

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.05.13

# 活塞有效面积测量方法的分析和比较

李海兵, 卓华, 赵亿坤, 陈武卿

(新疆维吾尔自治区计量测试研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 测量活塞有效面积可以根据具体情况采用直接平衡法或起始平衡法。本文就基于压力形变系数及温度修正的起始平衡法与使用直接平衡法的测量数据进行比较分析, 结果显示二者测量结果的一致性在不同的压力量程段有所不同。

**关键词:** 直接平衡法; 起始平衡法; 活塞有效面积; 测量方法

**中图分类号:** TB935; TH812

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2015)05-0057-03

## Analysis and Comparison of Measurement Method of the Effective Area of Pistons

LI Haibing, ZHUO Hua, ZHAO Yikun, CHEN Wuqing

(Xinjiang Research Institute of Measurement &amp; Testing, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** The effective area of a piston gauge is measured by either the direct balance or the method of initial balance. Herein, by analyzing and comparing the measurement of direct method and the other method which makes material pressure distortion coefficient and temperature compensated, it is found that the results of the two methods are different based on the different types of piston gauges.

**Key words:** direct balance; initial balance; effective area of piston gauge; measurement method; consistency

## 0 引言

JJG 59-1990《二、三等标准活塞式压力计检定规程》中规定测量活塞有效面积用起始平衡法, 修订后的JJG 59-2007《活塞式压力计检定规程》增加了直接平衡法<sup>[1]</sup>。直接平衡法是一种国际上常见的检定方法, 理论上较为科学合理<sup>[2-6]</sup>。JJG 59-2007 检定规程规定: 当标准活塞式压力计和被检活塞式压力计的活塞系统材料、形状尺寸都基本相同时才采用起始平衡法。本文讨论活塞有效面积测量过程中需注意的问题以及两种平衡方法测量结果的一致性。

## 1 直接平衡法

首先确定标准活塞式压力计和被检活塞式压力计参考平面的高度差  $h$ , 然后测量活塞式压力计的活塞质量及连接件质量, 需要注意的是哪些质量起了作用。在第一个平衡点时, 分别在两压力计上加上相应的专用砝码, 加压力后使两活塞升至工作位置, 以一定的

旋转速度转动, 使两活塞平衡, 记录下标称压力值、活塞温度、砝码质量、环境参数。直接平衡法的计算公式为

$$A_{T0} = A_{S0} \frac{(\sum m_T (1 - \frac{\rho_a}{\rho_T}) + \frac{2\gamma_T \sqrt{\pi A_T}}{g}}{(\sum m_S (1 - \frac{\rho_a}{\rho_S}) + \frac{2\gamma_S \sqrt{\pi A_S}}{g}} \cdot \frac{1 + \alpha_S (t_S - 20) (1 + \lambda_S p)}{1 + \alpha_T (t_T - 20) (1 + \lambda_T p)} \left( 1 + \frac{(\rho_f - \rho_a) gh}{p_T} \right) \quad (1)$$

式中:  $A_{T0}$  为零表压下的下级标准活塞有效面积,  $\text{mm}^2$ ;  $A_{S0}$  为零表压下的上级标准活塞有效面积,  $\text{mm}^2$ ;  $m$  为活塞、承重盘及所有专用砝码的真空质量,  $\text{kg}$ ;  $\rho$  为专用砝码密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_a$  为空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_f$  为工作介质密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为使用地的重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $\gamma$  为工作介质的表面张力系数,  $\text{N}/\text{m}^2$ ;  $p$  为活塞的名义压力,  $\text{Pa}$ ;  $h$  为活塞参考面的高度差,  $\text{m}$ ;  $\alpha$  为活塞系统的热膨胀系数,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\lambda$  为活塞系统的压力形变系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $t$  为活塞系统的温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。带下标 T 的量为下级标准活塞, 带下标 S 的量为上级标准活塞, 下同。

公式(1)与活塞式压力计检定规程中直接平衡法的公式本质上是相同的。在式中, 除了需要准确

收稿日期: 2015-07-16; 修回日期: 2015-08-24

基金项目: 国家质检总局科技计划项目(2013QK079)

作者简介: 李海兵(1984-), 男, 河南商丘人, 工程师, 硕士, 主要从事压力计量的研究工作。

测量活塞、承重盘及所有专用砝码的真空质量外，还需要准确测量活塞参考面的高度差和活塞系统的温度。

1.1 活塞参考面高度差的测量<sup>[7]</sup>

对于一般典型结构的活塞，其活塞下端面可以直接测量。高度差测量的过程(规则圆柱体结构)为：首先使活塞处于平衡位置，做出高度标识线，以标识活塞位置；其次缓慢取出活塞杆将其处于竖直方向紧贴活塞筒，找到标识线位置，使活塞筒的上部与其相齐，此时使用数显高度卡尺测量活塞的下端面，高度值即为活塞下端面与参考面的高度差值。

1.2 活塞系统温度的测量

对于自带测温系统的活塞式压力计，铂热电阻温度计置于活塞筒外壁，铂热电阻的最大允许误差为±0.1℃，分辨力为0.01℃，同时使用另一支铂热电阻温度计测量环境温度。带自动旋转装置的活塞系统和所处环境的温度曲线见图1。

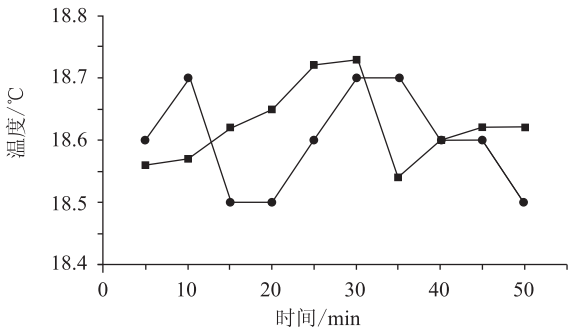


图1 活塞系统和环境温度的监测图

图1中，带方形块的曲线为活塞系统温度，带圆点的曲线为环境温度。由图1可知，在恒温的工作环境里，环境温度和活塞系统的温度有稍微的差异(≤0.2℃)。自动旋转的活塞系统在工作中电子元件部分散发热量，从而导致温度升高，需要实时测量温度的变化以便进行修正。温度不是活塞有效面积测量中的主要影响量，但温度的变化对测量结果影响较大。

表1 使用直接平衡法的计算过程和结果

| $m_s/\text{kg}$ | $m_T/\text{kg}$ | $t_s/^\circ\text{C}$ | $t_T/^\circ\text{C}$ | $\rho_a/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $\rho_T/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $p_T/\text{MPa}$ | $A_T/\text{mm}^2$ |
|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------|-------------------|
| 10.00478        | 8.22889         | 19.69                | 20.48                | 1.083                                  | 927.32                                 | 20.0010          | 4.032410          |

表2 使用起始平衡法的计算过程和结果

| $\Delta p/\text{MPa}$ | $\Delta m_T/\text{kg}$ | $\Delta m_s/\text{kg}$ | $p/\text{MPa}$ | $A_T/\text{mm}^2$ |
|-----------------------|------------------------|------------------------|----------------|-------------------|
| 10.003                | 5.00387                | 4.11576                | 30.004         | 4.032654          |

2 起始平衡法

起始平衡法可以抵消活塞及其连接件质量和气(液)柱高度差产生的压力。该方法用某一压力点的平衡数据作为起始点，用下几个压力点的专用砝码质量与之相减，可以消除某些系统误差，如高度误差等。首先确定起始平衡点，起始平衡后，上面所加的所有砝码作为平衡质量，必须保持不变，此质量不参与活塞有效面积的计算，只计算增加的专用砝码质量，其公式为

$$A_{T0}=A_{s0}\frac{\Delta m_T}{\Delta m_s}$$

式中： $\Delta m_s$ 、 $\Delta m_T$ 分别为标准、被检活塞式压力计相对于平衡点增加的砝码质量。基于起始平衡点的微小变化以及被检和标准活塞的材质不同造成的差异，起始平衡法公式为<sup>[8]</sup>

$$A_{Tp}=\frac{\Delta m_T(1-\frac{\rho_a}{\rho_T})[1-\alpha_T(t_T-20)]}{\Delta m_s(1-\frac{\rho_a}{\rho_s})[1-\alpha_s(t_s-20)]}\cdot\left\{1+\frac{p_0}{\Delta p}[\alpha_s(t_s-t_0)-\alpha_T(t_T-t_0)]\right\}\cdot[1+(\lambda_T-\lambda_s)p_0]\cdot A_{Sp}\tag{2}$$

式中： $p_0$ 是平衡点压力； $\Delta m$ 、 $\Delta p$ 分别为增加的砝码质量和压力； $t_0$ 为平衡点活塞系统的温度； $A_p$ 为名义压力 $p$ 下的活塞有效面积。

3 直接平衡法和起始平衡法的比较

以直接平衡法为例，使用测量范围为2~160 MPa，准确度等级为0.005级的活塞式压力计对测量范围为6~260 MPa，准确度等级为0.02级活塞式压力计活塞有效面积的测量过程(20 MPa点)，测量数据根据公式(1)计算得到。将表1中利用直接平衡法得到的测量数据代入公式(2)中进行起始平衡法的计算，计算结果如表2所示。

如上述所示，依次进行30，40，50，60，70，80，90 MPa各压力点的活塞有效面积的测量。将直接平衡法和起始平衡法比对的数据用图像来表示，如图2所示。图2中，带方形块的曲线为直接平衡法的数据，带圆点的曲线为起始平衡法的数据。

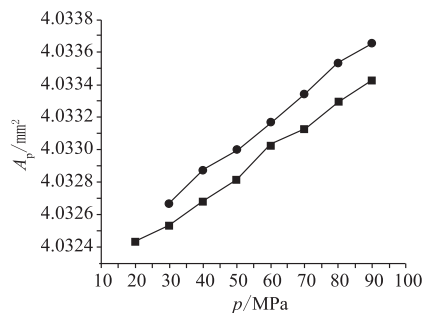
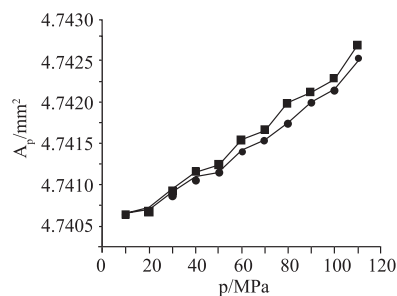
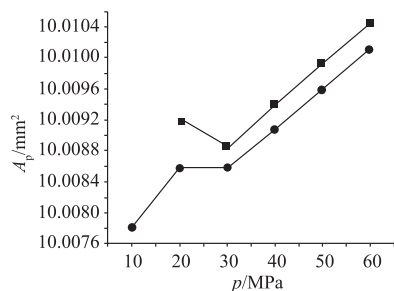


图2 两种平衡方法计算结果的比较图( $A_p - p$ 曲线)

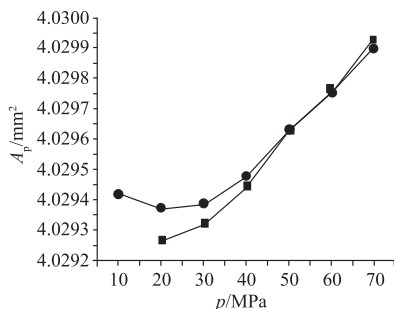
为了证明直接平衡法和起始平衡法测量结果的复现性,分别对不同测量上限(120, 60, 70 MPa)、不同规格型号的活塞式压力计进行分析,其所得的结果用曲线表示,如图3。



(a) 测量范围2~120 MPa的对比图



(b) 测量范围1~60 MPa的对比图



(c) 测量范围2~70 MPa的对比图

图3 基于直接平衡法与起始平衡法的活塞有效面积数据对比图( $A_p - p$ 曲线)

图3中圆点曲线为直接平衡法的数据,方形曲线为起始平衡法的数据。由活塞有效面积的定义可知:

$A_p = A_0(1 + \lambda p)$ , 理论上讲,测得了各压力点的活塞有效面积  $A_p$ , 可通过线性拟合(或二次方拟合)得到零表压下活塞有效面积  $A_0$  和形变系数  $\lambda$  (或  $\lambda_1, \lambda_2$ )。由图(2), (3)可知,根据直接平衡法和起始平衡法得到的  $A_p - p$  曲线的线性度较小,说明测量结果与理论分析一致。分析两种平衡方法测量结果的差异,各压力点的有效面积相对误差为  $3.4 \times 10^{-5} \sim 5.8 \times 10^{-5}$ , 均满足 0.01 级活塞式压力计准确度等级的要求。对不同规格型号、不同测量范围的活塞式压力计进行分析。图2和3(a)中活塞式压力计有高度标识参考线,直接平衡法测量得到的  $A_p - p$  线性度,以及两种方法测量结果的一致性较好。图3(b), (c)中在低量程段两种方法的  $A_p - p$  曲线的一致性较差。分析原因:①人工测量参考面位置带来的误差较大,体现在 10, 20, 30 MPa 压力点,需要标识活塞下端面的参考面位置,以方便测量计算;②活塞系统的温度变化较大,需要确定测量位置,准确测量活塞系统的温度。

## 4 结论

通过对直接平衡法和实时修正的起始平衡法的测量结果分析,发现二者在高量程段是基本一致的。而分析低量程段偏离的影响因素:一是活塞的高度差;二是活塞系统温度。因此,需要在活塞式压力计仪器上做出高度参考面的标识,活塞式压力计应配套相应的测量温度设备,以便操作人员进行测量和计算。

## 参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 59 - 2007 活塞式压力计[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- [2] Dadson R S, Lewis S L, Peggs G N. The Pressure Balance: Theory and Practice[M]. London: HMSO, 1982.
- [3] Alaaeldin A Eltawil, Shaker Gelany, Douglas A Olson. Results of hydraulic pressure comparison in the range of 25 MPa to 200 MPa between NIS-Egypt and NIST-USA[J]. MAPAN-Journal of Metrology Society of India, 2011, 26(4): 349 - 355.
- [4] Douglas A Olson, R Greg Driver, Walter J Bowers. A gas pressure scale based on primary standard piston gauges[J]. Journal of research of national institute of standards and technology, 2010, 115(6): 393 - 412.
- [5] JKN Sharma, Kamlesh K Jain, HNP Poddar. High pressure measurement with simple piston gauge in static condition[J]. PRAMANA-Journal of Physics, 1994, 42(3): 271 - 282.
- [6] 悦进, 杨远超. 活塞有效面积检定中直接平衡法与起始平衡法对比分析[J]. 计量技术, 2010(12): 59 - 61.
- [7] 李海兵, 麻锐, 卓华, 等. 新版精密压力表检定规程的讨论[J]. 计测技术, 2014, 34(S2): 46 - 49.
- [8] Yang Y C, Yue J. Calculation of effective area for the NIM primary pressure standards[J]. PTB-Mitteilungen, 2011, 121(3): 226 - 228.