



## 第六章 电容式传感器

---

- ◆ 工作原理和分类 \*\*\*
- ◆ 测量电路
- ◆ 应用实例

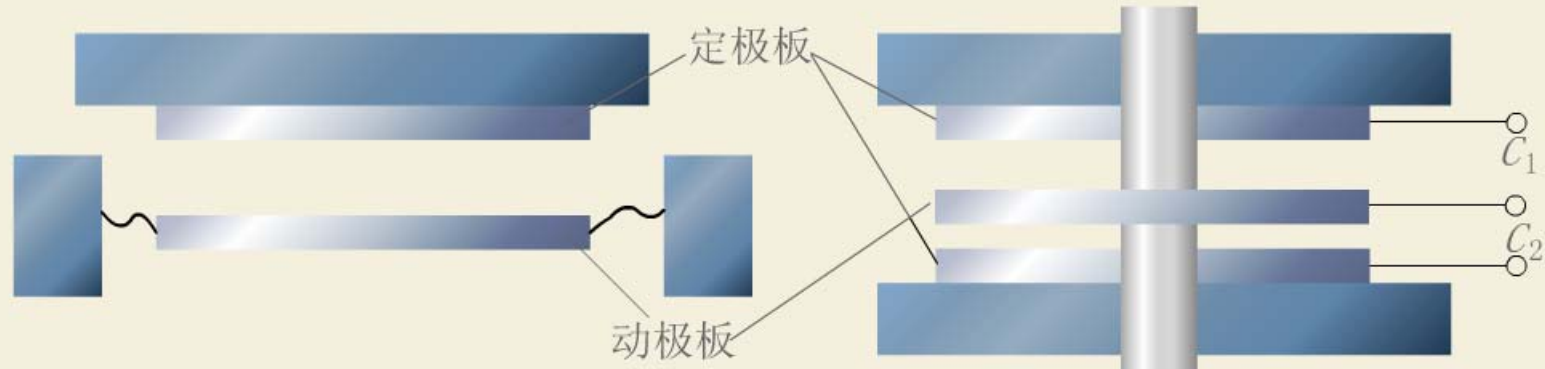


# 电容式传感器的工作原理和结构

- 电容式传感器——将被测非电量的变化转换为电容量变化。
- 平板电容器的电容通式：???

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} = \frac{\epsilon A}{d} \quad \epsilon_0 \text{无量纲}$$

- 定性工作原理：
  - 保持其他参数不变，仅改变一个参数，
  - 把被测量的变化转化为该参数的变化
  - 该参数的变化转化为电容量的变化
- 根据被测参数的变化分：
  - 变极距型电容传感器( $d$ )
  - 变面积型电容传感器( $A$ )
  - 变介质型电容传感器( $\epsilon$ )



基本的变间隙型电容传感器

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

差动结构的变间隙型电容传感器

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

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



## 变极距型电容传感器-单一型

$$C_0 = \frac{\varepsilon A}{d_0} \quad (\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r)$$

若 $d$ 从 $d_0 \rightarrow d_0 - \Delta d$ , 电容量 $C_0 \rightarrow C_0 + \Delta C$ , 则有

$$\Delta C = \frac{\varepsilon A}{d_0 - \Delta d} - \frac{\varepsilon A}{d_0} = \frac{\varepsilon A}{d_0} \left( \frac{1}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}} - 1 \right) \implies \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\frac{\Delta d}{d_0}}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}} \approx \frac{\Delta d}{d_0}$$

当 $\frac{\Delta d}{d_0} \ll 1$ 时, 变极距式电容传感器有近似线性关系, 此时灵敏度

灵敏度定义:  $K = \frac{\Delta C / C}{\Delta d} = \frac{1}{d_0}$

\*\*\* 结论: 为了获得高灵敏度, 一般 $d_0$ 较小, 但 $d_0$ 过小易引起电容器击穿或短路

一般变极板间距离电容式传感器的起始电容在 20~100pF 之间, 极板间距离在 25~200 $\mu\text{m}$  的范围内, 最大位移应小于间距的 1/10, 故在微位移测量中应用最广。

# 变极距型电容器式传感器的灵敏度及非线性

## ■ 非线性

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \left[ \frac{1}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}} \right] \xrightarrow{???} \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \left[ 1 + \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right) + \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right] \approx \frac{\Delta d}{d_0}$$

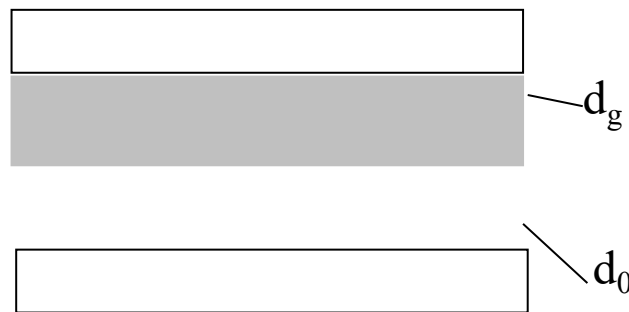
非线性误差: 
$$\gamma = \frac{\left| \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right|}{\left| \frac{\Delta d}{d_0} \right|} \approx \frac{\left| \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 \right|}{\left| \frac{\Delta d}{d_0} \right|} \times 100\% = \left| \frac{\Delta d}{d_0} \right| \times 100\%$$

\*\*\* 结论:

1. 为了减小非线性误差, 获得近似线性输出,  $\left| \frac{\Delta d}{d_0} \right|$  尽可能小, 则初始  $d_0$  极距尽可能大;
2. 初始  $d_0$  极距增大, 则灵敏度降低

为了获得高灵敏度, 降低非线性误差, 可设计双介电层型、差动型变极距电容器式传感器

## 变极距型电容传感器-双介电层型



$$C = \frac{A}{\frac{d_g}{\epsilon_0 \epsilon_g} + \frac{d_0}{\epsilon_0}} \quad ? ? ?$$

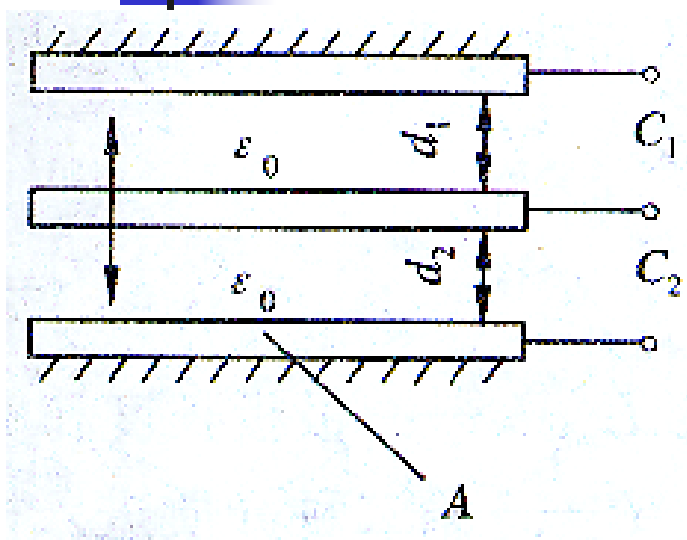
对于云母,  $\epsilon_g = 6 \sim 8.5$

图5-4 放置云母片的电容器

### \*\*\*特点:

1. 击穿电压由3kV增加到不小于1000kV, 平板间初始极距  $d_0$  可大大减小, 传感器灵敏度增大;
2.  $\frac{d_g}{\epsilon_0 \epsilon_g}$  为恒定值, 传感器线性误差极大减小? ? ?

# 变极距型电容传感器-差动型



动极板上移:

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

$$C_2 = C_0 \frac{1}{1 + \Delta d / d_0} = C_0 [1 - \frac{\Delta d}{d_0} + (\frac{\Delta d}{d_0})^2 - (\frac{\Delta d}{d_0})^3 + \dots]$$

$$\Delta C = C_1 - C_2 = C_0 [2 \frac{\Delta d}{d_0} + 2 (\frac{\Delta d}{d_0})^3 + 2 (\frac{\Delta d}{d_0})^5 + \dots]$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} = 2 \frac{\Delta d}{d_0} + 2 (\frac{\Delta d}{d_0})^3 + 2 (\frac{\Delta d}{d_0})^5 + \dots \approx 2 \frac{\Delta d}{d_0}$$

目的:

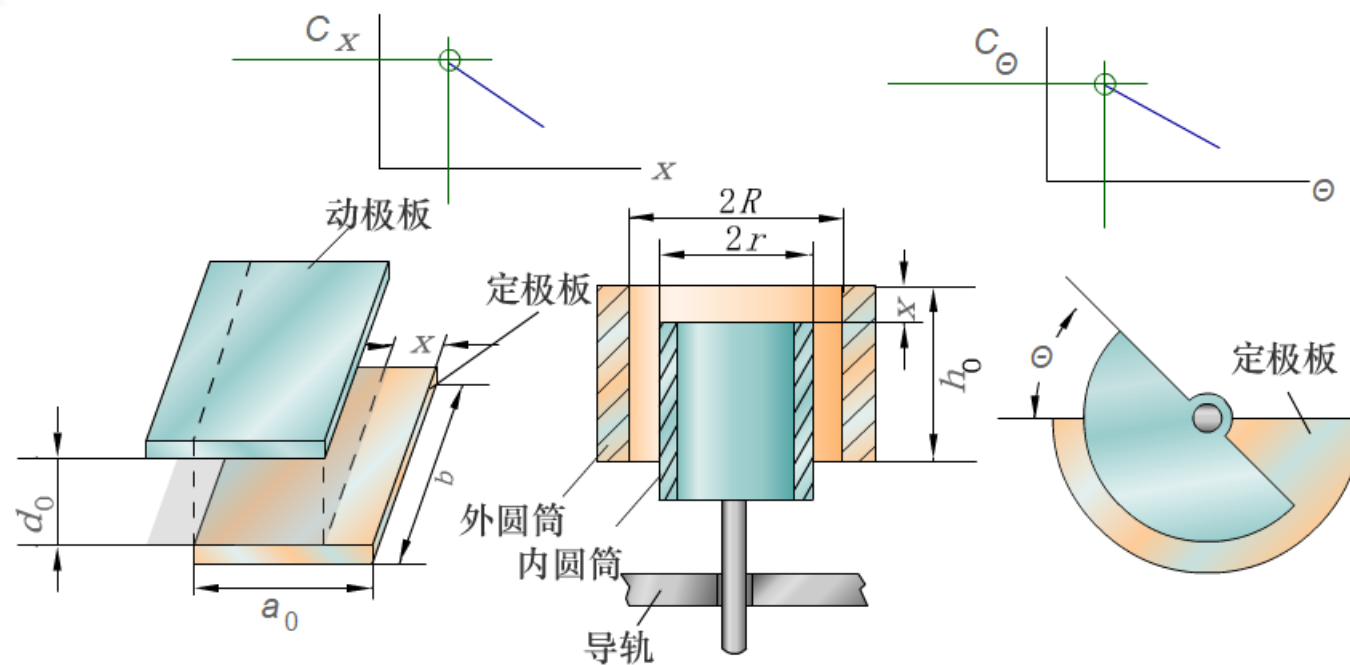
- 1) 提高灵敏度
- 2) 减小非线性误差
- 3) 克服某些外界因素  
(电压、温度) 对测量的影响

灵敏度:  $K = \frac{\Delta C / C}{\Delta d} \approx \frac{2}{d_0}$

非线性误差:  $\delta = \frac{2 |(\Delta d / d_0)^3|}{|2(\Delta d / d_0)|} \times 100\% = (\frac{\Delta d}{d_0})^2 \times 100\%$

定义?

# 变面积型电容传感器



平板型直线位移式

圆筒型直线位移式

半圆型角位移式

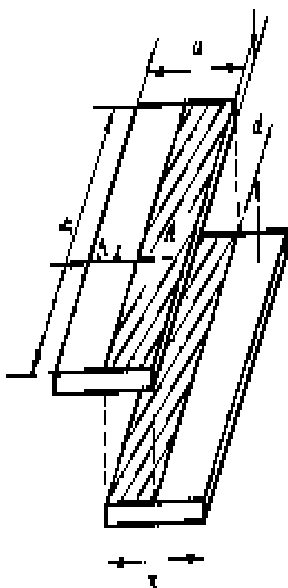
$$C_x = \frac{\epsilon b (a_0 - x)}{d_0} = C_0 \left(1 - \frac{x}{a_0}\right)$$

$$C_x = \frac{2\pi\epsilon (h_0 - x)}{\ln(R/r)} = C_0 \left(1 - \frac{x}{h_0}\right)$$

变面积型电容传感器工作原理



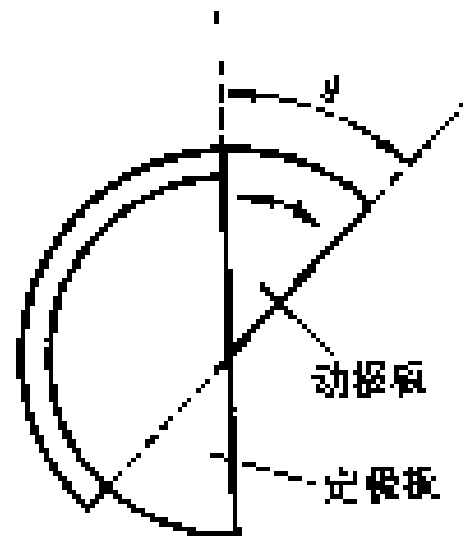
# 变面积型电容传感器



被测量?

图5-5 变面积型电容传感器原理图

$$\frac{\Delta c}{c_0} = \frac{\Delta x}{a} \quad ???$$



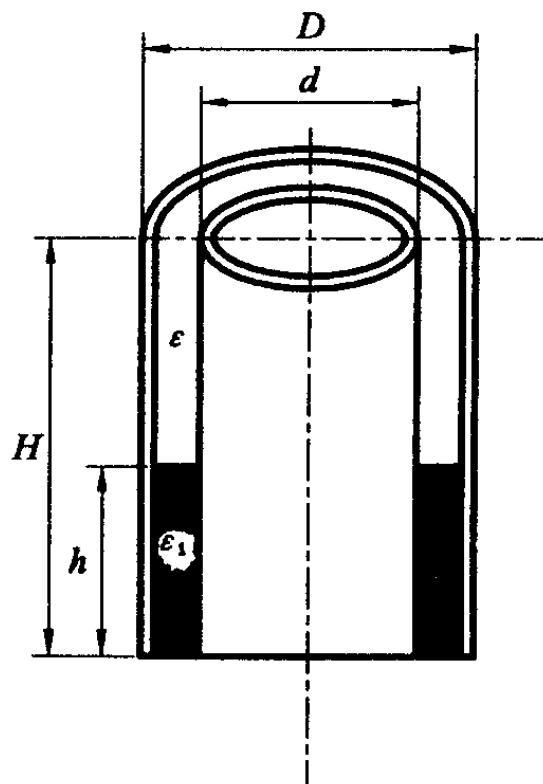
被测量?

图5-6 电容式角位移传感器原理图

$$\frac{\Delta c}{c_0} = \frac{\theta}{\pi} \quad ???$$

# 变介质型电容式传感器—柱式

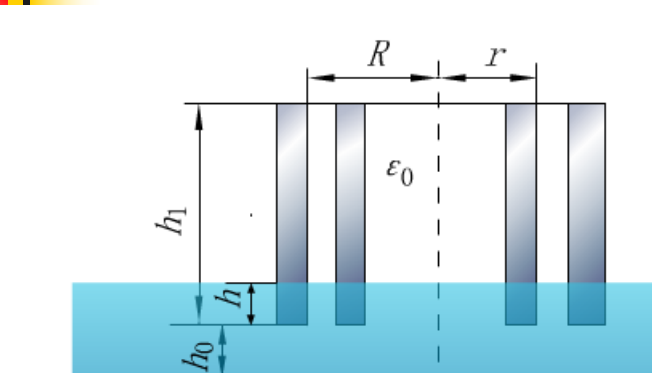
## ■ 柱式



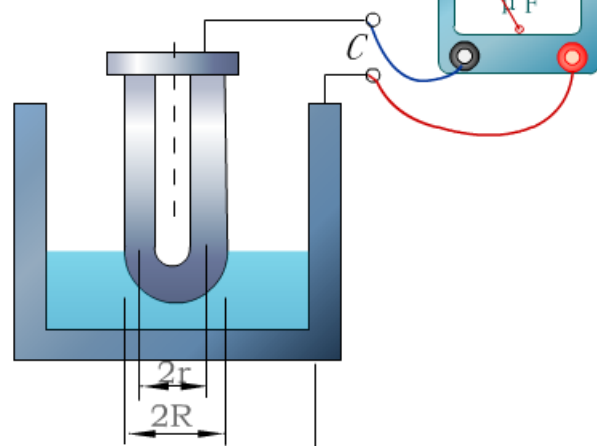
$$\begin{aligned} C &= \frac{2\pi\epsilon_1 h}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon_0 (H - h)}{\ln \frac{D}{d}} \\ &= \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi h(\epsilon_1 - \epsilon_0)}{\ln \frac{D}{d}} \\ &= C_0 + \frac{2\pi h(\epsilon_1 - \epsilon_0)}{\ln \frac{D}{d}} \end{aligned}$$

电容的增量正比于被测液位高度，  
可测量一种流体的液位高度

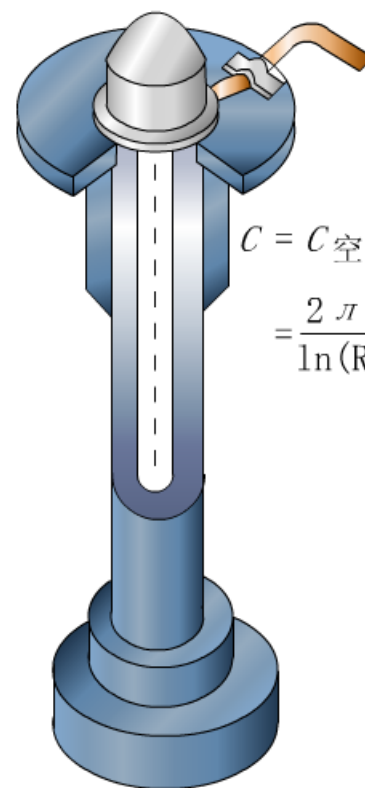
图 5 - 7 电容式液位变换器结构原理图



a) 同轴内外金属管式



b) 金属管外套聚四氟乙烯套管式



c) 图b的外观图

$$C = C_{\text{空}} + C_{\text{液}}$$

$$= \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(R/r)} [h_1 + (\epsilon_{r1} - 1)h]$$

## 电容液位计原理图

## 变介质型电容式传感器—平板式

### ■ 平板式

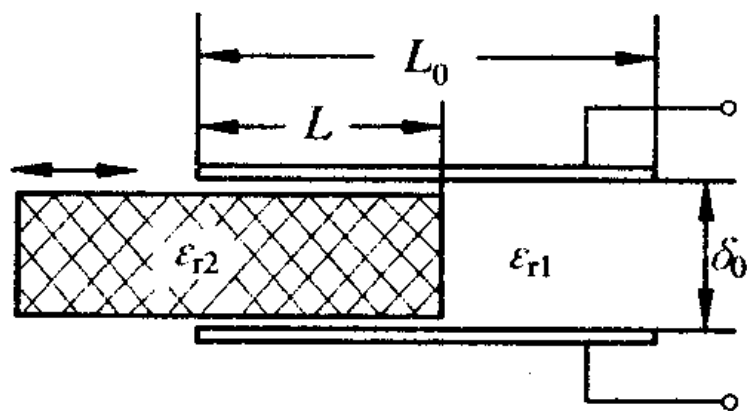


图 5 -8 变介质型电容式传感器

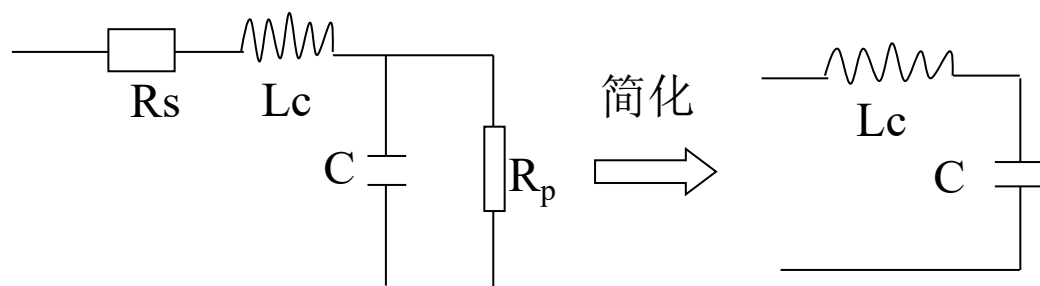
$$C = C_1 + C_2 = \epsilon_0 b_0 \frac{\epsilon_{r1} (L_0 - L) + \epsilon_{r2} L}{d_0}$$

$$= C_0 + \frac{\epsilon_0 (\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1}) L b_0}{d_0}$$

电容变化与电介质的移动量 $L$ 成线性关系

可用来测量纸张、绝缘薄膜等的厚度，也可用来测量粮食、纺织器、木材或煤等非导电固体介质的湿度。

## 电容传感器的等效电路



计算有效电容 $C_e$ :

$$\frac{1}{j\omega C_e} = \frac{1}{j\omega C} + j\omega L_c$$

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

两点注意:

工作频率等于或接近谐振频率时，谐振频率破坏了电容的正常作用。因此，工作频率应该选择低于谐振频率。

电容式传感器的有效电容除与位移有关外，还与角频率有关。因此，在实际应用时必须与标定的条件（ $\omega$ ）相同。



## 电容式传感器的测量电路

---

- 电容传感器的特点：电容量小，变化更小（**PF级**）。理论上，交流电桥可作为电容传感器的测量电路，但由于电容及变化太小，不易实现。
  - 调频电路
  - 运算放大器式电路
  - 脉冲宽度调制电路（自学）

# 调频电路

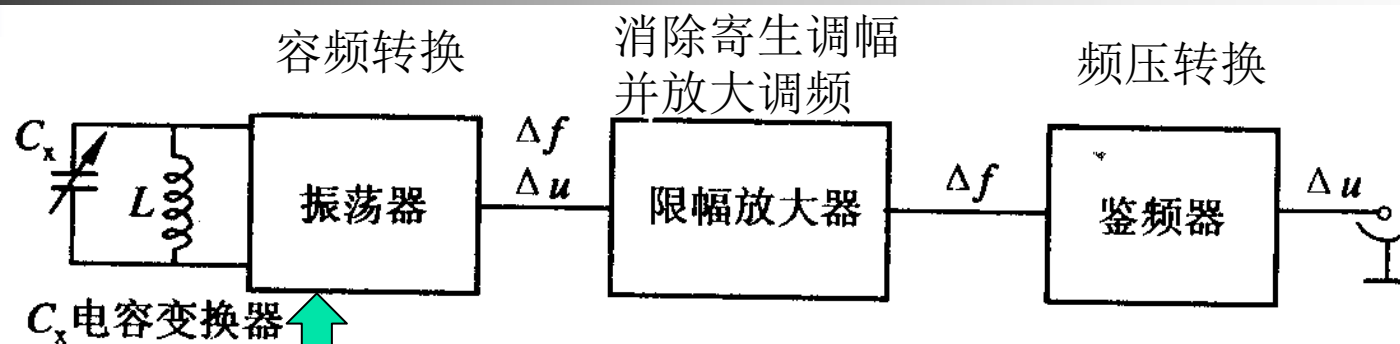


图 5 - 9 调频式测量电路原理框图

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

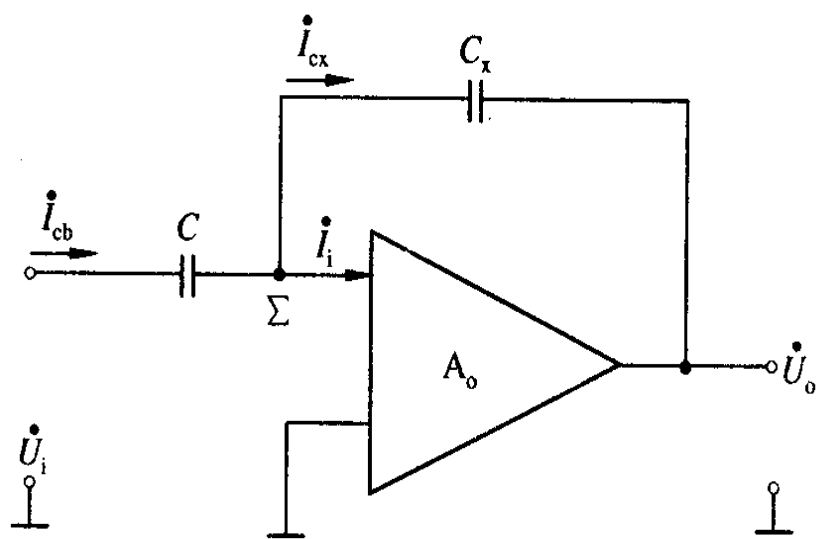
特点:

- 转换电路生成频率信号，可远距离传输不受干扰。
- 具有较高的灵敏度，可以测量高至  $0.01 \mu m$  级位移变化量。
- 但非线性较差，可通过鉴频器（频压转换）转化为电压信号后，进行补偿。

# 运算放大器式电路

运算放大器要求：输入阻抗高（避免泄漏）、放大倍数大（接近理想放大器）

$$\dot{U}_o = -\frac{C}{C_x} \dot{U}_i$$



$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_o &= -\frac{C}{C_x} \cdot \dot{U}_i \\ C_x &= \frac{\epsilon A}{d} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \dot{U}_o = -\frac{C \dot{U}_i}{\epsilon A} \cdot d$$

**\*\*** 电容的微小变化经直接放大后，转变成显著的电压变化

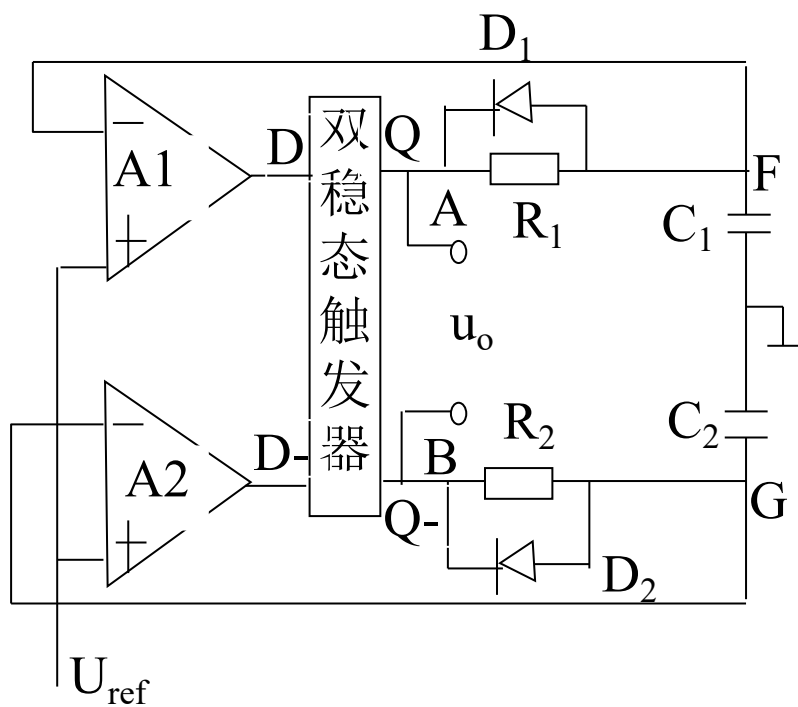
特点：

- 解决了单个变极板间距离式电容传感器的非线性问题
- 要求 $Z_i$ 及放大倍数足够大
- 为保证仪器精度，还要求电源电压的幅值和固定电容稳定

图 5 - 12 运算放大器式电路原理图



# 脉冲宽度调制电路



- $C_1$  充电,  $V_F \uparrow$ 。当  $V_F > V_{ref}$  时,  $D=0 \Rightarrow Q=0$ , 信号反转,  $\bar{Q}=1$ 。  $C_1$  经  $D_1$  放电。
- $C_2$  充电,  $V_G \uparrow$ 。当  $V_G > V_{ref}$  时,  $\bar{D}=0 \Rightarrow \bar{Q}=0$ ,  $Q=1$ , 再次反转。  $C_2$  经  $D_2$  放电。

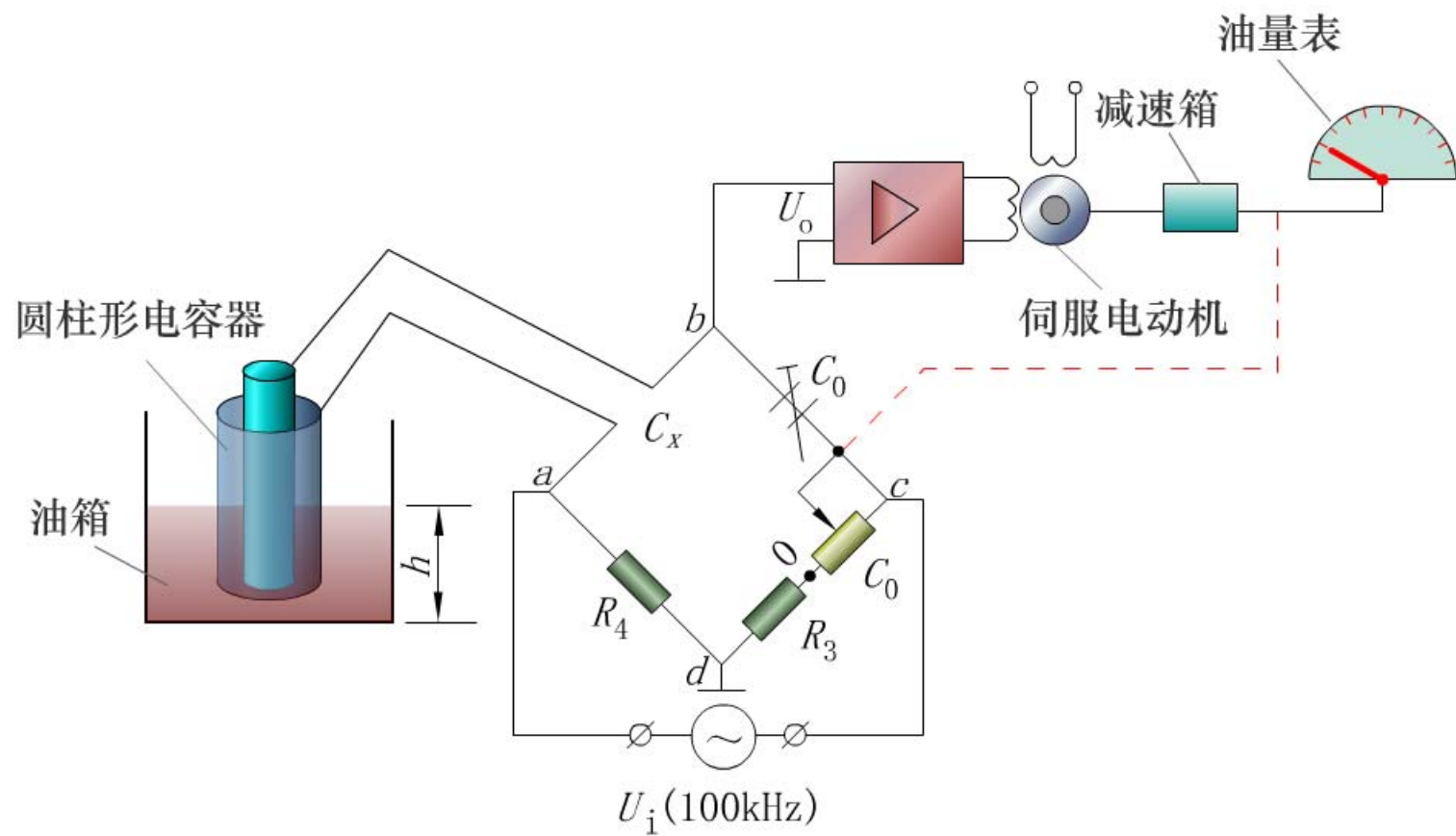
$$u_{AB} = u_A - u_B = \frac{U_1(T_1 - T_2)}{T_1 + T_2}$$

- 设双稳态触发器输出高电平  $U_1$ , 低电平 0

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= R_1 C_1 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_{ref}} \\ T_2 &= R_2 C_2 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_{ref}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} u_{AB} &= \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot U_1 \\ &= \frac{d_2 - d_1}{d_1 + d_2} U_1 \end{aligned}$$

当  $d_1 = d_0 - \Delta d$ ,  $d_2 = d_0 + \Delta d$  时, 有

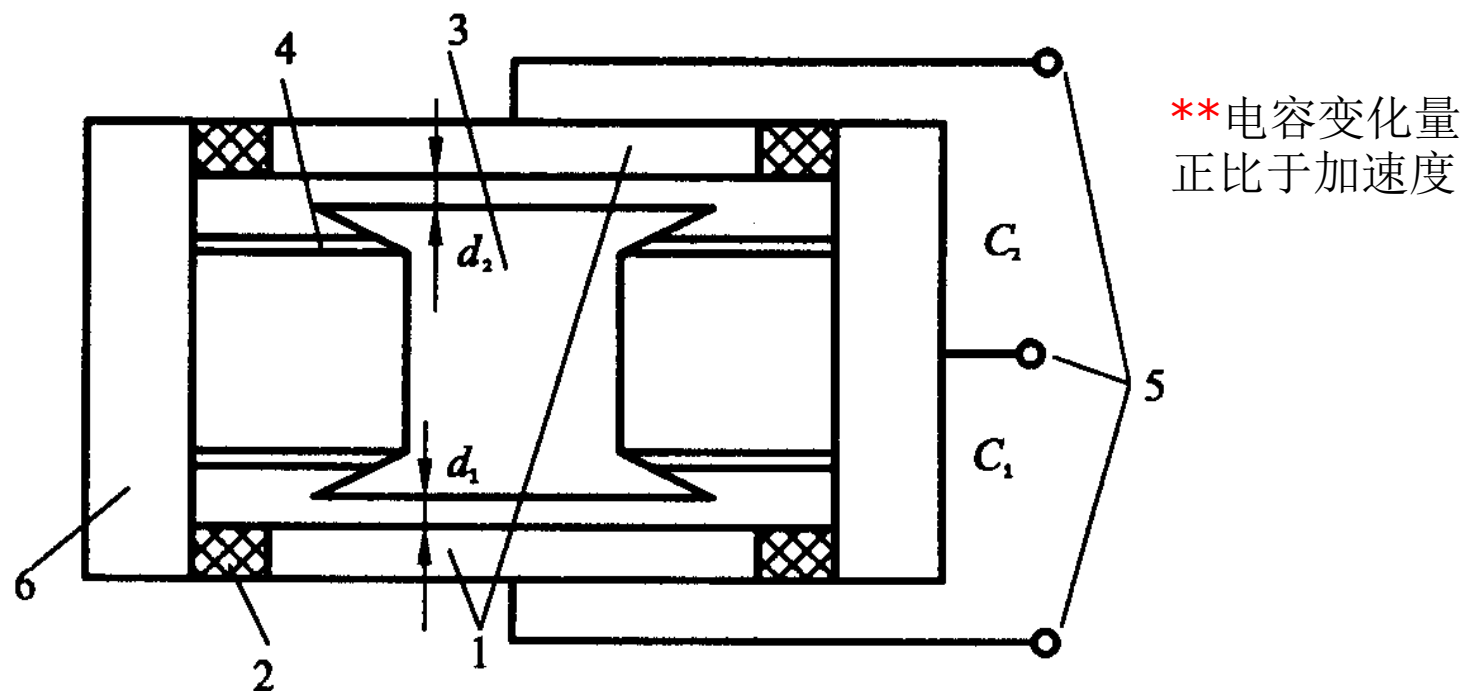
$$u_{AB} = \frac{\Delta d}{d_0} \cdot U_1$$



电容式油量表原理

# 电容式传感器的应用 (1)

## ■ 加速度传感器



—固定电极；2—绝缘垫；3—质量块；4—弹簧；5—输出端；6—壳体

图 5 - 18 差动式电容加速度传感器结构图

## 电容式传感器的应用 (2)

### ■ 电容式压力传感器

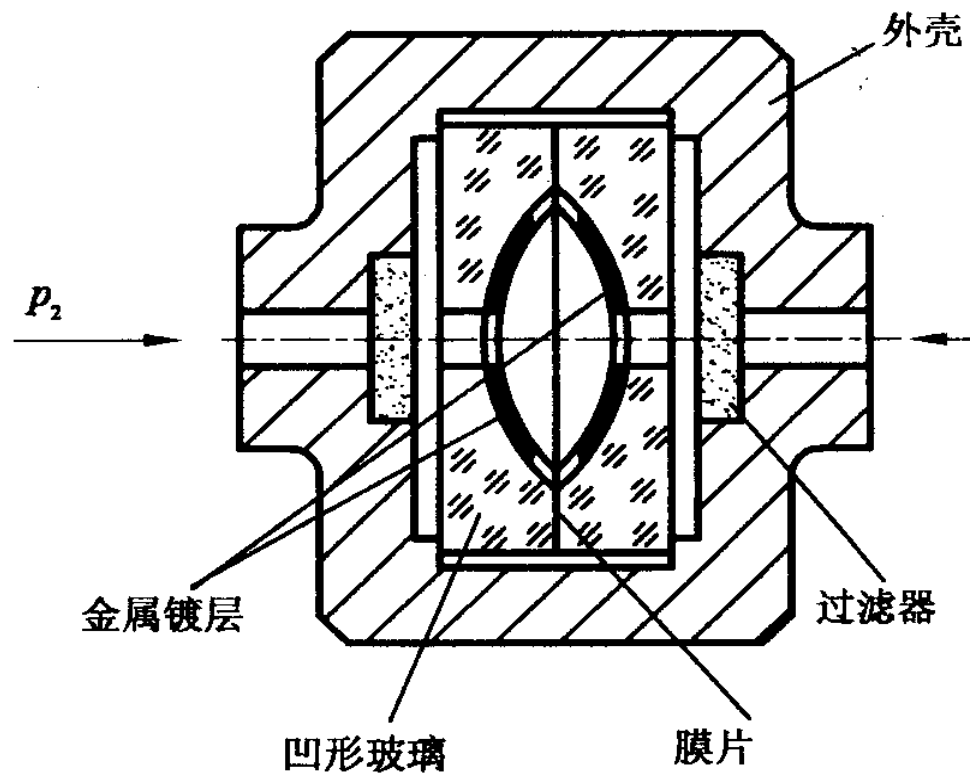


图 5-17 差动式电容式压力传感器结构图