

0.005 级活塞式压力计有效面积测量不确定度评定

□倪宏祥^{1, 2, 3} 张同林^{1, 2, 3} 付明东^{1, 2, 3} 郭义盼⁴ 于振毅^{1, 2, 3}

(1. 沈阳国仪检测技术有限公司; 2. 国家仪器仪表元器件质量检验检测中心;
3. 机械工业第二十四计量测试中心站(沈阳); 4. 南京航空航天大学航天学院)

【摘要】0.005 级活塞式压力计是压力工作基准级别的高精度压力标准器具, 在工业计量中应用非常广泛, 为了提升活塞式压力计在量值传递过程中的准确性, 评估活塞式压力计测量不确定度是十分必要的。本论文基于GUM 法对0.005 级活塞式压力计标准装置在有效面积量值传递过程中产生不确定度主要来源进行分析, 量化和评定各不确定度分量。结果表明: 使用0.005 级活塞式压力计标准装置校准0.02 级活塞式压力计活塞有效面积, 其扩展相对不确定度为 10×10^{-4} (取包含因子 $k=2$, 置信概率 $P=95\%$)。并且, 校准活塞式压力计有效面积时相对扩展不确定度与被检活塞式压力计有效面积无相关。

【关键词】有效面积; 压力; 包含因子; 标准不确定度; 扩展相对不确定度

文献标识码: A 文章编号: 1003-1870 (2025) 03-0024-05

Evaluation of Effective Area Measurement Uncertainty of 0.005-class Piston Pressure Gauge

【Abstract】The 0.005-class piston pressure gauge is a standard high-precision pressure instrument of pressure reference level, which is widely used in industrial measurement. In order to improve the accuracy of the piston pressure gauge in the measurement transfer process, it is necessary to evaluate the measurement uncertainty of the piston pressure gauge. Based on the GUM method, this paper analyzes the main sources of uncertainty generated by the standard 0.005-class piston pressure gauge during the effective area measurement transfer, and quantifies and evaluates each uncertainty component. The results show that when the standard 0.005-class piston pressure gauge is used to calibrate the piston effective area of the 0.02-class piston pressure gauge, its expanded relative uncertainty is (taking the coverage factor $k=2$, and the confidence level $P=95\%$). In addition, the expanded relative uncertainty in calibrating the effective area of the piston pressure gauge is unrelated to the effective area of the verified piston pressure gauge.

【Keywords】effective area; pressure; coverage factor; standard uncertainty; expanded relative uncertainty

引言

活塞式压力计是根据帕斯卡定律和流体静力学平衡原理设计而成，利用活塞及其连接件和专用砝码加载在活塞有效面积上的重力与测量压力作用在活塞下端面产生的力相平衡^[1]进行压力测量和量值传递的计量器具，一般由活塞系统、专用砝码、压力校验器组成。活塞压力计凭借其准确度高、技术性能稳定、使用范围广等优点一直作为压力计量量值溯源的主要计量标准器^[2]。0.005级为活塞压力计的最高准确度等级，由国家压力基准传递，常用作压力工作基准器，评定其测量不确定度是压力计量人员的一项主要技术工作^[2]。青青较全面的评定了0.01级活塞式压力计检定装置测量值的不确定度评定^[3]。李迪提出采用ABBA循环测量方法测量专用砝码重复性的方式评定专用砝码标准不确定度的A类分量^[4]。此外，还有用大量学者对活塞式压力计的活塞有效面积，活塞式压力计测量不确定度评定进行了大量研究^[5-7]。

本文对0.005级活塞压力计有效面积测量结果和压力测量不确定度分别进行了评定。最后，得到活塞有效面积的合成以及扩展相对不确定度和压力测量结果的合成和相对扩展不确定度。

1 活塞有效面积测量时的不确定度评定

1.1 活塞有效面积测量模型

活塞式压力计检定活塞有效面积工作原理^[8]如图1。由于活塞装配时，活塞杆轴线不能完全处于竖直状态，存在装配误差。因此，需要考虑轴线垂直度对活塞受力的影响。图2、图3为活塞式压力计工作受力图：

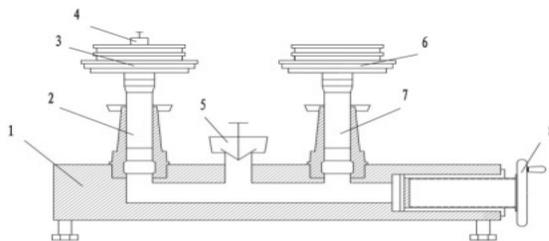


图1 活塞压力计检定活塞有效面积工作原理图

1. 校验器；2. 标准活塞压力计活塞系统；3. 活塞专用砝码；
4. 平衡时加的砝码；5. 油杯；6. 活塞专用砝码；
7. 被检活塞压力计活塞系统；8. 手轮加压器

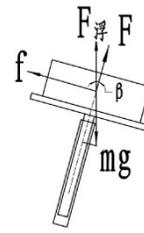


图2 标准活塞式压力计受力图

- $F_{\text{浮}}$ ——标准活塞所受的空气浮力；
- F ——标准活塞杆下端面所受的力；
- f ——标准活塞杆和砝码受到平行砝码托盘方向的力；
- mg ——标准活塞压力计砝码及活塞杆所受的重力；
- β ——标准活塞压力计活塞杆轴线与竖直方向的夹角；

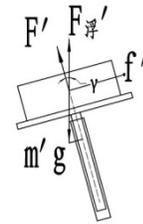


图3 被检活塞式压力计受力图

- $F'_{\text{浮}}$ ——被检活塞所受的空气浮力；
- F' ——被检活塞杆下端面所受的力；
- f' ——被检活塞杆和砝码受到平行砝码托盘方向的力；
- $m'g$ ——被检活塞压力计砝码及活塞杆所受的重力；
- γ ——被检活塞压力计活塞杆轴线与竖直方向的夹角；

设标准活塞式压力计活塞有效面积为 A 、被检活塞压力计活塞有效面积为 A' 。由活塞压力计检定活塞有效面积工作原理图1可知，当活塞压力计压力平衡时受力分析如图2、图3，此时式（2）成立。

$$P = \frac{F}{S} \quad (1)$$

$$\frac{(mg - F_{\text{浮}}) \cos \beta}{A} = \frac{(m'g - F'_{\text{浮}}) \cos \gamma}{A'} \quad (2)$$

设 p 为活塞杆下端面所受液体的压力， v_1 为标准活塞工作时所加专用砝码体积、 v_2 为被检活塞工作时所加专用砝码体积、 $\rho_{\text{空}}$ 为实验室空气密度、 $\rho_{\text{砝1}}$ 为标准活塞压力计专用砝码

密度、 $\rho_{\text{砷}2}$ 为被检活塞压力计专用砷码密度，

$\left(\rho_{\text{空}} = 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \rho_{\text{砷}1} = \rho_{\text{砷}2} = 8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$ 则由

$$F_{\text{浮}} = \rho_{\text{空}} g v_1 \quad F_{\text{浮}}' = \rho_{\text{空}} g v_2 \quad (3)$$

$$m = \rho_{\text{砷}1} \cdot v_1 \quad m' = \rho_{\text{砷}2} \cdot v_2 \quad (4)$$

将式(3)(4)代入式(2)整理得出被检活塞压力计在第*i*个平衡压力点的活塞有效面积^[8]积计算公式为：

$$A' = A \times \frac{m' \times \left(1 - \frac{\rho_{\text{空}}}{\rho_{\text{砷}2}}\right) \times \cos \gamma}{m \times \left(1 - \frac{\rho_{\text{空}}}{\rho_{\text{砷}1}}\right) \times \cos \beta}$$

即：

$$A' = A \times \frac{m' \cos \gamma}{m \cos \beta} \quad (5)$$

式中：

A ——标准活塞式压力计的有效面积，单位 cm^2 ；

m ——加在标准活塞式压力计上的砷码质量，单位 kg ；

β ——标准活塞式压力计轴线与垂线间的偏差角，单位 rad ；

A' ——被检活塞式压力计有效面积，单位 cm^2 ；

m' ——加在被检活塞式压力计上的砷码质量，单位 kg ；

γ ——被检活塞式压力计轴线与垂线间的偏差角，单位 rad 。

1.2 灵敏度系数

因： $A=0.498655\text{cm}^2$ ； $\beta=\gamma=5.8 \times 10^{-4}\text{rad}=2'$

有：

$$c_1 = \frac{\partial A'}{\partial A} = \frac{m' \cos \gamma}{m \cos \beta} = \frac{m'}{m} ;$$

$$c_2 = \frac{\partial A'}{\partial m} = \frac{-A \cdot m' \cdot \cos \gamma}{m^2 \cdot \cos \beta} = \frac{-m'}{2m^2} ;$$

$$c_3 = \frac{\partial A'}{\partial m'} = \frac{A \cdot \cos \gamma}{m \cdot \cos \beta} = \frac{1}{2m} ;$$

$$c_4 = \frac{\partial A'}{\partial \beta} = \frac{A \cdot \cos \gamma \cdot m' \cdot \sin \beta}{m \cdot \cos^2 \beta} = 2.9 \times 10^{-4} \frac{m'}{m} ;$$

$$c_5 = \frac{\partial A'}{\partial \gamma} = \frac{-A \cdot m' \cdot \sin \gamma}{m \cdot \cos \beta} = -2.9 \times 10^{-4} \frac{m'}{m} .$$

1.3 不确定度传播率

$$u_c^2(A') = c_1^2 u^2(A) + c_2^2 u^2(m) + c_3^2 u^2(m') + c_4^2 u^2(\beta) + c_5^2 u^2(\gamma) \quad (6)$$

1.4 分量标准不确定度

1.4.1 标准活有效面积标准不确定度

由检定证书得到标准活塞有效面积：

$A=0.498658 \pm 0.000015 \text{cm}^2$ ；其允许误差为 $\pm 0.000015 \text{cm}^2$ ，在区间内服从均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，区间半宽 $a=0.000015 \text{cm}^2$ ，则标准活塞有效面积标准不确定度为：

$$u(A) = \frac{0.000015\text{cm}^2}{\sqrt{3}} = 8.7 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \quad (7)$$

1.4.2 标准活塞所加砷码质量标准不确定度

由检定规程得到专用砷码质量其允许误差为 $\pm 0.001\%$ ，在区间内服从均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，区间半宽 $a=0.001\%$ ，则标准活塞所加砷码质量标准相对不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(m) = \frac{0.001\%}{\sqrt{3}} = 5.8 \times 10^{-6} \quad (8)$$

标准活塞式压力计所加砷码质量标准不确定度为：

$$u(m) = m \cdot u_{\text{rel}}(m) = 5.8 \times 10^{-6} \cdot m (\text{kg}) \quad (9)$$

1.4.3 被检0.02级活塞式压力计检定时所加砷码质量标准不确定度

由检定规程得到专用砷码质量其允许误差为 $\pm 0.008\%$ ，在区间内服从均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，区间半宽 $a=0.008\%$ ，则被检活塞所加砷码质量标准相对不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(m') = \frac{0.008\%}{\sqrt{3}} = 4.6 \times 10^{-5} \quad (10)$$

被检活塞式压力计所加砷码质量标准不确定度为：

$$u(m') = m' \times u_{\text{rel}}(m') = 4.6 \times 10^{-5} \times m' (\text{kg}) \quad (11)$$

1.4.4 标准活塞轴线与垂线偏角的标准不确定度

标准活塞式压力计轴线垂直度偏差为： $5.8 \times 10^{-4} \text{rad}(2')$ ；服从均匀分布标准不确定度为：

$$u(\beta) = 5.8 \times 10^{-4} \frac{1}{\sqrt{3}} = 3.35 \times 10^{-4} (\text{rad}) \quad (12)$$

1.4.5 被检0.02级活塞压力计轴线与垂线偏角的标准不确定度

被检活塞式压力计轴线垂直度偏差为： $5.8 \times 10^{-4} \text{rad}(2')$ 服从均匀分布标准不确定度为：

$$u(\gamma) = 5.8 \times 10^{-4} \frac{1}{\sqrt{3}} = 3.35 \times 10^{-4} \text{ (rad)} \quad (13)$$

1.4.6 标准不确定度一览表

表 标准不确定度一览表

标准不确定度分量	标准不确定度来源	标准不确定度值	灵敏度系数 c_i	分量标准不确定度 $u_i(A')=c_i u(x_i)$
$u(A)$	标准活塞有效面积	$8.7 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$	$\frac{m'}{m}$	$8.7 \times 10^{-6} \frac{m'}{m}$
$u(m)$	标准活塞所加砝码质量	$5.8 \times 10^{-6} \cdot m$	$\frac{-m'}{2m^2}$	$-2.9 \times 10^{-6} \frac{m'}{m}$
$u(m')$	被检活塞所加砝码质量	$4.6 \times 10^{-5} \cdot m'$	$\frac{1}{2m}$	$2.3 \times 10^{-5} \frac{m'}{m}$
$u(\beta)$	标准活塞轴线与垂线偏角	$3.35 \times 10^{-4} \text{ (rad)}$	$2.9 \times 10^{-4} \frac{m'}{m}$	$9.7 \times 10^{-8} \frac{m'}{m}$
$u(\gamma)$	被检活塞轴线与垂线偏角	$3.35 \times 10^{-4} \text{ (rad)}$	$-2.9 \times 10^{-4} \frac{m'}{m}$	$-9.7 \times 10^{-8} \frac{m'}{m}$

1.4.7 合成标准不确定

当被检活塞有效面积 $A'=0.5\text{cm}^2$ 时, 有 $m'/m=1$ 时, 标准合成不确定度为

$$\begin{aligned} u_c(A') &= \sqrt{c_1^2 u^2(A) + c_2^2 u^2(m) + c_3^2 u^2(m') + c_4^2 u^2(\beta) + c_5^2 u^2(\gamma)} \\ &= \sqrt{(8.7 \times 10^{-6})^2 + (-2.9 \times 10^{-6})^2 + (2.3 \times 10^{-5})^2 + 2 \times (9.7 \times 10^{-8})^2} \\ &= (2.5 \times 10^{-5}) \text{ cm}^2 \end{aligned} \quad (14)$$

当被检活塞有效面积 $A'=1\text{cm}^2$ 时, 有 $m'/m=2$, 标准合成不确定度为

$$\begin{aligned} u_c(A') &= \sqrt{c_1^2 u^2(A) + c_2^2 u^2(m) + c_3^2 u^2(m') + c_4^2 u^2(\beta) + c_5^2 u^2(\gamma)} \\ &= 2 \sqrt{(8.7 \times 10^{-6})^2 + (-2.9 \times 10^{-6})^2 + (2.3 \times 10^{-5})^2 + 2 \times (9.7 \times 10^{-8})^2} \\ &= (5.0 \times 10^{-5}) \text{ cm}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

1.4.8 扩展不确定度

假设活塞式压力计有效面积服从正态分布, 取置信概率95%, 则 $k=2$, 那么扩展不确定度为:

当被检活塞有效面积 $A'=0.5\text{cm}^2$ 时, 扩展不确定度为:

$$U = k \cdot u_c(A') = 2 \times 2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 = 5.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \quad (16)$$

即: $U = 5.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$, 扩展因子 $k=2$; 扩展相对不确定度:

$$U_{rel} = \frac{U}{A'} = \frac{5.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2}{0.5 \text{ cm}^2} = 1.0 \times 10^{-4}; \text{ 扩展因子 } k=2;$$

当被检活塞有效面积 $A'=1.0\text{cm}^2$ 时, 扩展不确定度为:

$$U = k \cdot u_c(A') = 2 \times 5.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 = 1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \quad (17)$$

即: $U = 1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, 扩展因子 $k=2$; 扩展相对不确定度:

$$U_{rel} = \frac{U}{A'} = \frac{1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2}{1.0 \text{ cm}^2} = 1.0 \times 10^{-4}, \text{ 扩展因子 } k=2;$$

1.4.9 不确定度报告

活塞式压力计有效面积检定时的扩展不确定度为:

当被检活塞式压力计有效面积 $A' = 0.5\text{cm}^2$ 时,

$$U = 5.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2; \text{ 扩展因子 } k=2;$$

扩展相对不确定度:

$$U_{rel} = 1.0 \times 10^{-4}; \text{ 扩展因子 } k=2;$$

当被检活塞式压力计有效面积 $A' = 1.0\text{cm}^2$ 时,

$$U = 1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2; \text{ 扩展因子 } k=2;$$

扩展相对不确定度:

$$U_{rel} = 1.0 \times 10^{-4}; \text{ 扩展因子 } k=2.$$

2 结语

本文以0.005级活塞压力计作为标准器对0.02级活塞压力计进行比对, 经过对活塞有效面积、专用砝码、环境温度、活塞杆的装配误差、重复性等对测量结果可能产生影响的因素进行全面分析, 评定出检定活塞有效面积时的扩展不确定度为: 当被检活塞有效面积 $A' = 0.5\text{cm}^2$ 时, 扩展不确定度 $U = 5.0 \times 10^{-5}\text{cm}^2$, 扩展相对不确定度: $U_{rel} = 1.0 \times 10^{-4}$, 当被检活塞有效面积 $A' = 1.0\text{cm}^2$ 时, 扩展不确定度 $U = 1.0 \times 10^{-4}\text{cm}^2$; 扩展相对不确定度: $U = 1.0 \times 10^{-4}\text{cm}^2$; 以上扩展因子均取: $k=2$ 。以上评定结果均符合JJG59-2022《液体活塞压力计》检定规程^[8]要求。

参考文献

- [1] 林雁波. 关于0.01级气体活塞式压力计有效面积测量结果不确定度的分析 [J]. 仪器仪表标准化与计量, 2022, (5): 32-4.
- [2] 王朋朋, 程杰, 张艳昆, 等. 0.005级压力式水深测量仪器检定装置的测量不确定度评定 [J]. 计量学报, 2021, 42(8): 1053-60.
- [3] 青青, 刘博韬. 0.01级活塞式压力计检定装置测量值的不确定度评定 [J]. 计量与测试技术, 2017, 44(3): 34-5.
- [4] 李迪. 0.005级活塞压力计标准的不确定度评定 [J]. 仪表技术, 2016, (10): 19-22.
- [5] 刘浩. 0.02级活塞式压力计活塞有效面积测量值的不确定度评定 [J]. 计量与测试技术, 2017, 44(6): 77-82.

[6] 刘靳抒, 王健, 吴斌, 等. 0.05级活塞式压力计测量不确定度评定报告 [J]. 计量与测试技术, 2012, 6(39).

[7] 许新民, 张秀松. 一等标准活塞式压力计有效面积的测量不确定度评定 [J]. 航空计测技术, 2003, 23(2): 28-41.

[8] 国家市场监督管理总局. 液体活塞式压力计检定规程: JJG59-2022: [S]. 北京: 中国计量科学研究院, 2022:

作者简介

倪宏祥 (1991—), 辽宁省葫芦岛市, 沈阳国仪检测技术有限公司, 工程师, 主要从事压力计量工作。

张同林 (1997—), 女, 硕士, 助工, 毕业于南京航空航天大学。现就职于沈阳国仪检测技术有限公司, 从事材料检测技术研究工作。

付明东 (1992—), 男, 工程师, 就职于沈阳国仪检测技术有限公司, 主要从事计量工作。

于振毅, 教授级高工, 沈阳国仪检测技术有限公司 (国家仪器仪表元器件质量检验检测中心) 总工程师, SAC/TC237/SC1 全国管路附件标准化技术委员会柔性管分技术委员会主任委员; SAC/TC237 全国管路附件标准化技术委员会委员; SAC/TC336 全国微机电技术标准化技术委员会委员; CMIF/TC17 机械工业仪器仪表元器件标准化技术委员会副主任委员; 《仪表技术与传感器》期刊编委; 《管道技术与设备》期刊编委, 沈阳工业大学校外硕士生导师。

郭义盼 (1988—), 女, 博士, 毕业于中国科学院近代物理研究所。现就职于南京航空航天大学。