

# 第五章 电容式传感器

## 5-1 工作原理与特性

以最简单的平行极板电容器为例说明其工作原理。在忽略边缘效应的情况下，平板电容器的电容量为：

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{\delta}$$

式中 $\epsilon_0$ —真空的介电常数，( $\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12}\text{F/m}$ )；

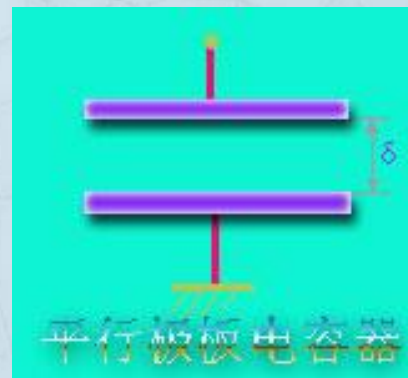
$S$ —极板的遮盖面积 ( $\text{m}^2$ )；

$\epsilon$ —极板间介质的相对介电系数，在空气中， $\epsilon=1$ ；

$\delta$ —两平行极板间的距离 ( $\text{m}$ )。

上式表明，当被测量 $\delta$ 、 $S$ 或 $\epsilon$ 发生变化时，都会引起电容的变化。如果保持其中的两个参数不变，而仅改变另一个参数，就可把该参数的变化变换为单一电容量的变化，再通过配套的测量电路，将电容的变化转换为电信号输出。

根据电容器参数变化的特性，电容式传感器可分为：**极距变化型**、**面积变化型**和**介质变化型**三种，其中极距变化型和面积变化型应用较广。



## 一、极距变化型：

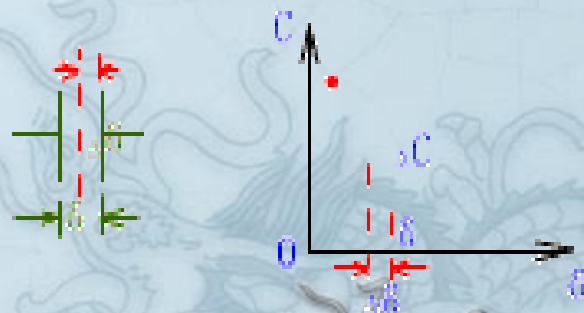
工作原理图如下。如果两极板相互覆盖面积及极间介质不变，当两极板在被测参数作用下发生位移，引起电容量的变化为：

$$dC = -\frac{\epsilon_0 \epsilon S}{\delta^2} d\delta$$

由此可得到传感器的灵敏度为：

$$K = \frac{dC}{d\delta} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon S}{\delta^2} = -\frac{C}{\delta}$$

从上式可看出，灵敏度 $K$ 与极距平方成反比，极距愈小，灵敏度愈高。一般通过减小初始极距来提高灵敏度。由于电容量 $C$ 与极距 $\delta$ 呈非线性关系，故这将引起非线性误差。为了减小这一误差，通常规定测量范围  $\Delta\delta \ll \delta_0$  一般取极距变化范围为  $\Delta\delta \ll \delta_0 \approx 0.1$ ，此时，传感器的灵敏度近似为常数。实际应用中，为了提高传感器的灵敏度、增大线性工作范围和克服外界条件(如电源电压、环境温度等)的变化对测量精度的影响，常常采用差动型电容式传感器。



极距变化型电容器



## 二、面积变化型：

下图为典型的角位移型电容式传感器。  
当动板有一转角时，与定板之间相互覆盖的面积发生变化，因而导致电容量变化。当覆盖面积对应的中心角为 $\alpha$ 、极板半径为 $r$ 时，覆盖面积为：

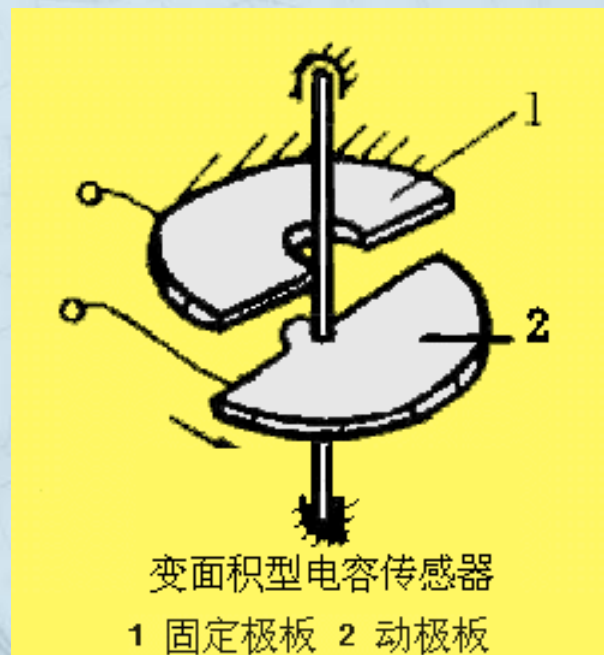
$$S = \frac{\alpha r^2}{2}$$

电容量为：

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 \alpha r^2}{2\delta}$$

其灵敏度为：

$$K = \frac{dC}{d\alpha} = \frac{\epsilon \epsilon_0 r^2}{2\delta} = \text{常数}$$



以上介绍的两种传感器可以进行动态非接触测量，对被测系统影响小。极距变化型电容传感器灵敏度高，但非线性大，故常用于微小位移测量。面积变化型电容传感器是一种线性传感器，可以测量较大的直线位移和角度位移，但灵敏度较低。介电常数变化型电容传感器是在两极板间加上介质构成的。由于各种介质的介电常数不同，当极板间的介电常数变化时电容量随之变化。常用于检测容器中液面的高度、溶液浓度和板材的厚度等。



## 5-2 测量电路

### 一、电桥电路：

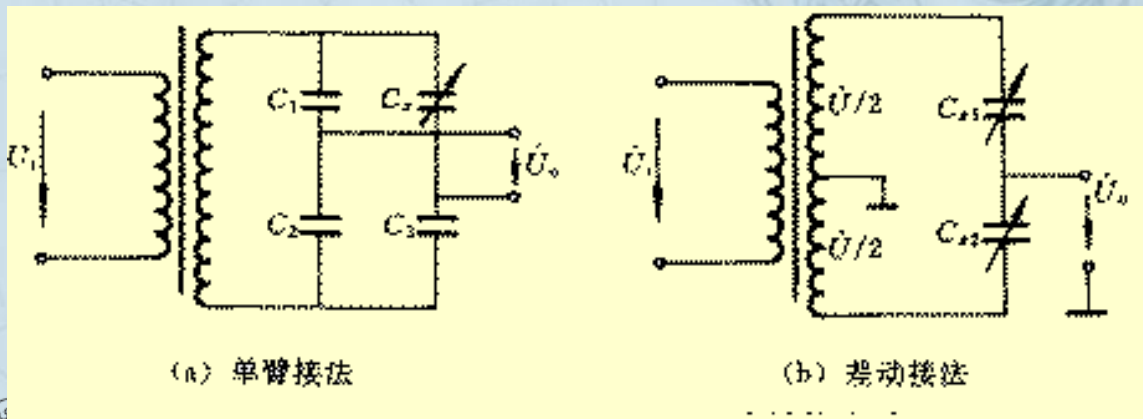
如图为桥式转换电路。图(a)为单臂接法的桥式测量电路，高频电源经变压器接到电容桥的一个对角线上，电容 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_x$ 构成电桥的四臂， $C_x$ 为电容传感器。交流电桥平衡时：

$$C_1/C_2 = C_x/C_3$$

当 $C_x$ 改变时， $U_o \neq 0$ ，有输出电压。在图(b)中，接有差动电容传感器，其空载输出电压可用下式表示：

$$U_o = (C_{x1} - C_{x2}) / (C_{x1} + C_{x2}) \times (U/2) = \pm (\Delta C / C_0) \times (U/2)$$

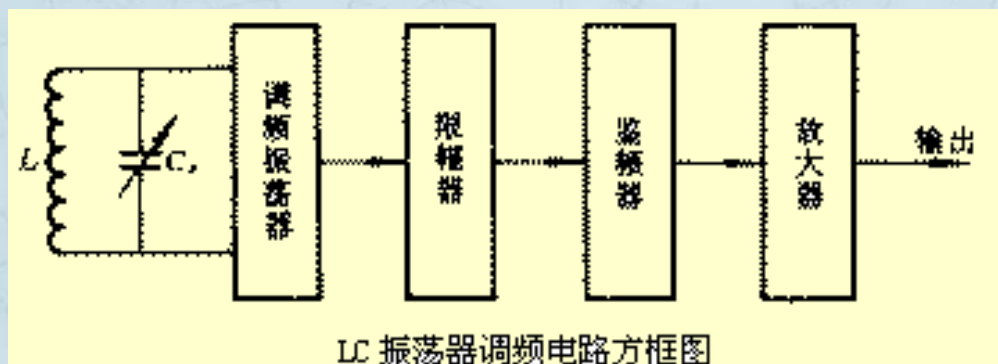
式中  $C_0$ —传感器的初始电容值； $\Delta C$ —传感器电容的变化值。  
该线路的输出还应经过相敏检波电路才能分辨 $U_o$ 的相位。



## 二、调频电路

这种电路是将电容式传感器作为LC振荡器谐振回路的一部分，或作为晶体振荡器中的石英晶体的负载电容。当电容传感器工作时，电容 $C_x$ 发生变化，使振荡器的频率 $f$ 发生相应的变化。由于振荡器的频率受电容式传感器的电容调制，这样就实现了 $C/f$ 的变换，故称为调频电路。图为LC振荡器调频电路方框图。调频振荡器的频率可由下式决定：

$$f=1/(2\pi\sqrt{LC})$$



LC 振荡器调频电路方框图

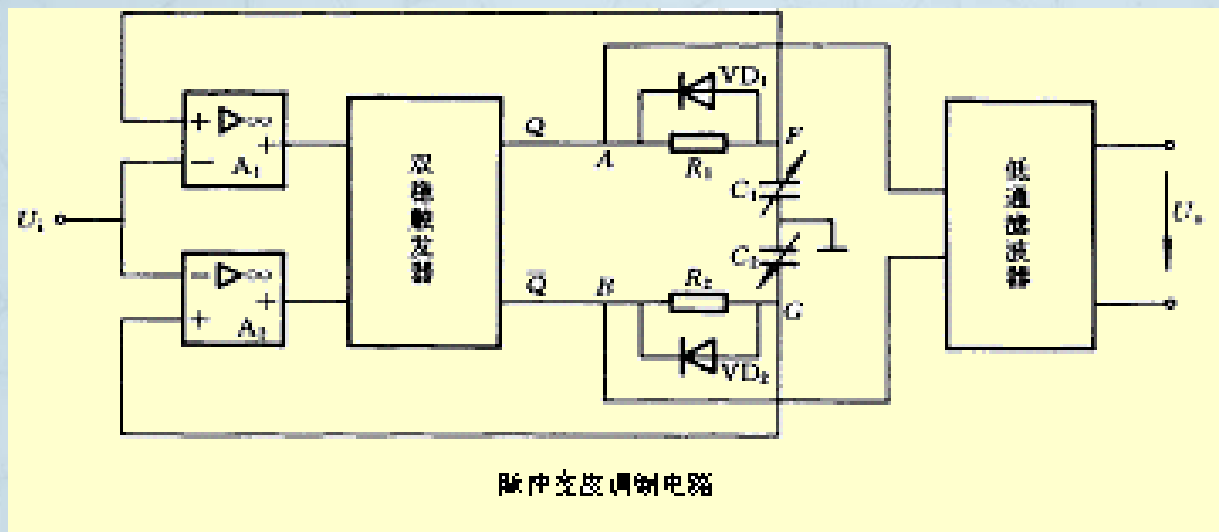
式中  $L$ ——振荡回路电感； $C$ ——振荡回路总电容。

$C$ 包括传感器电容 $C_x$ 、谐振回路中的微调电容 $C_1$ 和传感器电缆分布电容 $C_c$ ，即  $C=C_x+C_1+C_c$ 。

振荡器输出的高频电压是一个受被测量控制的调频波，频率的变化在鉴频器中变换为电压幅度的变化，经过放大器放大后就可用仪表来指示。



### 三、脉冲宽度调制电路



脉冲宽度调制电路是利用对传感器电容的充放电，使电路输出脉冲的宽度随电容传感器的电容量变化而改变，通过低通滤波器得到对应于被测量变化的直流信号。脉冲宽度调制电路如上图所示。

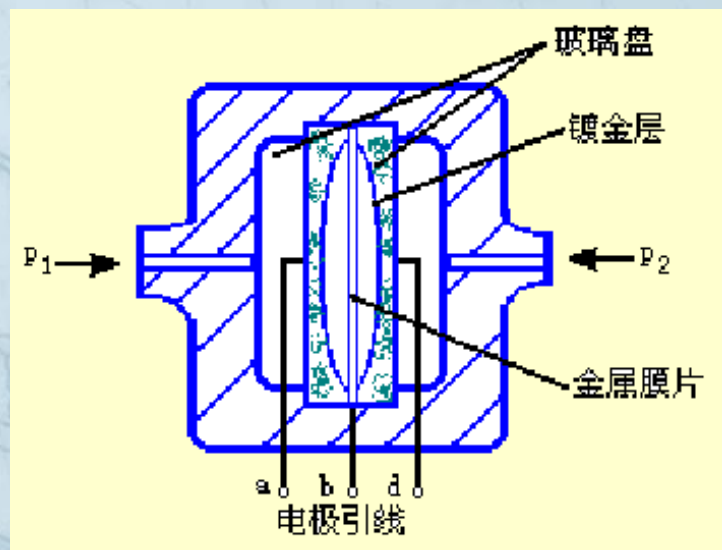


## 5-3 电容式传感器的应用：

### 一、电容式压力传感器

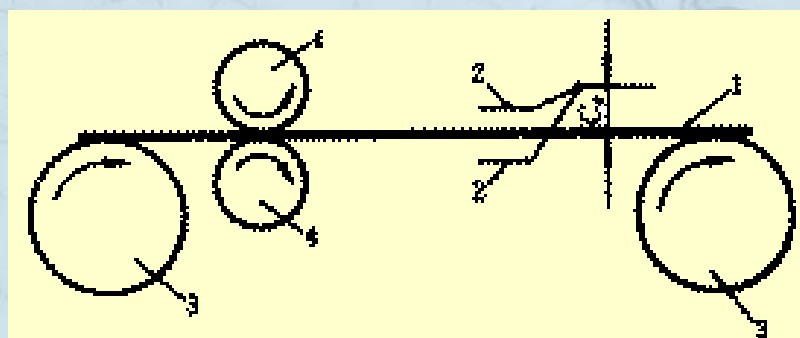
电容式压力传感器一般都利用弹性膜片作为敏感元件，利用弹性膜片在压力作用下的变形，以改变膜片与电容固定电极之间的距离，由此改变电容式传感器的电容量。右图为差动式电容压力传感器的结构原理图。由图可知，该传感器主要由一个动电极、两个固定电极和这三个电极的引出线组成。动电极为圆形薄金属膜片，它既是动电极，又是压力的敏感元件，固定电极为中凹的镀金玻璃圆片。

当被测压力(或压差)通过过滤器进入空腔时，弹性膜片两侧的压力差使膜片凸向一侧。这一位移使两个镀金玻璃圆片与膜片之间的电容量发生变化，经过测量电路再转换成相应的电压或电流变化。当两极板之间的距离很小时，压力和电容之间为线性关系。



## 二、电容测厚仪

下图为测量厚度的电容测厚仪原理图。在被测金属带材的上下两侧各放置一块面积相等，与带材距离相等的极板2，这样极板与带材就形成了两个电容器。把两块极板用导线连接起来就成为一个极板，而金属带材就是电容的另一个极板，其总电容 $C_x = C_1 + C_2 = 2C$ 。如果带材厚度发生变化，则引起电容量的变化。用交流电桥将电容的变化检测出来，经过放大，即可由电容测厚仪显示出带材厚度的变化。



电容测厚仪示意图

1—金属带材；2—电极极板；3—传动轮；4—轧辊

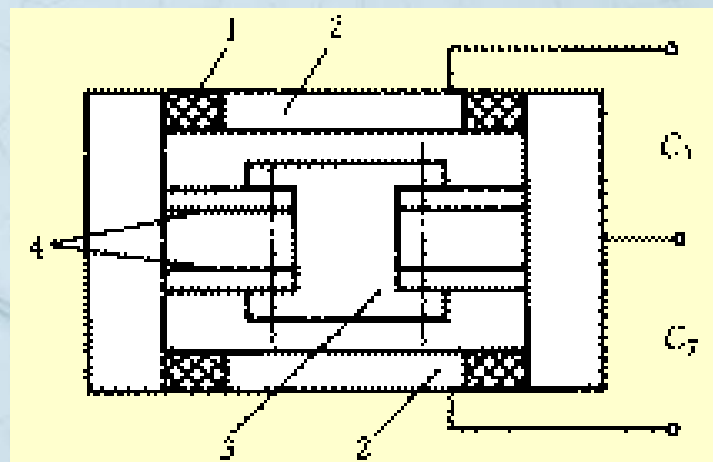




### 三、电容式加速度传感器

采用弹簧—质量系统将被测加速度变换成力或位移量，然后再通过电容式传感换成相应的电参量。

右图中的电容式加速度传感器就是基于这一原理制成的。该传感器两极板之间有一用弹簧支撑的质量块，此质量块的两个端面经磨平抛光后作为可动极板。当传感器的壳体测量垂直方向的振动时，由于质量块的惯性作用，使两固定电极板相对质量块产生位移。此时，上下两个固定电极与质量块端面之间的电容量产生变化，使传感器有一个差动的电容变化量输出。



电容式加速度传感器

- 1…绝缘体；2…固定电极；
- 3…质量块（动电极）；4…弹簧片

