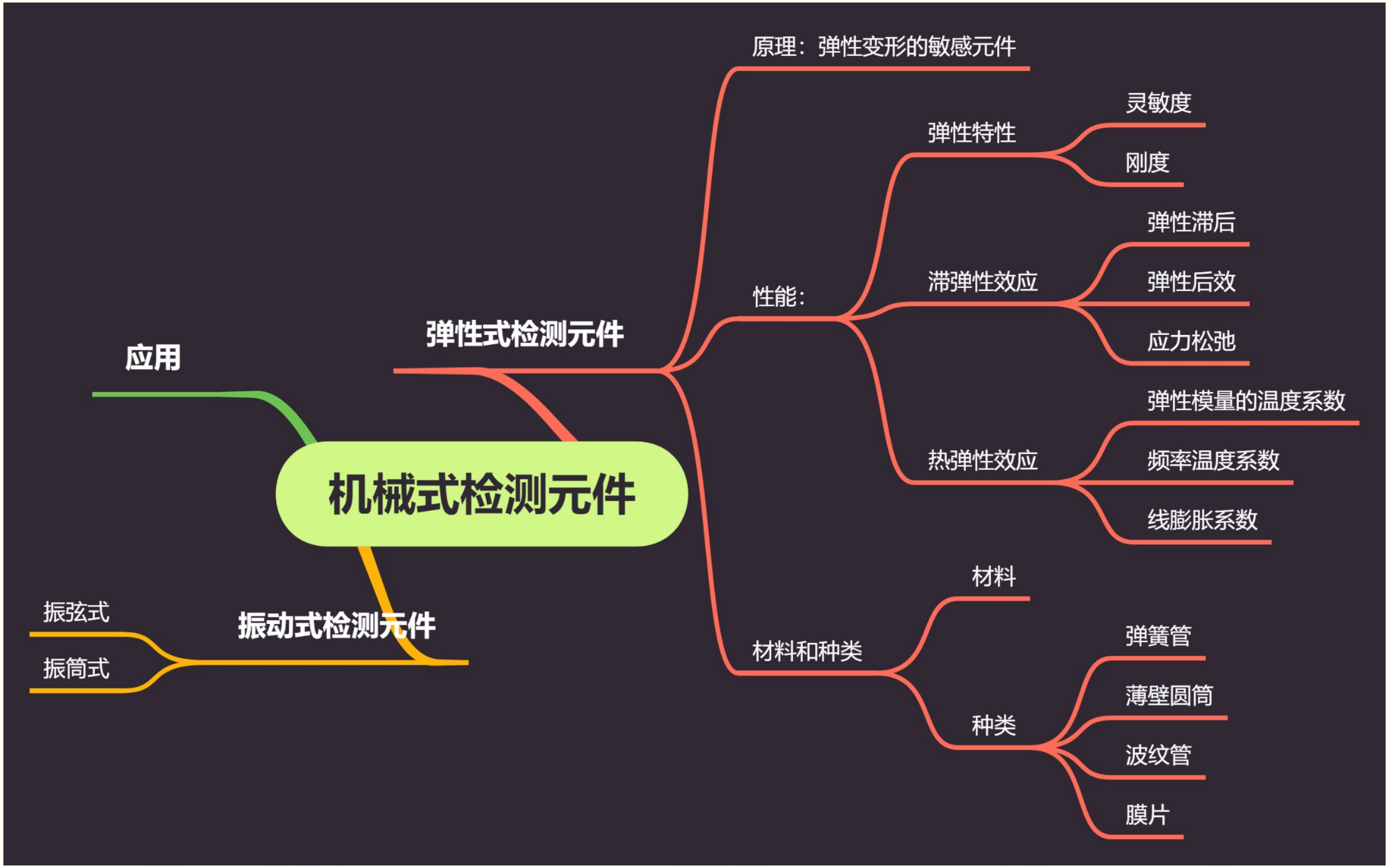
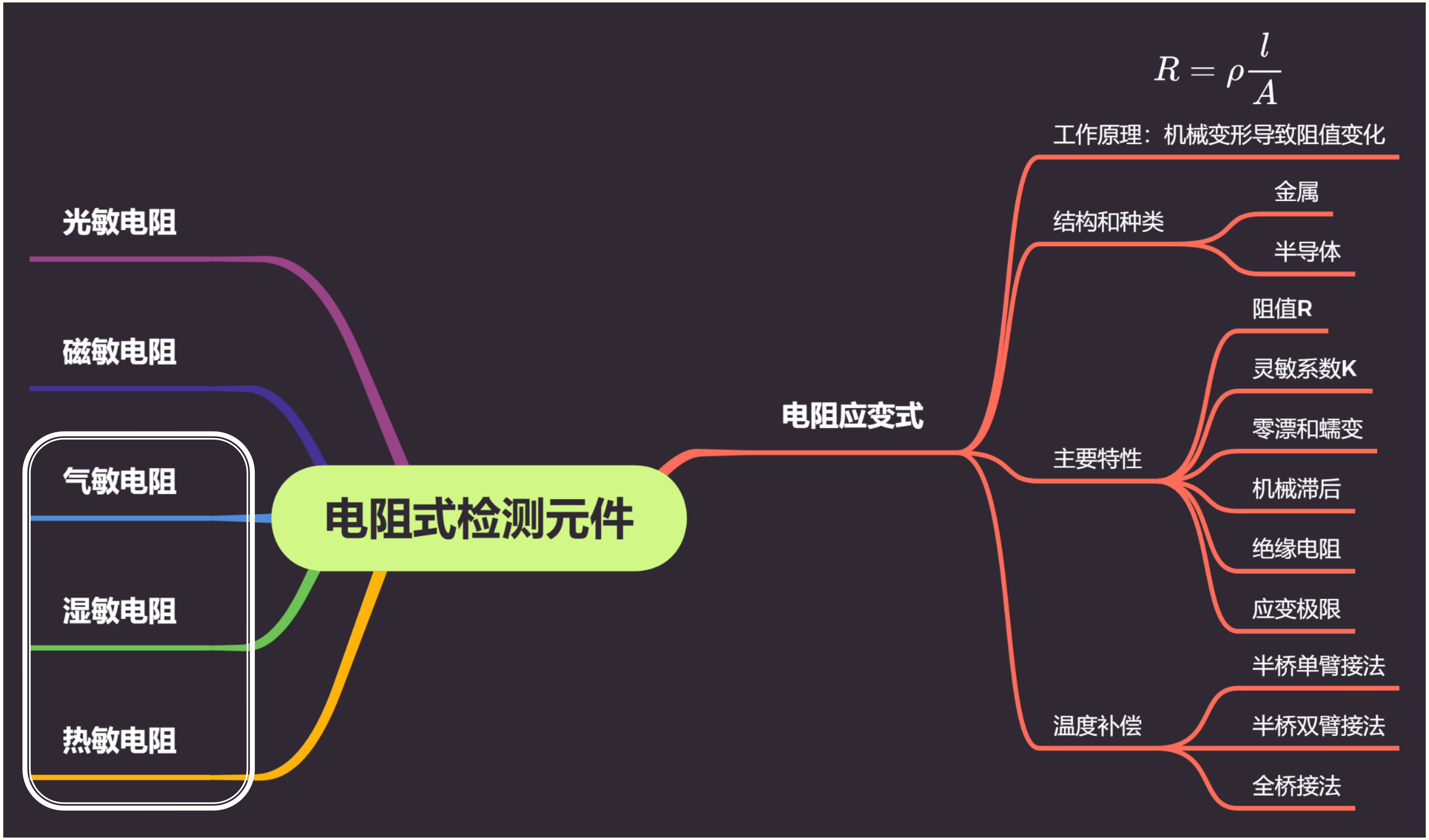
2.4、 电容式检测元件

机械式检测元件



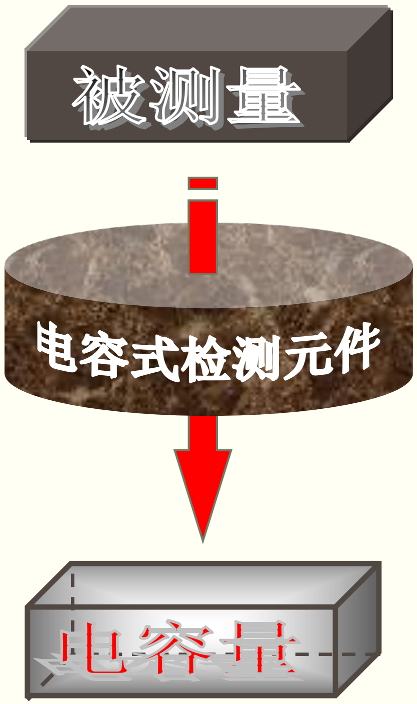
机械式检测元件
弹性式检测元件
原理：弹性变形的敏感元件
性能：
弹性特性
灵敏度
刚度
滞弹性效应
弹性滞后
弹性后效
应力松弛
热弹性效应
弹性模量的温度系数
频率温度系数
线膨胀系数
材料和种类
材料
种类
弹簧管
薄壁圆筒
波纹管
膜片
应用
振动式检测元件
振弦式
振筒式

电阻式检测元件



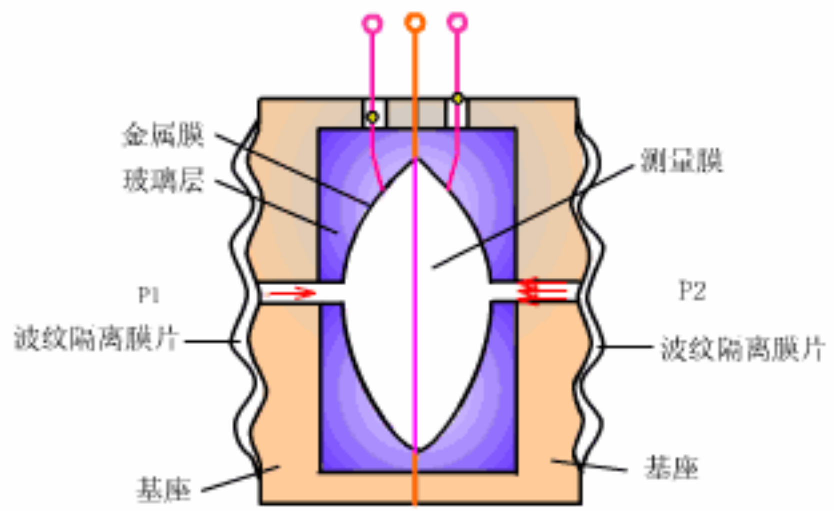
$R=\rho\frac{l}{A}$
工作原理：机械变形导致阻值变化
结构和种类
金属
半导体
阻值R
灵敏系数K
零漂和蠕变
主要特性
机械滞后
绝缘电阻
应变极限
半桥单臂接法
温度补偿
半桥双臂接法
全桥接法
电阻应变式
电阻式检测元件
光敏电阻
磁敏电阻
气敏电阻
湿敏电阻
热敏电阻

定义



将待测物理量转变为电容量变化的一类传感器

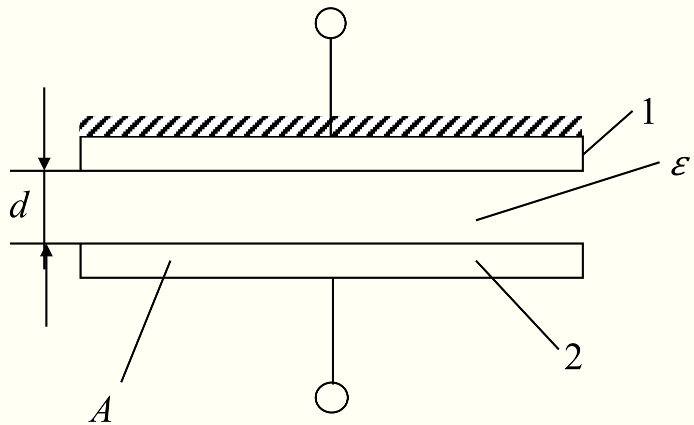
位移	振动	压力	加速度
角位移		差压	
		物位	

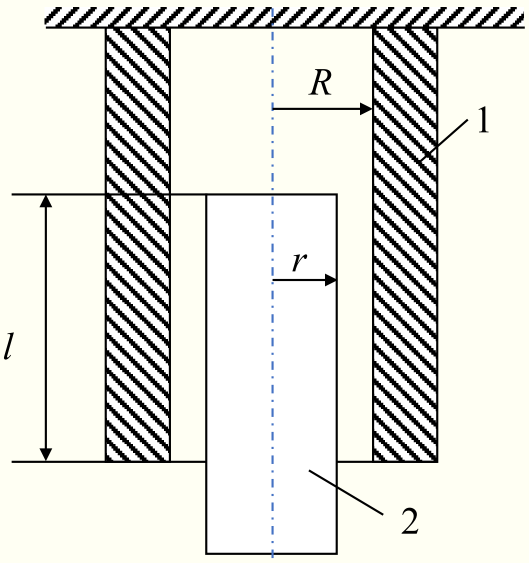


知识要点

电容式检测元件
温度补偿及抗干扰
几何尺寸变化
选材料
介电常数变化
转换电路补偿措施
寄生电容
屏蔽接地
增大初始电容
集成法
驱动电缆
工作原理--可变电容器
$C=\varepsilon\frac{A}{d}$
d
A
epsilon
结构特性
变极距式
变面积式
变介电参数式
优点
结构简单
低功耗
动态性能好
非接触式

1、工作原理





变介电常数式

变面积式

变介电常数式

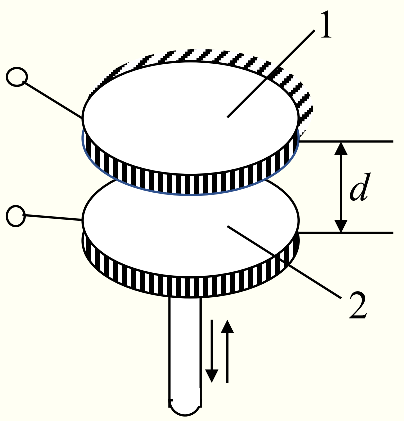
$$C = \varepsilon \frac{A}{d} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$$

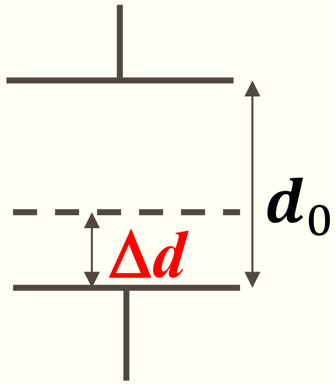
变极距式

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln\frac{R}{r}}$$

变工作长度式

1）变极距式



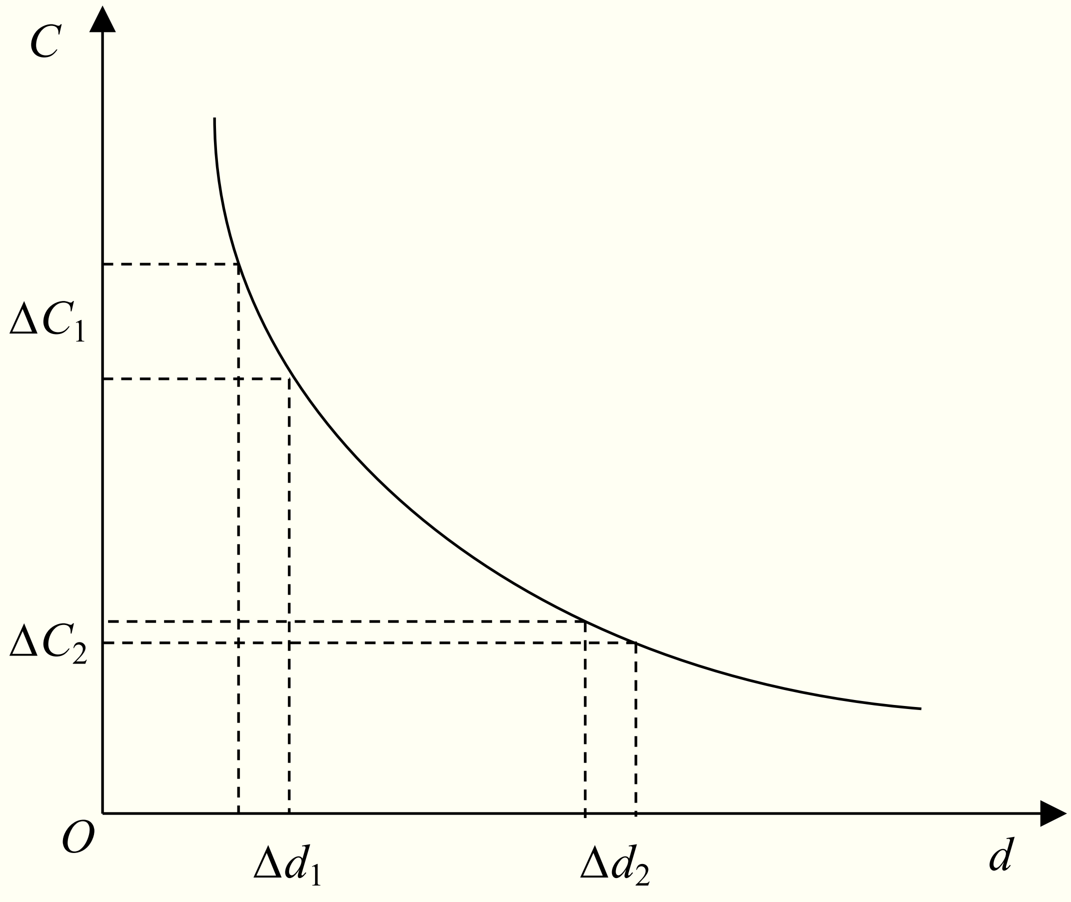


$$C_0 = \varepsilon \frac{A}{d_0}$$

$$C = C_0 + \Delta C = \varepsilon \frac{A}{d_0 - \Delta d} = \varepsilon \frac{A}{d_0} \cdot \frac{1}{1 - \dfrac{\Delta d}{d_0}} = C_0 \left[\frac{1}{1 - \dfrac{\Delta d}{d_0}} \right]$$

$$\Delta C = C - C_0 = C_0 \left[\frac{\dfrac{\Delta d}{d_0}}{1 - \dfrac{\Delta d}{d_0}} \right]$$

非线性关系



灵敏度

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

幂级数产开

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

$\Delta d/d_0 \ll 1$

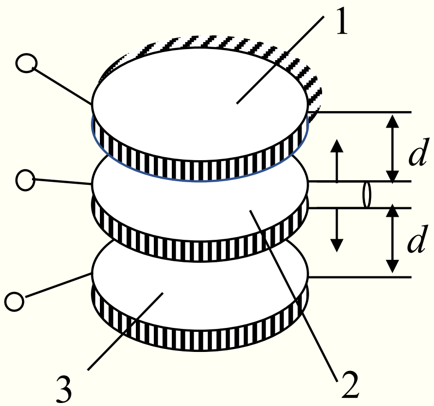
$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta d}{d_0}$$

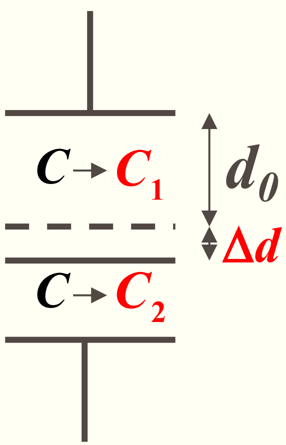
$$K_C = \frac{\Delta C}{\Delta d} = \frac{C_0}{d_0} = \frac{\varepsilon A}{d_0^2}$$

非线性误差

$$\delta=\frac{\Delta C-\Delta C'}{\Delta C}=-\left[\frac{\Delta d}{d_0}+\left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2+\left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^3+\cdots\right]$$

差动式电容





$$C_1 = C_0\left[\frac{1}{1+\frac{\Delta d}{d_0}}\right] \qquad C_2 = C_0\left[\frac{1}{1-\frac{\Delta d}{d_0}}\right]$$

$$C_1 = C_0\left[1-\frac{\Delta d}{d_0}+\left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2-\left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^3+\cdots\right]$$

$$C_2 = C_0\left[1+\frac{\Delta d}{d_0}+\left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2+\left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^3+\cdots\right]$$

$$\Delta C = C_2 - C_1 = C_0\left[2\left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)+2\left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^3+\cdots\right]$$

差动式电容

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \left[2\left(\frac{\Delta d}{d_0}\right) + 2\left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^3 + \cdots\right]$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx 2\frac{\Delta d}{d_0}$$

$$K_C = \frac{\Delta C}{\Delta d} = 2\frac{C_0}{d_0}$$

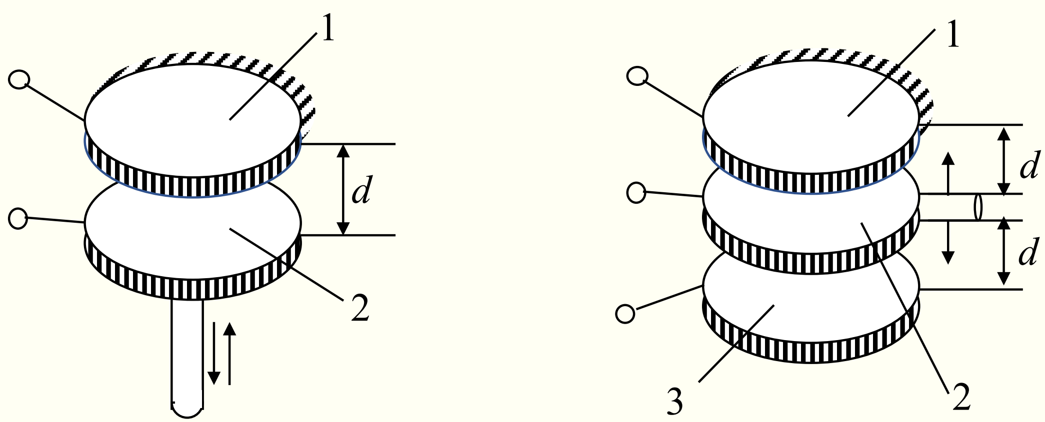
$$\delta = \frac{\Delta C - \Delta C'}{\Delta C} = -\left[\left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^4 + \cdots\right]$$

灵敏度 $\uparrow$ 非线性误差、环境影响 $\downarrow$

例题 1

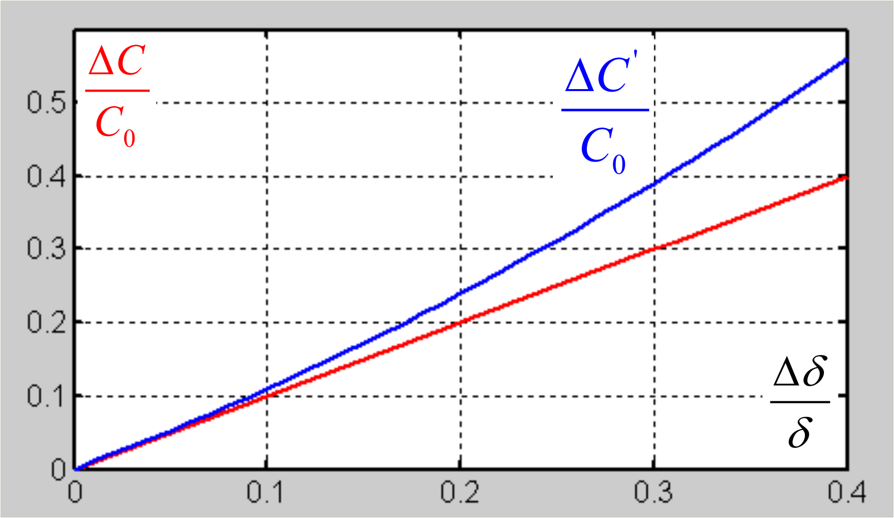
已知极板面为A，极板间介质为空气，极板间距1 mm，当极距减少0.1 mm时，求其电容变化量及相对变化率？

$$\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-12}\ \mathrm{F/m}$$

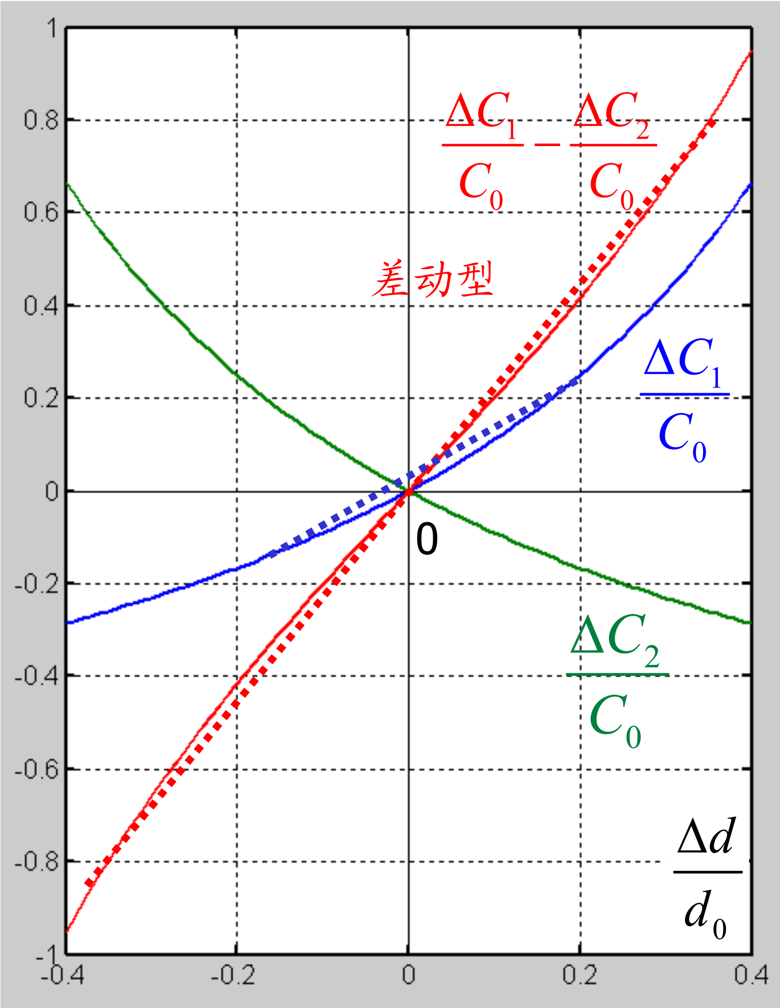


试计算非线性误差？

与差动电容的比较

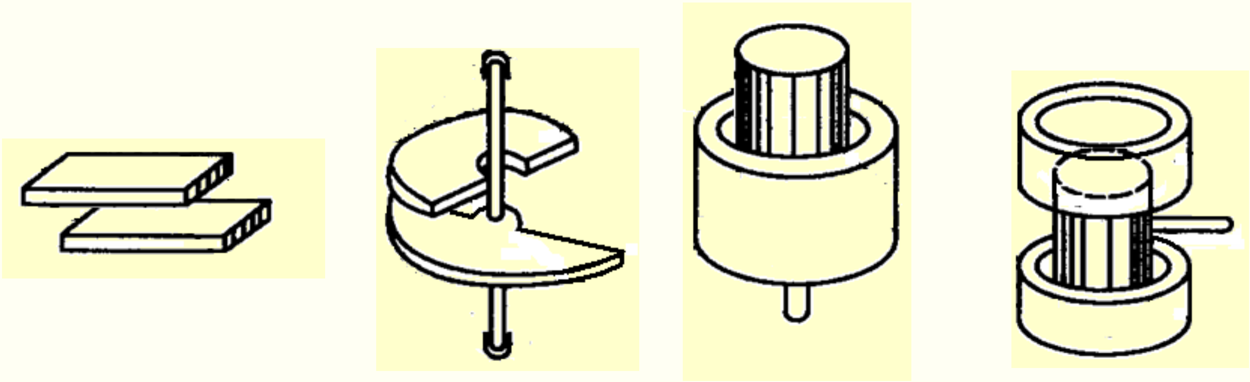


$\frac{\Delta C}{C_0}$
$\frac{\Delta C'}{C_0}$
$\frac{\Delta\delta}{\delta}$
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5



$\frac{\Delta C_1}{C_0}-\frac{\Delta C_2}{C_0}$
差动型
$\frac{\Delta C_1}{C_0}$
$\frac{\Delta C_2}{C_0}$
$\frac{\Delta d}{d_0}$
0
1
0.8
0.6
0.4
0.2
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
-0.4
-0.2
0.2
0.4

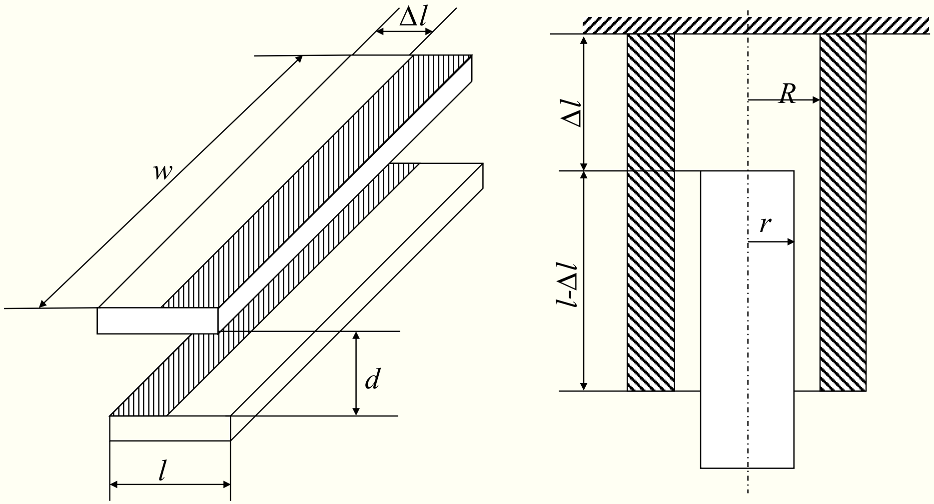
2）变面积式



$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\varepsilon_0}{d}A - \frac{\varepsilon_0}{d}A_0 = \frac{\varepsilon_0}{d}\Delta A$$

$$K_C = \frac{\Delta C}{\Delta A} = \frac{\varepsilon_0}{d}$$

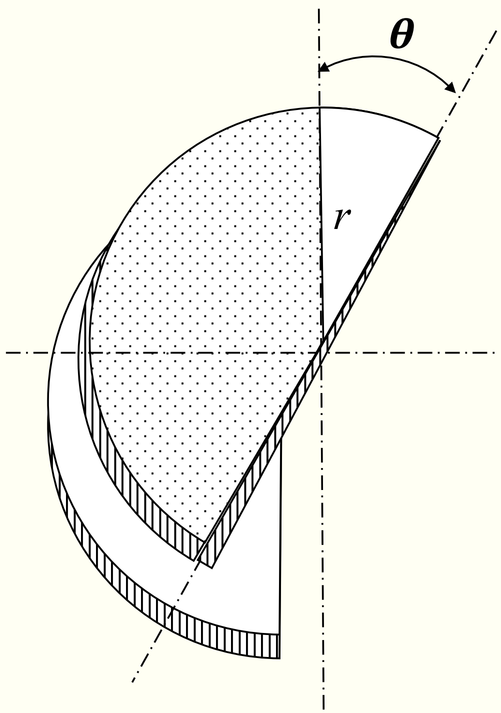
线位移测量



$$\Delta C = \frac{\varepsilon_0}{d}\Delta A = \frac{\varepsilon_0}{d} w \cdot \Delta l$$

$$\Delta C = C_0 - C = \frac{2\pi\varepsilon_0 l}{\ln\frac{R}{r}} - \frac{2\pi\varepsilon_0 (l-\Delta l)}{\ln\frac{R}{r}} = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{R}{r}} \cdot \Delta l$$

角位移测量



$$A = A_0 - \theta r^2/2\,, \qquad A_0 = \pi r^2/2$$

$$A = A_0\left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right)$$

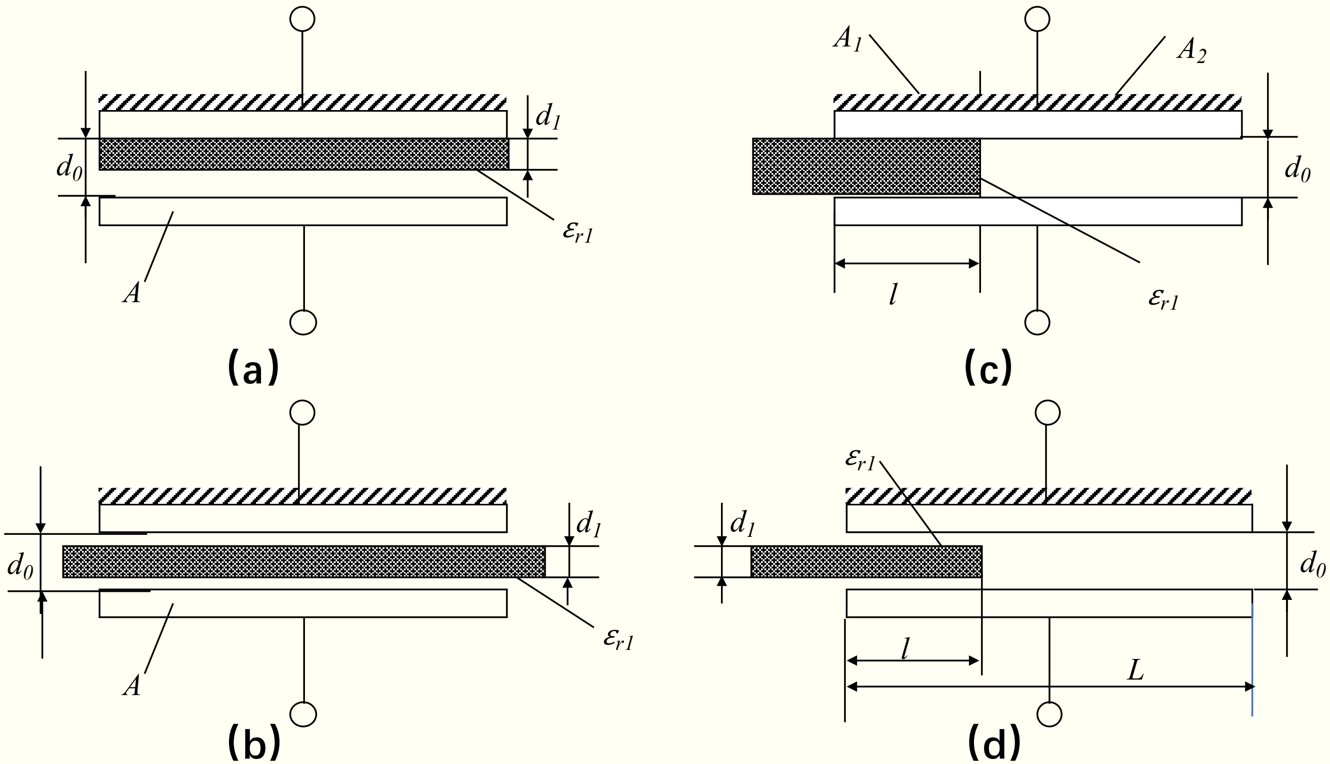
$$\Delta A = A_0 - A = A_0\frac{\theta}{\pi}$$

$$\Delta C = \frac{\varepsilon_0}{d}\Delta A = \frac{\varepsilon_0}{d}A_0\frac{\theta}{\pi} = C_0\frac{\theta}{\pi}$$

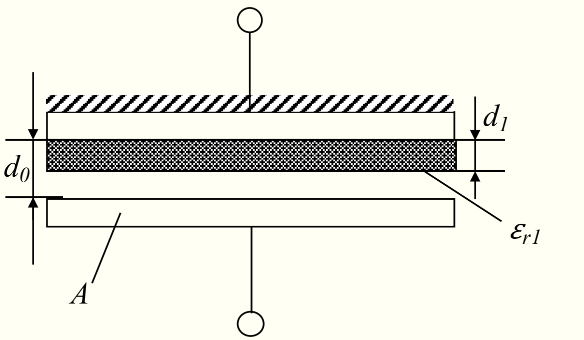
$$K_C = \frac{\Delta C}{\theta} = \frac{1}{\pi}\frac{\varepsilon_0}{d}A_0 = \frac{1}{\pi}C_0$$

3）变介电常数式

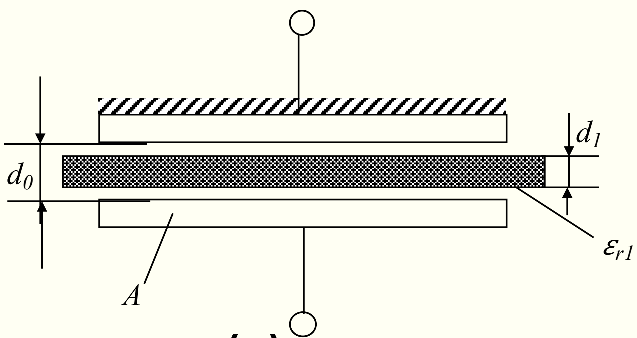
$$\Delta C = \frac{A}{d}\Delta\varepsilon$$



串联结构



(a)



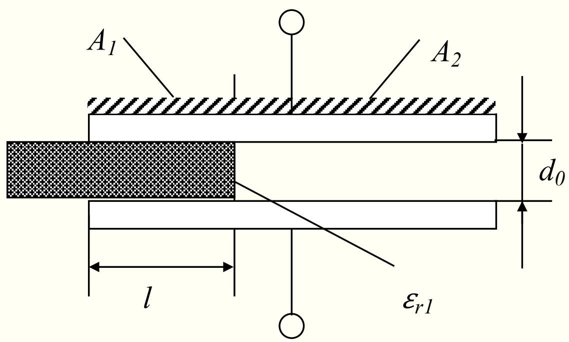
(b)

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\varepsilon_{r1}\varepsilon_0 A}{d_1 + \varepsilon_{r1}(d_0 - d_1)}$$

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{A}{d_0}$$

$$\Delta C = C - C_0 = C_0 \frac{\varepsilon_{r1} - 1}{1 + \varepsilon_{r1} \frac{d_0 - d_1}{d_1}}$$

并联结构



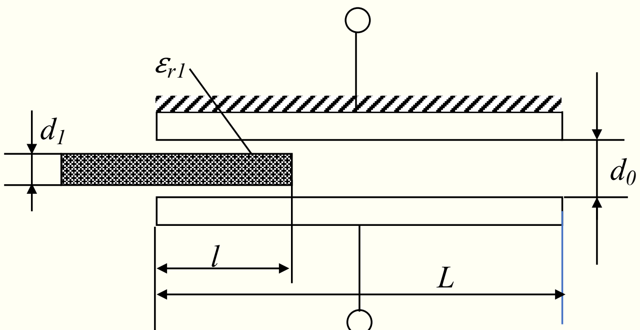
$$C = C_1 + C_2 = \frac{\varepsilon_{r1}\varepsilon_0 A_1}{d_0} + \frac{\varepsilon_0 A_2}{d_0}$$

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{A_1 + A_2}{d_0}$$

$$\Delta C = C - C_0 = C_0 \frac{\varepsilon_0 A_1(\varepsilon_{r1} - 1)}{d_0}$$

$$A_1 = wl$$

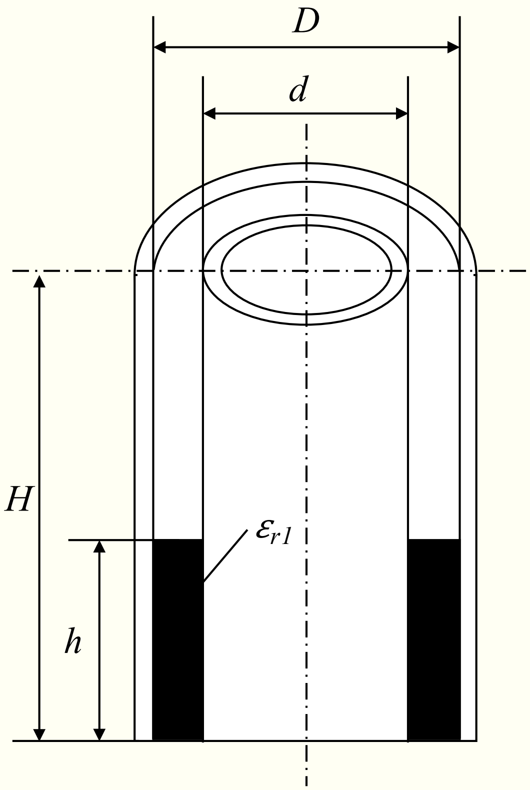
串并联结构



(d)

$$C=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}+C_3=\frac{\varepsilon_{r1}\varepsilon_0 wl}{d_1+\varepsilon_{r1}(d_0-d_1)}+\frac{\varepsilon_0 w(L-l)}{d_0}$$

圆筒状电容器

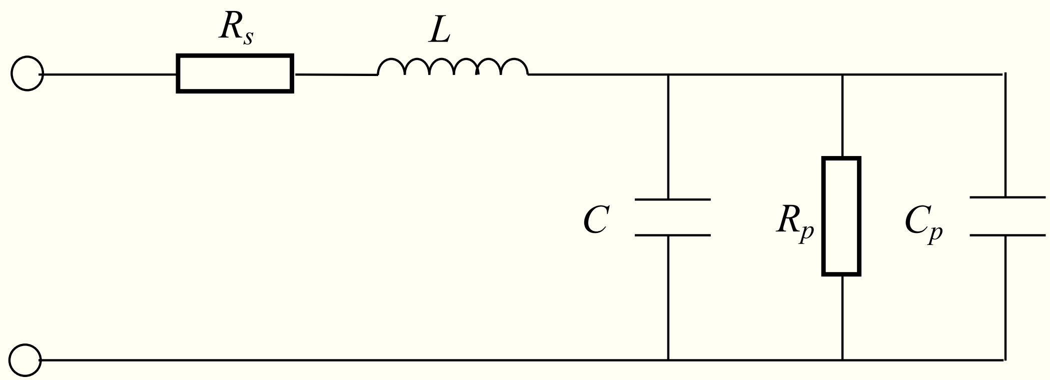


$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_{r1}\varepsilon_0 h}{ln\frac{D}{d}} + \frac{2\pi\varepsilon_0(H-h)}{ln\frac{D}{d}}$$

$$= \frac{2\pi\varepsilon_0 H}{ln\frac{D}{d}} + \frac{2\pi\varepsilon_0 h(\varepsilon_{r1}-1)}{ln\frac{D}{d}}$$

$$= C_0 + \frac{2\pi\varepsilon_0 h(\varepsilon_{r1}-1)}{ln\frac{D}{d}}$$

2、等效电路



- C为电容式传感器；
- R_p为并联损耗，包括极板间泄漏电阻和介质损耗等；
- R_s为串联损耗，包括引线电阻、极板电阻和金属支架电阻；
- L由电容器自身电感和引线电感组成，与电容器的结构形式及引线长度有关；
- C_p为寄生电容

有效电容

对于任一谐振频率以下的频率，由于 L的存在，检测元件的有效电容C_e在忽略R_p、R_s的影响时，可表示为

$$C_e = \frac{C}{1-\omega^2 LC}$$

$$\frac{\Delta C_e}{C_e} = \frac{\Delta C}{C}\left[\frac{C}{1-\omega^2 LC}\right]$$

3、温度与寄生电容影响

消除温度对电容的影响

温度补偿

温度变化

几何尺寸变化 → 附加误差

选用温度系数小且稳定的材料

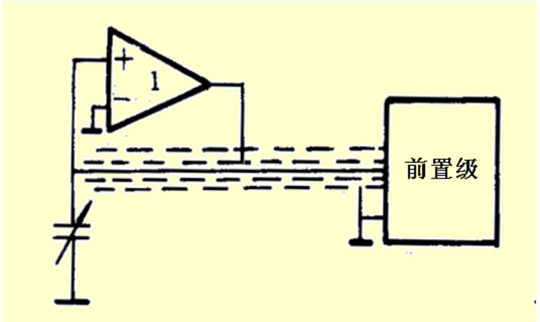
介电常数变化 → 测量误差

在转换电路中采取补偿措施

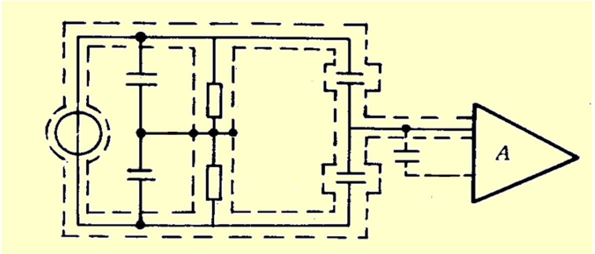
消除寄生电容的影响

- 增加初始电容
- 集成法
- 驱动电缆技术
- 整体屏蔽技术

驱动电缆技术

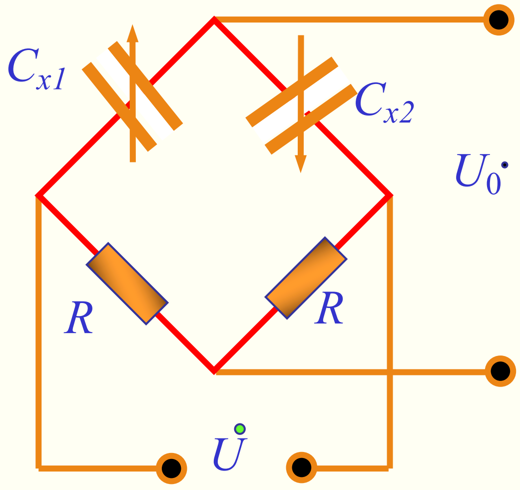


整体屏蔽技术

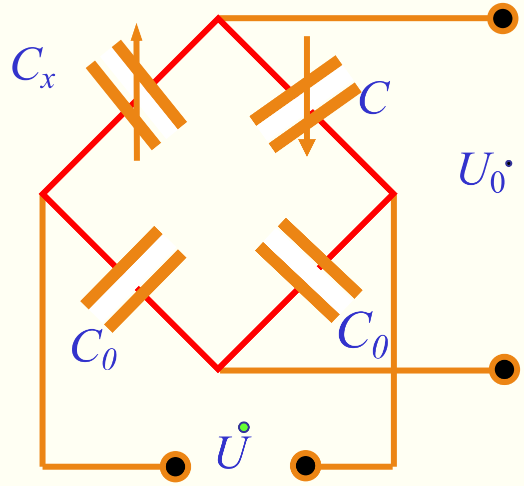


4、测量电路

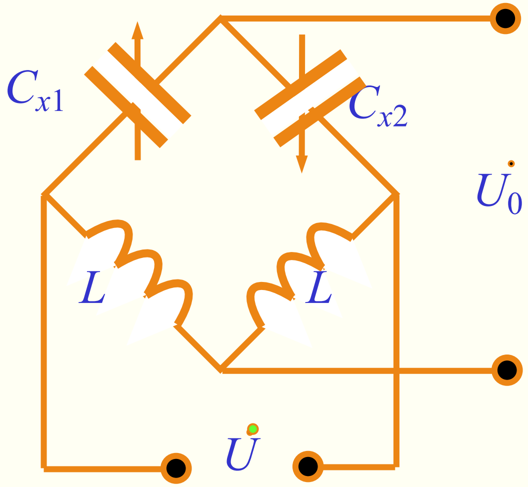
- 传感器电容作为交流电桥的臂(1/2)



电阻-电容



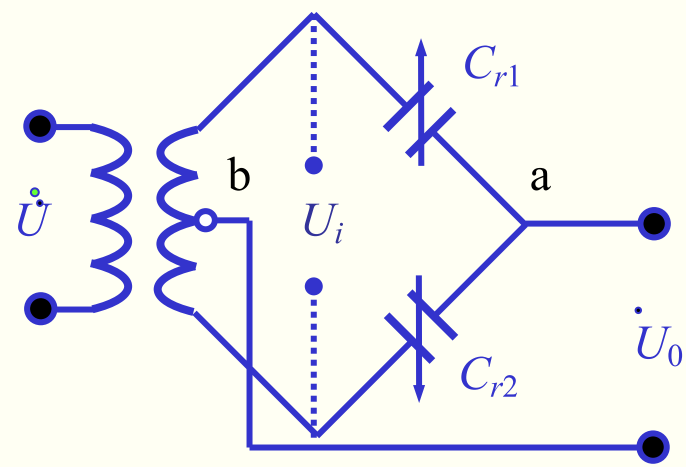
电容-电容



电感-电容

变压器电桥电路

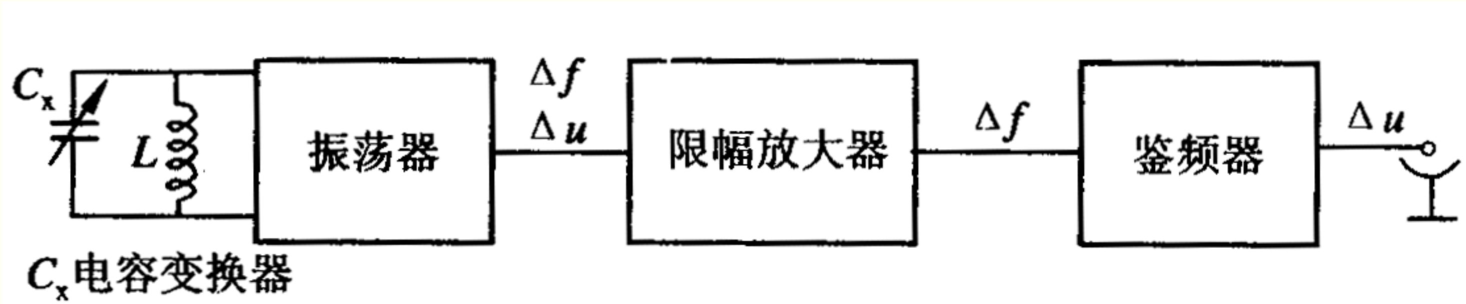
- 两个臂是差动电容传感器
- 两个臂是紧耦合变压器，为电桥提供电源
  - 电桥具有较高的灵敏度和稳定性
  - 寄生电容影响极小
  - 适合于高频电源下工作。
  - 变压器电桥使用元件最少
  - 桥路内阻最小
- 因此目前较多采用。



$$U_0 = U_a - U_b = \frac{U_i}{2}\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$$

$$U_0 = \frac{U_i}{2}\frac{\Delta d}{d}$$

2）调频电路

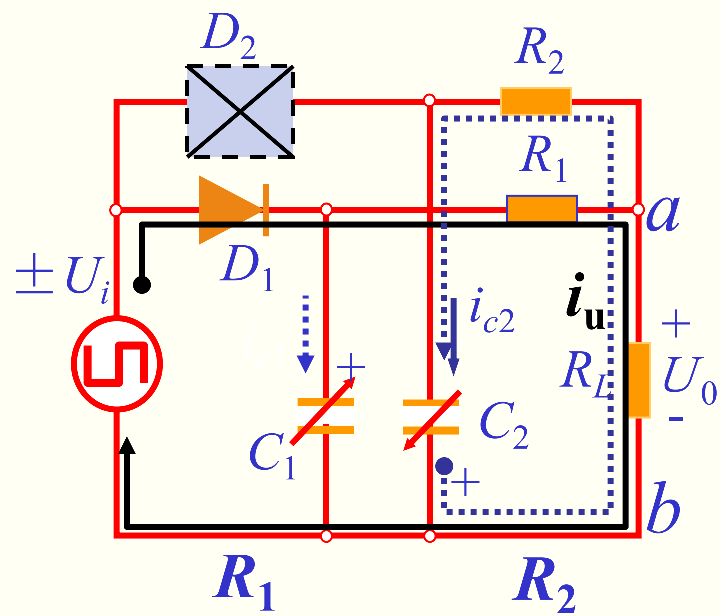


$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$$

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

3）二极管双T型电路

- 电容/电阻及二极管组成的双T网络
- 高频对称方波供电,幅值U_i
- 正半周:C_2已充电至U_i
  - D_1导通，D_2截止
  - C_1短时充电至U_i，随后:
  - U_i以电流i_u经R_1给负载供电
  - C_2以电流 i_{c2}经R_2从负载放电
  - 流过负载R_L的总电流为: i_u-i_{c2}
  - 方向a→ b

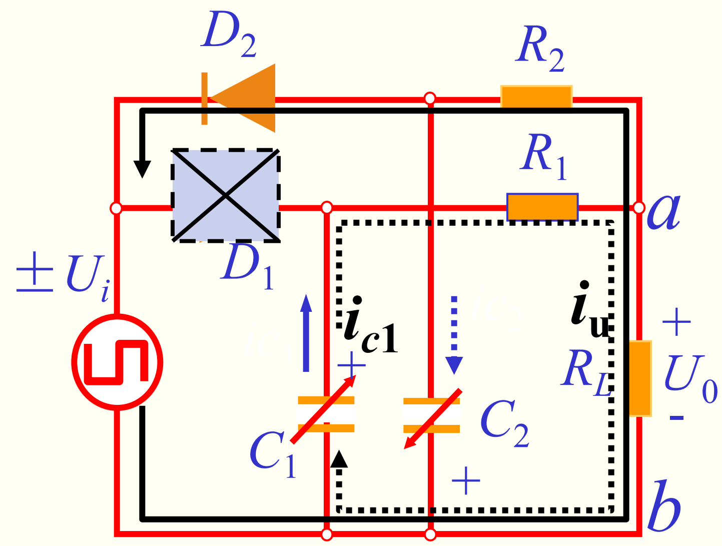


正半周:i_u-i_{c2},方向a→ b

二极管双T型电路

- 负半周: C_1已充电至U_i
  - D_2导通，D_1截止
  - C_2短时充电至U_i,随后:
  - U_i以电流i_u经R_2给负载供电
  - C_1以电流 i_{c1}经R_1从负载放电
  - 流过负载R_L的总电流为: i_u-i_{c1}
  - 方向b→a
- 若R_1=R_2,C_1=C_2,则i_{c1}=i_{c2}

  一个周期内R_L上平均电流



正半周:i_u-i_{c2},方向a→ b

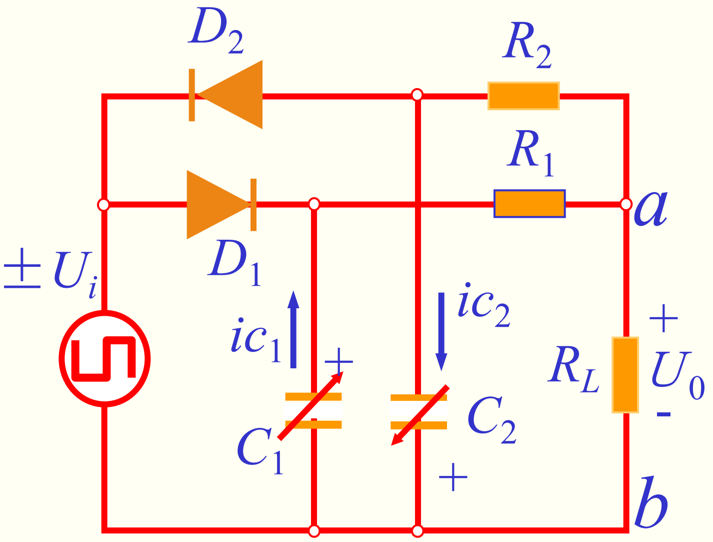
负半周:i_u-i_{c1},方向b→a

$$i_L = (i_u - i_{c2}) - (i_u - i_{c1}) = i_{c1} - i_{c2}$$

$$i_L = i_{c1} - i_{c2} = \begin{cases} 0 & , \quad C_1 = C_2 \\ DC & , \quad C_1 \neq C_2 \end{cases}$$

二极管双T型电路

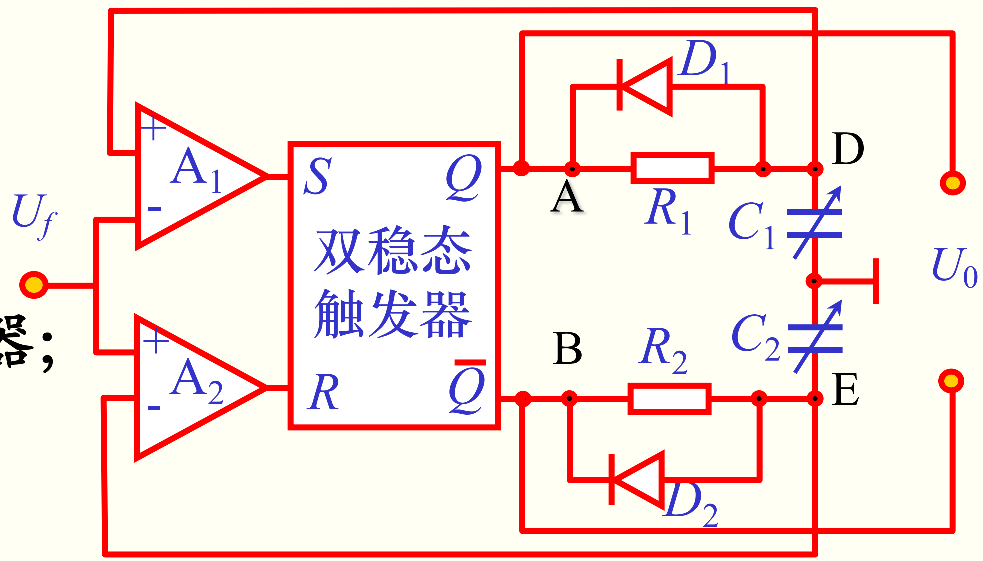
- 特点:
  - 直流输出
    - 电流的大小反映被测量大小
    - 电流的极性反映被测量的极性
  - 线路简单可集成在探头内部，减小分布电容
  - 使用于差动式或线性电容传感器
  - 电源周期、幅值影响灵敏度，须稳频、稳压



$$U_0=(R+R//R_L)i_L=\frac{RR_L(R+2R_L)}{(R+R_L)^2}\frac{U_i}{T}(C_2-C_1)$$

4）脉冲宽度调制电路

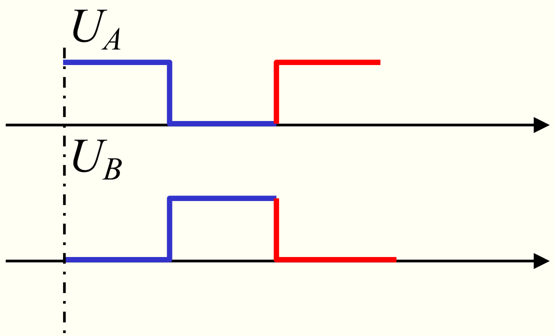
- 电路原理：
  - A_1, A_2：电压比较器；
  - U_f：参考直流电压；
  - C_1, C_2：差动电容传感器；
  - 输出 $U_{AB} = U_A - U_B$



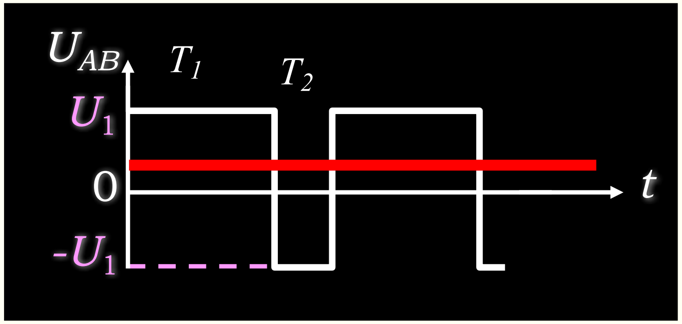
- 传感器电容的充放电改变电路的输出脉冲宽度
- 经低通滤波得到对应被测量的直流信号

脉冲宽度调制电路

- 当$C_1=C_2$时,两脉冲宽度相等
  - 一个周期内$U_{AB}=U_A-U_B$的均值为0;



- 当$C_1 \neq C_2$时,两脉冲宽度不等
  - $U_{AB}=U_A-U_B$反映电容变化量

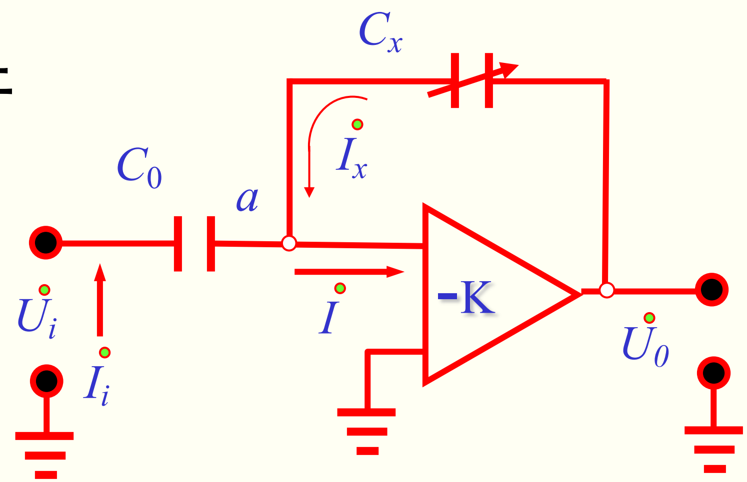


$$\bar{U}_0 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1 \quad = U_1 \frac{\Delta \delta}{\delta}$$

- 直流输出与被测位移成正比

5）运算放大器式电路

- 传感器电容C_x作为反馈元件
- 固定电容作为输入元件



$$U_0 = -\frac{1/j\omega C_x}{1/j\omega C_0}U_i = -\frac{C_0}{C_x}U_i$$

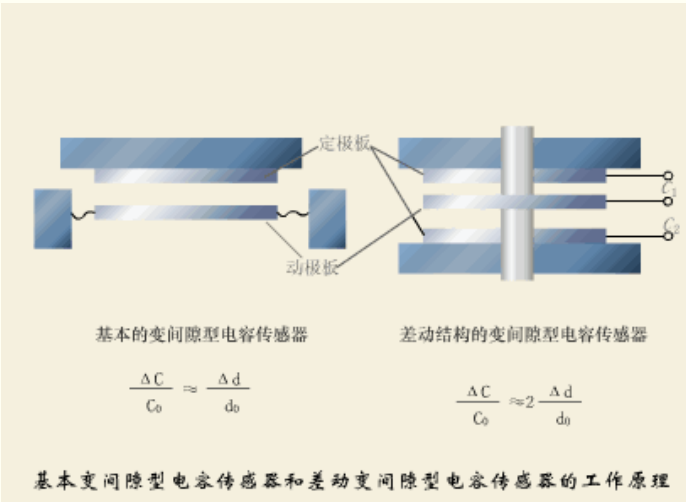
$$U_0 = \frac{C_0 U_i}{\varepsilon A} d$$

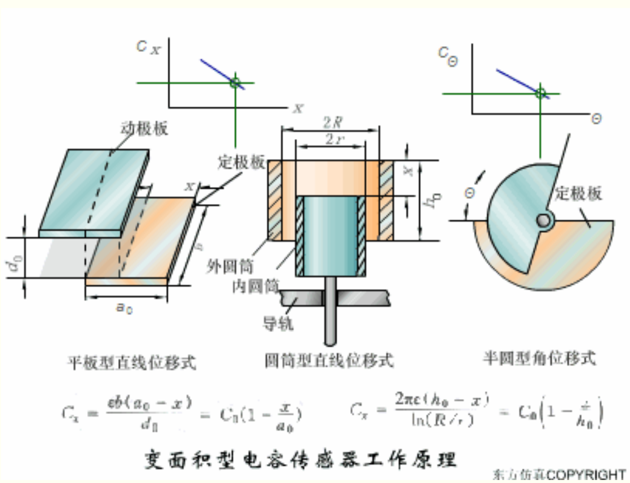
- 输出电压与极板间距d正比
- 输出电压与d的极性相反
  - K→∞、输入阻抗→∞时成立
  - 交流输出，相敏检波

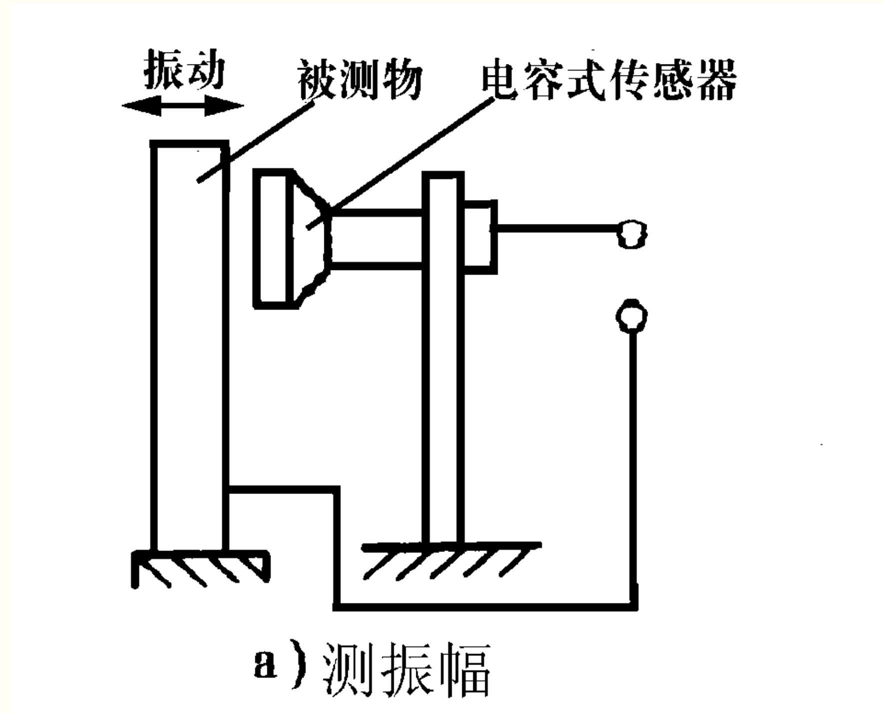
5、应用

- 位移检测
- 角位移检测
- 压力
- 加速度
- 物位
- ……

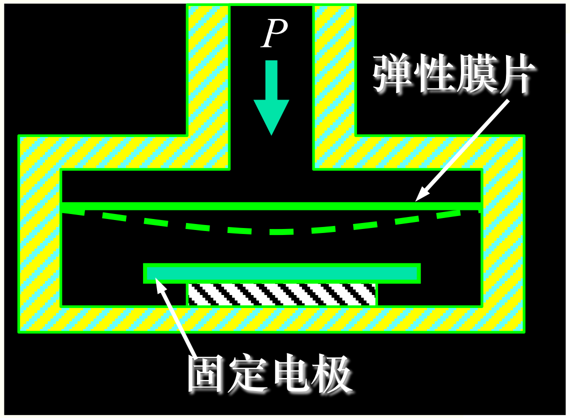
1）位移传感器

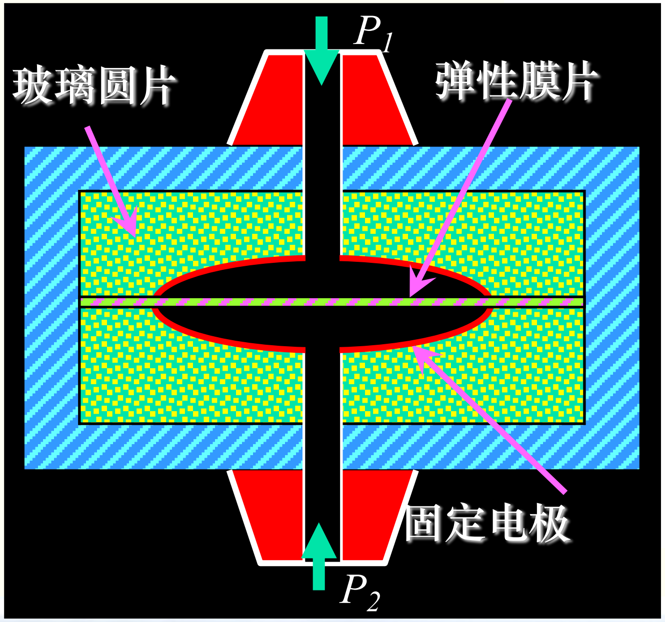

定极板
动极板
C_1
C_2
基本的变间隙型电容传感器
差动结构的变间隙型电容传感器
$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta d}{d_0}$
$\frac{\Delta C}{C_0} \approx 2\frac{\Delta d}{d_0}$
基本变间隙型电容传感器和差动变间隙型电容传感器的工作原理

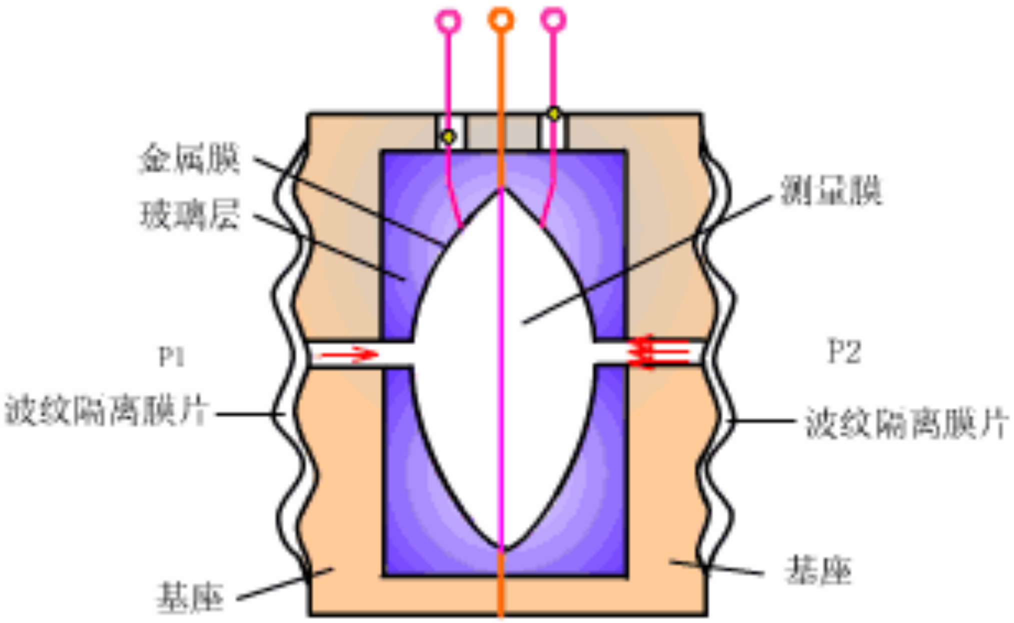

C_x
x
C_Θ
Θ
动极板
定极板
$2R$
$2r$
h_0
d_0
a_0
b
外圆筒
内圆筒
导轨
平板型直线位移式
圆筒型直线位移式
半圆型角位移式
$C_x = \frac{\varepsilon b(a_0 - x)}{d_0} = C_0(1 - \frac{x}{a_0})$
$C_x = \frac{2\pi\varepsilon(h_0 - x)}{\ln(R/r)} = C_0(1 - \frac{x}{h_0})$
变面积型电容传感器工作原理
东方仿真COPYRIGHT


振动
被测物
电容式传感器
a）测振幅

2）压力传感器

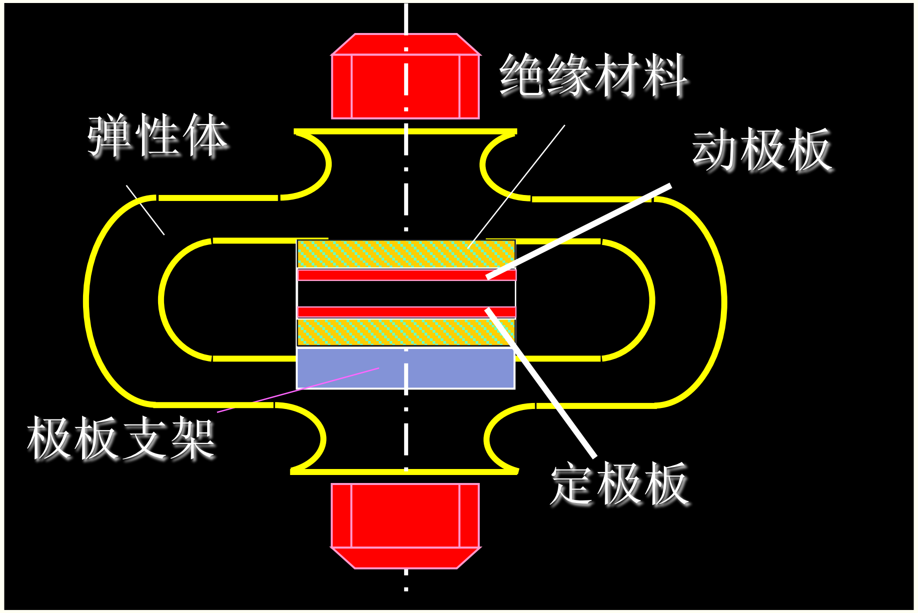


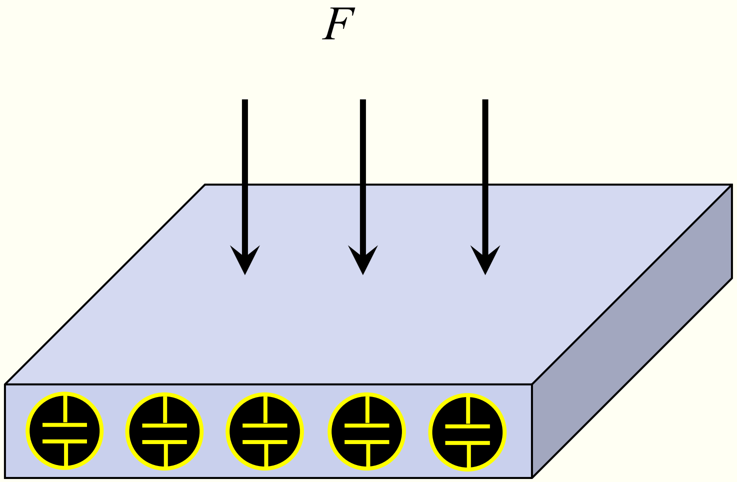




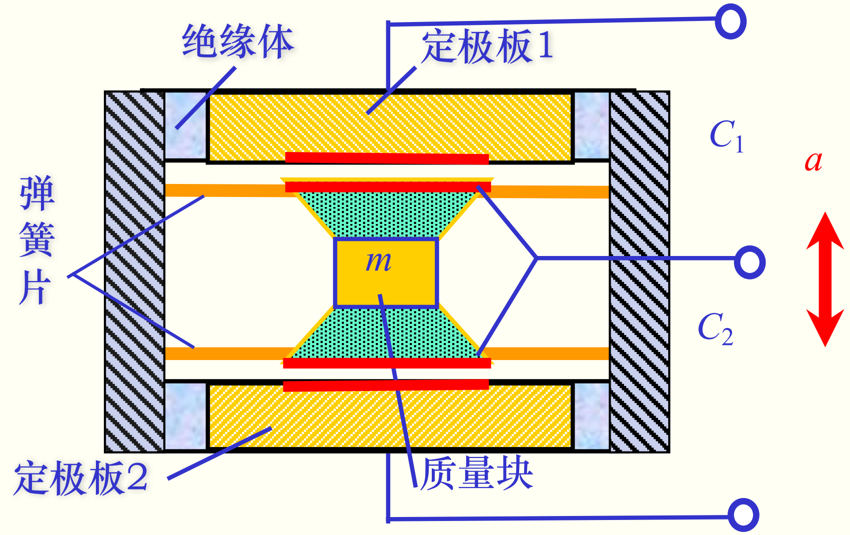
电容式压力传感器

重量传感器

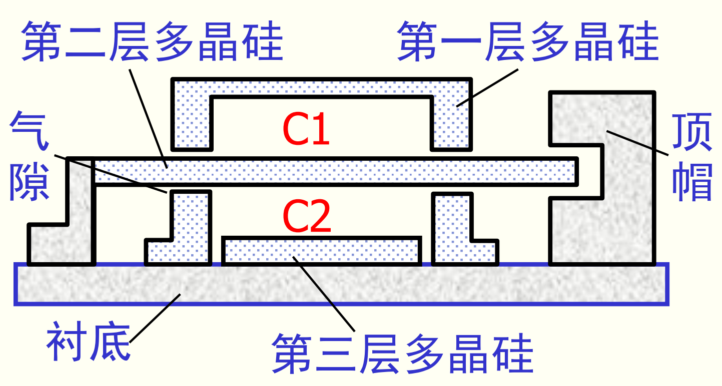




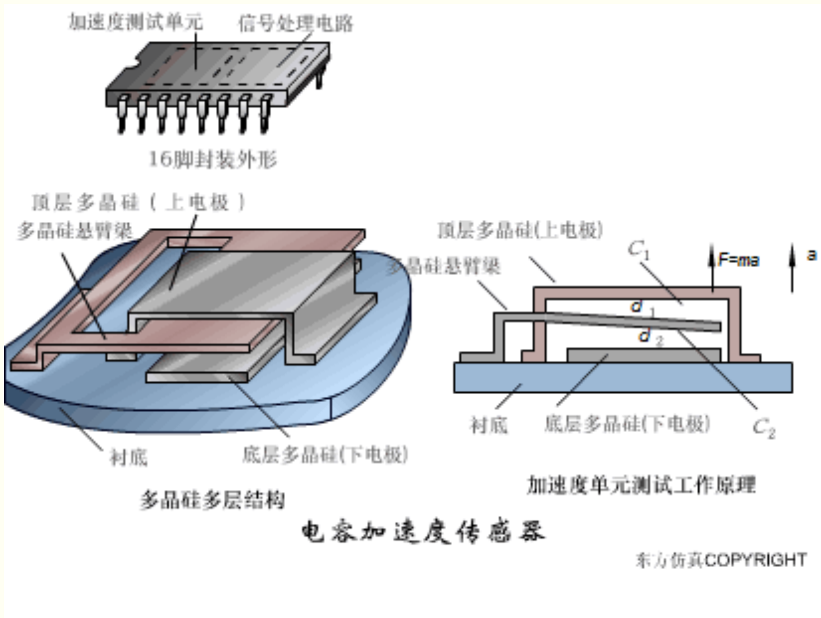
3）加速度传感器



绝缘体
定极板1
弹簧片
m
C_1
C_2
a
定极板2
质量块



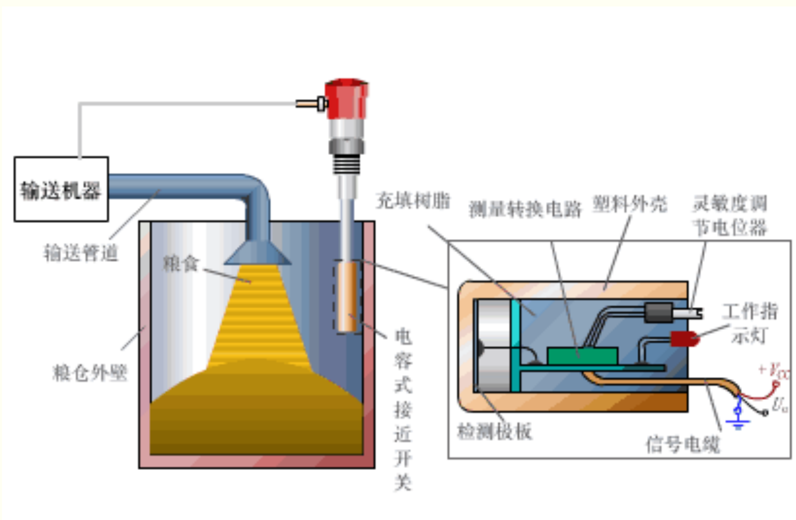
第二层多晶硅
第一层多晶硅
气隙
C1
C2
顶帽
衬底
第三层多晶硅



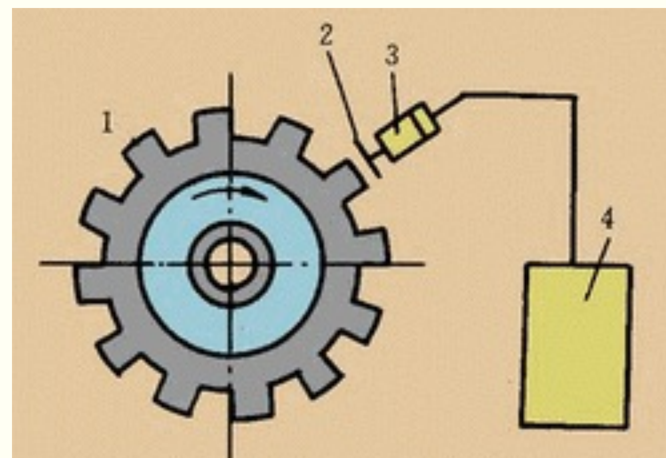
加速度测试单元
信号处理电路
16脚封装外形
顶层多晶硅（上电极）
多晶硅悬臂梁
衬底
底层多晶硅(下电极)
多晶硅多层结构
顶层多晶硅(上电极)
多晶硅悬臂梁
C_1
F=ma
a
d_1
d_2
衬底
底层多晶硅(下电极)
C_2
加速度单元测试工作原理
电容加速度传感器
东方仿真COPYRIGHT

4）接近式传感器

测量头构成电容器的一个极板，另一个极板是物体本身，当物体移向接近开关时，物体和接近开关的介电常数发生变化，使得和测量头相连的电路状态也随之发生变化. 由此便可控制开关的接通和关断;接近开关的检测物体，并不限于金属导体，也可以是绝缘的液体或粉状物体。



利用接近开关进行物体位检测的原理

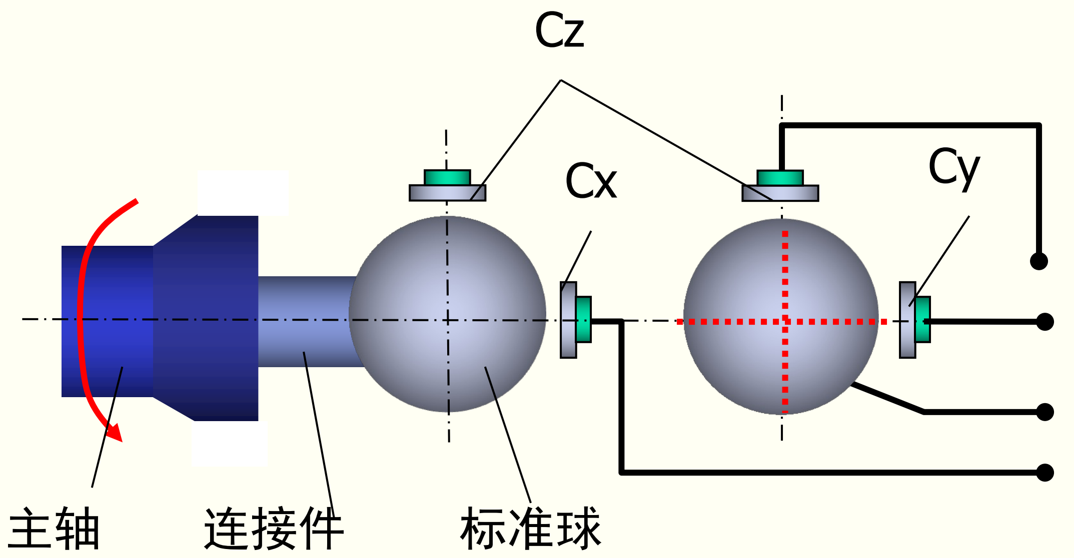


电容式转速传感器的结构原理

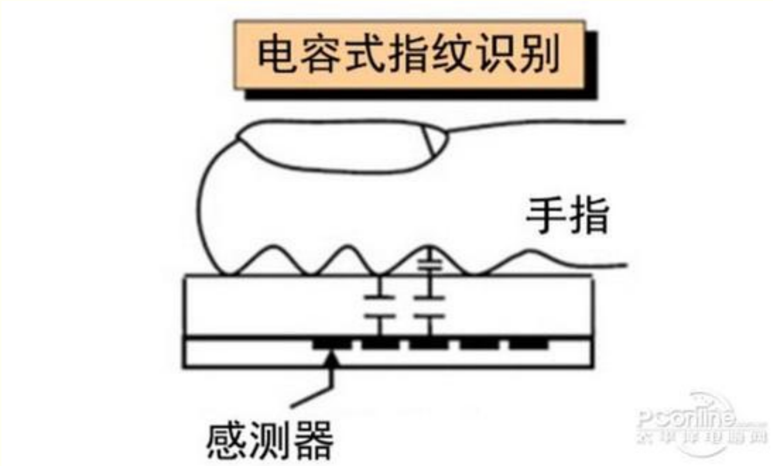
1-齿轮 2-定级

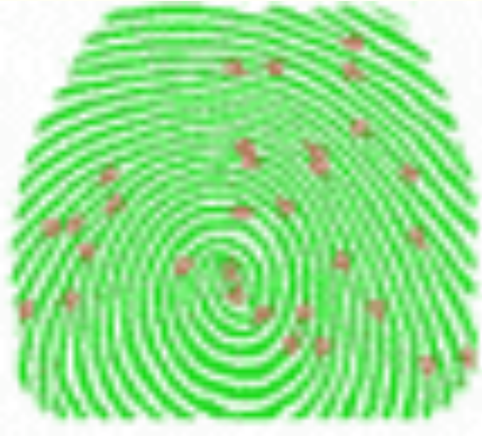
3-电容式传感器 4-频率计

主轴回转精度传感器



指纹传感器、电容式键盘





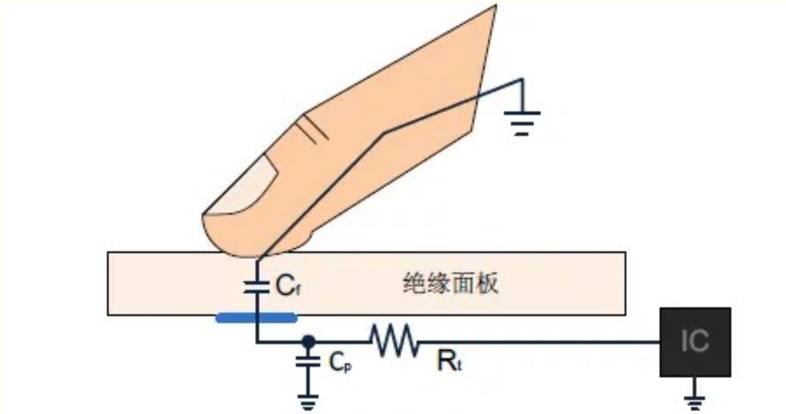
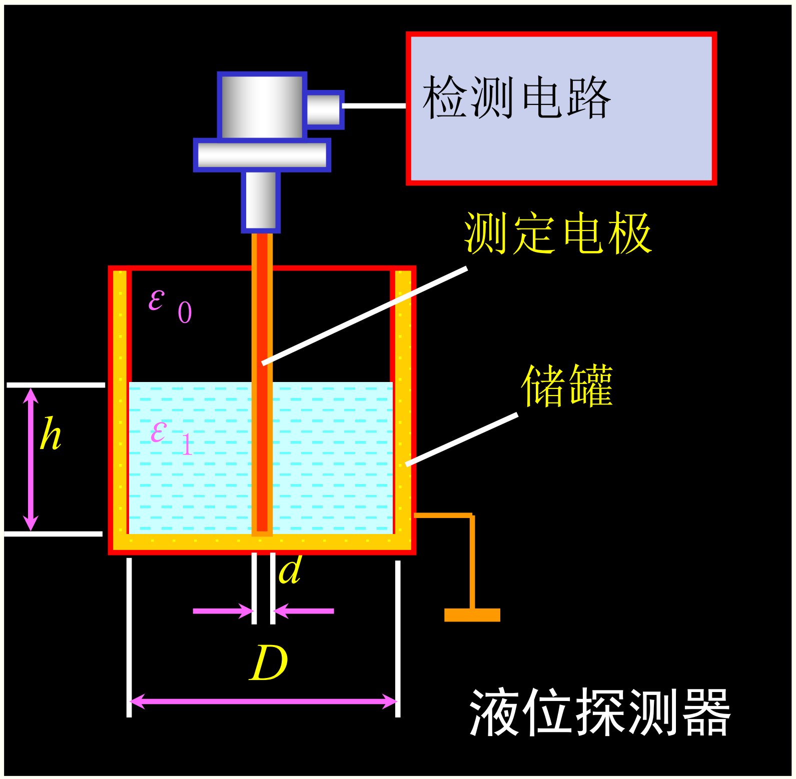
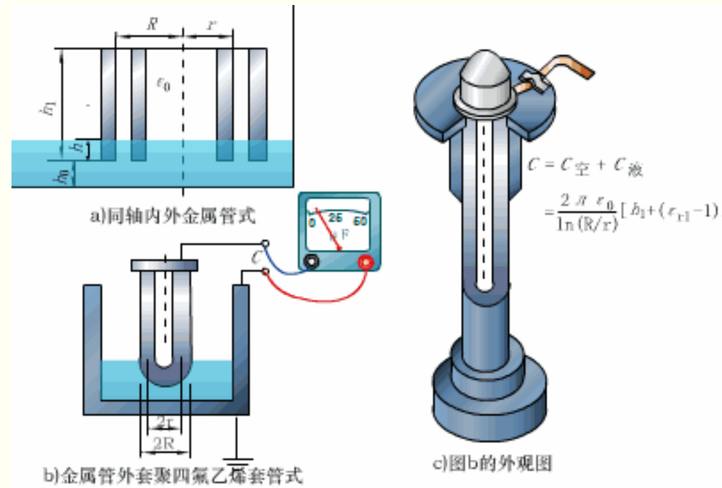


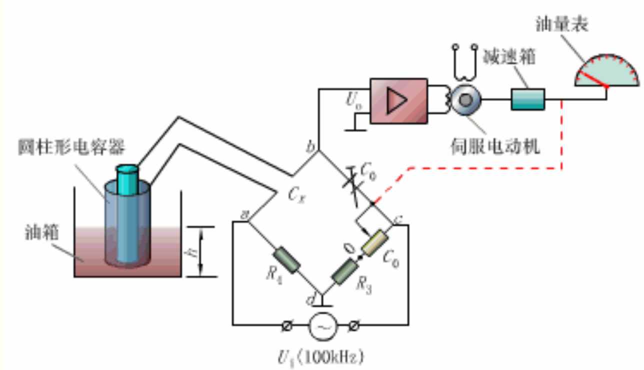
图 3 电容式触摸按键原理

5）液位传感器



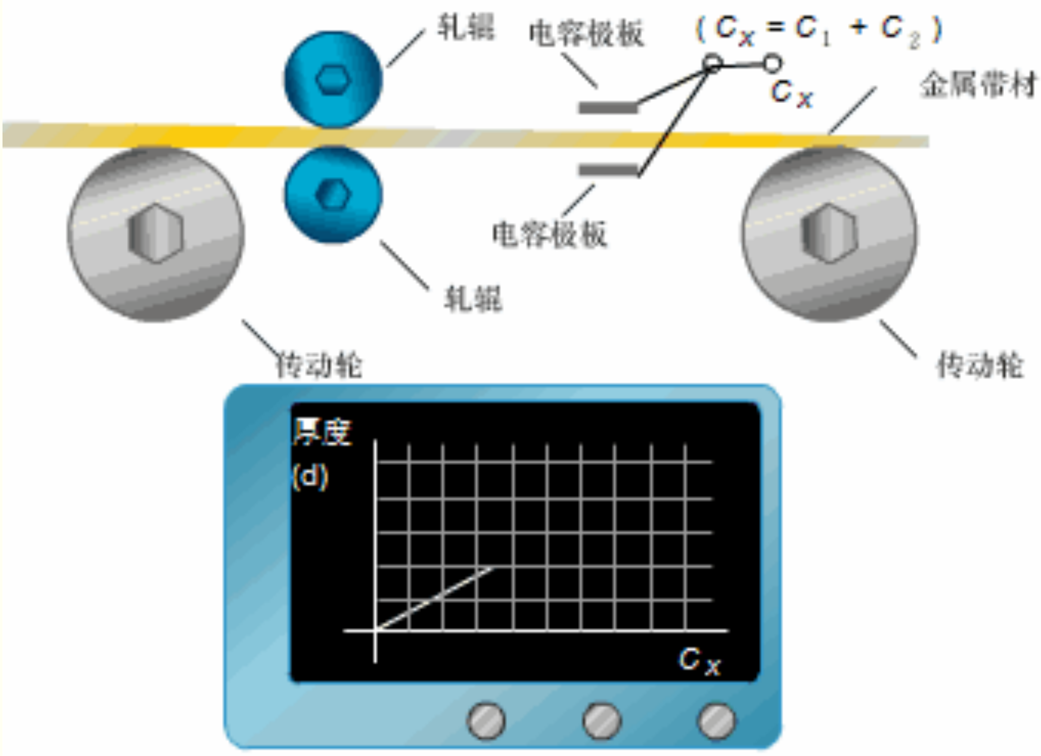


电容液位计原理图



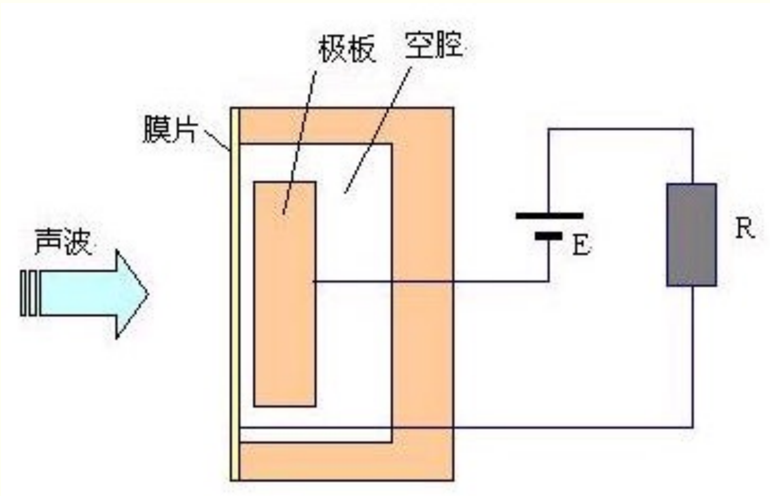
电容式油量表原理

厚度传感器



电容测厚仪

电容式传声器



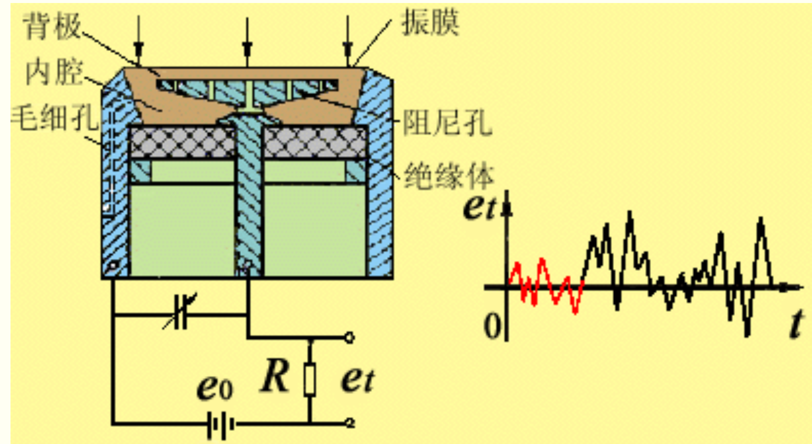
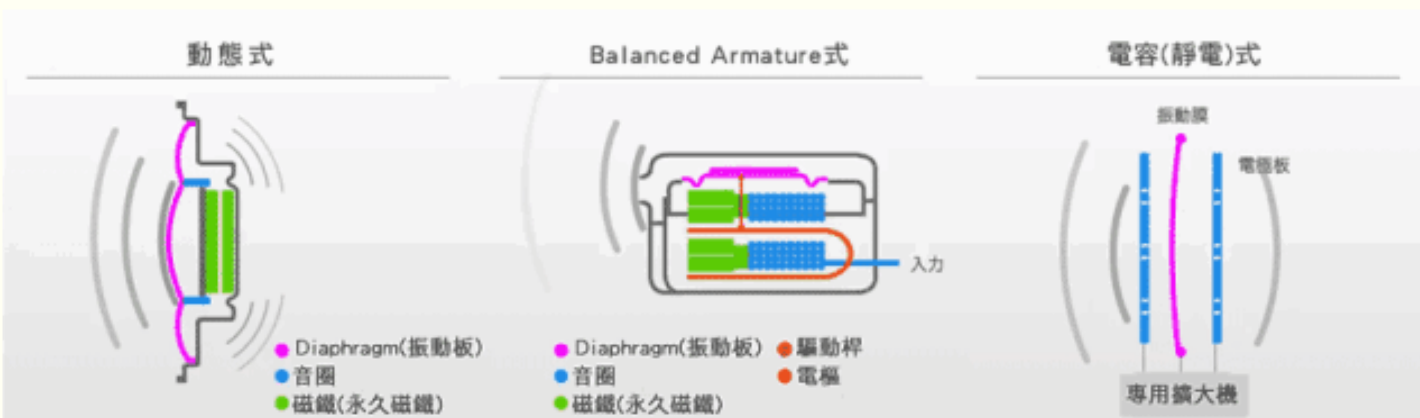
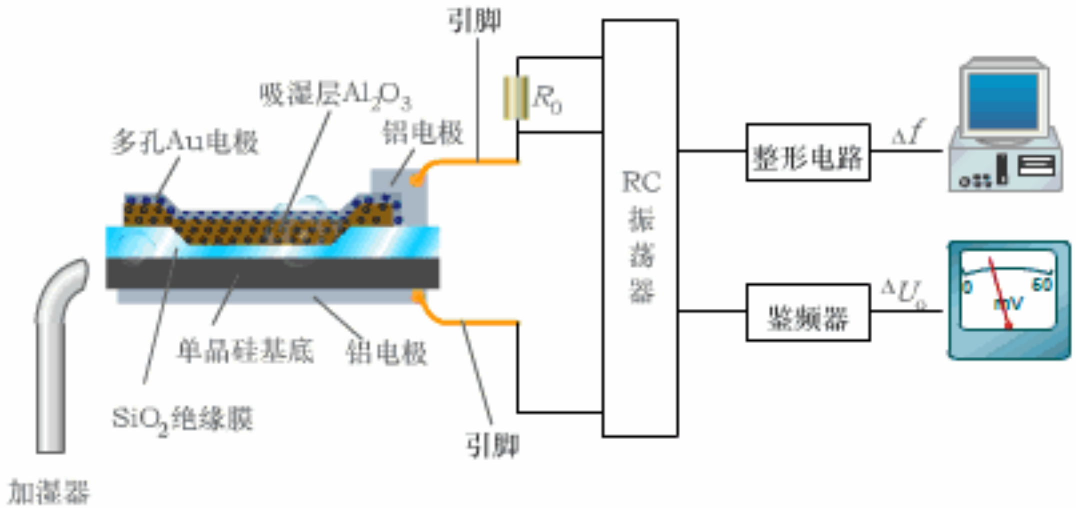


图8.5-5b 电容式传声器的电路原理



湿度传感器



多孔性氧化铝湿敏电容原理