

李建英, 贺晓雷, 于贺军, 等. 空气密度对 PG7607 活塞压力计测量结果的影响[J]. 气象, 2011, 37(5): 622-625.

# 空气密度对 PG7607 活塞压力计测量结果的影响<sup>\*</sup>

李建英 贺晓雷 于贺军 王有利

中国气象局气象探测中心, 北京 100081

**提 要:** 由于空气密度测量的影响所引入的不确定度分量是活塞压力计测量结果不确定度的主要组成部分之一。本文针对 PG7607 基准级活塞压力计通过公式推导分析了这种影响的程度, 结果表明: 空气密度对于该活塞压力计测量结果的影响与使用地点环境大气的温湿压状态有关; 与使用地点环境大气温湿压测量结果的不确定度有关; 针对实验室条件, 在全国范围内, 空气密度对于该活塞压力计测量结果的影响在 0.25 ppm 至 0.35 ppm 范围内, 在北京地区, 空气密度对于该活塞压力计测量结果的影响在 0.31 ppm 至 0.33 ppm 范围内。除了由于温湿压测量误差的不同引起的最终计算结果不同外, 本文的分析方法适用于其他类型的活塞压力计。

**关键词:** PG7607 活塞压力计, 测量不确定度, 空气密度, 影响

## The Effect of Air Density on Measurement Result of PG7607 Piston Pressure Gauge

LI Jianying HE Xiaolei YU Hejun WANG Youli

CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

**Abstract:** As the uncertainty component introduced by the effect of air density measurement is one of the main compositions of the measurement result uncertainty of the piston pressure gauge, the paper analyzed the effect degree with formula derivation to PG7607 primary piston pressure gauge, the results show that: the effect of the air density to the measurement results of the piston pressure gauge is related to the environmental atmospheric temperature, humidity, pressure status at the using site; related to the measurement result uncertainty of environmental atmospheric temperature, humidity, pressure at using sites. With the laboratory condition, the effect of the air density to measurement results of the piston pressure gauge is in the range from 0.25 ppm to 0.35 ppm in China, the effect of air density to the measurement results of piston pressure gauge is in the range from 0.31 ppm to 0.33 ppm in Beijing. The analysis method in this paper can be applied to other type piston pressure gauges, besides the final computation result differences due to the difference of temperature, humidity and pressure measurement errors.

**Key words:** PG7607 piston pressure gauge, measurement uncertainty, air density, effect

## 引 言

在许多国家计量院和重要的实验室, 已普遍使用活塞压力计作为压力标准器。我国气象部门早在

1993 年, 从美国引进 Ruska2465 活塞压力计, 最佳测量能力达到 35 ppm ( $1 \text{ ppm} = 1 \times 10^{-6}$ )。基于该活塞压力计所建立的气压量传体系对于保证以动槽或定槽水银气压表为主的气压观测网络观测数据的准确提供了可靠的支撑。

\* 气候观测综合计量检定技术研究(GYHY200706003)资助

2010 年 6 月 9 日收稿; 2010 年 12 月 26 日收修定稿

第一作者: 李建英, 主要从事气象仪器检定工作. Email: liyaoc@cma.gov.cn

2000年前后,我国各级气象部门陆续建立了自动气象站,自动气象站测量气压广泛使用芬兰 VAISALA 公司生产的 PTB220 数字气压表。该数字气压表的校准不确定度已达到 0.15 hPa,远远高于人工观测气压使用的动槽或定槽水银气压表<sup>[1-2]</sup>。为适应这一变化,2008 年国家气象计量站引进了美国 DHI 公司的 PG7607 活塞压力计,最佳测量能力达到 8 ppm。尽管活塞压力计在最佳测量能力上优于其他压力测量仪器,但是其在使用中所复现压力的不确定度受到空气密度、本地重力加速度、环境温度、水平状态、活塞倾斜程度等多达十余项因素的影响。

由于在绝压测量模式下,活塞压力计的输出压力以真空为参考,因此空气密度仅对活塞压力计的表压测量模式存在影响。对于这种影响,国内同行针对密度为  $1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  的标准大气状态进行了广泛的探讨和分析。这种方法对于 50 ppm 以下的活塞压力计已经可以满足应用需要,但是对于不确定度达到 8 ppm 的基准级活塞压力计来讲尚且不足。本文针对实验室环境条件,对环境空气密度及其不确定度对活塞压力计压力复现结果的影响进行了全量程范围的分析,确定了活塞压力计使用中的最佳大气状态。

## 1 活塞压力计工作原理

活塞压力计主要由活塞组件和砝码等组成,结构原理如图 1 所示。

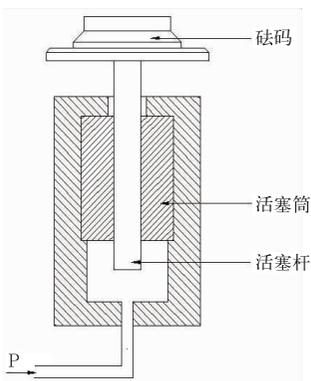


图 1 活塞压力计结构原理  
Fig. 1 The structural principle of piston pressure gauge

当活塞压力计处于平衡悬浮状态时,所复现的压力(实际为压强)满足式(1)。

$$p = \frac{mg}{A} \quad (1)$$

式中: $p$  为工作压力(表压),单位:Pa;  $m$  为砝码、活塞及连接件总质量(真空中的质量),单位:kg;  $g$  为活塞压力计工作地点的重力加速度,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $A$  为活塞有效面积,单位: $\text{m}^2$ 。

在表压状态下,活塞压力计在实际使用中,砝码和活塞杆所产生的重力将由于空气浮力的影响而小于理论值,而活塞杆的面积也将在温度和压力的影响下有所变化,因此需要加以修正。实际工作中活塞压力计所复现的压力满足式(2)。

$$p = \frac{mg(1 - \frac{\rho}{\rho_m})}{A_0[1 + \alpha(t - 20)](1 + \lambda p)} \quad (2)$$

式中: $\rho$  为空气密度,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\rho_m$  为砝码密度,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $A_0$  为活塞组件在零压力和  $20^\circ\text{C}$  下的有效面积,单位: $\text{m}^2$ ;  $\alpha$  为活塞杆和活塞筒的线性热膨胀系数,单位: $1/^\circ\text{C}$ ;  $t$  为活塞组件温度,单位: $^\circ\text{C}$ ;  $\lambda$  为压力形变系数,单位: $1/\text{MPa}$ 。

由式(2)可见,实际工作中活塞压力计所复现的压力与空气密度  $\rho$  相关,因此,空气密度  $\rho$  及其不确定度将对所复现压力的不确定度产生影响。

## 2 空气密度计算公式

对于实际的湿空气,其空气密度的计算公式<sup>[3]</sup>如下:

$$\rho = \frac{p_A M_a}{ZRT} \left[ 1 - X_V \left( 1 - \frac{M_V}{M_a} \right) \right] \quad (3)$$

式中: $p_A$  为环境大气压力,单位:Pa;  $M_a$  为干空气摩尔质量,单位:kg;  $Z$  为压力为  $p$ , 温度为  $T$  时湿空气的压缩系数;  $R$  为气体常数;  $T$  为气体绝对温度,单位:K;  $X_V$  为水汽摩尔分数,按式(4)计算;  $M_V$  为水汽摩尔质量,单位:kg。

$$X_V = \frac{e}{p_A} \quad (4)$$

式中  $e$  为水汽分压,单位为 Pa,其数值可按式计算。

$$e = U p_{sv} \quad (5)$$

式中: $U$  为以小数点形式表示的相对湿度;  $p_{sv}$  为温度为  $T$  时的饱和水汽压,单位:Pa。

根据式(3)~(5),可推导出湿空气密度与环境大气压力、气体绝对温度、气体相对湿度以及当前温度下饱和水汽压的关系,见式(6)。

$$\rho = \frac{M_a}{ZR T} (p_A - 0.378U p_{sw}) \quad (6)$$

将  $M_a/R = 3.48349$  (1991 年 CIPM-81 公式使用的推荐值) 代入式(6), 有:

$$\rho = \frac{3.48349 \times 10^{-3}}{ZT} (p_A - 0.378U p_{sw}) \quad (7)$$

通过式(7), 可以看出对空气密度标准不确定度分量有影响的量有环境压力  $p_A$ 、温度  $T$ 、湿度  $U$ 、空气压缩系数  $Z$ 。

### 3 空气密度的标准不确定度 $u(\rho)$

PG7607 活塞压力计底座安装有环境压力传感器、环境温度传感器及湿度传感器, 这些传感器对环境实时测量, 实时进行空气密度的计算, 进而计算其复现的压力。因为空气密度是环境压力、温度、湿度和空气压缩系数的函数, 因此, 环境压力、温度、湿度和空气压缩系数的测量不确定度都将影响空气密度的不确定度。表 1 给出了在一定环境条件下使用各传感器的测量标准不确定度。根据表 1 各传感器使用的环境条件, 查湿空气的压缩系数表<sup>[3]</sup>, 空气压缩系数  $Z \approx 1$ 。可将式(7)中的  $Z$  按 1 取值。

表 1 在一定环境条件下使用各传感器的测量标准不确定度

Table 1 The measurement standard uncertainties of various sensors under certain environmental conditions		
测量变量	传感器测量的标准不确定度 <sup>[4]</sup>	环境条件
温度 $T$	0.5 K	19~23 °C
压力 $p_A$	0.1 kPa	700~1100 hPa
相对湿度 $U$	5.0%	50%~70%

#### 3.1 饱和水汽压 $p_{sw}$ 的计算<sup>[5]</sup>

$$p_{sw} = \exp(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T}) \quad (8)$$

式(8)中:

$A = 1.23778847 \times 10^{-5} \text{ K}^{-2}$ ,  $B = -1.9121316 \times 10^{-2} \text{ K}^{-2}$ ,  $C = 33.93711047$ ,  $D = -6.3431645 \times 10^3 \text{ K}^{-1}$ ,  $T$  为热力学温度, 单位: K。

常数  $A, B, C, D$  值为 1991 年 CIPM-81 公式使用的推荐值, 从式(8)可以看出, 饱和水汽压只与温度有关。

#### 3.2 温度测量引入空气密度不确定度分量的计算

对式(7)中  $T$  求偏导, 有:

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} = -\frac{3.48349 \times 10^{-3}}{T^2} \left\{ p_A + 0.378U e^{(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T})} \times [T(2AT + B - \frac{D}{T^2}) - 1] \right\} \quad (9)$$

$\frac{\partial \rho}{\partial T}$  为温度测量引入空气密度不确定度分量的

灵敏系数,  $u(T) = 0.5 \text{ K}$ , 因此, 温度测量引入空气密度不确定度分量  $u_T(\rho)$  可表示为灵敏系数与温度测量标准不确定度  $u(T)$  的乘积<sup>[6]</sup>。

#### 3.3 压力测量引入空气密度不确定度分量的计算

对式(7)中  $p_A$  求偏导, 有:

$$\frac{\partial \rho}{\partial p_A} = 3.48349 \times 10^{-3} \frac{1}{T} \quad (10)$$

$\frac{\partial \rho}{\partial p_A}$  为压力测量引入空气密度不确定度的灵敏

系数,  $u(p_A) = 100 \text{ Pa}$ , 压力测量引入空气密度不确定度分量  $u_{p_A}(\rho)$  可表示为灵敏系数与压力测量标准不确定度  $u(p_A)$  的乘积<sup>[6]</sup>。

#### 3.4 湿度测量引入空气密度不确定度分量的计算

对式(7)中  $U$  求偏导, 有:

$$\frac{\partial \rho}{\partial U} = -3.48349 \times 10^{-3} \frac{1}{T} \times 0.378 p_{sw} \quad (11)$$

$\frac{\partial \rho}{\partial U}$  为湿度测量引入空气密度不确定度分量的

灵敏系数,  $u(H) = 5\% = 0.05$ , 湿度测量引入空气密度不确定度分量  $u_U(\rho)$  可表示为灵敏系数与湿度测量标准不确定度  $u(U)$  的乘积<sup>[6]</sup>。

#### 3.5 空气密度的合成标准不确定度 $u_c(\rho)$

由于环境温度测量分量、压力测量分量和湿度测量分量互不相关, 遵循测量不确定度评定与表示中合成标准不确定度的计算公式<sup>[6]</sup>, 因此空气密度合成标准不确定度为各分量引入标准不确定度的方和根, 见式(12)。

$$u_c(\rho) = f_1(T, p_A, U) = \sqrt{\left[ \frac{\partial \rho}{\partial T} \times u(T) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \rho}{\partial p_A} \times u(p_A) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \rho}{\partial U} \times u(U) \right]^2} \quad (12)$$

通过式(9)至式(11)可以看出,  $u_c(\rho)$  是环境温度  $T$ 、环境压力  $p_A$  和环境湿度  $U$  的函数。

在表 1 所规定的  $T, p_A, U$  变化范围内, 通过 MATLAB 编程可计算出  $u_c(\rho)$  的最小值为 0.00203

$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 出现在环境压力为 700 hPa、温度为 19 °C 及相对湿度为 50% 的条件下。 $u_c(\rho)$  的最大值为 0.00280  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 出现在环境压力为 1100 hPa、温度为 23 °C 及相对湿度为 70% 条件下。

在北京地区环境压力在(1000±50) hPa 范围、实验室环境温度控制在(20±1) °C 范围、湿度环境控制在 50%~70% 范围内, 通过 MATLAB 编程可计算出  $u_c(\rho)$  的最小值为 0.00245  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 出现在环境压力为 950 hPa、温度为 19.9 °C 及相对湿度为 50% 的条件下。 $u_c(\rho)$  的最大值为 0.002685  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 出现在环境压力为 1050 hPa、温度为 21 °C 及湿度为 70% 条件下。

#### 4 空气密度对压力测量引入的标准不确定度分量 $u_{r,\rho}(p)$

空气密度对压力测量引入的标准不确定度分量表示为:  $u_{r,\rho}(p) = c_{r,\rho} \times u_c(\rho)$ , 即空气密度标准不确定度与它的灵敏系数的乘积<sup>[6]</sup>, 其中  $c_{r,\rho}$  为灵敏系数。

##### 4.1 空气密度对压力测量标准不确定度灵敏系数 $c_{r,\rho}$ 的计算

对式(2)中  $\rho$  求偏导, 有:

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = - \frac{mg}{A_0[1 + \alpha(t - 20)](1 + \lambda p)\rho_m}$$

$$c_{r,\rho} = f_2(\rho_m) = \left| \frac{1}{p} \times \frac{\partial p}{\partial \rho} \right| \approx \left| - \frac{1}{\rho_m} \right| = \left| - \frac{1}{8000} \right| = 125 \text{ ppm}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$$

$c_{r,\rho}$  为空气密度引入标准不确定度的灵敏系数。

##### 4.2 空气密度对压力测量引入的标准不确定度分量 $u_p$ 的计算

$$u_{r,\rho}(p) = c_{r,\rho} u_c(\rho) = f_2(\rho_m) f_1(T, p_A, U) \quad (k=1)$$

$u_{r,\rho}(p)$  最大值为 0.35 ppm, 最小值为 0.25 ppm。

在北京地区, 实验室温湿度环境加以控制的条件下,  $u_{r,\rho}(p)$  最大值为 0.33 ppm, 最小值为 0.31 ppm。

## 5 结论

(1) 空气密度对于活塞压力计测量结果的影响与使用地点环境大气的温湿压状态有关; 与使用地点环境大气温湿压测量结果的不确定度有关。

(2) 在全国范围内, 环境压力在 700~1100 hPa 范围、实验室环境温度控制在 19~23 °C 范围、相对湿度环境控制在 50%~70% 范围内, 空气密度对于活塞压力计测量结果的影响在 0.25 ppm 至 0.35 ppm 范围内。

(3) 在北京地区环境压力在(1000±50) hPa 范围、实验室环境温度控制在 19~21 °C 范围、相对湿度环境控制在 50%~70% 范围内, 空气密度对于活塞压力计测量结果的影响在 0.31 ppm 至 0.33 ppm 范围内。

值得指出的是, 尽管由于空气密度引入的不确定度分量对于 PG7607 活塞压力计不确定度的贡献仅为 8.4%, 但是由于对其不确定度有影响的分量包括了砝码、有效面积、重力加速度、空气密度、砝码密度等十几个方面, 因此在基标准级计量仪器比对进行不确定度分析时, 空气密度分量对压力测量引入的标准不确定度也是不能忽略的。

## 参考文献

- [1] PTB220 Series Digital Barometers User's GUIDE. Finland: Vaisala Oyj. 2001:71-72.
- [2] 鞠晓慧, 任芝花, 曹丽娟, 等. 自动与人工观测气压的差异与原因分析[J]. 气象, 2010, 36(1):104-110.
- [3] 李英干, 范金鹏. 湿度测量[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 46-484.
- [4] Michael Bair, Pierre Delajoud. Uncertainty Analysis for Pressure Defined by a PG7601, PG7102, PG7202 OR PG7302 PISTON GAUGE. DH Instruments, Inc. Technical Note 7920TN01C. 1996:10-13.
- [5] 姚弘, 陈利. JJG99-2006 砝码检定规程[M]. 北京: 中国计量出版社, 2006:42-44.
- [6] 李慎安, 施昌彦, 刘凤. JJF1059-1999 测量不确定度评定与表示[M]. 北京: 中国计量出版社, 1999:16-18.