

可控间隙活塞压力计研究

岑月琴 张鹏程

(中国计量科学研究院 北京 100013)

摘要 本文介绍了新型的压力基准——可控间隙活塞压力计。该种活塞压力计可通过一系列实验确定其参数。实验测得的参数比理论计算的结果更加切合实际，因而可以大大提高作为基准的不确定度。

关键词： 活塞压力计 间隙 控隙压力

1. 引言

压力是一个非常重要的量值，它的重要性体现为它在航空航天、能源探测、电力、化工等工业领域的非常广泛的应用。科学技术的迅猛发展也影响到了压力的计量与测试，由于近代传感技术、控制技术、及电子工业的飞速进步，大量的传感器、变送器应用于现场取代了传统的指针压力表，不仅实现了自动化，并且也将压力测试的精度大大提高。另一方面，由于近代物理、化学以及许多高新技术的发展，在对于实验条件的要求方面，对于高精度压力设备的使用与需求也不断增加，这就向我们提出了新的课题：如何才能满足日益增长的高精度溯源要求？

本文是笔者在美国国家标准技术研究院(NIST)就 PG-27 可控间隙活塞压力计所做部分实验工作的总结，从中总结经验对于作为气压段基准的大直径可控间隙气体活塞压力计的研究工作具有指导意义。

2. 关于可控间隙活塞压力计的理论知识

可控间隙活塞压力计在其工作位置所产生压力的公式为：

$$P = \frac{\left[\sum_{i=1}^n M_i \left(1 - \frac{\rho_{air}}{\rho_i} \right) g + \gamma \cdot C \right]}{A_e(p)} \quad (1)$$

式中， M_i 为加载于可控间隙活塞压力计上的第 i 块砝码的质量， ρ_{air} 为空气密度， ρ_i 为第 i 块砝码的密度， g 为当地重力加速度， γ 为表面张力系数， C 为活塞周长。

可控间隙活塞压力计的有效面积可表达为：

$$A_e = \pi \cdot r^2 (1 + b \cdot p) [1 + d \cdot (p_z - p_j)] \cdot [1 + (\alpha_p + \alpha_c) \cdot (T - T_r)] \quad (2)$$

其中：

r _____	参考温度、零压力下的活塞半径；	T _____	活塞系统温度；
b _____	活塞压力形变系数；	T_r _____	参考温度；
P _____	活塞工作压力；	d _____	控隙压力系数；
α_p _____	活塞线性热膨胀系数；	p_z _____	零间隙控隙压力；
α_c _____	活塞筒线性热膨胀系数；	p_j _____	工作控隙压力。

在对可控间隙活塞压力计进行研究时，上述参数中， α_p 、 α_c 和 b 可以从活塞和活塞筒材料的力学性质得到； r 、 T 、 T_r 、 d 、 p_z 和 p_j 则通过实测得到。所谓对可控间隙活塞压力计的研究，就是确定可控间隙活塞压力计的 r 、 d 、 p_z 和 p_j 。

3. r 、 d 、 p_z 和 p_j 的确定

3.1 r 的确定

r 通常由精密测径仪测得，考虑到活塞不可能是理想的圆柱，因此需要做不同截面的多个径向测量。通常所选截面为 3 个：一个在中间，另外两个距两端面为 0.5cm。在每个截面做 4 个方向测量。这样可以得到 12 个直径的数据 $d_i(i=1,2\ldots 12)$ ，则对于所求的 r ，有：

$$\bar{r} = \frac{1}{2} \bar{d} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^{12} d_i}{12}$$

$$\sigma_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (d_i - \bar{d})^2}{12(12-1)}}$$

$$\sigma_{\bar{r}} = \frac{1}{2} \sigma_{\bar{d}}$$

通过实际几何尺寸测量，得到：

$$\bar{r} = 3.950189 \times 10^{-3} m$$

$$\sigma_{\bar{r}} = 1.28 \times 10^{-3} m$$

3.2 控隙压力系数“ d ”确定

在 (2) 式中，活塞筒形变系数修正项为：

$$C_d = 1 + d(p_z - p_j)$$

其中的 d 为控隙压力系数，可由以下实验测得：

把可控间隙活塞压力计和一台工作基准活塞压力计连接，选定一系列测压点，在每一压力点平衡活塞，然后增加空隙压力 p_j ，由于在 p_j 的作用下，可控间隙活塞压力计的有效面积减小，为了保持压力不变，必须调整可控间隙活塞压力计上的砝码。从 (1) 式我们知：

$$W = \sum_{i=1}^n m_i g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_i}\right) = p \cdot A_0 [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(T - T_r)] (1 + bp) [1 + d(p_z - p_j)] \quad (3)$$

p_j 的增加引起的 W 的变化

$$\Delta W = -p A_0 [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(T - T_r)] (1 + bp) d \Delta p_j \quad (4)$$

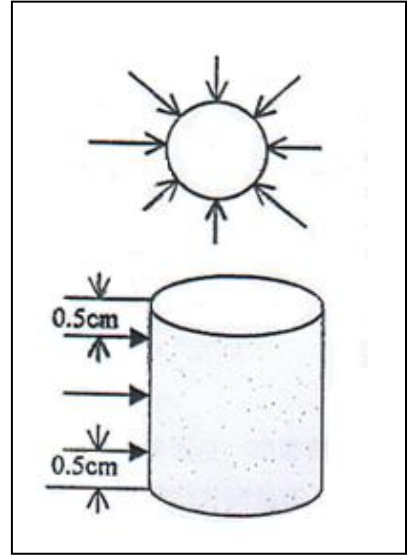
(4)除以(3)有：

$$\frac{\Delta W}{W} = -\frac{d \Delta p_j}{1 + d(p_z - p_j)} \approx -d \Delta p_j \quad (d(p_z - p_j) \ll 1)$$

因此，

$$d = -\frac{\Delta W}{W \Delta p_j}$$

在实验中，我们取 2MPa、4MPa、8MPa、12MPa、20MPa 作为‘ d ’的测量点，在每点分别取控隙压力为 0MPa、7MPa、14MPa、21MPa，并分别平衡，则我们在每个压力点可得到



三个‘ d' ’值,六个测压点共 18 个‘ d' ’值。其平均值为: $\bar{d}=3.42\times 10^{-12}/\text{pa}$,标准偏差为: $7.4\times 10^{-14}/\text{Pa}$ 。

3.3 P_z 的确定

由于活塞间隙相对于活塞直径很小,因此,我们可以把活塞杆和活塞筒之间的间隙等价成两个无穷大平行平面。活塞间隙下端和上端有一压差 $p-p_0$ (其中 p 为系统介质压力, p_0 为大气压力)。在恒定压差作用下,流体介质开始从下向上流动。由层流基本定律可知,流过活塞间隙的流体流量为:

$$Q = \frac{\pi r h^3}{6\mu L} \cdot (p - p_0)$$

对于一台可控间隙活塞压力计来说,活塞直径一定,活塞筒和活塞杆之间的配合长度 L 一定, μ 为可控间隙活塞压力计采用的流体介质粘度。当作某一压力点的测量时, p 为一定值,只有间隙 h 随着 p_j 的增大减小。假设 h 正比于 $(p_z - p_j)$

$$\text{即: } h = C (P_z - P_j)$$

$$\text{则: } Q = \frac{\pi r C^3}{6\mu L} \cdot (p - p_0) (p_z - p_j)^3 \quad (5)$$

我们又知活塞下降速度和流量 Q 之间有关系: $Q = A_0 \frac{dS}{dt}$

因此 (5) 式可改写为:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{\pi r (p - p_0)}{6\mu L A_0}\right]^{\frac{1}{3}} \cdot C \cdot (p_z - p_j) = C' \cdot (p_z - p_j)$$

$$\text{或者: } p_j = p_z - B \cdot \left(\frac{dS}{dt}\right)^{\frac{1}{3}}$$

因此,我们只需测量可控间隙活塞压力计在不同控隙压力下的下降速度,即可得到 p_z 。

图 2 为在不同压力下测得的下降速度立方根与控隙压力曲线,其中 A~F 曲线分别是在 7、9、12、16、21 和 26MPa 下测得的,每条曲线与 p_j 轴的交点即为该压力下的 p_z , p_z 与测压点压力的关系如图 3。

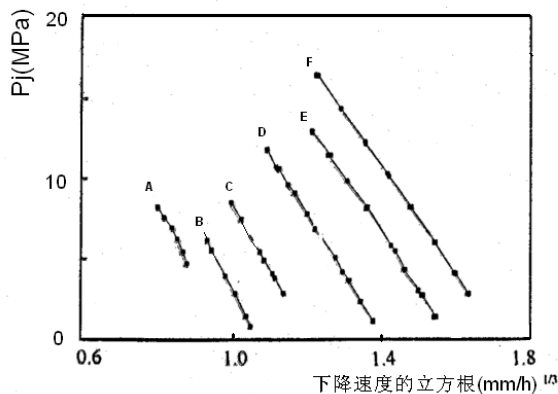


图 2 下降速度的立方根与 P_j 的关系

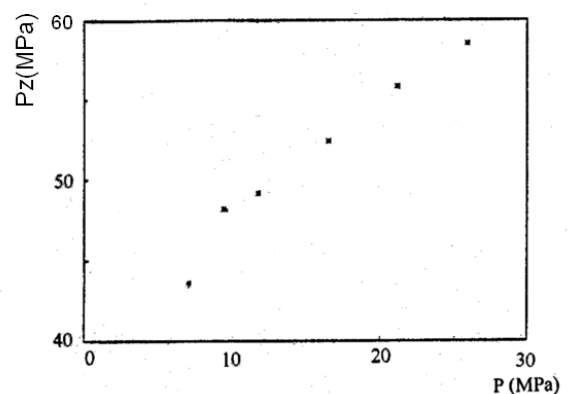


图 3 压力零间隙压力之间关系图

3.4 p_j 的选择

当 p_j 小时,由于间隙大,下降速度快,这时用可控间隙活塞压力计进行量传很难达到平衡;

而且间隙过大，活塞易偏离垂直位置，从而增加活塞筒和杆间的摩擦，减小活塞灵敏度。当 p_j 取值大时，由于活塞筒、杆非理想圆柱，尽管 $p_j < p_z$ ，但活塞筒和杆之间已经接触，这不但会降低活塞灵敏度，且长期运转在此状态下，易损坏活塞筒和活塞。因此，正确选择 p_j 极为重要。

对活塞间隙内的流体应用流体力学方程，可得活塞以角速度 ω 在筒内转动时所受的力矩：

$$\Gamma = - \frac{2\pi\eta\omega Lr^3}{h}$$

进而可得到活塞转动角速度在转动反方向力矩作用下，随时间的变化关系：

$$\omega = \omega_0 e^{-\frac{2\pi\eta Lr^3}{Ih}t}$$

其中 ω_0 为起始转动角速度， I 为转动惯量。当实测曲线与理论曲线最接近时，我们认为此时的 p_j 为最合理的选择。下图为在不同 p_j 下测得的 $\omega \sim t$ 曲线与理论曲线的比较：

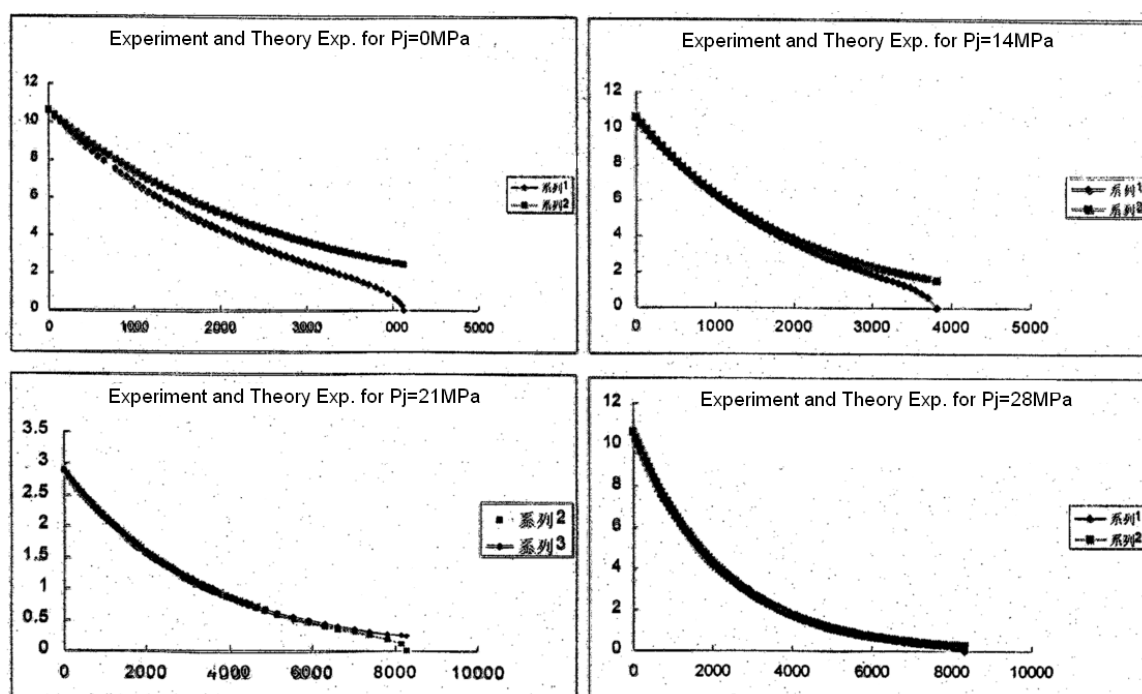


图 4. 不同 P_j 下， $\omega \sim t$ 曲线图

从上图可知： $p_j = 21\text{MPa}$ 时，理论与实测最相符。

4. 可控间隙活塞压力计的不确定度

在对一台可控间隙活塞压力计进行实验研究并确定其 R 、 d 、 P_z 和 P_j 之后，该可控间隙活塞压力计即可作为压力基准使用。可控间隙活塞压力计的标准不确定度依赖于(1) 式中各参数的不确定度，并可表示为方和根的形式如下：

$$\frac{dp}{p} = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{p} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} dx_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

下表为 26MPa 下，PG-27 可控间隙活塞压力计各不确定度分量：

x_i	数 值	$\frac{1}{p} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i}$	数 值	dx_i	$\frac{1}{p} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} dx_i$ (ppm)
M	$1.3 \times 10^3 \text{kg}$	$1/M$	$7.69 \times 10^{-4} \text{kg}$	$2.8 \times 10^{-4} \text{kg}$	2.0
g	9.801018m/s^2	$1/g$	$1.02 \times 10^{-1} \text{s}^2/\text{m}$	$5 \times 10^{-6} \text{m/s}^2$	0.5
ρ_a	1.18kg/m^3	$1/\rho_m$	$1.2 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{kg}$	$1 \times 10^{-2} \text{kg/m}^3$	1.2
ρ_m	$3.09 \times 10^{-2} \text{kg/m}^3$	ρ_a/ρ_m^2	$1.7 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$	$1 \times 10^2 \text{kg/m}^3$	1.7
γ	$3.9 \times 10^{-2} \text{N/m}$	$C/(\text{gm})$	$1.96 \times 10^{-5} \text{m/N}$	$3 \times 10^{-4} \text{N/m}^3$	0
C	$2.5 \times 10^{-2} \text{m}$	$\gamma/(\text{gm})$	$2.42 \times 10^{-5} \text{m}$	$1 \times 10^{-5} \text{m}$	0
A_0	$4.902139 \times 10^{-5} \text{m}^2$	$1/A_0$	$2.04 \times 10^4 \text{m}^2$	$3.2 \times 10^{-10} \text{m}^2$	6.5
α_p	$4.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$T-T_r$	$2 ^\circ\text{C}$	$3 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$	0.6
α_c	$4.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$T-T_r$	$2 ^\circ\text{C}$	$3 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$	0.6
$T-T_r$	$T_r=20 ^\circ\text{C}$	$\alpha_c+\alpha_p$	$9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$2 \times 10^{-2} / ^\circ\text{C}$	0.2
B	$-549 \times 10^{-12} / \text{Pa}$	p	$2 \times 10^7 \text{pa}$	$1.8 \times 10^{-14} \text{Pa}$	0.5
p	$2.6 \times 10^7 \text{Pa}$	b	$5.49 \times 10^{-13} / \text{Pa}$	$1 \times 10^5 \text{Pa}$	0
p_z	$5.85 \times 10^7 \text{Pa}$	d	$3.42 \times 10^{-12} / \text{Pa}$	$1.5 \times 10^6 \text{Pa}$	5.13
d	$3.42 \times 10^{-12} / \text{Pa}$	p_z-p_j	$4.64 \times 10^7 \text{Pa}$	$7.4 \times 10^{-14} / \text{Pa}$	3.4
p_j	$2.1 \times 10^7 \text{pa}$	d	$3.42 \times 10^{-12} / \text{Pa}$	$0.7 \times 10^5 \text{Pa}$	0.2

由式(6)可得，标准不确定度为：

$$\frac{\Delta P}{P} = 9.5 \text{ppm}$$

5. 结论

通过对 PG-27 可控间隙活塞压力计的研究，我们可以看出通过选取合适的控制参数能够使其达到最佳工作状态，从而能够使我们获得基准级的理想不确定度。本文所述实验确定的可控间隙活塞压力计 PG-27 的不确定度为 9.5ppm。

参考文献

1. James W. Schmidt, Bernard E. Welch, Charles D. Ehrlich *Operation mode and gas species effects on rotation drag in pneumatic dead weight pressure gauges.* Meas. Sci. Technol. 4. (1993)
2. K. Jain NPL and C. Ehrlich and J. Houck *NIST Intercomparison of hydraulic pressure measurements to 28MPa using a single-piston gauge in the controlled-clearance, reentrant and simple configurations.* Rev. Sci. Instrum., Vol.63, No.5 May 1992