

活塞式压力计 基本原理及应用

作者：董书
西安云仪仪器仪表有限公司技术总工
Xi'an Yunyi Instrument Co., Ltd



摘要

- 本文对活塞压力计的工作原理、结构类型、误差因素进行了较为详细的介绍，并结合具体实例，对活塞压力计的不确定因素进行了定量分析。
- 关键词：活塞、压力计。

压力的定义

- 压力（**P**）不是独立的基本物理量，而是质量和长度量的导出量。
- 压力的定义为： $P = F/A$ (1)
- 式中：
 - **F** 为力值
 - **A** 为承受该力值的面积
- 根据以上原理，我们可以采用多种方法通过特定的机械装置产生压力。其中最常见的方法是液体压力计装置和活塞式压力计装置。

理论依据及结构

- 活塞式压力计又称为静重式压力计，是利用流体静力平衡原理及帕斯卡定律工作的仪器。
- 活塞式压力计的结构类型有很多种，最基本的结构原理如图 1 所示。

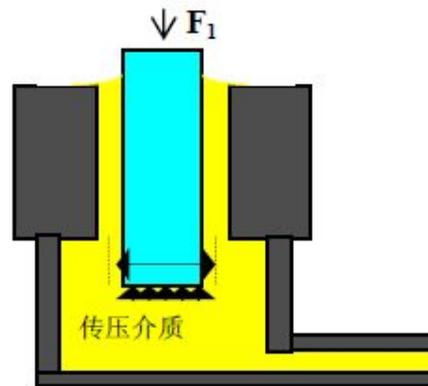


图 1

流体静力平衡

- 流体静力平衡是通过作用在活塞系统的力值与传压介质产生的反作用力相平衡实现的。活塞系统由活塞和缸体（活塞筒）组成，二者形成极好的动密封配合。活塞的面积（有效面积）是已知的，当已知的力值作用在活塞一端时，活塞另一端的传压介质会产生与已知力值大小相等方向相反的力与该力相平衡。由此，可以通过作用力值和活塞的有效面积计算得到系统内传压介质的压力。在实际应用中，力值通常由砝码的质量乘以使用地点的重力加速度得到。

不确定度影响因素

- 由此方法得到的压力的不确定度取决于仪器本身的物理特性（和不确定度）以及许多外部影响因素。所有因素都必须予以深入的分析 and 考虑。对不确定度影响因素的重视程度将直接决定测量结果“误差”的大小。

不确定度内部影响因素

- 来自活塞式压力计本身的测量不确定度的影响分量主要有：砝码、活塞系统的刚度、活塞系统的温度膨胀系数、流体的表面张力、垂直度影响、以及磁场对磁性部件的影响等。

不确定度外部影响因素

- 来自外部因素的不确定度影响分量主要有：使用地点的重力加速度、砝码在空气中受到的浮力、操作环境的受控程度和稳定程度。
- 应该注意到：我们以上讨论的不确定度分量只是局限在活塞压力计本身的测量不确定度进行分析得出的。如果我们要给出被校验仪器的测量不确定度报告，还必须对其他因素加以考虑。这些因素包括：与流体介质种类和参考压力（或气压）相关的位置差、系统泄漏、温度梯度等。

基本组成

- 活塞式压力计的基本组成原理如图 2 所示：

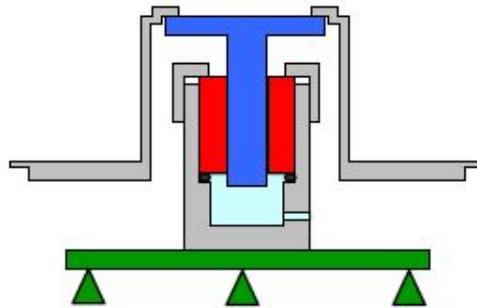


图 2

- 从图2 可以看出，活塞压力计由活塞、活塞筒、基座、砝码和压力接口组成。基座对活塞系统起支撑作用并使活塞底部工作面与传压介质相接触，基座底部的螺栓用于调节活塞系统与地面的垂直度。

活塞/活塞筒（活塞系统组件）的类型

- 对活塞压力计测量结果影响最大的因素（尤其在高压时）是压力对活塞有效面积的影响。这就是我们通常所说的“压力形变系数”。基于以上认识，我们通过多种方法对活塞系统组件加以完善，力图消除或减小“压力形变系数”对测量结果的影响。
- 最典型的活塞系统组件有三种结构形式，分别叫做“基本型”、“复入型”和“可控间隙型”。这三种结构形式的活塞系统组件由于其易实现性和商业上的可行性，至今仍被广泛采用。

基本型

- 基本型是所有活塞系统类型中最简单的一种结构，其结构原理如图 2 所示。

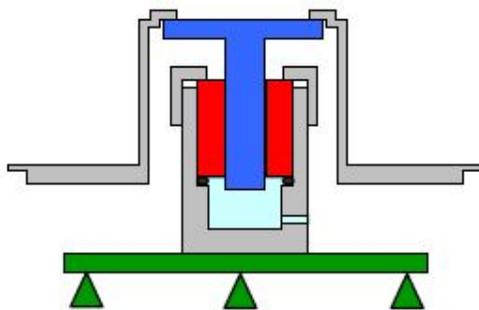


图 2

- 基本型结构中，活塞筒的外表面始终暴露在大气中。活塞筒的直径会随着压力的增加而增大，从而导致活塞有效面积的增大，为“正”压力变形系数。

复入型

- 复入型：如图3所示。

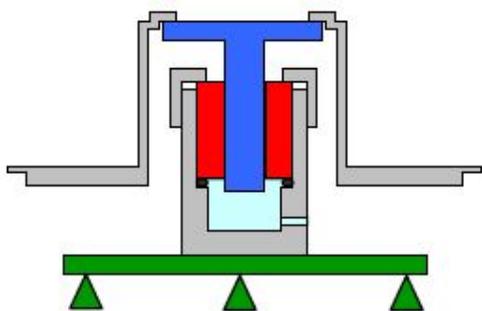


图 2

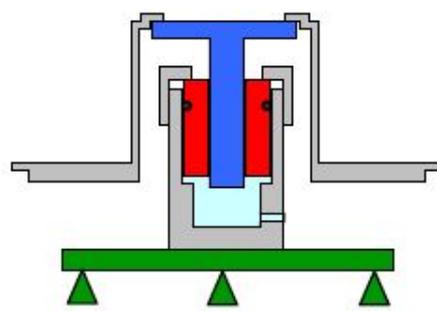


图 3

- 在这种结构类型中，将活塞系统内部压力施加到活塞筒外表面的一部分。这样以来，当系统压力增加时，活塞的有效面积通常会减小，为“负”压力变形系数。

可控间隙型

- 可控间隙型: 如图4。

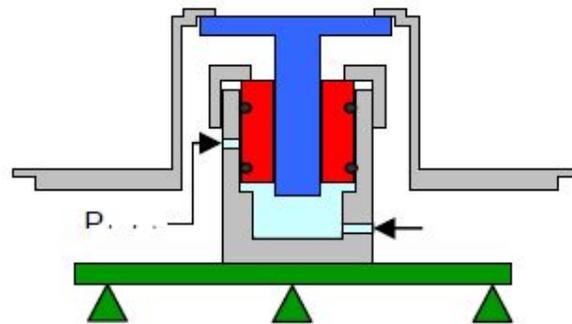


图 4

- 在这种结构类型中，活塞和活塞筒之间的间隙由作用在活塞筒外部（参与工作部分）的独立压力控制系统进行控制。目的是消除压力变形系数，使得活塞的有效面积不随系统试验压力的改变而变化。

压力与力值的关系—基本因素

- 影响压力与力值关系的基本因素有：浮力、重力加速度、流体表面张力系数，以及温度系数引起的线性膨胀、压力系数引起的弹性变形对活塞有效面积的影响等。
- 由压力的基本定义：
$$P_r = \frac{F}{A_e} \quad (2)$$
- 式中：
 - P_r --- 活塞工作端面压力值
 - F --- 作用在活塞上的力值（砝码重力）
 - A_e --- 活塞系统有效面积

压力与力值的关系—基本因素

- 又由, $F = M_a \cdot g_l$ (3)

- 得到: $P_r = \frac{M_a \cdot g_l}{A_e}$ (4)

- 式中:

- M_a = 砝码质量(经标准检定给出的表观值,包括活塞及连接件质量).
- g_l = 使用地点重力加速度

力值修正

- 浮力影响:

- 根据阿基米德定律: 物体受到的浮力等于物体排开的流体的重量。物体在空气中的重量要小于物体在真空环境中的重量, 减少的重量等于物体排开的空气的重量, 近似等于空气的密度乘以物体的体积。对于形状不规则的物体, 体积很难通过几何测量的方法计算得到, 即便可以通过计算得到, 还需要知道该物体材料的密度。如果物体的质量是以表观值表示而不是以真实质量表示的, 则在进行浮力修正时, 只要知道称量该物体质量时所使用的标准砝码的密度就可以了。这种方法已被普遍接受, 并使得浮力影响修正得以简化。

力值修正

- 在对表观值表示质量的砝码进行浮力修正时，可以不必知道砝码的密度，而直接通过称量该物体质量时所使用的标准砝码的密度进行修正（可推导证明）。尽管这样会引入很小的误差，但对于活塞压力计的浮力修正很实用，且不会造成明显的误差。
- 浮力修正公式为：
$$1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (5)$$
- 式中：
 - ρ_a = 砝码周围空气的密度
 - ρ_s = 上级标准砝码的密度

力值修正

- 重力加速度影响：
 - 从公式（4）可以看出，重力加速度对力值有直接的影响。根据力值（ F ）、质量（ M ）、重力加速度（ g_l ）选用单位的不同，定义系数 k ：
 - $k = 1$ ---当 F 单位为N, M 单位为kg, g_l 单位为 m/s^2 时；
 - $k = 1/980.665$ --- 当 F 单位为公斤力, M 单位为kg, g_l 单位为 cm/s^2 时。

力值修正

- 表面张力:

- 当活塞压力计工作介质为液体时（例如油或水），必须对表面张力的影响加以考虑。至少，需要量化其对活塞压力计整体性能的影响。

- 活塞筒顶部与活塞接触部位存在的半月形油膜的表面张力会产生作用于活塞轴向的力。

- 表面张力定义为： $F_{st} = \tau \cdot C$ (6)

- 式中:

- τ = 表面张力系数 (N/m)

- C = 活塞周长 (cm)

- 由公式 (5)、公式 (6) 可以得到有效力值的表达式为:

$$F_e = M_a \cdot [1 - \rho_a / \rho_s] \cdot k \cdot g_l + (\tau \cdot C) \quad (7)$$

面积修正

- 弹性变形

- 当压力计的工作压力增加时，活塞/活塞筒会发生弹性变形，使得活塞/圆筒体的有效面积也发生变化，这种面积的改变可以用一个二次多项式来表示：

- $$A_e = A_o * (1 + b_1 * p + b_2 * p^2) \quad (8)$$

- 式中：

- A_o ——某参考压力下活塞的面积
- b_1 & b_2 ——弹性变形系数，可通过实验获得

- 在许多应用中，可以用压力与有效面积的线性关系式和代表校准过程的随意性的余项来表述以上关系；但在需要完整表达线性数据余项时，二次表达式可能更好的反映有效面积随压力的变化规律以及随校准过程的变化规律。

面积修正

- 温度系数

➤ 当系统温度改变时，活塞/活塞筒的有效面积也将改变，变形量可通过下式计算：
$$A_{o(t)} = A_{o(ref)} \cdot (1 + c \cdot \theta_t) \quad (9)$$

➤ 式中：

- $A_{o(t)}$ ——工作温度下有效面积的修正
- $A_{o(ref)}$ ——零压力和标准温度下活塞的面积
- c ——热膨胀系数
- θ_t ——标准温度和实际工作温度的差值

➤ 结合式 (7)、(8)、(9)，我们可以得出 P-F 关系式：

$$(10) \quad P_r = \frac{M_a \cdot \left[1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right] \cdot k \cdot g_l + (\tau \cdot C)}{A_o \cdot (1 + b_1 \cdot p + b_2 \cdot p^2) \cdot (1 + c \cdot \theta_t)}$$

➤ 这里，假设活塞系统的轴线和重力加速度的方向是平行的，因不平行而产生的误差与偏离角度的余弦值成比例。

参考平面

- 无论工作介质是气体还是液体，气柱或液柱高度差在重力作用下引起的测量误差不容忽视，必须进行估测。为便于估测，必须确切一个参考位置，使得关系式 $P = F / A$ 在此位置成立。实际中通常在活塞上选择此位置，我们称之为测量的参考平面。它的位置由活塞的形状决定，如果活塞为圆柱体，则可选定活塞的下端面为参考面。如果活塞不是圆柱体，而是有锥度的，那么参考平面可在活塞静止时的支撑位置选取。
- 在计算活塞压力计的压力时，以参考平面处的压力值作为基本值，系统中其他平面的压力这样得到：该平面到参考平面的距离乘以流体的密度，再加入到（或减）参考平面上的压力值。通常在操作中，事先作个标记，然后给系统加压，直到活塞浮在标记稍稍靠上一点时，停止加压，稍后，活塞将下降到该标记处，此时系统达到稳定状态，即可读数。如果读数时活塞的位置偏高或偏低，就会产生一个误差，误差值与相同高度液柱产生的误差相等。式（10）中各参数是必须了解和量化的，忽略它们中的任何一个，将产生很大的误差，为强调这一点，下面以数据说明：如果忽略这些参数的影响，可能会在测量中产生以下典型的误差量。

力值

- 浮力: 在典型的环境下, 它相当于砝码重量的0.015% (150ppm)。
- 重力加速度: g_l 每变化 0.001 cm/sec^2 可引起压力变化 1 ppm。在美国, 不同地域重力加速度的差异可能导致的压力变化为0.3% (3000ppm)。
- 表面张力: 对于液体活塞压力计, 根据活塞的直径不同而不同, 能达到20Pa(0.003psi), 这在低压力时影响很大。
- 垂直度: 与纵轴的偏离使垂直分力减小, 减小的值与偏离角的余弦成比例, 偏离1度时, 存在0.015%的误差, 偏离0.1度时, 误差为2ppm。

面积

- 温度系数：与活塞/活塞筒的材料有关，例如：

活塞材料	活塞筒材料	温度系数 (ppm/°C)
钢	钢	24
碳化钨	钢	15
碳化钨	碳化钨	9

- 压力系数：与几何形状和材料有关，它能产生约0.05%的误差（500ppm）。

最主要的误差源

- 表1 活塞压力计的典型修正因素

修正参数	不修正情况下的典型影响
当地重力加速度与标准重力加速的偏差值	1500ppm(美国)
根据环境气压，温度和湿度确定的砝码在空气中受到的浮力	+140ppm
活塞的有效面积随压力的变化	浸入型活塞为：1.4ppm/MPa
偏离标准温度时活塞和活塞筒的变形	9.1ppm/°C（碳化钨）
液柱高度差	80Pa/cm(0.031psi/in)
气柱高度差	大气压力下为： 0.1Pa/cm(0.0005psi/ft)

最主要的误差源

- 表2 压力测量不确定度中不可修正的干扰因素

不确定度因素	可能的误差值
温度测量误差	9ppm/°C (碳化钨)
不垂直度	7'以内, 为+2ppm
活塞压力计周围的空气流动	可能很大
活塞压力计或附近物体产生的静电	可能很大
磁场	可能很大, 尤其专用砝码是磁性材料时

绝压工作模式

- 在该示例中，活塞压力计产生的压力与大气压有关，活塞的参考面，包括砝码，都置于当地的大气环境中，工作在表压测量模式；如果参考压力减小到绝对零压，那么活塞产生的压力就是绝对压力。为实现绝压工作模式，通常用一个钟形的玻璃罩将质量块封装在其内，用排量合适的真空泵，将玻璃罩内的气体抽出。
- 但将玻璃容器抽成高真空是很难实现的，应测量出内部的残余压力，并列入压力的计算式中。这样得到绝对的压力—力值关系式如下：

$$P_{r(abs)} = \frac{M_a \cdot \left[1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right] \cdot k \cdot g_1}{A_o \cdot (1 + b_1 \cdot p + b_2 \cdot p^2) \cdot (1 + c + \theta t)} - P_{ref} \quad (13)$$

- 上式中不包括表面张力修正项，是因为绝压通常只用气体活塞压力计产生，基本上不用考虑气体介质表面张力的影响。

高度差修正

- 前文叙述的压力—力值关系式考虑，即式（10），仅在活塞压力计的参考平面上是成立的，实际应用中，我们往往更关注被测试设备的受压点的压力。这需要对系统内流体（气体或液体）的高度差造成的压力差进行补偿。进行表压模式测试时，参考压力（气压）随高度的变化也必须考虑。

高度差修正

- 以图5 为例，活塞参考平面处的压力以 P_A 表示，被测仪表感压点的压力以 P_B 表示，则：

$$P_B = P_A - (k \cdot g_1 \cdot \rho_f \cdot h + k \cdot g_1 \cdot \rho_a \cdot h) \quad (14)$$

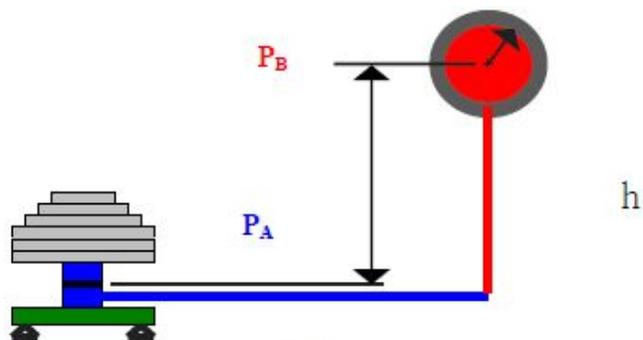


图 5

- 式中：
 - k = 比例系数
 - h = 被测试仪表感压点与活塞参考平面的垂直高度差。被测试仪表在活塞参考面上方时为正，下方为负。
 - g_1 = 当地重力加速度
 - ρ_f = 流体介质密度，随压力改变而变化，在介质为气体时尤为明显。
 - ρ_a = 空气密度。通常取 0.00118g/cm^3 ，也可根据使用地点的气压、温度、相对湿度计算得到。

高度差修正

- 通过以上修正，可得到被测仪表处的压力为：

$$P_B = P_A - k \cdot g_1 \cdot h \cdot (\rho_f - \rho_a) \quad (15)$$

- 上述修正看起来似乎意义不大，其实不然。看下面的例子：若活塞压力计所用工作介质（油）的密度为 0.9 gm/cm^3 ，则每厘米液柱产生的压力约为 0.0009 kgf/cm^2 。当活塞压力计工作压力为 100 kg/cm^2 ，液柱高度差为1厘米时，如果不对高度差进行修正，将产生9ppm 的测量误差（0.0009%）；如果高度差为10cm，则测量误差可达到90ppm (0.009%)；在这个高度差下，如果活塞压力计工作压力为 10 kgf/cm^2 ，则由液柱高度差引起的误差可达到900ppm (0.09%)。

结论

- 许多文献对活塞压力计的原理进行了很好的论述，但关于活塞压力计实际应用中需要考虑的因素的论述却少之又少。以上经验的获得来之不易，希望能对活塞压力计用户有所裨益。
- 研制活塞压力计的最终目的是产生或测量出准确的压力。
- 压力测量的误差来源主要有三方面，分别是：标准仪器、被校验仪器本身，以及使用人员和使用环境。要对测量结果的不确定进行分析，必须对以上三个方面的因素进行全面考虑。
- “准确度”是通过压力基（标）准装置的检定确定的，通常由有能力的权威计量部门给出。通过计量部门的量值传递，可以给出活塞压力计的技术特性（有效面积、压力系数、质量等），并给出以上参数的测量不确定度。
- 活塞压力计的技术性能也必须明确，包括：重复性、灵敏度、稳定性，温度系数等。这些由仪器制造商提供。
- 操作人员和环境所产生的误差也必须进行客观的分析、量化或控制。
- 活塞压力计没有固有的“准确度”，它仅仅是一个工具，它的工作特性（随机的和系统的）应包含在压力计量的全过程中。

篇外语

- 技术是良心
- 用料，机加这些更是良心
- 我们用心去做好每一个零件，活塞压力计零部件共243种零件，每一个部件我们都用心做的最好。
- 云仪器仪表的全体员工希望同中国计量同发展