

李建英,贺晓雷,于贺军,等. PG7607 基准级活塞压力计零级有效面积的确定[J]. 气象,2011,37(9):1173-1177.

PG7607 基准级活塞压力计零级有效面积的确定^{* 1}

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: 对于活塞压力计,零级有效面积是其最重要的参量。利用作为压力基准级活塞压力计活塞-活塞筒几何尺寸的测量结果,用几何法计算活塞压力计的零级有效面积和不确定度,活塞压力计零级有效面积计算结果为 1961.0276 mm^2 ,其扩展不确定度为 $4.3 \text{ ppm}(k=2, 1 \text{ ppm}=10^{-6})$;用压力平衡法获得活塞零级有效面积的结果为 1961.0279 mm^2 ,其扩展不确定度计算结果为 $15 \text{ ppm}(k=2)$;用几何法获取活塞零级有效面积的不确定度最小,活塞零级有效面积为 1961.0276 mm^2 。

关键词: PG7607 活塞压力计, 零级有效面积, 零级有效面积不确定度

Determination of the Initial Effective Area of the PG7607 Primary Standard Piston Pressure Gauge

LI Jianying HE Xiaolei YU Hejun WANG Youli

CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

Abstract: The initial effective area is the most important parameter to a piston pressure gauge. The initial effective area and uncertainty of the piston pressure gauge are calculated with a dimensional method, by aid of the dimensional measurement results of the piston and cylinder of the primary piston pressure gauge. The calculation result of the initial effective area of the piston pressure gauge is 1961.0276 mm^2 , with an extended uncertainty of $4.3 \text{ ppm}(k=2, 1 \text{ ppm}=10^{-6})$; The initial effective area of the piston obtained with a pressure balance method is 1962.0279 mm^2 , with an extended uncertainty of $15 \text{ ppm}(k=2)$. Therefore, the uncertainty of the piston effective area obtained with the dimensional method is the smallest, and the piston initial effective area is 1961.0276 mm^2 .

Key words: PG7607 piston pressure gauge, initial effective area, uncertainty of the initial effective area

引 言

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^[1-2]。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 全自动气体活塞压力计(以下简称 PG7607),最佳测量能力由原来的 35 ppm

($1 \text{ ppm}=10^{-6}$)提升到了 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,但其所复现的大气压力量值的不确定度与活塞的零级有效面积、所加载的砝码组的质量、当地重力加速度等十几项因素密切相关。在这十几项影响因素中,零级有效面积所引入的相对不确定度分量与活塞压力计复现压力的相对不确定度之间的相关性达到 100% ,是影响最为严重的因素之一。因此,准确的确定零级活塞有效面积的数值,是保证 PG7607 所复现的压力量值准确可靠的前提。

对于零级有效面积的确定,从实验的简单性和

* 气候观测综合计量检定技术研究(GYHY200706003)资助

2010 年 7 月 1 日收稿; 2011 年 1 月 25 日收修定稿

第一作者: 李建英,主要从事气象仪器计量检定技术研究. Email: ljyao@cma.gov.cn

成本的经济性出发,国内普遍采用被称为压力平衡法的实验过程来完成。近年来,国际上越来越多的报告表明,通过基于几何测量的几何法,正逐步成为确定零级有效面积的另外一条途径。

基于这样一个背景,国家气象计量站分别采用压力平衡法和几何法获取了 PG7607 零级有效面积,在对两个结果进行了分析和比较后,依据结果不确定度最小原则,最终选择了几何法所获得的结果作为零级有效面积的值。

1 零级活塞有效面积

零级活塞有效面积(以下简称活塞有效面积)是指在某一温度、零压力下活塞系统的等效面积。活塞有效面积的温度一般是在 20℃ 或 23℃ 条件下,活塞有效面积^[3]在数值上等于活塞截面积与活塞系统间隙面积之半的和,活塞有效面积示意图如图 1 所示。图 1 虚线圆所表示的面积为活塞有效面积,根据式(1)计算活塞的有效面积。

$$A_0 = \frac{1}{4}\pi d_p^2 + \frac{1}{8}\pi(d_c^2 - d_p^2) \quad (1)$$

式中: d_p :活塞外径,单位为 mm; d_c :活塞筒内径,单位为 mm; A_0 :活塞组件在零压力和 20℃ 条件下的有效面积,单位 mm^2 。

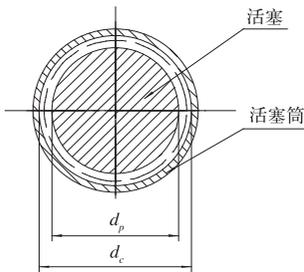


图 1 活塞有效面积示意图

Fig. 1 Diagram of piston effective area

2 通过几何法计算活塞有效面积

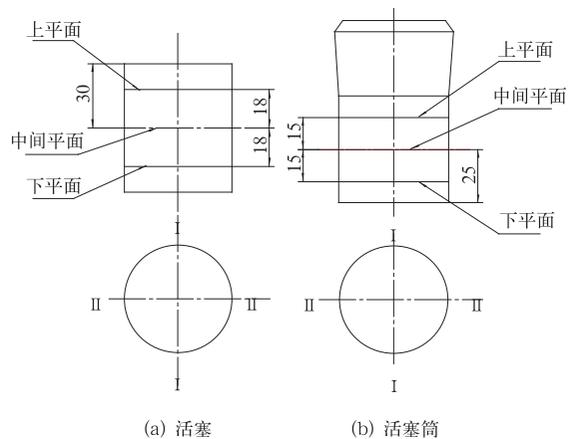
2.1 几何法原理

几何法是根据活塞有效面积的定义,对活塞和

活塞筒几何尺寸进行测量,根据测量结果计算活塞有效面积。

2.2 几何测量及测量结果

在 2008 年初,加拿大国家实验室对 PG7607 的活塞和活塞筒进行了几何尺寸测量。该实验室分别对 PG7607 活塞和活塞筒的三个不同高度(中间平面位置、上平面位置和下平面位置)、两个相互垂直的位置(I 和 II)进行了测量。在加拿大国家实验室提供的校准报告^[4](LS-2008-0001)中,给出了活塞和活塞筒几何尺寸的测量结果及不确定度。活塞测量的中心高度为距活塞顶向下 30 mm 的位置,该测量位置为中间平面,距活塞测量中心高度 +18 mm 的测量平面为上平面,距活塞测量中心高度 -18 mm 的测量平面为下平面。活塞筒测量的中心高度为距活塞筒底面向上 25 mm 的位置,该测量位置为中间平面,距活塞筒测量中心高度 +15 mm 的测量平面为上平面,距活塞筒测量中心高度 -15 mm 的测量平面为下平面。活塞和活塞筒几何尺寸测量位置如图 2 所示。



(a) 活塞

(b) 活塞筒

图 2 活塞-活塞筒几何尺寸测量位置

Fig. 2 Dimensional measurement positions for piston and cylinder

活塞直径测量结果见表 1。

活塞筒直径测量结果见表 2。

2.3 活塞有效面积的计算

根据表 1 和表 2 活塞-活塞筒几何尺寸的测量

表 1 活塞 S/N 850 直径测量结果

Table 1 Diameter measurement results of piston S/N 850

测量平面	测量位置 I/mm	测量位置 II/mm	扩展不确定度/ $\mu\text{m}(k=2)$	圆度/ μm	扩展不确定度/ $\mu\text{m}(k=2)$
上平面 d_{p1}	49.96811	49.96814	0.15	0.15	0.02
中间平面 d_{p2}	49.96813	49.96816	0.15	0.08	0.02
下平面 d_{p3}	49.96821	49.96823	0.15	0.11	0.02

表2 活塞筒 S/N 850 直径测量结果
Table 2 Diameter measurement results of cylinder S/N 850

测量平面	测量位置 I/mm	测量位置 II/mm	扩展不确定度/ $\mu\text{m}(k=2)$	圆度/ μm	扩展不确定度/ $\mu\text{m}(k=2)$
上平面 d_{c1}	49.96920	49.96957	0.15	0.32	0.02
中间平面 d_{c2}	49.96893	49.96898	0.15	0.12	0.02
下平面 d_{c3}	49.96936	49.96903	0.15	0.26	0.02

结果用式(1)计算活塞有效面积。国外同行在用该公式计算时,未考虑测量平面的权重,只是简单计算活塞、活塞筒测量直径的平均值后,再根据式(1)计算活塞的有效面积。本文在计算活塞有效面积时,对活塞-活塞筒直径测量结果考虑了权重,根据各截面的权,分别计算活塞和活塞筒的加权直径。

2.3.1 活塞加权直径的计算

根据表1活塞直径测量结果及不确定度,对6个测量结果用加权算术平均值的方法计算活塞的直径。

(a) 计算三个测量平面活塞的平均直径

上平面活塞平均直径 $\overline{d_{p1}}$ 为49.968125 mm;中间平面活塞平均直径 $\overline{d_{p2}}$ 为49.968145 mm;下平面活塞平均直径 $\overline{d_{p3}}$ 为49.968220 mm。

(b) 计算三个测量平面活塞平均直径标准偏差

首先依据式(2)分别计算三个测量平面活塞直径的标准偏差,再依据式(3)计算三个测量平面活塞平均直径标准偏差。

$$s_{pi} = \sqrt{\frac{(d_{pi} - \overline{d_{pi}})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式(2)中: s_{pi} :活塞直径测量的标准偏差; d_{pi} :活塞直径; $\overline{d_{pi}}$:活塞平均直径; n :测量次数。

依据式(3)分别计算三个测量平面活塞平均直径的标准偏差。

$$\overline{s_{pi}} = \frac{s_{pi}}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

式(3)中: $\overline{s_{pi}}$:活塞平均直径的标准偏差。

活塞平均直径标准偏差计算结果分别为:上平面活塞平均直径的标准偏差 $\overline{s_{p1}}$ 为 2.12×10^{-5} ;中间平面活塞平均直径的标准偏差 $\overline{s_{p2}}$ 为 2.12×10^{-5} ;下平面活塞的平均直径的标准偏差 $\overline{s_{p3}}$ 为 1.41×10^{-5} 。

(c) 计算三个测量平面活塞平均直径的权

依据式(4)^[5]分别计算三个测量平面活塞平均直径的权。

$$p_{p1} : p_{p2} : p_{p3} = \frac{1}{s_{p1}^2} : \frac{1}{s_{p2}^2} : \frac{1}{s_{p3}^2} \quad (4)$$

活塞平均直径权的计算结果分别为:上平面活塞平均直径的权 p_{p1} 为4;中间平面活塞平均直径的权 p_{p2} 为4;下平面活塞平均直径的权 p_{p3} 为9。

(d) 计算三个测量平面活塞加权的直径

根据式(5)计算活塞三个测量平面的加权直径 d_p 。

$$d_p = \frac{d_{p1} p_{p1} + d_{p2} p_{p2} + d_{p3} p_{p3}}{p_{p1} + p_{p2} + p_{p3}} \quad (5)$$

活塞的加权直径 d_p 为49.968180 mm。

2.3.2 活塞筒加权直径的计算

根据表2活塞筒直径测量结果及不确定度,对6个测量结果用加权算术平均值的方法计算活塞筒的直径。活塞筒加权直径的计算方法与活塞加权直径的计算方法相同,活塞筒的加权直径 d_c 为49.968968 mm。

2.3.3 活塞有效面积的计算

将活塞加权直径 d_p 和活塞筒加权直径 d_c 的计算结果分别代入式(1),根据对活塞有效面积有效位的精度分析, π 取值为3.141592,活塞有效面积的计算结果为1961.0276 mm²。

2.3.4 活塞有效面积不确定度的计算

对式(1)进行整理,导出活塞有效面积 A_0 为:

$$A_0 = \frac{1}{8} \pi (d_p^2 + d_c^2) \quad (6)$$

由于各分量互不相关,因而合成方差 $u^2(A_0)$ 按式(7)^[6]计算。

$$u^2(A_0) = \left[\frac{\partial A_0}{\partial d_p} \right]^2 u^2(d_p) + \left[\frac{\partial A_0}{\partial d_c} \right]^2 u^2(d_c) \quad (7)$$

据表1及表2,将 $u(d_p)$ 为0.000075 mm, $u(d_c)$ 为0.000075 mm,代入式(7),有 $u(A_0)$ 为0.0042 mm。

活塞有效面积的相对不确定度按式(8)计算。

$$u_r(A_0) = \frac{u(A_0)}{A_0} \quad (8)$$

活塞有效面积的扩展不确定度 $u_r(A_0) = 4.3 \text{ ppm}(k=2)$ 。

3 通过压力平衡法获取活塞有效面积

3.1 压力平衡法的原理

所谓压力平衡法是将使用参考压力测量仪器与PG7607同时测量同一压力,通过调整PG7607上所加载的砝码组的质量,使其与被测压力达到平衡。如图3所示。平衡后,可根据式(9)计算PG7607的

有效面积。

$$A_0 = \frac{Mg(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m})\cos\theta + F_r}{(P_s - \rho gh)[1 + (\alpha_p + \alpha_c)(t - 20)](1 + \lambda P_s)} \quad (9)$$

式中： M ：砝码及活塞质量； g ：重力加速度； ρ_a ：空气密度； ρ_m ：砝码、承重盘及活塞平均密度； h ：气柱高度； ρ_f ：介质密度； t ：活塞温度； λ ：弹性形变系数； $\alpha_p + \alpha_c$ ：热膨胀系数； θ ：活塞轴线与重力方向的夹角； F_r ：活塞和活塞筒之间的摩擦力，表现为活塞的灵敏阈。

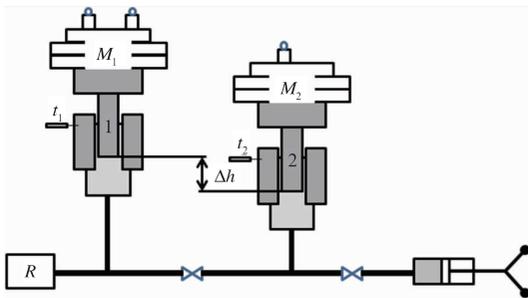


图 3 活塞压力计比对装置

1: 计量院活塞; 2: 计量站 PG7607 活塞

Fig. 3 Comparison devices of piston pressure gauge

3.2 比对及比对数据

国家气象计量站的 PG7607 在 2009 年 4 月 15 日和 4 月 16 日与中国计量院的气压基准在国家气象计量站大气压力实验室进行了比对，比对模式为表压模式，比对介质为氮气，比对的压力点为 300、500、800、1000、1300 和 1600 hPa。比对数据及结果见表 3。

3.3 活塞有效面积的计算

将表 3 中各压力点活塞面积取平均，作为压力

$$u_{re}(A_0) = \sqrt{u_r^2(A_0) + u_r^2(p_s) + u_r^2(M) + \alpha^2 u^2(t) + p_s^2 u^2(\lambda) + (\frac{g}{p_s})^2 u^2(h) + \tan^2 \theta u^2(\theta) + (\frac{1}{A_0 p_s})^2 u^2(Fr)} \quad (10)$$

活塞有效面积扩展不确定度计算结果为 15 ppm^[7] ($k=2$)。

4 两种方法的比较

由第 2 节的计算结果和第 3 节的实验结果可以看出，通过两种方法所获得的有效面积的差值为 9.1 ppm，处于两个结果扩展不确定度的平方和开

表 3 活塞压力计比对数据及结果

Table 3 Comparative data and results of piston pressure gauge

压力点 /Pa	计量院活塞 压力/Pa	计量站活塞 压力/Pa	相对误差 /ppm	计量站活塞有效 面积/mm ²
30000	30025.50	30025.78	9.3	1961.0538
	30025.60	30025.78	6.0	1961.0473
	30025.59	30025.78	6.3	1961.0469
	30025.54	30025.78	8.0	1961.0504
	50202.51	50202.97	9.2	1961.0477
50000	50202.51	50202.97	9.2	1961.0479
	50202.56	50202.97	8.2	1961.0458
	50202.55	50202.97	8.4	1961.0458
	80374.11	80374.64	6.6	1961.0432
	80374.11	80374.65	6.8	1961.0432
80000	80374.04	80374.64	7.5	1961.0448
	80374.02	80374.64	7.8	1961.0448
	100006.3	100007.0	7.0	1961.0438
	100006.2	100007.0	8.0	1961.0444
	100006.2	100007.0	8.0	1961.0454
100000	100006.2	100007.0	8.0	1961.0443
	130099.0	130099.9	7.0	1961.0436
	130099.1	130099.9	6.2	1961.0419
	130099.1	130099.9	6.2	1961.0429
	130099.1	130099.9	6.2	1961.0429
130000	160292.7	160293.8	6.9	1961.0453
	160292.7	160293.8	6.9	1961.0450
	160292.8	160293.8	6.3	1961.0440
	160292.8	160293.8	6.3	1961.0440
	160292.8	160293.8	6.3	1961.0442

平衡法获得活塞有效面积的结果，活塞有效面积的结果为 1961.0454 mm²。

3.4 活塞有效面积不确定度的计算

根据式(9)活塞有效面积的计算公式，可知，活塞有效面积是压力、砝码质量、空气密度、砝码密度、重力加速度等量的函数，因此，活塞有效面积不确定度依据式(10)计算。

方所确定的数值区间内。因此，可以认为通过两种方法所获取的有效面积的数值在其各自的不确定度水平上均真实可靠。

同时可以看出，采用几何法所获得的有效面积的扩展不确定度明显优于通过压力平衡法所获得的有效面积的扩展不确定度，仅为后者的 30% 左右。其原因在于采用压力平衡法来确定有效面积时，所获取的结果受到活塞压力计上所加载的砝码组的质

量、实验中的环境温度、活塞上加载压力所形成的活塞的形变、活塞和活塞筒的垂直状态、实验中活塞压力计输出压力基准面与参考活塞压力计输出压力参考面的高度差以及参考活塞压力计测量值等诸多因素的影响,从而降低了实验结果的可靠性,增大了结果的不确定度。而采用基于基本定义的几何法来确定有效面积,除了直径测量的不确定度及活塞和活塞筒的圆度外,几乎不受其他因素的影响,从而使得结果更加准确可靠,具有更小的不确定度。因此,采用通过几何法获取的有效面积作为最终结果,相对于通过压力平衡法所获得的实验结果,更为准确可靠。

5 结 论

(1)用几何法计算 PG7607 活塞有效面积的结果为 1961.0276 mm^2 ,该活塞有效面积扩展不确定度的计算结果为 $4.3 \text{ ppm}(k=2)$ 。

(2)用压力平衡法获得 PG7607 活塞有效面积

的结果为 1961.0279 mm^2 ,该活塞有效面积扩展不确定度的计算结果为 $15 \text{ ppm}(k=2)$ 。

(3)用几何法获取活塞有效面积的不确定度最小,活塞有效面积为 1961.0276 mm^2 。

参 考 文 献

- [1] PTB220 Series Digital Barometers User's GUIDE[M]. 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] 蒋思敬,姚士春. 压力计量[M]. 北京:中国计量出版社, 1991:124-135.
- [4] Calibration report No. LS-2008-0001[R]. 2008 National Research Council Canada.
- [5] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社, 1994: 22-24.
- [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, 1991: 18-20.
- [7] 校准报告, RGpc2009-0018[R]. 北京:中国计量科学研究院.



中国第四纪气候变化与自然灾变发展趋势预测研究

高庆华 等编著

该书以地球系统整体观为指导,系统研究了第四纪冰川与气候变化和太阳活动、地球旋转、地壳运动、海洋运动、生物活动及温室效应等方面的关系和影响,明确提出了气候变化的基本规律是多因子、多周期的冷暖交替变化;温室效应和全球变暖问题需要进一步研究;全球变暖的利弊影响和地区差异性,需要具体评估;根据自然灾害的发展趋势,我国应对气候变化的重点应该是警惕与防范干旱化与极端天气变化造成的灾害。

该书可供从事第四纪地质、气象、环境、灾害等方面研究的人员参考。

16 开 定价: 36.00 元

气象哲学概论

牛忠保 等著

该书以马克思主义哲学为指导,以现代气象学、中国古代哲学为基础,比较系统地阐述了气象哲学的基本内涵、中国古代哲学对于气象的认识、气象变化一般规律、人与气象的关系,对现代气象工作实践有一定的指导意义。本书可以作为气象系统工作者、哲学社会科学工作者以及大众读者的参考读物。

16 开 定价: 24.00 元

地面气象观测

崔讲学 主编

该书共 21 章,主要讲述地面气象观测工作的组织工作、地面气象要素的观测方法、地面气象仪器的工作原理和维护维修方法及地面气象观测质量的控制等。以基础原理和方法等实用知识为重点,强化观测数据质量保证,以利于引导地面气象观测员活学活用。本书既包括气象台站业务中必须掌握和严格遵守执行的内容,也包括地面气象观测技术的较新进展。

该书是中国气象局培训中心组织编写的地面气象观测业务培训教材,既可作为基层台站业务人员自学参考资料,也可作为高等院校气象专业师生的辅导资料。

16 开 定价: 55.00 元

全球气候变化和低碳农业研究

闵九康 主编

该书主要论述了全球气候变化及其生物调控潜能、温室气体的发生和全球平衡账、低碳环境和低碳农业的发展、农作物(包括果林作物)在防治气候变暖中的战略意义、无碳生物能源氢(H₂)和生物冰核技术及其应用发展前景。

该书可供从事气象学、环境学、农学和生态学研究的科技工作者及高等院校师生参考和阅读。

16 开 定价: 45.00 元