

# 传感器技术

王慧青

东南大学仪器科学与工程学院



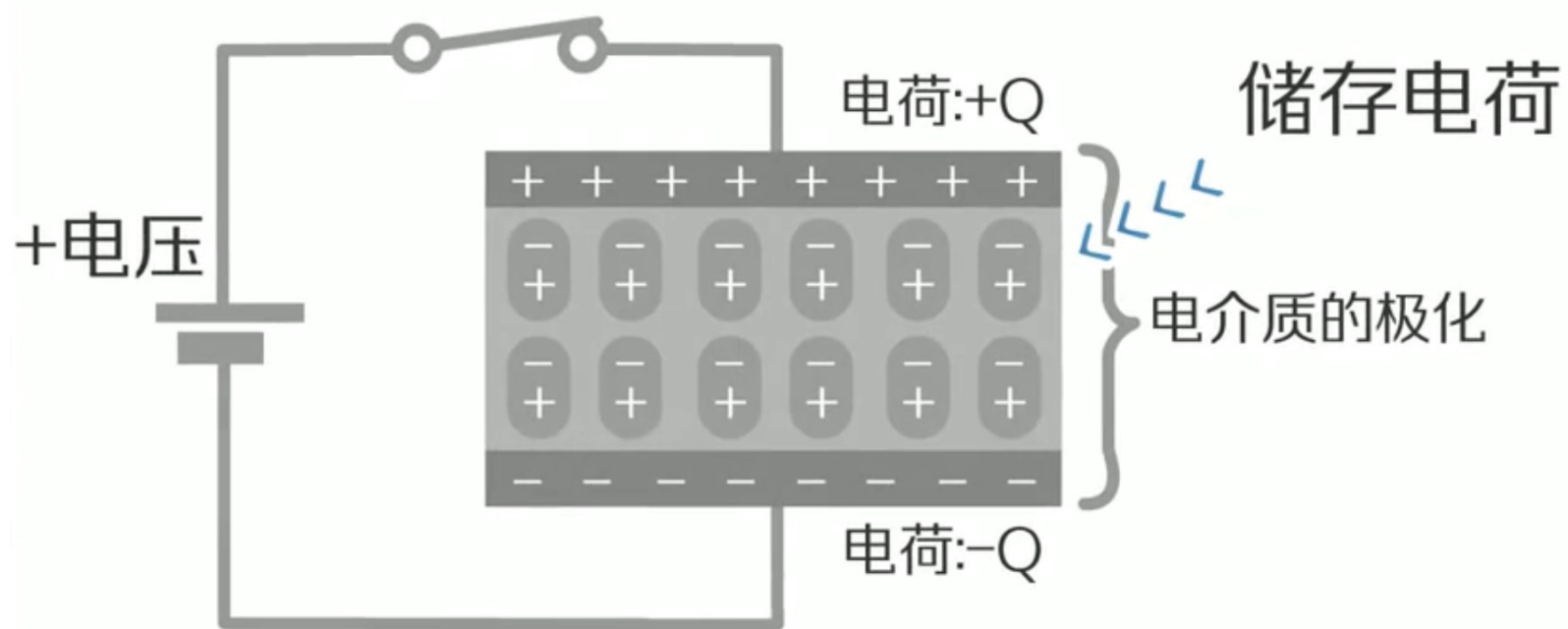
# 第4章 电容式传感器

4.1 工作原理、结构和特性

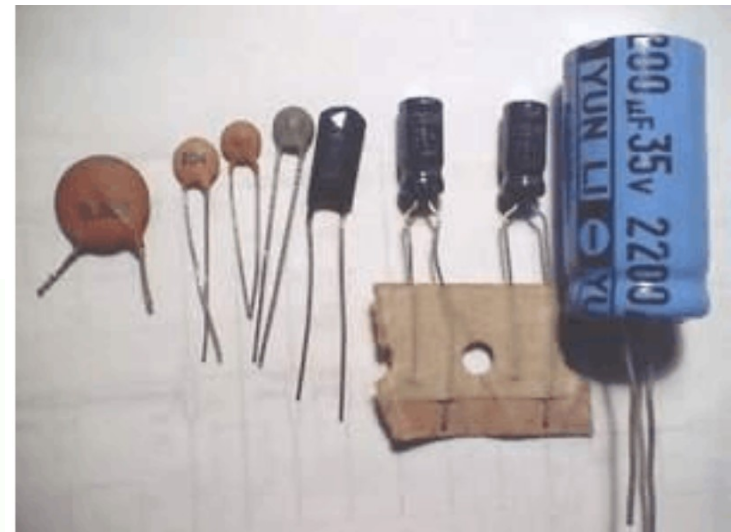
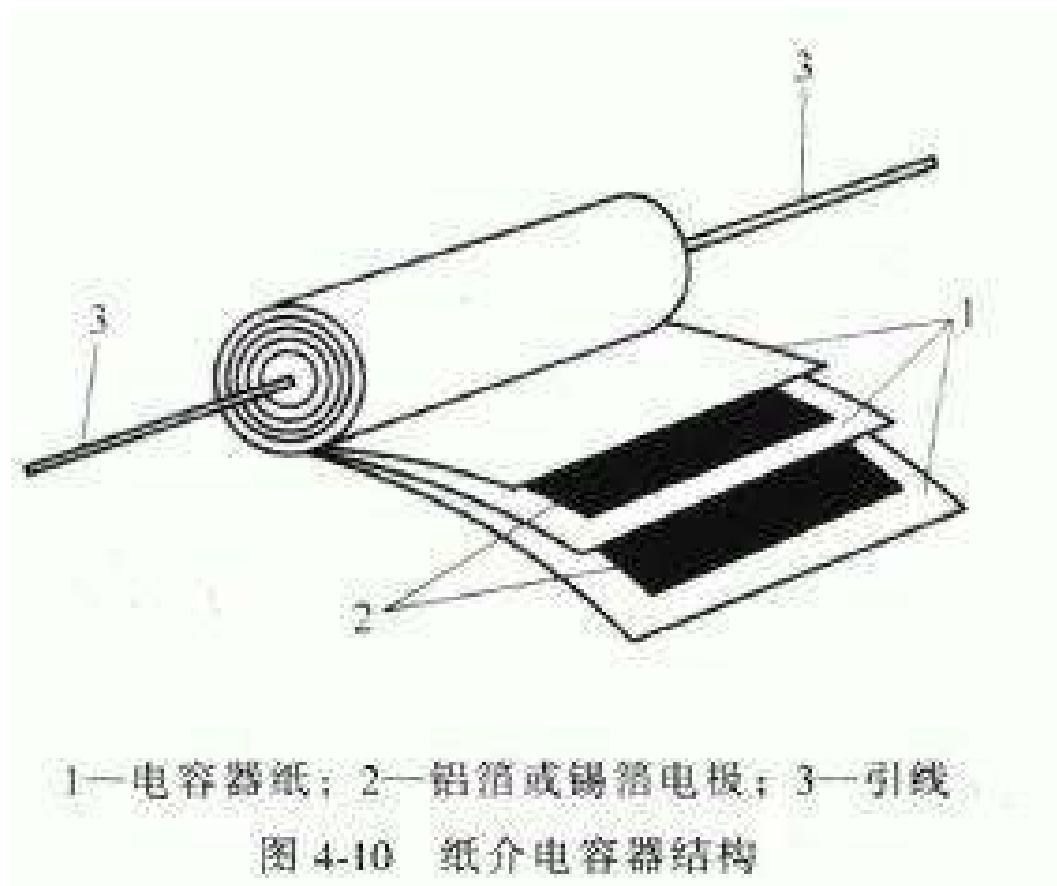
4.2 问题及改进

4.3 测量电路

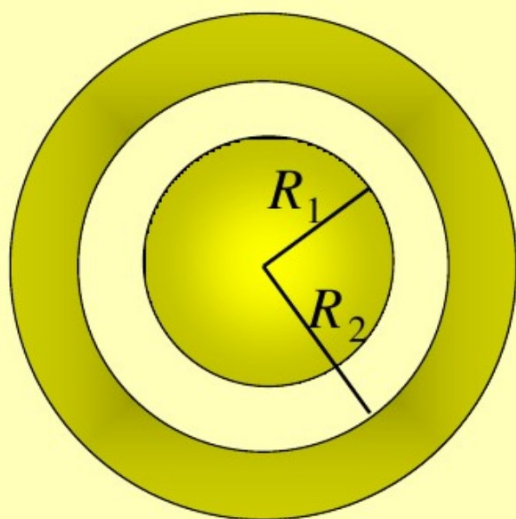
4.4 应用



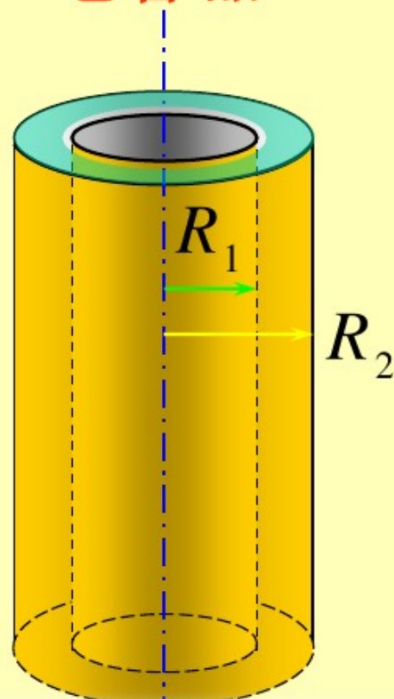
## 纸介电容器结构



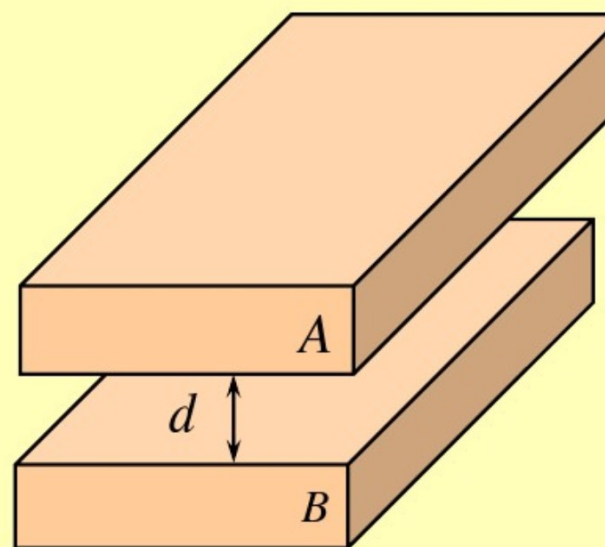
球形  
电容器



柱形  
电容器



平行板  
电容器

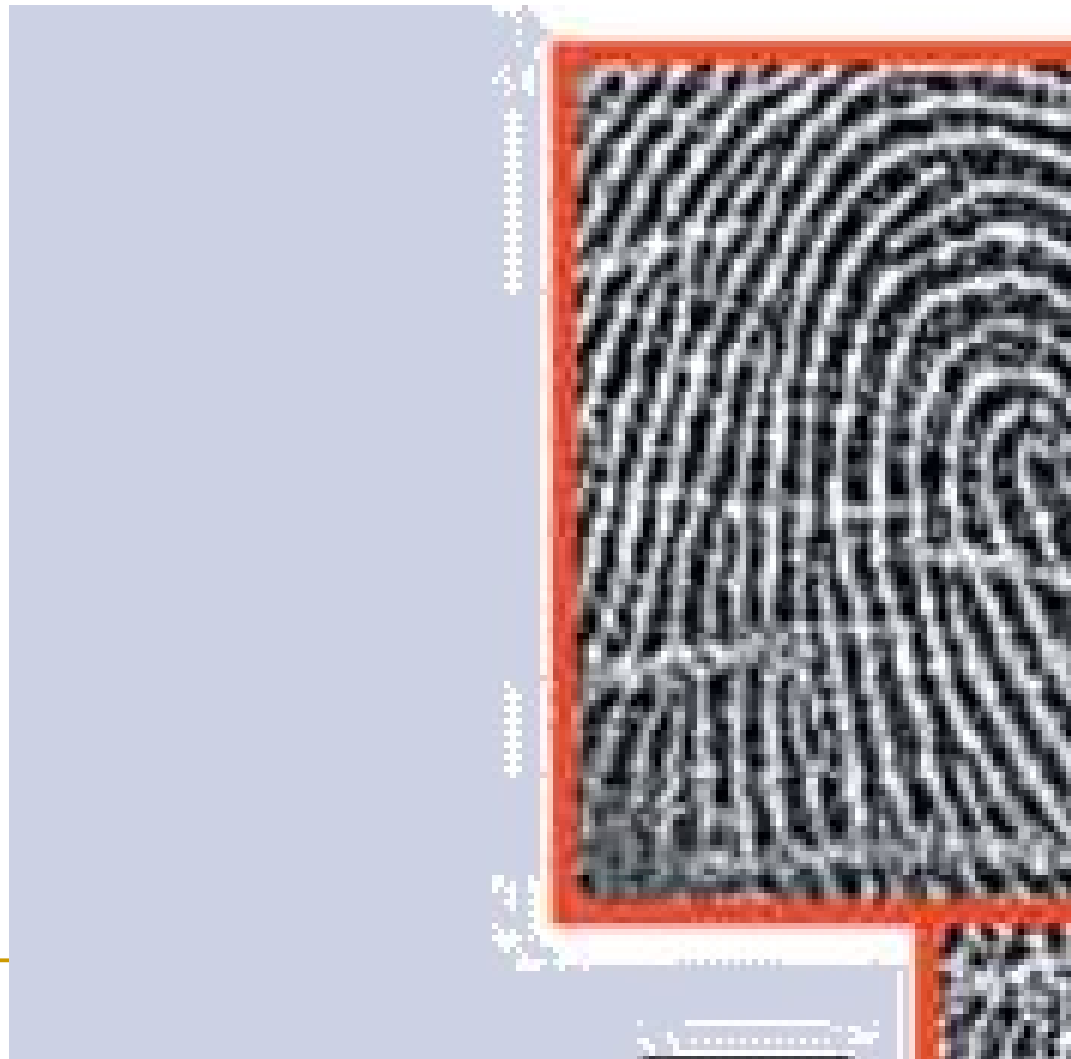


# 指纹识别传感器



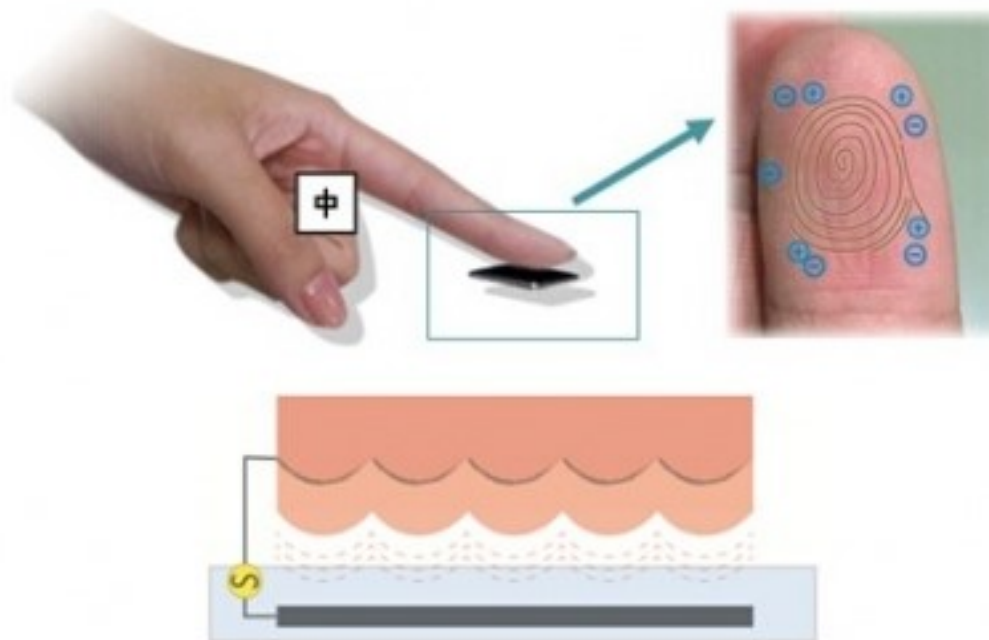
指纹识别传感器

# 电容式指纹识别传感器



# 电容式指纹识别传感器

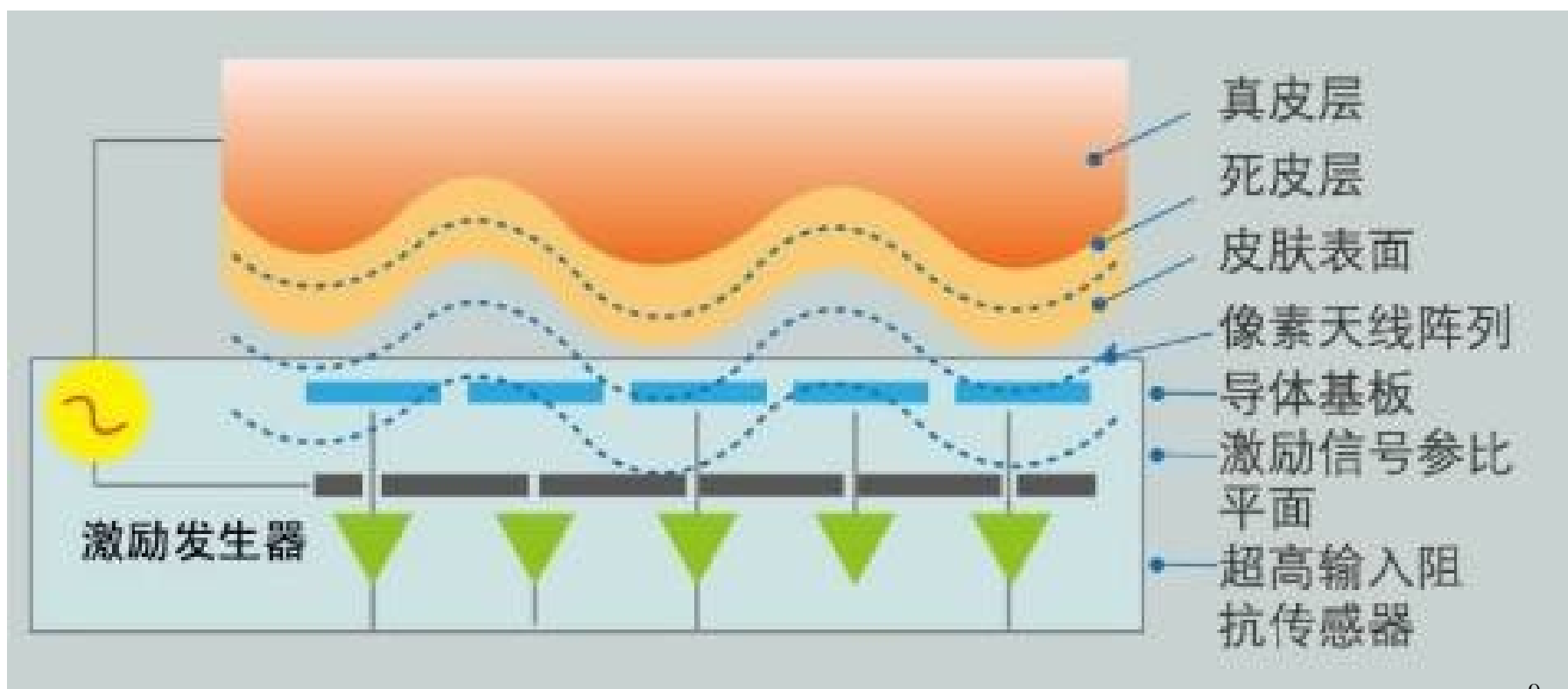
- 指纹识别所需电容传感器包含一个大约有数万个金属导体的阵列，其外面是一层绝缘的表面

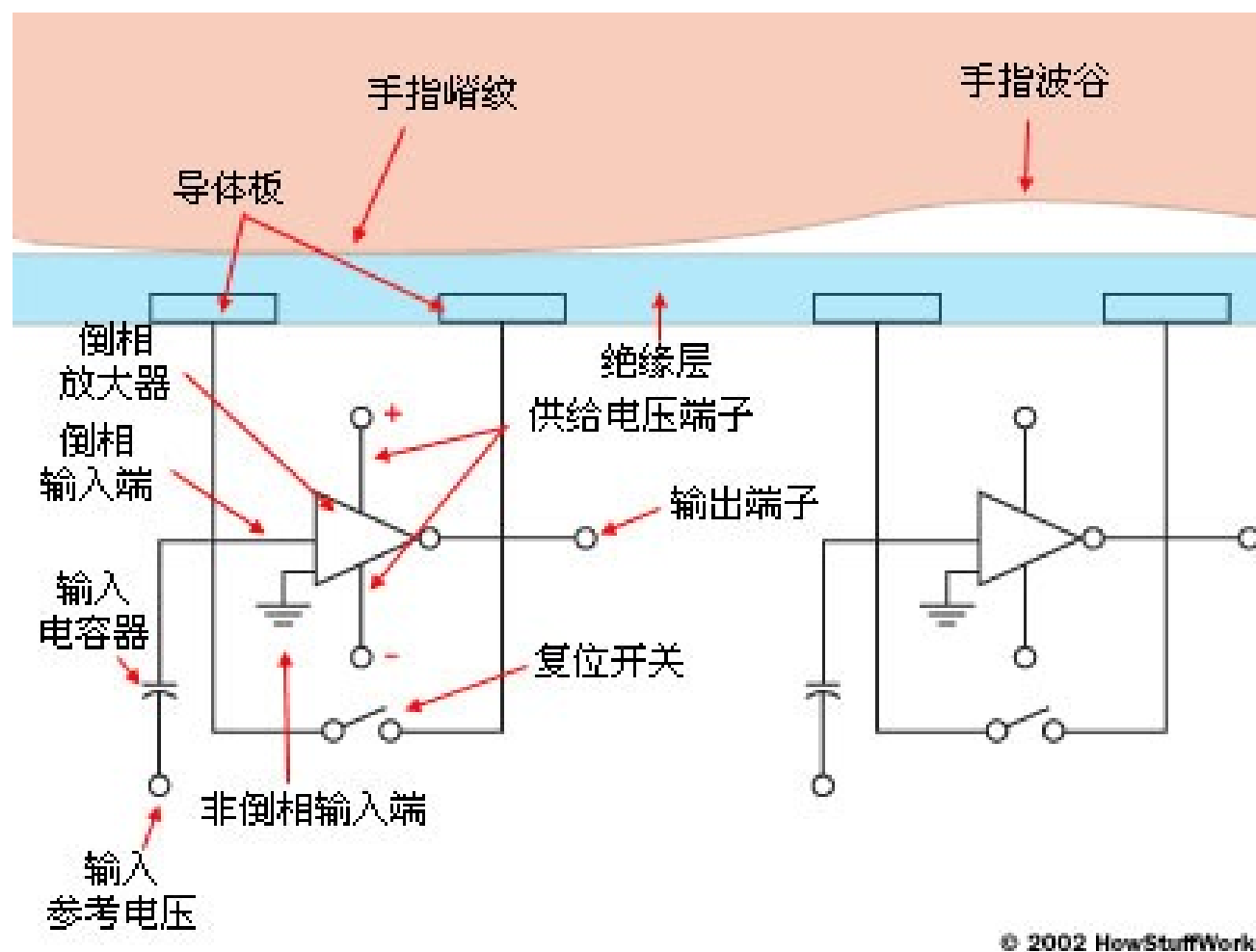




# 电容式指纹识别传感器

- 当用户的手指放在上面时，金属导体阵列/绝缘物/皮肤就构成了相应的小电容器阵列。它们的电容值随着脊（近的）和沟（远的）与金属导体之间的距离不同而变化。







# 电容式传感器

**电容式传感器：**将被测非电量的变化转换为电容量变化的一种传感器。

**优点：**结构简单、高分辨力、可非接触测量，并能在高温、辐射和强烈振动等恶劣条件下工作。



## 4.1 Capacitor 原理、结构和特性

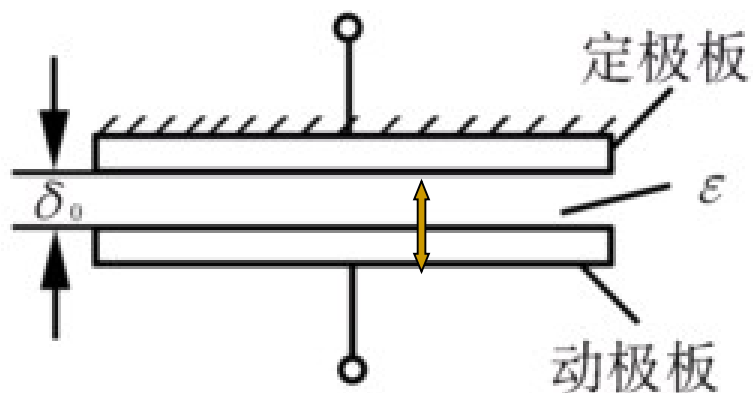
- 由绝缘介质分开的两个平行金属板组成的平板电容器.
- 电容量与真空介电常数 $\varepsilon_0$  ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m)、极板间介质的相对介电常数 $\varepsilon_r$ 、极板的有效面积 $A$ 、两极板距离 $\delta$ 有关:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{\delta}$$

- 若被测量的变化使式中 $\delta$ 、 $A$ 、 $\varepsilon_r$ 三个参量中任意一个发生变化时, 都会引起电容量的变化, 再通过测量电路就可转换为电量输出。
- 电容式传感器可分为变极距型、变面积型和变介质型。

## 4.1.1 变极距型电容传感器

### 单极式



变极距型电容传感器原理图

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{\delta}$$

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{\delta_0}$$

$\epsilon_r$ ,  $A$ : 常数

$\delta_0$ : 初始极距



## 4.1.1 变极距型电容传感器

当 $\delta_0$ 减小 $\Delta\delta$ 时，电容量 $C$ 增大 $\Delta C$ :

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} - C_0 = C_0 \frac{\frac{\Delta\delta}{\delta_0}}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}$$

电容相对变化量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\frac{1}{2\pi f\epsilon_0} \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}$$

当  $(\Delta\delta/\delta_0) \ll 1$  时，将上式按泰勒级数展开:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left[ 1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^3 + \dots \right]$$



## 4.1.1 变极距型电容传感器

略去高次(非线性)项, 近似的线性关系和灵敏度S:

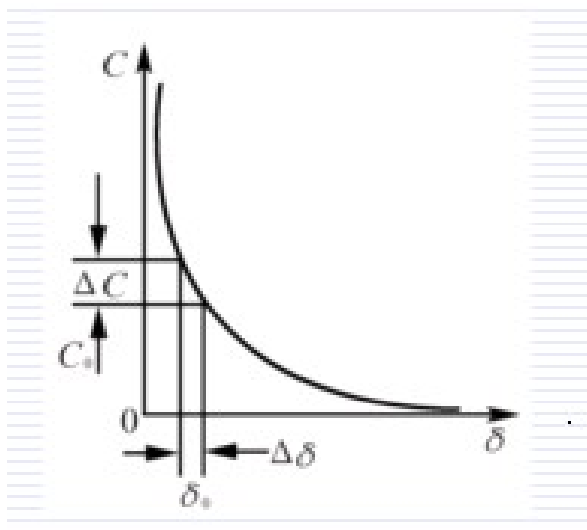
$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$$

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta \delta} = \frac{C_0}{\delta_0} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{\delta_0^2}$$

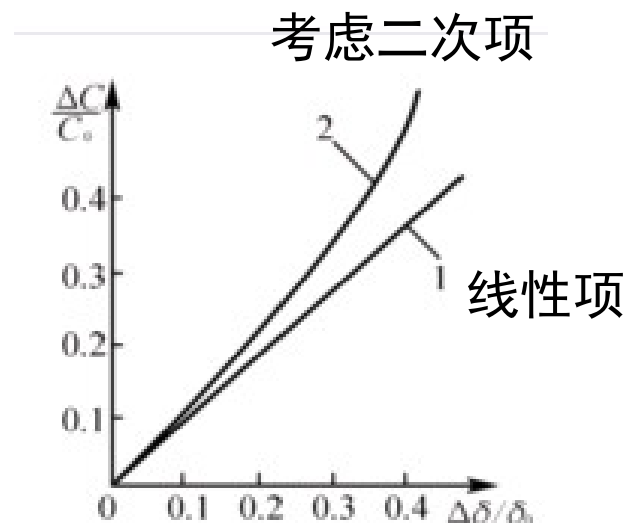
如果考虑泰勒展开式中的线性项及二次项

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left( 1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)$$

## 4.1.1 变极距型电容传感器



$C=f(\delta)$  特性曲线



变极距型电容传感器的非线性特性

因此，只考虑线性项作为传感器的特性使用时，其相对非线性误差  $e_f$  为

$$e_f = \frac{\left| \left( \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 \right|}{\left| \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right|} \times 100\% = \left| \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right| \times 100\%$$





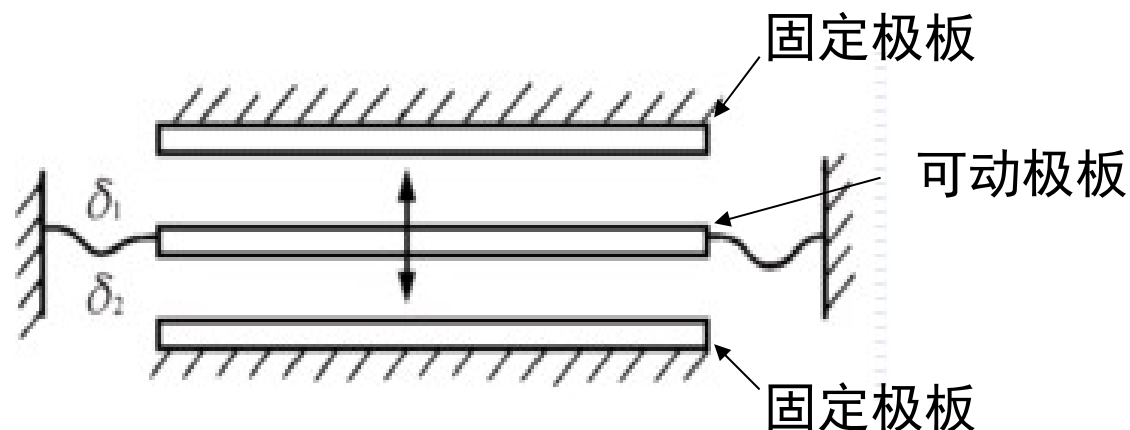
## 4.1.1 变极距型电容传感器

由上讨论可知：

- (1) 变极距型电容传感器只有在  $\left| \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right|$  很小（小测量范围）时，才有近似的**线性输出**；
- (2) **灵敏度S**与**初始极距  $\delta_0$** 的平方成反比，故可用减少  $\delta_0$  的办法来提高灵敏度。例如在电容式压力传感器中，常取  $\delta_0 = 0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ ， $C_0$  在  $20 \sim 100 \text{ pF}$  之间，可测小至  $0.01 \text{ } \mu\text{m}$  的线位移。

## 4.1.1 变极距型电容传感器

### 差动式



初始位置时， $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$ ，两边初始电容相等。

当动极板向上有位移 $\Delta\delta$ 时，两边极距为 $\delta_1 = \delta_0 - \Delta\delta$ ， $\delta_2 = \delta_0 + \Delta\delta$ ；两组电容一增一减。电容总的相对变化量为：

$$\Delta C / C_0 = \frac{\Delta C_1 - \Delta C_2}{C_0} = 2 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left[ 1 + \left( \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \left( \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right]$$



## 4.1.1 变极距型电容传感器

略去高次项，可得近似的线性关系

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{2\Delta\delta}{\delta_0}$$

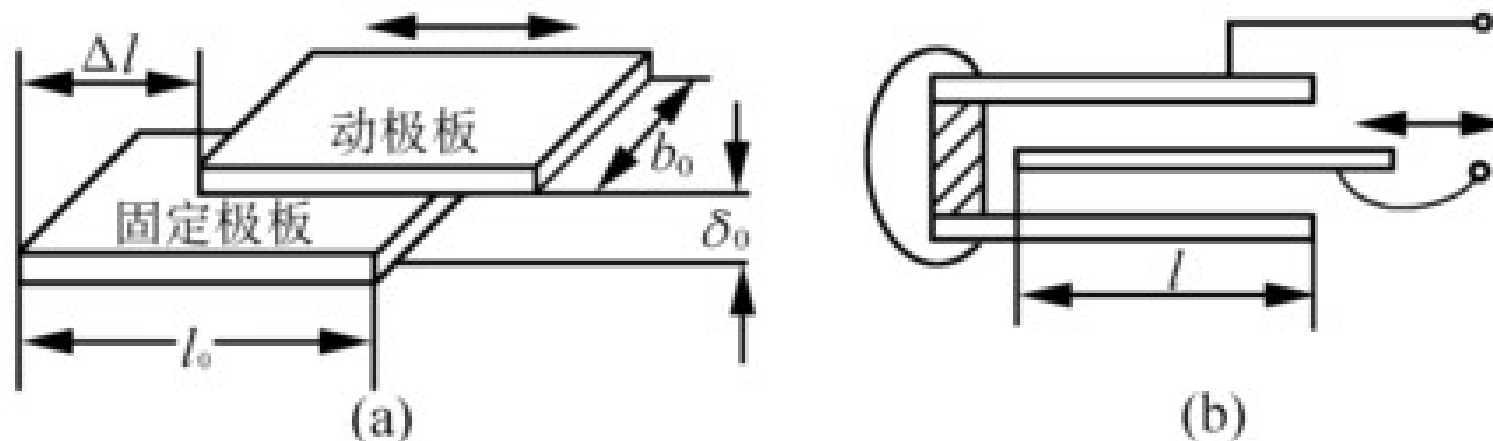
相对非线性误差 $e_f'$  为

$$e_f' = \frac{\left| 2(\Delta\delta/\delta_0)^3 \right|}{\left| 2(\Delta\delta/\delta_0) \right|} = (\Delta\delta/\delta_0)^2 \times 100\%$$

**差动式比单极式：**

- 1) 灵敏度提高一倍；
- 2) 非线性误差大为减小；
- 3) 有效地补偿温漂。

## 4.1.2 变面积型电容传感器



变面积型电容传感器原理图  
(a) 单片式；(b) 中间极板移动式

有 $\Delta l$ 移动时:

$$C = C_0 - \Delta C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r (l_0 - \Delta l) b_0}{\delta_0}$$



## 4.1.2 变面积型电容传感器

电容的相对变化:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

很明显，这种传感器的输出特性呈线性，适合于测量较大的直线位移和角位移。

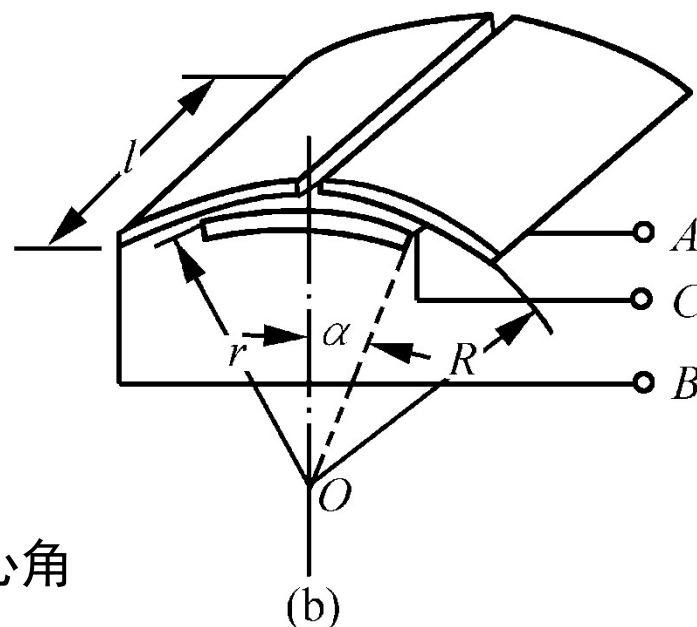
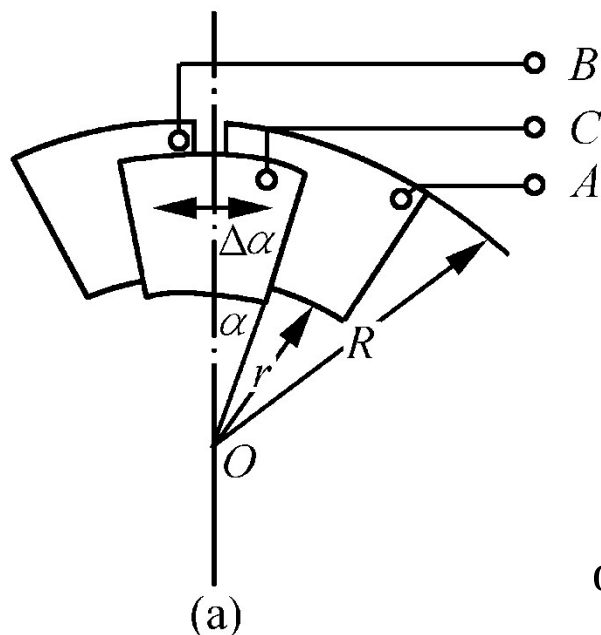
灵敏度S:

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta l} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r b_0}{\delta_0}$$

采用中间极板移动式消除  $\delta_0$  移动中的影响

## 4.1.2 变面积型电容传感器

用途：角位移的测量



$\alpha$ : 圆心角

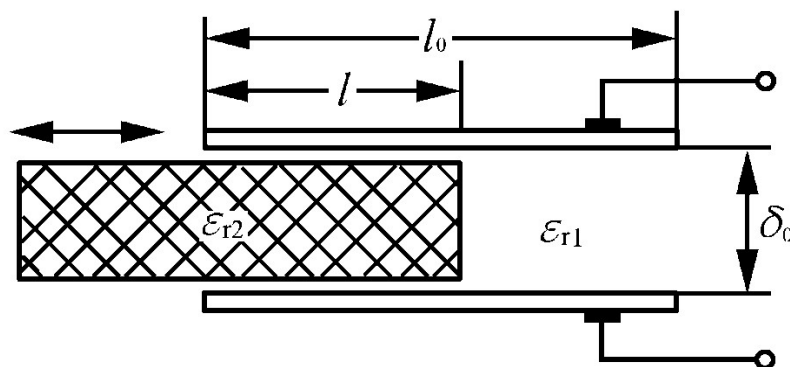
变面积型差动式结构

(a) 扇形平板结构；(b) 柱面板结构

$$C_{AC0} = C_{BC0} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r (R^2 - r^2) \alpha}{\delta_0}$$

$$C_{AC0} = C_{BC0} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r l r \alpha}{\delta_0}$$

## 4.1.3 变介质型电容传感器



电介质插入式电容传感器；

用途：

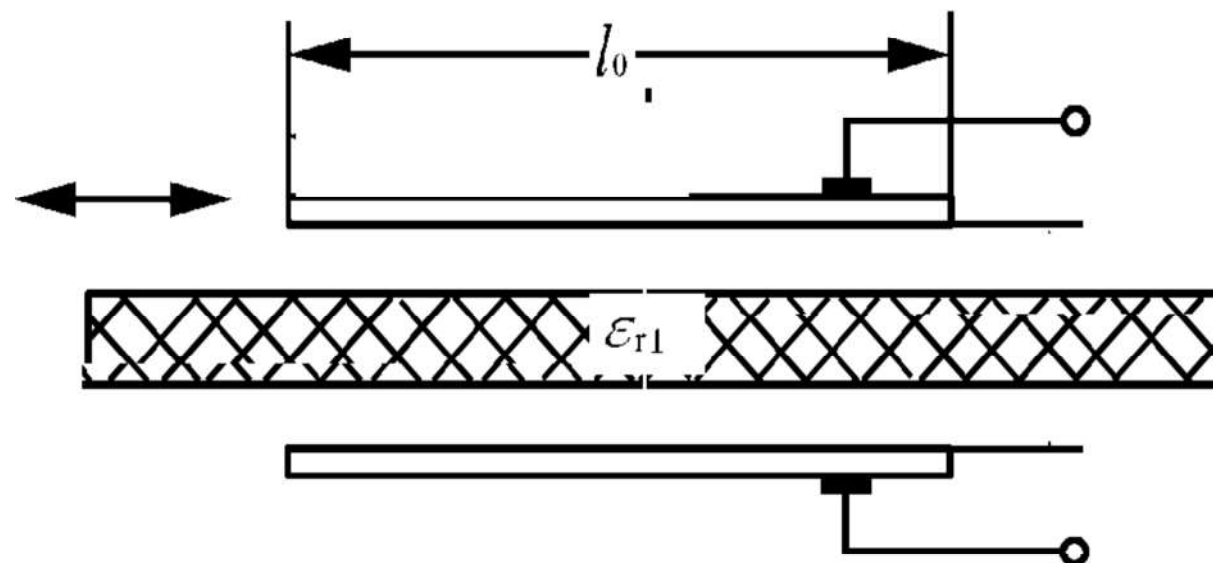
1) 测量粮食、纺织品、木材或煤等非导电固体物质的湿度

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0 b_0}{\delta_0} [\epsilon_{r1} (l_0 - l) + \epsilon_{r2} l]$$

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r l_0 b_0 / \delta_0$$

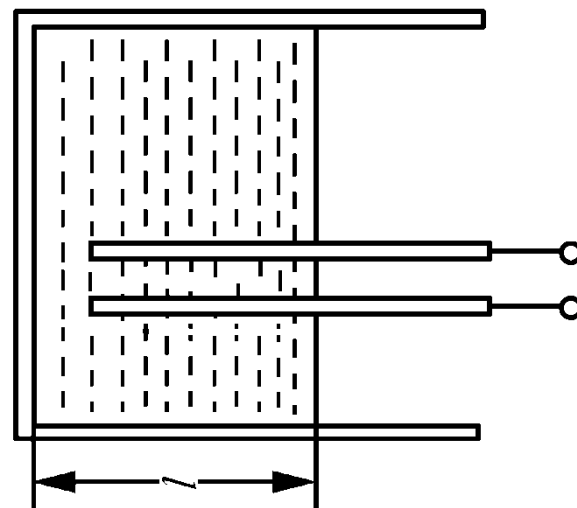
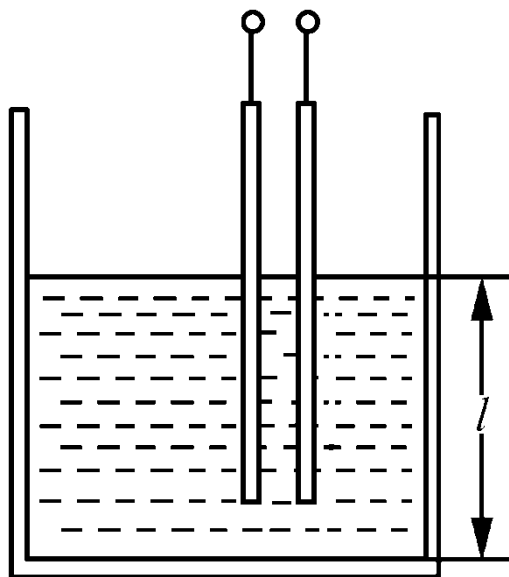
$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{\epsilon_{r2} - 1}{l_0} l$$

## 2) 测量纸张、绝缘薄膜等厚度





### 4.1.3 变介质型电容传感器

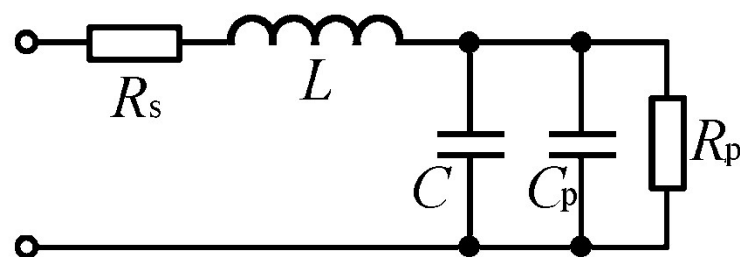


非导电流散材料物位的电容传感器

- 这种电容传感器有较多的结构型式，可以用来测量纸张、绝缘薄膜等的厚度，也可用来测量粮食、纺织品、木材或煤等非导电固体物质的湿度。

## 4.2 应用中存在的问题及其改进措施

### 4.2.1 等效电路



电容传感器的等效电路

$C$ : 传感器电容

$L$ : 电容器及引线电感

$C_p$ : 为寄生电容

$R_p$ : 低频损耗并联电阻，包含极板间漏电和介质损耗

$R_s$ : 高湿、高温、高频激励工作时的串联损耗电阻，包含导线、极板间和金属支座等损耗电阻；

## 4.2 应用中存在的问题及其改进措施

在实际应用中，特别在高频激励时，尤需考虑L的存在，会使传感器有效电容变化

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

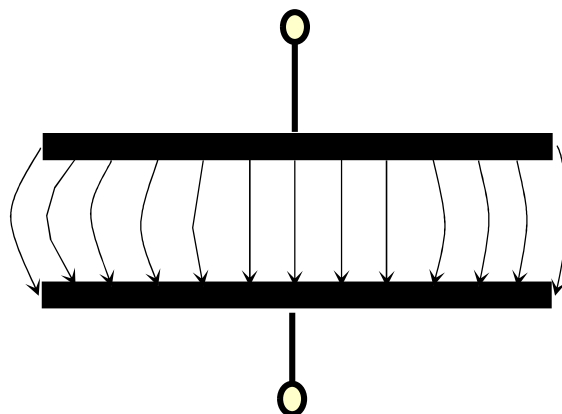
从而引起传感器有效灵敏度的改变

$$S_e = \frac{S}{(1 - \omega^2 LC)^2}$$

因此，每当改变激励频率或者更换传输电缆时都必须对测量系统重新进行标定。

## 4.2 应用中存在的问题及其改进措施

### 4.2.2 边缘效应



实际上当极板厚度 $h$ 与极距 $\delta$ 之比相对较大时，边缘效应的影响就不能忽略。

对极板半径为 $r$ 的变极距型电容传感器，其电容值：

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \left\{ \frac{\pi r^2}{\delta} + r \left[ \ln \frac{16\pi r}{\delta} + 1 + f\left(\frac{h}{\delta}\right) \right] \right\}$$

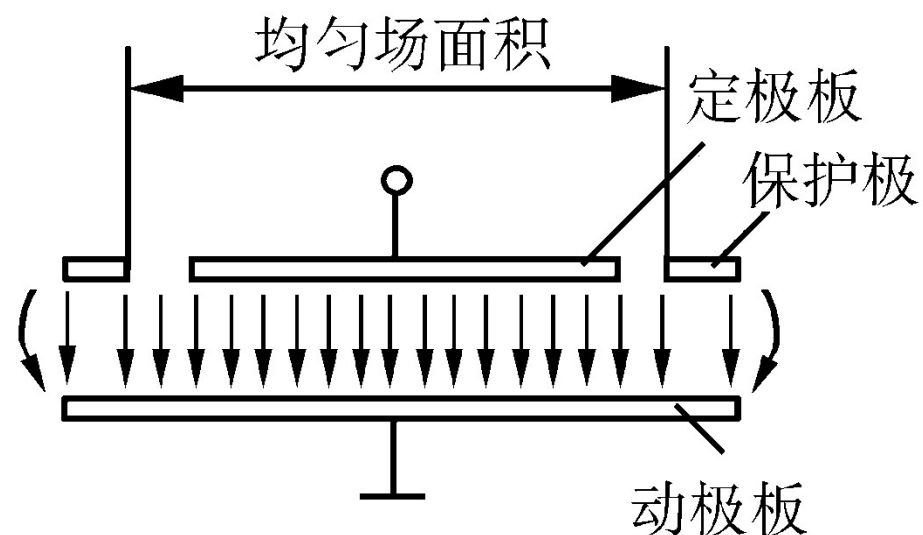
## 4.2 应用中存在的问题及其改进措施

边缘效应的影响：

灵敏度降低，而且产生非线性。

消除边缘效应的方法：

- 1) 保护环结构
- 2) 减小极板的厚度。  
如在绝缘材料上制作  
金属薄膜作为极板



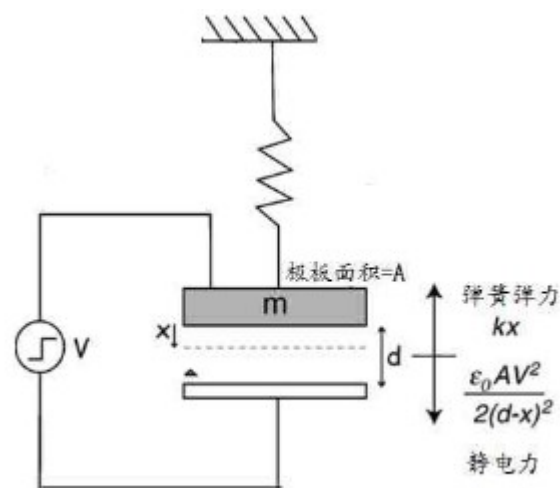
带有保护环的电容传感器原理结构

## 4.2 应用中存在的问题及其改进措施

### 4.2.3 静电引力

电容式传感器两极板间因存在静电场，而作用有静电引力或力矩。静电引力的大小与极板间的工作电压、介电常数、极间距离有关。通常这种静电引力很小，但在采用推动力很小的弹性敏感元件情况下，须考虑因静电引力造成的测量误差。

Pull in 现象





## 4.2 应用中存在的问题及其改进措施

### 4.2.4 寄生电容

电容式传感器由于受结构与尺寸的限制，其电容量都很小（几pF到几十pF），属于小功率、高阻抗器件，因此极易受外界干扰。

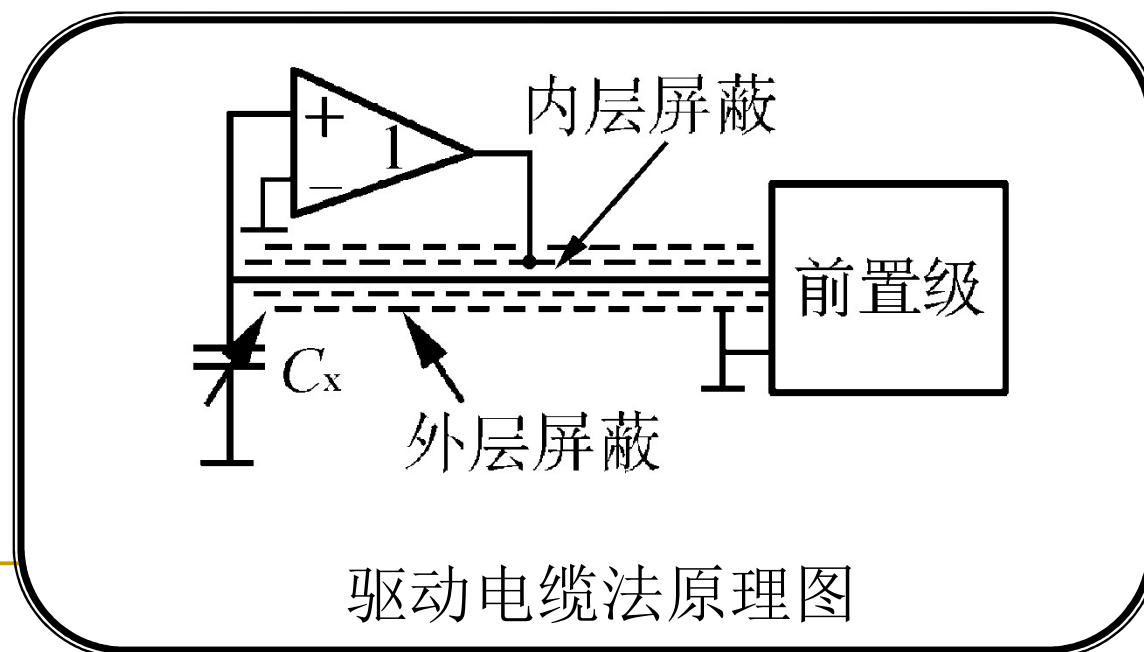
随机性的电缆寄生电容是传感器电容并联，为其大小的几倍、几十倍的，严重影响传感器的输出特性，甚至会淹没有用信号而不能使用。

## 4.2 应用中存在的问题及其改进措施

### 消除寄生电容的方法：

#### 1. 驱动电缆法

实际上是一种等电位屏蔽法。在电容传感器与测量电路的前置级之间采用双层屏蔽电缆，并接入增益为1的驱动放大器。





## 4.2 应用中存在的问题及其改进措施

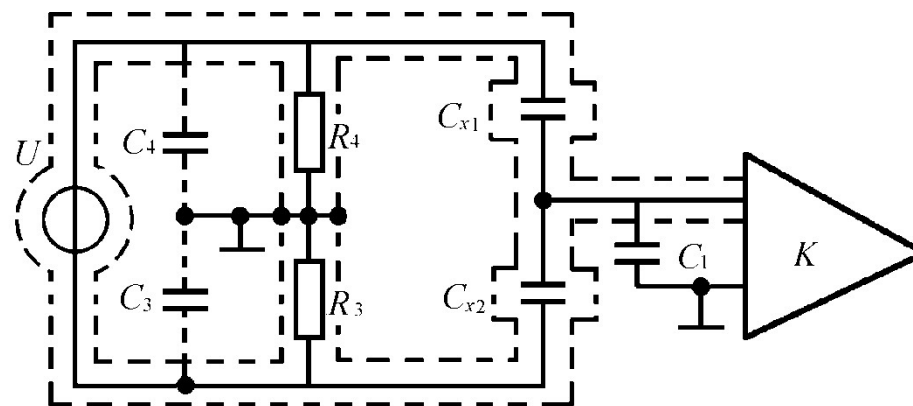
驱动放大器是一个输入阻抗很高、具有容性负载、放大倍数为1的同相放大器。

该方法的难点：要在很宽的频带上严格实现放大倍数等于1，且输出与输入的相移为零。为此有人提出，用运算放大器驱动法取代上述方法。

## 4.2 应用中存在的问题及其改进措施

### 2. 整体屏蔽法

以差动电容传感器 $C_{x1}$ 、 $C_{x2}$ 配用电桥测量电路为例。 $U$ 为电源电压， $K$ 为不平衡电桥的指示放大器。



整体屏蔽法原理图

所谓整体屏蔽是将整个电桥(包括电源、电缆等)统一屏蔽起来；其关键在于正确选取接地点。本例中接地点选在两平衡电阻 $R_3$ 、 $R_4$ 桥臂中间，与整体屏蔽共地。

---

## 4.2 应用中存在的问题及其改进措施

### 3. 采用组合式与集成技术

一种方法是将测量电路的前置级或全部装在紧靠传感器处，缩短电缆；

另一种方法是采用超小型大规模集成电路，将全部测量电路组合在传感器壳体内；

更进一步就是利用集成工艺，将传感器与调理等电路集成于同一芯片，构成集成电容式传感器。



## 4.2 应用中存在的问题及其改进措施

### 4.2.5 温度影响

环境温度的变化将改变电容传感器的输出相对被测输入量的单值函数关系，从而引入温度干扰误差。这种影响主要有以下两个方面：

#### (1) 温度对结构尺寸的影响

电容传感器由于极间隙很小而对结构尺寸的变化特别敏感。在传感器各零件材料线胀系数不匹配的情况下，温度变化将导致极间隙较大的相对变化，从而产生很大的温度误差。



## 4.2 应用中存在的问题及其改进措施

### (2) 温度对介质的影响

温度对介电常数的影响随介质不同而异，**空气及云母**的介电常数温度系数近似为零；而某些液体介质，如硅油、蓖麻油、煤油等，其介电常数的温度系数较大。例如煤油的介电常数的温度系数可达 $0.07\%/^{\circ}\text{C}$ ；若环境温度变化 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ ，则将带来7%的温度误差，故采用此类介质时必须注意温度变化造成的误差。

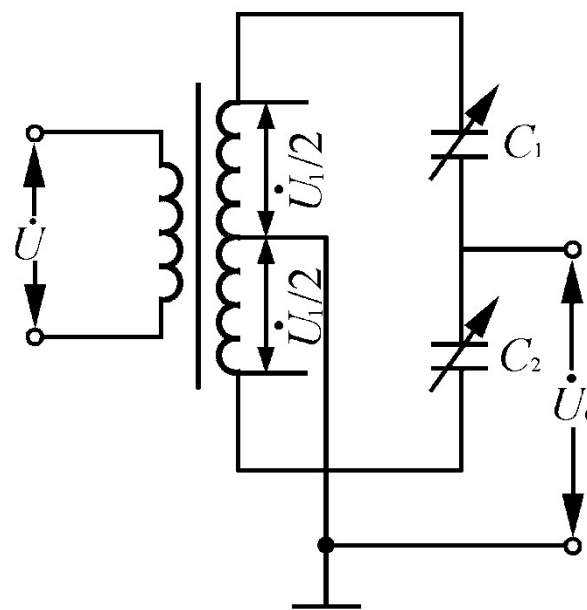
## 4.3 测量电路

电容式传感器将被测非电量变换为电容变化后，必须采用测量电路将其转换为电压、电流或频率信号。

### 4.3.1 变压器电桥

如图所示， $C_1$ 、 $C_2$ 为传感器的两个差动电容。电桥的空载输出电压为

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}}{2} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$$



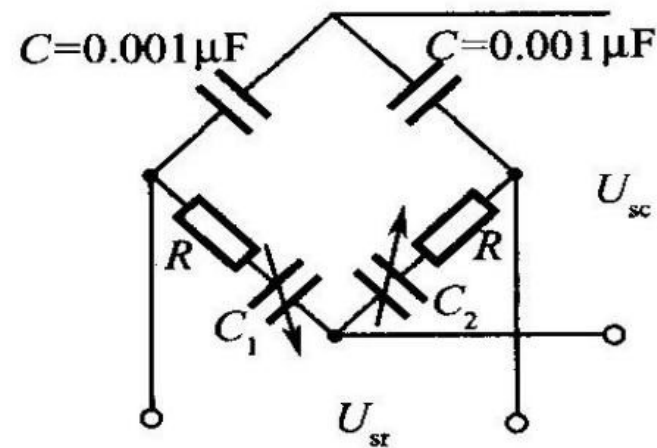
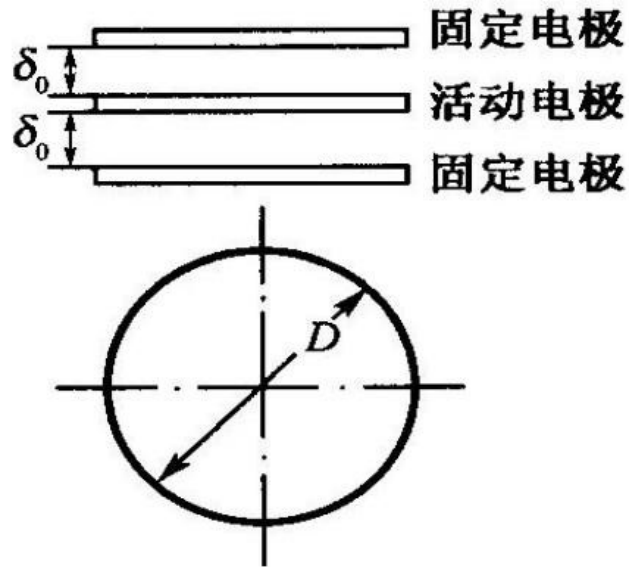
变压器电桥

对于变极距差动型传感器:

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}}{2} \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta_0}$$

在压力比指示系统中采用差动式变间隙电容传感器和电桥测量电路，如图所示。已知： $\delta_0=0.25\text{mm}$ ； $D=38.2\text{mm}$ ； $R=5.1\text{k}\Omega$ ； $U_{sr}=60\text{V}$ (交流)，频率 $f=400\text{Hz}$ 。试求：

- (1)该电容传感器的电压灵敏度 $K_u$  ( $\text{V}/\mu\text{m}$ )；
- (2)当电容传感器的动极板位移 $\Delta\delta=10\mu\text{m}$ 时，输出电压 $U_{sc}$ 值。



解：由传感器结构及其测量电路可知

(1) 初始电容

$$\begin{aligned} C_1 = C_2 = C_0 &= \frac{\varepsilon_0 \frac{\pi}{4} D^2}{\delta_0} \\ &= \frac{8.85 \times 10^{-12} \times \pi \times (38.2 \times 10^{-3})^2}{4 \times 0.25 \times 10^{-3}} \\ &= 40.6 \times 10^{-12} (F) = 40.6 pF \end{aligned}$$

由于

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{1}{\omega C_0} = \frac{1}{2\pi f C_0} = \frac{1}{2\pi \times 400 \times 40.6 \times 10^{-12}} \\ &= 9.8 \times 10^6 (\Omega) \gg R (= 5.1 k\Omega) \end{aligned}$$

则

$$U_0 = \frac{U_i}{2} \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{U_i}{2} \frac{\Delta d}{\delta_0}$$

从而得

$$K_u = \frac{U_0}{\Delta d} = \frac{U_i}{2\delta_0} = \frac{60}{2 \times 0.25} = 120 V/mm = 0.12 V/\mu m$$

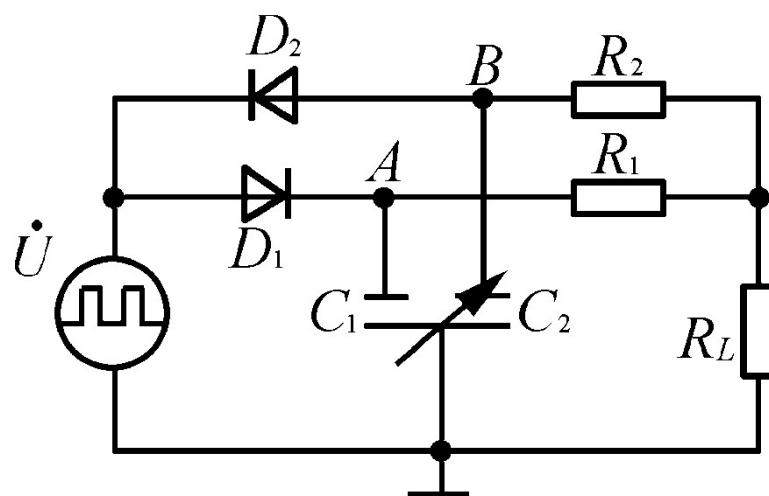
(2)  $U_0 = K_u \Delta d = 0.12 V/\mu m \times 10 \mu m = 1.2 V$



## 4.3 测量电路

### 4.3.2 双T二极管交流电桥

如图所示： $\dot{U}$ 是高频电源，提供幅值为 $U$ 的对称方波（正弦波也适用）； $D_1$ 、 $D_2$ 为特性完全相同的两个二极管， $R_1=R_2=R$ ； $C_1$ 、 $C_2$ 为传感器的两个差动电容。





## 4.3 测量电路

当传感器没有位移输入时， $C_1 = C_2$ ， $R_L$ 在一个周期内流过的平均电流为零，无电压输出。

当 $C_1$ 或 $C_2$ 变化时， $R_L$ 上产生的平均电流将不再为零，因而有信号输出。其输出电压的平均值为

$$\bar{U}_L = \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} R_L U f (C_1 - C_2)$$

$f$ : 电源频率。当 $R_L$ 已知时，令：

$$\bar{U}_L \approx K U f (C_1 - C_2)$$



## 4.3 测量电路

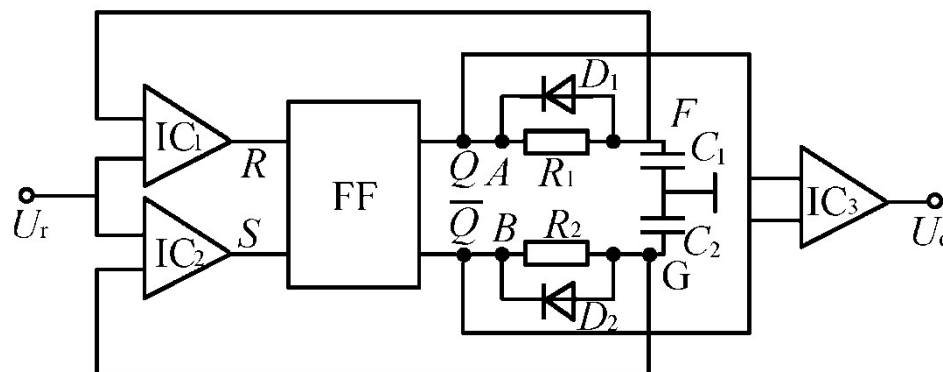
该电路适用于各种电容式传感器。

应用**特点和要求**：

- (1) 电源、传感器电容、负载均可同时在一点接地；
- (2) 二极管 $D_1$ 、 $D_2$ 工作于高电平下，因而非线性失真小；
- (3) 其灵敏度与电源频率有关，因此电源频率需要稳定；
- (4) 将 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 安装在 $C_1$ 、 $C_2$ 附近能消除电缆寄生电容影响；线路简单；
- (5) 输出电压较高。

## 4.3 测量电路

### 4.3.3 脉冲调宽电路



差动脉冲宽度调制电路

当接通电源后，若A端为高电平( $U_1$ )，B端为低电平(0)，则触发器通过 $R_1$ 对 $C_1$ 充电；当F点电位 $U_F$ 升到与参考电压 $U_r$ 相等时，比较器 $IC_1$ 产生一脉冲使触发器翻转，从而使A端为低电平，B端为高电平( $U_1$ )。此时，由电容 $C_1$ 通过二极管 $D_1$ 迅速放电至零，而触发器由B端经 $R_2$ 向 $C_2$ 充电；当G点电位 $U_G$ 与参考电压 $U_r$ 相等时，比较器 $IC_2$ 输出一脉冲使触发器翻转，从而循环上述过程。



## 4.3 测量电路

可以看出，电路充放电的时间，即触发器输出方波脉冲的宽度受电容 $C_1$ 、 $C_2$ 调制。

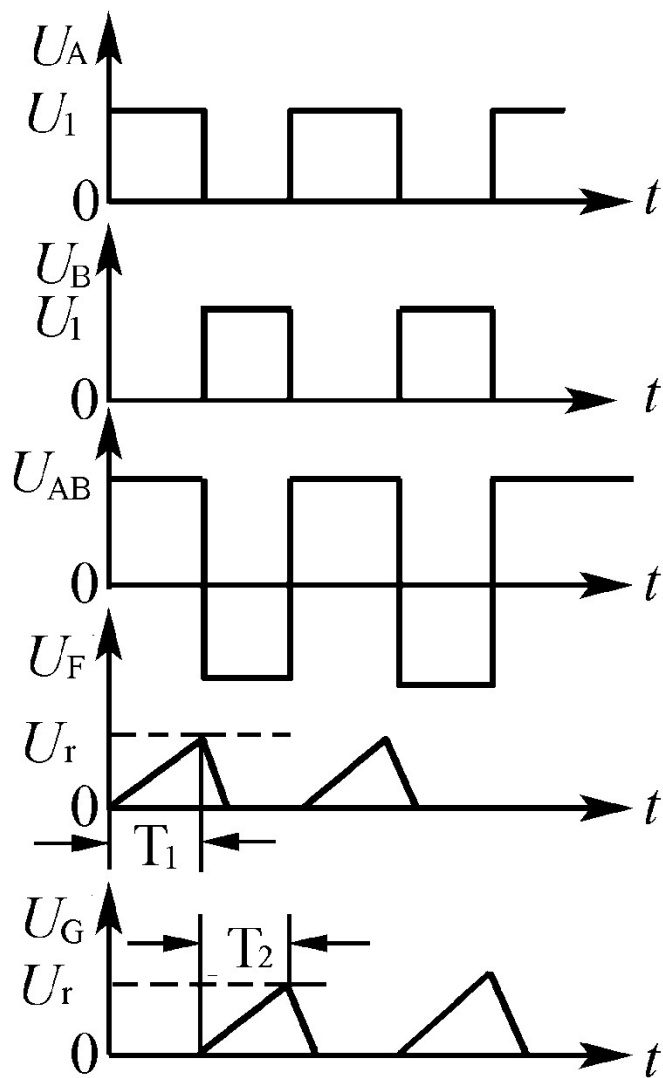
当 $C_1=C_2$ 时，各点的电压波形如图(a)所示，Q和 两端电平的脉冲宽度相等，两端间的平均电压为零。

当 $C_1>C_2$ 时，各点的电压波形如图(b)所示，Q、 两端间的平均电压(经一低通滤波器)为

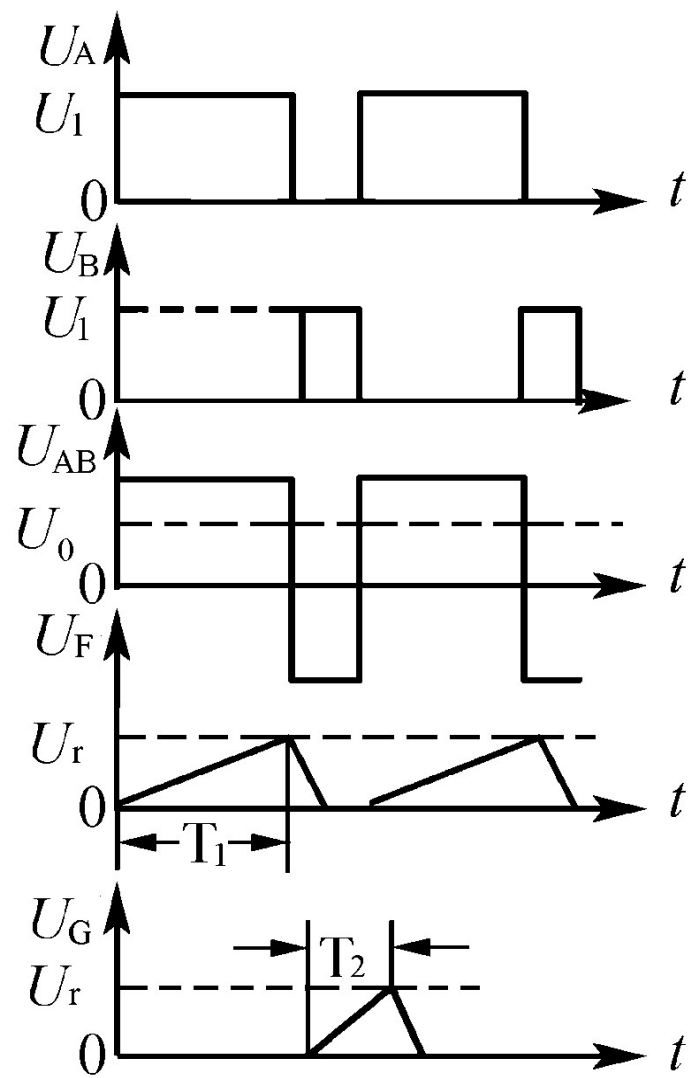
$$U_0 = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} U_1 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1$$

$T_1$ 和 $T_2$ 分别为Q端和 端输出方波脉冲的宽度，即 $C_1$ 和 $C_2$ 的充电时间。

## 4.3 测量电路



(a)



(b)



## 4.3 测量电路

用于差动式变极距型电容传感器时:

$$U_0 = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} U_1$$

用于差动式变面积型电容传感器时:

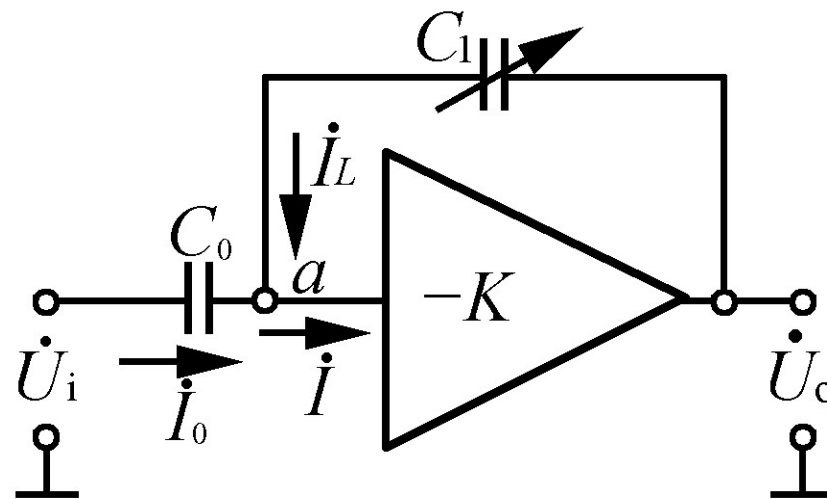
$$U_0 = \frac{\Delta A}{A} U_1$$

这种电路不需要载频和附加解调电路，无波形和相移失真；输出信号只需要通过低通滤波器引出；直流信号的极性取决于 $C_1$ 和 $C_2$ ；对变极距和变面积的电容传感器均可获得线性输出。这种脉宽调制线路也便于与传感器做在一起，从而使传输误差和干扰大大减小。

## 4.3 测量电路

### 4.3.4 运算放大器电路

$C_1$ 为传感器电容，它跨接在高增益运算放大器的输入端和输出端之间。放大器的输入阻抗很高( $Z_i \rightarrow \infty$ )，因此可视作理想运算放大器。其输出端输出与 $C_1$ 成反比的电压 $U_0$ ，即



运算放大器电路

$$U_o = -U_i \frac{C_0}{C_1}$$

对变极距型电容传感器( $C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{\delta}$ ):  $U_o = U_i \frac{C_0}{\epsilon_0 \epsilon_r A} \delta$

克服了变极距型电容传感器的非线性





## 4.4 电容式传感器及其应用

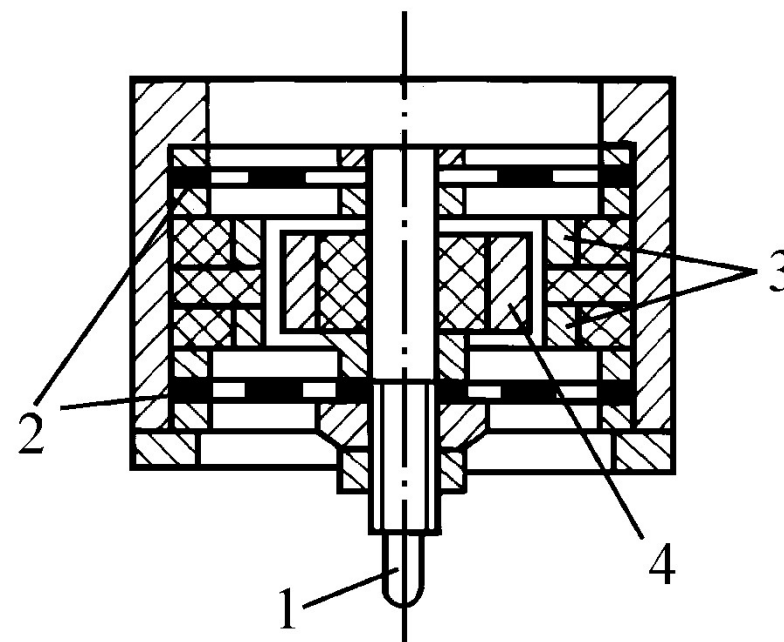
随着电容式传感器应用问题的完善解决，它的应用**优点**十分明显：

- (1) 分辨力极高，能测量低达 $10^{-7}$ 的电容值或 $0.01\mu\text{m}$  的绝对变化量和高达 $(\Delta C/C = 100\% \sim 200\%)$ 的相对变化量，因此尤适合微信息检测；
- (2) 动极质量小，可无接触测量；自身的功耗、发热和迟滞极小，可获得高的静态精度和好的动态特性；
- (3) 结构简单，不含有机材料或磁性材料，对环境(除高湿外)的适应性较强；
- (4) 过载能力强。

## 4.4 电容式传感器及其应用

### 4.4.1 电容式位移传感器

如图所示为一种变面积型电容式位移传感器。它采用差动式结构、圆柱形电极，与测杆相连的动电极随被测位移而轴向移动，从而改变活动电极与两个固定电极之间的覆盖面积，使电容发生变化。它用于接触式测量，电容与位移呈线性关系。



电容式位移传感器

- 1-测杆；2-开槽簧片；  
3-固定电极；4-活动电极

## 4.4 电容式传感器及其应用

### 4.4.2 电容式加速度传感器

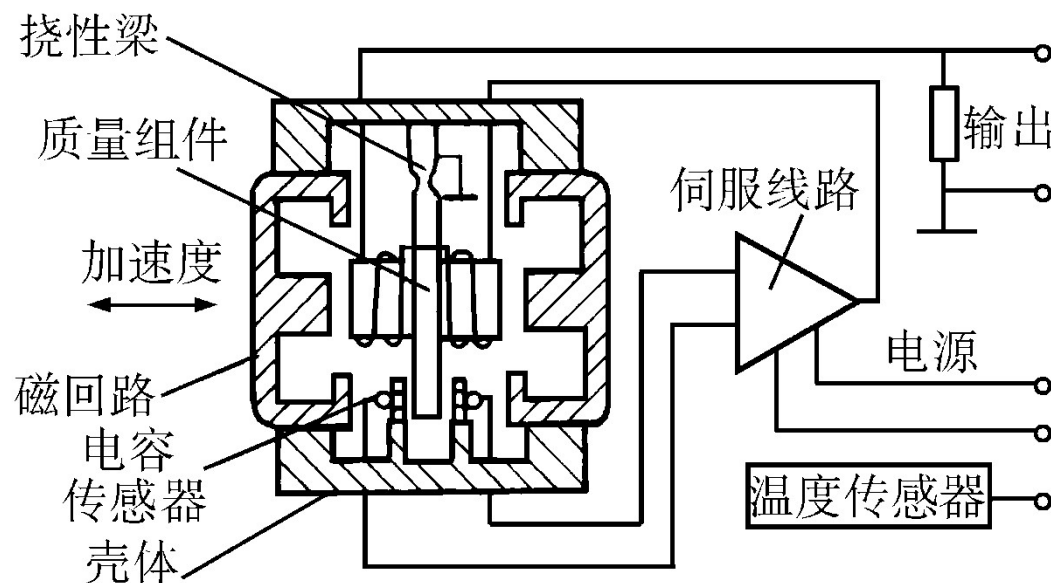
#### 工作原理

加速度输入（质量块）

差动电容输出

电流反馈

力平衡



力平衡式挠性加速度传感器



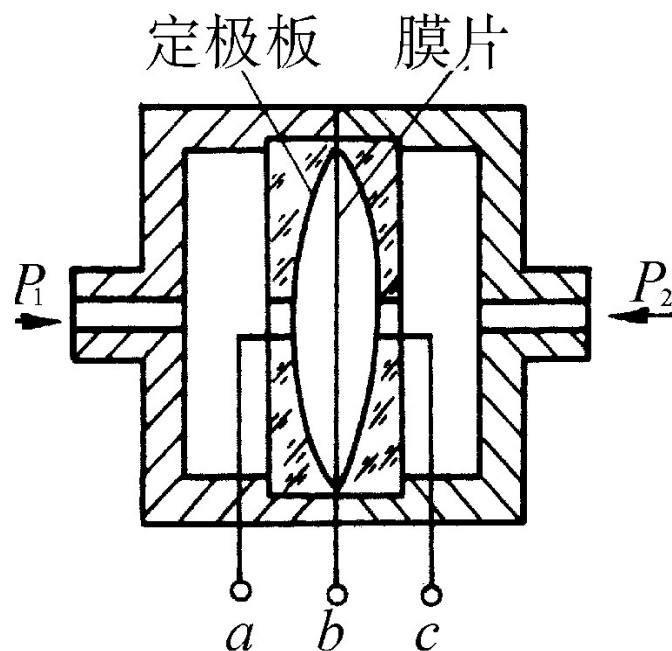
## 4.4 电容式传感器及其应用

在这种加速度传感器中，传感器和力发生器的工作面均采用微气隙“压膜阻尼”，使它比通常的油阻尼具有更好的动态特性。

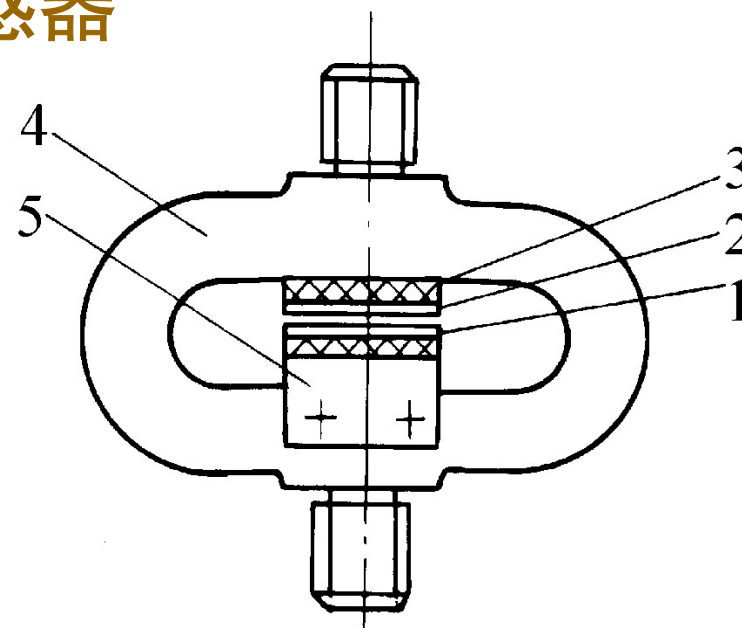
典型的石英电容式挠性加速度传感器的量程为  $0 \sim 150 \text{ m/s}^2$ ，分辨力  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，非线性误差和不重复性误差均不大于  $0.03\% \text{ F.S.}$ 。

## 4.4 电容式传感器及其应用

### 4.4.3 电容式力和压力传感器



电容式压差传感器



电容式称重传感器

1-动极板；2-定极板；  
3-绝缘材料；4-弹性体；  
5-极板支架



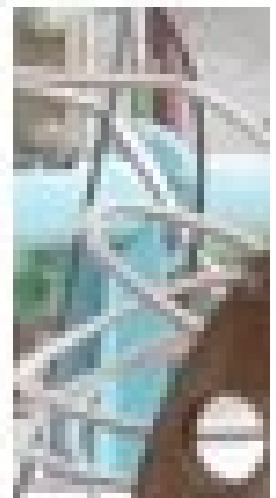
## 4.4 电容式传感器及其应用

### 4.4.4 电容式物位传感器

电容式物位传感器是利用被测介质面的变化引起电容变化的一种变介质型电容传感器。

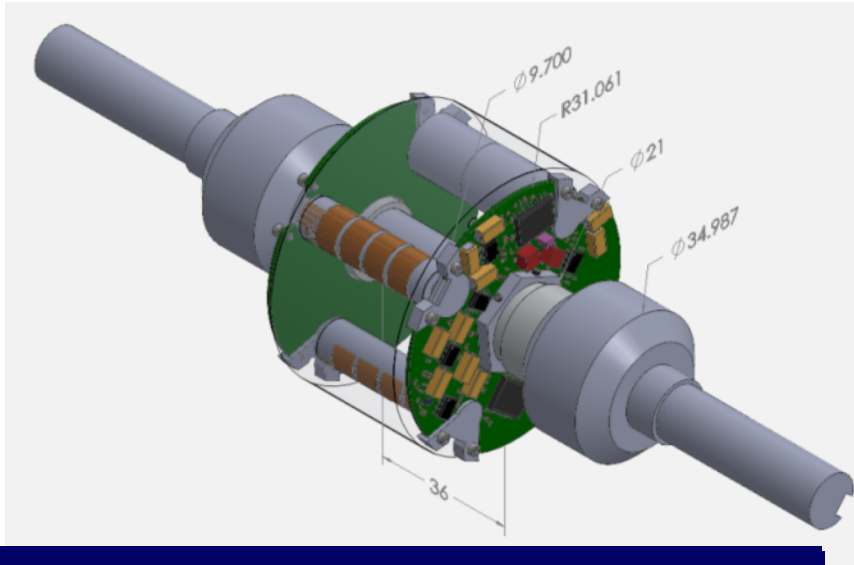
除上述应用外，电容式传感器还可用于转速测量与金属零件计数等。

## 科研演示: 电容层析成像





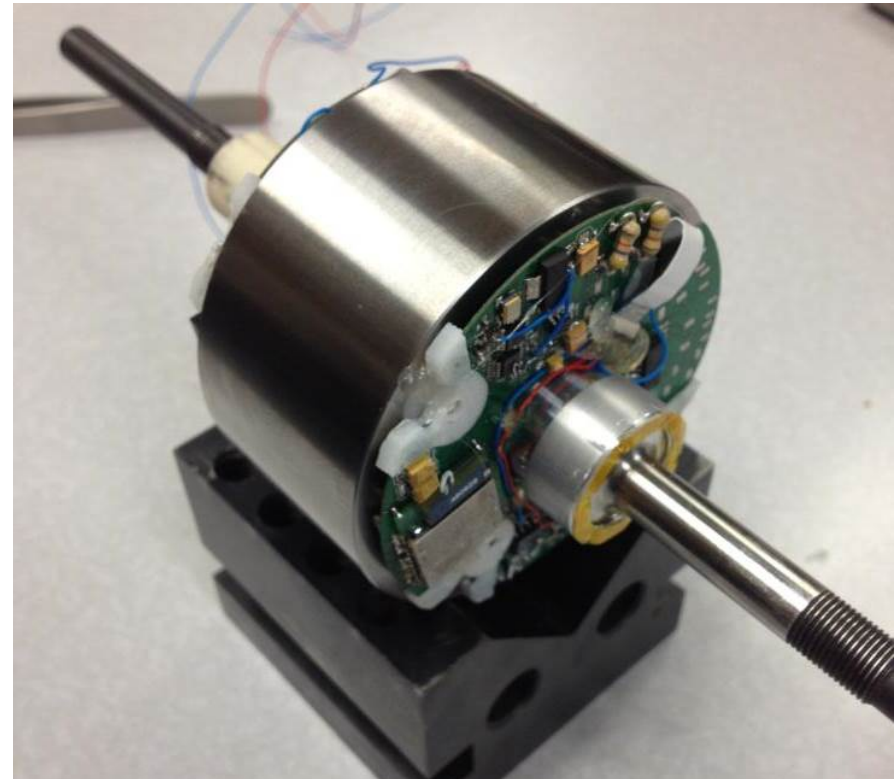
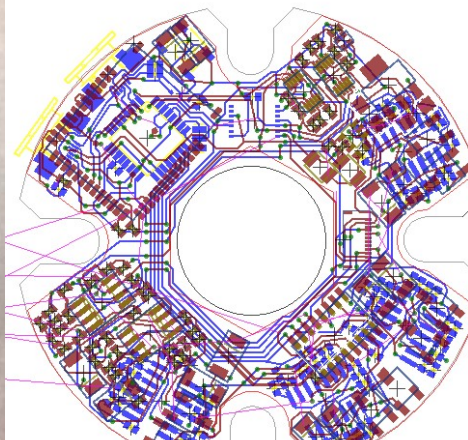
# 科研演示: 电容传感器测轮轴形变



**Mechanical Structure of Roll Assembly**



**ZigBee-Based Wireless Transmitter**



**Prototype Being Tested**

- Circuit dimension:  $\varnothing 60 \times 5.1$  mm
- Transmission distance: 5~15 m
- Transmission protocol: *ZigBee*