

# 第二章 压力计量标准

## 第一节 活塞式压力计

### 1. 引言

活塞压力计是直接按照压力的定义公式： $P=F/A$  定义压力的，它所覆盖的压力范围从微压直到 2500MP。近年来，随着活塞加工工艺水平的提高和圆度测量技术的发展，活塞压力计的计量性能得到了巨大的发展，活塞压力计在气压段定义的压力不确定度已经达到了 3ppm，而成本和维护费用远低于液体压力计，作为一种最充满活力的测压手段，毫无疑问，活塞压力计在压力计量方面将扮演越来越重要的角色。

### 2. 活塞压力计介绍

#### 2.1 工作原理

活塞压力计是以流体静力学平衡原理及帕斯卡定律为基础测量压力的，压力定义公式如下：

$$P = \frac{F}{A}$$

其中 F 为活塞及所加砝码在重力场中产生的力，A 为活塞的有效面积。活塞压力计的原理如[图 2.1-1]：由活塞组件和砝码组组成。活塞在活塞筒内垂直地自由运动，压力作用在活塞底面产生的力和加于活塞上端的砝码重力相平衡。活塞底端的流体可为气体或液体，活塞压力计用来测量气体压力和液体压力。活塞压力计的上端以及所加砝码组有空气包围（绝压测量则为真空）。

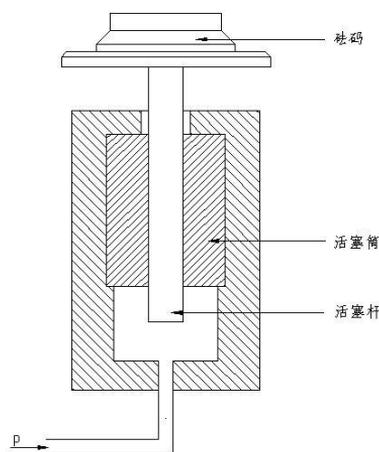


图 2.1-1 活塞压力计原理

#### 2.2 工作介质

活塞压力计按照设计分为气介质和液体介质两类。

油介质活塞压力计可覆盖几十千帕直到 2500MPa 的压力，油作为传压介质同时也润滑活塞系统，通常油介质活塞压力计集成有压力发生和调节装置，使用起来非常方便。由于在做低压测量时，必须考虑液柱差的影响，因此限制了油介质活塞在低压下的应用。

气体活塞压力计是非常适合低压测量的，但是，如果用气体润滑活塞系统要求洁净气体，并且通过活塞间隙的气体流量必须足够小，否则，将影响活塞压力计的分辨率。因此，气润滑气介质活塞一般使用在 7MPa 以下。另一种为油润滑、气介质活塞，由于活塞间隙由油密封而变的非常稳定。气压测量可达 100MPa。

## 2. 3 活塞压力计的质量水平

一个活塞压力计的压力测量质量受两个方面的影响：

- a) 我们对它的影响参数的认知水平
- b) 压力测量时的平衡质量

好的活塞平衡质量要求活塞具有好的延迟时间和下降速度，这就要求在以下方面做工作：

- 活塞加工质量和活塞系统材料选取
- 活塞的旋转速度
- 降低旋转部分的重心
- 润滑液体的选择

### 2. 3. 1 加工质量和材料选取

优质材料的选用以及优秀的加工工艺是活塞加工的关键，世界著名的活塞生产厂家可加工出活塞间隙只有十分之几个微米、延迟时间达几个小时、下降速度优于 0.1mm/分钟的优质活塞。高硬度、低热膨胀系数和弹性形变系数材料的选用，可使活塞最大限度的保持初始的几何形状。

### 2. 3. 2 活塞的旋转

旋转的活塞及砝码具有转动惯量而保持垂直取向，使活塞处于活塞筒的中央，在活塞间隙中产生一个均匀的润滑膜，从而减小活塞和活塞筒之间的摩擦力，选取合适的转动速度可使摩擦力最小，提高活塞灵敏度。

### 2. 3. 3 旋转部分的重心

为了使活塞处于活塞筒中央，一些活塞压力计的砝码承重盘设计为筒状，使砝码重心尽可能的低，这样可保持活塞垂直并理想的在活塞筒中运动。

### 2. 3. 4 润滑流体

润滑流体的选择也影响活塞的平衡质量，粘度大的流体，在通过活塞间隙时，摩擦力大，粘度小的流体在通过活塞间隙时，泄露过快，难以稳定，因此，对于特定活塞，应该选择合适粘度的流体，达到最佳折衷。对于购买的活塞压力计，建议不要轻易更改厂家推荐的润滑流体。

## 2. 4 自动压力控制

当我们在一个系统内设定一个稳定的压力后，由于系统的泄露或温度变化等原因，稳住压力是很不容易的。活塞压力计却不同，它具有自动压力控制能力，一旦压力被设定，由于活塞在上、下限之间运动，自动调节系统容积，保持压力恒定。只要一个外部压力发生器加压活塞到工作位置，在活塞浮动期间，系统自动调节，保持压力不变。

## 2. 5 修正系数及其影响

这里我们再次提起压力定义公式： $P=F/A$ ，压力的测量依赖于我们对力  $F$  和面积  $A$  的认知。

### 2. 5. 1 力的确定

处于重力场中的砝码 M 产生的力可表示为：

$$F=M \times g$$

其中 g 为活塞压力计所处地点的重力加速度。在做表压测量时，砝码还受到大气压力的浮力，考虑到浮力影响，力可表示为：

$$F=Mg(1-\rho_a/\rho_M)$$

这里 M 为总质量（包括活塞质量）， $\rho_a$  为空气密度， $\rho_M$  为砝码密度。

由于液体的表面张力，还需加入沿活塞圆周的表面张力项，从而力表示为：

$$F=Mg(1-\rho_a/\rho_M)+\Gamma\pi D$$

这里  $\Gamma$  是流体的表面张力系数，D 为活塞的直径，在作低精度测量时，该项可忽略。

## 2. 5. 2 活塞组件有效面积的确定

活塞组件的有效面积是温度和压力的函数，可表示为：

$$A=A_0[1+(\alpha_c+\alpha_p)(t-20^\circ\text{C})](1+\lambda P)$$

$A_0$  为活塞组件在零压和  $20^\circ\text{C}$  下的有效面积，对于理想几何形状的活塞，活塞筒和活塞杆之间的间隙内流体的流动为层流，在中立面，层之间的相对流速为零，层之间没有摩擦力，因此，中立面的半径即为活塞组件的有效半径，根据经典的粘性流体力学可知，两个圆柱面间流动的流体中立面半径为：

$$R_n^2 = \frac{R^2 - r^2}{2\ln(R/r)}$$

其中 R 为活塞筒半径，r 为活塞半径，取活塞间隙为 h，则  $R=r+h$ ，代入上式并取一级近似有：

$$R_n^2 = r^2 \left( 1 + \frac{h}{r} \right),$$

则活塞组件的有效面积为：

$$A_0 = \pi R_n^2 = \pi r^2 + \pi r h$$

即：活塞组件的有效面积为活塞杆的面积与活塞间隙面积的一半。

活塞组件的有效面积可由三种方法得到：

- a) 直接几何尺寸测量
- b) 下降速度测量
- c) 由上级标准传递得到

$[1+(\alpha_c+\alpha_p)(t-20^\circ\text{C})]$  项为温度变化修正项， $\alpha_c$  和  $\alpha_p$  为活塞杆和活塞筒的线性热膨胀系数，t 为活塞组件温度。

$(1+\lambda P)$  项为压力形变修正项， $\lambda$  为压力形变系数，P 为工作压力。

对于自由形变活塞，压力形变系数可由理论导出，反压型活塞，则压力形变系数由实验得到。

一般活塞压力计测量的压力可表示为：

$$P = \frac{Mg \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) + \Gamma \pi D}{A_0 [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(t - 20^\circ\text{C})] (1 + \lambda P)}$$

要获得必要的测量精度，必须对上式中的参数予以重视。

另外，还有一种活塞压力计，在一般校准实验室很少见到，这就是可控间隙活塞压力计，它主要用于高压测量和研究工作。对于可控间隙活塞压力计，活塞组件的有效面积还与控隙压力有关，可控间隙活塞组件的有效面积表示为：

$A = A_0 [1 + (\alpha_c + \alpha_p)(t - 20^\circ\text{C})] (1 + \lambda P) [1 + d(p_z - p_j)]$  其所定义的压力可表示为：

$$P = \frac{Mg \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) + \Gamma \pi D}{A_0 [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(t - 20^\circ\text{C})] (1 + \lambda P) [1 + d(P_z - P_j)]}$$

其中  $P_z$  为零隙压力， $P_j$  为控隙压力。

### 3. 活塞压力计发展历史的回顾

进入十九世纪，随着西方工业化的发展，采用液柱测量压力已经不能满足工业的需要，人们自然要寻找高压测量的途径，这就是活塞压力计。

类似今天活塞压力计的出现，可以追溯到 180 年以前。十九世纪初，Perkin 在研究流体压缩性时，制造了一台活塞压力计，可产生 200MPa 的压力，活塞为简单结构，砝码通过杠杆加于活塞上。后来，由于蒸汽机的发展，带动了活塞压力计的发展，1833 年，Parrot 等人制造了一台 10MPa 类似结构的活塞压力计。

1846 年，法国人 Galy-Cazalat 介绍了一种设计新颖的活塞压力计，包括两个直径不同的活塞，通过机械方式耦合。压力通过橡胶膜片作用在小活塞上并以力的形式传递给大活塞，大活塞上端为水银柱，由水银柱平衡压力并指示压力，这样可以通过水银柱乘以大、小活塞面积比得到压力。通过改变面积比，可以测量大到 100MPa 的压力。该活塞压力计就是当今倍压器和分压器的雏形。

1869 年，Seys 设计了双量程活塞压力计，两个不同直径的活塞，同轴的安装在一个活塞筒中，大大拓宽了活塞压力计的量程，这就是当今双量程活塞的祖先。

1880 年，Cailletet 设计了 150MPa，精度 0.5% 的活塞压力计，把活塞间隙加工到  $5\mu\text{m}$ ，这在当时是一件了不起的事情。1894 年，Stückrath 设计了带有承重盘的活塞，并且活塞的灵敏度达到了 0.04%。1893 年，法国人 Amagat 为了研究气体的压缩系数，设计了一台 300MPa 的活塞压力计，与众不同的是，Amagat 没有在活塞上使用密封材料，也没有使用橡胶膜片，而是在活塞柱体表面的加工和测量上下了一番工夫，从而使活塞可以自由旋转，大大提高了活塞的灵敏度。

1903 年，英国 NPL 研制了差动活塞，解决了高压下活塞杆过细带来的活塞杆变形和折断问题。

1912 年，Bridgman 在研究压力对材料性能的影响时，需要高压，而当时的活塞压力计只能达到 300MPa，不能满足研究的需要，为了解决在高压下测压介质通过活塞间隙泄露的问题，Bridgman 设计了工作压力大于 1300MPa 的反压型活塞，最高可达 2000MPa，这是最早的反压型活塞。

1953 年，美国 NBS（现 NIST）设计了可控间隙活塞压力计。

## 4. 活塞压力计的分类

活塞压力计有多种分类方法，可以按照活塞组件的设计结构分类，也可按照介质或测力方式分类。

### 4.1 按照活塞组件结构分类

按照活塞组件结构，活塞压力计可分为简单活塞、差动活塞、反压型活塞和可控间隙活塞。

#### 4.1.1 简单活塞

简单活塞结构如图 2.1-2 所示，压力仅作用在活塞筒的底部和内表面，在间隙内压力的作用下，活塞筒自由形变，直径增大，而活塞杆的直径变化远小于活塞筒，活塞间隙内流体的中立面半径变大，有效面积增大，压力形变系数可通过理论计算得到。简单活塞，加工工艺简单，活塞灵敏度高，因此得到了广泛的应用。

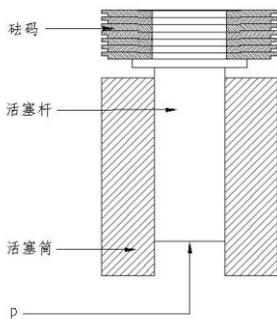


图 2.1-2 简单活塞

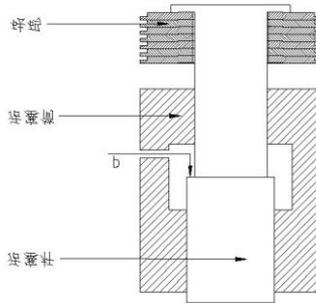


图 2.1-3 差动活塞

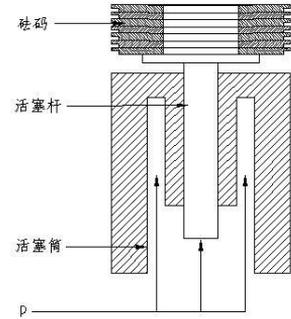


图 2.1-4 反压型活塞

#### 4.1.2 差动活塞

差动活塞如图 2.1-3 所示，由两套活塞组件通过机械耦合结合起来，压力作用在两个活塞的连接处，活塞的有效面积为两套活塞面积之差。差动活塞活塞杆较粗，有效面积很小，主要用于高压，解决细活塞杆容易变形和折断的问题。这种活塞加工较为复杂。

#### 4.1.3 反压型活塞

反压型活塞在结构设计或安装结构设计上，可将侧压力导入活塞筒外表面，用以补偿活塞间隙中压力引起的活塞筒形变。原理结构如图 2.1-4 所示，当活塞筒壁较薄或测量压力较高时，可以考虑采用这种结构。如 DH 公司的 5301 型油介质活塞压力计即采用这种设计。由于活塞筒外部压力总是大于间隙压力，活塞的有效面积随着压力增大减小，压力形变系数为负值并可通过实验获得。

#### 4.1.4 可控间隙活塞

可控间隙活塞是在简单活塞的活塞筒外壁施加独立的压力，控制活塞和活塞筒之间的间隙的活塞压力计。这种活塞压力计主要用于高

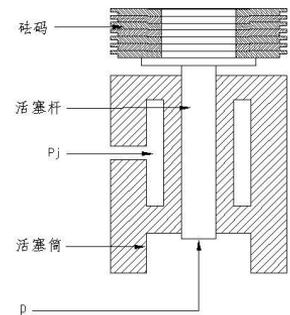


图 2.1-5 可控间隙活塞

压测量和压力计量研究工作中。近年来，随着活塞技术的发展，在高精度低压测量中，也采用了可控间隙技术，如，NIST 的 PG-27 油介质活塞。

## 4. 2 按照工作模式分类

按照工作模式，活塞压力计可分为气润滑气介质活塞、油润滑气介质活塞和油介质活塞三种。

### 4. 2. 1 气润滑气介质活塞

气润滑气介质活塞测压介质为气体，活塞间隙内的润滑流体为测压气体。由于气体的粘度很小，所以活塞的灵敏度很高，适合做高精度低压力测量。缺点是对测压气体和被检仪表的洁净度和湿度要求很严格，同时做高压测量不易稳定，一般量程不高于 7MPa。这种类型的活塞首先由美国 CEC 公司推出，现在法国 DH 公司生产的 APX50 气润滑气介质活塞不确定度已达到 3ppm，并成为取代汞液体压力计的基准在 LNE 使用。

### 4. 2. 2 油润滑气介质活塞

油润滑气介质活塞压力计的测压介质为气体，活塞间隙内的润滑流体为液体，工作原理如图 2.1-6：一个可视液面的油杯底部和活塞筒相连，被测压力  $P_g$  同时作用在活塞低部和油杯液面上，活塞间隙中的液体压力  $P_i = P_g + \rho gh$ ，这个压力总是比测量压力  $P_g$  高出一个液柱差。由于压差不大且活塞间隙很小，进入系统的液体微乎其微，并且可分离到收集器，定期排除。由于采用液体润滑，活塞间隙被液体密封而没有泄漏，且不受检定介质质量的影响，因此，可做高压禁油压力仪表的检定，最高压力可达 100MPa，典型产品有 DH 公司的 5200 型油润滑气体活塞压力计。

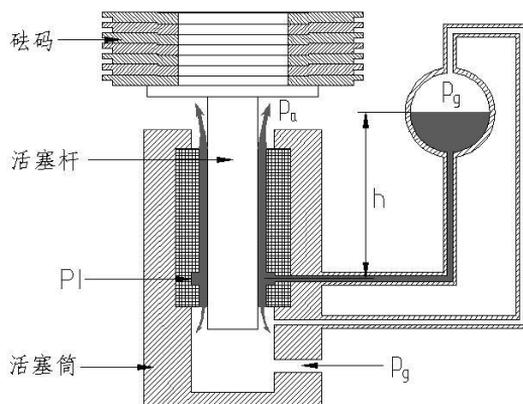


图 2.1-6 油润滑气介质活塞

### 4. 2. 3 油介质活塞

油介质活塞的测压介质和润滑液体均为油，适于作为中、高压标准，并被广泛应用。近年来，由于活塞研磨工艺的提高，活塞压力计的介质选用趋于低粘度的植物油和矿物油，从而提升活塞压力计的灵敏度。

## 4. 3 按测力方式分类

我们知道，活塞压力计是通过向长度和质量溯源来定义压力的，质量的标准传递过程为砝码和天平组成的传递链，活塞压力计即可采用砝码测量压力作用在活塞有效面积上产生的力，也可采用天平测量压力作用在活塞有效面积上产生的力，由此，活塞压力计分为砝码式活塞压力计和天平式活塞压力计。

### 4. 3. 1 砝码式活塞压力计

砝码式活塞压力计是应用最广泛的压力计量仪器，我们几乎可以在所有压力实验室看到它。按照

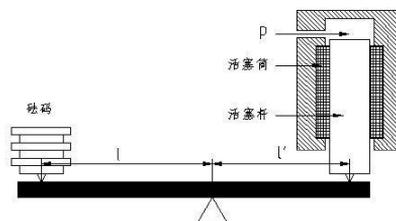
砝码加载方式可分为直接加载和间接加载两种，如：直接活塞顶端加载、降低重心顶端加载、活塞底端悬挂和活塞上端悬挂等加载方式为直接加载式活塞压力计；杠杆加载和倍增器液压加载为间接加载。

### 4. 3. 2 天平式活塞压力计

对于砝码式活塞压力计，我们大家都不陌生，但对天平式活塞压力计，可能大家并不熟悉，这里简单予以介绍。

天平式活塞压力计包括活塞组件、天平、标准砝码和底座。原理如图 2.1-7，被测压力通过活塞转化为力，作用在天平横梁的一端，另一端采用砝码平衡，根据所加平衡砝码及天平两端臂长比，即可测出力值，即： $Mg \times l = P \times A_c \times l'$ 。

天平可不等臂，从而可采用这种活塞压力计测量微压和高压。其实，早期高压活塞压力计即采用这种结构，八十年代初计量院、上海计量所、西安自动化仪表研究所和上海天平厂曾经联合研制过这种天平式微压活塞压力计。与我国同期研究这种活塞压力计的还有 DH 公司，他们在七十年代末开始设计并于八十年代初设计完成，成为商品。到目前已经多次更新换代，并采用电子天平，实现了活塞压力计的数字化和检定点的连续化。



## 5. 复杂活塞系统

所谓复杂活塞系统，是由活塞压力计演变出来的，完成一般活塞压力计所不能完成的特殊校准任务的活塞。这种活塞，对生产厂家的加工能力要求很高，所以，生产厂家不多，市场上也较少见。常见的有双量程活塞、压力倍增器和压力差分器。

### 5. 1 双量程活塞

双量程活塞结构如图 2.1-8 所示，活塞组件包括低量程活塞、高量程活塞、辅助活塞和活塞筒。低压下，低量程活塞在压力作用下向上移动，顶起辅助活塞和砝码到工作位置，当压力继续增高到低量程活塞满量程时，继续升高压力，低量程活塞和活塞筒底部接触而停止工作。高量程活塞在压力作用下，继续向上顶起辅助活塞和砝码到高量程活塞的工作位置。一般活塞覆盖量程十分之一到满量程的压力范围，双量程活塞可覆盖量程百分之一到满量程的压力范围。而且使用起来非常方便。但是，加工这种活塞需要三个活塞面和两个活塞筒面同轴，这要比加工通常活塞（要求一个活塞面和一个活塞筒面同轴）困难得多。

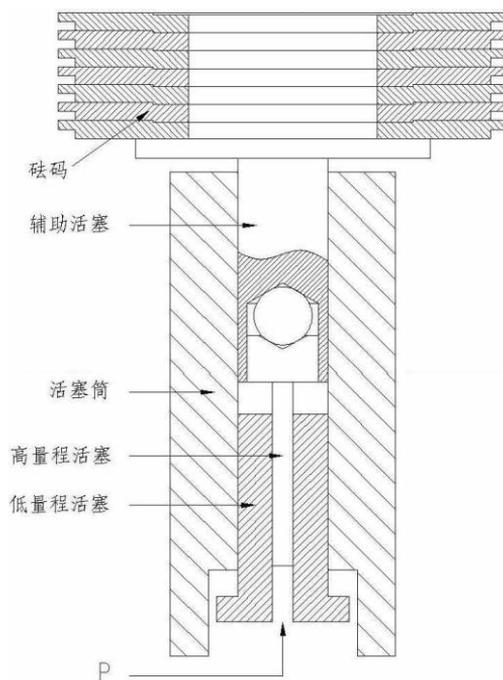


图 2.1-8 双量程活塞

### 5. 2 压力倍增器

压力倍增器的设计是为了把高压活塞压力计的量程向上延伸数倍，使高压活塞压力计即可做一般高压测量，也可做超高压测量。

压力倍增器的结构如图 2.1-9 所示：它包括两套耦合的活塞，低压活塞的面积是高压活塞的数倍（设为 K），当压力倍增器的耦合活塞达到平衡时，高压活塞上端的压力是低压活塞下端的压力的 K 倍。活塞的面积比 K 即为压力倍增器的计量参数。一般压力倍增器的两个活塞组采用同一材料制造，温度膨胀系数相同，K 值不受温度影响。而由于两组活塞所受压力不同，K 值是压力的函数： $K=K_0 \times (1+\lambda P)$ ， $\lambda$  可由试验得到。

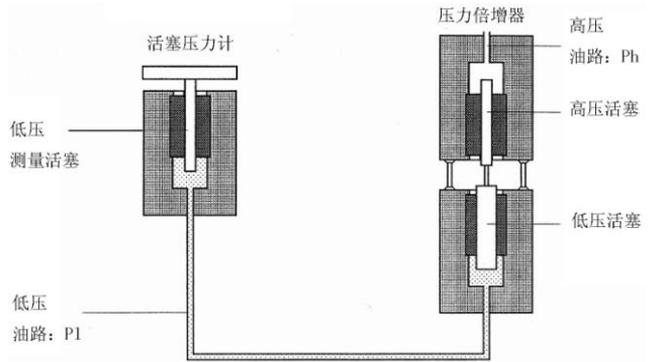


图 2.1-9 压力倍增器

压力倍增器可用于超高压活塞压力计，这种采用压力倍增器的超高压标准与可控间隙超高压活塞相比，具有测量起始压力低，结构小巧轻便，可以方便的移动的优点。

### 5. 3 压力差分器

压力差分器的设计是为了静压下小差压的测量，静压可为任何负压、正压，最高静压可达 40MPa。结构如图 2.1-10 所示：它包括三组同轴的活塞，上、下活塞面积相等，中间活塞的面积是上、下活塞的数倍（设为 K）。活塞之间有两个腔体，腔内被导入静压后由阀门分离，上方腔体加以小压力  $\Delta p$ ，则由此增加的向下的附加力为  $(A-a) \times \Delta p$ ，要使压力差分器活塞平衡，则必须在下端活塞底部增加压力  $\Delta p_{平衡}$ ，使  $a \times \Delta p_{平衡} = (A-a) \times \Delta p$ ，则

$$\Delta p = \frac{a}{A-a} \times \Delta p_{平衡}$$

$\Delta p_{平衡}$  和静压可由其它活塞测量，从而可得到差压，

差压量程由面积比确定，且为压力差分器唯一的参数  $K_d$ ， $K_d$  不受温度和压力的影响。这种差压测量方法的优点是：所测差压可以很小；压力测量不确定度与静压无关；操作方便，这些是双活塞活塞压力计在差压测量时所做不到的。

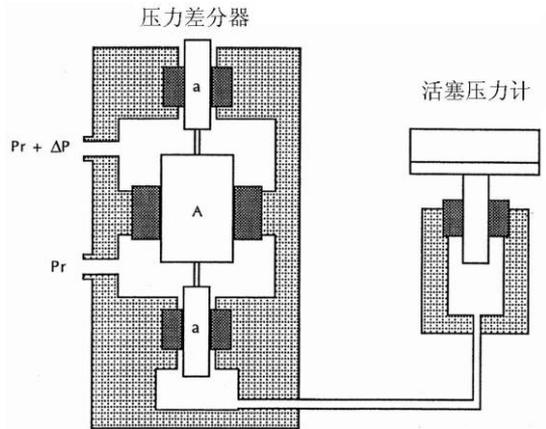


图 2.1-10 压力差分器