

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106364

# 基于输入量相关性分析的 PTB210 型 气压传感器的不确定度评定研究\*

闻春华<sup>1</sup> 徐珊<sup>2</sup> 魏明明<sup>1</sup>

(1. 江西省大气探测技术中心 南昌 330096; 2. 南昌市气象局 南昌 330036)

**摘要:** 针对以往自动气象站气压传感器采用 GUM 评定不确定度时, 缺乏不确定度分量之间相关性分析的问题。以 PTB210 型的数字式气压传感器为研究对象, 参照气压传感器检定规程设计了相应的实验室校准方案, 并演算出其对应的测量模型, 在分析其不确定度分量之间的相关性的前提下, 研究制定出相应的不确定度评定的方法。通过执行该方法, 得出在 1 010 hPa 校准点时其正行程和反行程的合成标准不确定度分别为 0.065 hPa 和 0.069 hPa 的结果。结果表明, 采用该方法更加贴近实际, 不确定度评定的结果更加真实可靠, 能有效地弥补以往 GUM 评定气压传感器不确定度时的不足。

**关键词:** 气压传感器; 不确定度; GUM; 相关系数

**中图分类号:** TB09 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

## Research on uncertainty evaluation of PTB210 air pressure sensor based on correlation analysis of input components

Wen Chunhua<sup>1</sup> Xu Shan<sup>2</sup> Wei Mingming<sup>1</sup>

(1. Jiangxi Provincial Atmospheric Observation and Technical Center, Nanchang 330096, China;

2. Nanchang Meteorological Bureau, Nanchang 330036, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of lack of correlation analysis between the components of uncertainty when the air pressure sensor of automatic weather station used GUM to evaluate the uncertainty in the past. This paper takes PTB210 digital air pressure sensor as the research object, designs the corresponding laboratory calibration scheme according to the verification regulation of air pressure sensor, and calculates its corresponding measurement model. On the premise of analyzing the correlation between its uncertainty components, the corresponding uncertainty evaluation method is developed. By implementing this method, the combined standard uncertainty of forward stroke and reverse stroke is 0.065 hPa and 0.069 hPa respectively at 1 010 hPa calibration point. This method is more close to the reality, and the result of uncertainty evaluation is more real and reliable, which can effectively make up for the shortcomings of GUM in evaluating the uncertainty of air pressure sensor in the past.

**Keywords:** air pressure sensor; uncertainty; GUM; correlation coefficient

## 0 引言

气压是指作用在单位面积上的垂直空气所受到的重力, 即单位面积上的大气的压力, 其受到高度和温度的影响, 在气象学中气压的变化与各种天气现象密切相关, 因此做好气压的观测对于有效地研究和分析不同的天气现象有着重要的科学意义, 为了确保气压观测数值的准确性, 需定期对气压观测仪器进行溯源, 一般采用检定或校准方式进

行, 而在进行溯源时则需要对其测量误差进行不确定度的评定, 目前主流的不确定度评定方法为“不确定度评定指南法”(即 GUM 法)。

文献[1-6]采用 GUM 方法对常规的数字式气压计进行了示值误差的不确定度评定, 文献[7-9]分别对 PTB210 型、PTB330 型、DYC1 型气压传感器的检定结果的不确定度进行了分析。以上人员均取得了不错的研究成果, 但是在 GUM 进行不确定度评定时均未考虑输入量的相关性。

收稿日期: 2021-04-12

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(42065011)、江西省气象科技重点项目(赣气发[2018]127 号)资助

而实际往往并非如此,例如文献[10-14]在对温湿度、风速等传感器的不确定度评定研究中发现输入量中波动性和均匀性之间往往存在一定的相关性。结合以上人员的研究现状,本文将自动气象站气压传感器为研究对象,对其不确定度评定过程中输入量的相关性进行分析探讨,旨在为获取更加可靠的不确定度评定结果,进而有效地确保气压观测数值的准确性。

## 1 概述

### 1.1 测量条件

本实验将压力控制器和气压标准器及被测气压传感器通过三通连接器、连接管路进行连接,通过对比气压标准器和被测气压传感器来判定被测对象的测量误差,如图1所示。

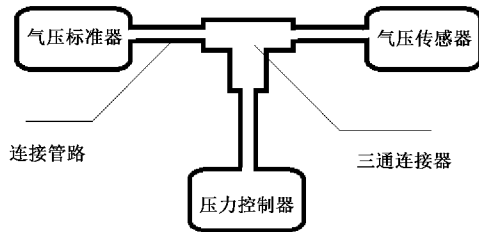


图1 气压传感器测量连接示意图

实验选取 PTB210 型的数字式气压传感器为被测对象,气压标准器选取 745-16B 型数字气压计,配套的压力控制器选取 YKQ-20-B 型便携式的气压发生器。

### 1.2 测量方法

测量方法参照检定规程《JJG(气象)001-2015 自动站气压传感器检定规程》的执行步骤,选取 1 010 hPa 为测试气压点,对 PTB210 型的数字式气压传感器进行校准,校准通过对比其与气压标准器求测量误差的方式进行。配套的测试软件选取省级计量检定管理系统(3MS 系统),在温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,湿度为  $(55 \pm 5)\% \text{RH}$  的环境下进行。

### 1.3 测量模型

结合以上测量方法对 PTB210 型的数字式气压传感器进行示值误差的测量,建立的测量模型为:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \overline{p'} - (\overline{p} + c) + \delta p_H \\ \overline{p'} &= \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 p'_i \\ \overline{p} &= \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 p_i \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $\Delta p$  表示气压传感器的测量误差;  $\overline{p'}$ 、 $\overline{p}$  分别表示气压标准器和被测气压传感器测量结果的平均值(通常每分钟读取 1 次数据,一共读取 4 次,取 4 次读数的平均值);  $c$  表示标准器在该点的修正值;  $\delta p_H$  表示由高度差引入的测量误差的修正值。考虑到在进行实验室,气压标准器和被测气压传感器处于同一水平面,因此  $\delta p_H = 0 \text{ hPa}$ ,另查询到所使用的气压标准器的上级溯源检定证书,在

1 010 hPa 测试点时,对应的修正值为 0 hPa,因此  $c = 1 010 \text{ hPa}$ 。因此,式(1)可简化为式(2)所示。

$$\Delta p = \overline{p'} - \overline{p} \quad (2)$$

## 2 测量不确定度来源分析及评定

本实验的不确定度采用的是 GUM 方法,该方法可参照《JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示》计量校准规范,其评定结果一般以扩展不确定度的形式进行表示,如式(3)所示。

$$U = k u_c \quad (3)$$

其中,  $k$  表示相关系数,一般  $k = 2$ ,  $u_c$  表示合成标准不确定度,其一般采用 A 类不确定度和 B 类不确定度分别进行评定,如式(4)所示。

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (4)$$

其中,  $u_A$  表示 A 类不确定度,即独立重复测量所引入的不确定度。  $u_B$  表示 B 类不确定度,其表示通过一切可利用的有关信息进行科学判断,得到的估计值的偏差所引入的不确定度。通常 B 类标准不确定度不止一个。在以往的评定中,一般默认为 B 类标准不确定度各输入量彼此之间彼此不相关,通常采用式(5)进行简单的套用。

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{B_i}^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

而实际情况往往并非如此。若考虑到 B 类标准不确定度输入量之间彼此的相关性,则需进行相关系数分析。则 B 类标准不确定度需表示为<sup>[15]</sup>:

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_{B_i}) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N r(x_{B_i}, x_{B_j}) u(x_{B_i}) u(x_{B_j})}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

其中,  $u_B$  为 B 类标准不确定度;  $x_{B_i}, x_{B_j}$  为 B 类标准不确定度输入量的估计值;  $n$  为 B 类标准不确定度输入量的数量;  $u(x_{B_i}), u(x_{B_j})$  为  $x_{B_i}, x_{B_j}$  的 B 类标准不确定度输入量的分量;  $r(x_{B_i}, x_{B_j})$  为  $x_{B_i}, x_{B_j}$  输入量相关系数。

### 2.1 A 类不确定度的评定

通过对 1 010 hPa 点进行测试,实验分正行程(气压调压时从低向高的行程)和反行程(气压调压时从高向低的行程)分别进行,其中每隔 1 min 读取 1 次标准器和被检传感器的气压值,正反行程各取 4 次读数。然后再分别计算其对应的误差值及相关的均值,获取的数据如表 1 所示。

对 PTB210 型的数字式气压传感器进行多次重复测量引入的标准不确定度(即 A 类标准不确定度),由于正反行程各测量 4 次,根据 GUM 法评定 A 类不确定度的要求,当独立重复测量不足 10 次时,相对于贝塞尔公式求标准偏差方法,极差法更准确可靠,因此采用极差法进行计算,如式(7)所示。

$$u_A = \frac{S(x)}{\sqrt{n}} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{C_n \cdot \sqrt{n}} \quad (7)$$

正行程误差值中最大值  $x_{\max} = 0.12 \text{ hPa}$ ,最小值  $x_{\min} =$

表1 1 010 hPa 测试点相关实验数据

读数次数		1	2	3	4	均值
正行程	标准	1 010.06	1 010.08	1 010.11	1 010.09	1 010.085
	被检	1 010.15	1 010.19	1 010.23	1 010.21	1 010.195
	误差值	0.09	0.11	0.12	0.12	0.11
反行程	标准	1 010.04	1 010.03	1 010.06	1 010.12	1 010.062 5
	被检	1 010.17	1 010.18	1 010.20	1 010.22	1 010.192 5
	误差值	0.13	0.15	0.14	0.10	0.13

0.09 hPa,测量次数  $n=4$  时,对应的极差系数  $C_n=2.06$ ,同理,反行程误差值中最大的  $x_{max}=0.15$  hPa,最小值  $x_{min}=0.10$  hPa,测量次数  $n=4$  时,对应的极差系数  $C_n=2.06$ 。通过式(5)分别计算出 1 010 hPa 测试点时正行程  $u_A=0.007$  hPa,反行程  $u'_A=0.012$  hPa。

2.2 B类不确定度的评定

B类不确定度表示通过一切可利用的有关信息进行科学判断,所引入的不确定度。根据对 PTB210 型气压传感器的校准实验分析,得出对其校准结果有影响的有关信息包括气压标准器最大允许误差引入、由分辨率所导致的修约误差引入、由压力控制器的稳定性引入和气路的均匀性引入。通过对以上信息进行分析,由气压标准器最大允许误差引入的不确定度分量和由分辨率所导致的修约误差引入的不确定度分量,均属于独立不相关的两个不确定度输入量来源,与其他不确定度输入量来源彼此之间并不存在彼此相互影响,因此其并不存在相关性。与此同时,由于压力控制器的稳定性会导致实验时气路的均匀性产生变化,因此压力控制器的稳定性引入的不确定度分量和气路的均匀性引入的不确定度分量之间存在一定的相关性,需进行相关系数的计算。现将对以上不同的 B类不确定度分量分别进行分析。

1)标准器引入

根据该实验采用的 745-16B 型数字气压计,其对应的

最大允许误差  $\delta = \pm 0.1$  hPa,其对应的区间半宽度为 0.1 hPa,按照其分布类型为均匀分布来考虑,对应的包含因子  $k = \sqrt{3}$ ,因此由该分量引入的标准不确定度为:

$$u_{B1} = \frac{\delta}{\sqrt{3}} = 0.1 \text{ hPa} / \sqrt{3} = 0.06 \text{ hPa}$$

2)由分辨率引入

根据被测传感器的输出精确到小数点后两位,即 0.01 hPa,其因为分辨率导致的修约误差为  $\delta = \pm 0.005$  hPa,其对应的区间半宽度为 0.005 hPa,同样满足均匀分布,对应的包含因子  $k = \sqrt{3}$ ,由此分量引入的标准不确定度为:

$$u_{B2} = \frac{\delta}{\sqrt{3}} = 0.005 \text{ hPa} / \sqrt{3} = 0.002 9 \text{ hPa}$$

3)由压力控制器的稳定性和气路的均匀性引入

由整个实验测量连接过程发现,整个实验测试气路属于封闭连接的环境,其整个气压的稳定性主要取决于气压发生器的稳定性,因此通过观察 YKQ-20-B 型便携式的气压发生器在达到测试点 1 010 hPa 之后,其气压的读数可间接反映出压力控制器的稳定性。同理,通过 745-16B 型数字气压标准器可监测出气路的均匀性。在进行校准实验的同时,当气压发生器和标准器都达到 1 010 hPa 测试点后,每隔 20 s 分别监测气压标准器和气压发生器数据,实验数据如表 2 所示。

表2 1 010 hPa 测试点气压标准器和气压发生器测试数据

读数次数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
正行程	发生器(x)	1 010.04	1 010.08	1 010.09	1 010.12	1 010.05	1 010.06	1 010.13	1 010.14	1 010.12	1 010.05
	标准(y)	1 010.06	1 010.07	1 010.10	1 010.12	1 010.06	1 010.05	1 010.09	1 010.07	1 010.06	1 010.10
反行程	发生器(x)	1 010.05	1 010.08	1 010.06	1 010.06	1 010.05	1 010.09	1 010.15	1 010.14	1 010.12	1 010.10
	标准(y)	1 010.09	1 010.03	1 010.08	1 010.12	1 010.13	1 010.10	1 010.09	1 010.07	1 010.09	1 010.11

(1)由压力控制器的稳定性

正行程压力控制器(即气压发生器)的控制范围在(1 010.04~1 010.14) hPa 区间,反行程其控制范围在(1 010.05~1 010.15) hPa 区间,其区间范围均为 0.1 hPa,对应的区间半宽度均为 0.05 hPa,满足均匀分布,包含因子  $k = \sqrt{3}$ ,由此正行程引入的标准不确定度  $u_{B3}$  和反行程不确定度  $u'_{B3}$  为:

$$u_{B3} = u'_{B3} = \frac{\delta}{\sqrt{3}} = 0.05 \text{ hPa} / \sqrt{3} = 0.029 \text{ hPa}$$

(2)由气路的均匀性引入

正行程气压标准器的变化范围在(1 010.06~1 010.12) hPa 区间,其区间范围均为 0.06 hPa,对应的区间半宽度为 0.03 hPa,反行程其变化范围在(1 010.03~1 010.13) hPa 区间,其区间范围均为 0.10 hPa,对应的区间半宽度为 0.05 hPa,均满足均匀分布,包含因子  $k = \sqrt{3}$ ,由此正行程引入的标准不确定度  $u_{B4}$  和反行程引入的标准不确定度  $u'_{B4}$  分别为:

$$u_{B4} = \frac{\delta}{\sqrt{3}} = 0.03 \text{ hPa}/\sqrt{3} = 0.017 \text{ hPa}$$

$$u'_{B4} = \frac{\delta}{\sqrt{3}} = 0.05 \text{ hPa}/\sqrt{3} = 0.029 \text{ hPa}$$

### (3) 相关系数

根据表2的测得值,以正行程为例,相关系数的计算公式为:

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})}{(10-1) \cdot s(x) \cdot s(y)} \quad (8)$$

其中,  $x$  和  $y$  分别表示气压发生器和气压标准器的测试数据,  $s(x)$ 、 $s(y)$  分别为气压发生器和气压标准器对应实验数据的标准差,根据表2中相关数据进行计算:

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{10-1} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 0.011 \ 813 \ 36$$

$$s(y) = \sqrt{\frac{1}{10-1} \sum_{i=1}^{10} (y_i - \bar{y})^2} = 0.007 \ 272 \ 47$$

同时计算出:

$$\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = 0.000 \ 246$$

并将以上计算结果代入式(8)计算相关系数得出:

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})}{(10-1) \cdot s(x) \cdot s(y)} = \frac{0.000 \ 246}{9 \times 0.011 \ 813 \ 36 \times 0.007 \ 272 \ 47} = 0.318 \ 2$$

同理,将表2中反行程相关数据按照以上方案进行计算,具体过程在此不在赘述,其相关系数结果为:

$$r'(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^{10} (x'_i - \bar{x}')(x'_i - \bar{x}')}{(10-1) \cdot s(x') \cdot s(y')} = \frac{-0.000 \ 24}{9 \times 0.011 \ 642 \ 83 \times 0.008 \ 875 \ 68} = -0.258$$

### 2.3 合成标准不确定度的评定

PTB210型的数字式气压传感器在1010 hPa校准点对应的B类标准不确定度可知,仅  $u_{B3}$  和  $u_{B4}$  之间存在相关性,以正行程为例,将  $u_{B1} \sim u_{B4}$  代入B类标准不确定度的计算式(6)得:

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_{i_k}) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N r(x_{i_k}, x_{j_k}) u(x_{i_k}) u(x_{j_k})} = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + 2r(x, y) \cdot u_{B3} \cdot u_{B4}} \quad (9)$$

将以上B类标准不确定度代入式(4),得出合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + 2r(x, y) \cdot u_{B3} \cdot u_{B4}} = 0.065 \text{ hPa}$$

同理,得到反行程的合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + 2r'(x, y) \cdot u'_{B3} \cdot u'_{B4}} = 0.069 \text{ hPa}$$

### 2.4 评定结果的表示

通过合成标准不确定度,将其代入式(3),计算出对应的正行程和反行程扩展不确定度分别为  $U=0.131 \text{ hPa}$ ,  $U=0.137 \text{ hPa}$ ,根据《JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示》相关要求,扩展不确定度一般保留1~2位有效数字,当第1位有效数字为1或2时,应保留2位有效数字,同时应该将保留数末位后的数字全部进位。对应的正行程和反行程的扩展不确定度均为  $0.14 \text{ hPa}$ 。

### 3 结 论

科学合理的不确定度评定方法对于测量结果的准确性有着至关重要的作用,本实验所采用的不确定度评定方法参照《JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示》相关要求执行,通过分析不确定度来源主要包括A类不确定度(即重复性引入的不确定度)、标准器最大允许误差、分辨率所导致的修约误差、压力控制器的稳定性和气路的均匀性等。分析发现压力控制器的稳定性和气路的均匀性存在相关性,并通过具有相关性不确定度传播律公式进行计算得到了相应的不确定度评定结果。该方法相对于未分析不确定度分量之间相关性的不确定度评定方案而言,其评定结果更加客观真实可靠。

### 参考文献

- [1] 杨卫洁. 标准数字式气压计示值误差测量不确定度评定[J]. 中国计量, 2021(2): 110-112.
- [2] 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.
- [3] 刘洪涛, 龚熙. 气压传感器测量不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(12): 112-115.
- [4] 谢连妮, 隋丹, 曹蕾. 基于GUM法的气压传感器检定结果不确定度分析[J]. 黑龙江气象, 2018, 35(4): 31-32.
- [5] 周飞, 邵国忠, 蒋兴. 数字式气压计示值误差测量不确定度评定[J]. 中国计量, 2018(12): 92-93.
- [6] 孙涛, 陈金明, 林雁波. 数字式气压计校准结果不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(5): 110-111, 114.
- [7] 张敏. PTB210 气压传感器检定结果不确定度分析与评定[J]. 电子技术与软件工程, 2019(19): 222-223.
- [8] 王旭, 孔诗媛, 张昊喆, 等. PTB330 型气压传感器示值误差测量不确定度评定[J]. 气象水文海洋仪器, 2021, 38(1): 42-44.
- [9] 蒋涛, 于平, 刘宇. DYC1 型数字气压传感器检定结果的不确定度分析[J]. 内蒙古气象, 2017(4): 46-48.
- [10] 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.
- [11] 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.

- [12] 魏明明. 皮托管测量风速时 GUM 评定不确定度的偏差修正[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 146-154.
- [13] 魏明明. 风速测量结果中关于水汽修正项的影响分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(6): 103-111.
- [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, 32(11): 17-25.
- [15] 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]. 北京: 中国质检出版社, 2012.

#### 作者简介

**闻春华**, 副研级高工, 主要从事综合气象观测业务。

E-mail: 380653383@qq.com

**魏明明**(通信作者), 工程师, 主要从事气象观测仪器的计量检定工作。

E-mail: wcimingming@yeah.net