



传感器原理与工程应用

Principle and Application of Sensors

第3章 电容式传感器 · 压力测量



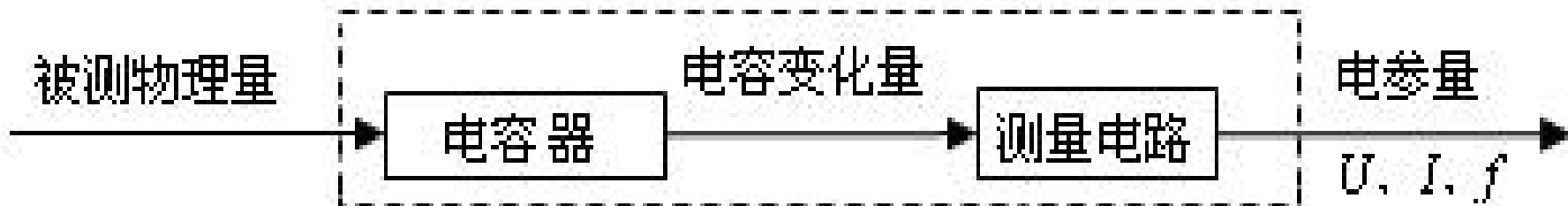
定义：电容式传感器是以各种类型的电容器为传感元件，通过将物理量转换成电容量的变化来实现测量的一类传感器。

应用：位移、压力、液位、转速、振动、加速度、角度、成分含量等。

特点：动态特性好、精度高、结构简单、可以实现非接触测量。

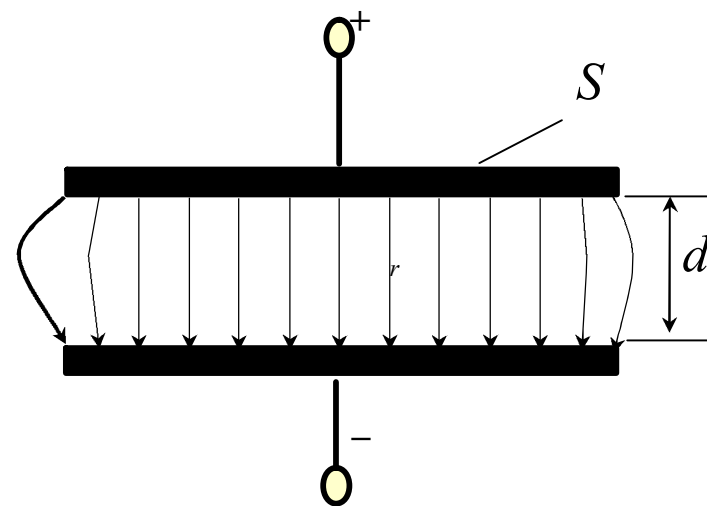


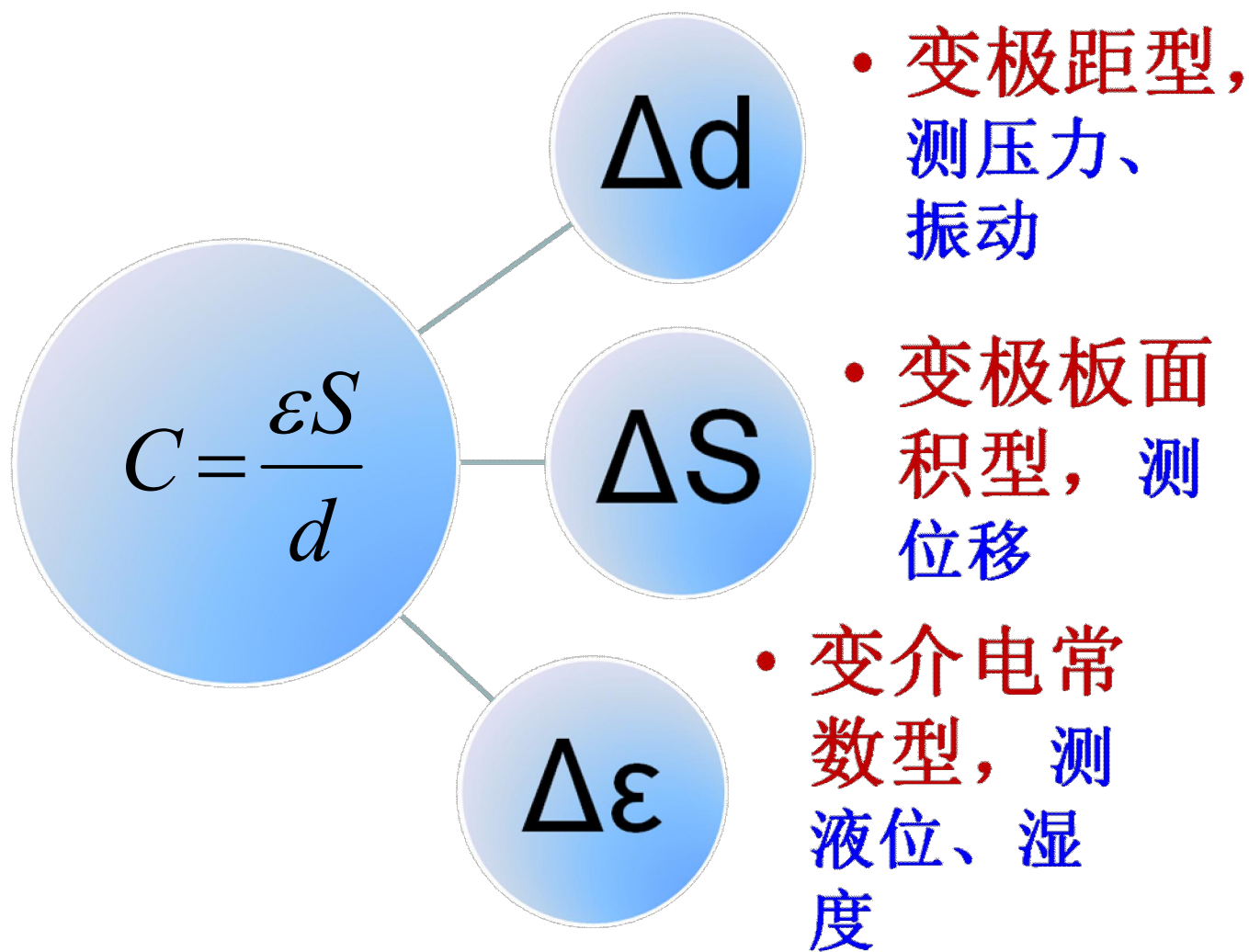
电容传感器变量间的转换关系为：



当忽略电容器边缘效应时，图示平行极板电容器的电容量为

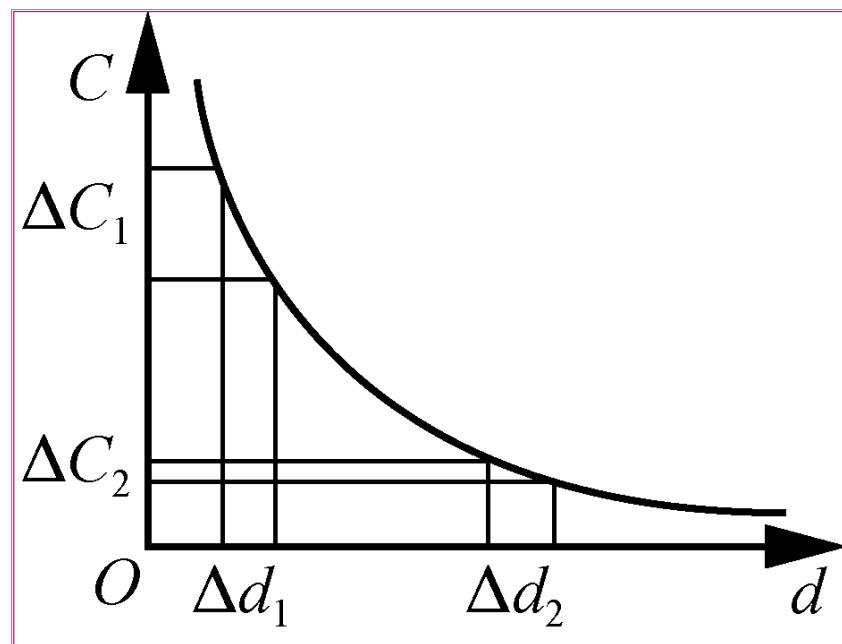
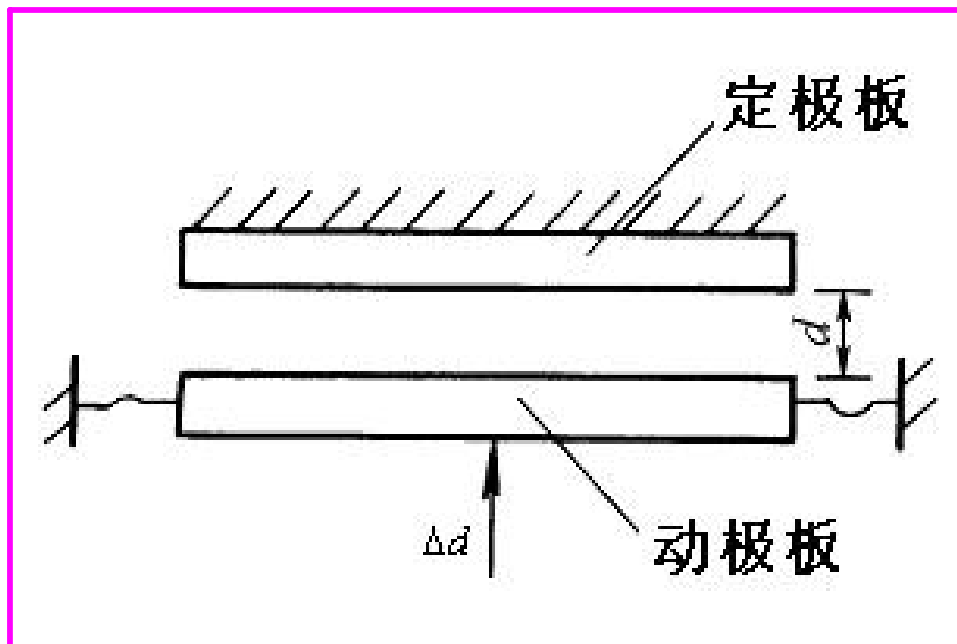
$$C = \frac{\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}$$







1. 变极距型电容传感器（空气介质）



$$C = \varepsilon S \frac{1}{d}$$

C与d呈非线性关系！
灵敏度不是常数！



变极距型电容传感器输入-输出特性分析

设初始电容为：

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d_0} \approx \frac{\varepsilon_0 S}{d_0}$$

当间隙 d_0 减小 Δd 时，则电容量增大 ΔC ，则：

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d_0 - \Delta d} - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d_0} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d_0} \cdot \frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d} = C_0 \frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d}$$

电容的相对变化为：

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \frac{1}{1 - \Delta d / d_0}$$



当 $\Delta d / d_0 \ll 1$ 时，将上式按泰勒级数展开，得：

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \left[1 + \frac{\Delta d}{d_0} + \left[\frac{\Delta d}{d_0} \right]^2 + \left[\frac{\Delta d}{d_0} \right]^3 + \dots \right]$$

可见，电容C的相对变化与位移之间呈现的是一种非线性关系。
在**误差允许范围**内通过略去高次项得到其近似的线性关系：

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta d}{d_0}$$

限制测量范围是在满足误差要求前提下解决传感器非线性问题的常用方法

电容传感器的静态灵敏度为

$$K = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta d} = \frac{1}{d_0}$$

灵敏度随极板间距的减小而增大



只考虑二次非线性项，忽略其它高次项，则非线性误差：

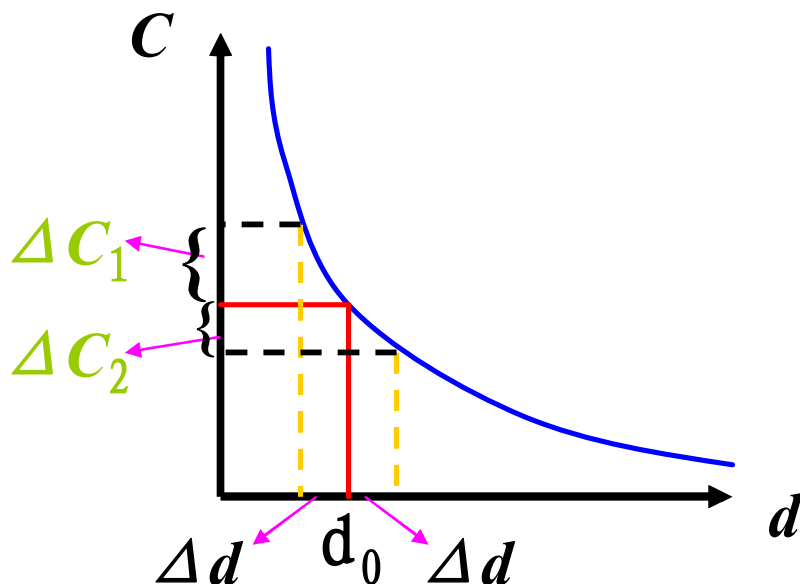
$$\delta_L = \left| \frac{\Delta d}{d_0} \right| \times 100\%$$

非线性随极板间距
的减小而增大

由以上分析可知：变极距型电容式传感器只有在 $\Delta d/d_0$ 很小时，才有近似的线性输出。

如图，极距变化相同值
 $\pm \Delta d$ 所对应的电容变化
量不同

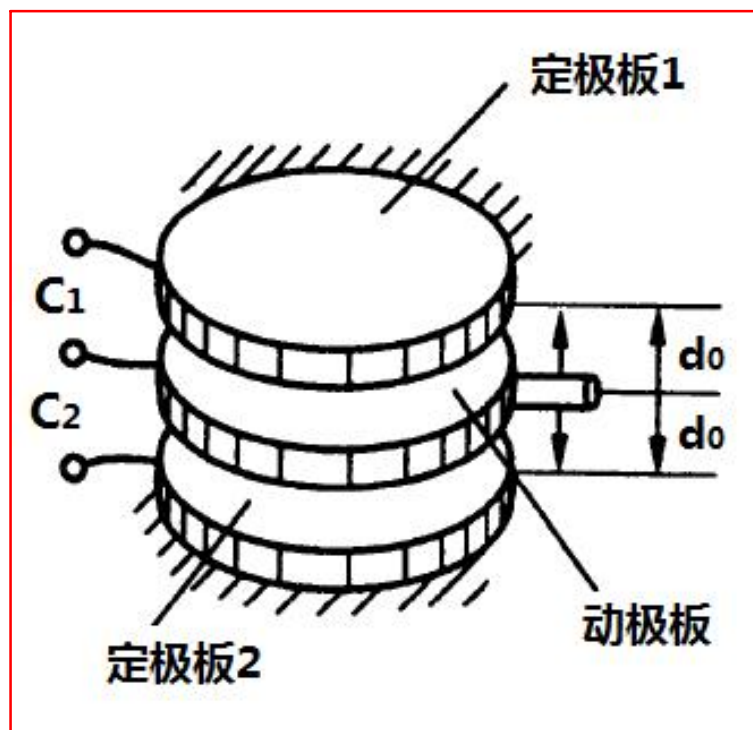
$$\Delta C_1 > \Delta C_2$$





措施

- 采用差动结构
- 性能得到改善



工作时差动电容器总电容变化为：

$$\Delta C = C_1 - C_2 = \frac{\varepsilon_0 S}{d_0 + \Delta d} - \frac{\varepsilon_0 S}{d_0 - \Delta d} = -2C_0 \frac{\Delta d}{d_0} \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2}$$



当 $\Delta d / d_0 \ll 1$ 时，将上式按泰勒级数展开，得：

$$\frac{\Delta C}{C_0} = -2 \frac{\Delta d}{d_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^4 + \dots \right]$$

略去非线性高次项，得： $\frac{\Delta C}{C_0} = -2 \frac{\Delta d}{d_0}$

变极距差动电容式传感器的灵敏度 K' 为

$$K' = \left| \frac{\Delta C / C_0}{d_0} \right| = \frac{2}{d_0}$$



变极距差动电容传感器的非线性误差 δ'_L 近似为

$$\delta'_L = \frac{\left| 2(\Delta d / d_0)^3 \right|}{\left| 2(\Delta d / d_0) \right|} \times 100\% = \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 \times 100\%$$

差动技术的优势

提高灵
敏度

减小非
线性

抗干扰
能力强



总结



变极距型电容式传感器输入-输出为非线性关系；



减小初始极板间距可以提高灵敏度，但增大了非线性，一般初始间距为25 ~ 200微米



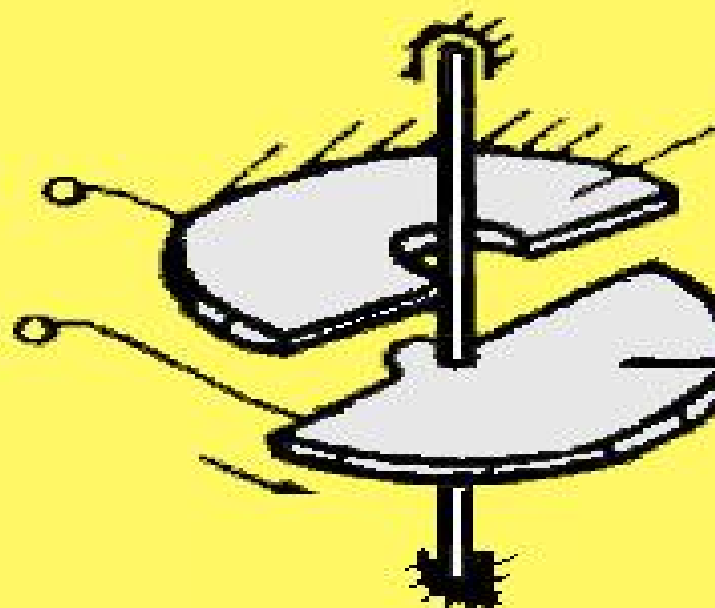
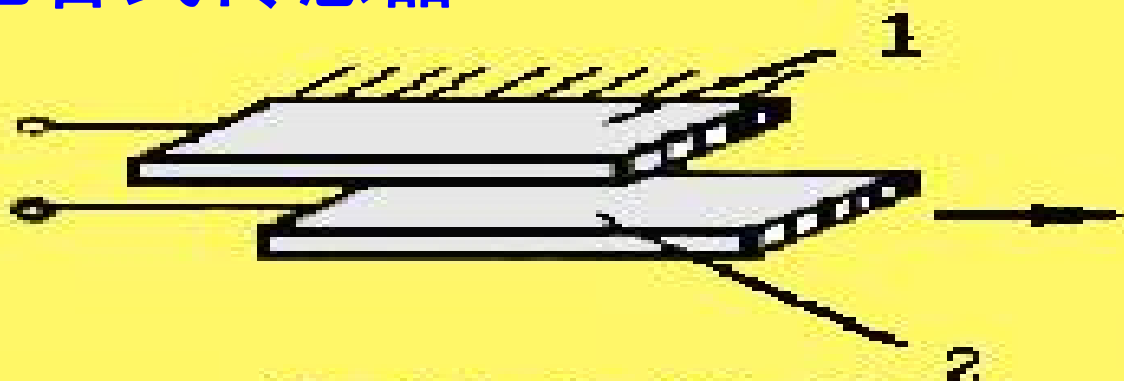
工作时要求 $|\Delta d/d_0| \leq 0.1$ ，故变极距型电容传感器主要用于0.01微米至零点几毫米的微小线位移测量



极板间距的增量方向与电容的增量方向相反

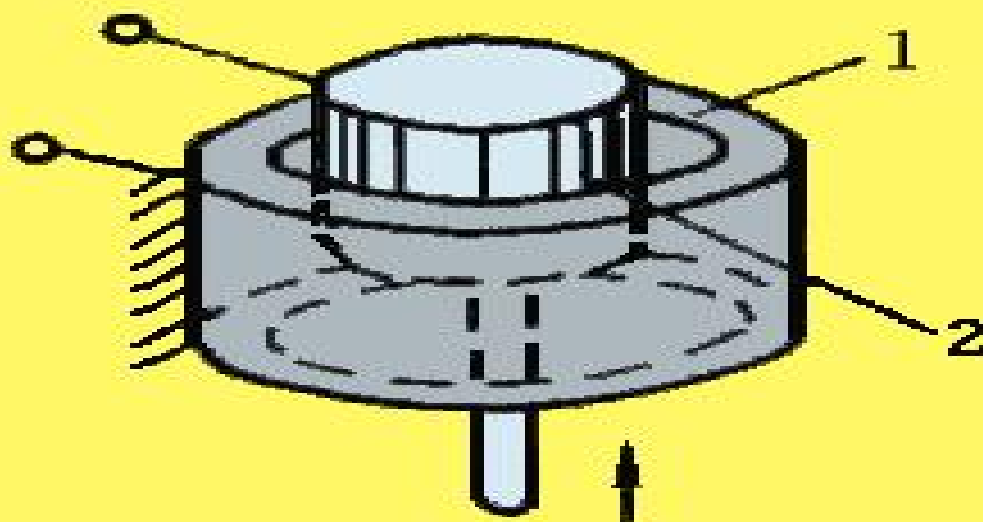


2. 变面积型电容式传感器



变面积型电容传感器

1 固定极板 2 动极板



变面积型电容传感器

1 固定极板 2 动极板



当动极板移动后,极板相对有效面积发生变化,对应的电容值为:

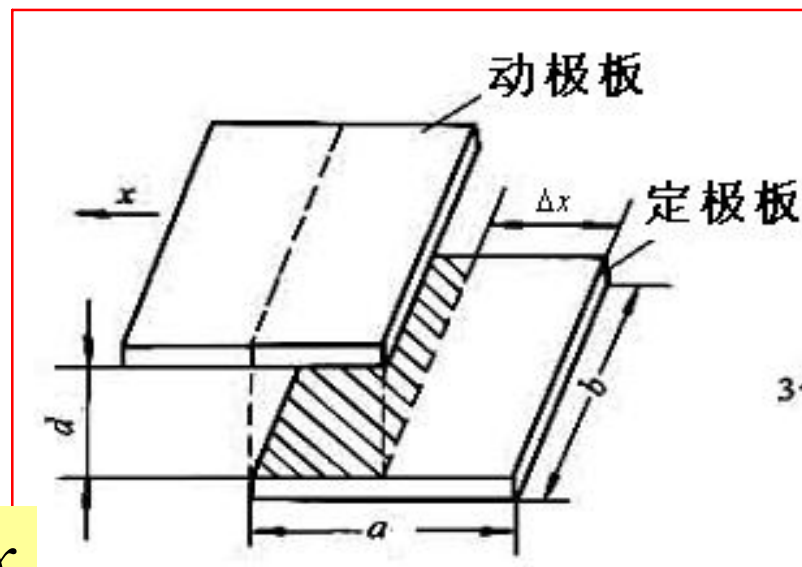
$$C_x = \varepsilon \frac{b(a - \Delta x)}{d} = C_0 - \varepsilon \frac{b\Delta x}{d}$$

$$\Delta C = C_x - C_0 = -\varepsilon \frac{b\Delta x}{d} = -C_0 \frac{\Delta x}{a}$$

灵敏度: $k = -\frac{\Delta C}{\Delta x} = \varepsilon \frac{b}{d}$

灵敏度为常数

缺点: 平板形结构对极距变化特别敏感, 测量精度受到影响。





圆柱形结构受极板径向变化的影响很小，成为实际中最常采用的结构。

其电容计算式为：

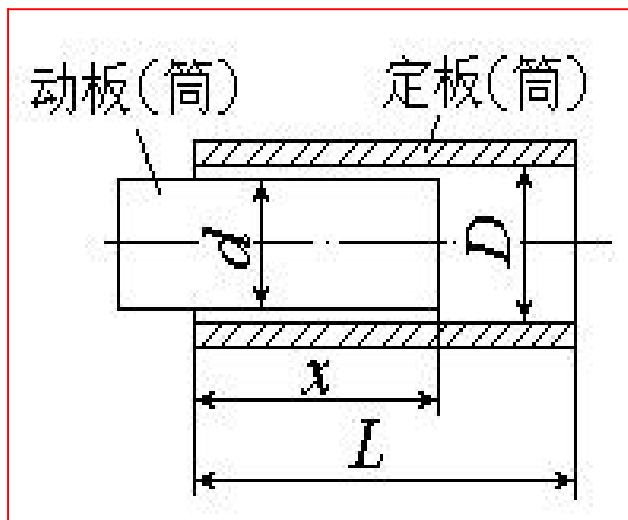
$$C = \frac{2\pi\epsilon x}{\ln(D/d)}$$

当重叠长度 x 变化时，电容量变化为：

$$\Delta C = \frac{2\pi\epsilon\Delta x}{\ln(D/d)}$$

灵敏度为：

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D/d)}$$



结论： 其输出与输入成线性关系，测量范围大，灵敏度是常数，但圆柱式电容传感器灵敏度较低。

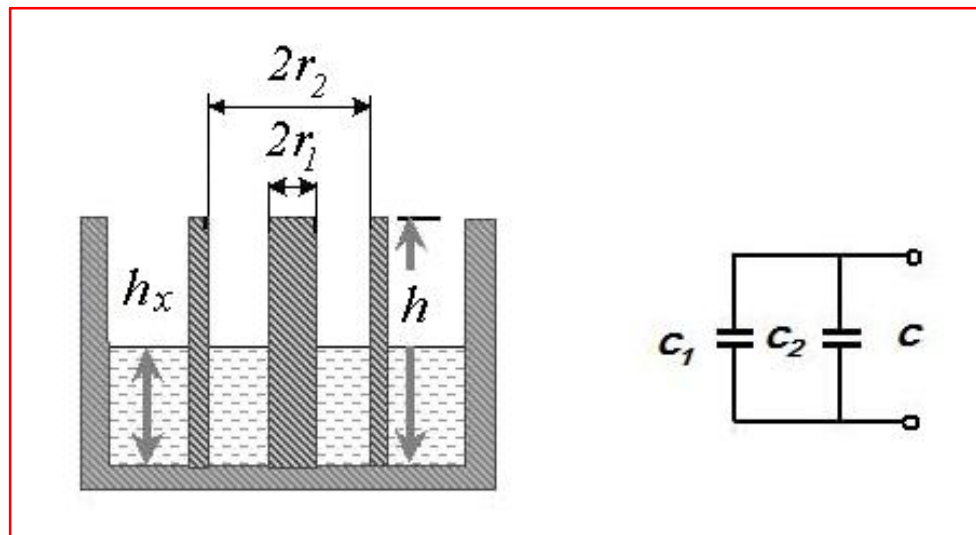


3. 变介质型电容式传感器

电容式液位传感器

图示同轴圆柱形电容器的初始电容为：

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln(r_2/r_1)}$$



测量时，电容器的介质一部分是被测液位的液体，一部分是空气。设 C_1 为液体有效高度 h_x 形成的电容， C_2 为空气高度 $(h-h_x)$ 形成的电容，则：

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon h_x}{\ln(r_2/r_1)}$$

$$C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0(h-h_x)}{\ln(r_2/r_1)}$$

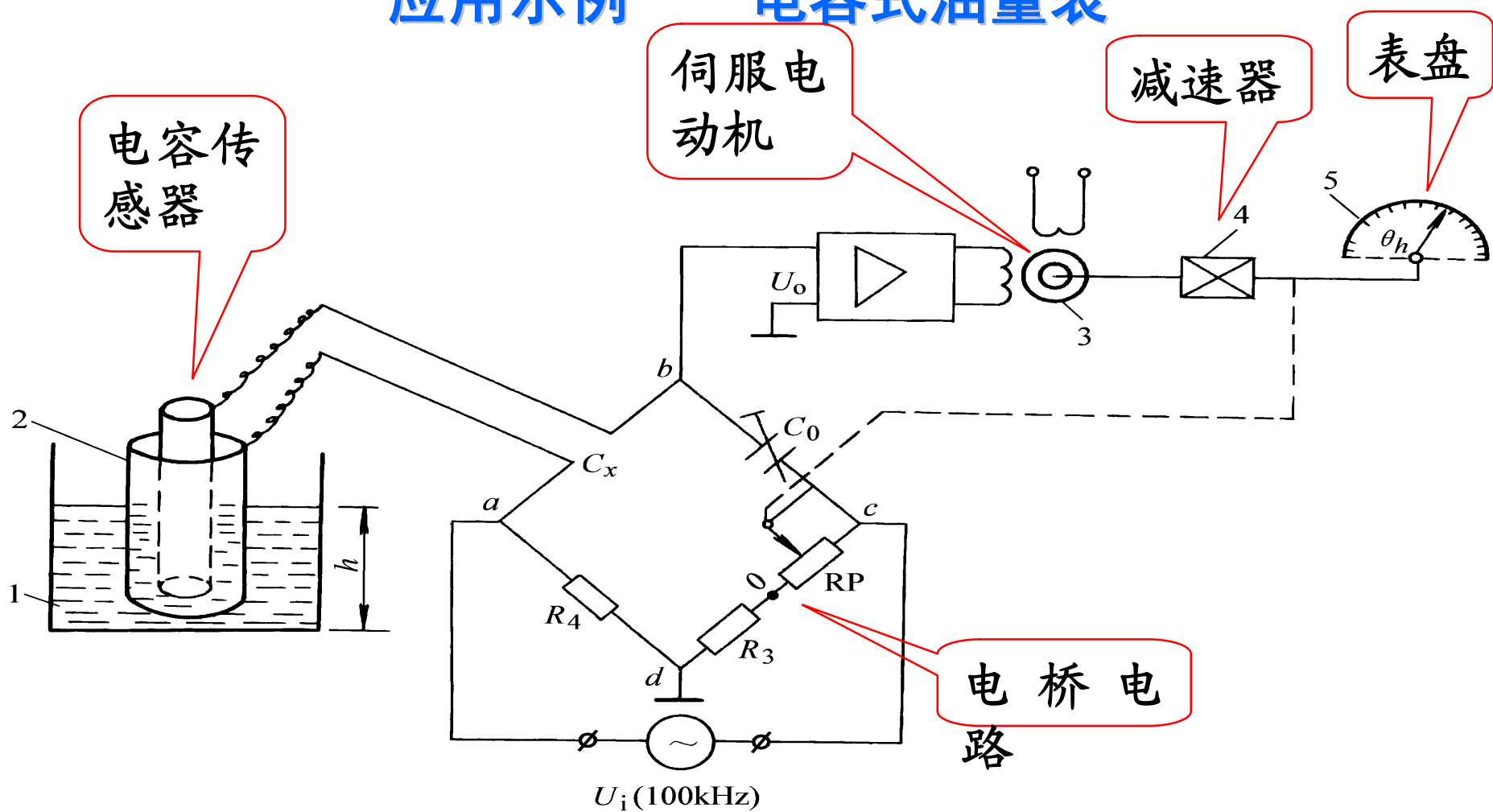
由于 C_1 和 C_2 为并联，所以总电容为：



$$\begin{aligned} C &= \frac{2\pi\epsilon h_x}{\ln(r_2/r_1)} + \frac{2\pi\epsilon_0(h-h_x)}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{2\pi\epsilon_0 h_x}{\ln(r_2/r_1)} + \frac{2\pi(\epsilon - \epsilon_0)h_x}{\ln(r_2/r_1)} \\ &= C_0 + C_0 \frac{(\epsilon - \epsilon_0)}{\epsilon_0 h} h_x \end{aligned}$$

可见，电容 C 理论上与液面高度 h_x 成线性关系，只要测出传感器电容 C 的大小，就可得到液位高度。

应用示例——电容式油量表





电容式液位计——导电液体液位测量

棒状电极（金属管）外面包裹聚四氟乙烯套管，当被测液体的液面上升时，引起棒状电极与导电液体之间的电容变大。



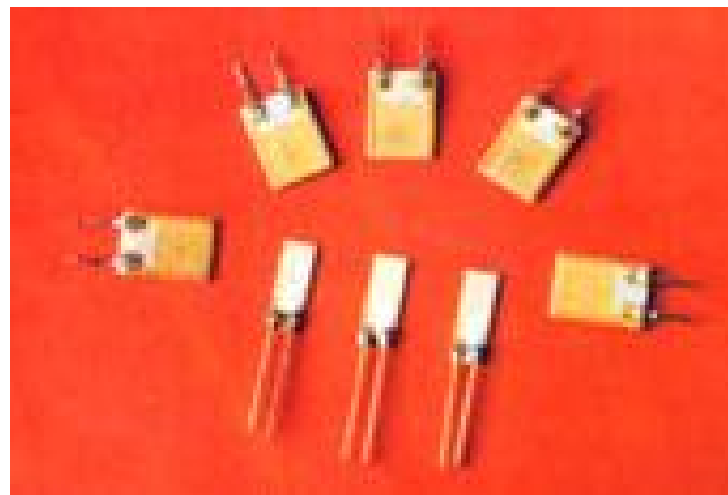
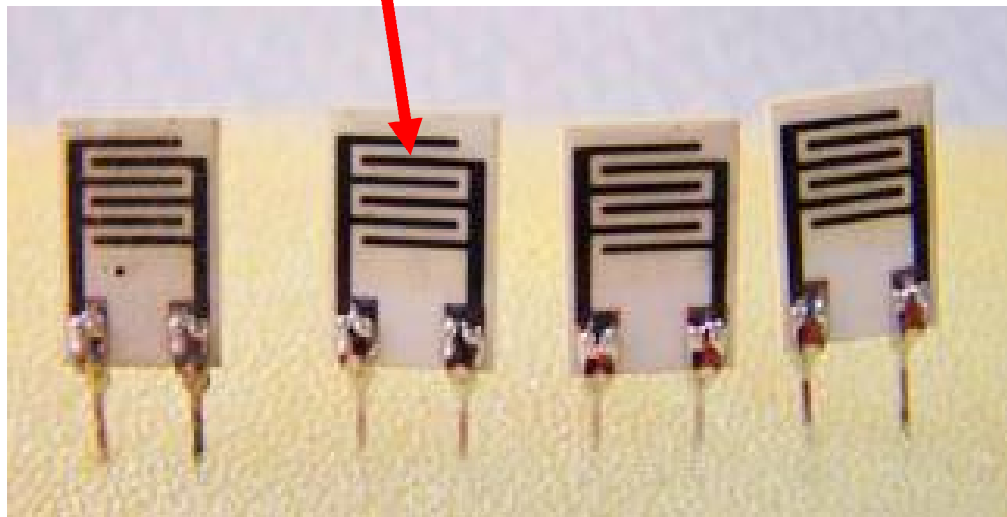
聚四氟乙烯外套



湿敏电容——变介电常数

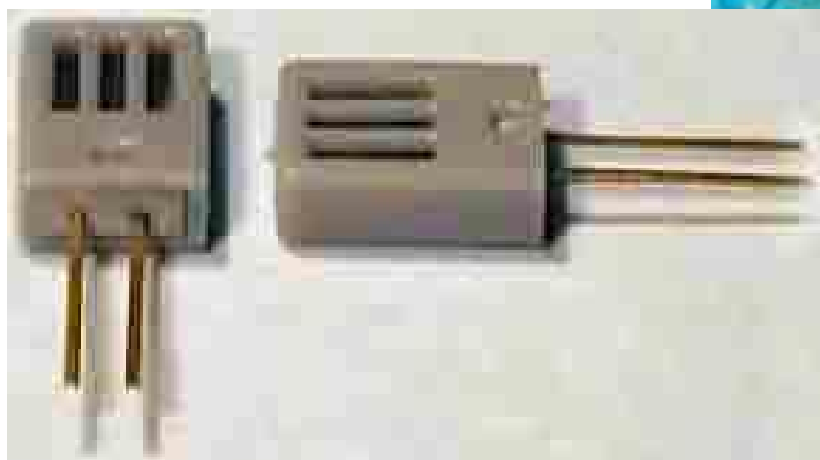
利用具有很大吸湿性的绝缘材料作为电容传感器的介质，在其两侧面镀上多孔性电极。当相对湿度增大时，吸湿性介质吸收空气中的水蒸气，使两块电极之间的介质相对介电常数大为增加（水的相对介电常数为80），所以电容量增大。

吸水高分子薄膜





湿敏电容模块及传感器外形





电容式传感器的测量电路

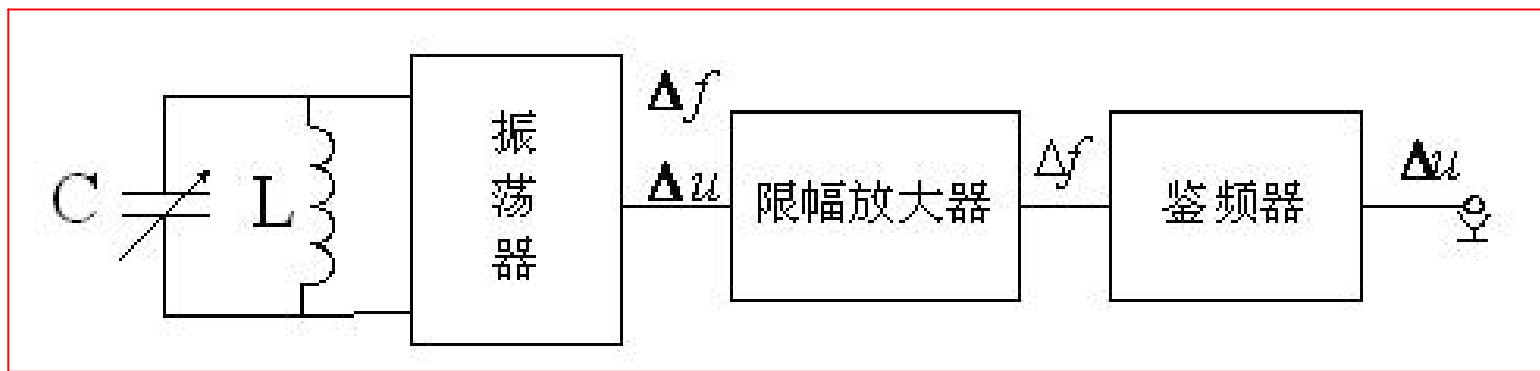
◆常用测量线路

- 不平衡交流电桥
- 谐振电路
- 调频电路
- 差动脉冲宽度调制电路
- 二极管环形检波电路
- 运算放大电路



1. 调频测量电路

调频测量电路把电容式传感器作为振荡器谐振回路的一部分。



当被测信号为零时, $\Delta C=0$, 振荡器有一个固有振荡频率 f_0 , 即:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$$

当电容发生变化时, 频率变为

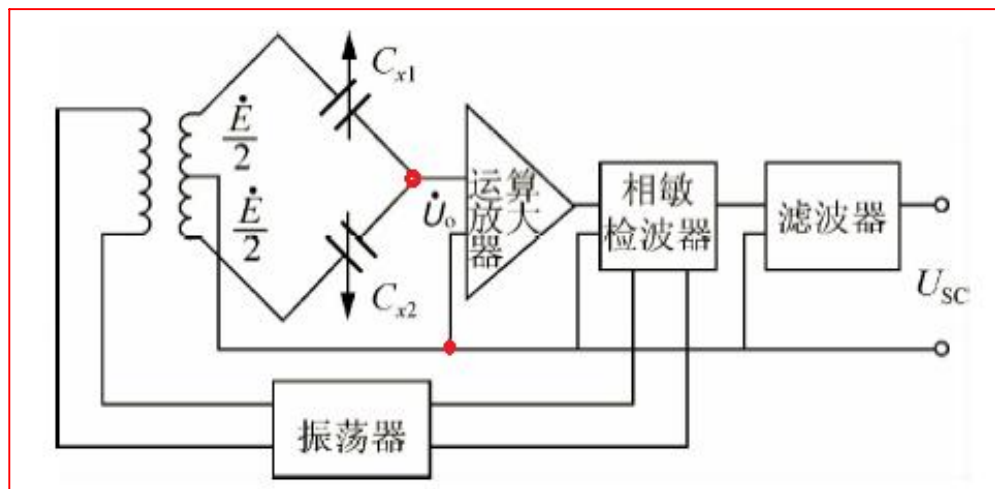
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 \pm \Delta C)}} = f_0 \pm \Delta f$$

调频测量电路具有较高的灵敏度, 可测至 $0.01 \mu\text{m}$ 级位移变化量, 易于用数字仪器测量, 并与计算机通讯, 抗干扰能力强。



2. 交流电桥测量电路

变压器电桥具有使用元件最少，桥路内阻最小的特点。
电桥输出电压为：



$$\dot{U}_0 = \dot{E} \frac{C_{x1}}{C_{x1} + C_{x2}} - \frac{\dot{E}}{2} = \frac{\dot{E}}{2} \left(\frac{2C_{x1}}{C_{x1} + C_{x2}} - 1 \right) = \frac{\dot{E}}{2} \frac{C_{x1} - C_{x2}}{C_{x1} + C_{x2}} = \frac{\dot{E}}{2} \frac{\Delta C}{C_0}$$

若为变极距式差动电容传感器，则电桥输出为：

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E}}{2} \frac{\Delta d}{d_0}$$

\dot{U}_0 经放大、相敏检波和滤波后输出直流电压 U_{sc} 大小与位移成线性关系，其正负极性反映位移的方向。



3. 运算放大器式测量电路

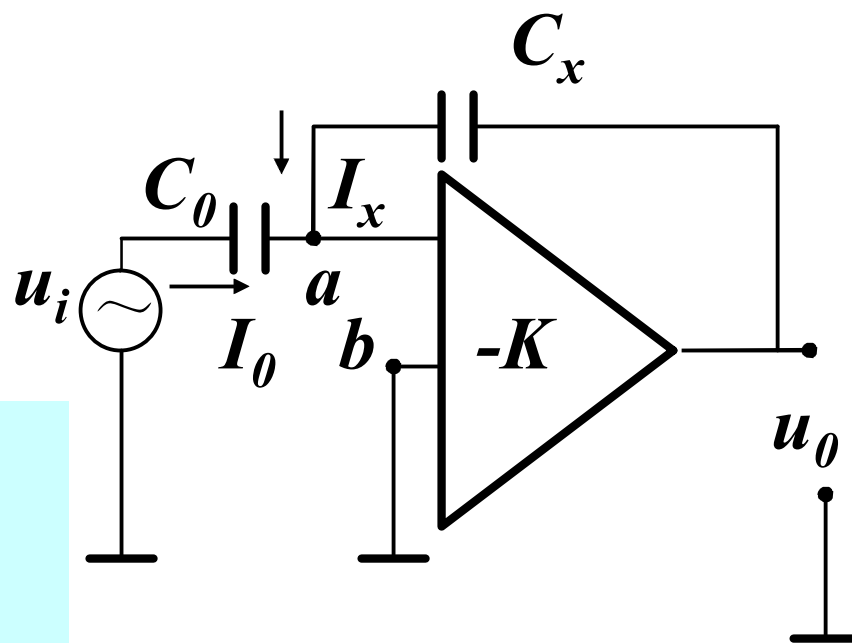
由 $U_a = 0, I = 0$:

$$\begin{cases} U_i = -j \frac{1}{\omega C_0} I_0 \\ U_0 = -j \frac{1}{\omega C_x} I_x \\ I_0 = -I_x \end{cases}$$

解得： $U_0 = -U_i \frac{C_0}{C_x}$

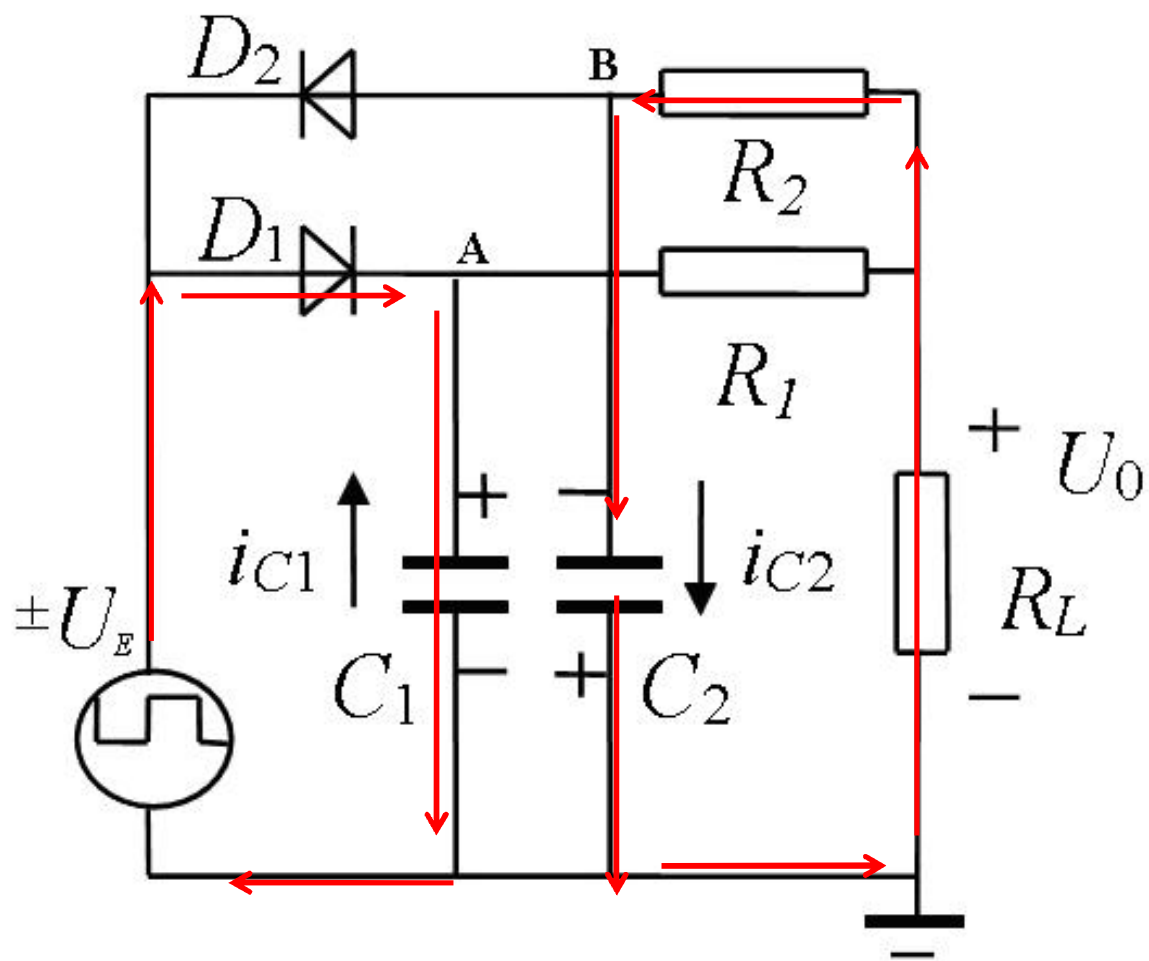
而 $C_x = \frac{\varepsilon S}{d}$ ；代入上式得：

$$U_0 = -U_i \frac{C_0}{\omega S} d$$





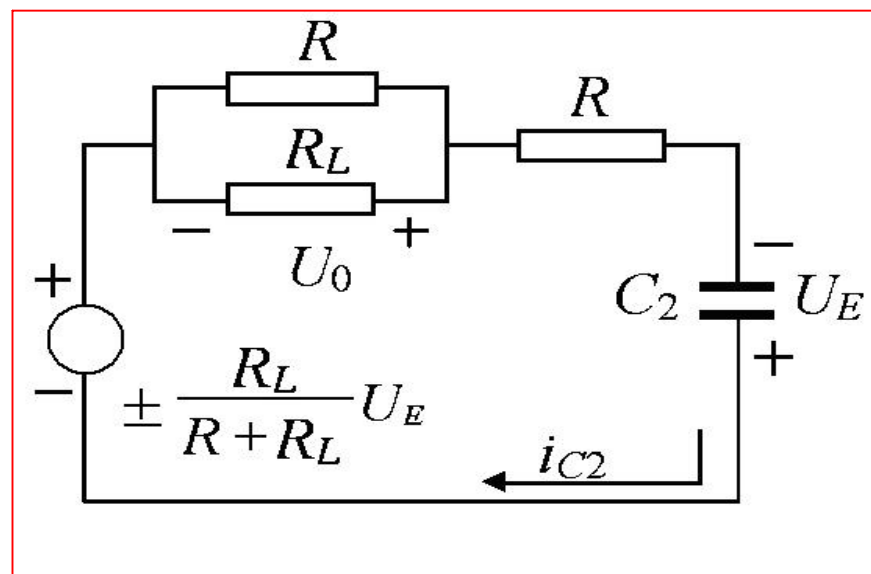
4. 二极管双T型交流电桥





若将二极管理想化，当电源为正半周时，电路可等效成一阶电路

当供电电压是幅值为 $\pm U_E$ 、周期为 T 、占空比为 50% 的方波，可直接得到流过电容 C_2 的电流 i_{C2} ：



$$i_{C2} = U_E \frac{1 + R_L / (R + R_L)}{R + R R_L / (R + R_L)} \exp \left[\frac{-t}{R + R R_L / (R + R_L) C_2} \right]$$

正半周电流 i_{C2} 的平均值 I_{C2} 可以写成：

$$I_{C2} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_{C2} dt \approx \frac{1}{T} \int_0^{\infty} i_{C2} dt = \frac{1}{T} \frac{R + 2R_L}{R + R_L} U_E C_2$$



同理，可得负半周时流过电容 C_1 的平均电流 I_{C1} 为

$$I_{C1} = \frac{1}{T} \frac{R + 2R_L}{R + R_L} U_E C_1$$

故在负载 R_L 上产生的电压为：

$$U_0 = \frac{RR_L}{R + R_L} (I_{C1} - I_{C2}) = \frac{RR_L (R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} \frac{U_E}{T} (C_1 - C_2)$$

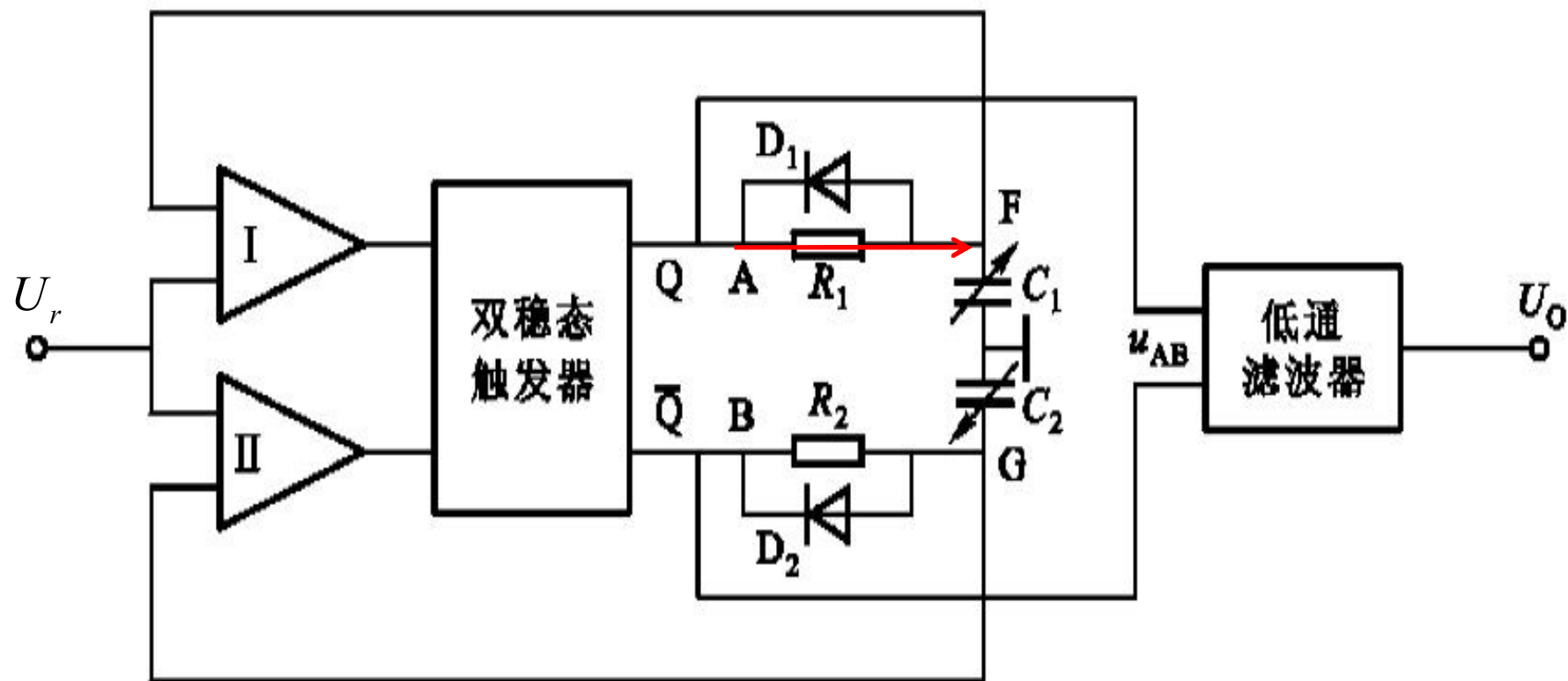
当 R_L 已知时， $\frac{RR_L (R + 2R_L)}{(R + R_L)^2}$ 为常数，设为 K ，则：

$$U_0 \approx K \times f \times U_E \times (C_1 - C_2)$$

式中， f ——电源电压的频率。

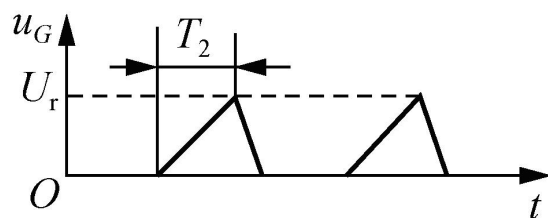
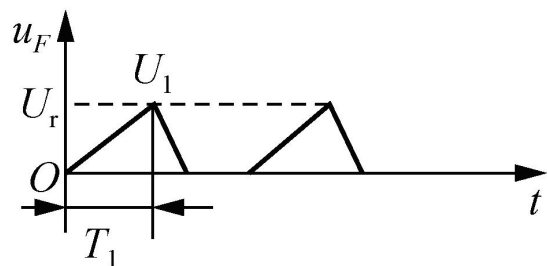
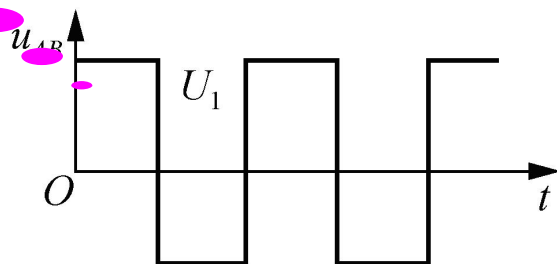
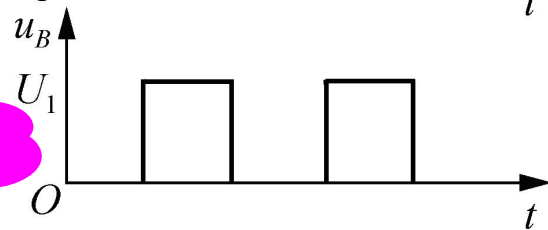
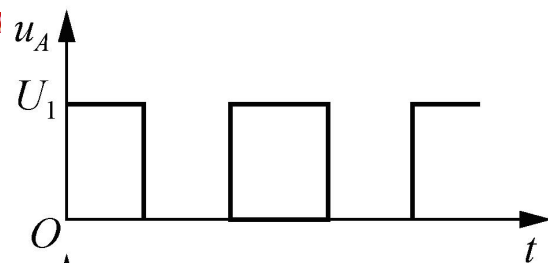
表明，传感器的输出电压不仅与电源电压的频率和幅值有关，而且与 T 形网络中的电容 C_1 和 C_2 的差值有关。当电源参数确定后，输出电压只是电容 C_1 和 C_2 的函数。

5 . 差动脉冲调宽电路

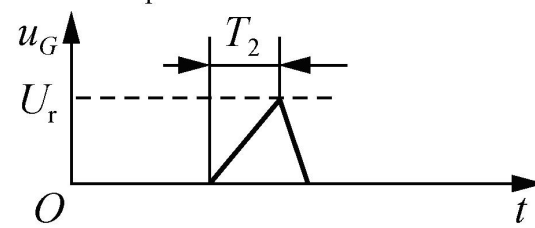
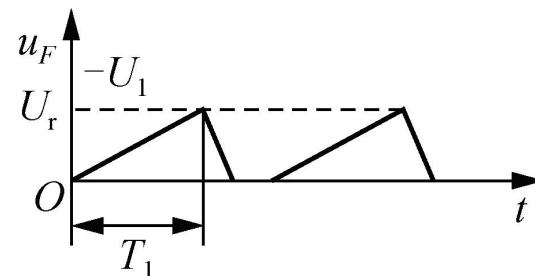
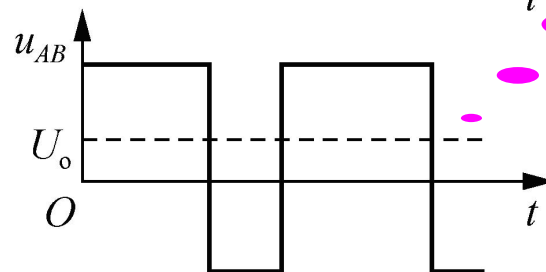
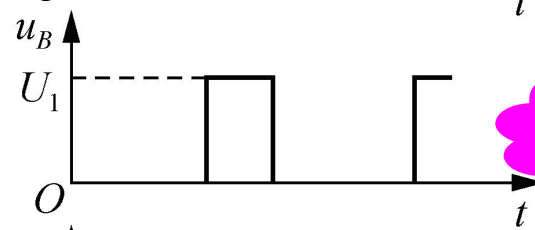
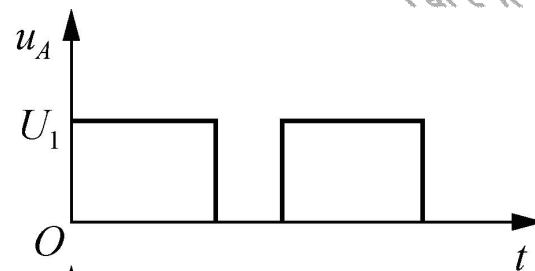




$C_1 = C_2$ 时



$C_1 > C_2$ 时





u_{AB} 经过滤波后，即可得到一直流输出电压 U_0

$$U_0 = \frac{T_1 U_1}{T_1 + T_2} - \frac{T_2 U_1}{T_1 + T_2} = \frac{(T_1 - T_2) U_1}{T_1 + T_2}$$

式中： $T_1 = \frac{R_1 C_1 \ln U_1}{U_1 - U_r}; T_2 = \frac{R_2 C_2 \ln U_1}{U_1 - U_r}$

当电阻 $R_1 = R_2 = R$ 时， 则为： $U_0 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1$

如果是变间隙式， 则： $U_0 = \frac{d_1 - d_2}{d_1 + d_2} U_1$

因为： $d_1 = d_0 + \Delta d; d_2 = d_0 - \Delta d; d_1 + d_2 = d_0$ ； 则：

$$U_0 = \frac{\Delta d}{d_0} U_1$$



◆优点

- 不论是极距变换型还是面积变换型，输入-输出都成线性关系，此电路对传感器元件的线性要求不高；
- 不需要解调电路，只需要经过低通滤波器就可以得到直流输出；
- 调宽脉冲频率的变化对输出无影响；
- 采用直流稳压电源，不存在对其波形和频率的要求。



电容式传感器的优点：

- (1) 输入能量小而灵敏度高。
- (2) 精度高达0.01%。
- (3) 动态特性好，适合测量动态参数。
- (4) 能量损耗小。
- (5) 结构简单，环境适应性好（高温、辐射等）。

缺点： 电缆分布电容影响大。

集成电路、双屏蔽传输电缆等——降低分布电容的影响



电容式传感器的典型应用之一

——压力传感器

一、压力的概念及压力表的分类

压力 (p) 是垂直作用在单位面积 (S) 上的力 (F)，即物理学中常称的压强。国际单位是帕斯卡，简称帕 (Pa)。1Pa=1N/m²。因帕单位太小，工程上常用 kPa (10³Pa) 和 MPa (10⁶Pa) 表示压力值。

表压力：指测压仪器仪表所显示的压力，通常压力测量仪表总是处于大气之中，其测得的压力值均是超过大气压力以上的压力数值。



工业中的常用压力表分为以下四类：

1. 液柱式压力计

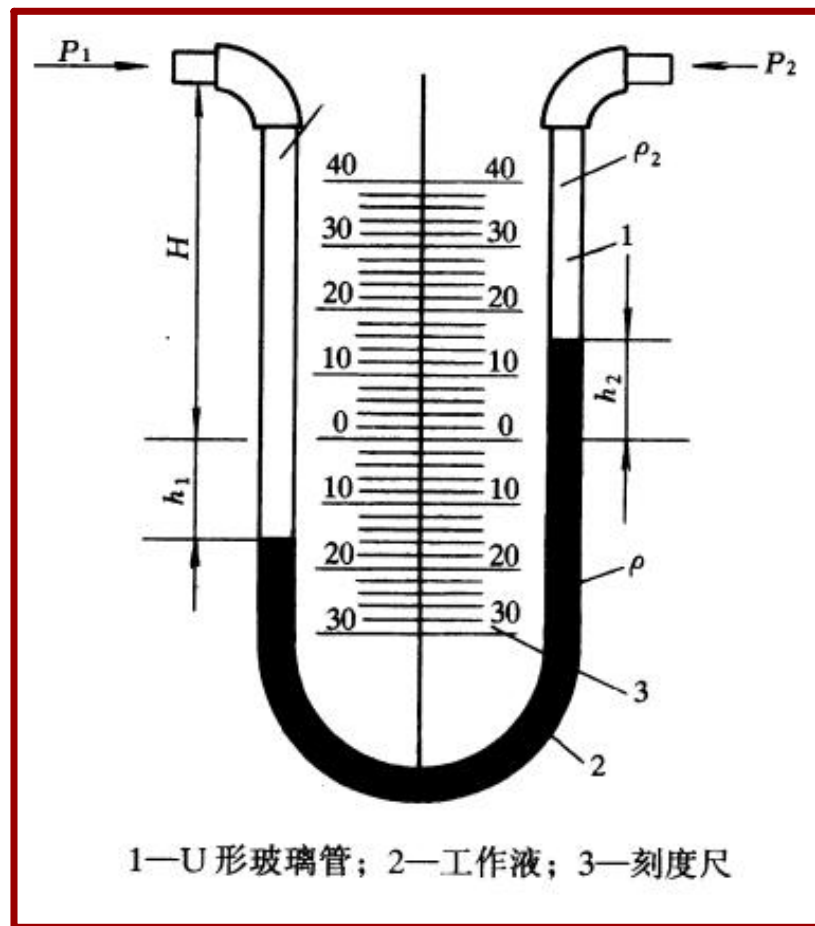
它是根据流体静力学原理制作的。

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

$$= \rho g(h_1 + h_2)$$

优点：结构简单，使用方便。

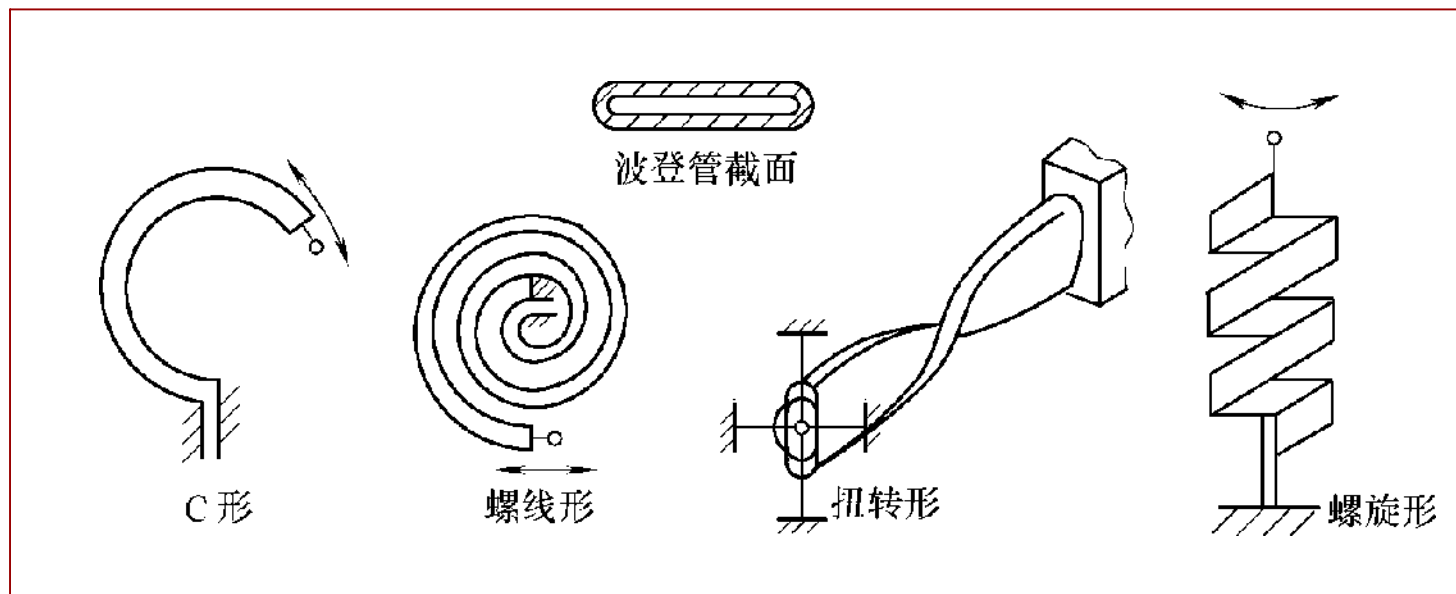
缺点：量程受液柱高度的限制，
体积大，玻璃管容易损坏及读数不方便。





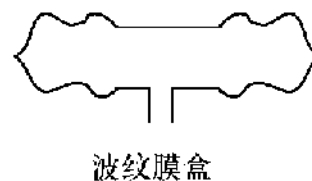
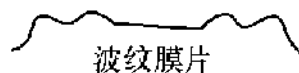
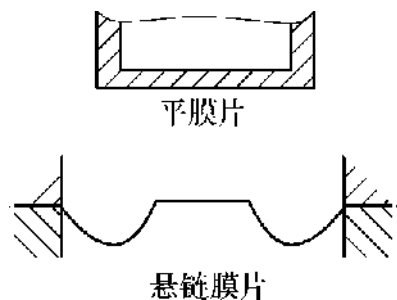
2. 弹性式压力表

它是根据弹性元件受力变形的原理，将被测压力转换成位移进行测量的仪表。基于此原理工作的仪表有**弹簧管**式压力表、**膜片**（或膜盒式）压力表、**波纹管**式压力表等。此类仪表多用于现场指示压力。

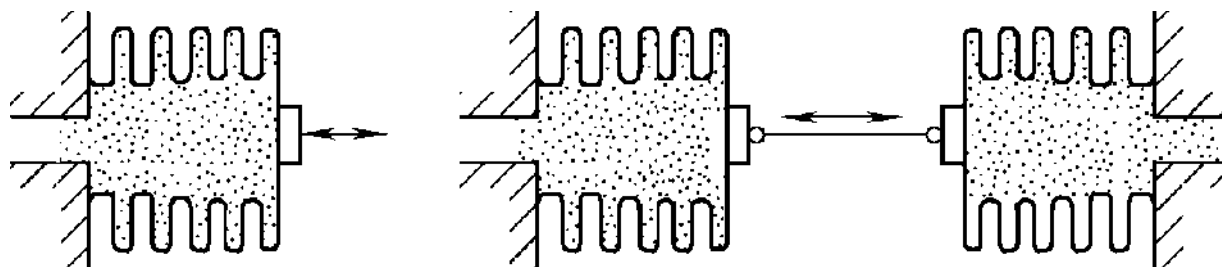


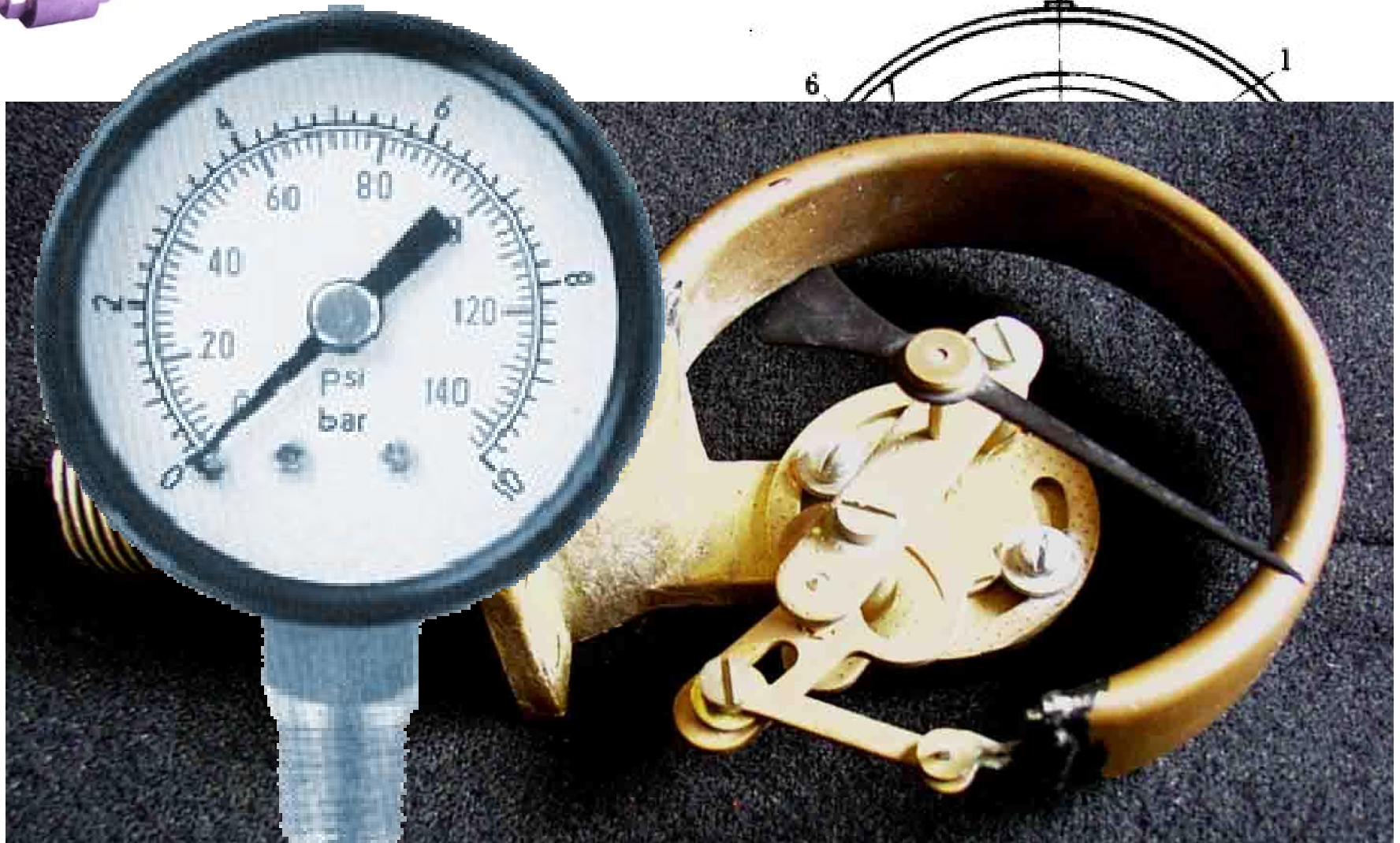


膜片与膜盒



波纹管是外周沿轴向有深槽形波纹状皱褶，可沿轴向伸缩的薄壁管子。





7—游丝；8—调整螺丝；9—接头



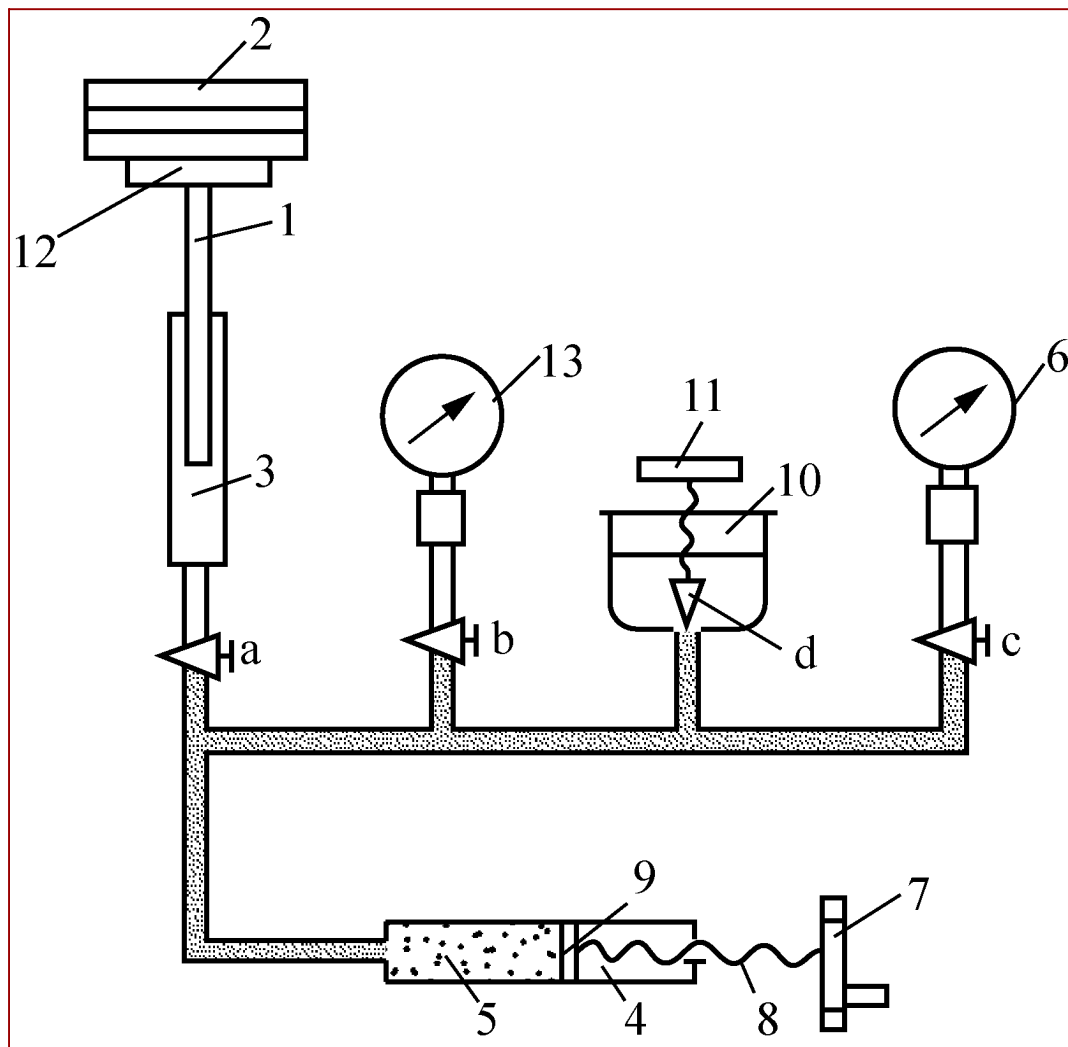
3. 负荷式压力计

它是基于流体静力学平衡原理和帕斯卡定律进行压力测量的，可将被测压力转换成活塞面积上所加平衡砝码的质量来进行测量的仪表。这种压力计的测量精度较高，允许误差可以小到0.05% ~ 0.02%，通常被当作标准仪器对压力检测仪表进行标定。





1—测量活塞； 2—砝码；
 3—活塞柱； 4—手摇泵；
 5—工作液； 6—被校压力表；
 7—手轮； 8—丝杆；
 9—手摇泵活塞； 10—油杯；
 11—进油阀手轮； 12—托
 盘； 13—标准压力表；
 a、b、c—切断阀；
 d—进油阀



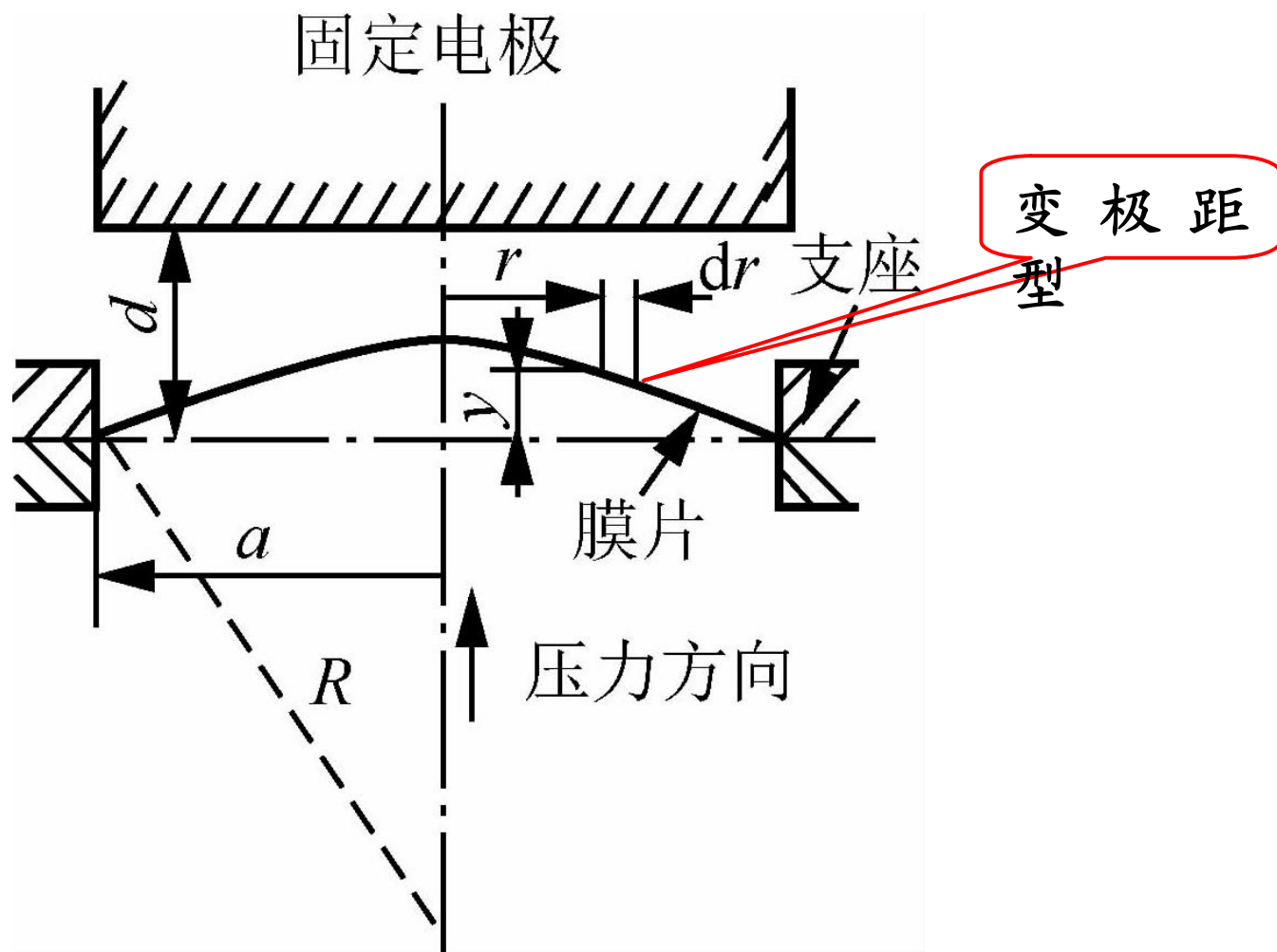


4. 电测式压力计

它是利用敏感元件将被测压力转换成各种电量，如电阻、电感、电容、电位差等。基于此原理工作的仪表有应变片式压力计、霍尔片式压力计、电容式压力计、电感式压力计等。此类仪表多用于将压力信号远传至控制室进行压力集中指示，具有较好的动态响应，量程范围大，线性好，便于进行压力的应用和自动控制等特点。



二、电容式压力传感器工作原理及结构





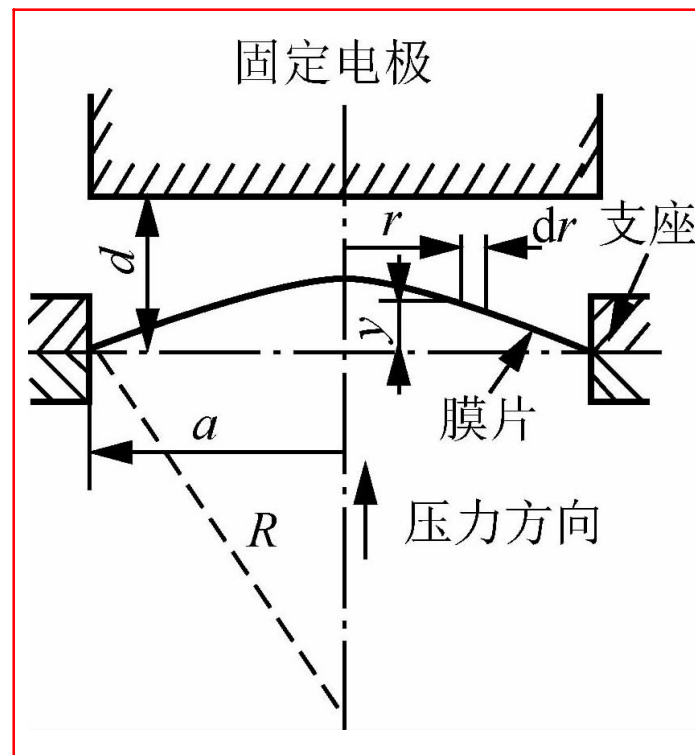
当膜片的挠度很小时，膜片任意半径 r 处的挠度 y 与压力成近似线性关系：

$$y = \frac{p}{4\sigma} (a^2 - r^2)$$

在膜片上取宽度为 dr ，长度为 $2\pi r$ 的窄环，它与固定极板构成的电容为

$$dC = \frac{\varepsilon_0 2\pi r dr}{d - y}$$

式中， d 为膜片与固定极板的初始间距。





在 $y/d \ll 1$ 情形下，变形膜片球面与固定极板之间的电容为

$$\begin{aligned} C &= C_0 + \Delta C = \frac{2\pi\epsilon_0}{d} \int_0^a \left[1 + \frac{p}{4d\sigma} (a^2 - r^2) \right] r dr \\ &= \frac{2\pi\epsilon_0}{d} \left[\frac{a^2}{2} + \frac{p}{4d\sigma} \int_0^a (a^2 - r^2) r dr \right] \end{aligned}$$

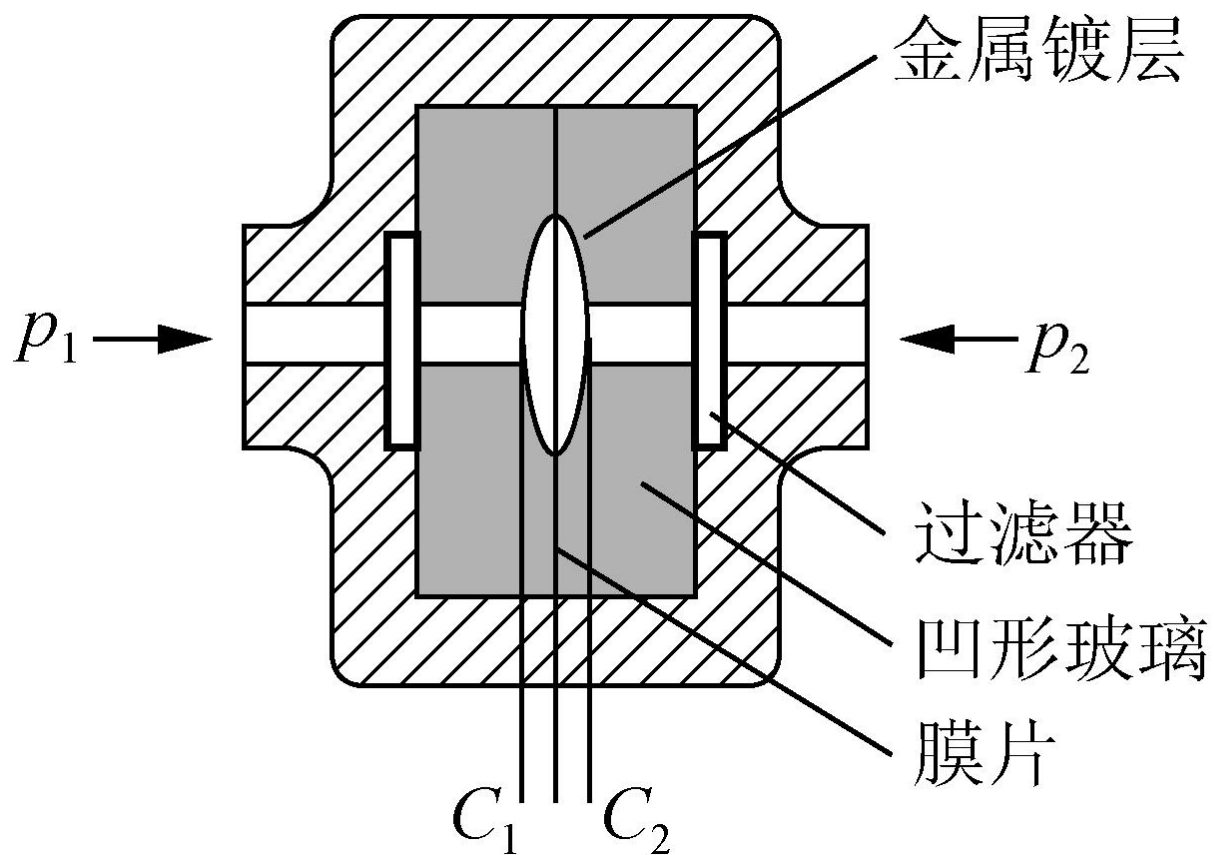
因此电容的相对变化为：

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{a^2}{8\sigma d} p$$

压力与电容变化成线性关系



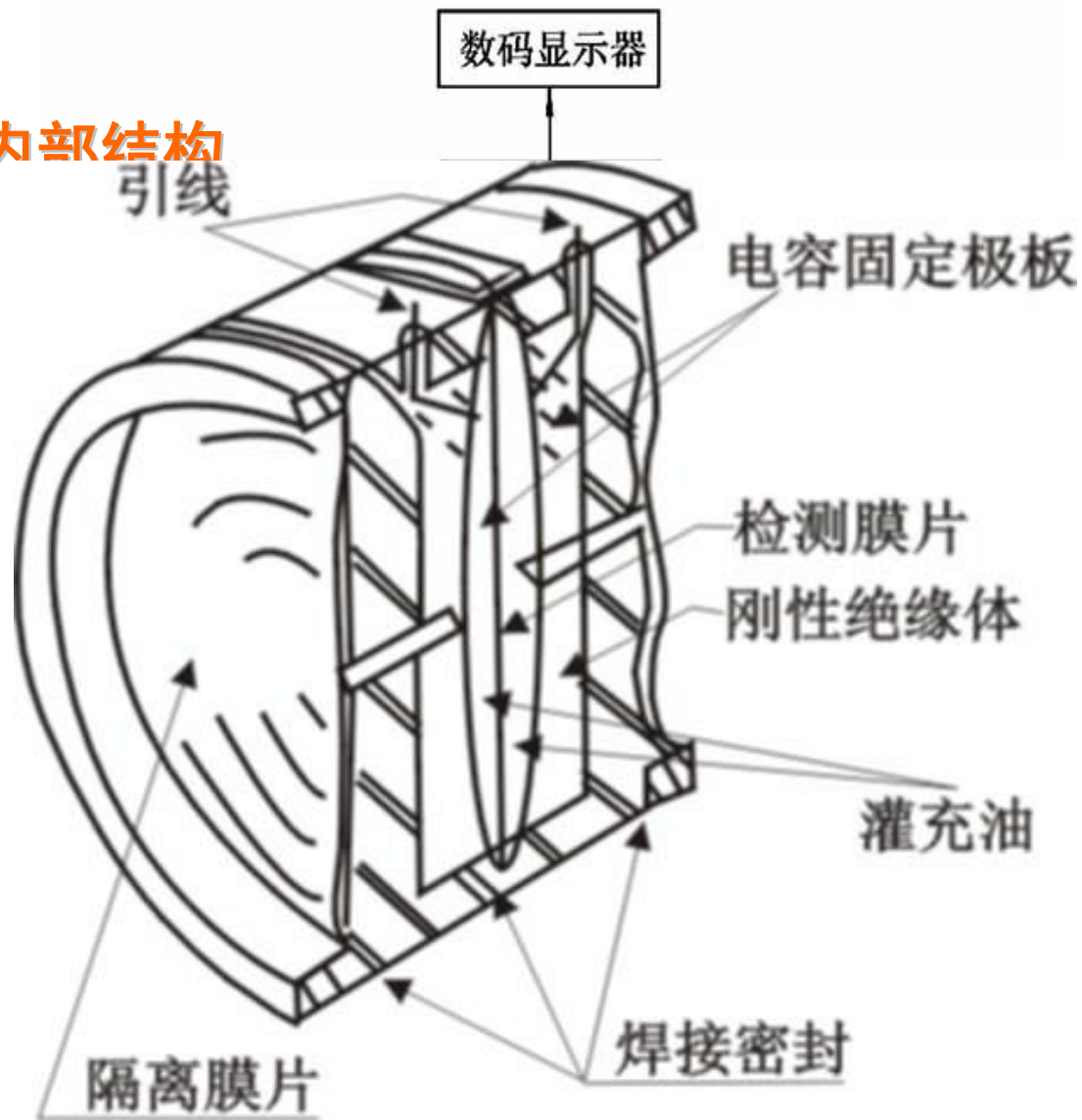
电容式差压传感器结构示意图





电容式差压变送器内部结构

- 1—高压侧进气口
- 2—低压侧进气口
- 3—过滤片
- 4—空腔
- 5—柔性不锈钢波纹隔离膜片
- 6—导压硅油
- 7—凹形玻璃圆片
- 8—镀金凹形电极
- 9—弹性平膜片
- 10— δ 腔





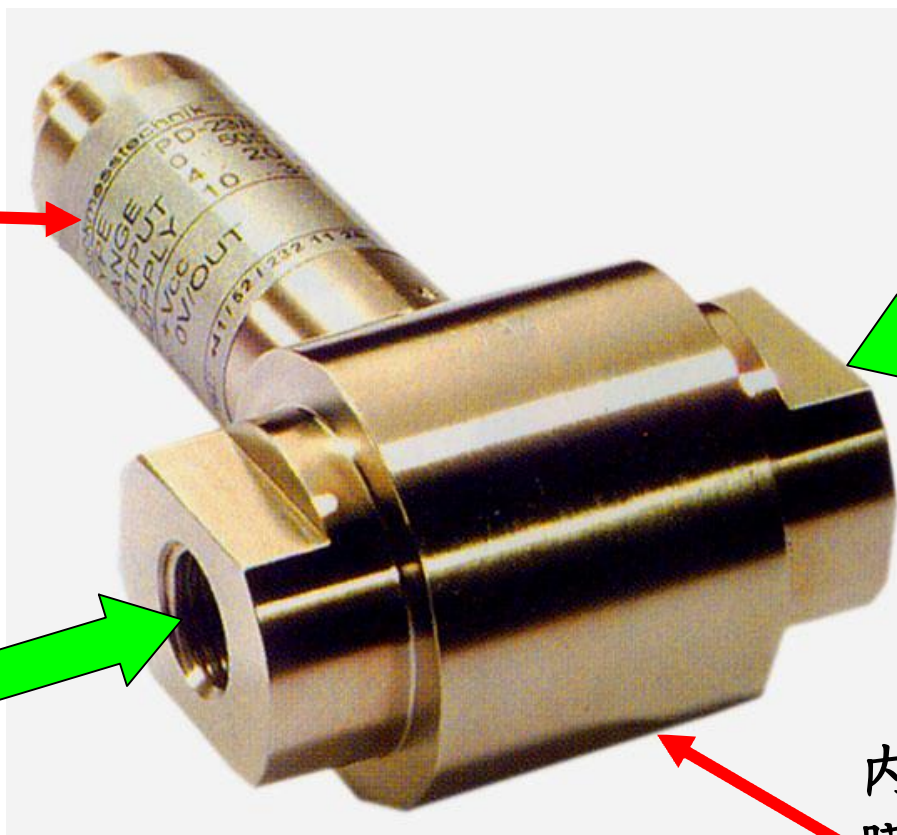
电容式差压变送器实物图片

电子线路位置

低压侧进气口

高压侧进气口

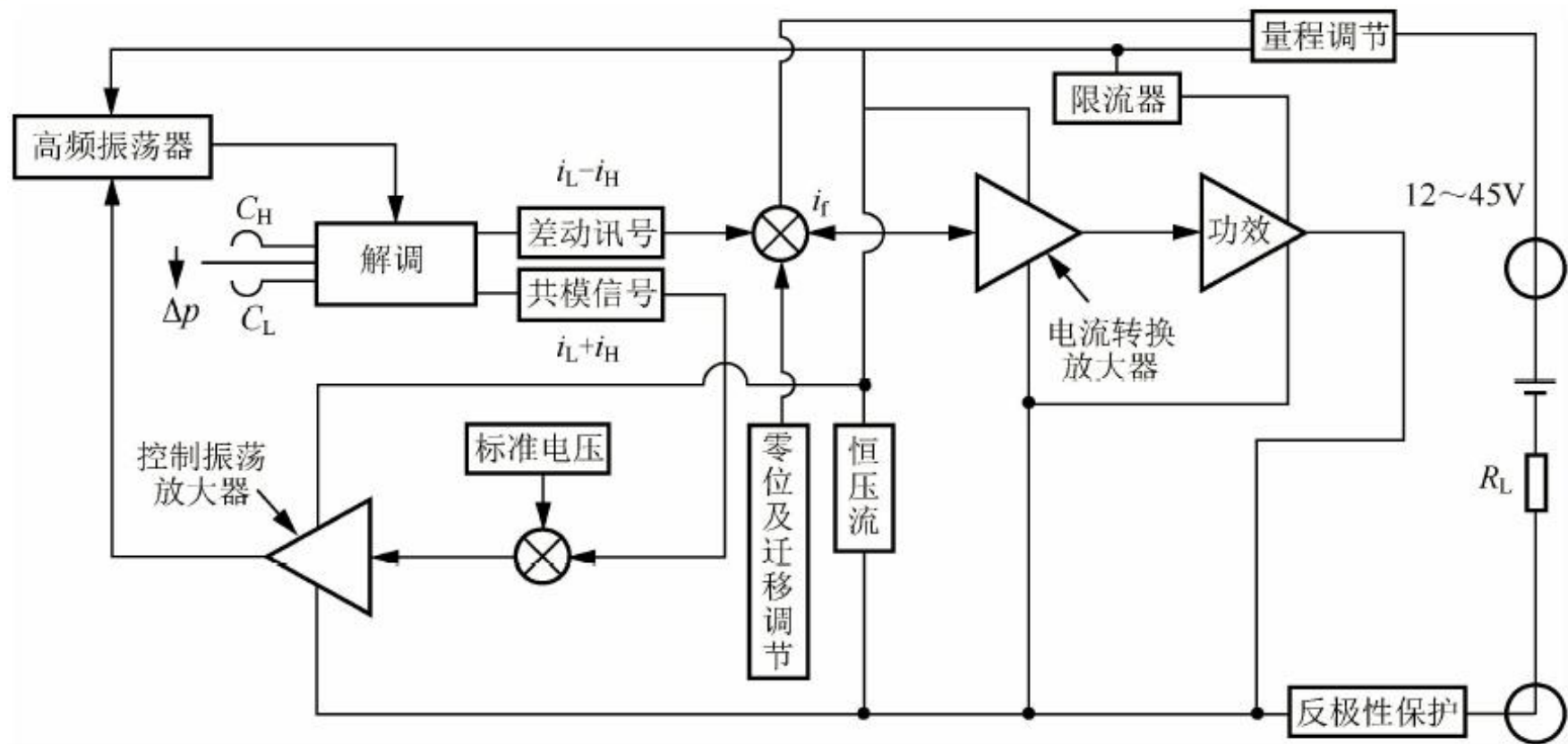
内部不锈钢膜片的位置





各种电容式差压变送器外形

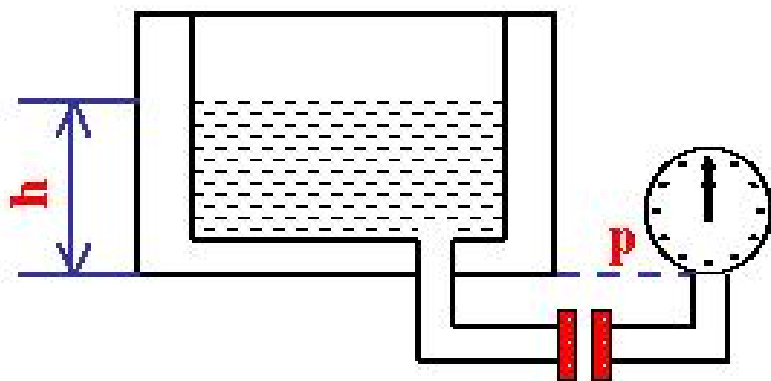




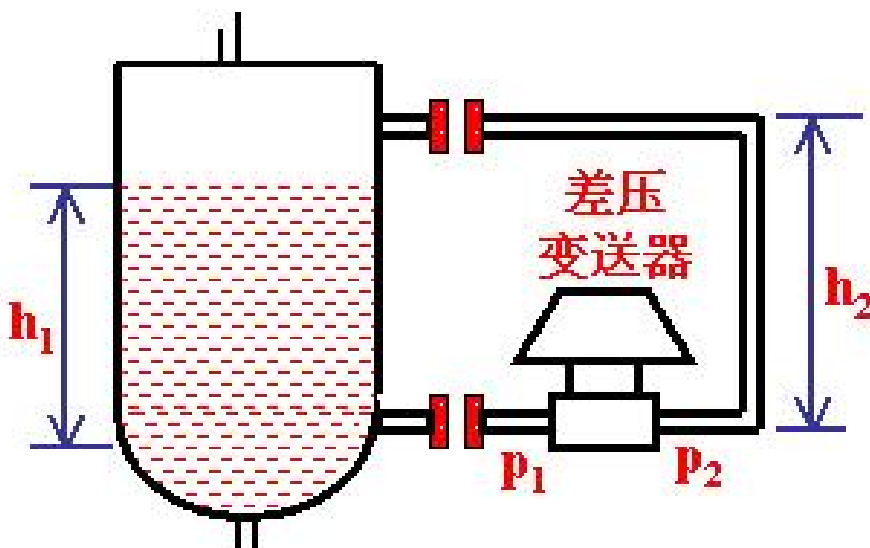
$$i_L - i_H = \frac{C_0 I_0}{k} (p_H - p_L)$$



电容式差压变送器应用——液位测量



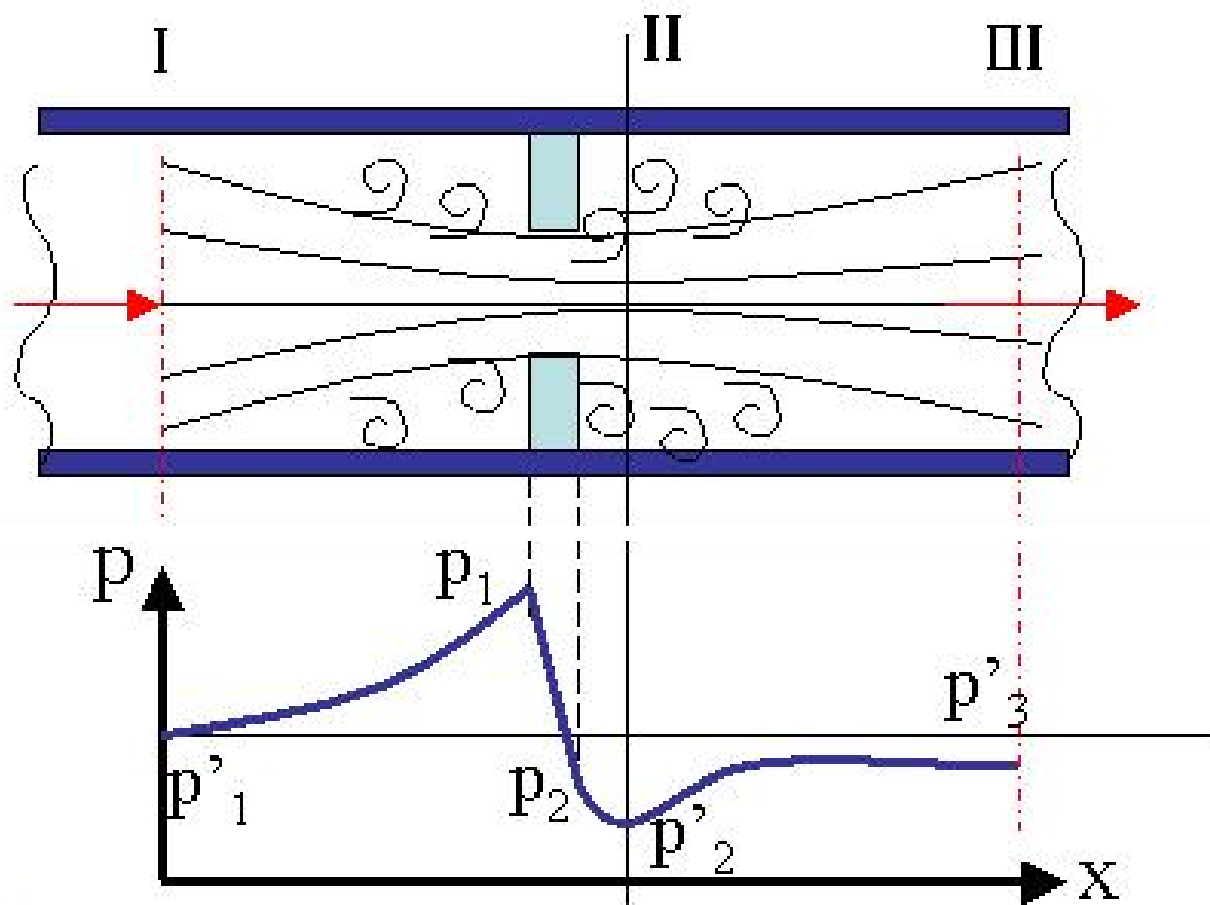
单法兰(开口)

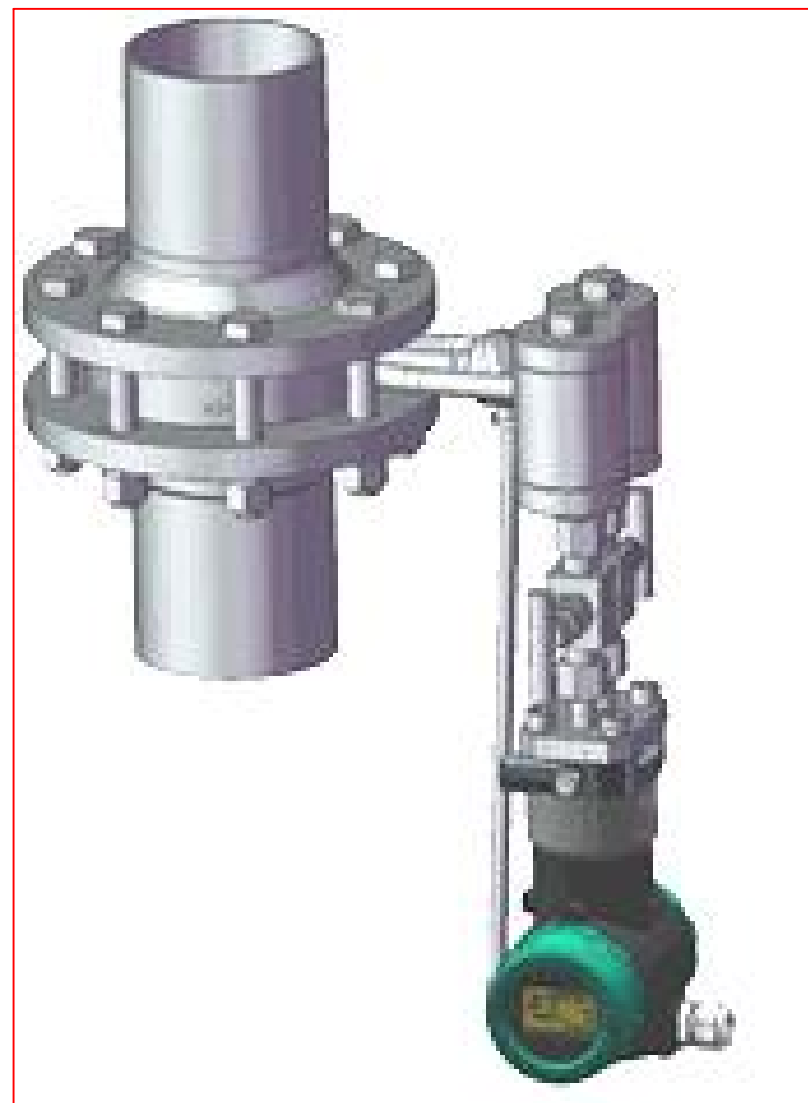
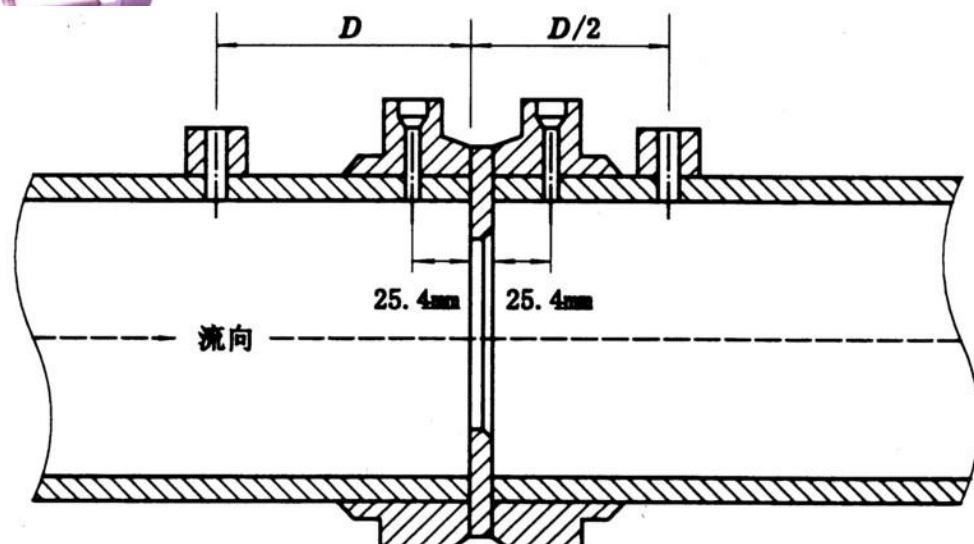


双法兰(闭口)



电容式差压变送器应用——流量测量(差压式流量计)

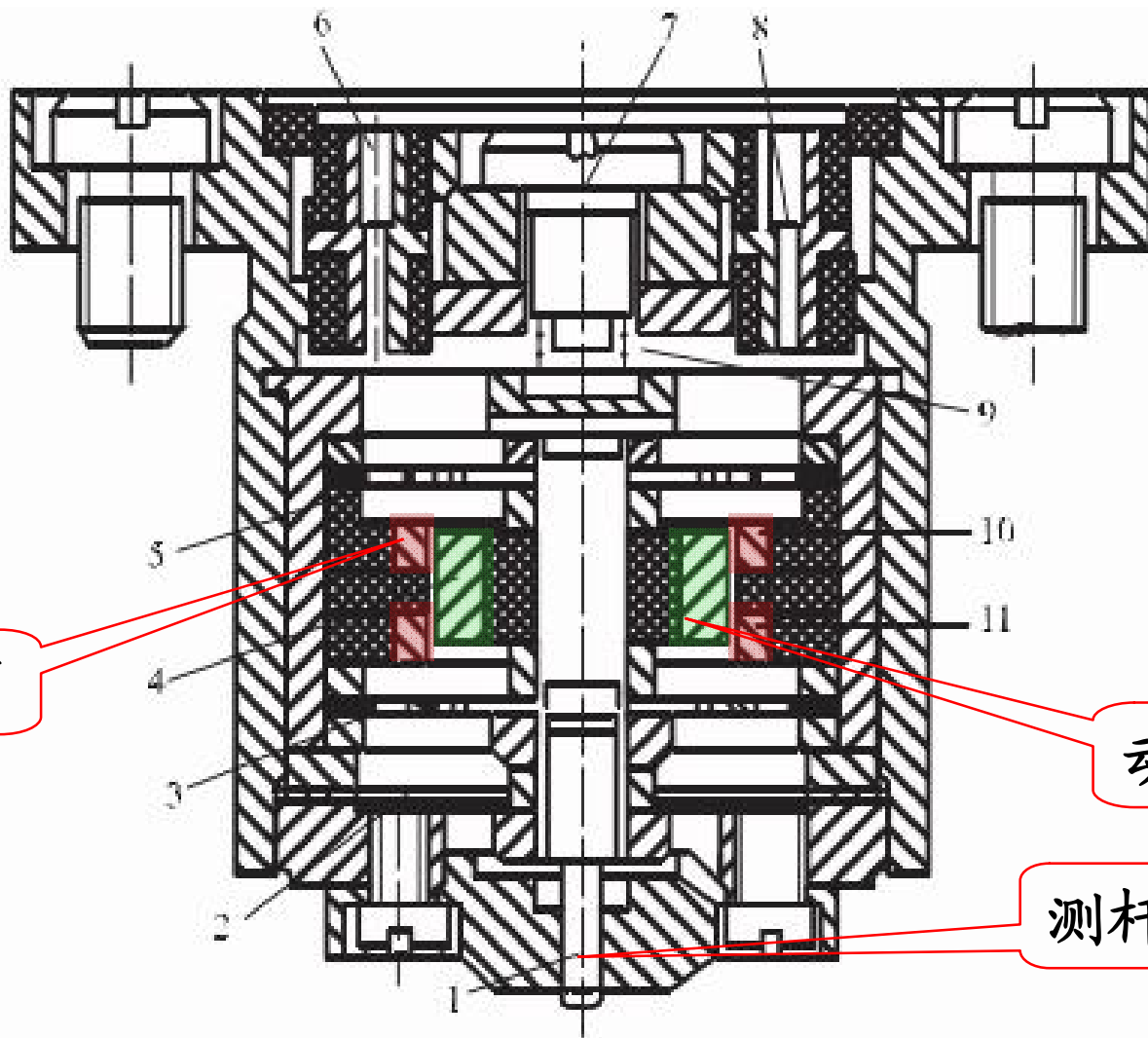






电容式传感器的典型应用之二

——电容式位移/尺寸传感器



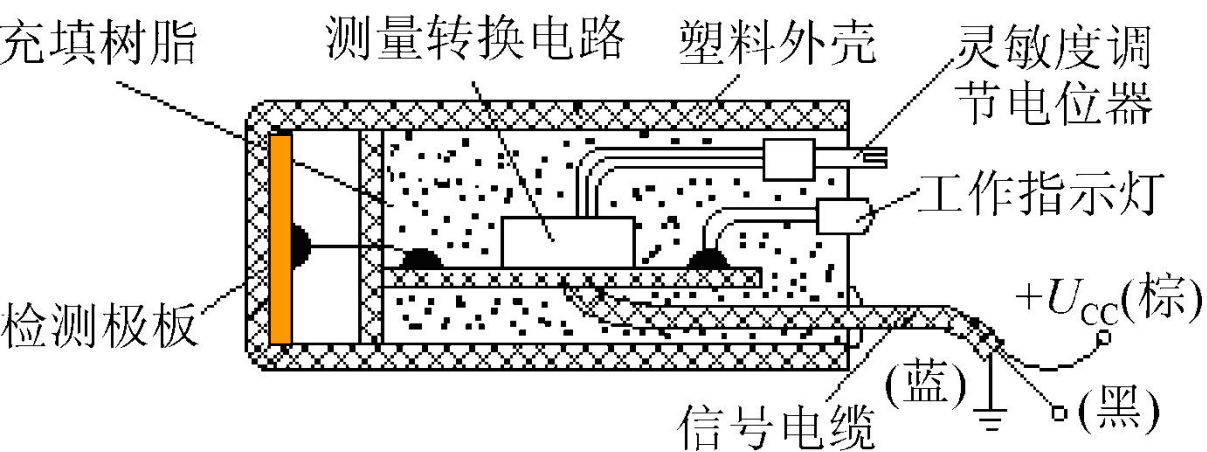
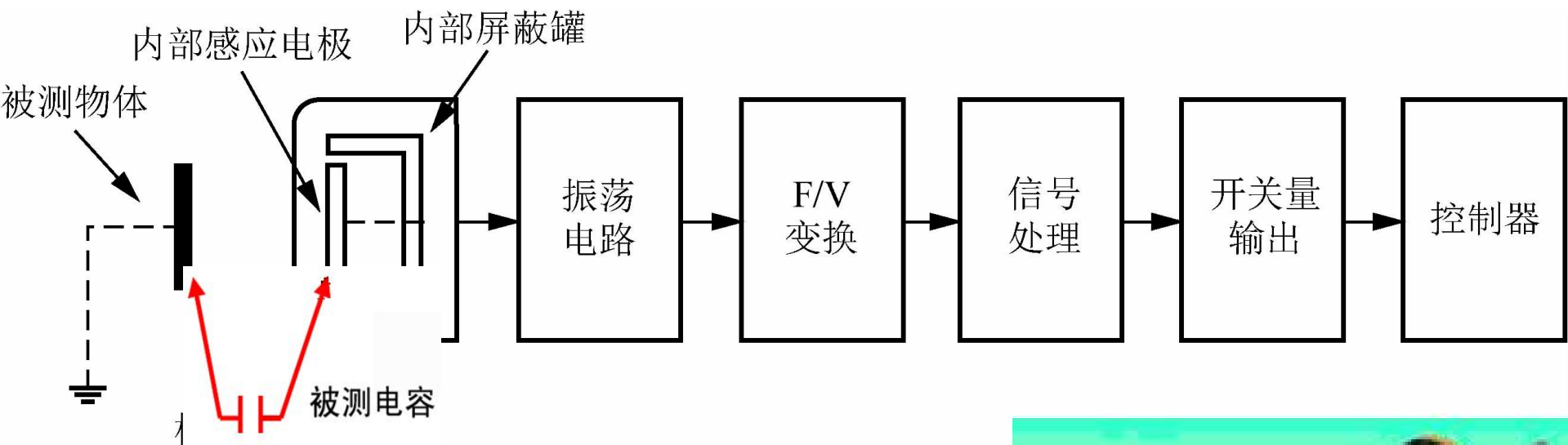
定极筒

动极筒

测杆

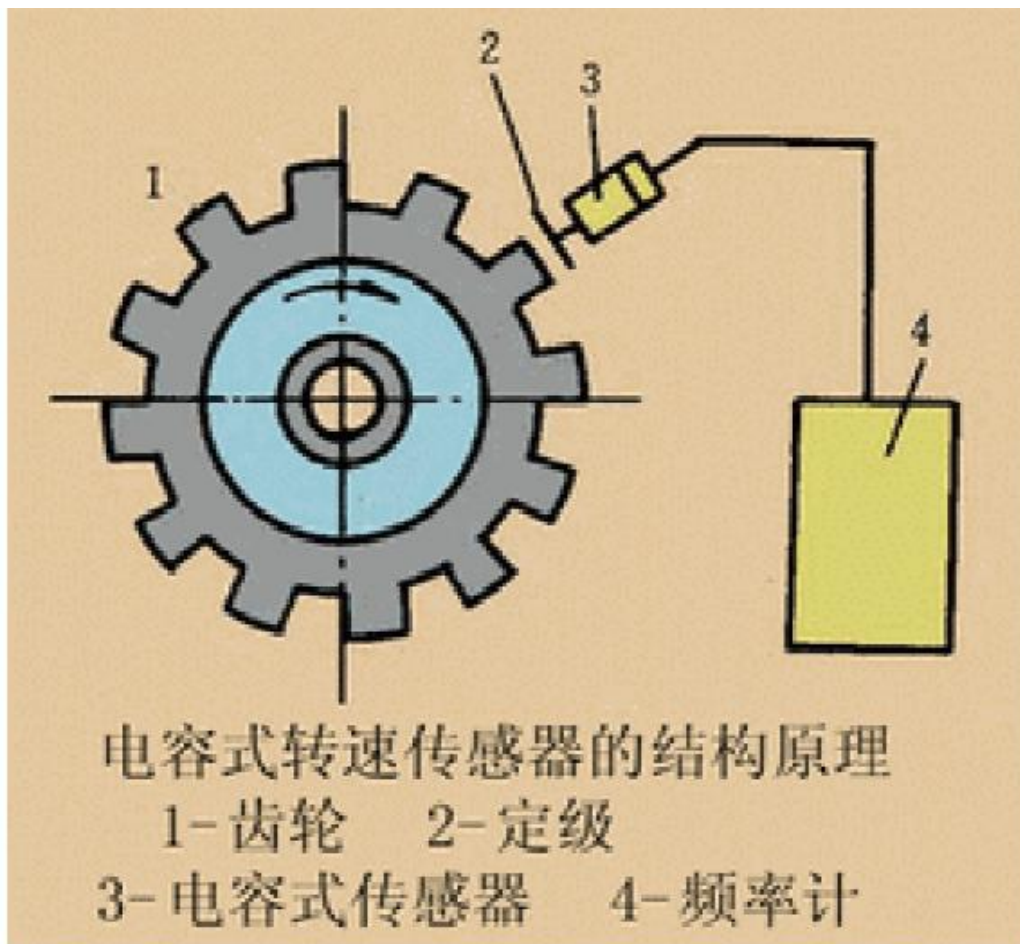


电容式接近开关传感器





电容式接近开关在转速测量中的应用

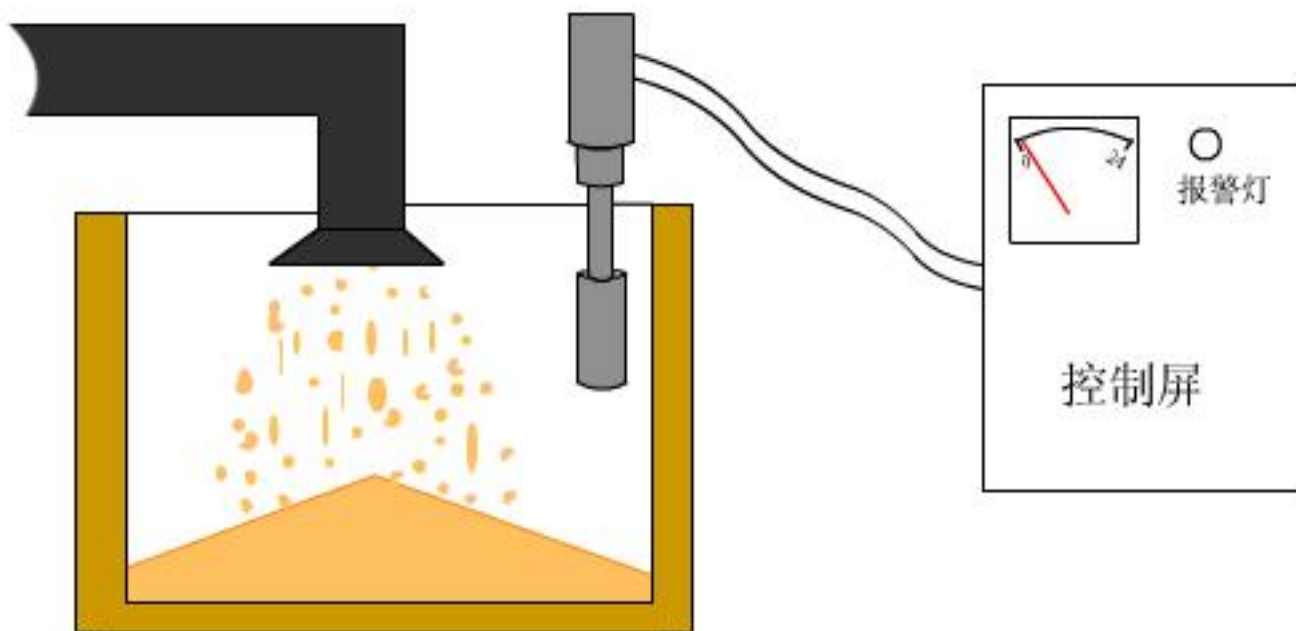


齿轮转动时，电容量发生周期性变化，通过测量电路转换为脉冲信号，则频率计显示的频率代表转速大小。设齿数为 z ，频率为 f ，则转速为：

$$n = \frac{60f}{z} \quad (r/min)$$

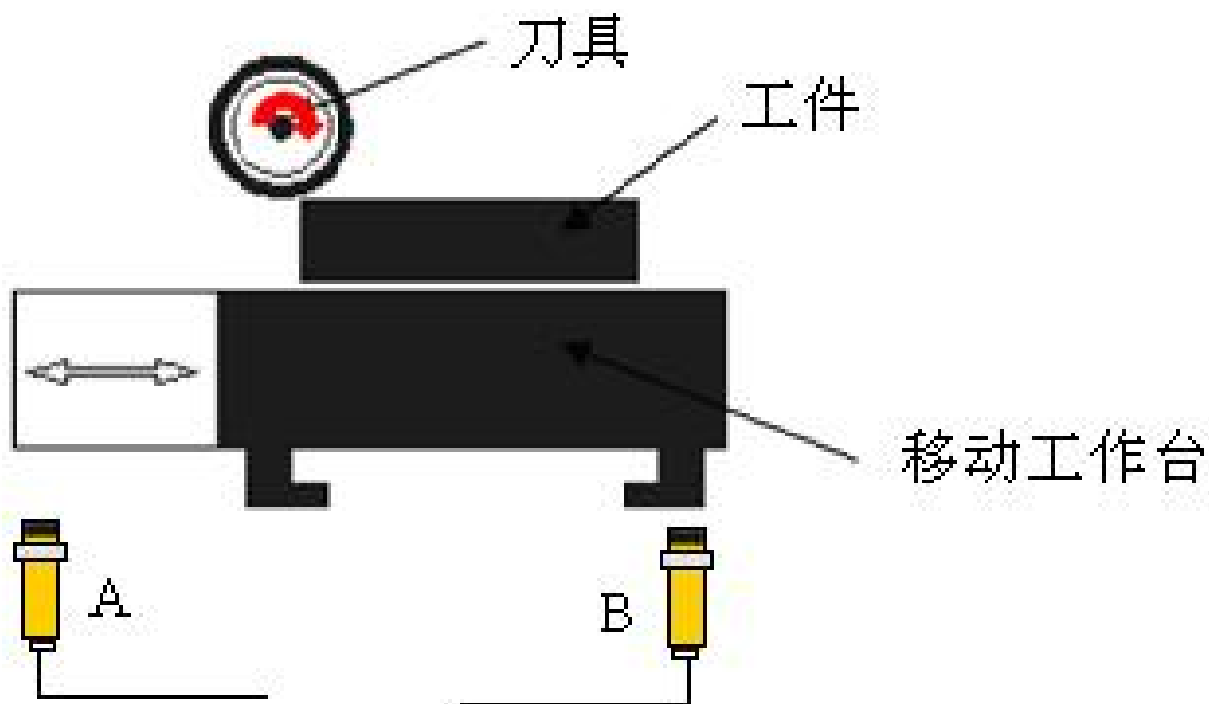


电容式接近开关在物位测量控制中的应用





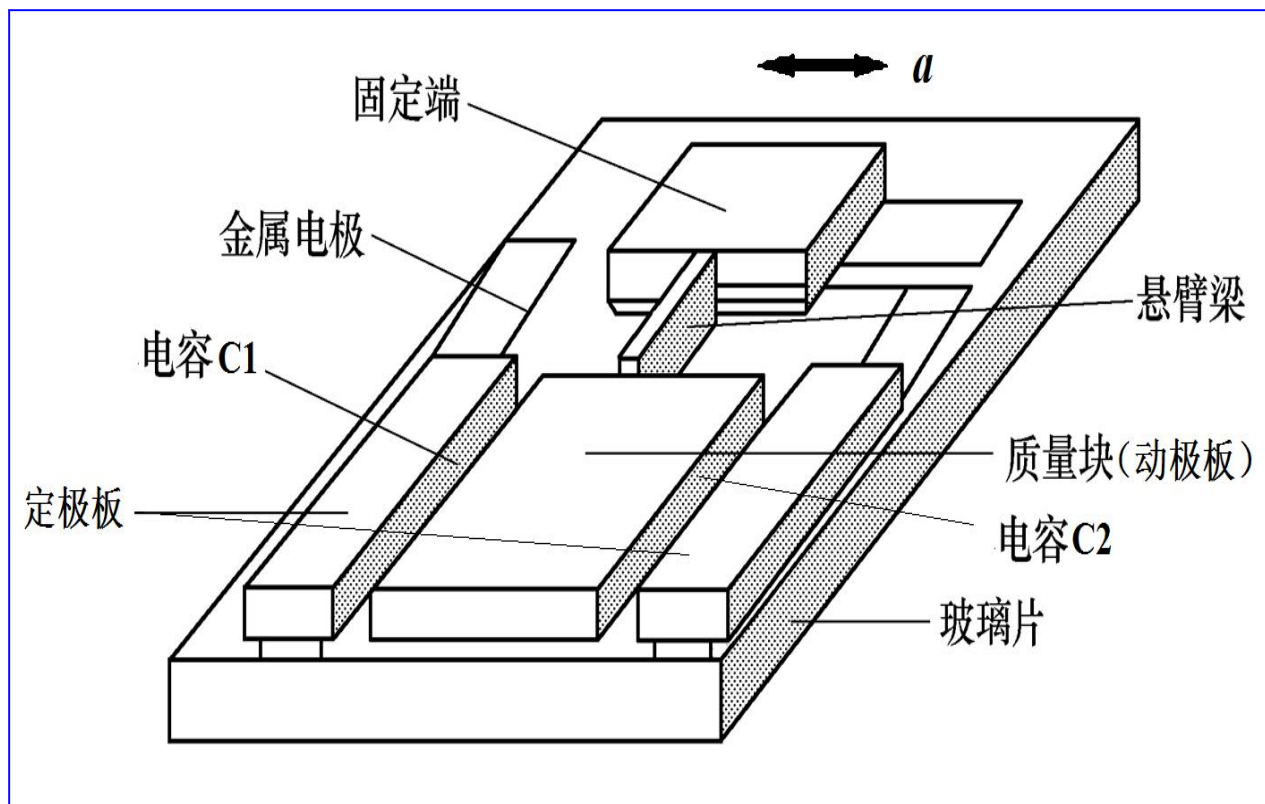
电容式接近开关在物位测量控制中的应用





电容式传感器的典型应用之三

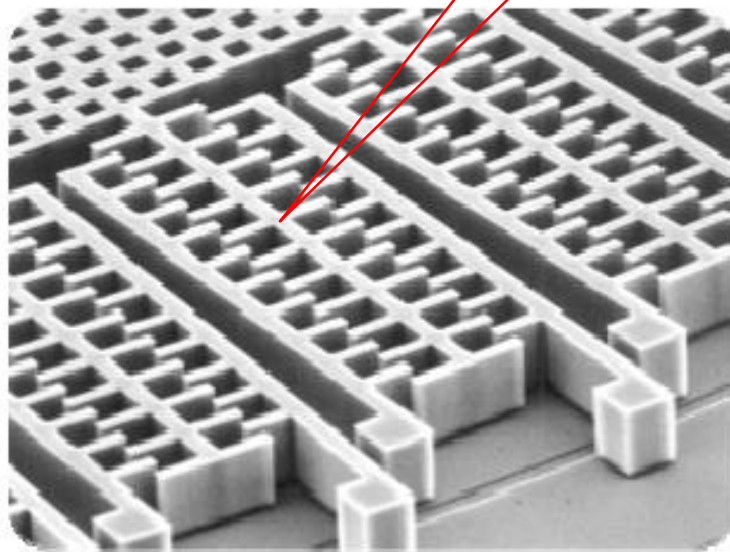
——电容式微加速度传感器



优点：灵敏度、分辨率高，动态特性好，线性度、温度稳定性好，**功耗极低。**



电容传感器的梳状电极





- 掌握电容传感器的工作原理、分类、基本计算、性能特点；
- 掌握电容传感器转换电路工作原理；
- 了解压力的测量方法及各类传感器；
- 了解电容式传感器的其它应用。



教材P100页： 3-25

通知： 每周课后晚上9点~10点到课程QQ群参加R. Q. A活动