



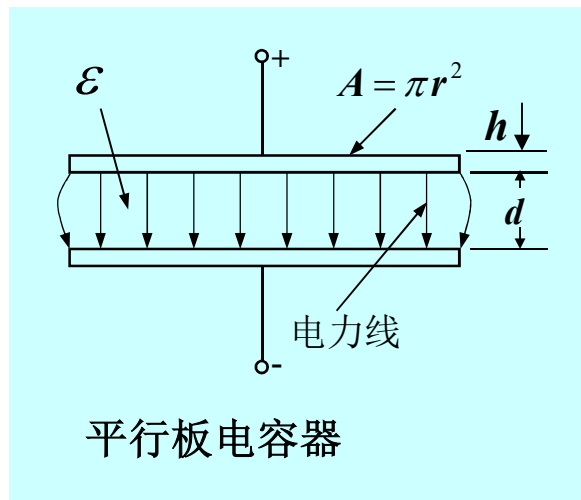
电容式传感器



本章目录

- 1 电容式传感器的工作原理和结构
- 2 电容式传感器的灵敏度及非线性
- 3 电容式传感器的误差分析
- 4 电容式传感器的测量电路
- 5 电容式传感器的应用

1 电容传感器的工作原理和结构



由绝缘介质分开的两个平行金属板组成的平板电容器, 如果不考虑边缘效应, 其电容量为

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

- ①**变极距型** 覆盖面积和介电常数不变, 被测量为极距。用于测量机械位移。
- ②**变面积型** 极距及介电常数不变, 改变覆盖面积(覆盖长度或宽度), 用于测量位移。
- ③**变介电常数型** 覆盖面积及极距均不变, 被测量为 ϵ 。

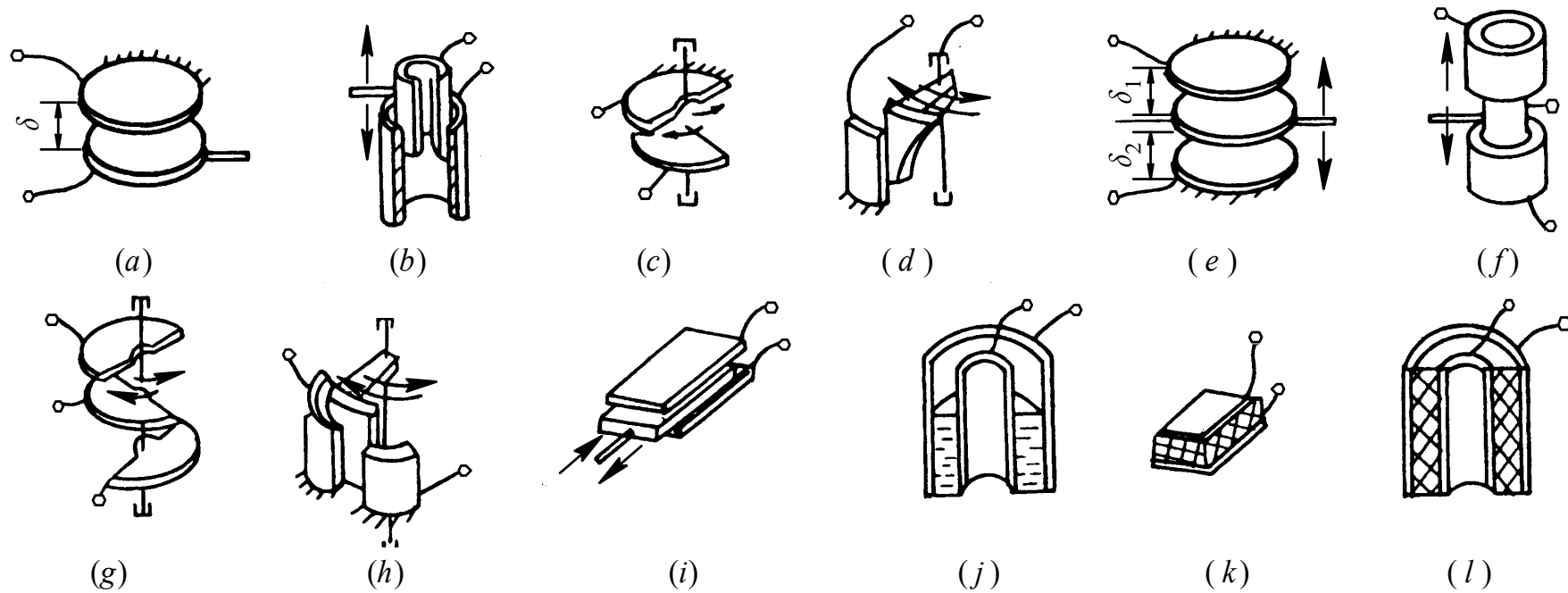
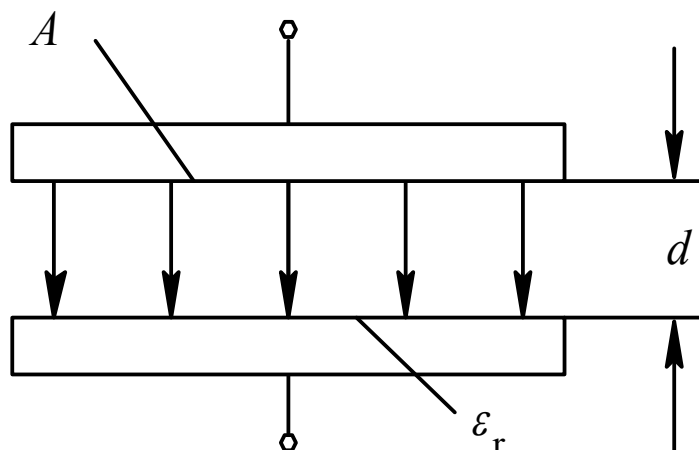


图5-1 电容式传感元件的各种结构形式

1.1 变极距型电容传感器



变极距型电容传感器

在极板的几何尺寸远大于极间距离和介质均匀的条件下，即忽略边缘效应后，其电容与结构尺寸之间的关系为：

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

ε : 板级间介质的介电常数

ε_r : 板级间介质的相对介电常数

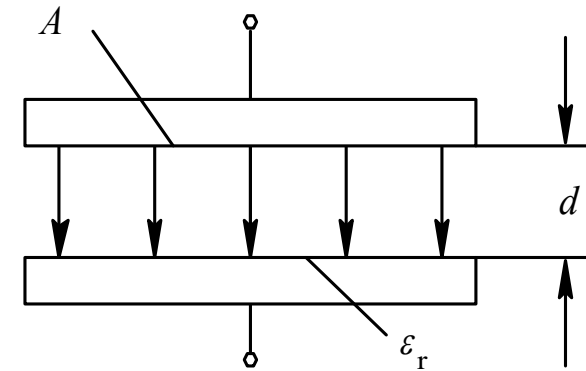
ε_0 : 真空中的介电常数($8.85 \times 10^{-12} \text{ C/Nm}^2$)

A : 板级的面积

d : 板级间的距离

当传感器的 ε_r 和 S 为常数，初始极距为 d_0 时，其初始电容 C_0 为

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



若电容器极板间距离由初始值 d_0 缩小了 Δd ，电容增大了 ΔC ，则有

$$C = C_0 + \Delta C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d_0 - \Delta d} = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}}$$

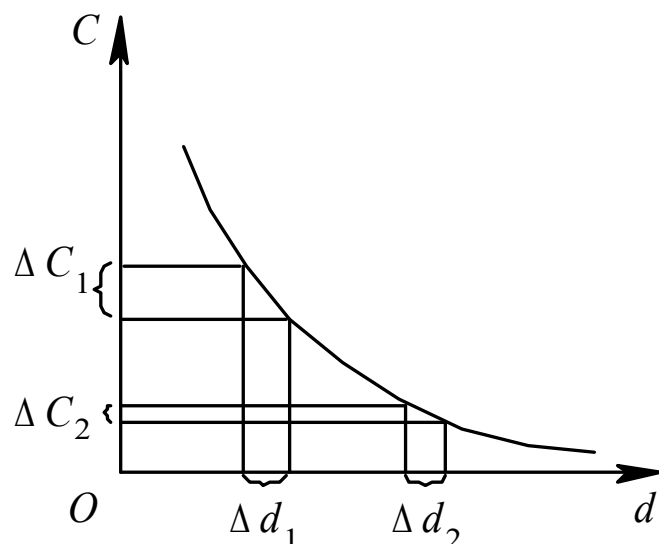
变极距型电容传感器灵敏度

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

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

$$|\Delta d / d_0| \ll 1$$

$$\frac{\Delta c}{c_0} \approx \frac{\Delta d}{d_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right) + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right]$$



略去高次项, 得到近似的线性:

$$|\Delta d / d_0| \ll 1$$

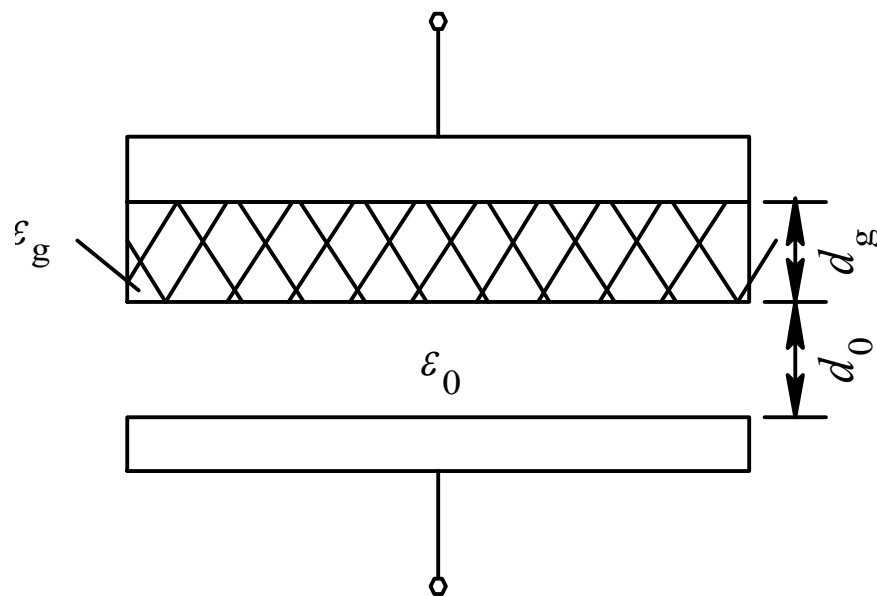
$$\frac{\Delta c}{c_0} = \frac{\Delta d}{d_0}$$

电容传感器的
灵敏度为:

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

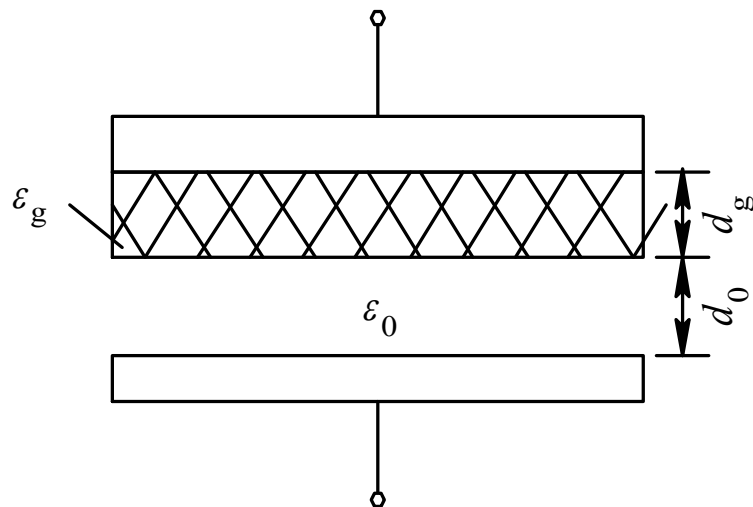
对灵敏度的说明

- 一般变极板间距离电容式传感器的起始电容在 $20 \sim 100\text{pF}$ 之间, 极板间距离在 $25 \sim 200\mu\text{m}$ 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。



放置云母片的电容器

- 小的间距可提高传感器灵敏度。但间距过小, 容易引起电容器击穿或短路。为此, 极板间可采用高介电常数的材料 (云母、塑料膜等) 作介质。
- 云母片的相对介电常数是空气的7倍, 其击穿电压不小于 1000 kV/mm , 而空气的仅为 3 kV/mm 。因此有了云母片, 极板间起始距离可大大减小。



电容C变为:

$$C = \frac{S}{\frac{d_g}{\epsilon_0 \epsilon_g} + \frac{d_0}{\epsilon_0}} \quad (5-5)$$

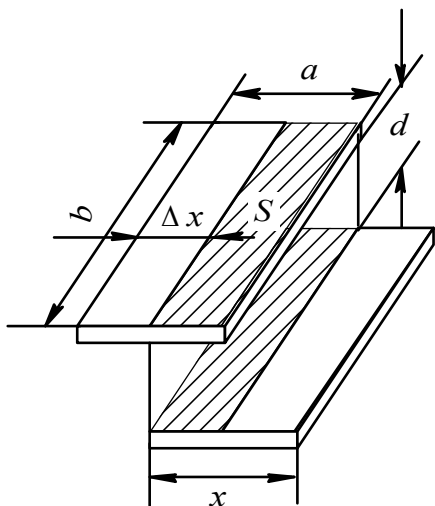
式中: ϵ_g —云母的相对介电常数, $\epsilon_g=7$;

ϵ_0 —空气的介电常数, $\epsilon_0=1$;

d_0 —空气隙厚度;

d_g ——云母片的厚度。

1.2 变面积型电容式传感器



变面积型电容传感器原理图

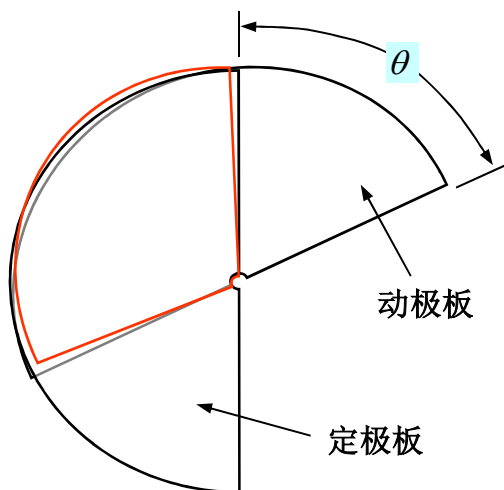
被测量通过动极板移动引起两极板有效覆盖面积 S 改变，从而得到电容量的变化。当动极板相对于定极板沿长度方向平移 Δx 时，则电容变化量为：

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \Delta x \cdot b}{d} \quad (5-6)$$

式中 $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r ba/d$ 为初始电容。电容相对变化量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta x}{a} \quad (5-7)$$

这种形式的传感器其电容量 C 与水平位移 Δx 呈线性关系。

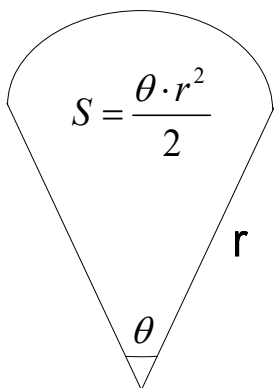


平板电容式角位移传感器

当动极板有一个角位移 θ 时，与定极板间的有效覆盖面积就发生改变，从而改变了两极板间的电容量。当 $\theta=0$ 时，则

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S_0}{d_0}$$

式中： ϵ_r —介质相对介电常数； d_0 —两极板间距离； S_0 —两极板间初始覆盖面积。当 $\theta \neq 0$ 时，则



$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S_0 \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right)}{d_0} = C_0 - C_0 \frac{\theta}{\pi}$$

传感器的电容量 C 与角位移 θ 呈线性关系。

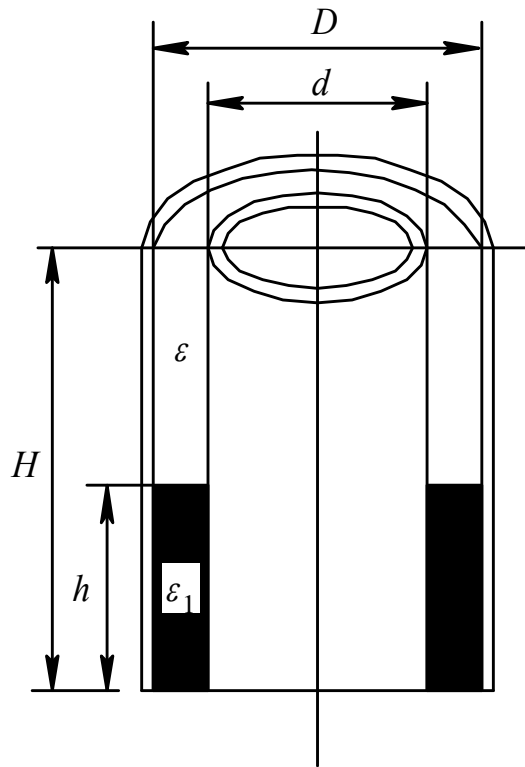
1.3 变介质型电容式传感器

若忽略边缘效应，则空容器的电容为：

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon H}{\ln \frac{D}{d}}$$

图示变换器电容值为：

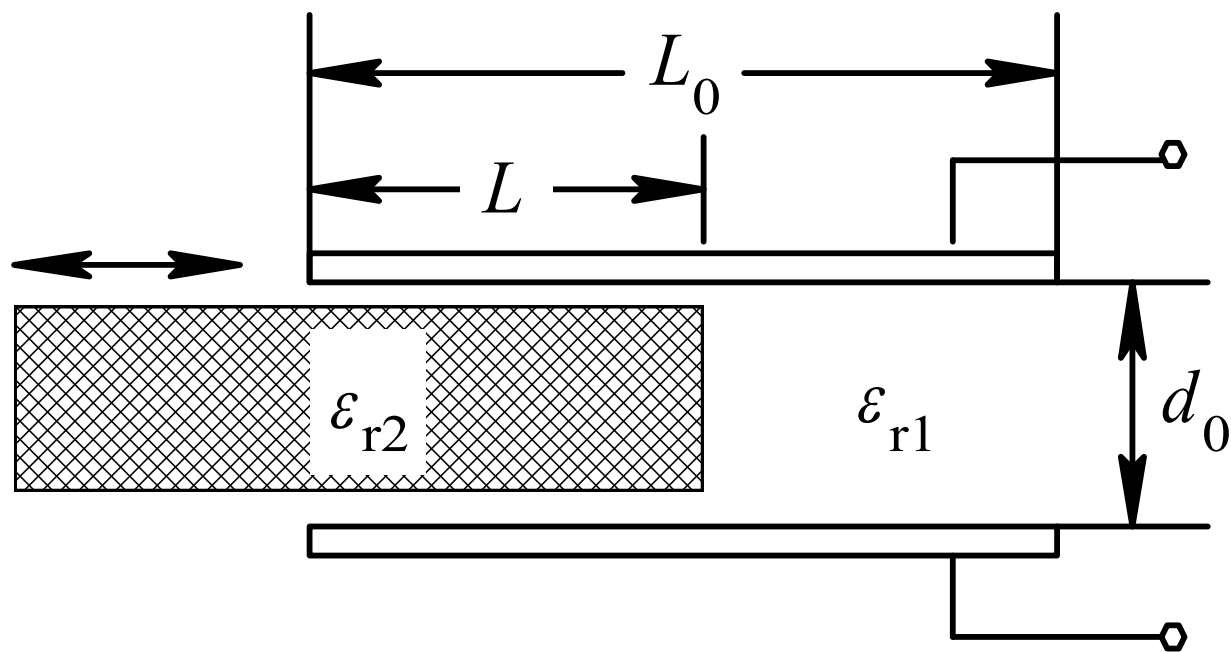
$$\begin{aligned} C &= \frac{2\pi\epsilon_1 h}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon(H-h)}{\ln \frac{D}{d}} \\ &= \frac{2\pi\epsilon H}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi h(\epsilon_1 - \epsilon)}{\ln \frac{D}{d}} = C_0 + \frac{2\pi h(\epsilon_1 - \epsilon)}{\ln \frac{D}{d}} \end{aligned}$$



电容式液位变换器结构原理图

电容增量正比于被测液位高度 h 。

变介质型电容传感器有较多的结构形式，图示是一种常用的结构形式。



变介质型电容式传感器

图中两平行电极固定不动，极距为 d_0 ，相对介电常数为 ε_{r2} 的电介质以不同深度插入电容器中，从而改变两种介质的极板覆盖面积。传感器总电容量 C 为

$$C = C_1 + C_2 = \varepsilon_0 b_0 \frac{\varepsilon_{r1}(L_0 - L) + \varepsilon_{r2}L}{d_0} \quad (5-11)$$

若电介质 $\varepsilon_{r1}=1$ ，当 $L=0$ 时，传感器初始电容 $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r L_0 b_0 / d_0$ 。当被测介质 ε_{r2} 进入极板间 L 深度后，引起电容相对变化量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{(\varepsilon_{r2} - 1)L}{L_0} \quad (5-12)$$

可见，电容量的变化与电介质 ε_{r2} 的移动量 L 成线性关系。

表5-1 电介质材料的相对介电常数

材 料	相对介电常数 ϵ_r	材 料	相对介电常数 ϵ_r
真 空	1.000 00	硬橡胶	4.3
其它气体	1~1.2	石英	4.5
纸	2.0	玻璃	5.3~7.5
聚四氟乙烯	2.1	陶瓷	5.5~7.0
石油	2.2	盐	6
聚乙烯	2.3	云母	6~8.5
硅油	2.7	三氧化二铝	8.5
米及谷类	3~5	乙醇	20~25
环氧树脂	3.3	乙二醇	35~40
石英玻璃	3.5	甲醇	37
二氧化硅	3.8	丙三醇	47
纤维素	3.9	水	80
聚氯乙烯	4.0	钛酸钡	1 000~10 000

2 电容式传感器的灵敏度及非线性

前面已得到：变极距电容的相对变化量为

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

当 $|\Delta d/d_0| \ll 1$ 时，按级数展开，可得

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

得到近似的线性关系：

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

灵敏度：

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

说明：单位输入位移所引起的输出电容相对变化的大小（即灵敏度）与 d_0 呈反比关系。

如果考虑前式中的线性项与二次项， 则

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \left(1 + \frac{\Delta d}{d_0} \right)$$

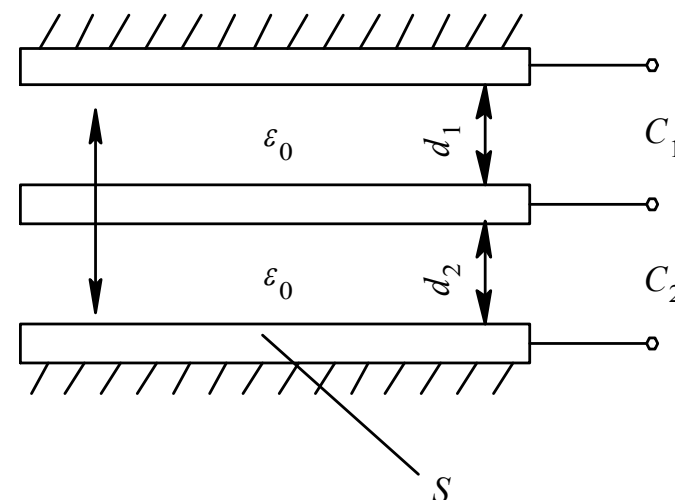
由此可得出传感器的**相对非线性误差** δ 为

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

要提高灵敏度，应减小起始间隙 d_0 ，但非线性误差却随着 d_0 的减小而增大。

在实际应用中，为了提高灵敏度，减小非线性误差，大都采用**差动式结构**。

在差动式平板电容器中，当动极板位移 Δd 时，电容器 C_1 的间隙 d_1 变为 $d_0 - \Delta d$ ，电容器 C_2 的间隙 d_2 变为 $d_0 + \Delta d$ 。



差动平板式电容传感器结构图

$$C_1 = C_0 \frac{1}{1 - \Delta d / d_0}$$

$$C_2 = C_0 \frac{1}{1 + \Delta d / d_0}$$

在 $\Delta d/d_0 \ll 1$ 时, 按级数展开得

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

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

电容值总的变化量为

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

电容值相对变化量为

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

略去高次项，则 $\Delta C/C_0$ 与 $\Delta d/d_0$ 近似成为如下的线性关系：

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

如果只考虑式中的线性项和三次项，则电容式传感器的相对非线性误差 δ 近似为

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

差动的好处:

- 灵敏度得到一倍的改善

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

单传感器灵敏度:

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

- 线性度得到改善

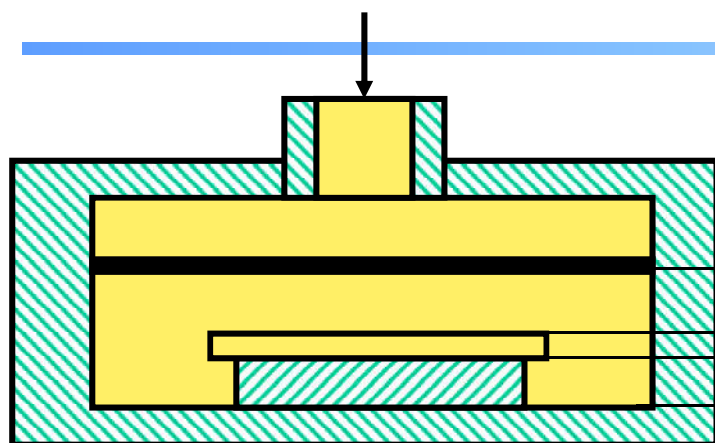
$$\delta = \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 \times 100\%$$

单传感器非线性:

$$\delta = \frac{\Delta d}{d_0} \times 100\%$$

3 电容传感器的误差分析

(1) 温度对电容传感器的影响



$$\delta_0 = a_0 - b_0 - g_0$$

δ_0 : 极板间隙;
 g_0 : 固定极板厚;
 b_0 : 绝缘件厚

$$\delta_t = a_0(1 + \alpha_a \Delta t) - b_0(1 + \alpha_b \Delta t) - g_0(1 + \alpha_g \Delta t)$$

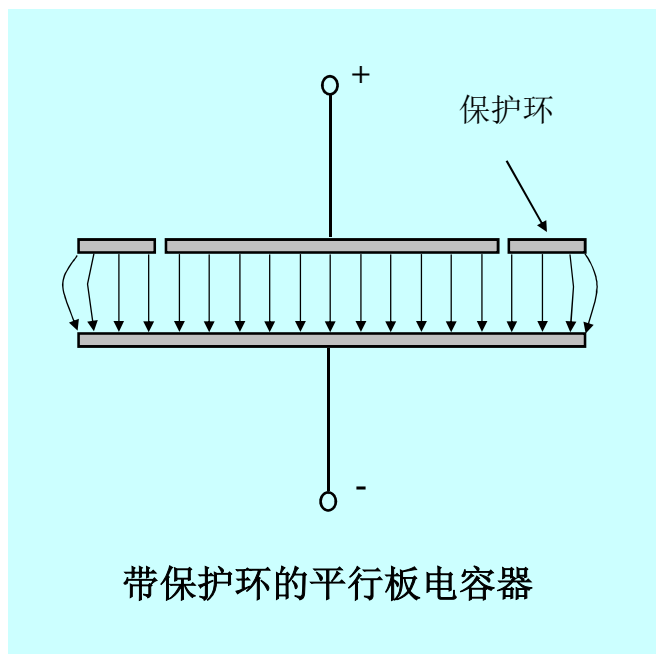
$$\therefore \Delta \delta_t = (a_0 \alpha_a - b_0 \alpha_b - g_0 \alpha_g) \cdot \Delta t$$

欲消除影响, 使得 $(a_0 \alpha_a - b_0 \alpha_b - g_0 \alpha_g) = 0$

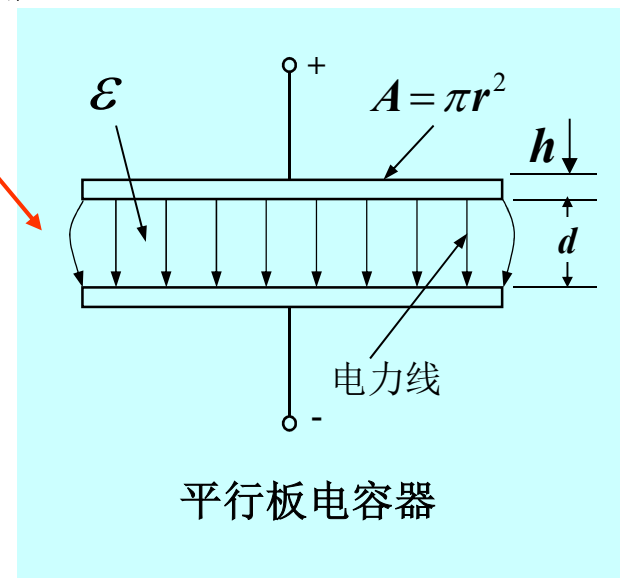
- 温度误差与零件的尺寸、热膨胀系数有关, 可消除
- 应减少尺寸链的组成环节
- 选用热膨胀系数小、几何尺寸稳定的材料。

(2) 电容电场的边缘效应

变极距型电容式传感器（平行板电容器式）
使用保护环减小边缘效应。



边缘效应



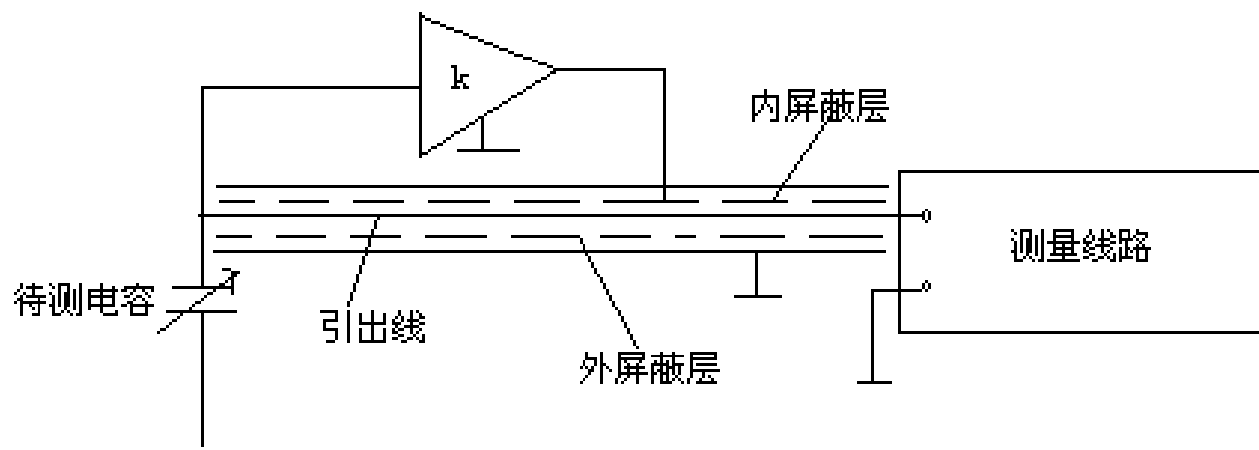
(3) 杂散电容的影响

- 电极引线之间以及导线的杂散电容，其数值约 **100pF/m**；
- 用于选择不同测量电极的电子开关其输入电容值约 **8pF**；
- 在普通线路板上两段间隔 **1mm** 长 **1cm** 的导线之间的分布电容约 **1pF**。
- 测量电容最多数十 **pF**，远小于影响电容测量的杂散电容值，抗杂散电容的能力是小电容电路必须具备的重要性能。

抗杂散电容的方法

- * 减小变换器至测量线路距离
- * 整体屏蔽
- * 驱动电缆技术
- * 电荷转移法

驱动电缆技术—设法让杂散电容两端保持同电位



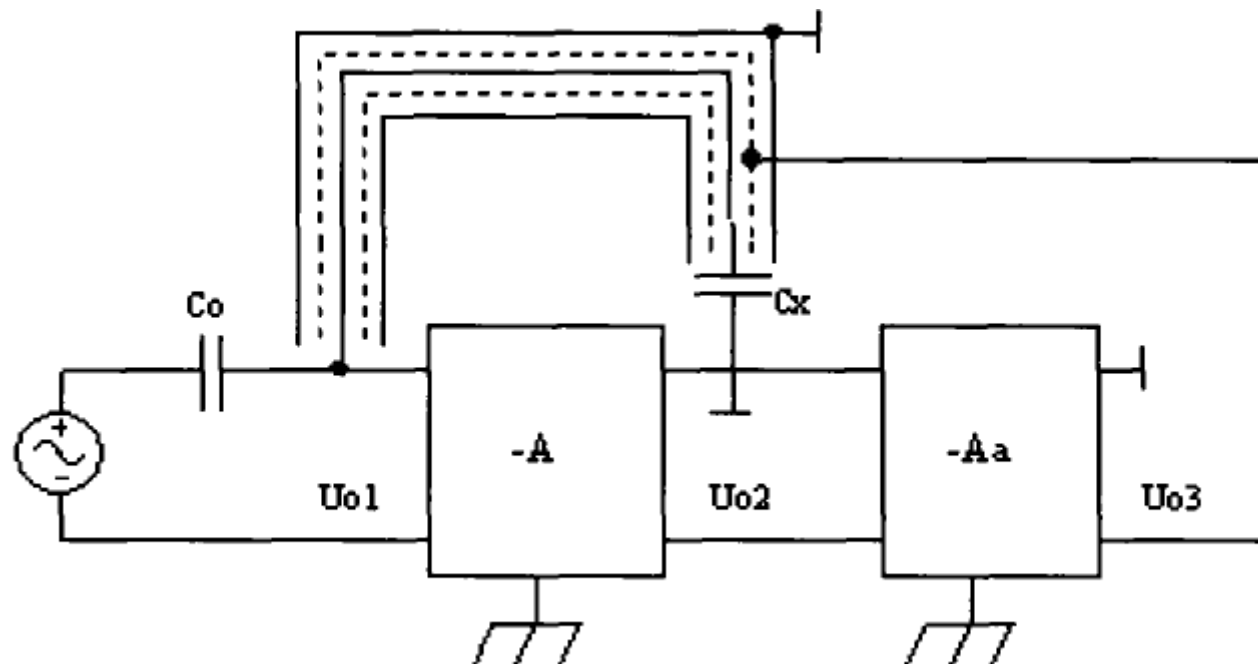
原理：使屏蔽层电位跟踪与电缆相连接的电容传感器电极电位，并要求二者幅值及相位均相等。（ $K=1$ 的同相放大）

芯线和内层屏蔽层之间通过单位增益的运算放大器相连接而互不影响，因此杂散电容由于两端电位相等，表现为即**不吸收电荷也不释放电荷**，对电容传感器 C_x 没有影响。

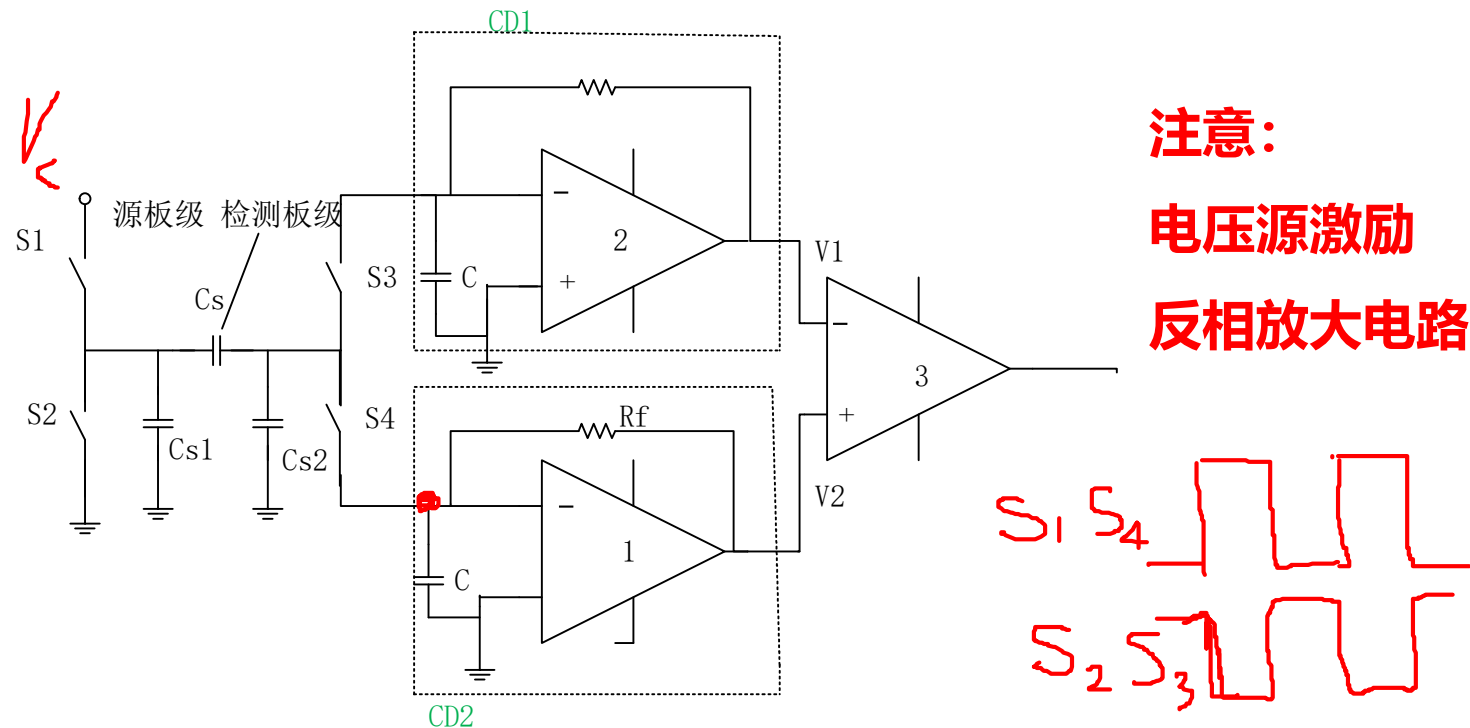
难点：该方法的难点在于要在很宽的频带上实现放大倍数等于1，且输入输出的相移为零。

驱动电缆技术—运算放大器驱动法 (自学)

传感器原理及其应用 王化祥 天津大学出版社



抗杂散电容的电荷转移法：



- 当杂散电容 C_{s1} 变化时，由于激励源的恒压特性，相当于激励源对杂散电容和有效电容进行独立激励（并联），从而不会影响对有效电容的测量。
- 杂散电容 C_{s2} 两端电位相同，在电路中相当于不工作。

4 电容式传感器的测量电路

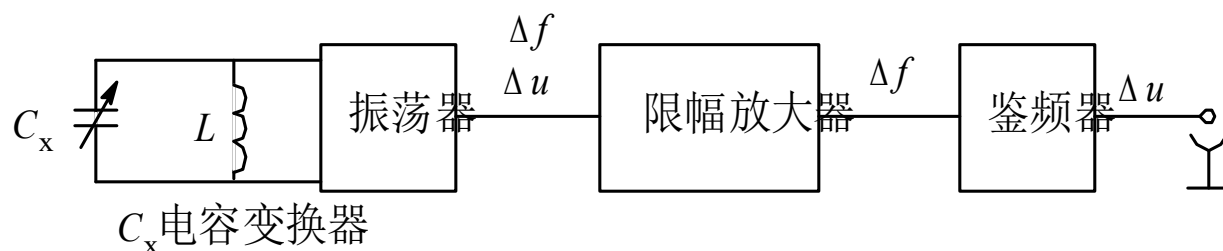
4.1 调频电路

把电容式传感器作为振荡器谐振回路的一部分，当输入量导致电容量发生变化时，振荡器的振荡频率就发生变化。

可将频率作为输出量用以判断被测非电量的大小，但此时系统是非线性的，不易校正，因此必须加入鉴频器，将频率的变化转换为电压振幅的变化，经过放大就可以用仪器指示或记录仪记录下来。调频振荡器的振荡频率为

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

式中： C —振荡回路的总电容， $C=C_1+C_2+C_x$ ，其中 C_1 为振荡回路固有电容， C_2 为传感器引线分布电容， $C_x=C_0\pm\Delta C$ 为传感器的电容。



当被测信号为0时, $\Delta C=0$, 则 $C=C_1+C_2+C_0$, 所以振荡器有一个固有频率 f_0 , 其表示式为

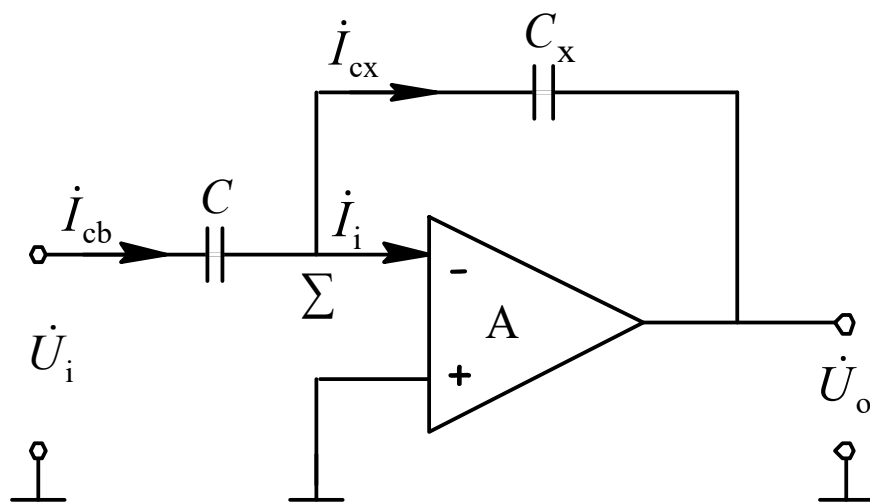
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(C_1 + C_2 + C_0)L}}$$

当被测信号不为0时, $\Delta C \neq 0$, 振荡器频率有相应变化, 此时频率为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(C_1 + C_2 + C_0 \mp \Delta C)L}} = f_0 \pm \Delta f$$

调频电容传感器测量电路具有较高的灵敏度, 可以测量高至 $0.01 \mu\text{m}$ 级位移变化量。信号的输出频率易于用数字仪器测量, 并与计算机通讯, 抗干扰能力强, 可以发送、接收, 以达到遥测遥控的目的。

4.2 运算放大器式电路



运算放大器式电路原理图

由于运算放大器的放大倍数非常大，而且输入阻抗 Z_i 很高，运算放大器的这一特点可以作为电容式传感器的比较理想的测量电路。由运算放大器工作原理可得

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

如果传感器是一只平板电容，则 $C_x = \epsilon S/d$ ，代入上式可得

$$\dot{U}_o = -\dot{U}_i \frac{C}{\epsilon S} d$$

式中“—”号表示输出电压 U_o 的相位与电源电压反相。可见运算放大器的输出电压与极板间距离 d 成线性关系。

运算放大器式电路虽解决了单个变极板间距离式电容传感器的非线性问题，注意**条件**：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 U_i 的幅值和固定电容 C 值稳定。

4.3 二极管双T形交流电桥

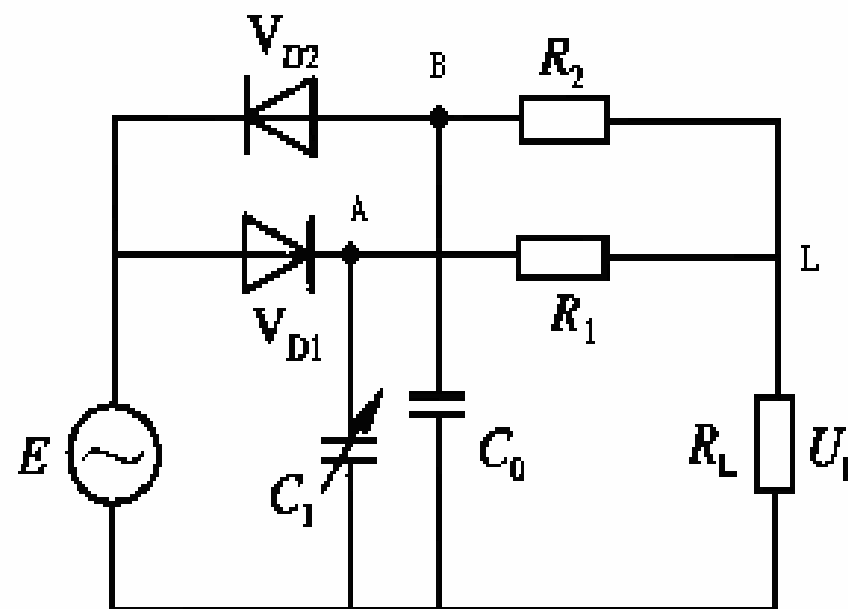
U_E 为方波电压信号，周期为 T ,占空比50%,; $R_1=R_2=R$; C_1 、 C_0 为差动电容传感器的电容，或者一个为固定电容，另一个为电容传感器的电容， R_L 为负载电阻。

●交流电桥测量电路→相敏解调→
电路的复杂化。

●美国麻省理工学院教授

K.S.LION发明非线性双T网络。

●该线路非常简单，不需要附加相敏解调器，就能获得高电平的直流输出，而且灵敏度较高。



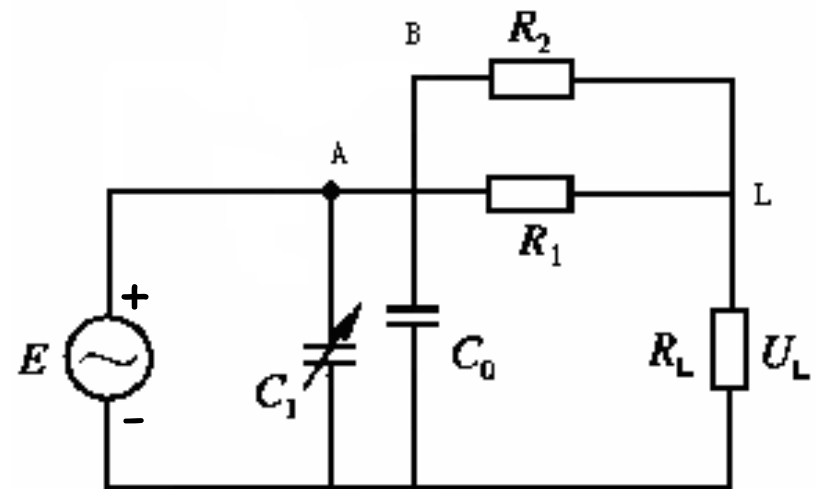
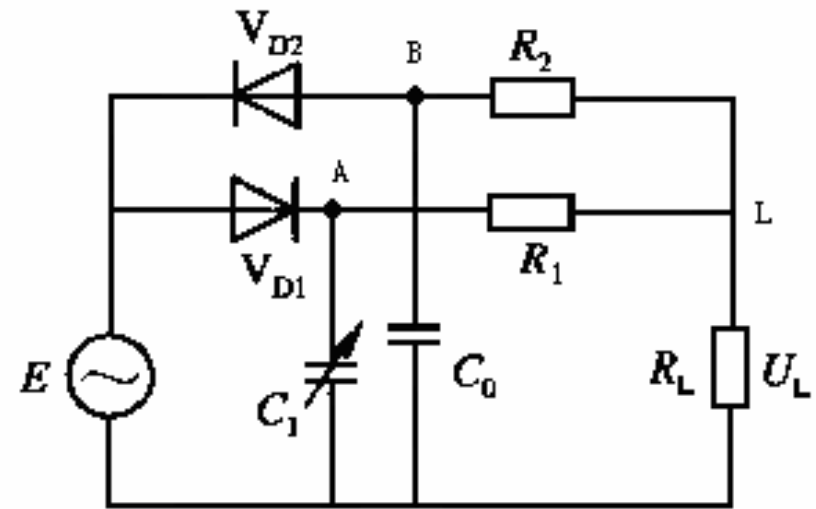
● 二极管双T桥路工作原理

① 电源转换到正半周，此时 D_1 导通， D_2 截止， C_1 立即充电至电源电压 E （ $E=U_E$ ）。

在正半周期间： $U_A = +U_E$ 。

C_0 放电

C_0 放电电流服从指数变化规律。

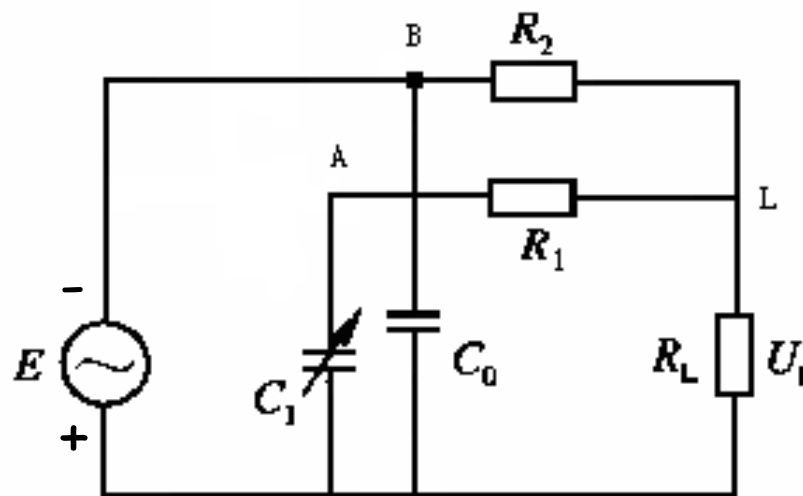
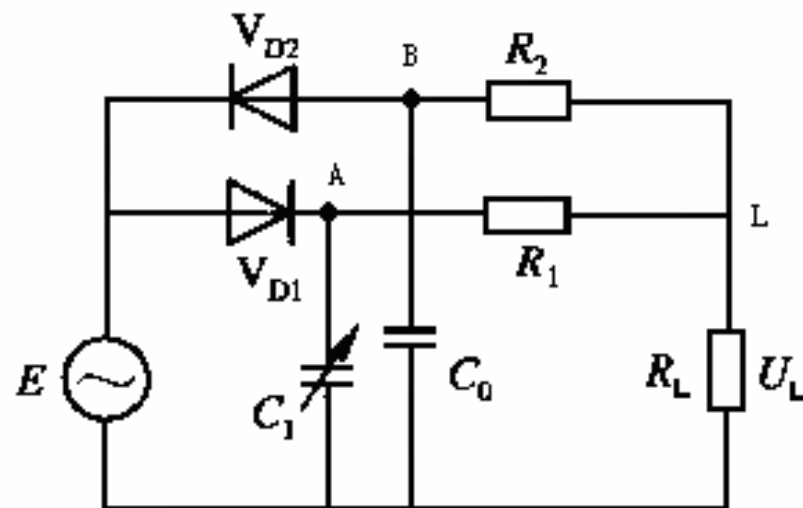


②电源转为负半周，此时 D_2 导通， D_1 截止， C_0 立即充电至电源电压。

在电源为负半周期间： $U_B = -U_E$

C_1 放电

C_1 放电电流服从指数变化规律。



电源处于负半周:

$$I_{L1}R_L = (I_1 - I_{L1})R - U_E$$

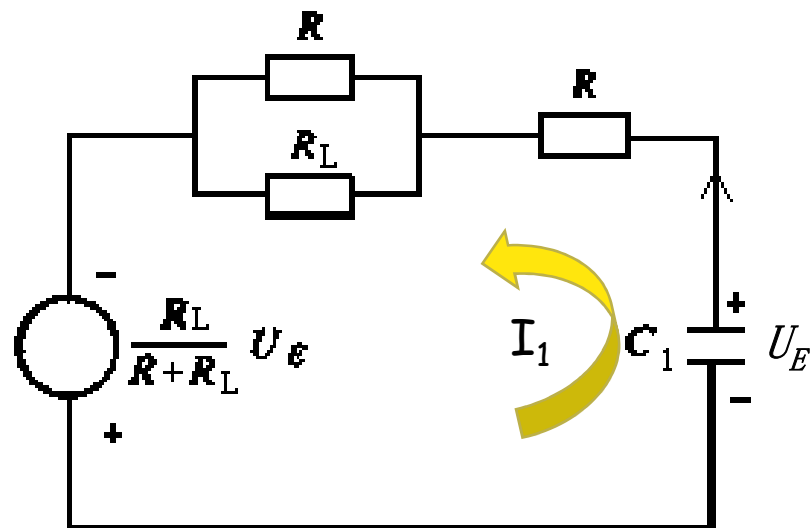
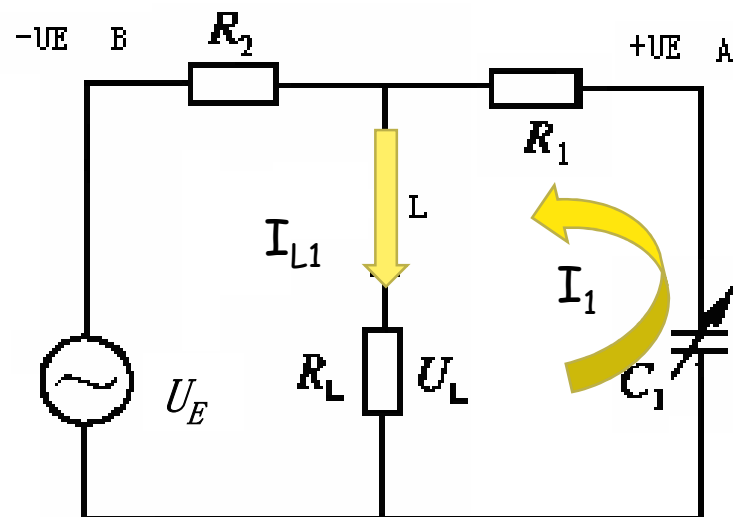
$$I_{L1} = \frac{I_1 R - U_E}{R + R_L}$$

同理，电源处于正半周:

$$I_{L2} = \frac{I_2 R - U_E}{R + R_L}$$

则:

$$U_L = (I_{L1} - I_{L2})R_L = \frac{R_L R}{R_L + R} (I_1 - I_2)$$



电源处于负半周

$$i_1 = \frac{[U_E + \frac{R_L}{R+R_L}U_E]}{R+(R//R_L)} e^{-\frac{t}{[R+R//R_L]C_1}}$$

$$I_1 = \frac{1}{T} \int_0^T i_1 dt$$

电源处于正半周

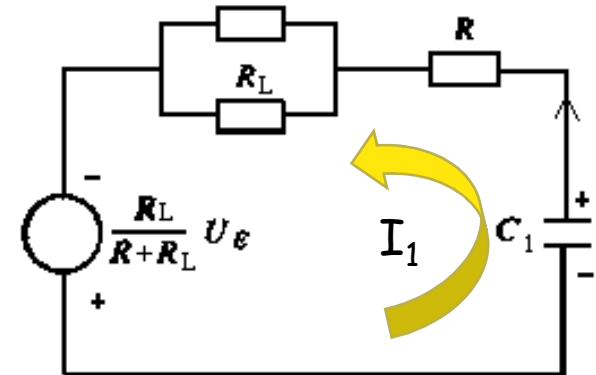
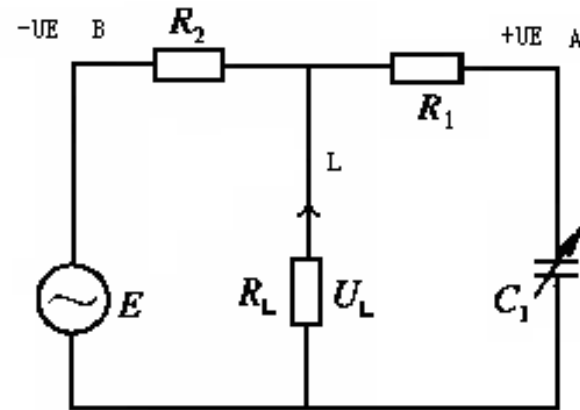
$$i_2 = \frac{[U_E + \frac{R_L}{R+R_L}U_E]}{R+(R//R_L)} e^{-\frac{t}{[R+R//R_L]C_0}}$$

$$I_2 = \frac{1}{T} \int_0^T i_2 dt$$

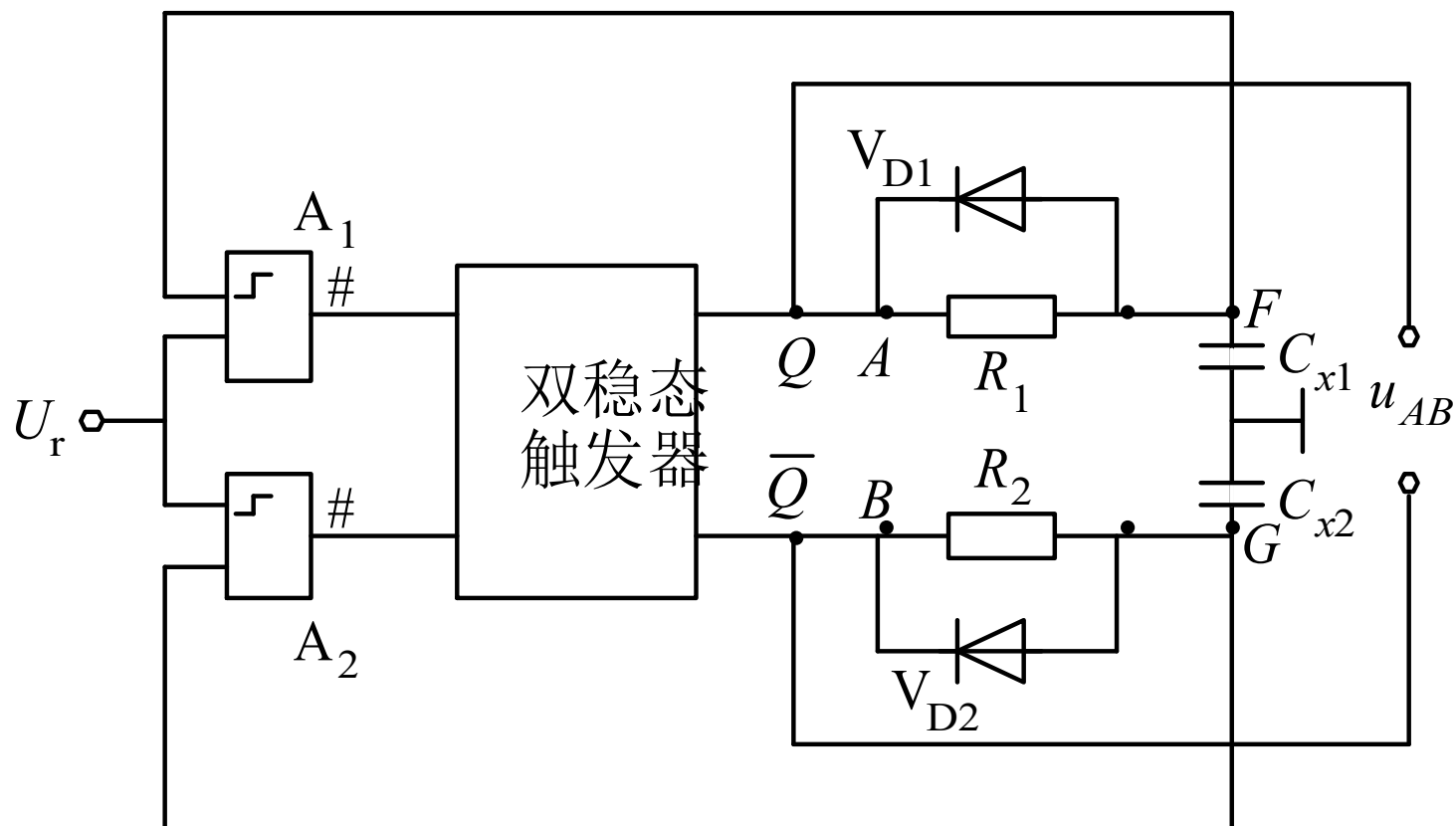
$$U_L = \frac{RR_L}{R+R_L}(I_1 - I_2) = \frac{RR_L(R+2R_L)}{(R+R_L)^2 T} U_E (C_1 - C_0 - C_1 e^{-k_1} + C_0 e^{-k_0})$$

$$k_0 = \frac{R+R_L}{2R_L C_0 (R+2R_L)} T, k_1 = \frac{R+R_L}{2R_L C_1 (R+2R_L)} T$$

当 k_0 、 $k_1 > 5$ 时, $U_L \approx \frac{RR_L(R+2R_L)}{(R+R_L)^2 T} U_E (C_1 - C_0)$ 的非线性误差 $< 1\%$

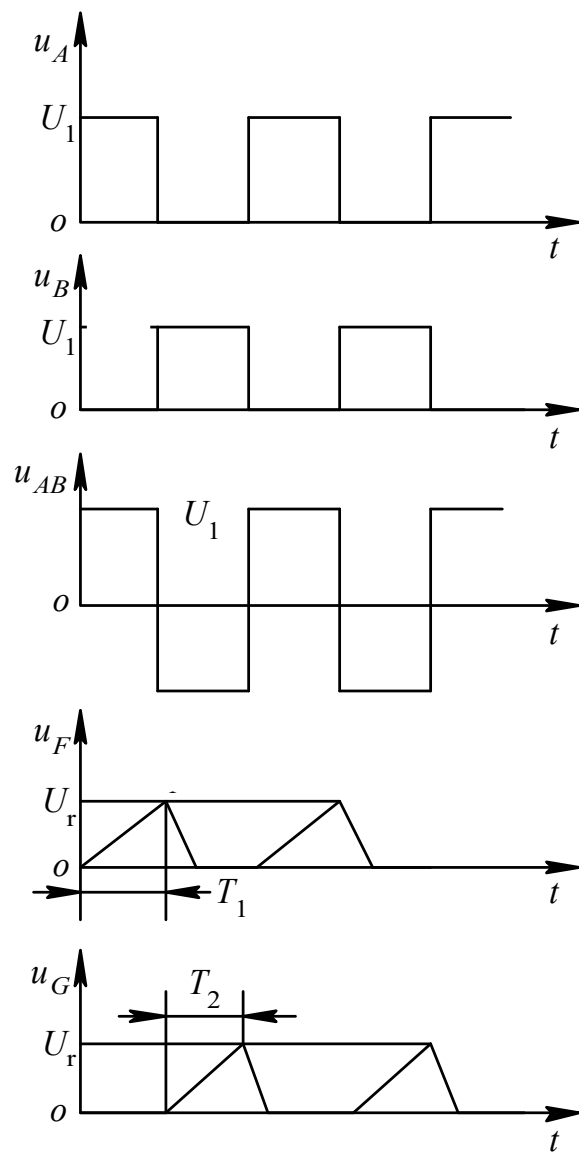


4.5 脉冲宽度调制电路

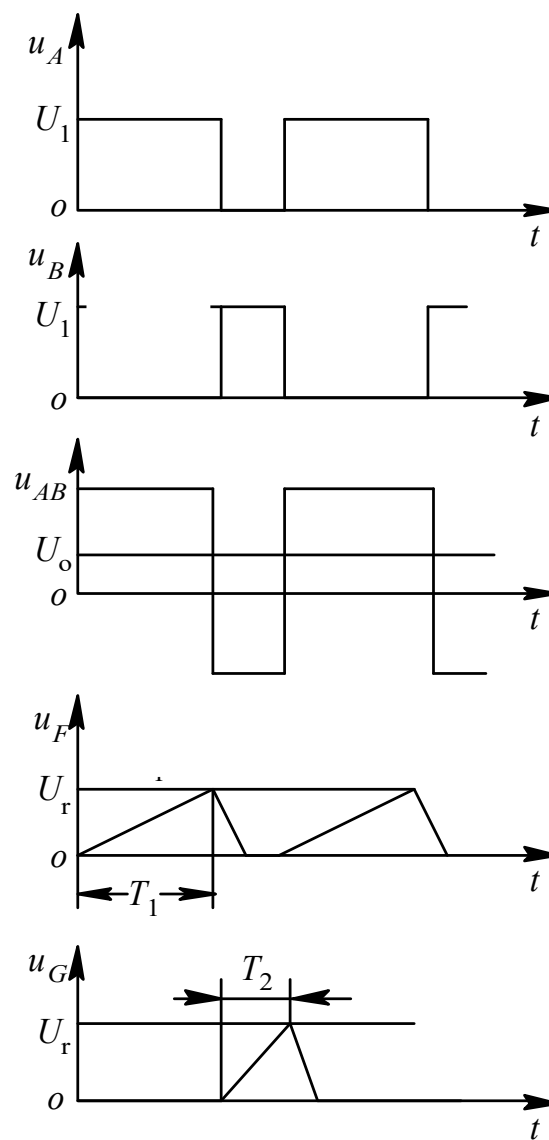


脉冲宽度调制电路图

脉冲宽度调制电路电压波形图



(a)



(b)

电路各点波形如图（b）所示，此时 u_A 、 u_B 脉冲宽度不再相等，一个周期 (T_1+T_2) 时间内的平均电压值不为零。此 u_{AB} 电压经低通滤波器滤波后，可获得 U_o 输出

$$U_o = U_A - U_B = U_1 \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2}$$

式中： U_1 ——触发器输出高电平；

T_1 、 T_2 —— C_{x1} 、 C_{x2} 充电至 U_r 时所需时间。

由电路知识可知

$$T_1 = R_1 C_{x1} \ln \frac{U_1}{U_1 - U_r}$$
$$T_2 = R_2 C_{x2} \ln \frac{U_1}{U_1 - U_r}$$

若 $R_1=R_2$ ，可得

$$U_o = \frac{C_{x1} - C_{x2}}{C_{x1} + C_{x2}} U_1$$

在变极板距离的情况下可得

$$U_o = \frac{d_1 - d_2}{d_1 + d_2} U_1$$

式中， d_1 、 d_2 分别为 C_{x1} 、 C_{x2} 极板间距离。

当差动电容 $C_{x1} = C_{x2} = C_0$ ，即 $d_1 = d_2 = d_0$ 时， $U_o = 0$ ；若 $C_{x1} \neq C_{x2}$ ，设 $C_{x1} > C_{x2}$ ，即 $d_1 = d_0 - \Delta d$ ， $d_2 = d_0 + \Delta d$ ，则有

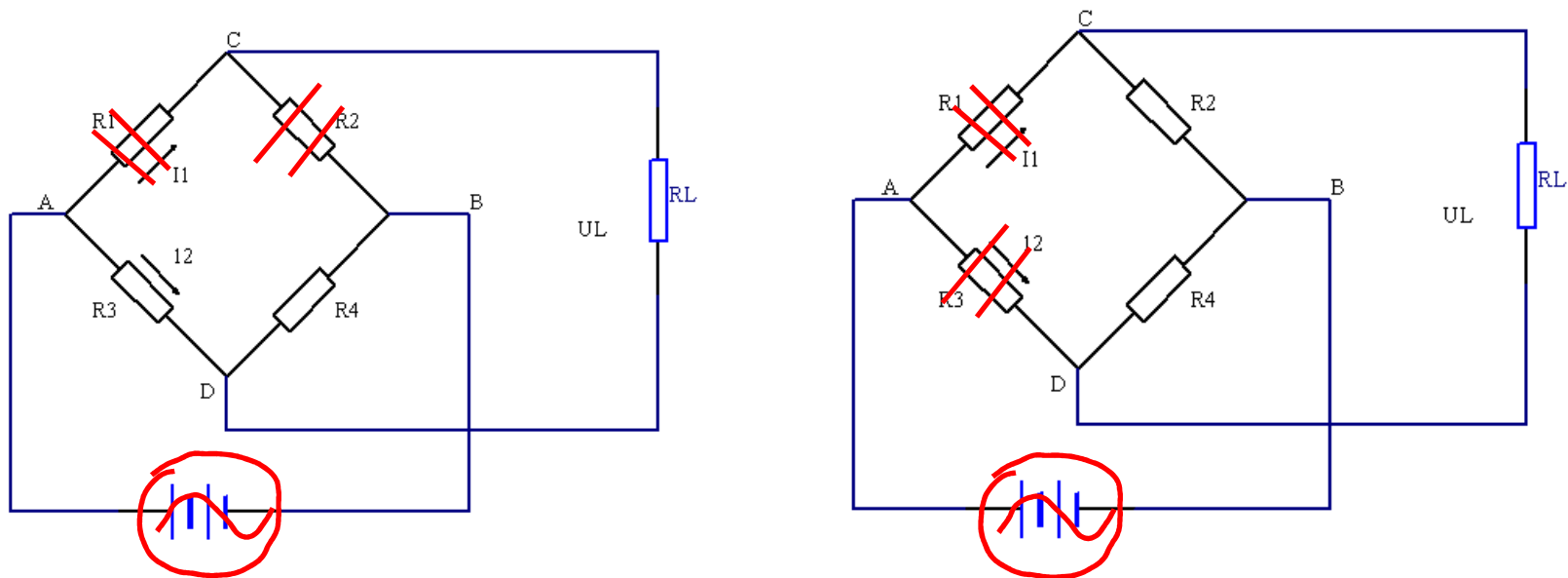
$$U_o = \frac{\Delta d}{d_0} U_1$$

同样，在变面积电容传感器中，则有

$$U_o = \frac{\Delta S}{S} U_1$$

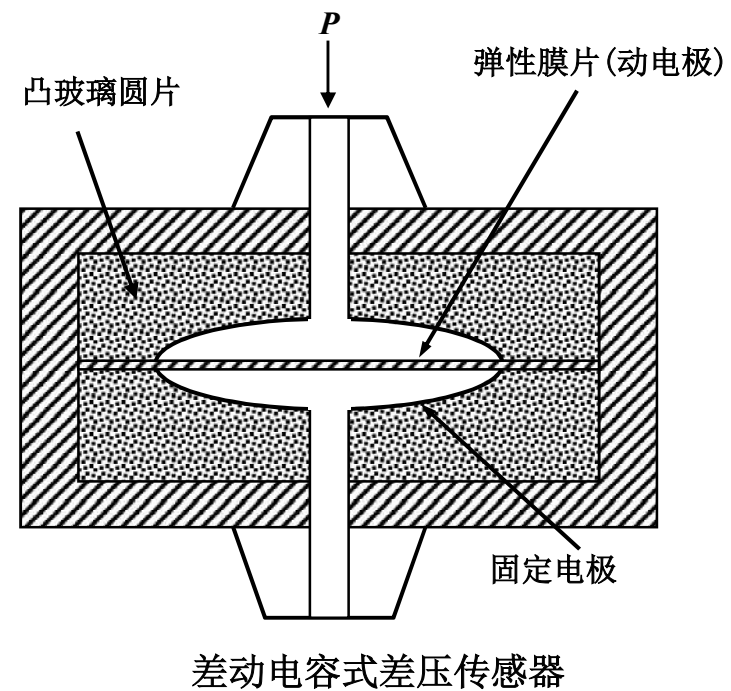
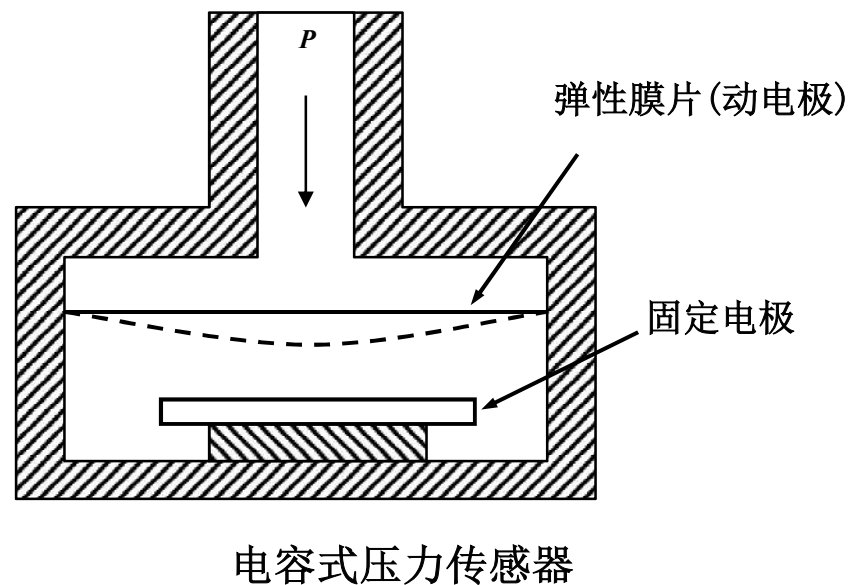
由此可见，差动脉宽调制电路适用于变极板距离以及变面积差动式电容传感器，并具有线性特性，且转换效率高，经过低通放大器就有较大的直流输出，调宽频率的变化对输出没有影响。

4.6 电桥电路

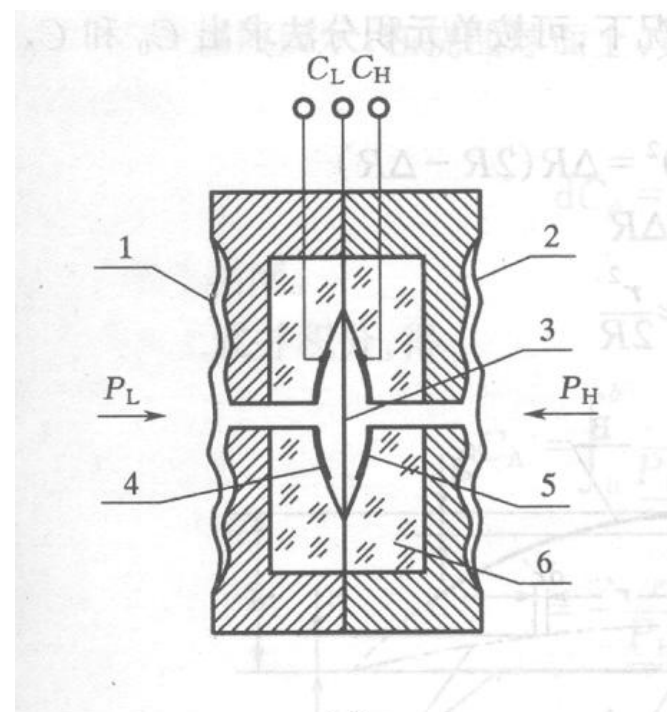
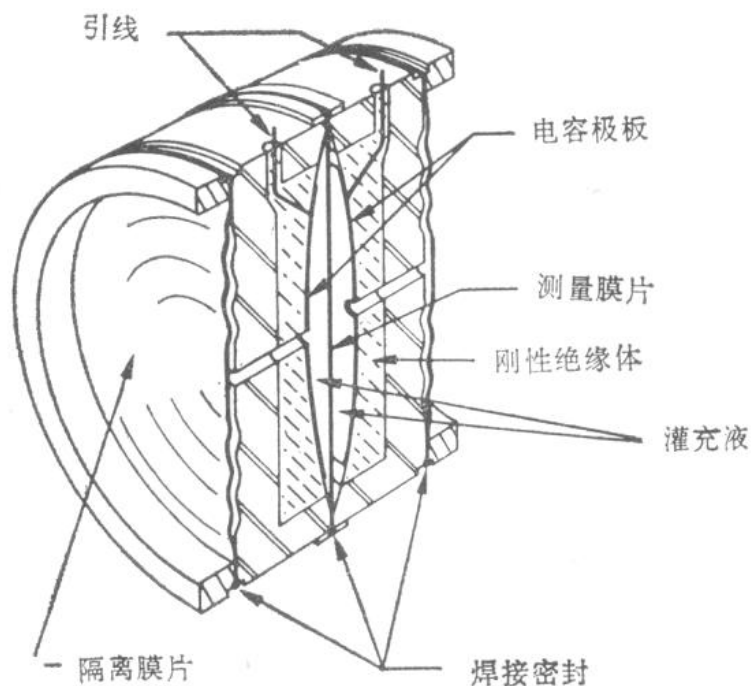


5 电容式传感器的应用

5.1 电容式压力传感器



实例



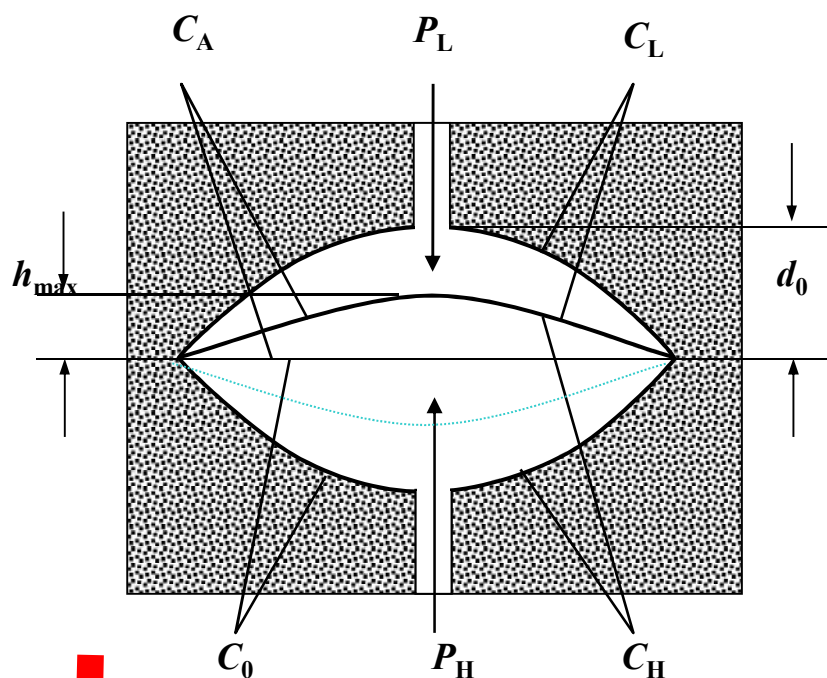
差动电容式差压传感器结构图

美国Rosemount公司专利

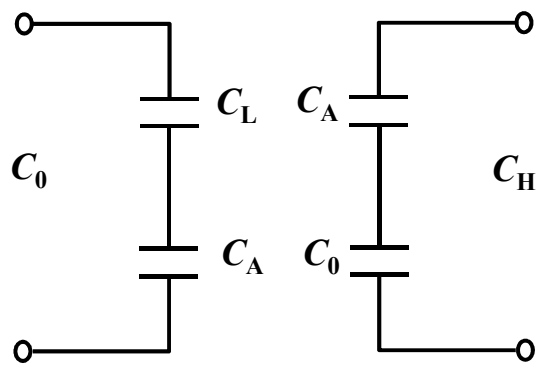
特点：温度稳定性好、耐腐蚀、抗震性好
可用于工业过程的各种压力测量

$$P_H - P_L = K \cdot \frac{C_L - C_H}{C_L + C_H}$$

实例



等效电路



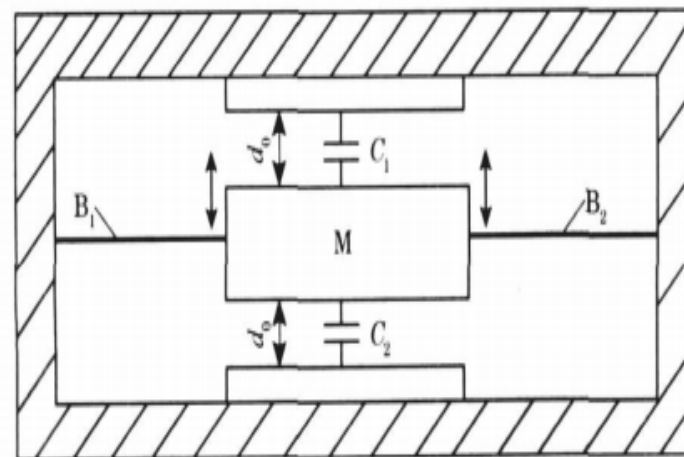
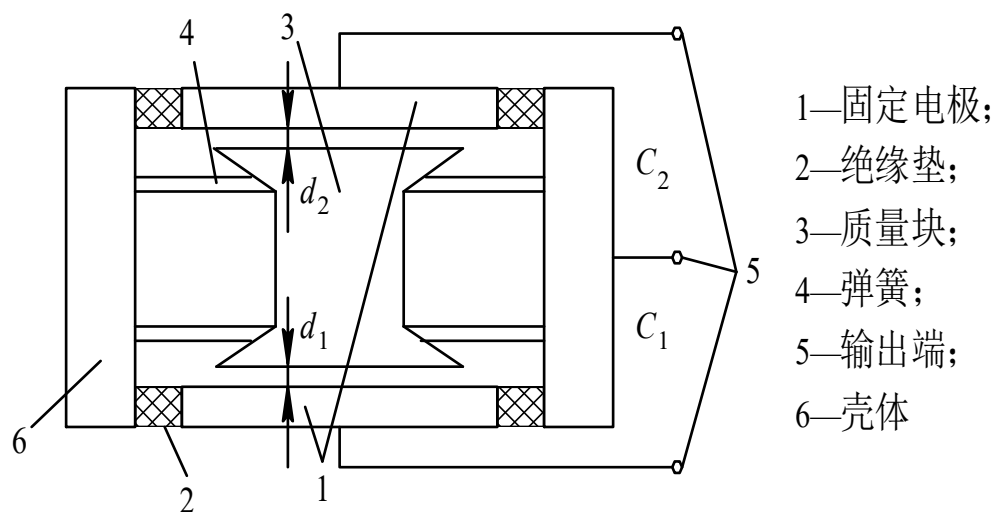
- $P_H = P_L$ 时中心膜片处于平直状态，膜片两侧电容均为 C_0 ；
- $P_H > P_L$ 时，中心膜片上凸，上部电容为 C_L ，下部电容为 C_H 。
- C_H 相当于当前膜片位置与平直位置间的电容 C_A 和 C_0 的串联；而 C_0 又可以看成是膜片上部电容 C_L 与的 C_A 串联。

$$C_0 = \frac{C_A C_L}{C_A + C_L} \Rightarrow C_L = \frac{C_A C_0}{C_A - C_0};$$

$$C_H = \frac{C_A C_0}{C_A + C_0}$$

$$\frac{C_L - C_H}{C_L + C_H} = \frac{C_0}{C_A}, \quad C_A \propto \frac{1}{P_L - P_H}$$

5.2 电容式加速度传感器

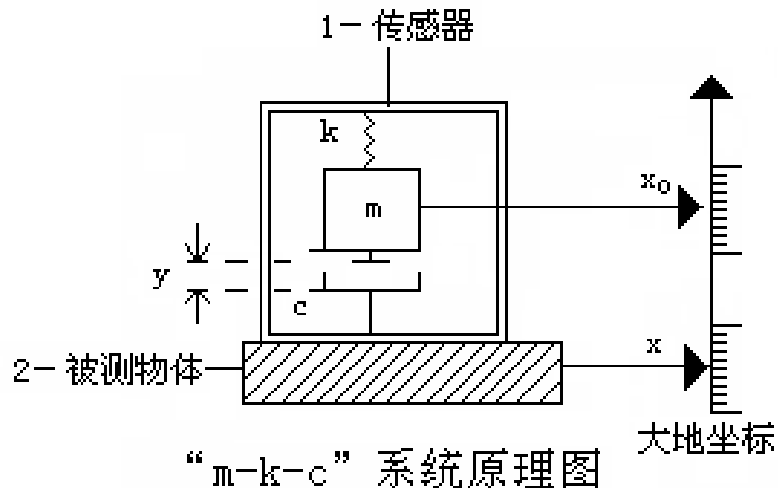


差动式电容加速度传感器结构图

当传感器壳体随被测对象沿垂直方向作直线加速运动时，**质量块在惯性空间中相对静止，两个固定电极将相对于质量块在垂直方向产生大小正比于被测加速度的位移。**此位移使两电容的间隙发生变化，一个增加，一个减小，从而使 C_1 、 C_2 产生大小相等、符号相反的增量，此增量正比于被测加速度。

电容式加速度传感器的主要特点是频率响应快和量程范围大，大多采用空气或其它气体作阻尼物质。

--电容加速度传感器动态特性（自学）



- 建立相对运动和绝对运动的联系。
- 将被测参数x(相关量如加速度)的大小，变为电容动极板相对位移y的转换。

根据牛顿第二定律，物体（动极板）受到惯性力 F_R ，阻尼力 F_P ，弹簧力 F

$$F_R + F_P + F = m \frac{d^2 x_0}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = 0$$

动极板和定极板之间的相对位移 $y = x_0 - x$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = -m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

--电容加速度传感器动态特性

当输入为 $x = X_m \sin \omega t$

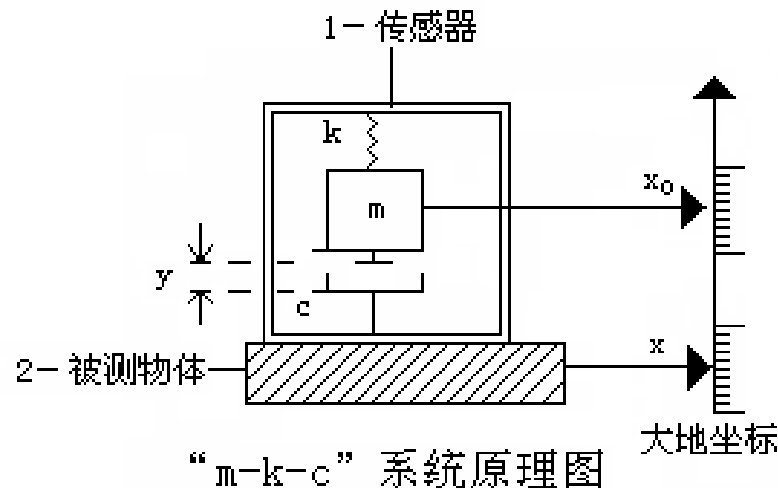
输出为 $y = Y_m \sin(\omega t - \varphi)$

$$Y_m = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \cdot X_m$$

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\xi = \frac{\eta}{2\sqrt{km}}$$



- 当被测刚体作正弦运动时，电容器的动极板亦相对于定极板作正弦运动，其振幅和相位则与传感器的结构参数 $\xi\omega_0$ 有关。
- 动极板质量轻，固有频率非常高。

--电容加速度传感器动态特性

$$A_m = \omega^2 X_m$$

$$Y_m = \frac{1}{\omega_0^2} \frac{A_m}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2]^2 + 4\xi^2 (\frac{\omega}{\omega_0})^2}}$$

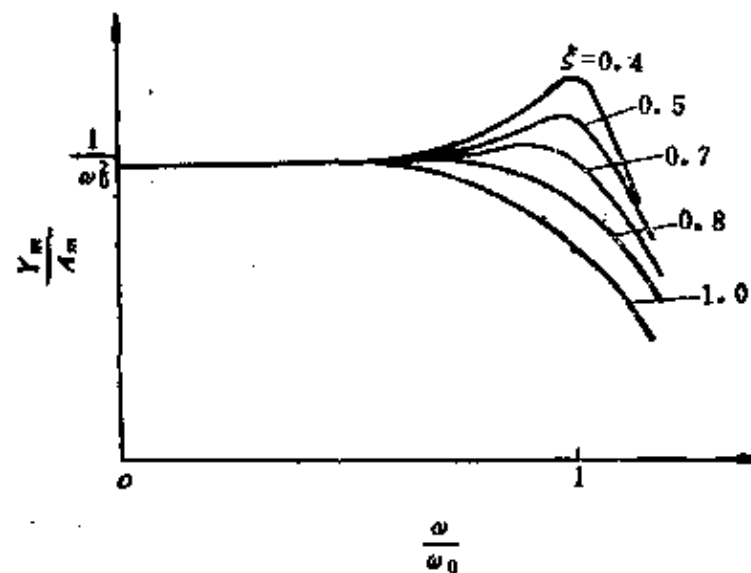
当 $\frac{\omega}{\omega_0} \ll 1$ 时, 传感器的振幅将反映被测量的加速度,

$$\text{即 } Y_m \approx \frac{1}{\omega_0^2} A_m$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

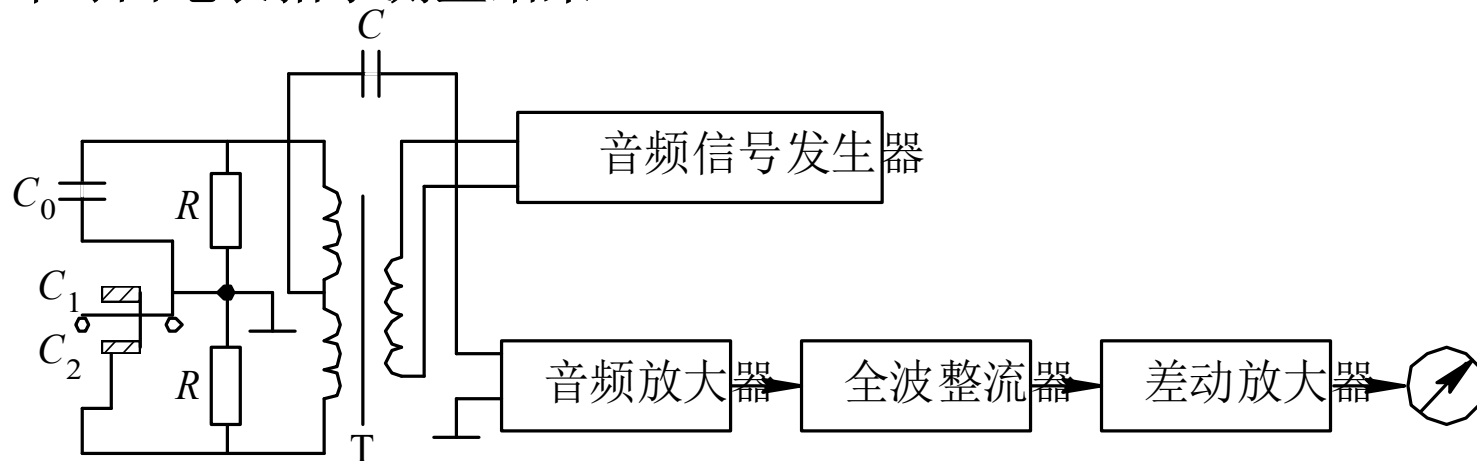
$$\xi = \frac{\eta}{2\sqrt{km}}$$

结论: 可以提高固有频率, 增大频区, 但灵敏度降低。



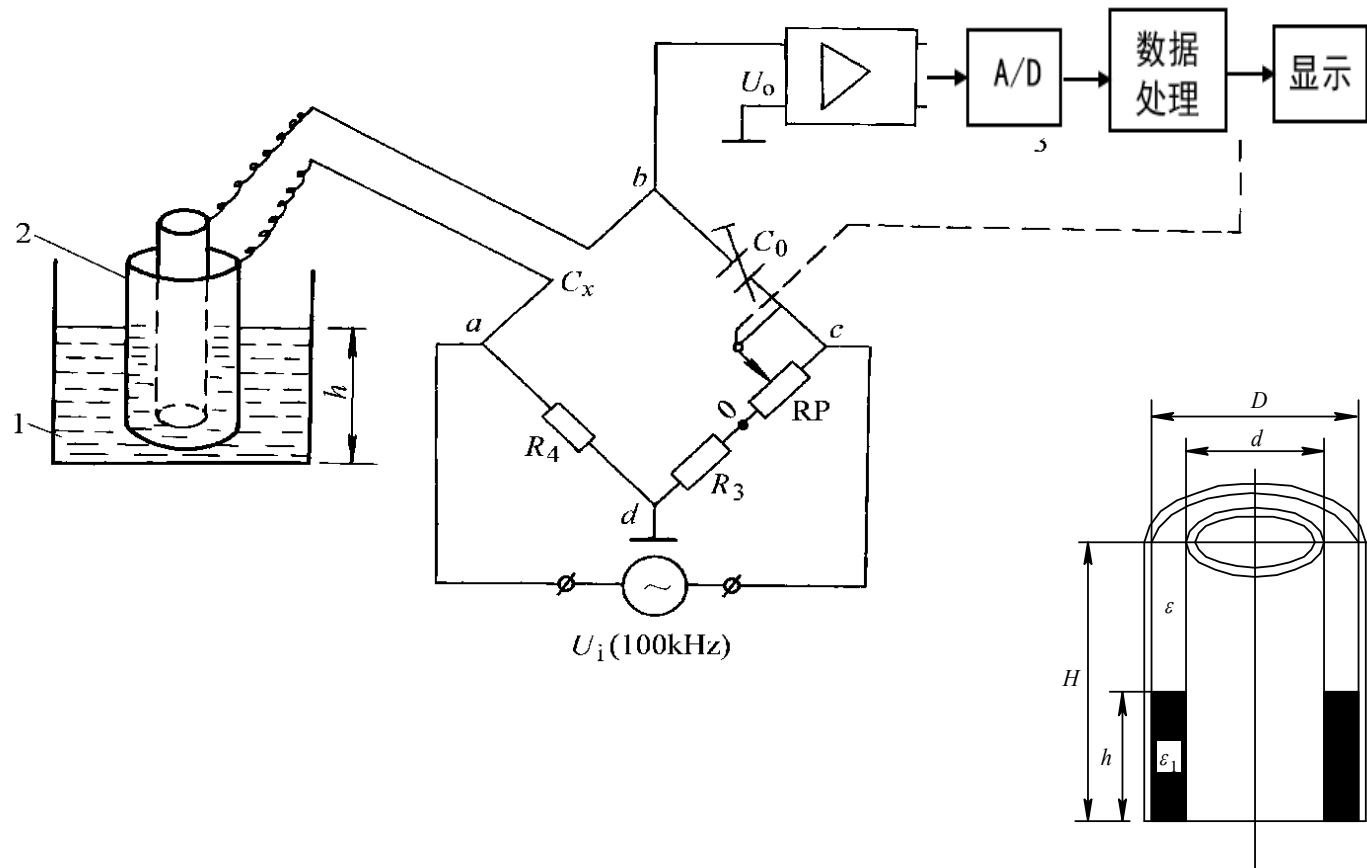
5.3 差动式电容测厚传感器

电容测厚传感器是用来对金属带材在轧制过程中厚度的检测，其工作原理是在被测带材的上下两侧各置放一块面积相等，与带材距离相等的极板，这样极板与带材就构成了两个电容器 C_1 、 C_2 。如果带材的厚度发生变化，将引起电容量的变化，用交流电桥将电容的变化测出来，经过放大即可由电表指示测量结果。



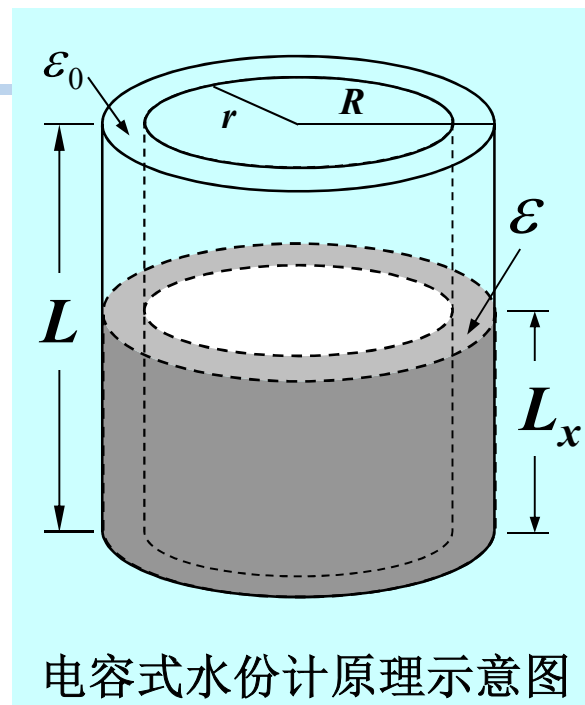
差动式电容测厚仪系统组成框图

5.4 电容液位传感器



5.5 应用—电容法测量含水量

- 测量原理：水的相对介电常数是空气的80倍，故以水为介质的电容器对水的变化非常敏感。
- 测量时相当于三个电容并联：分别是空气、水份和固体。



$$C = C_1 + C_2 + C_3 = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln(R/r)} [(1-k) + \epsilon_{rH} k \omega_H + \epsilon_r k (1 - \omega_H)]$$

ϵ_r 被测物自身介电常数

ϵ_{rH} 水的相对介电常数

ω_H 物体的含水量

当 $k = L_x / L$ 不变时，电容的变化正比于 ω_H 的大小。

5.6 应用—电容法测量气固两相流

什么是气固两相流？

- 气固两相流是同时存在气相和固相的物质流动。
- 如，化学工业中，洗衣粉、奶粉的气流干燥；
- 如在冶金、电力行业中煤粉的气力输送；
- 如食品、建筑行业中的谷物、食盐、水泥等物料的气力输送。

气固两相流参数测量的要求

描述气固两相流流动状态的参数。如固相颗粒浓度、速度、分布以及分相流量等。

气固两相流参数检测的难点

必须采用非接触式测量方法，不破坏被测过程的流场；且气固两相流流动过程太复杂。

气固两相流

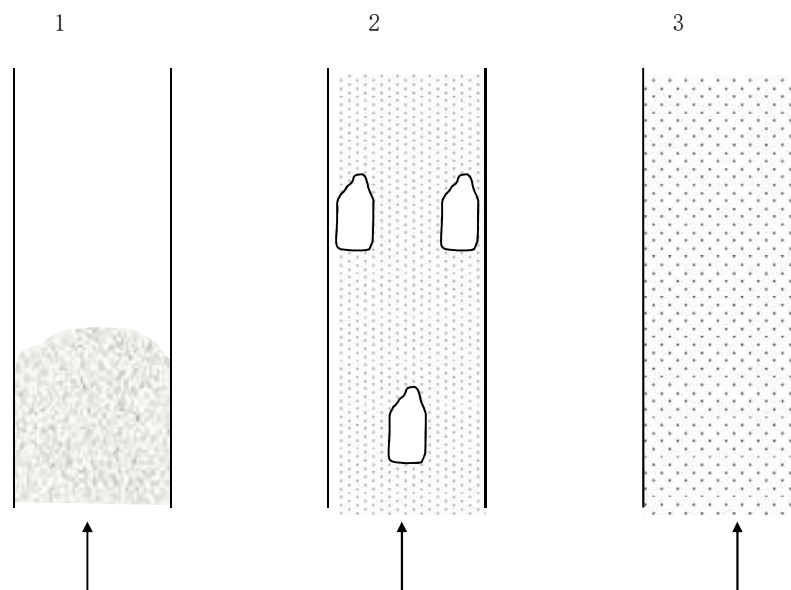


图1.1 垂直上升气固两相流的流动结构

1. 流动床结构 2. 弹状流动结构 3. 散布状流动结构

气固两相流

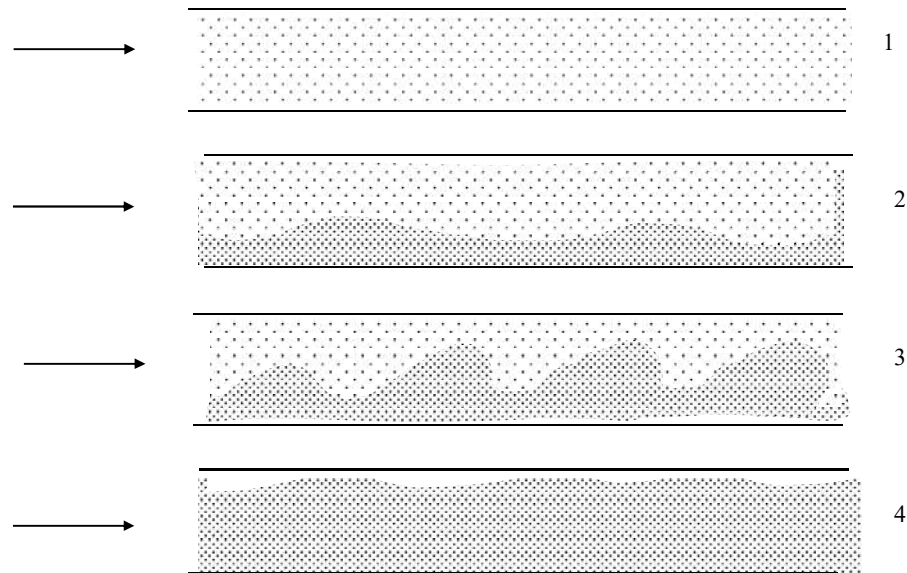
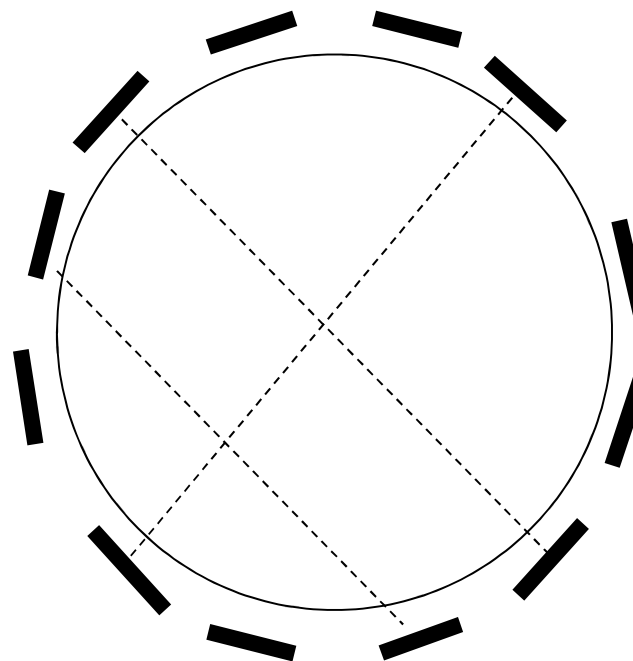
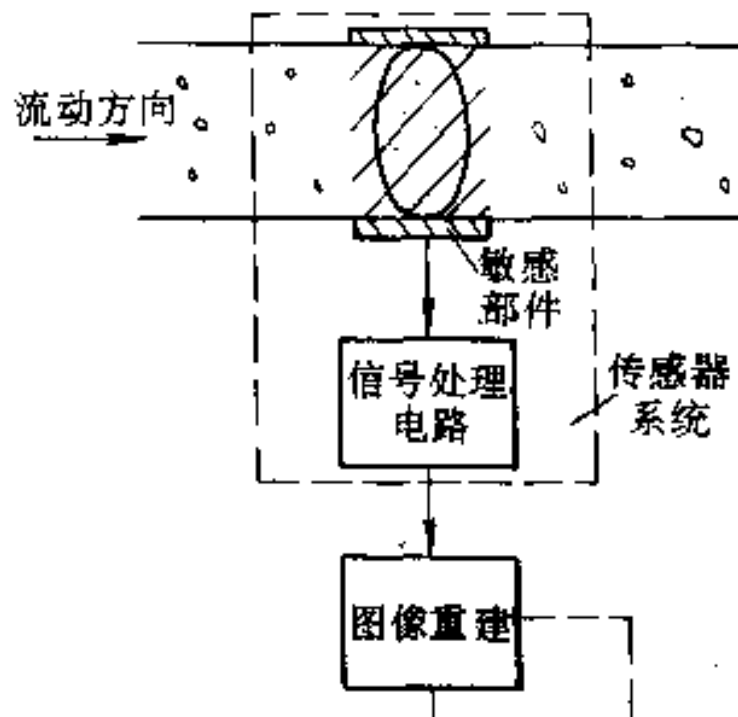


图1.2 水平管道气固两相流的流动结构

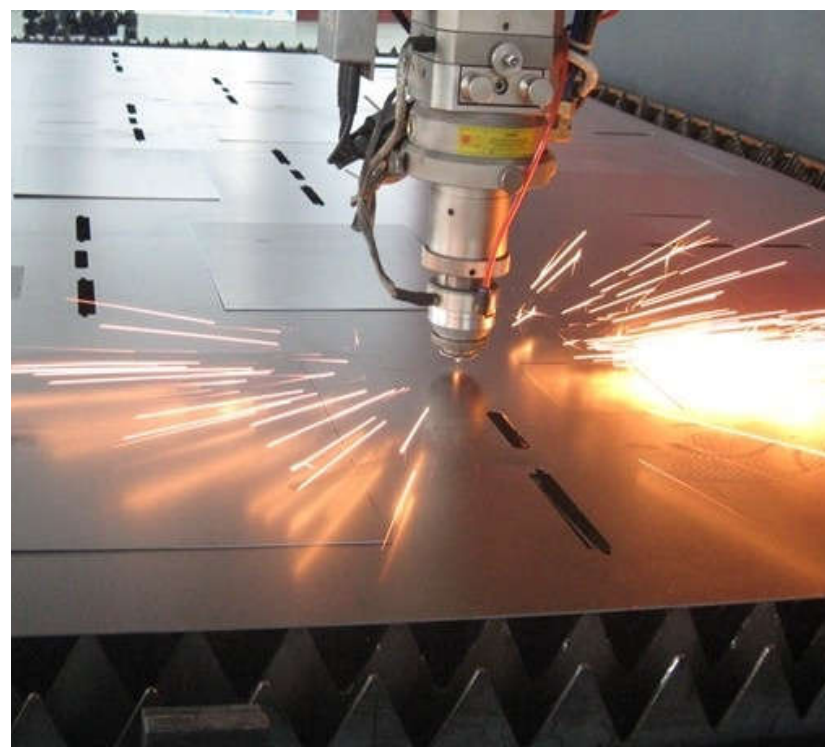
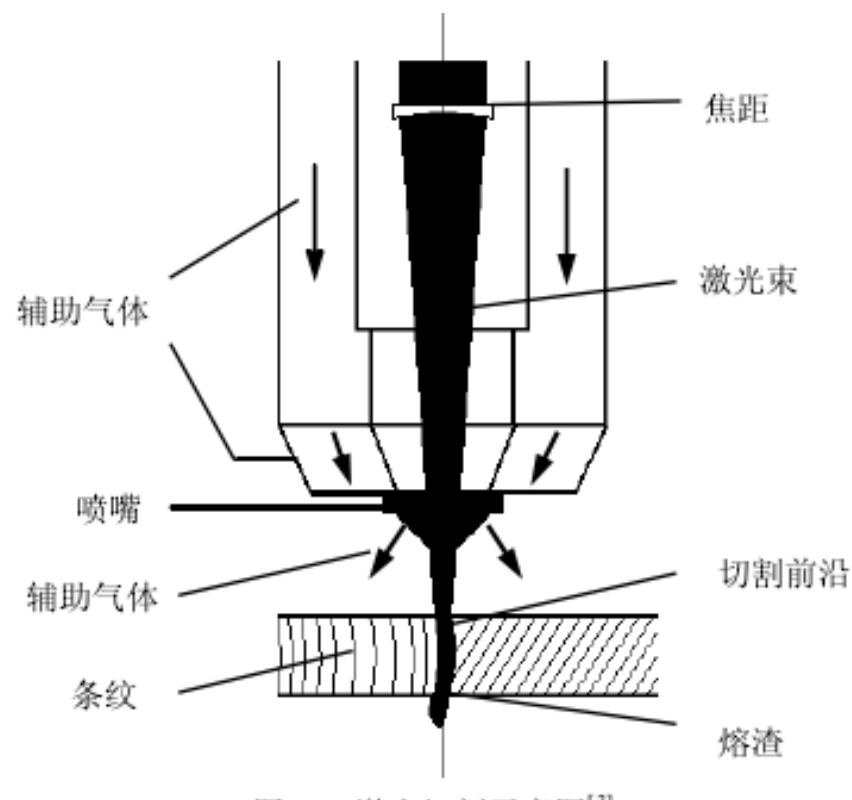
1. 均匀流动结构 2. 退化均匀流动结构
3. 沙丘流动结构 4. 柱状流动结构

●电容层析成像测量方法的设想

- ①一个电容传感器可以测量均匀分布的两相流。
- ②将复杂的两相流划分为若干个均匀的两相流，使用数量多于划分网格数的电容传感器来获得反映两相流分布的电介质分布。

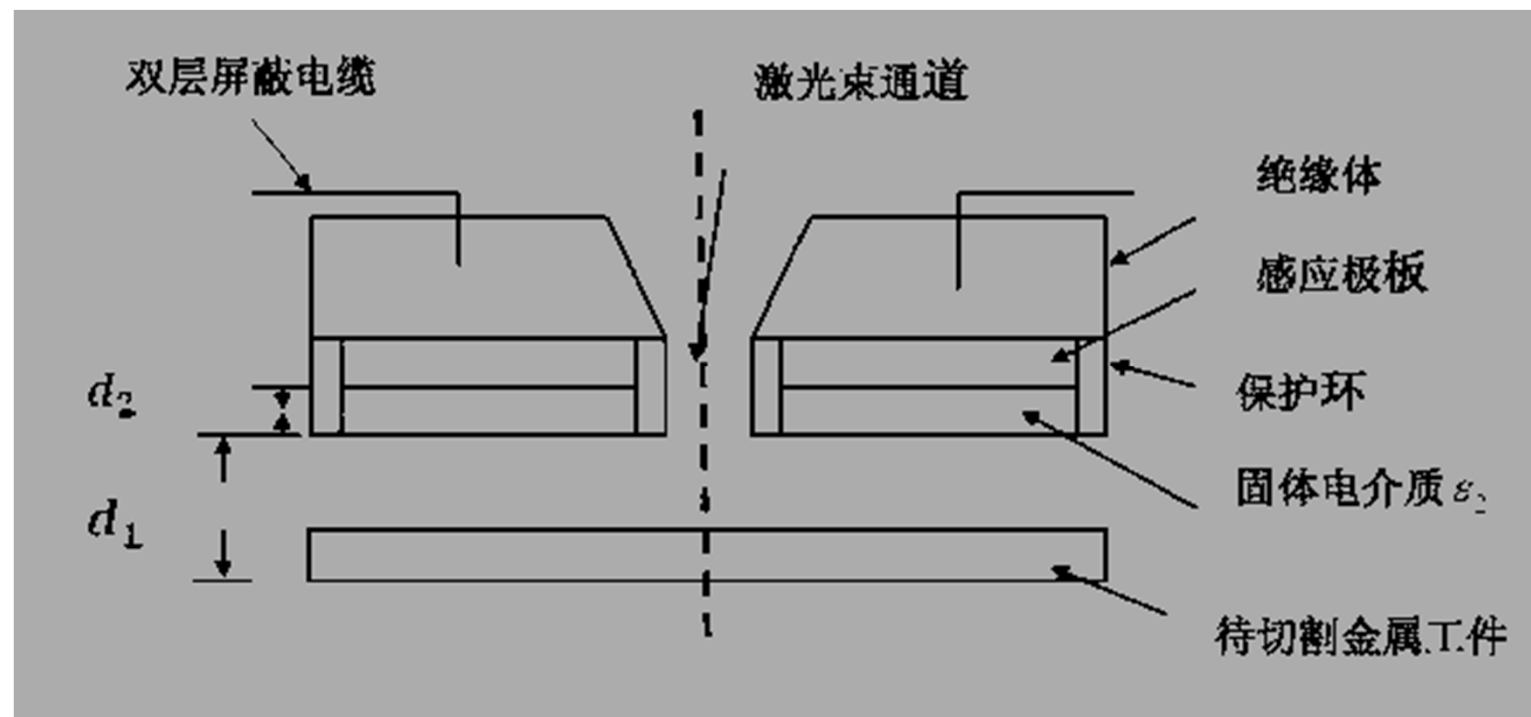


5.7 应用-电容式激光焦点测量



- ☆激光切割是一种非接触式加工技术,激光头与加工工件表面留有间距。
- ☆在激光切割过程中,为了保证切割质量,需要使切口处的功率密度最大,这要求切割头的喷嘴与被加工工件表面的间隙恒定。
- ☆在实际生产加工中,待切割加工的工件表面位置高度通常会发生变化,使用激光焦点位置测量系统获得实际距离,再通过控制系统调节激光切割头的焦距。

传感器结构：



作业：

4-2、4-4、4-7、4-10、4-11、4-14

周二交作业