



# 阻抗式传感器

Impedance Sensors





## 3.2 电容式传感器

### 3.2.1 电容式传感器的工作原理及结构形式

1. 变间隙的电容式传感器
2. 变面积的电容式传感器
3. 变介电常数的电容式传感器

### 3.2.2 电容式传感器的等效电路

### 3.2.3 电容式传感器的信号调理电路

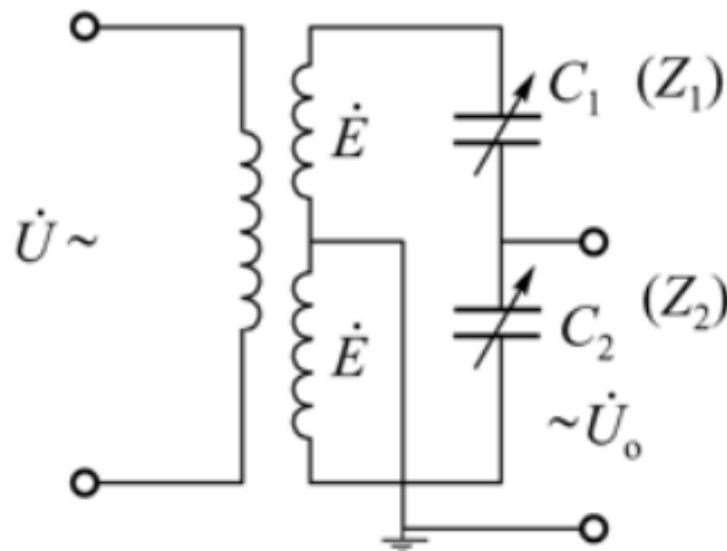
### 3.2.4 影响电容传感器精度的因素及提高精度的措施

### 3.2.5 电容式传感器的应用



# 1. 变压器电桥电路

电桥电路是电容式传感器最基本的  
一种测量电路。图中 $C_1$ 与 $C_2$ 是差动电  
容传感器的两个电容，另两个臂是变压  
器的两个次级线圈，可以是电阻、电容  
或电感。



$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E} + \dot{E}}{Z_2 + Z_1} Z_1 - \dot{E} = \dot{E} \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

$$C_1 = \frac{\epsilon A}{d + \Delta d}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon A}{d - \Delta d}$$

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1} = \frac{d + \Delta d}{j\omega \epsilon A}$$

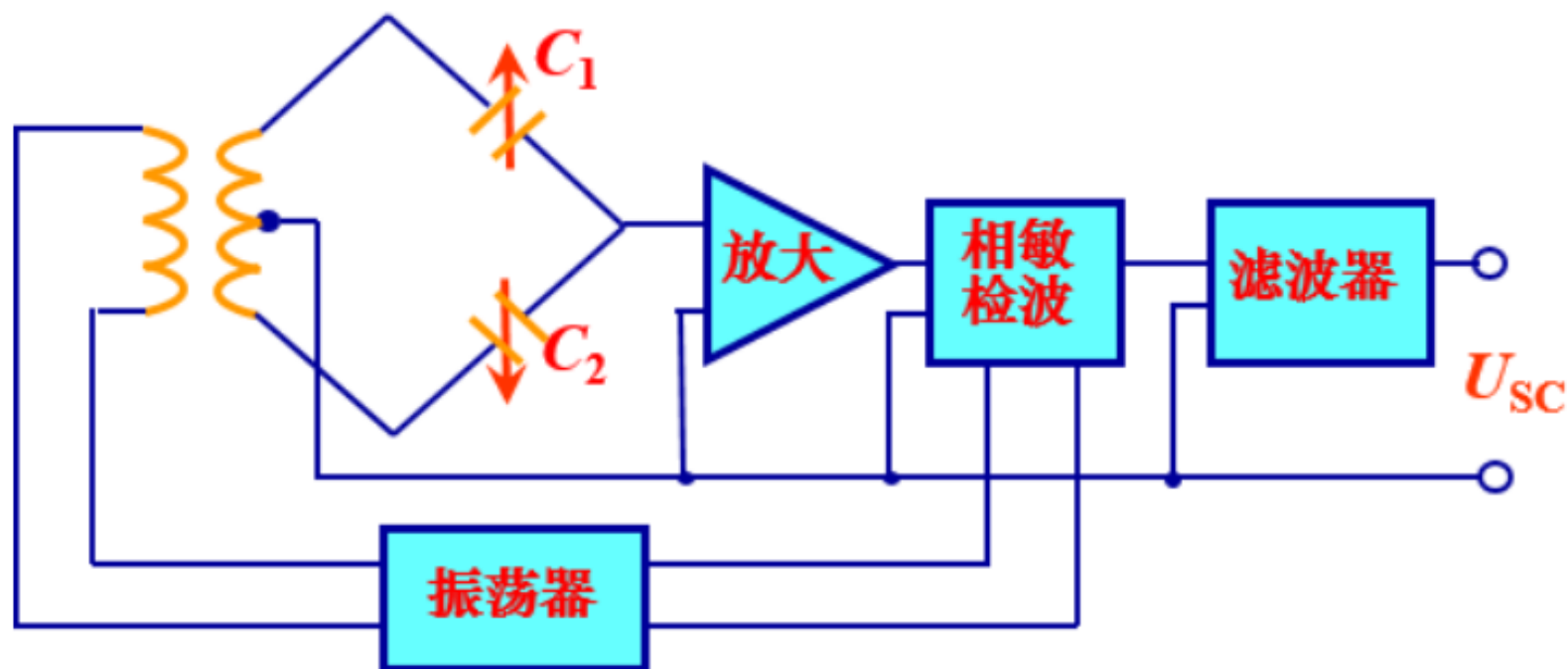
$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2} = \frac{d - \Delta d}{j\omega \epsilon A}$$



$$\dot{U}_0 = \dot{E} \frac{\Delta d}{d}$$



# 1. 变压器电桥电路



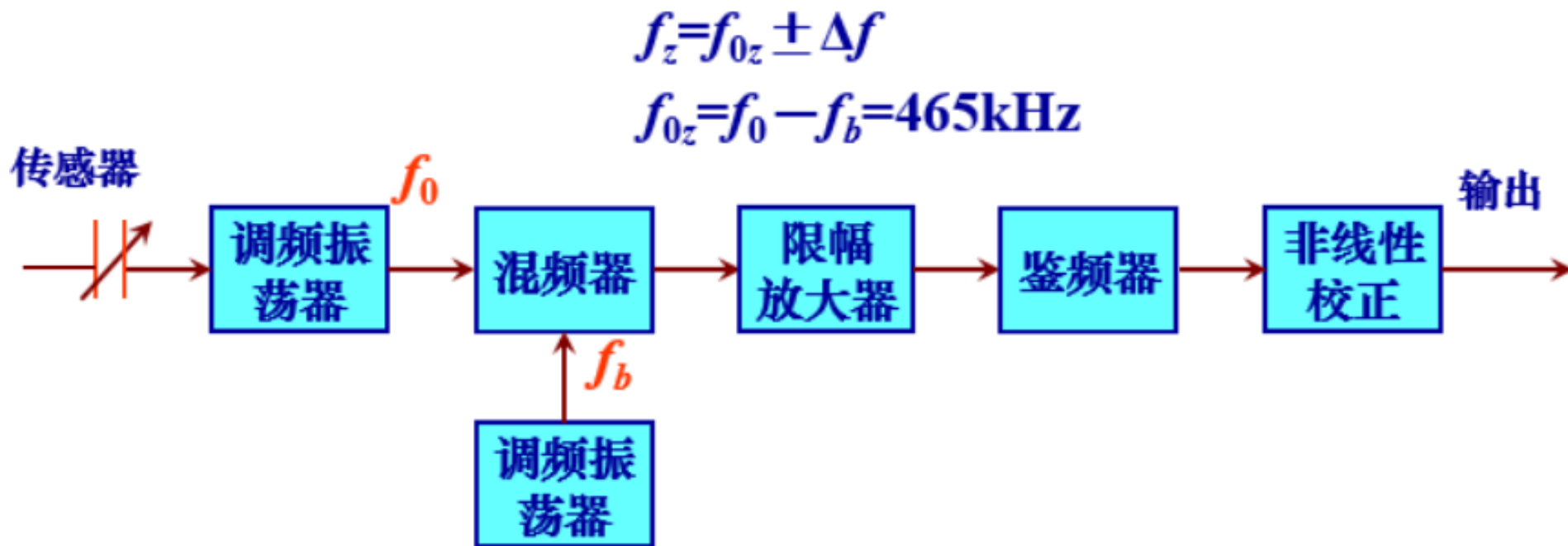
电桥测量电路

由于电桥输出电压与电源电压成比例，因此要求**电源电压波动极小，需采用稳幅、稳频等措施。**



## 2. 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。

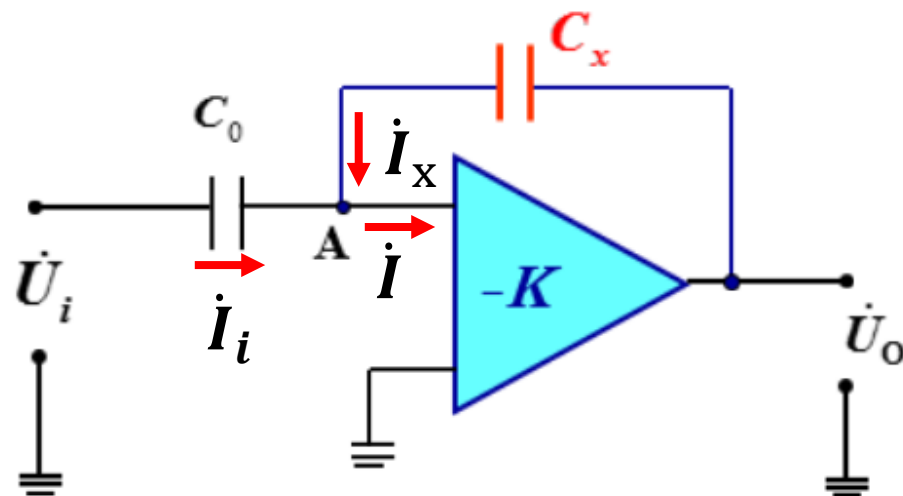


外差式调频电路方框图



### 3. 运算放大器式电路

$C_x$ 为传感器， $C_0$ 为固定电容。当运算放大器输入阻抗很高、增益很大时，可认为运算放大器输入电流为零。



$$\dot{I}_i = \dot{U}_i j\omega C_0$$

$$\dot{I}_x = \dot{U}_o j\omega C_x$$



$$\dot{U}_o = -\dot{U}_i \frac{C_0}{C_x}$$

$$\dot{I}_i + \dot{I}_x = 0$$

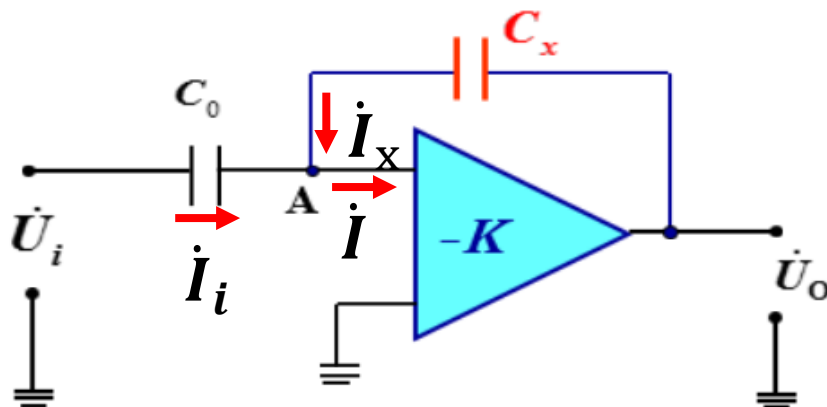


### 3. 运算放大器式电路

若传感器是一平行板电容，则：

$$C_x = \frac{\epsilon S}{d}$$

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{U}_i C_o}{\epsilon S} d$$

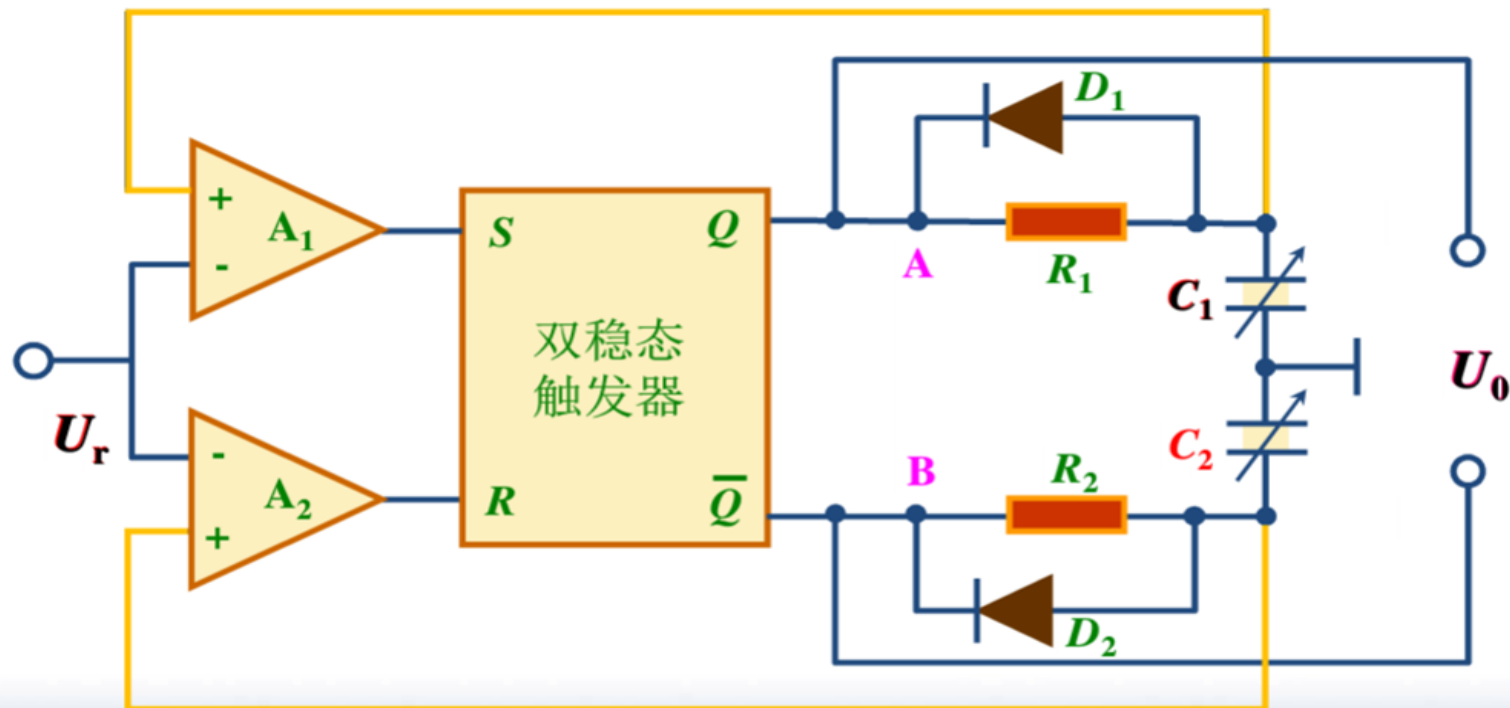


- 可见运算放大器的输出电压与动极板的板间距离成正比。运算放大器电路解决了单个变极距型电容传感器的非线性问题。
- 上式是在运算放大器的**放大倍数和输入阻抗无限大**的条件下得出的，实际上该测量电路仍然存在一定的非线性。



## 4. 脉冲宽度调制电路

- 利用对传感器电容的充、放电使电路输出脉冲的宽度随传感器电容量变化而变化。通过低通滤波器得到对应被测量变化的直流信号。







## 4. 脉冲宽度调制电路

根据电路知识可知：

$$U_{AP} = \frac{T_1}{T_1 + T_2} U_1 \quad U_{BP} = \frac{T_2}{T_1 + T_2} U_1$$

$U_{AP}$ 、 $U_{BP}$ —A点和B点的矩形脉冲的平均值；

$T_1$ 、 $T_2$ —分别为 $C_1$ 和 $C_{12}$ 的充电时间；

$U_1$ —触发器输出的高电位。

$C_1$ 、 $C_2$ 的充电时间 $T_1$ 、 $T_2$ 为：

$$T_1 = R_1 C_1 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_r} \quad T_2 = R_2 C_2 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_r}$$



## 4. 脉冲宽度调制电路

A、B两点间的电压经低通滤波器滤波后获得，等于  
A、B两点电压平均值 $U_{AP}$ 与 $U_{BP}$ 之差

$$U_0 = U_{AP} - U_{BP} = \frac{T_1}{T_1 + T_2} U_1 - \frac{T_2}{T_1 + T_2} U_1 = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} U_1$$

设 $R_1 = R_2 = R$ ，则

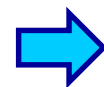
$$U_0 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1$$

对于差动电容  
改变极板间距



$$U_0 = \frac{\Delta d}{d_0} U_1$$

对于差动电容  
改变极板面积



$$U_0 = \frac{\Delta A}{A_0} U_1$$



### 3.2.4 影响电容传感器精度的因素及提高精度的措施

电容传感器具有高灵敏度和高精度等优点，但这许多优点都与传感器的正确设计、正确选材及精细加工工艺有关。同时也应该注意影响其精度的各种因素。

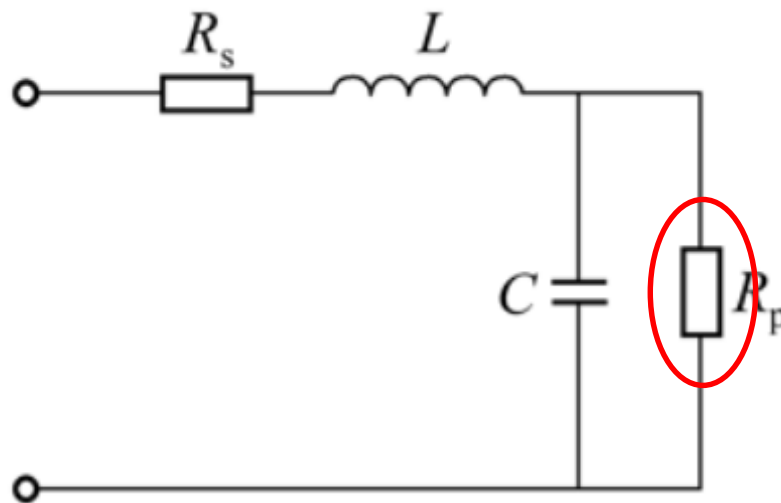


# 1. 温度的影响

- 对传感器几何尺寸的影响
- 对介质介电常数的影响



## 2. 漏电阻的影响



电容式传感器的电容量很小，一般为**几十pF**。如果激励频率较低时，电容传感器的容抗很高，达**几十兆欧**，由于具有这样高的内阻抗，所以绝缘问题显得十分突出。



## 2. 漏电阻的影响

漏电阻与传感器的容抗相近时，将使系统总的**灵敏度下降**。甚至当绝缘材料性能不够好的时候，绝缘电阻会随着环境温度和湿度而变化，致使传感器的输出存在**零漂**。

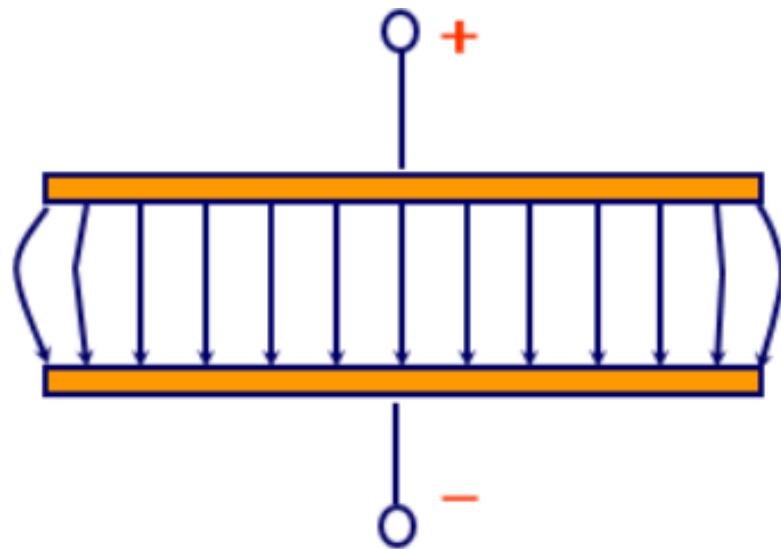
选用**绝缘性能好的材料**（陶瓷、石英等）作两极板间支架；采用**高的激励电源频率**（数千赫至数兆赫）降低传感器的内阻。



### 3. 边缘效应的影响

**适当减小极间距**，使电极直径或边长与间距比增大，可减小边缘效应的影响，但易产生击穿并有可能限制测量范围。

**电极应做得极薄**使之与极间距相比很小，这样也可减小边缘电场的影响。

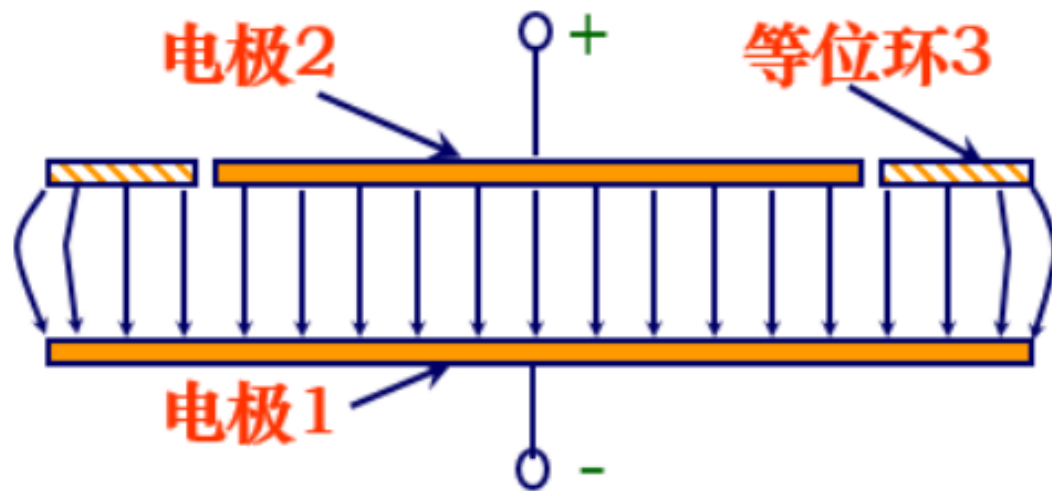




### 3. 边缘效应的影响

可在结构上增设等位环来消除边缘效应。

等位环3与电极2同平面并将电极2包围，彼此电绝缘但等电位，使电极1和2之间的电场基本均匀，而发散的边缘电场发生在等位环3外周不影响传感器两极板间电场。



带有等位环的平板式电容器传感器

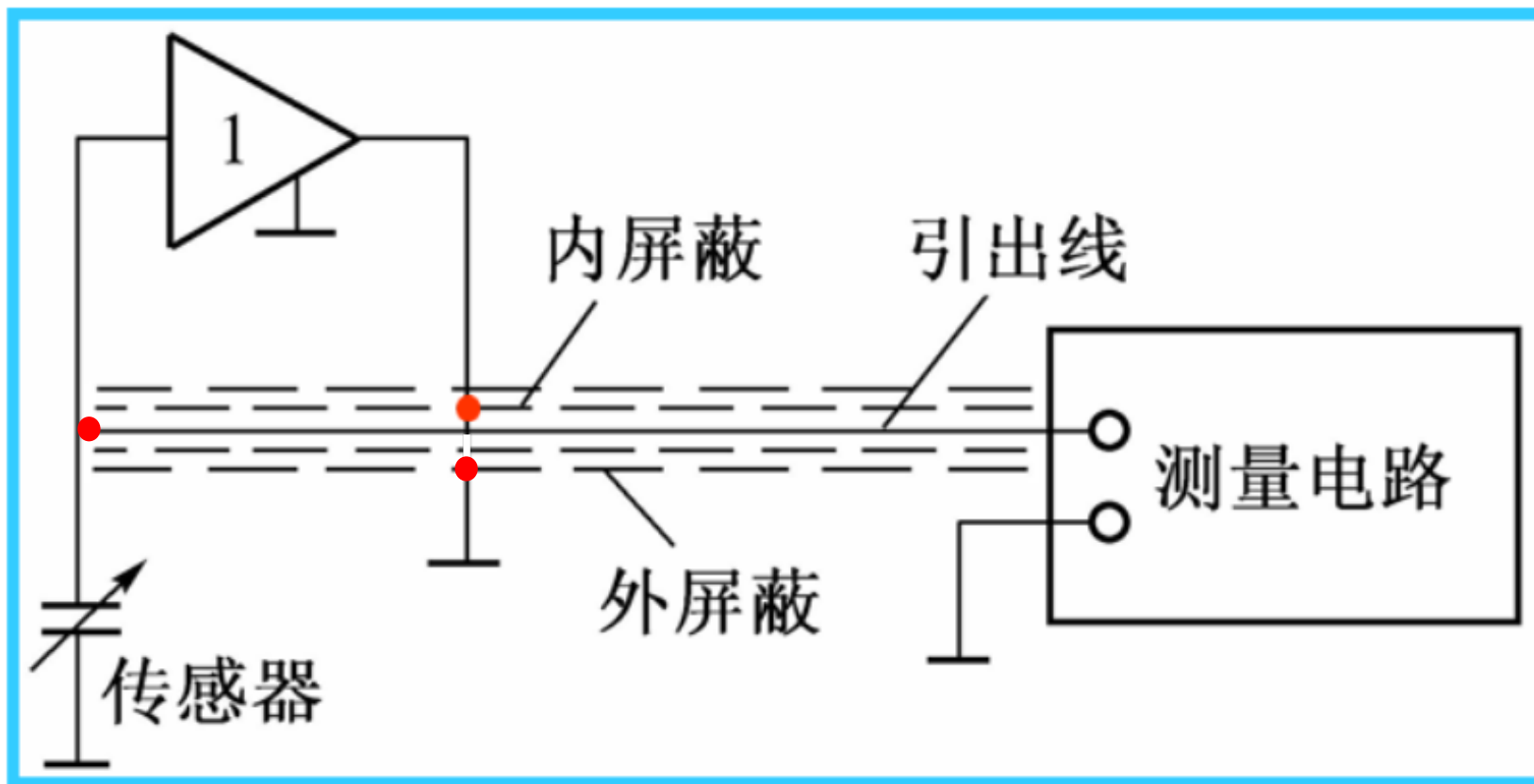




## 4. 寄生电容的影响

- 任何两个导体之间均可构成电容联系，因此电容式传感器除了极板间的电容外，极板还可能与周围物体之间产生电容联系。这种附加的电容，称之为**寄生电容**。
- 寄生电容与传感器电容相并联，影响传感器灵敏度。
  - 增加传感器原始电容值
  - 注意传感器的接地和屏蔽
  - 集成化
  - 采用“驱动电缆”技术
  - 整体屏蔽法

## 4. 寄生电容的影响

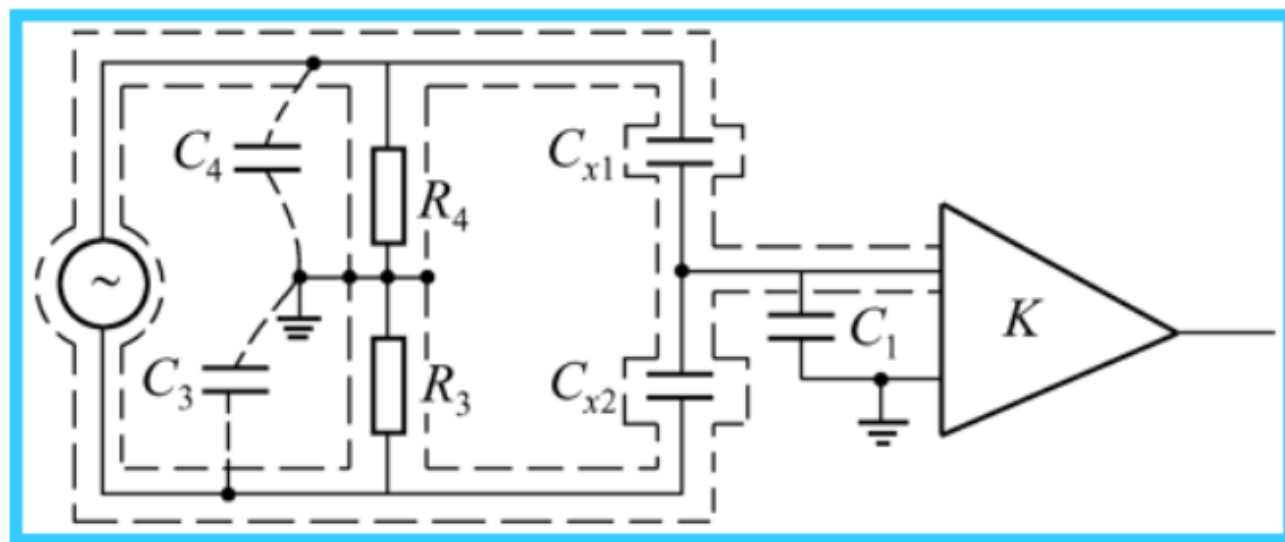


驱动电缆法



## 4. 寄生电容的影响

将电容式传感器和所采用的转换电路、传输电缆等用同一个屏蔽壳屏蔽起来，正确选取接地点可减小寄生电容的影响和防止外界的干扰。



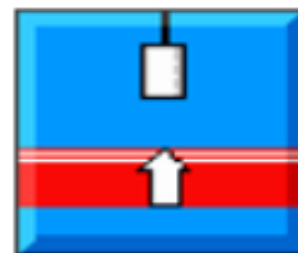
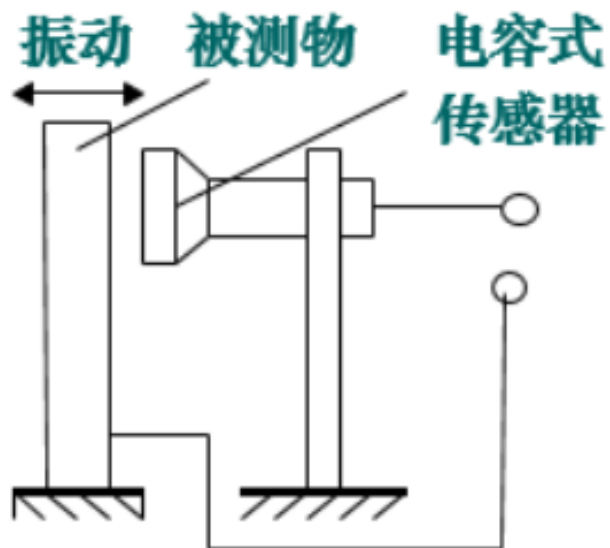
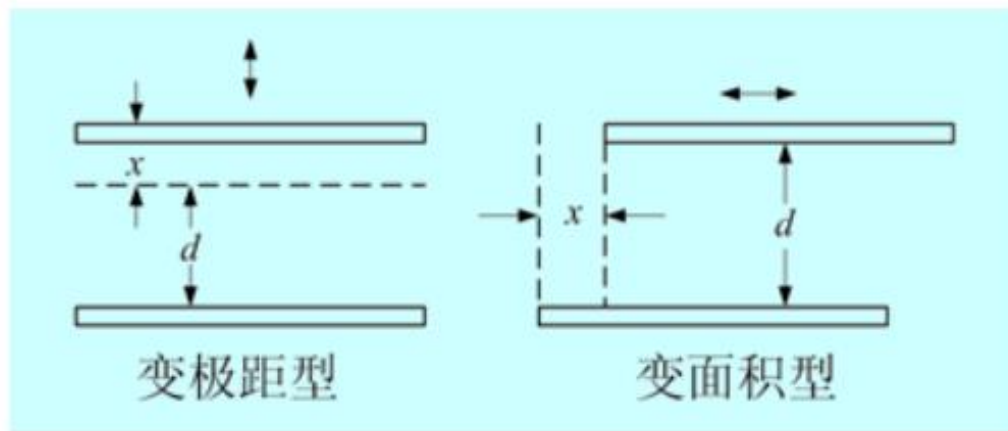
### 整体屏蔽法



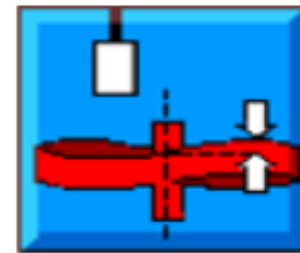
## 3.2.5 电容式传感器的应用

电子技术的发展，解决了电容式传感器存在的许多技术问题，使电容式传感器不但广泛应用于精确测量位移、厚度、角度、振动等物理量，还应用于测量力、压力、差压、流量、成分含量（油、粮食中的水分）、非金属材料的涂层、油膜等的厚度、电介质的湿度、密度、厚度等。

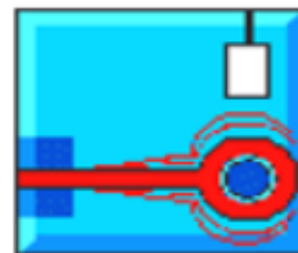
# 1. 电容式位移传感器



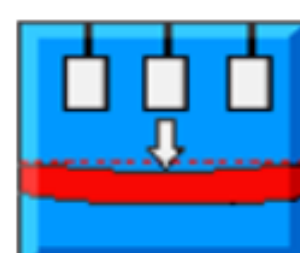
位移



变形



振动

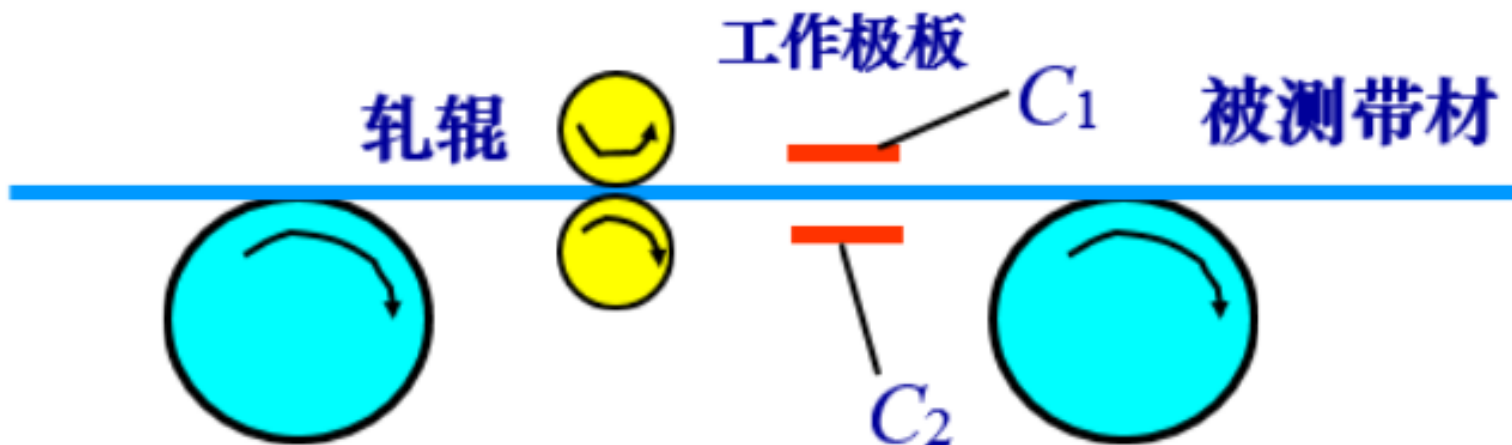


弯曲



# 1. 电容式位移传感器

## 电容测厚传感器在板材轧制装置中的应用



$C_1$ 、 $C_2$ 工作极板与带材之间形成两个电容。当金属带材在轧制中厚度发生变化时，将引起电容量的变化。通过检测电路可以反映这个变化，并转换和显示出带材的厚度。



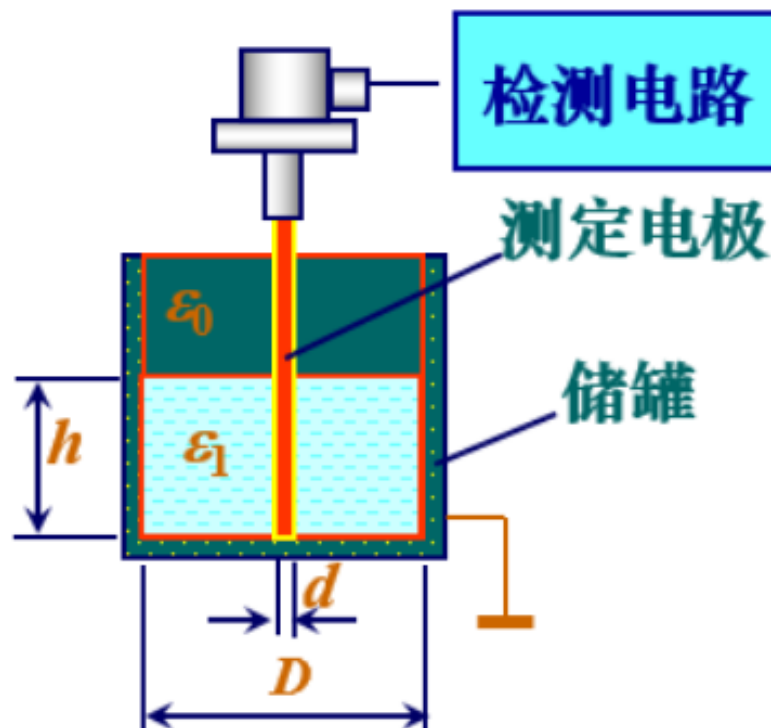
# 1. 电容式位移传感器

电容式液位计利用液位高低变化影响电容器电容量大小的原理进行测量。依此原理还可进行其它形式的物位测量。**对导电介质和非导电介质都能测量**，此外还能测量有倾斜晃动及高速运动的容器的液位。不仅可作液位控制器，还能用于连续测量。



# 1. 电容式位移传感器

## 电容式料液位传感器



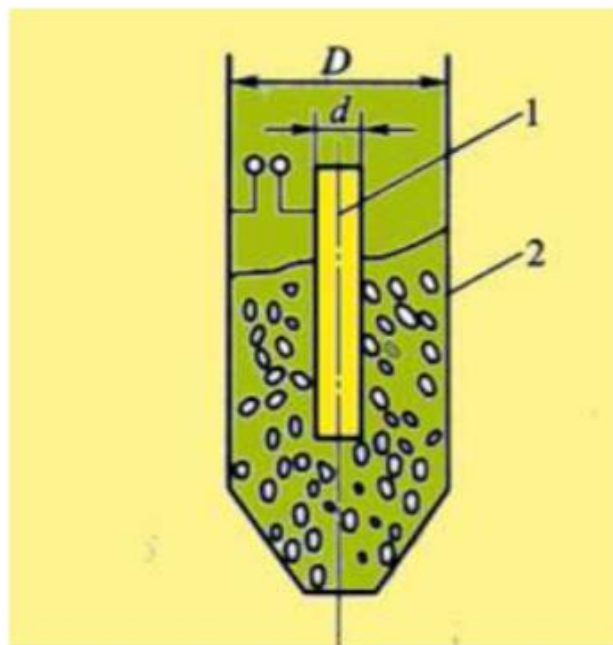
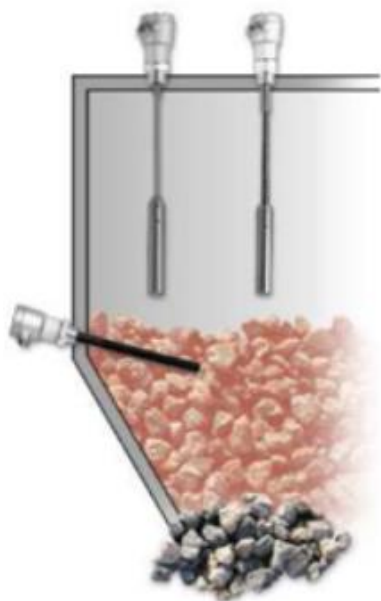
测定电极安装在金属储罐的顶部，储罐的罐壁和测定电极之间形成了一个电容器。





# 1. 电容式位移传感器

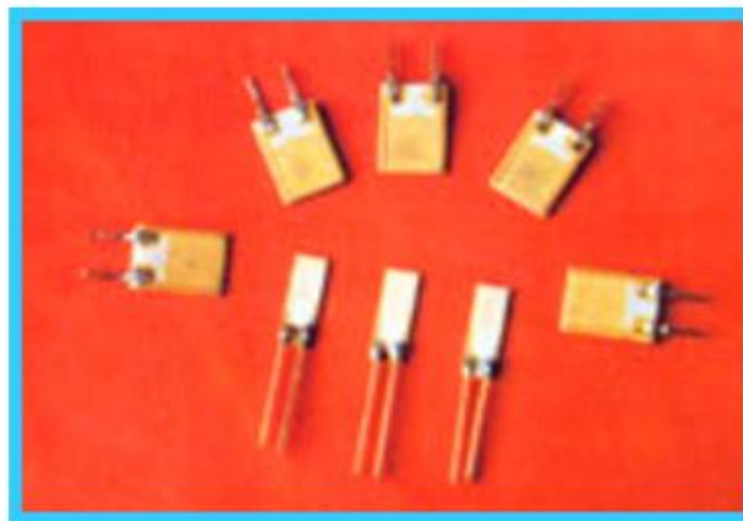
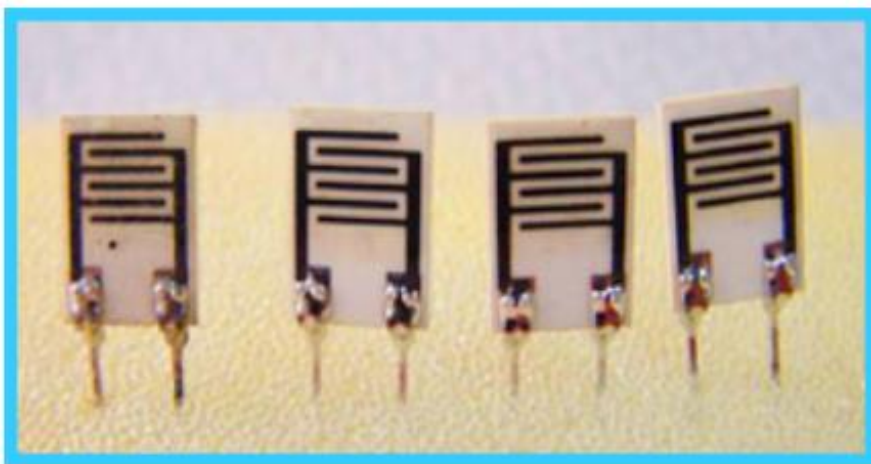
电容式料位计不仅能测不同性质的液体，而且还能测量不同性质如块状、颗粒状、粉状、导电性、非导电性的物料。





## 2. 电容式湿敏传感器

- 湿敏电容一般是用**高分子薄膜电容**制成的，常用的高分子材料有聚苯乙烯、聚酰亚胺、酪酸醋酸纤维等。
- 当环境湿度发生改变时，湿敏电容的**介电常数**发生变化，使其电容量也发生变化，其电容变化量与相对湿度成正比。





## 2. 电容式湿敏传感器

### 湿敏电容模块及传感器外形





## 2. 电容式湿敏传感器

### 湿敏电容传感器的安装使用



在野外的使用



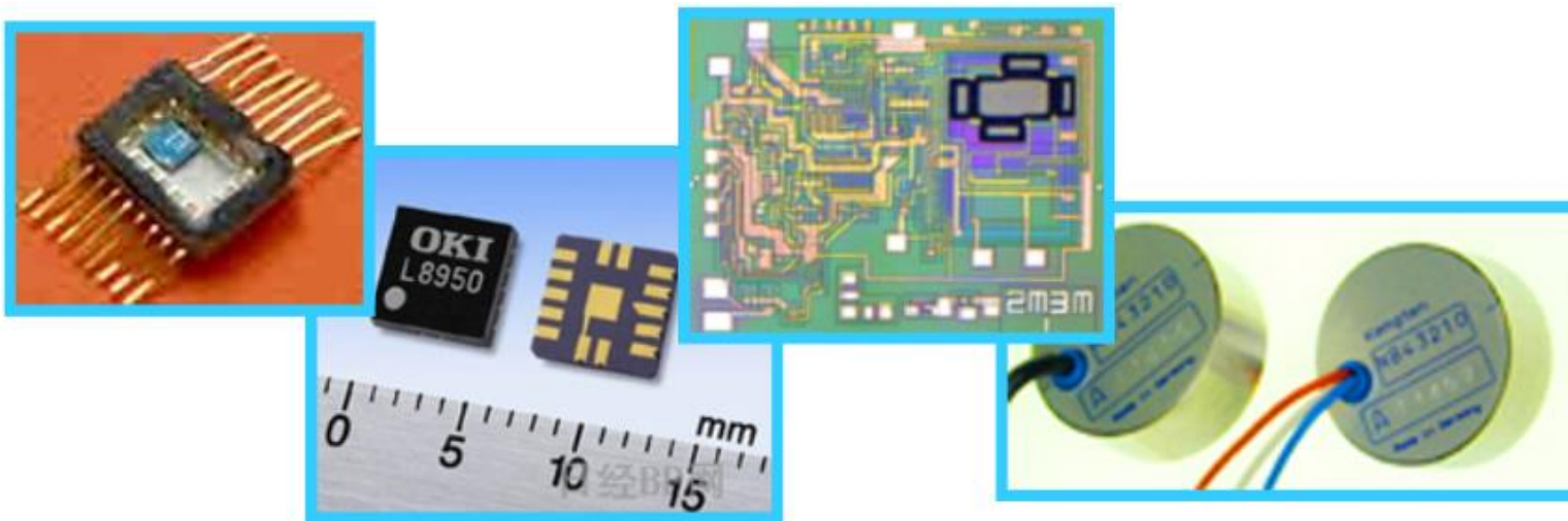
带报警器的家庭使用型





### 3. 电容式微加速度传感器

- 以微细加工技术为基础，既能测量交变加速度（振动），也可测量惯性力或重力加速度。
- 工作电压为2.7~5.25V，加速度测量范围为数g。





### 3. 电容式微加速度传感器



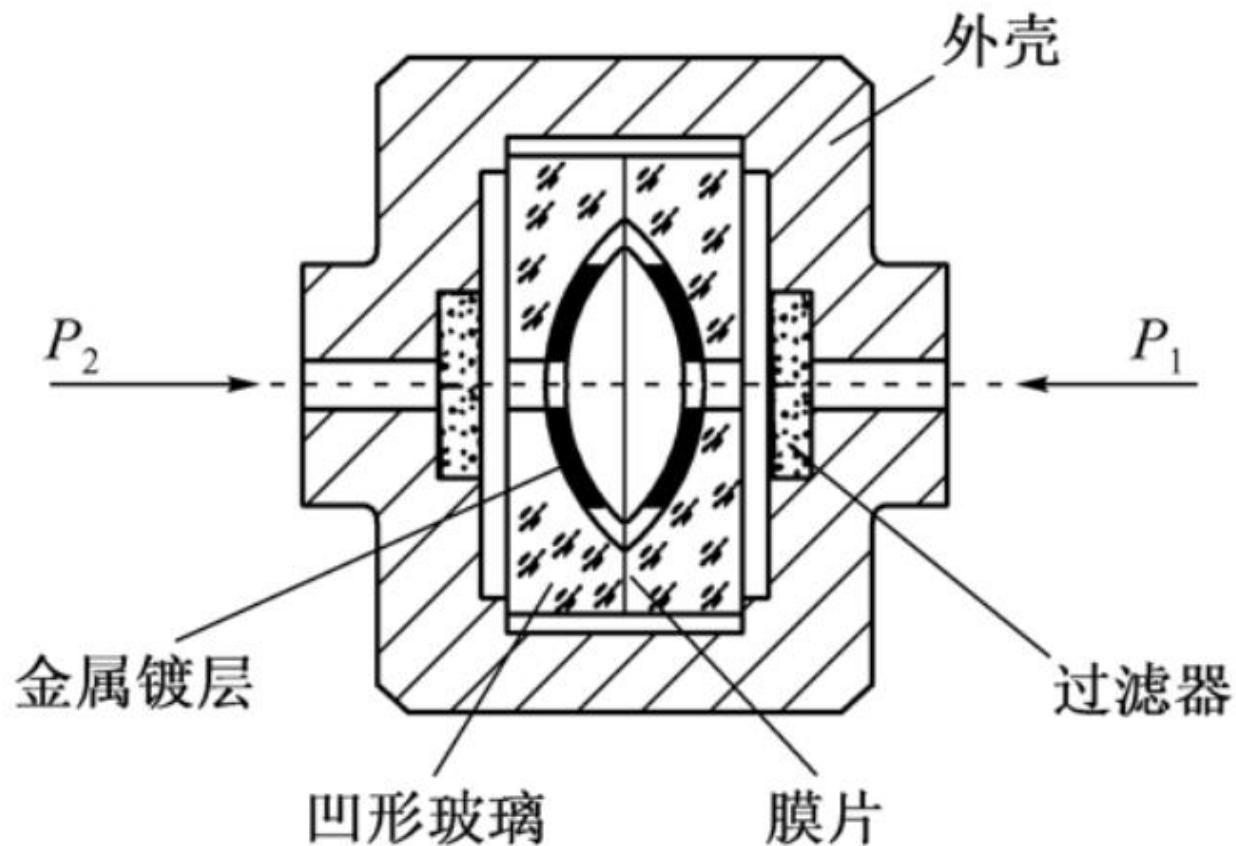
装有传感器的假人

气囊

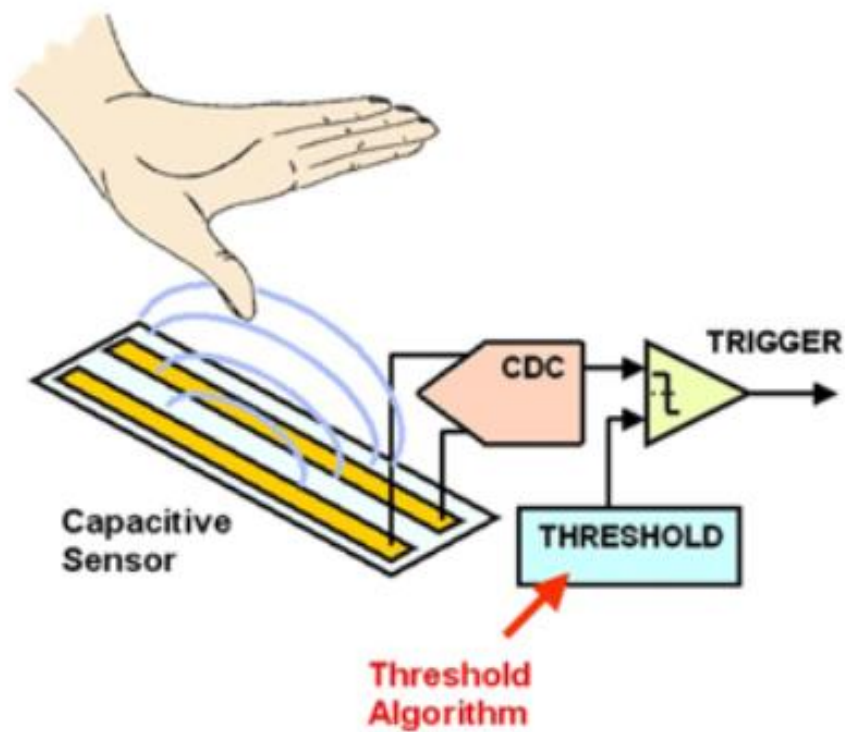
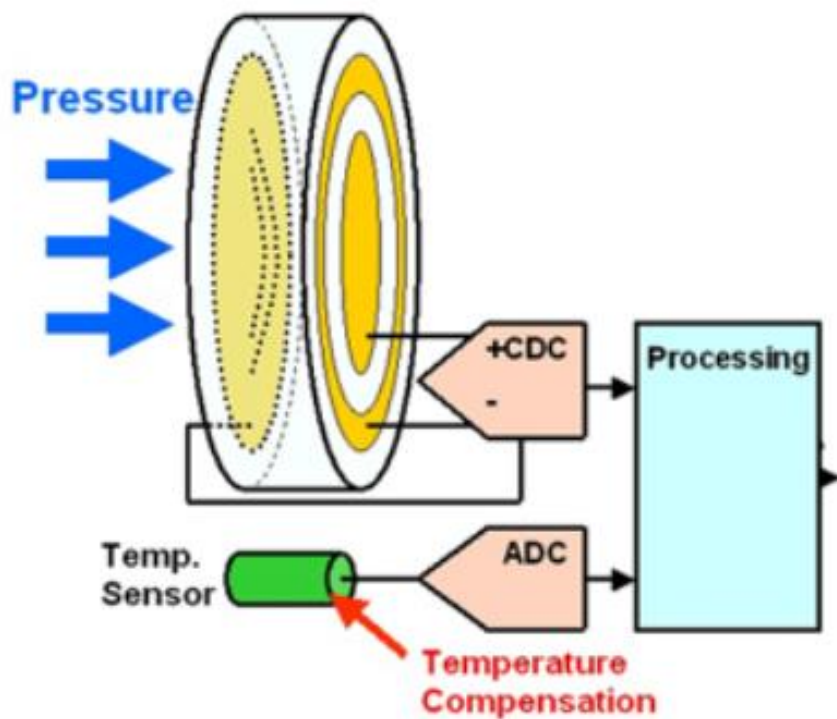
- 加速度传感器安装在轿车上，可以作为**碰撞传感器**。
- 当测得的**负加速度值**超过设定值时，微处理器据此判断发生了碰撞，于是就启动轿车前部的折叠式安全气囊迅速充气而膨胀，托住驾驶员及前排乘员的胸部和头部。



## 4. 电容式差压传感器

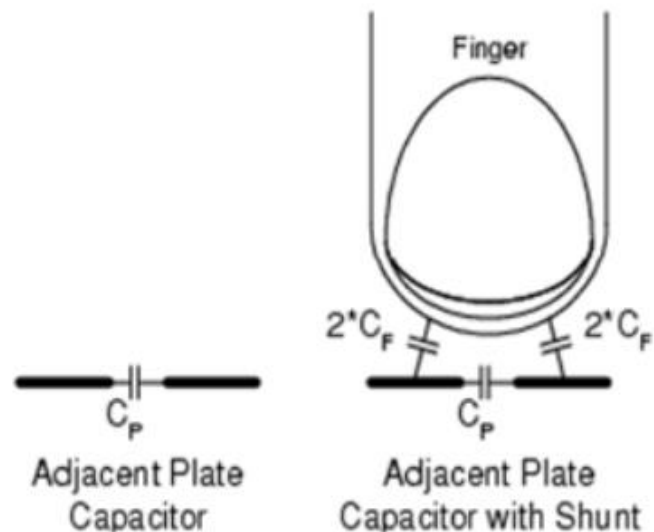
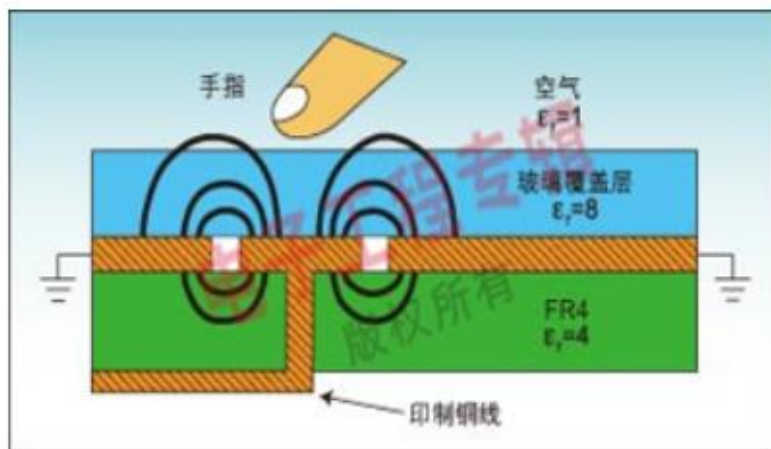
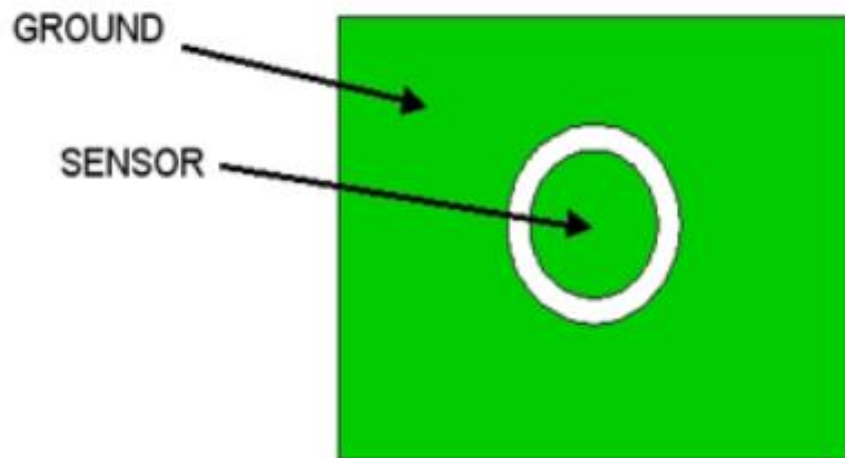


## 5. 电容式触摸传感器





## 5. 电容式触摸传感器



当手指靠近电容屏时，  
总电容=相邻极板电容  
+手指电容



# 本节小结

1. 电容传感器的工作原理
2. 特性分析
3. 信号调理电路
4. 影响传感器精度的因素及提高精度的措施

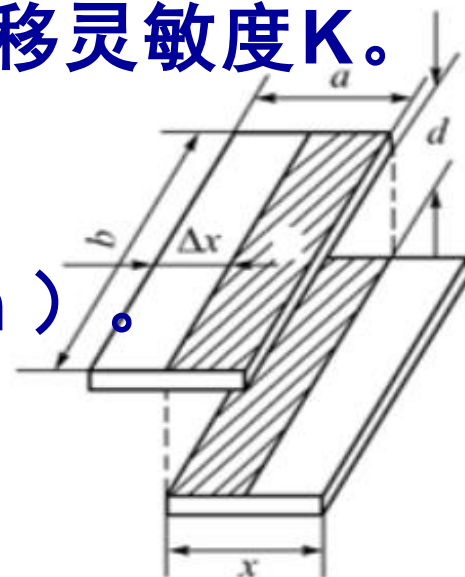




# 作业

3-2-1 一个以空气为介质的平极电容式传感器结构如下图所示，其中极板宽度  $a=10\text{mm}$ 、长度  $b=16\text{mm}$ ，两极板间距  $d=1\text{mm}$ 。测量时，一块极板在原始位置上沿  $a$  向平移了  $2\text{mm}$ ，求该传感器的电容变化量、电容相对变化量和位移灵敏度  $K$ 。

（已知空气的相对介电常数  $\varepsilon_r=1$ ，真空时的介电常数  $\varepsilon_0=8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ）。





# 作业

**3-2-2** 当差动式极距变化型的电容传感器动极板相对于定极板位移了  $\Delta d = 0.75\text{mm}$  时，若初始电容量  $C_0 = 80\text{pF}$ ，初始距离  $d = 4\text{mm}$ ，试计算其非线性误差。若将差动电容改为单只平板电容，初始值不变，其非线性误差有多大？

**3-2-3** 差动电容式传感器接入变压器电桥，变压器副边两绕组电压有效值均为  $U$  时，试推导出电桥空载输出电压  $U_0$  与  $C_{x1}$ 、 $C_{x2}$  的关系表达式。若采用变极距型电容传感器，设初始极距为  $\delta_0$ ，改变  $\Delta\delta$  后，求空载输出电压  $U_0$  与  $\Delta\delta$  的关系表达式。

