{(i)}。$$

6) 通过  $h \times M$  个样本值计算出  $u(y)$ ，并根据其设定数值容差  $\delta$ ，其值为  $u(y)$  最后一位有效数字的下一位的一半。

7) 进行稳定性判断，即当  $2s_y、2s_{u(y)}、2s_{y_{low}}、2s_{y_{high}}$  均小于  $\delta$  时(根据 JCGM 101 : 2008 GUM supplement 1 的要求，当验证相应的 GUM 的适用性时，需将  $\delta$  用  $\delta/5$  进行替换)，此时评定结束；否则  $h+1$  返回执行步骤 5)，直至最终达到稳定，此时通过  $h \times M$  个样本值计算出  $y、u(y)$  和  $y_{low}、y_{high}$ 。

由于该收敛值  $\delta$  与标准不确定度  $u(y)$  相关，因此整个流程属于自适应过程。其具体的执行流程如图 3 所示。有关自适应 MCM 法评定测量不确定度的详细步骤可参见 JCGM 101 : 2008 GUM supplement 1。

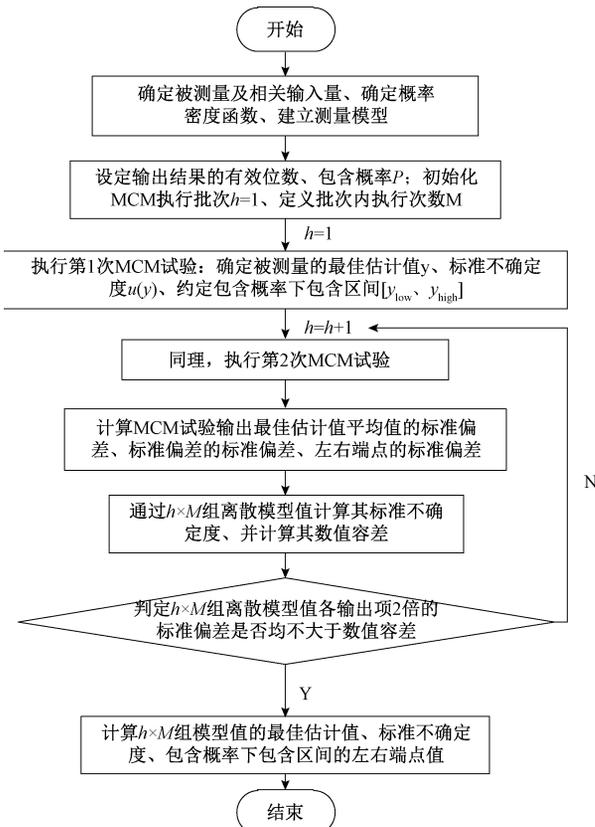


图 3 自适应 MCM 法评定测量不确定度流程  
Fig.3 The process of adaptive MCM to assess measurement uncertainty

## 4 试验分析

由于 MCM 是一种基于概率分布传播的方法，无需进行复杂的灵敏度系数的计算，能将风速方程中所有因素均考虑进来，不需将影响较小的水汽修正项省去，因此评定的结果更加完整；并且，MCM 采用真实的模拟策略，相对于 GUM 评定结果而言，它评定的结果更准确可靠，可将其做为实际状态下的标准输出。

试验将分别采用 GUM 和 MCM 对皮托管测量风速值的不确定度进行评定，皮托管测量风速值的实验场景如图 4 所示。为了判断 GUM 评定的结果是否适用，还将通过 JCGM 101 : 2008 GUM supplement 1 给出的 MCM 验证 GUM 适用性方法，对 GUM 的适用性进行验证。最后，通过对比 GUM 与 MCM 得到的概率分布特征参数，获取 GUM 方法得到的标准不确定度的偏差，并通过偏差值对其测量结果进行修正。

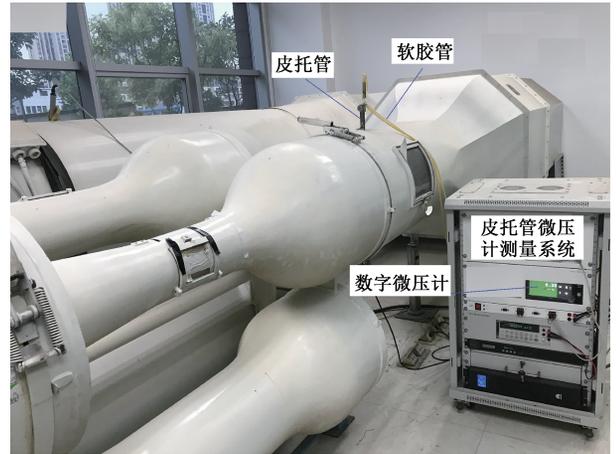


图 4 皮托管测量风速值的实验场景

Fig.4 Experimental scene of the pitot tube measuring wind speed

### 4.1 GUM 方法评定不确定度

1) 通过原始模型计算出各风速测量点风速值  $v_i$ ，即各风速测量点的风速最佳估计值如表 1 所示。

2) 通过分析不确定度的来源，并评定简化测量模型中的各风速测量点对应的输入量的标准不确定度  $u(x_i)$ ，如表 2 所示。

通过计算得到各输入量的灵敏度系数  $c_i$  如式(10)~式(15)所示。

$$c_1 = \frac{\partial(v_i)}{\partial r_i} = \sqrt{\frac{1013.25 \cdot (273.15 + t)}{288.15 \cdot p}} \cdot \sqrt{\zeta k_c} \cdot 1.278 \sqrt{p_v} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{r_i}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_i}{r_i} \quad (10)$$

表2 GUM方法评定时不确定度输入量来源及量值  
Table 2 Sources and values of uncertainty components under GUM evaluation

输入量符号	输入量来源	相对区间半宽度	相对标准不确定度
$u(r_i)$	数字式微压计内部液体的修正系数不确定度引入	$(1.0 \times 0.2\%) / 1.0$	$u(r_i) / r_i = 0.10\%$
$u(\zeta)$	皮托管系数不确定度引入	$(1.0 \times 0.2\%) / 1.0$	$u(\zeta) / \zeta = 0.10\%$
$u(k_c)$	微压计系数不确定度引入	$(1.0 \times 0.2\%) / 1.0$	$u(k_c) / k_c = 0.10\%$
$u(p_v)$	微差压计不确定度引入	$(p_v \times 0.01\%) / p_v$	$u(p_v) / p_v = 0.005\%$
$u(t)$	温度传感器不确定度引入	$0.2^\circ\text{C} / (20 + 273.15)^\circ\text{C}$	$u(t) / t = 0.034\%$
$u(p)$	气压传感器不确定度引入	$0.2 \text{ hPa} / 1012 \text{ hPa}$	$u(p) / p = 0.001\%$

$$c_2 = \frac{\partial(v_i)}{\partial \zeta} = \sqrt{\frac{1013.25 \cdot (273.15 + t)}{288.15 \cdot p}} \cdot \sqrt{r_i k_c} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{T}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_i}{T} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_i}{273.15 + t} \quad (14)$$

$$1.278 \sqrt{p_v} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\zeta}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_i}{\zeta} \quad (11)$$

$$c_6 = \frac{\partial(v_i)}{\partial p} = \sqrt{\frac{1013.25 \cdot (273.15 + t)}{288.15}} \cdot \sqrt{r_i \zeta k_c} \cdot 1.278 \sqrt{p_v} \cdot \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot p^{-\frac{3}{2}} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{v_i}{p} \quad (15)$$

$$c_3 = \frac{\partial(v_i)}{\partial k_c} = \sqrt{\frac{1013.25 \cdot (273.15 + t)}{288.15 \cdot p}} \cdot \sqrt{r_i \zeta} \cdot 1.278 \sqrt{p_v} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_c}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_i}{k_c} \quad (12)$$

$$3) \text{ 由式(4)计算合成标准不确定度 } u_c \text{ 如式(16)所示。}$$

$$1.278 \sqrt{p_v} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_c}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_i}{k_c} \quad (12)$$

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u^2(r_i) + c_2^2 u^2(\zeta) + c_3^2 u^2(k_c) + c_4^2 u^2(p_v) + c_5^2 u^2(T) + c_6^2 u^2(p)}$$

$$c_4 = \frac{\partial(v_i)}{\partial p_v} = \sqrt{\frac{1013.25 \cdot (273.15 + t)}{288.15 \cdot p}} \cdot \sqrt{r_i \zeta k_c} \cdot 1.278 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{p_v}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_i}{p_v} \quad (13)$$

$$u(v_i) = \sqrt{c_1^2 u^2(r_i) + c_2^2 u^2(\zeta) + c_3^2 u^2(k_c) + c_4^2 u^2(p_v) + c_5^2 u^2(T) + c_6^2 u^2(p)} \quad (16)$$

$$1.278 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{p_v}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_i}{p_v} \quad (13)$$

将各输入量的灵敏度系数  $c_1 \sim c_6$  代入式(16)整理得:

$$c_5 = \frac{\partial(v_i)}{\partial T} = \sqrt{\frac{1013.25}{288.15 \cdot p}} \cdot \sqrt{r_i \zeta k_c} \cdot 1.278 \sqrt{p_v} \cdot \frac{v_i}{2T^2}$$

$$u(v_i) = \frac{v_i}{2} \sqrt{\left(\frac{u(r_i)}{r_i}\right)^2 + \left(\frac{u(\zeta)}{\zeta}\right)^2 + \left(\frac{u(k_c)}{k_c}\right)^2 + \left(\frac{u(p_v)}{p_v}\right)^2 + \left(\frac{u(T)}{T}\right)^2 + \left(\frac{u(p)}{p}\right)^2} \quad (17)$$

当包含区间概率  $p = 95\%$  时,包含因子  $k_p = 1.96$ ,此时扩展不确定度  $U_{95}$  为:

4) 通过计算,可获取各风速测量点对应风速值的  $u_c$  和  $U_{95}$ ;在约定概率  $p = 95\%$  时,最后的测量结果  $V = v_i \pm U_{95}$ ,对应的包含区间为  $[v_i - U_{95}, v_i + U_{95}]$ ,其相应值如表3所示。

$$U_{95} = 1.96 \times u(v_i) \quad (18)$$

表3 GUM 评定结果  
Table 3 Evaluation results of GUM

风速测量点	$u(v_i)$	$U_{95}$	$v_i - U_{95}$	$v_i + U_{95}$	m/s
2	0.001 770 542	0.003 470 262	2.001 755 562	2.008 696 085	
5	0.004 470 399	0.008 761 982	5.054 185 045	5.071 709 008	
10	0.008 867 451	0.017 380 204	10.025 445 226	10.060 205 634	
15	0.013 269 223	0.026 007 677	15.002 041 726	15.054 057 080	
20	0.017 705 417	0.034 702 617	20.017 555 616	20.086 960 852	
30	0.026 558 126	0.052 053 927	30.026 333 424	30.130 441 277	

4.2 MCM 方法评定不确定度

1) 采用风速时的原始模型,由于各风速测量点对应的微压计的实测风压值  $p_v$  不同外,其它各输入量均相

同,以风速测量点 10 m/s 为例,分析确立各输入量的 PDF 的概率分布情况如表4所示(其它各风速测量点的  $u(p_v)$  值可根据其对应的实测风压值构建 PDF<sup>[18]</sup>)。

表 4 输入量概率分布情况

Table 4 Probability distribution of input quantities

输入量符号	输入量来源	区间半宽度	$u(x_i)$	PDF
$u(r_i)$	数字式微压计内部液体的修正系数不确定度引入	1.0×0.2%	0.001	$N[1, 0.001]$
$u(\zeta)$	皮托管系数不确定度引入	1.0×0.2%	0.001	$N[1, 0.001]$
$u(k_c)$	微压计系数不确定度引入	1.0×0.2%	0.001	$N[1, 0.001]$
$u(p_v)$	微差压计不确定度引入	60.20×0.01%	0.00301	$N[60.20, 0.00301]$
$u(t)$	温度传感器不确定度引入	0.2℃	0.1℃	$N[20℃, 0.1℃]$
$u(u)$	湿度传感器不确定度引入	4% RH	2% RH	$N[80\% RH, 2\% RH]$
$u(p)$	气压传感器不确定度引入	0.2 hPa	0.1hPa	$N[1\ 012\ hPa, 0.1\ hPa]$

2) 设定相应的包含概率  $p=95\%$ , 输出结果的标准不确定度  $u(y)$  的有效位数  $n_{dig}$  的设定方法为: 当  $u(y)$  的第 1 位有效数字为 1 或 2 时,  $n_{dig}=2$ , 其他情况  $n_{dig}=1$ 。

3) 由于  $J=100/(1-p)$ ,  $p=95\%$ , 因此  $J=2\ 000$ , 所以设定批次内 MCM 执行次数  $M=\max(J, 10^4)=10\ 000$ 。

4) 通过执行自适应 MCM 程序获取  $h \times M$  个样本值,

并计算出  $u(y)$ , 然后根据其设定数值容差  $\delta$ 。

5) 在执行稳定性判断时, 为了验证相应的 GUM 的适用性, 将  $\delta$  用  $\delta/5$  进行替换。通过  $h \times M$  个样本值得到的评定结果包括: 最佳估计值  $y$ 、标准不确定度  $u(y)$ 、约定概率下的最短包含区间的左右端点值  $y_{low}$  和  $y_{high}$ , 如表 5 所示。

表 5 MCM 评定结果

Table 5 Evaluation results of MCM

风速测风点	$y$	$u(y)$	$y_{low}$	$y_{high}$	m/s
2	2.005 224 977	0.001 781 098	2.001 734 857	2.008 719 428	
5	5.062 938 213	0.004 497 312	5.054 131 555	5.071 753 282	
10	10.042 834 108	0.008 942 022	10.025 333 837	10.060 344 981	
15	15.028 034 965	0.013 353 330	15.001 834 903	15.054 170 335	
20	20.052 247 086	0.017 797 914	20.017 426 974	20.087 132 475	
30	30.078 382 423	0.026 769 422	30.025 931 589	30.130 870 140	

### 4.3 MCM 验证 GUM 的适用性

现将 GUM 和 MCM 评定的结果用 MATLAB 软件进行仿真, 并将仿真概率分布图进行对比, 以风速测量点为 10 m/s 为例, 其 MCM 与 GUM 评定结果概率分布如图 5 所示。蓝色柱状图表示的是 MCM 的概率密度分布, 红色曲线表示相应的 GUM 方法得到的概率密度分布。由图 5 可知 2 种方法得到的概率密度分布结果基本一致。为了进一步验证 GUM 适用性, 现采用 JCGM 101 : 2008 GUM supplement 1 给出的 MCM 验证 GUM 适用性方法。

该验证方法指出, 当 MCM 和 GUM 采用相同的包含区间时, 其各自端点的绝对偏差不大于数值容差  $\delta$ , 则表明 GUM 通过验证。其步骤如下。

1) 通过 GUM 得出约定概率下 (一般取  $p=95\%$ ) 的包含区间的左右端点  $y-U_p, y+U_p$ 。

2) 通过 MCM 得到相同概率下 (一般取  $p=95\%$ ) 包含区间的左右端点值  $y_{low}$  和  $y_{high}$  值。

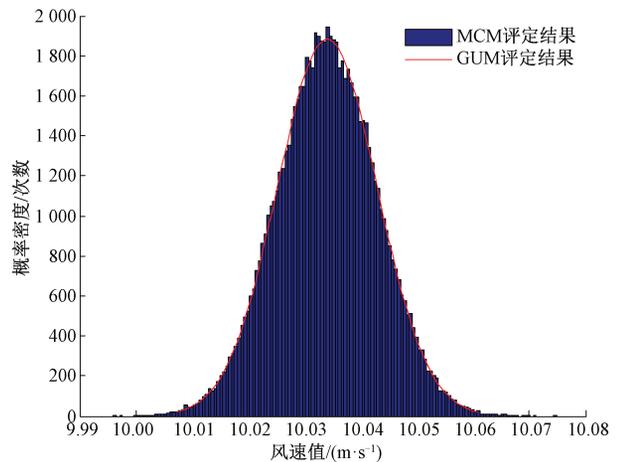


图 5 MCM 与 GUM 评定结果概率分布 (风速测量点为 10 m/s)

Fig.5 Probability distribution of MCM and GUM evaluation results (the wind speed measurement point 10 m/s)

3) 计算两个区间端点的绝对偏差  $d_{\text{low}}$  和  $d_{\text{high}}$ , 如式(19)、(20)所示。

$$d_{\text{low}} = |(y - U_p) - y_{\text{low}}| \quad (19)$$

$$d_{\text{high}} = |(y + U_p) - y_{\text{high}}| \quad (20)$$

4) 判定区间端点的绝对偏差  $d_{\text{low}}$  和  $d_{\text{high}}$  是否均不大于  $\delta$ ; 如果不大于则通过验证, 表明 GUM 适用于此场合, 否则验证不通过, 应考虑用 MCM 方法或其他方法进行替代。

根据以上方法进行验证, 结果如表 6 所示, GUM 方法和 MCM 方法获得的包含区间各自端点的绝对偏差  $d_{\text{low}}$  和  $d_{\text{high}}$ , 均不大于数值容差  $\delta$ , GUM 通过 MCM 的验证。因此, GUM 方法依然适用。

表 6 GUM 适用性验证结果

Table 6 Verification results of GUM m/s

风速测风点	$d_{\text{low}}$	$d_{\text{high}}$	$\delta$	是否通过验证
2	0.000 020 705	0.000 023 343	0.000 05	通过
5	0.000 053 490	0.000 044 274	0.000 5	通过
10	0.000 111 389	0.000 139 347	0.000 5	通过
15	0.000 206 823	0.000 113 255	0.000 5	通过
20	0.000 128 642	0.000 171 623	0.000 5	通过
30	0.000 401 835	0.000 428 863	0.000 5	通过

#### 4.4 GUM 方法评定结果的偏差修正

GUM 方法获取的风速测量结果一般由风速最佳估计值  $v_i$ 、扩展不确定度  $U_{95}$  来表示, 而  $U_{95}$  由标准不确定度  $u(v_i)$  来决定。由于 GUM 和 MCM 均基于原始模型直接获取的风速值, 因此, 通过 GUM 获取的风速最佳估计值  $v_i$  和 MCM 获取的风速最佳估计值  $y$  可认为是一致的。所以 GUM 方法对测量结果的影响由  $u(v_i)$  决定。

由于 MCM 采用真实的模拟策略, 其评定的结果被认定为真实可靠的, 因此通过 MCM 对未经舍弃水汽修正项的原始模型获取的风速值进行不确定度评定的结果可认为是风速测量结果的标准值, 其评定结果中的  $u(y)$  可认为是标准不确定度的标准值。同时, GUM 对舍弃水汽修正项的简易模型获取的风速值进行的不确定度评定时, 获取的  $u(v_i)$  为标准不确定度的实测值。其对应的偏差值  $\Delta u_c$  为:

$$\Delta u_c = u(v_i) - u(y) \quad (21)$$

因此 GUM 方法对测量结果的影响则取决于  $\Delta u_c$ , 为了得出  $\Delta u_c$  的分布规律, 通过对其进行线性拟合, 来确定  $\Delta u_c$  对应的回归方程。具体的方法如下。

通过对 0~40 m/s 的风速区间, 间隔 1 m/s 的风速点进行统计, 其各风速测量点  $\Delta u_c$  如图 6 所示的离散点, 根

据各偏差值的分布特征, 判定其满足一级线性回归方程为:

$$\Delta u_c = k_u \cdot v_i + b \quad (22)$$

由于在 0 m/s 时, 对应的 GUM 和 MCM 的不确定度均为 0 m/s, 因此可断定其截距  $b=0$  m/s。所以一级线性回归方程为:

$$\Delta u_c = k_u \cdot v_i \quad (23)$$

通过对各风速测量点的  $\Delta u_c$  采用最小二乘法拟合, 得出  $k_u = -0.6118 \times 10^{-5}$ , 并且通过式(21)、(23)可得到式(24)。

$$u(y) = u(v_i) + 0.6118 \times 10^{-5} \cdot v_i \quad (24)$$

经过修正后的 GUM 标准不确定度理论上等于采用 MCM 评定时得到的标准不确定度  $u(y)$  值。

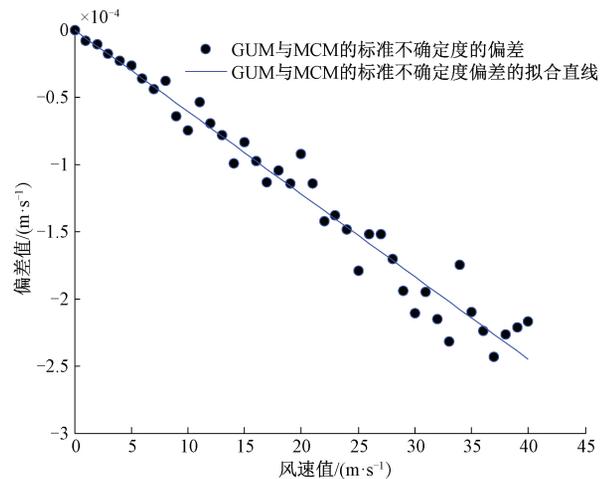


图 6 GUM 与 MCM 的标准不确定度的偏差及拟合直线

Fig.6 Deviation and fitting line of standard uncertainty between GUM and MCM

## 5 结 论

本文以皮托管测量风速为研究对象, 分别采用 GUM 对简化模型(舍弃水汽修正项)与 MCM 对原始模型(未舍弃水汽修正项)的不确定度进行评定, 主要结论如下。

1) 采用 JCGM 101:2008 GUM supplement 1 给出验证方法, 将 MCM 对 GUM 适用性进行了验证得出, 通过舍弃水汽修正项采用简化模型进行 GUM 评定的传统方法, 依然适用于皮托管进行风速测量时的不确定度的评定。

2) 相比 MCM 评定结果, GUM 评定的结果标准不确定度产生了负偏差, 通过对 0~40 m/s 中间隔 1 m/s 的各风速测量点对应的标准不确定度偏差值采用最小二乘法拟合得出, 标准不确定度偏差值相对于实测风速值的偏差率为  $-0.6118 \times 10^{-5}$ , 对应的偏差值为  $-0.6118 \times 10^{-5} v_i$ 。

3) 由标准不确定度的偏差值得出,其对应修正值为  $0.6118 \times 10^{-5} v_i$ 。因此,当约定概率  $p=95\%$  时,GUM 法修正后的风速测量结果为  $V = v_i \pm 1.96 \times [u(v_i) + 0.6118 \times 10^{-5} \times v_i]$ 。由此可见,经修正后的风速测量结果的包含区间相对于原包含区间  $v_i \pm 1.96 \times u(v_i)$  更宽,其对应包含区间的左、右端点的修正值分别约为  $-1.2 \times 10^{-5} v_i$  和  $1.2 \times 10^{-5} v_i$ 。

本文验证了皮托管测得的风速值采用传统 GUM 方法评定不确定度的适用性,并对其测量结果进行了有效的修正。但由于传统的 GUM 方法依然适用,该方法仅导致不确定度的偏差,且偏差率较小。因此在应用时,可根据实际情况,确定是否对其进行修正。

### 参考文献

[1] 魏明明,金锐,闻春华,等.温湿度传感器校准结果的不确定度分析与评定[J].电子测量技术,2018,41(8):35-41.  
WEI M M, JIN R, WEN CH H, et al. Uncertainty analysis and evaluation of calibration results of temperature and humidity sensor [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(8): 35-41.

[2] The Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data-Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995): JCGM 100: 2008 [S]. Switzerland: ISO, 2008:1.

[3] 黄健,肖苏,程虎.皮托管校准装置校准结果的不确定度分析[J].自动化与仪器仪表,2013(4),109-110.  
HUANG J, XIAO S, CHENG H. Uncertainty analysis of calibration result of pitot tube calibration device [J]. Automation and Instrumentation, 2013(4), 109-110.

[4] 何宝林.以孔板和皮托管为标准器的风速测量装置[J].计量学报,2006(2):124-127.  
HE B L. Measurement of air velocity by orifice plate and pitot static tubes [J]. Acta Metrologica Sinica, 2006(2): 124-127.

[5] 孙志强,周子民,张宏建,等.皮托管测量影响因素分析 I. 检测杆与安装角的影响[J].传感技术学报,2007,20(3):690-693.  
SUN ZH Q, ZHOU J M, ZHANG H J, et al. On the influencing factors in a pitot tube measurement I. Influence of Air Horn and Mounting Angle [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(3): 690-693.

[6] 孙志强,周子民,张宏建,等.皮托管测量影响因素分析 II.全压孔与静压孔的影响[J].传感技术学报,2007,20(4):941-944.

SUN ZH Q, ZHOU J M, ZHANG H J, et al. On the influencing factors in a pitot tube measurement II. Influence of Total and Static Ports [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(4): 941-944.

[7] 刘宇,武春爱,张佳佳,等.基于检定环境对风速表标准值影响的研究[J].国外电子测量技术,2016,35(10):72-75.  
LIU Y, WU CH AI, ZHANG J J, et al. Study on verification environment based on the influence of anemometer standard value [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(10): 72-75.

[8] 郭金良,白景双,冯杰.煤矿用涡街原理风速传感器校准方法研究[J].电子测量与仪器学报,2012,26(S1):125-127.  
GUO J L, BAI J SH, FENG J. Mine works with the vortex velocity sensor calibration method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(S1): 125-127.

[9] 闫选利,王保强,卢会国,等.风速传感器检定与校准方法研究[J].成都信息工程学院学报,2012,27(4):344-348.  
YAN X L, WANG B Q, LU H G, et al. Research on verification and calibration of wind speed sensors [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2012, 27(4): 344-348.

[10] 朱乐坤,沙奕卓,温晓清.风速传感器测试结果的不确定度分析[J].仪器仪表学报,2007,28(8):444-448.  
ZHU L K, SHA Y ZH, WEN X Q. Uncertainty analysis of testing result for wind speed sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(8): 444-448.

[11] The Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data-Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement"-Propagation of distributions using a Monte Carlo method: JCGM 101: 2008 [S]. Switzerland: ISO. 2008:1.

[12] SEDIVA S, UHER M, HAVLIKOVA M. Application of the Monte Carlo method to estimate the uncertainty of air flow measurement [C]. Carpathian Control Conference. IEEE, 2015: 465-469.

[13] 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,2018,32(11):17-25.  
WEI M M. Comparative analysis of measurement uncertainty evaluation with Monte Carlo method and GUM

- [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018, 32(11): 17-25.
- [14] 王伟,宋明顺,陈意华,等.蒙特卡罗方法在复杂模型测量不确定度评定中的应用[J]. 仪器仪表学报,2008, 29(7): 1446-1449.  
WANG W, SONG M SH, CHEN Y H, et al. Application of Monte-Carlo method in measurement uncertainty evaluation of complicated mode[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(7): 1446-1449.
- [15] 魏明明. 自适应 MCM 的波动性指标收敛趋势分析[J]. 计量学报, 2019, 40(3):530-537.  
WEI M M. Analysis of convergence trend of adaptive MCM volatility index[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(3): 530-537.
- [16] 凌明祥,李会敏,黎启胜,等.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, et al. Quasi Monte Carlo method for the measurement uncertainty evaluation considering correlation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014: 35(6):1385-1393.
- [17] KANG W, TRANG N D, LEE S H, et al. Experimental and numerical investigations of the factors affecting the S-type pitot tube coefficients[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015, 44:11-18.
- [18] ADEFILA K, YAN Y, SUN L, et al. Calibration of an averaging pitot tube for gaseous CO<sub>2</sub> flowmetering[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(5): 1240-1249.
- [19] 刘园园,杨健,赵希勇,等.GUM法和MCM法评定测量不确定度对比分析[J]. 计量学报, 2018, 39(1): 135-139.  
LIU Y Y, YANG J, ZHAO X Y, et al. Comparative analysis of uncertainty measurement evaluation with GUM and MCM[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(1): 135-139.
- [20] 崔明涛,田芳,李玉全,等.差压补偿液位测量的不确定度评定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1524-1531.  
CUI M T, TIAN F, LI Y Q, et al. Research on uncertainty evaluation of the compensated differential pressure level measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7):1524-1531.

### 作者简介



魏明明,2013年于西北师范大学获得硕士学位,现为江西省大气探测技术中心工程师,国家一级注册计量师,主要研究方向为气象仪器的计量检定。

E-mail: weimingming@yeah.net

**Wei Mingming** received his M. Sc. degree from North west Normal University in 2013. Level1 Certified Metrology Engineer of China. He is currently an engineer at Jiangxi Provincial Atmospheric Observation and Technical Center. His main research interest is metrological verification of meteorological instrument.