

## 第5章 电容式传感器

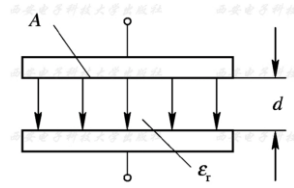
不考虑边缘效应，其电容量为

$\epsilon$ ——电容极板间介质的介电常数;

$A$ ——两平行板所覆盖的面积;

$d$ ——两平行板之间的距离。

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

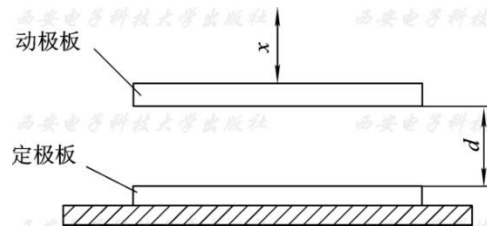


$A$ 、 $d$  或  $\epsilon$  发生变化时，电容量  $C$  也随之变化。如果保持其中两个参数不变，而仅改变其中一个参数，就可把该参数的变化转换为电容量的变化，通过测量电路就可转换为电量输出。因此，电容式传感器可分为**变极距型**、**变面积型**和**变介电常数型**三种。

### 变极距型电容传感器

初始电容量  $C_0$  为

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



若电容器极板间距离由初始值  $d_0$  缩小了  $\Delta d$ ，电容量增大了  $\Delta C$ ，则有

$$C = C_0 + \Delta C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_0 - \Delta d} = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}} = \frac{C_0 \left(1 + \frac{\Delta d}{d_0}\right)}{1 - \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2}$$

可得传感器的**输出特性不是线性关系，而是曲线关系**

**有在  $\Delta d/d_0$  很小时，才有近似的线性关系。**式子可以简化为：

$$C = C_0 + C_0 \frac{\Delta d}{d_0}$$

在  $d_0$  较小时，对于同样的  $\Delta d$  变化所引起的  $\Delta C$  可以增大，从而使传感器灵敏度提高。但  $d_0$  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

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

$\epsilon_g$ ——云母的相对介电常数， $\epsilon_g=7$ ;

$\epsilon_0$ ——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

云母片的相对介电常数是空气的 7 倍, 其击穿电压不小于 1000kV/mm, 而空气仅为 3kV/mm。因此有了云母片, 极板间起始距离可大大减小。同时  $dg/(\epsilon_0\epsilon_g)$  项是恒定值, 它能使传感器的输出特性的线性度得到改善。

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 $\mu$ 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

## 变面积型电容式传感器

动极板移动引起两极板有效覆盖面积  $A$  改变, 从而得到电容量的变化。当平移  $\Delta x$  时, 电容变化量为

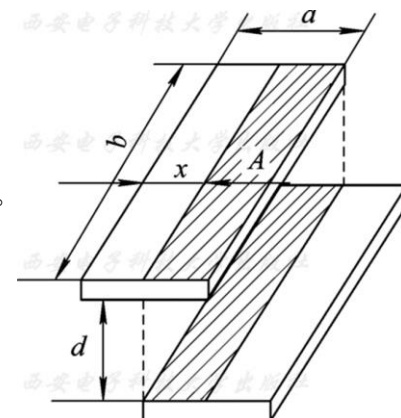
$$\Delta C = C - C_0 = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r b \Delta x}{d}$$

$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r ba/d$  为初始电容;

电容相对变化量为:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta x}{a}$$

电容量  $C$  与水平位移  $\Delta x$  呈线性关系。



电容式角位移传感器。

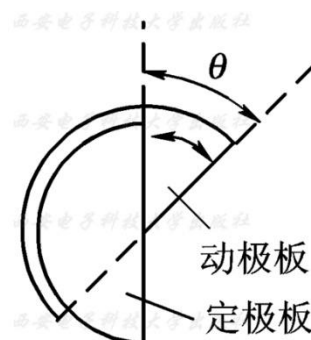
动极板有角位移  $\theta$  时, 与有效覆盖面积发生改变, 当  $\theta=0$  时, 有

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A_0}{d_0}$$

当  $\theta \neq 0$  时, 有

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A_0 \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right)}{d_0} = C_0 - C_0 \frac{\theta}{\pi}$$

电容量  $C$  与角位移  $\theta$  呈线性关系。



## 变介质型电容式传感器

改变极板间介质的方式测量液位高低的电容式传感器。

设

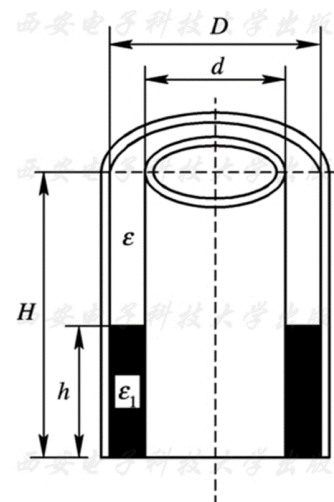
被测介质的介电常数为  $\epsilon_1$ ,

$\epsilon$ ——空气介电常数;

$C_0$ ——由变换器的基本尺寸决定的初始电容值

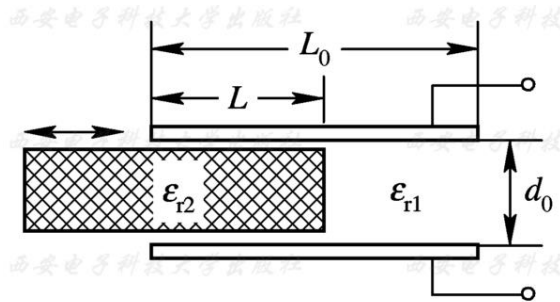
则

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



此时变换器电容值为 (可知电容增量正比于被测液位高度  $h$ 。)

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



两平行电极固定不动，极距为  $d_0$ ，相对介电常数为  $\epsilon_2$  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

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

$L_0$ 、 $b_0$ ——极板的长度、宽度；

$L$ ——第二种介质进入极板间的长度。

若电介质  $\epsilon_{r1}=1$ ，则当  $L=0$  时，传感器初始电容  $C_0 = \epsilon_0 \epsilon_{r1} L_0 b_0 / d_0$ 。当被测介质  $\epsilon_{r2}$  进入极板间  $L$  深度后，引起电容相对变化量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{(\epsilon_{r2} - 1)L}{L_0}$$

电容量的变化与电介质  $\epsilon_2$  的移动量  $L$  成线性关系

## 电容式传感器的灵敏度及非线性

只讨论变极距型平板电容式传感器的灵敏度及非线性。

电容的相对变化量为：

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

当  $|\Delta d/d_0| \ll 1$  时，上式可按级数展开，可得：

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

输出电容的相对变化量  $\Delta C/C_0$  与输入位移  $\Delta d$  之间成非线性关系，当  $|\Delta d/d_0| \ll 1$  时可略去高次项，得到近似的线性关系，如下式所示：

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

电容传感器的灵敏度为  $K$ ：

输出电容相对变化的大小与  $d_0$  呈反比关系

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

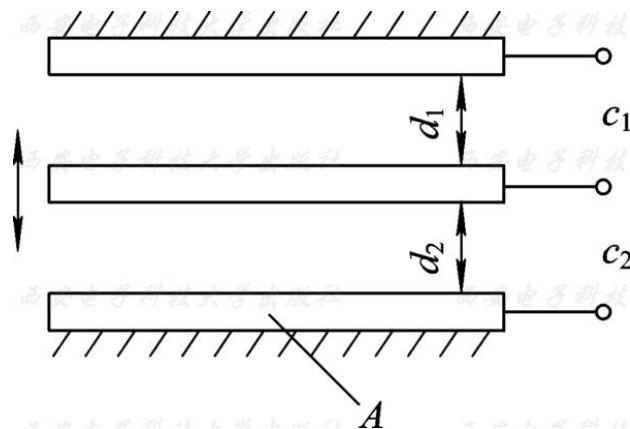
如果考虑式中的线性项与二次项，则  $\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \left( 1 + \frac{\Delta d}{d_0} \right)$

可得出传感器的相对非线性误差  $r_L$  为：

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

可以看出：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。

为了提高灵敏度，减小非线性误差，大都采用**差动式**结构。



在差动平板式电容器中，当动极板上移  $\Delta d$  时，

电容器  $C_1$  的间隙  $d_1$  变为  $d_0 - \Delta d$ ,  $C_1 = C_0 \frac{1}{1 - \Delta d/d_0}$

电容器  $C_2$  的间隙  $d_2$  变为  $d_0 + \Delta d$ ,  $C_2 = C_0 \frac{1}{1 + \Delta d/d_0}$

级数展开后相减，得电容值总变化量

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

电容值相对变化量：

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

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：

**误差：**

略去高次项，则  $\frac{\Delta C}{C_0} \approx 2 \frac{\Delta d}{d_0}$

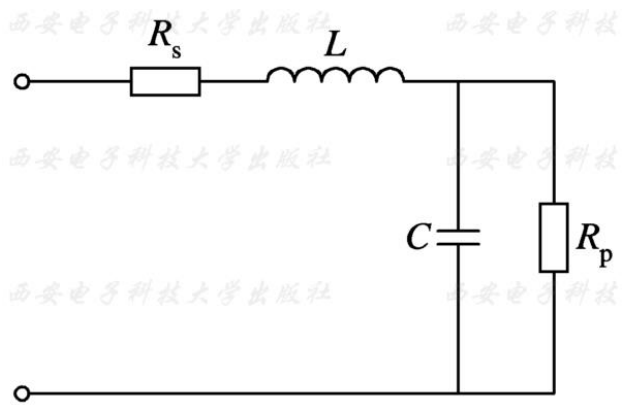
如果只考虑**相对变化量**中的线性项和三次项，

则电容式传感器的相对**非线性误差**  $r_L$  近似为：

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

做成**差动式**之后，**灵敏度增加了一倍**，而**非线性误差则大大降低了**。

## 电容式传感器的等效电路



$R_p$  为并联损耗电阻，它代表极板间的泄漏电阻和介质损耗。这些损耗在低频时影响较大，随着工作频率增高，容抗减小，其影响就减弱。 $R_s$  代表串联损耗，即代表引线电阻、电容器支架和极板电阻的损耗。电感  $L$  由电容器本身的电感和外部引线电感组成。

由等效电路可知，它有一个**谐振频率**，通常为几十兆赫。当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**，否则电容传感器不能正常工作。

传感元件的有效电容  $C_e$  可由下式求得(为了计算方便，忽略  $R_s$  和  $R_p$ )：

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{j\omega C_e} &= j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \\ C_e &= \frac{C}{1 - \omega^2 LC} \\ \Delta C_e &= \frac{\Delta C}{1 - \omega^2 LC} + \frac{\omega^2 LC \Delta C}{(1 - \omega^2 LC)^2} = \frac{\Delta C}{(1 - \omega^2 LC)^2} \end{aligned} \right\}$$

在这种情况下，电容的实际**相对变化量**为

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

电容式传感器的实际**相对变化量**与传感器的**固有电感  $L$**  的角频率  $\omega$  有关。

因此，在实际应用时必须与标定的条件相同。

## 电容式传感器的测量电路

电容式传感器中电容值以及电容变化值都十分微小，这样微小的电容量还不能直接为目前的显示仪表所显示，也很难为记录仪所接受。这就必须借助于测量电路检出这一微小电容增量，并将其转换成与其成单值函数关系的电压、电流或者频率。电容转换电路有**调频电路**、**运算放大器式电路**、二极管双 T 形交流电桥、脉冲宽度调制电路等。

### 调频电路



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。虽然可将频率作为测量系统的输出量，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

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

$L$ ——振荡回路的电感；

$C$ ——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

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

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，并与计算机通信，**抗干扰能力强，可以发送、接收，以达到遥测遥控的目的。**

### 运算放大器式电路

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。

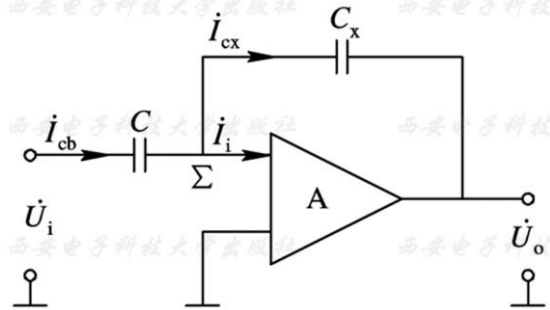
由运算放大器工作原理可得

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

$U_i$  是交流电源电压

$U_o$  是输出信号电压

$C_x$  为电容式传感器电容



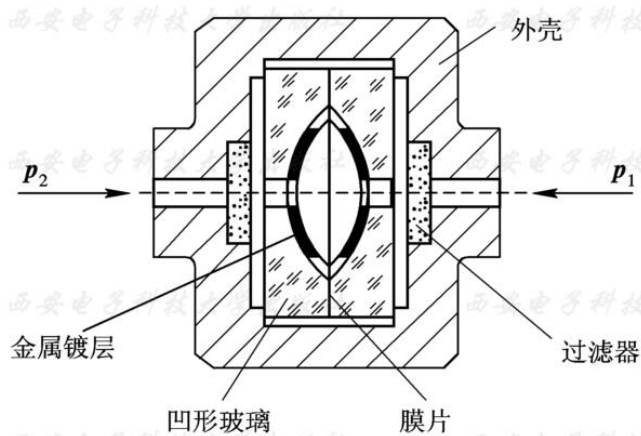
如果传感器是一只平板电容，则  $C_x = \epsilon S/d$ ，代入上式，可得

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

式中“-”号表示输出电压  $\dot{U}_o$  的相位与电源电压反相。上式说明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，但要求  $Z_i$  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。

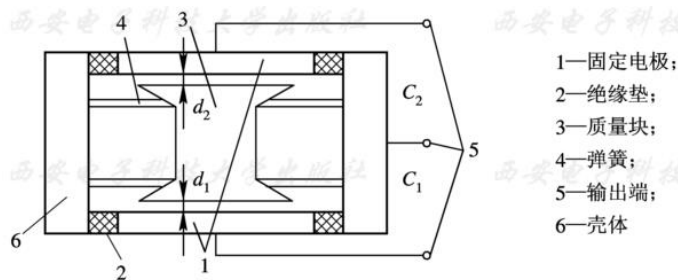
# 电容式传感器的应用

## 电容式压力传感器



图中所示膜片为动电极，两个在凹形玻璃上的金属镀层为固定电极，构成差动电容器。当被测压力或压力差作用于膜片并产生位移时，所形成的两个电容器的电容量，一个增大，一个减小。  
该电容值的变化经测量电路转换成与压力或压力差相对应的电流或电压的变化。

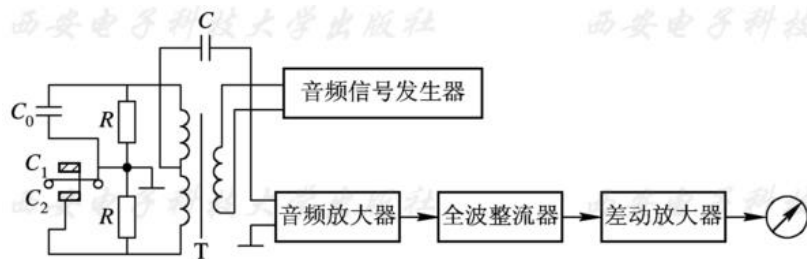
## 电容式加速度传感器



它有两个固定极板(与壳体绝缘)，中间有一用弹簧片支撑的质量块，此质量块的两个端面经过磨平抛光后作为可动极板(与壳体电连接)。  
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。

## 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  $C_1$ 、 $C_2$ 。把两块极板用导线连接起来成为一个极，而带材就是电容的另一个极，其总电容为  $C_1 + C_2$ ，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。

音频信号发生器产生的音频信号，接入变压器  $T$  的原边线圈，变压器副边的两个线圈作为测量电桥的两臂，电桥的另外两桥臂由标准电容  $C_0$  和带材与极板形成的被测电容  $C_x$  ( $C_x = C_1 + C_2$ ) 组成。电桥的输出电压经放大器放大后整流为直流，再经差动放大，即可用指示电表指示出带材厚度的变化。