

## 第三章

## 压力检测

## 3.1 概述

- 压力是一个基本的工艺参数，它可以改变化学平衡、影响反应速度，也可以改变物质的性质、提高过程质量，所以在许多生产过程中，工艺上都对压力提出一定的要求，以达到高产、优质、低耗和安全生产的目的。
- 例如，塑料厂生产的高压聚乙烯要在  $1500\text{MPa}$  的高压下聚合；而涤纶厂在对对苯二甲酸乙二醇进行聚合时，又要在压力仅为  $1\text{mmHg}$  的情况下进行。

## 一. 压力的定义

工程上所谓的**压力**，指的是**垂直而均匀地作用在单位面积上的力**，即物理学中所说的**压强**，用数学式表示为：

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

$P$ ---压力

$F$ ---垂直作用力

$A$ ---受力面积

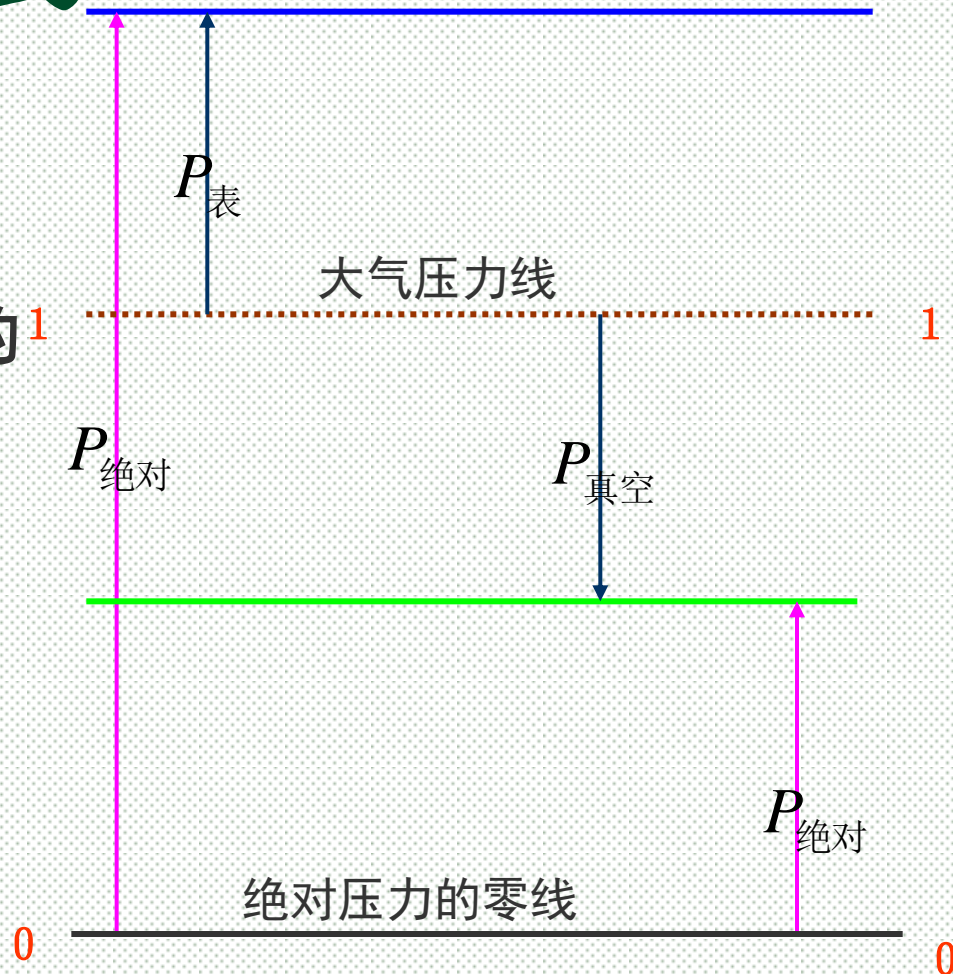
## 二. 压力的表示方式

1. 绝对压力  $P_{\text{绝对}}$ ——介质实际所受的压力；
2. 表压  $P_{\text{表}}$ ——高于大气压的绝对压力与大气压之差；

$$P_{\text{表}} = P_{\text{绝对}} - P_{\text{大}}$$

3. 真空度  $P_{\text{真空}}$ ——大气压力与低于大气压的绝对压力之差（有时也称负压）；

$$P_{\text{真空}} = P_{\text{大}} - P_{\text{绝对}}$$



## 注意到:

- 各种工艺设备和测量仪表通常是处于大气之中，本身就承受着大气的压力。所以工业上使用的**压力表**和**真空表**，其指示值分别为**表压**和**真空度**。
- 在许多计算中用的是**绝对压力**，则可以用表压加  $1\text{kgf}/\text{cm}^2$  来近似表示被测的绝对压力。
- 化工生产领域中，压力的范围很广，高压可达  $10^4\text{kgf}/\text{cm}^2$  低压可达真空度为  $760\text{mmHg}$

### 三. 压力的单位

在工程技术上衡量压力的单位主要有以下几种：

#### 1. 帕 (Pa)

帕是国际制 (SI) 单位，以 ( $N/m^2$ ) 表示，即：

$$1Pa = 1N/m^2$$

#### 2. 工程大气压 ( $kgf/cm^2$ )

即1公斤力垂直而均匀地作用在1平方厘米的面积上所产生的压力，与帕的关系为：

$$1kgf/cm^2 = 0.9807 \times 10^5 \text{帕}$$

#### 3. 毫米汞柱 ( $mmHg$ )，毫米水柱 ( $mmH_2O$ )

即在1平方厘米面积上分别由1毫米汞柱、1毫米水柱的重量产生的压力，常用于测量较低的压力，与帕的关系为：

$$1mmHg = 1.332 \times 10^2 \text{帕}$$

$$1mmH_2O = 0.9807 \times 10 \text{帕}$$

# 压力单位之间的关系:

单位	帕 (Pa)	巴 (bar)	工程 大气压 (kgf/cm <sup>2</sup> )	标准 大气压 (atm)	毫米水柱 (mmH <sub>2</sub> O)	毫米汞柱 (mmHg)	磅力/平方 英寸 (lbf/in <sup>2</sup> )
帕 (Pa)	1	$1 \times 10^{-5}$	$1.019716 \times 10^{-5}$	$0.9869236 \times 10^{-5}$	$1.019716 \times 10^{-1}$	$0.75006 \times 10^{-2}$	$1.450442 \times 10^{-4}$
巴 (bar)	$1 \times 10^5$	1	1.019716	0.9869236	$1.019716 \times 10^4$	$0.75006 \times 10^3$	$1.450442 \times 10$
工程大气压 (kgf/cm <sup>2</sup> )	$0.980665 \times 10^5$	0.980665	1	0.96784	$1 \times 10^4$	$0.73556 \times 10^3$	$1.4224 \times 10$
标准大气压 (atm)	$1.01325 \times 10^5$	1.01325	1.03323	1	$1.03323 \times 10^4$	$0.76 \times 10^3$	$1.4696 \times 10$
毫米水柱 (mmH <sub>2</sub> O)	$0.980665 \times 10$	$0.980665 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$0.96784 \times 10^{-4}$	1	$0.73556 \times 10^{-1}$	$1.4224 \times 10^{-3}$
毫米汞柱 (mmHg)	$1.333224 \times 10^2$	$1.333224 \times 10^{-3}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.3158 \times 10^{-3}$	$1.35951 \times 10$	1	$1.9338 \times 10^{-2}$
磅力/平方英寸 (lbf/in <sup>2</sup> )	$0.68949 \times 10^4$	$0.68949 \times 10^{-1}$	$0.70307 \times 10^{-1}$	$0.6805 \times 10^{-1}$	$0.70307 \times 10^3$	$0.51715 \times 10^2$	1

## 例题：

在大气压为  $1\text{kgf}/\text{cm}^2$  的条件下，已知某容器内绝对压力为  $0.4\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，则容器内的真空度是多少？如果容器内绝对压力为  $2.2\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，则容器的表压应为多少？

解： 
$$P_{\text{真空}} = (1 - 0.4)\text{kgf}/\text{cm}^2 = 0.6\text{kgf}/\text{cm}^2$$
$$= (0.6 \times 10^4) \text{ mmH}_2\text{O} = 6000\text{mmH}_2\text{O}$$

$$P_{\text{表}} = (2.2 - 1)\text{kgf}/\text{cm}^2 = 1.2\text{kgf}/\text{cm}^2$$
$$= (1.2 \times 0.98 \times 10^5 \times 10^{-6}) \text{ MPa} = 0.1176\text{MPa}$$



## 四. 压力的检测方法

### (1) 弹性力平衡方法

弹簧管压力计、波纹管压力计、膜式压力计

基于弹性元件的弹性变形特性进行测量。

### (2) 重力平衡方法

U型管压力计

活塞式压力计将被测压力转换成活塞上所加平衡砝码的质量来进行测量。

液柱式压力计是根据流体静力学原理，将被测压力转换成液柱高度进行测量。

### (3) 机械力平衡方法

将被测压力变换成一个集中力，用外力与之平衡，通过测量平衡时的外力来得到被测压力。

### (4) 物性测量方法

电气式压力计、振频式压力计、  
光纤压力计、集成式压力计

基于在压力作用下测压元件的某些物理特性发生变化的原理。

## 3.2 常用压力检测仪表

- 弹性式压力计
- 液柱式压力计
- 负荷式压力计
- 压力传感器
- 压力开关

## 3.2.1 弹性压力表

- 弹性式压力表的基本传感元件是弹性元件
- 根据弹性元件受力后发生弹性形变的原理来测量压力

## 一. 弹性元件

当弹性元件在其轴向受到外力作用时，就会产生拉伸或压缩位移，即：

$$F = C \cdot X$$

$$X = \frac{F}{C} = \frac{A_e \cdot p}{C} = \frac{A_e}{C} \cdot p$$

$F$  --- 轴向外力

$C$  --- 弹性元件的刚度系数

$X$  --- 位移

$A_e$  --- 弹性元件受压的有效面积

$p$  --- 被测压力

为了保证测量精度，通常弹性元件的位移很小，使之工作在弹性特性的线性范围内，从而可近似认为 $C$ 是常数，使弹性元件的位移与被测压力成正比。

类别	名称	示意图
薄膜式	平薄膜	
	波纹膜	
	挠性膜	
波纹管式	波纹管	
弹簧管式	单圈弹簧管	
	多圈弹簧管	

常用的弹性元件

波纹膜片

波纹管

弹簧管

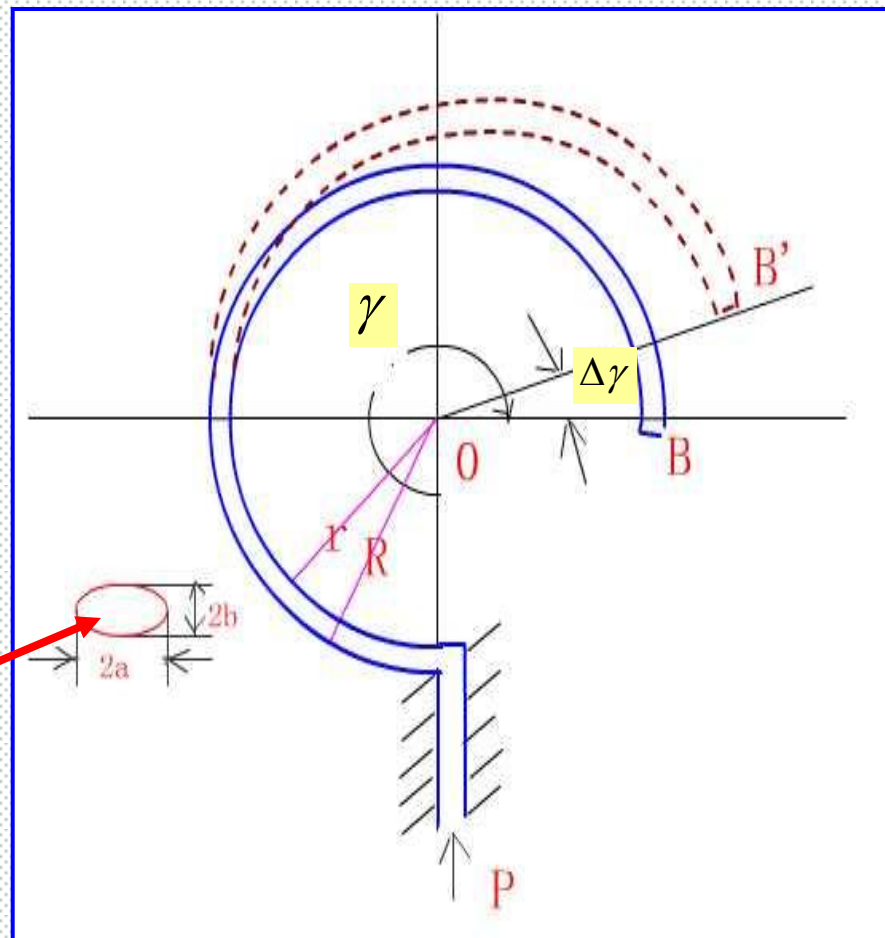
波纹膜片和波纹管用于测量低压和微压；

弹簧管可用于测量高、中、低压直至真空度，故使用较多。

## 二. 弹簧管压力表

弹簧管是一根弯曲成圆弧形的**金属空心管**，中心的初始角一般为  $\gamma = 270^\circ$ ，**截面积呈扁圆形或椭圆形**。一端是固定的，作为被测压力的输入端，另一端密封的，并且不固定，称为自由端。

不可以是  
圆形的吗？



单圈弹簧管测压原理



当管内通入被测压力 $P$ 时，**椭圆形截面就将趋向圆形**，其自由端就有一个小的**位移**，使金属管的中心角有一个变化量。

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = p \frac{1-\mu^2}{E} \cdot \frac{R^2}{b \cdot h} \left( 1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \cdot \frac{\alpha}{\beta + \kappa^2}$$

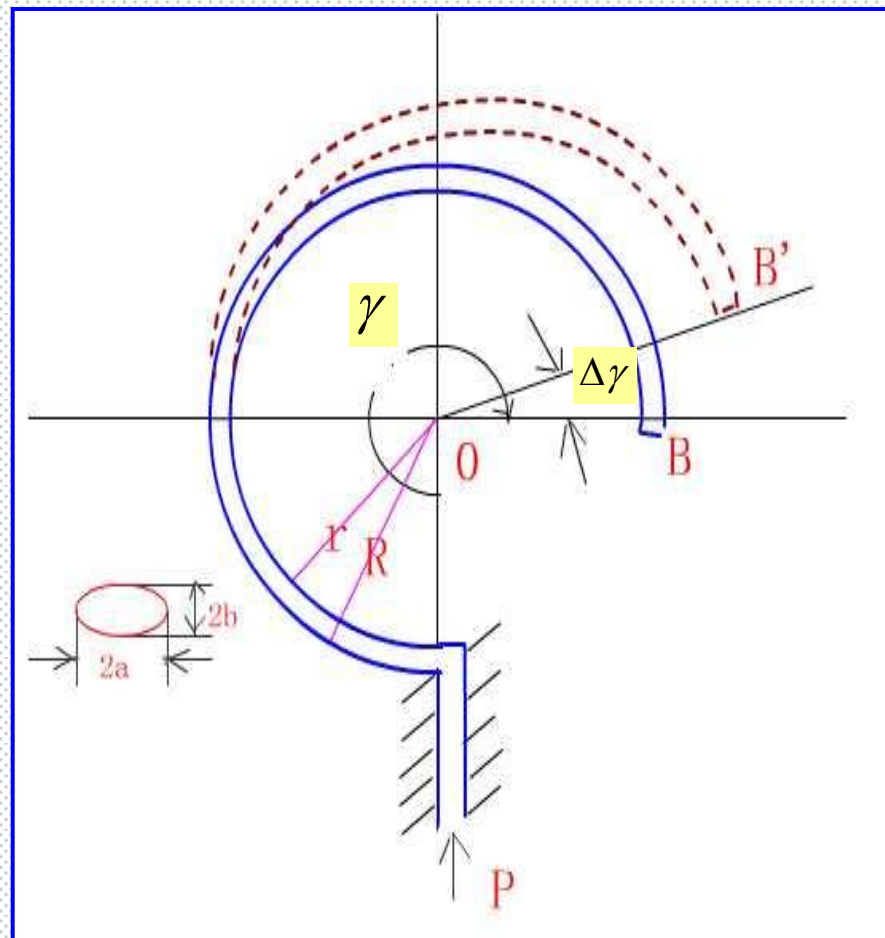
$\mu, E$  --- 弹簧管材料的泊松系数和弹性模数

$h$  --- 弹簧管壁厚

$\kappa$  --- 弹簧管的几何参数

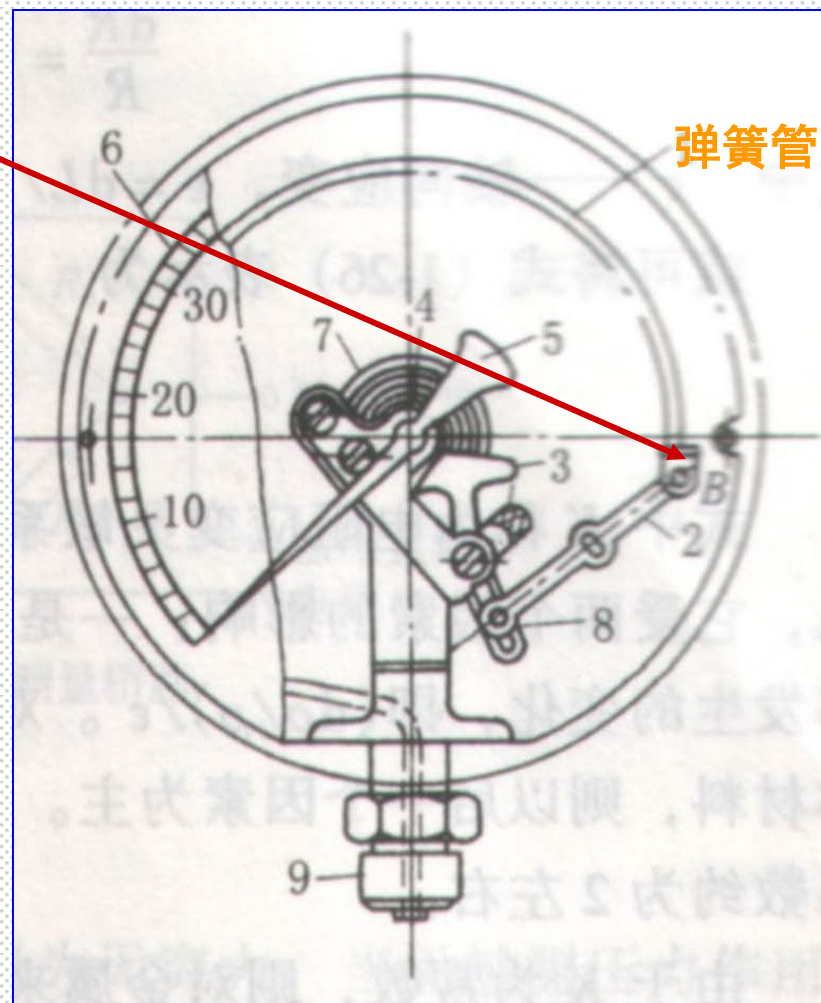
$\alpha, \beta$  --- 与 $a/b$ 比值有关的参数

即可以用变化量 $\Delta\gamma$ 来测量被测压力 $P$ 。



单圈弹簧管测压原理

- 弹簧管自由端的位移很小，必须通过传动机构将其放大，才能用指针式仪表直接指示被测压力。
- **弹簧管的自由端与机械式的传动机构连在一起**，带动指针的偏转，以实现压力的测量。





## 弹簧管压力计的特点：

结构简单；

体积小；

测量范围广；

测量精度较高；

仅适用于压力的就地显示  
及远距离报警。



### 三. 膜片

膜片是一种圆形薄板或薄膜，其周边固定在壳体或基座上。当膜片两边的压力不等时就会产生位移。

将膜片成对地沿着周边密封焊接，就构成了膜盒。若将膜盒内部抽成真空，常用于测量大气的绝对压力。

膜片受到压力作用产生的位移量较小，须将膜片和其他转换元件结合在一起使用。

例如，在力平衡式压力变送器中，膜片受压后的位移，通过杠杆和电磁反馈机构的放大和信号转换等处理，输出标准电信号；

在电容式压力变送器中，将膜片与固定极板构成平行板电容器，当膜片受压产生位移时，测出电容量的变化就间接测得压力的大小；

在光纤式压力变送器中，入射光纤的光束照射到膜片上产生反射光，反射光被接受光纤接受，其强度是光纤至膜片的距离的函数，当膜片受压后的位移后，接受到的光强度信号相应会发生变化，通过光电转换元件和有关电路的处理，就可以得到与被测压力对应的电信号。

## 四. 波纹管

波纹管是一种轴对称的波纹状薄壁金属筒体，当它受到轴向力作用时能产生较大的伸长或收缩位移。

波纹管的位移相对较大，通常在其顶端安装传动机构，带动指针直接读数。

波纹管灵敏度较高，适合检测低压信号，测压范围是 $1.0 \sim 10^6 \text{Pa}$ ，但波纹管时滞较大，测量精度一般只能达到1.5级。

## 3.2.2 液柱式压力表

- 液柱式压力计根据流体静力学原理，将被测压力转换成液柱高度进行测量。
- U型管压力计、单管压力计、斜管压力计

类别	工作原理	用途	特点
U型管压力计	流体静力学原理	实验室低压、负压和小差压测量	适合静压测量；需两次读数，读数误差大；测量范围-10~10kPa，精度0.2级、0.5级
单管压力计		压力基准仪器或压力测量	适合静压测量；只需一次读数，读数误差比U型管小
斜管压力计		微压（小于1.5kPa）测量	适合静压测量；倾斜度越小，灵敏度越高，但测量范围也越小

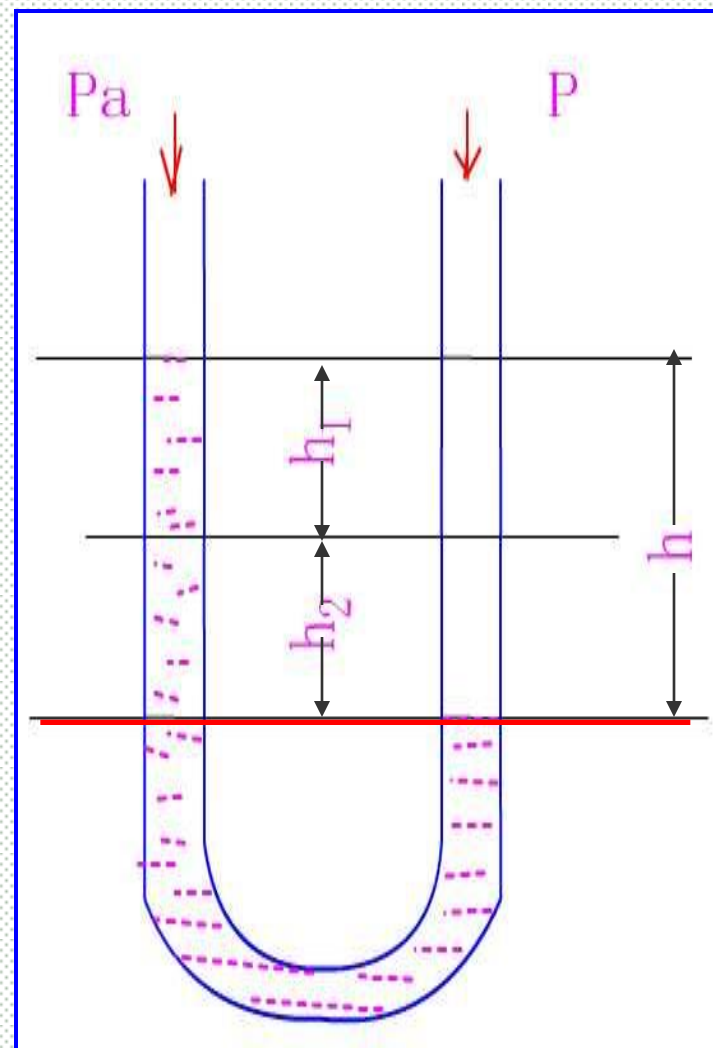
# U型管压力计

当U型管压力计的一端通大气，另一端接被测压力时，有：

$$(\rho' \cdot g \cdot h + P)A = (\rho \cdot g \cdot h + P_a) \cdot A$$

$\rho$  --- U型管内所充工作液的密度

$\rho'$  --- 被测介质的密度



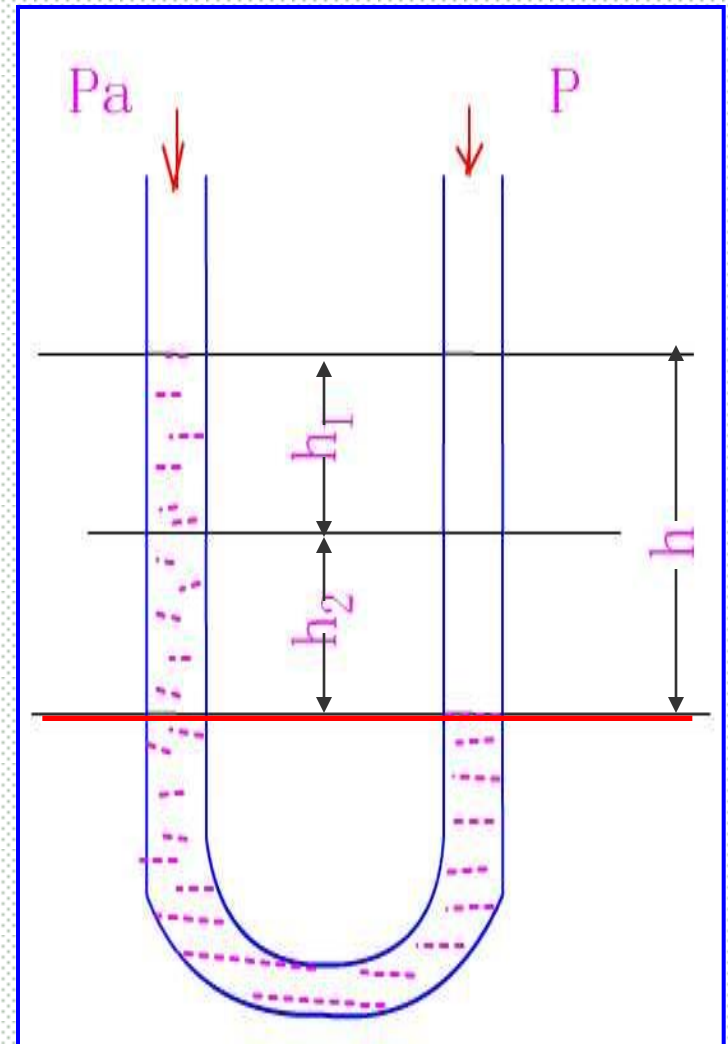
U型管压力计

$$(\rho' \cdot g \cdot h + P)A = (\rho \cdot g \cdot h + P_a) \cdot A$$

$$h = \frac{P - P_a}{(\rho - \rho')g} \approx \frac{p}{\rho \cdot g}$$

表压

即被测压力的**表压**与工作液的**高度**成正比。



U型管压力计

## 液柱式压力计的特点：

- 测量比较准确；
- 不能远距离传送，只能安装在现场供操作人员参考，而且比较容易出现视差；
- 一般适用于测量低压、负压或压力差。



## 3.2.3 负荷式压力表

- 负荷式压力计直接按压力的定义制作。
- 根据静力学原理，被测压力等于活塞系统和砝码的重力除以活塞的有效面积。
- 活塞式压力计、浮球式压力计、钟罩式微压计

类别	工作原理	用途	特点
活塞式压力计	静力平衡（压力转换成砝码重量）	中、高压标准校验仪器	结构简单，性能稳定，精度高；操作稍复杂，不能直接测量
浮球式压力计		低压标准压力发生器	结构简单，性能稳定，精度高；操作方便
钟罩式微压计		微压标准校验仪器和标准微压发生器	精度与灵敏度高，可测正压、负压、绝对压力



## 3.2.4 压力传感器

基于在压力作用下测压元件的某些物理特性发生变化的原理工作，能够检测压力并提供远传信号，能够满足自动化系统集中检测显示和控制的要求。

当压力传感器输出的电信号进一步变换成标准统一信号时，又将它称为压力变送器。

电阻应变片压力传感器、压电式压力传感器、电感式压力传感器、电容式压力传感器、电位器式压力传感器、霍尔压力传感器、谐振式压力传感器。。。。。

类别	工作原理	用途	特点
电阻应变片压力传感器	应变效应或压阻效应	用于将压力转换成电信号，实现远距离监测、控制	将应变片粘贴在弹性元件上，在弹性元件受压变形的同时应变片也发生应变，其电阻值发生变化，通过测量电桥输出测量信号。
压电式压力传感器	压电效应		长期稳定性能好，线性好，重复性好，迟滞小，使用温度范围宽，频率响应范围宽，体积小，重量轻。
电感式压力传感器	压力引起磁路磁阻变化，造成铁芯线圈等效电感变化		结构简单、灵敏度高、输出功率大、输出阻抗小、抗干扰能力强；响应较慢，分辨率随测量范围增大而减小。测量范围0~100kPa，精度在0.2~1.5级之间。
电容式压力传感器	压力引起电容变化		体积小，重量轻；陶瓷薄膜材料性能稳定，耐腐蚀；可将模拟量远距离传送，也可用脉冲频率调制法传输，抗干扰性能好，不必用屏蔽导线；精度高，可达±0.2%；测量范围广，可从0~4kPa到0~6MPa；可在粉尘和有爆炸危险场合下应用。
电位器式压力传感器	压力推动电位器滑头移动		
霍尔压力传感器	霍尔效应		受温度影响大，需采取恒温或温度补偿措施。
光纤压力传感器	用光纤测量由压力引起的位移变化		
谐振式压力传感器	压力改变振体的固有频率		结构简单，性能稳定可靠。测量范围0~42MPa，精度0.02~0.5级。

## 一. 应变片式压力传感器

- 应变片是由金属导体或半导体材料制成的电阻体, 基于应变效应工作。
- 在电阻体受到外力作用时, 其电阻阻值发生变化, 相对变化量为

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon$$

- $\varepsilon$ 是材料的轴向长度的相对变化量, 称为应变;
- $k$ 是材料的电阻应变系数

# (1) 金属材料的应变效应

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$\rho$  --- 电阻率

$L$  --- 导体长度

$A$  --- 导体横截面积

**金属电阻：**受轴向（或径向）的外力作用时，长度  $L$  和截面积  $S$  发生方向相反的变化（电阻率的变化很小，可以忽略），从而引起电阻值的变化。

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \approx \frac{dL}{L} - \frac{2dD}{D}$$

$$A = \pi \frac{D^2}{4}$$

- 根据材料力学可知：

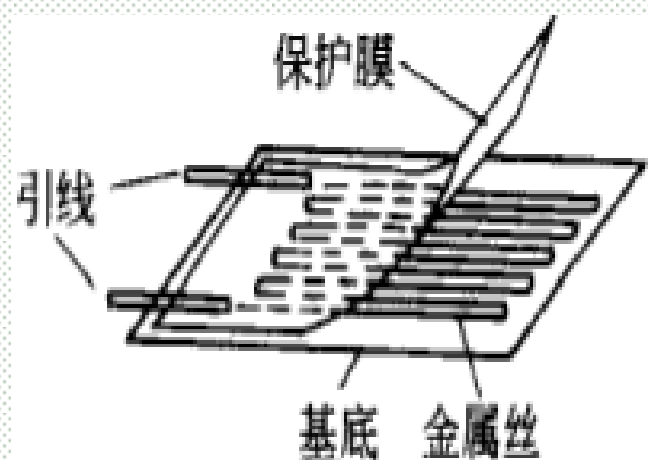
$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \approx \frac{dL}{L} - \frac{2dD}{D}$$

$$\frac{dD}{D} = -\mu \frac{dL}{L}$$

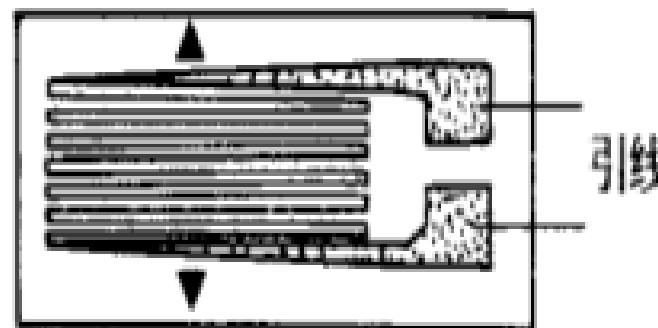
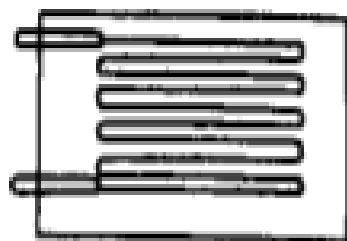
$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \left( -2\mu \frac{dL}{L} \right) = (1 + 2\mu) \frac{dL}{L}$$

**结论：**金属材料受外力影响产生的相对电阻变化率和其应变量成正比。

# 金属电阻应变片的结构形式



(a) 丝式应变片



(b) 箔式应变片

## (2) 半导体的压阻效应

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}$$

**半导体电阻：**受轴向（或径向）的外力作用时，电阻率发生较大的变化（远大于长度L和截面积S发生的变化），从而引起电阻值的变化。

$$\frac{dR}{R} \approx \frac{d\rho}{\rho} = \pi E \varepsilon$$

$\pi$  --- 半导体材料的压阻系数

$E$  --- 半导体材料的弹性模量

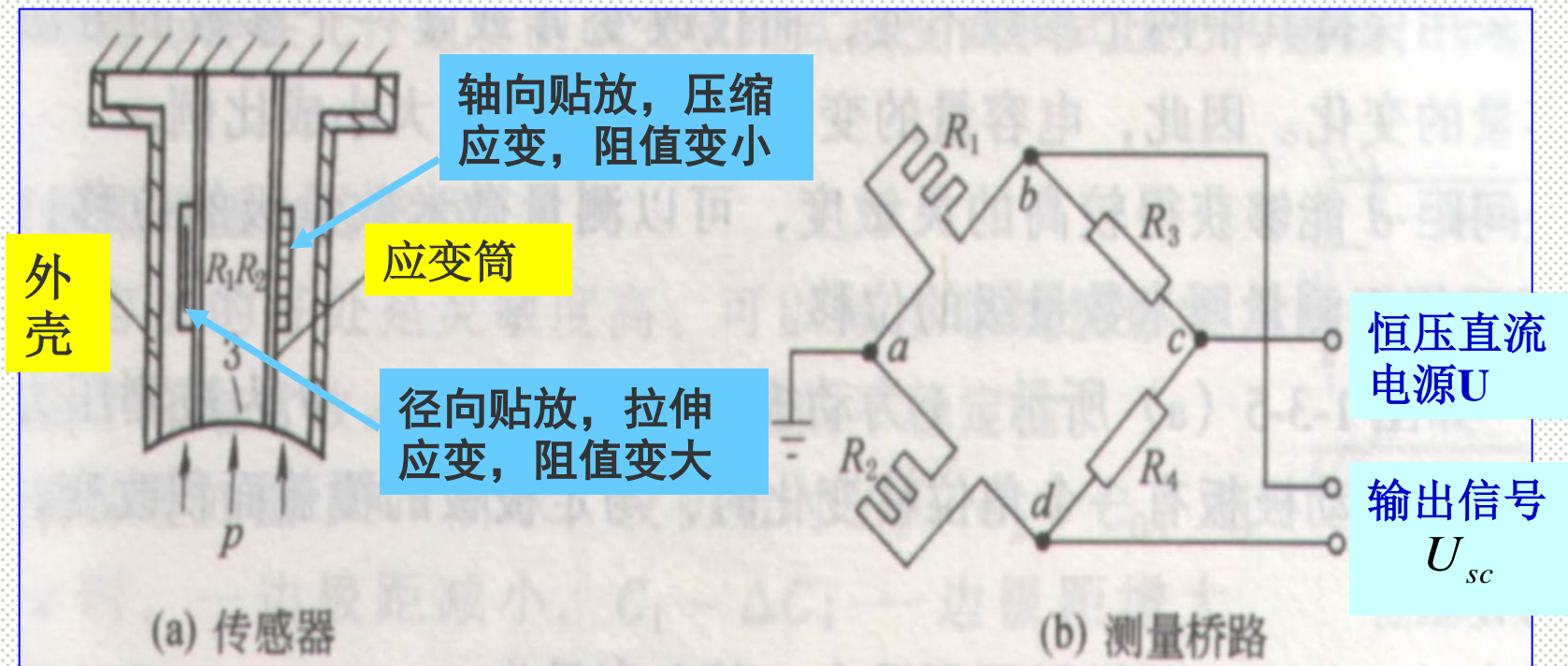
$\varepsilon$  --- 轴向应变



### (3) 应变式压力传感器及测量线路

将应变片粘于弹性元件上，应变片将被测压力转换成电阻值的变化，再由测量桥路获得相应的毫伏级电量的输出信号。

$$U_{sc} = U_{ba} - U_{da} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U$$

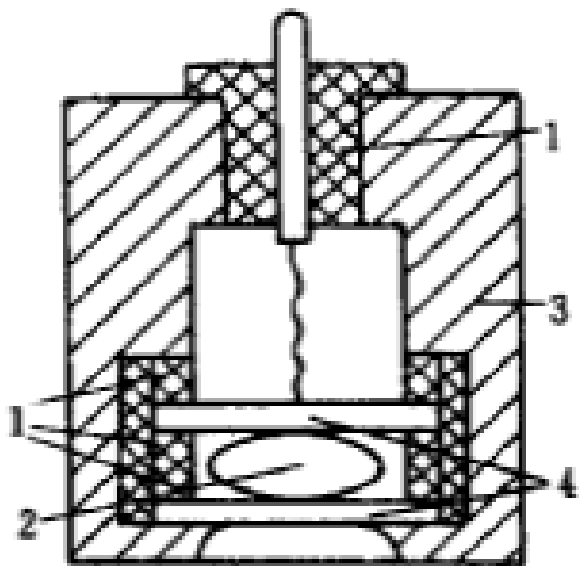




## 二、压电式压力传感器

当某些材料受到某一方向的压力作用而发生变形时，内部就产生极化现象，同时在它的两个表面上就产生符号相反的电荷；当压力去掉后，又重新恢复不带电状态。这种现象称为**压电效应**。具有压电效应的材料称为压电材料。

压电材料：石英晶体、人工制造的压电陶瓷、高分子压电薄膜等。



1—绝缘体；2—压电元件；  
3—壳体；4—膜片

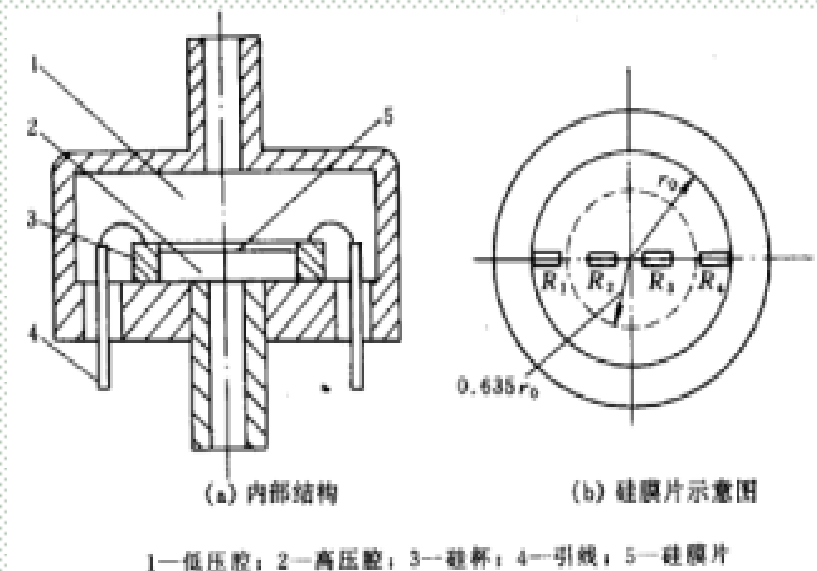
压电元件被夹在两块弹性膜片之间，压电元件一个侧面与膜片接触并接地，另一个侧面通过金属箔和引线将电量引出。压力作用于膜片时，压电元件受力而产生电荷，电荷量经放大可转换成电压或电流输出。

压电式压力传感器结构简单，体积小，线性度好，量程范围大。但是由于晶体上产生的电荷量很小，因此对电荷放大处理的要求较高。

### 三. 压阻式压力计

在半导体材料的基片上用集成电路工艺制成，基于压阻效应工作。

常用的压阻元件有单晶硅膜片以及在N型单晶硅膜片上扩散P型杂质的扩散硅等，也是依附于弹性元件而工作。



**主要优点：**结构简单，性能稳定可靠，寿命长，精度高，无活动部件，能测出微小压力的变化，动态响应好，便于成批生产。

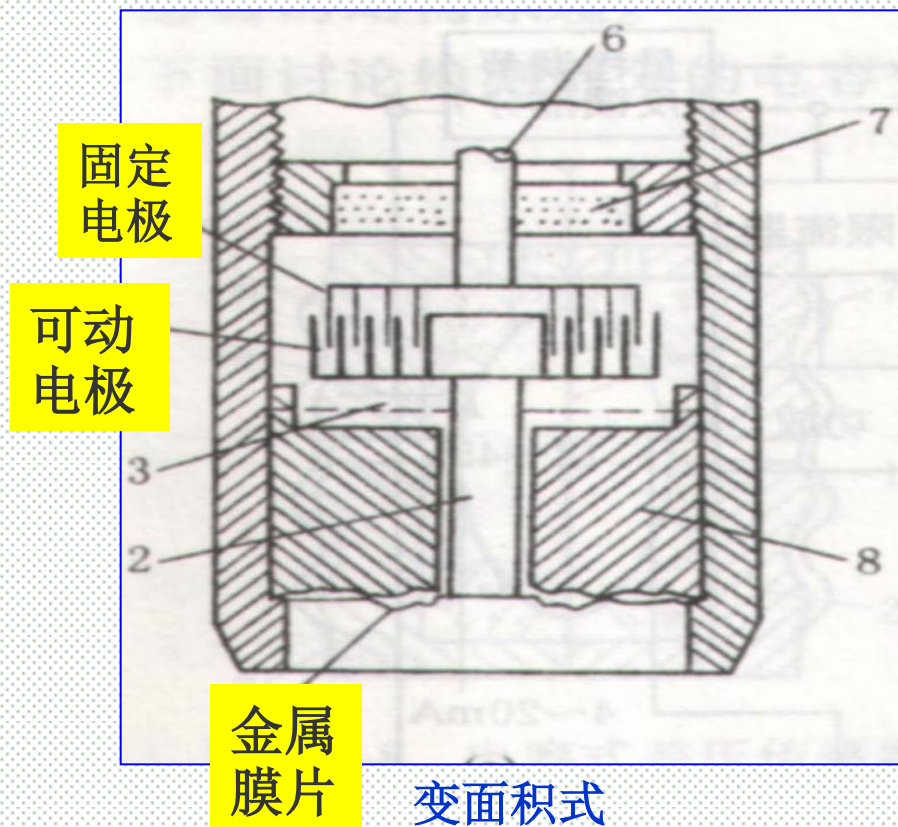
**主要缺点：**测压元件容易受到温度的干扰影响而改变压电系数。

在加工制造硅片时利用集成电路的制造工艺，将温度补偿电路、放大电路甚至电源变换电路都集中在同一块硅片上，从而大大提高了传感器性能。这种传感器也称为**固态压力传感器**。

## 四. 电容式压力传感器

用弹性膜片作为测量电容的一个极。当被测压力发生变化时，使极间电容发生变化。用测量电容的方法测出电容量  $C$ ，就可得知被测压力的大小。

这类传感器具有结构简单、适应性强、具有良好的动态特性、本身发热小、信号可以非接触测量等特点，从而得到广泛的应用。



被测压力作用在金属膜片上，通过中心柱2和支撑簧片3，使可动电极4随簧片位移而动作，从而改变电容极板之间的覆盖面积，使输出的电容量发生变化。

# (1) 电容传感器的原理

$$C = \frac{\varepsilon A}{d}$$

$\varepsilon$  --- 电容极板间介质的介电常数

$d$  --- 两平行板之间的距离

$A$  --- 两平行板覆盖的面积

在实际测量中，采用保持其中的两个参数不变，而仅改变 $A$ 或 $d$ 的方法。

改变平行板间距 $d$ ，能够获得较高的灵敏度（可以测量微米数量级的位移）；

改变平行板覆盖面积 $A$ 只适用于测量厘米数量级的位移。



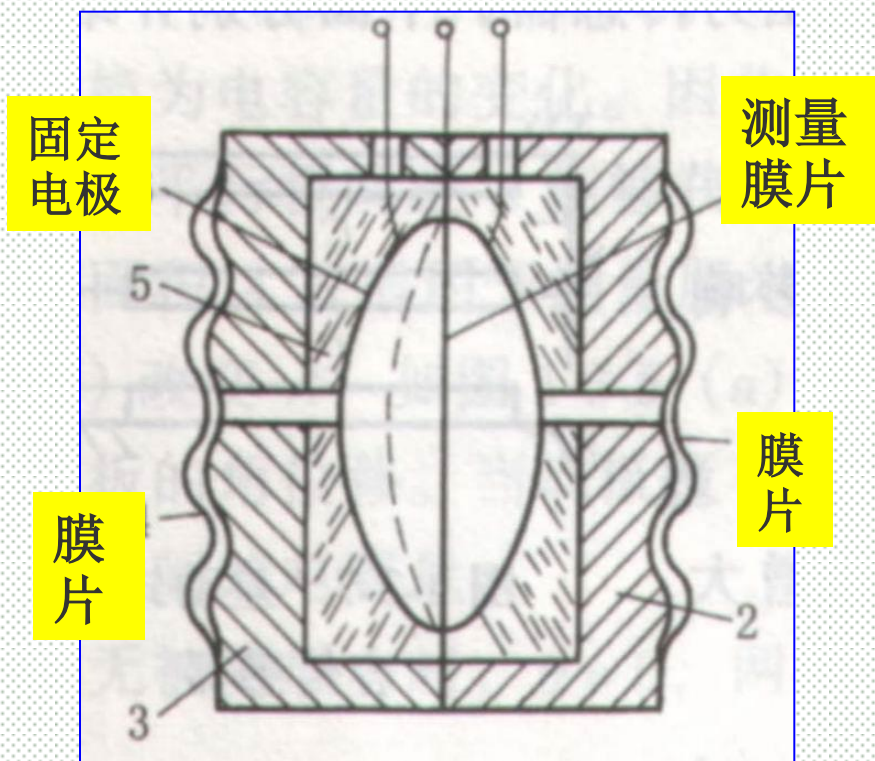
## (2) 电容式压力传感器

金属膜(作为固定电极)与测量膜片构成两个串联电容 $C_1$ 和 $C_2$ ，作用在膜片上的压力差通过不可压缩的硅油传递到测量膜片的两侧；无压差时，左右两侧的初始电容均为 $C_0$ 。

压差不为零时，可推导得到：

$$\frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} = K \cdot \Delta p$$

即：差动电容的变化值与压力差成正比。



差动变极距式

## 五. 集成式压力传感器

它是将微机械加工技术和微电子集成工艺相结合的一类新型传感器，有压阻式、微电容式、微谐振式等形式。



压阻式集成传感器检测元件的示意图

硅杯底部是E型断面，构成作为检测元件的硅膜片。在硅膜片断面减薄部分，沿应力灵敏度大的方向形成力敏电阻，感受差压引起的切向和径向应力变化；在硅膜片断面加厚部分也形成力敏电阻，感受静压的作用；在加厚部分切向和径向压阻系数接近零的方向形成温敏电阻，感受温度的变化。

将差压、静压和温度同时测出，再送入微机系统经过运算处理后就可以得到修正后的被测差压值、静压值和温度值。测量精度高，可以达到0.1级，功耗低，响应快，重量轻，稳定性和可靠性高。

## 3.2.5 压力开关

压力开关是与电器开关相结合的装置。当系统内压力高于或低于额定的安全压力时，感应器弹性元件的自由端产生位移，直接或经过比较后推动开关元件，改变开关元件的通断状态，达到控制被测压力的目的。

压力开关采用的弹性元件有单圈弹簧管、膜片、膜盒及波纹管等。

压力开关分机械型、电子型、隔爆型等。



## 3.3 压力表的选用

- ❖ 主要包括仪表型式、量程范围、精度和灵敏度、外形尺寸以及是否还需要远传和其他功能，如指示、记录、报警、控制等。
- 依据：
  - （1）必须满足工艺生产过程的要求，包括量程和精度；
  - （2）必须考虑被测介质的性质，如温度、压力、黏度、腐蚀性、易燃易爆程度等；
  - （3）必须注意仪表安装使用时所处的现场环境条件，如环境温度、电磁场、振动等。

## ■ 在选择量程时应注意：

- 对于稳定状况，正常压力应为刻度上限 $\frac{1}{2} - \frac{2}{3}$ 处；
- 对于脉动压力，正常压力应为刻度上限 $\frac{1}{2} - \frac{1}{3}$ 处；
- 对于高压压力，正常压力应为刻度上限 $\frac{1}{2} - \frac{3}{5}$ 以下，甚至低于 $\frac{1}{2}$ 。

## ■ 从被测介质性质来看：

- 对腐蚀性较强的介质选用耐腐的隔膜压力计或与介质接触部分用耐腐材料；
- 对粘性、结晶及易堵介质选用隔膜压力计；
- 按爆炸危险介质分类选用耐压防爆或本安型防爆栅；
- 测量氧气、氨气、氢气、乙炔、硫化氢等介质应选择专用的压力仪表。

## ■ 从对仪表输出信号要求来看：

- 对于只需要观察压力变化的情况，可选用弹簧管或U型液柱式那样直接指示型的仪表；
- 对于需要将压力信号远传到控制室或其他电动仪表的情况，则应选用电气式压力检测仪表或其他具有电信号输出的仪表，如应变片压力传感器、电容式压力传感器等；
- 对于要检测快速变化的压力信号的情况，则应选用电气式压力检测仪表，如扩散硅压力传感器。

## ■ 从仪表使用环境来看：

- 对于温度特别高或特别低的环境，应选择温度系数小的敏感元件；
- 对于爆炸性较强的环境，在使用电气式压力表时，应选择安全防爆型压力表。

- 各种压力表各有其特点和适用范围。在选择压力表后，还应该**正确安装**，避免因安装不当造成的测量误差。
  - 取压位置的选择
  - 导压管的安装
  - 压力仪表的安装

有关压力表的安装必须严格按照各种压力表的使用说明书规定进行。

**以上所述的压力表选择原则对其他参数的测量仪表也是适用的。**

END