



石家莊鐵道大學  
SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY

在线开放课程

常用传感器

压电式传感器

主讲：马怀祥

# 目录



在线开放课程

一. 压电效应

二. 压电材料

三. 压电式传感器及其等效电路

四. 测量电路

# 压电式传感器



在线开放课程

工作原理：

压电式传感器是一种**可逆型换能器**，既可以将机械能转变为电能，又能将电能转变成机械能。是一种**能量转换型**传感器。

其工作原理是利用某些物质的**压电效应**。

# 一. 压电效应

## 1. 正向压电效应：机 $\longrightarrow$ 电

当沿着一定方向对某些电介质施力而使它变形，其内部产生极化现象，同时它的两个表面上产生符号相反的电荷；当外力去掉后又恢复不带电状态，这种将机械能转换成电能的效应称为“**正压电效应**”。

## 2. 逆向压电效应：电 $\longrightarrow$ 机

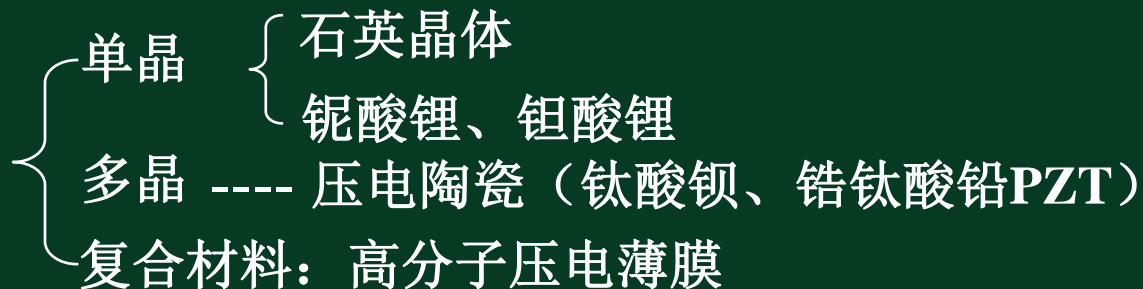
当在电介质极化方向施加电场时，电介质在一定方向上产生机械变形，内部出现机械应力，这种将电能转换成机械能的现象称“**逆压电效应**”（**电致伸缩效应**）。

## 二. 压电材料

目前为止常见的压电材料分为三大类，即：

压电晶体、压电陶瓷及新型压电材料，

它们都具有较好的特性。如具有较大的压电常数，机械性能优良，强度高，固有振荡频率稳定，时间稳定性好，温度稳定性好等，是比较理想的压电材料。

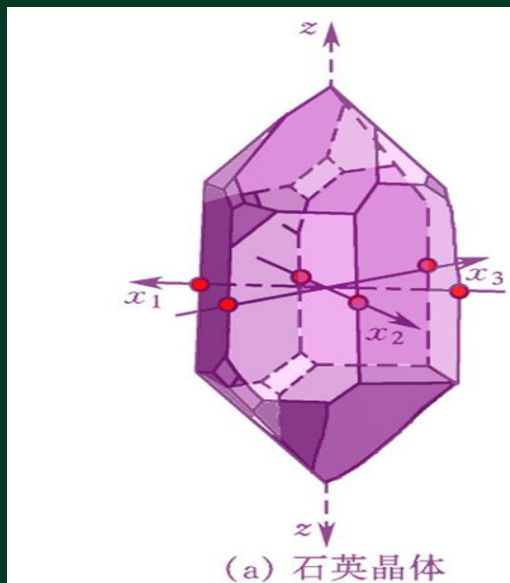


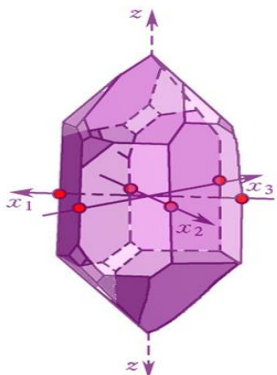
# 1. 石英晶体

理想形状：中间为六棱柱，两端为对称的棱锥，

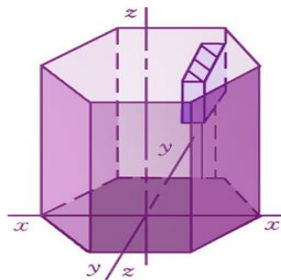
共30个晶面。

光轴  
电轴  
机械轴





(a) 石英晶体



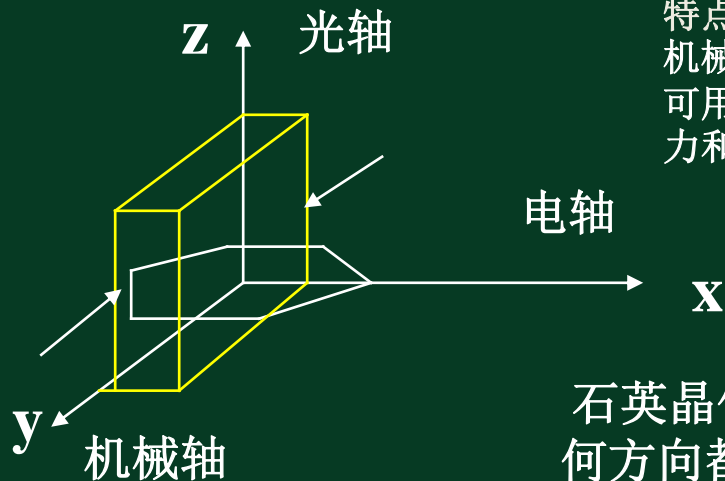
(b) 石英晶体的晶轴

**Z—光轴：**光线沿该方向通过晶体不发生双折射。不产生  
压电效应，故又称为**中性轴**。

**X—电轴：**垂直于此轴的晶面上有最强的压电效应

**Y—机械轴：**在电场作用下，y轴具有最明显的**机械变形**。

# 石英晶体压电效应模型



特点：温度稳定好；  
机械强度高；  
可用来测量大量程的  
力和加速度。

石英晶体并不是在任  
何方向都存在压电效应

① 纵向效应：

$$q_1 = D_1 F_x$$

② 横向效应：

$$q_2 = D_2 F_y$$

③ 切向效应：

$$q_3 = D_3 F_\gamma$$

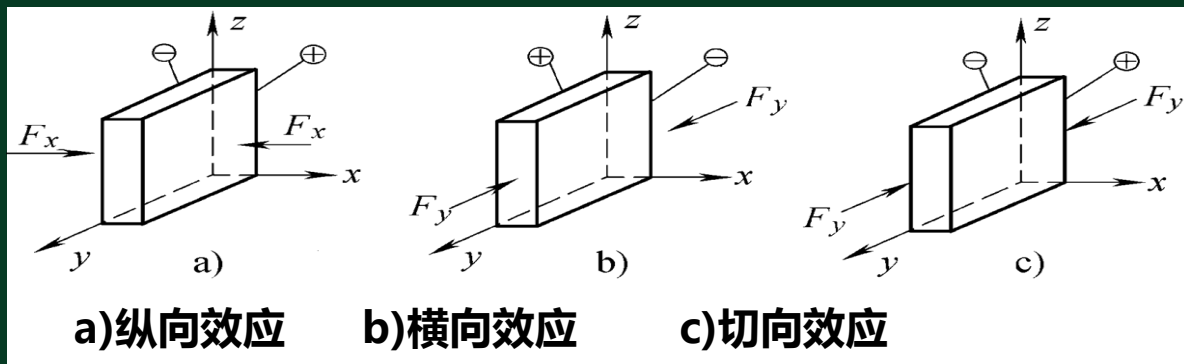


# 压电效应模型

**纵向压电效应：**沿x轴加力，电荷出现在垂直于x轴的表面。

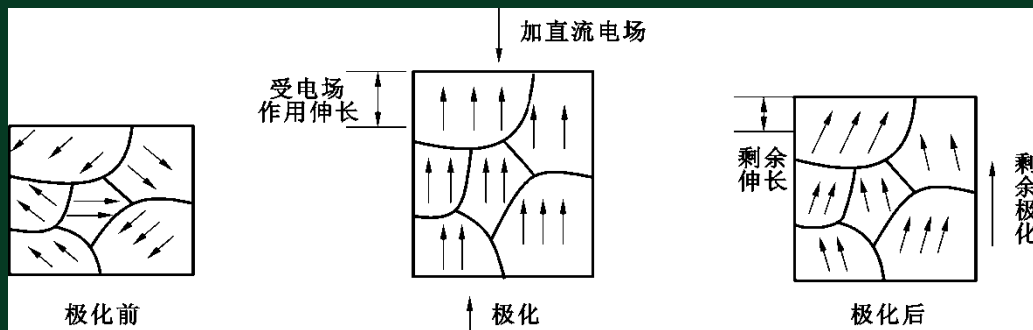
**横向压电效应：**沿y轴加力，电荷仍出现在垂直于x轴的表面。

**切向压电效应：**沿x轴或y轴施加垂直于z轴的剪切力，  
在垂直于 x 轴的晶体表面产生电荷。



## 2. 压电陶瓷

### 多晶铁电体 极化

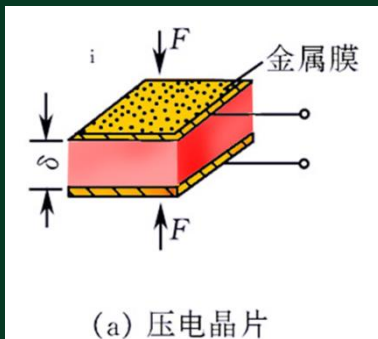


特点：制造工艺成熟；灵敏度好；成本低。

### 三. 压电式传感器及其等效电路

#### 1. 等效电路

具有一定电容的电荷源



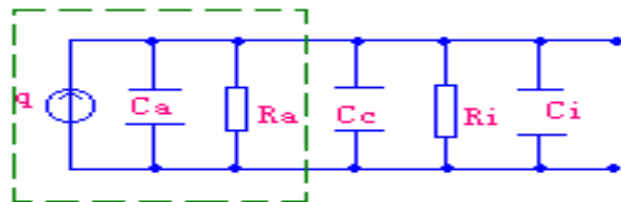
等效电容:

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

开路电压:

$$U_0 = \frac{q}{C_a}$$

等效电路:



# 等效电路

$$C = C_a + C_c + C_i$$

$$R_0 = R_i // R_a$$

根据电荷平衡建立方程式:

$$q = Cu + \int idt$$

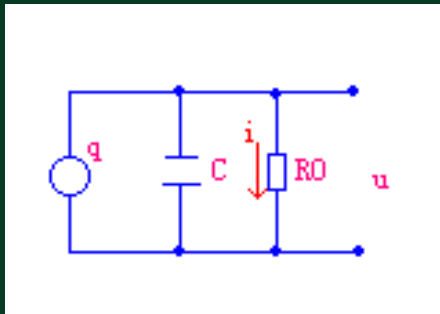
$$\text{又} \because i = u / R_0$$

$$\text{则: } CR_0 i + \int idt = q$$

两边取拉氏变换:

$$CR_0 I(s) + \frac{I(s)}{s} = Q(s)$$

$$\therefore \frac{I(s)}{Q(s)} = \frac{s}{1 + R_0 C s} = H(s)$$



∴ 频率响应函数

$$H(\omega) = \frac{j\omega}{1 + R_0 C j\omega}$$

幅频响应函数:

$$A(\omega) = \frac{\omega}{\sqrt{1 + (R_0 C \omega)^2}}$$

相频响应函数:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{1}{\omega R_0 C}。$$

若作用在压电晶片上的作用力为:

$$F = F_0 \sin \omega t$$

则相应表面电荷为:

$$q = D \cdot F = D F_0 \sin \omega t = q_0 \sin \omega t$$

根据线性时不变系统的特性，其稳态输出：

$$i(t) = q_0 A(\omega) \sin[\omega t + \varphi(\omega)]$$
$$= \frac{q_0 \omega}{\sqrt{1 + (R_0 C \omega)^2}} \sin[\omega t + \varphi(\omega)]$$

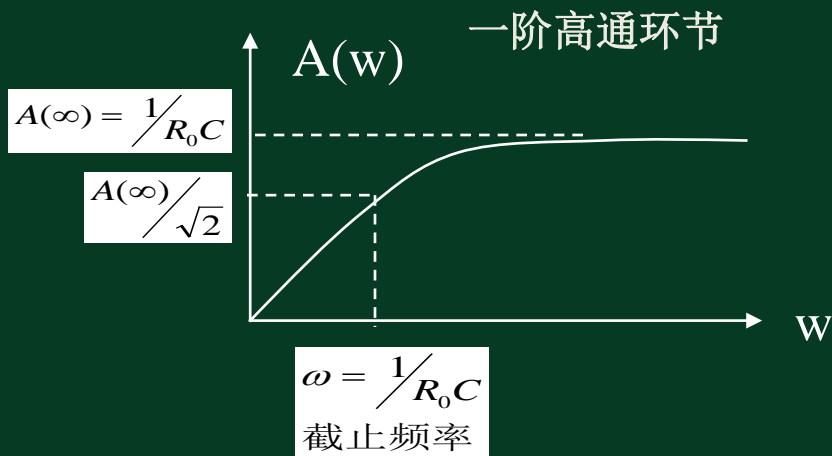
∴ 输出电压值：

$$u = i \cdot R_0 = \frac{q_0}{C} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega R_0 C}\right)^2}} \sin[\omega t + \varphi(\omega)]$$

$$A(\omega) = \frac{\omega}{\sqrt{1 + (R_0 C \omega)^2}}$$

当  $\omega \gg 1/R_0 C$  时,  $A(\omega) \approx 1/R_0 C; \varphi(\omega) \approx 0$

能实现不失真传输

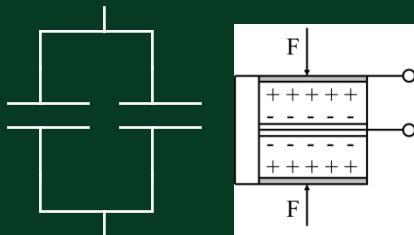


可见压电元件具有优良的高频特性，低频特性不好。为了改善其低频特性（降低下限截止频率），需有较大的 $R_0$ 或 $C$ 。而 $R_0 \approx R_i$ ，即压电元件需后接高输入阻抗的运算放大器。

## 2.压电元件常用结构形式

### ①并联:

$$C'=2C \quad u'=u \quad q'=2q$$

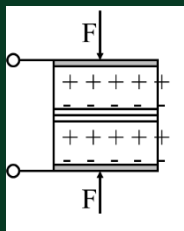


时间常数大, 动态响应差, 适合于慢变信号的测量。以电荷量输出的场合。

### ②串联:



$$C'=C/2 \quad u'=2u \quad q'=q$$



时间常数小, 动态响应好, 适合于快变信号的测量。以电压作为输出的场合。



## 四. 测量电路

### 1. 压电传感器对测量电路的要求:

压电传感器内阻很高, 且信号微弱, 因此, 一般不能直接显示和记录, 而需经过二次仪表进行阻抗变换和信号放大。

压电传感器需后接高输入阻抗的前置放大器。

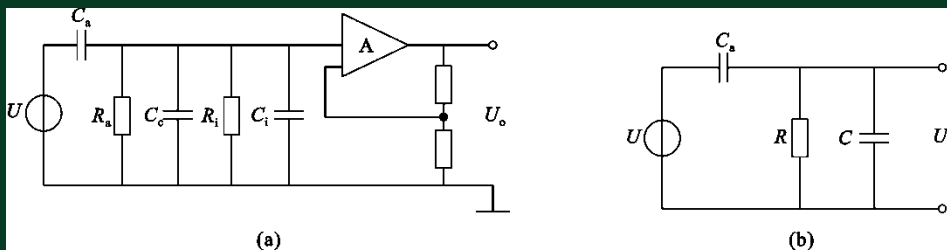
### 2. 前置放大器的作用:

{ 阻抗变换 (高输入阻抗  $\longrightarrow$  低输出阻抗)  
放大微弱信号

### 3. 前置放大器的形式:

{ 电压放大器: 电阻反馈; 输出电压与输入电压成正比。  
电荷放大器: 带电容负反馈的高增益运放; 输出电压与输入电荷成正比。

# ①电压放大器



$$\text{输出: } u_y = -uA = -\frac{q_0 A}{C} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega C R_0}\right)^2}} \sin(\omega t + \varphi)$$

当 $\omega$ 很高时，输出信号的幅值：

$$U_0 = \frac{q_0 A}{C}$$

其中 $C = C_a + C_c + C_i$

**问题：**输出电压与电缆电容有关。如果电缆电容变化，灵敏度也随之变化。

## ②电荷放大器

由电荷平衡建立方程式:

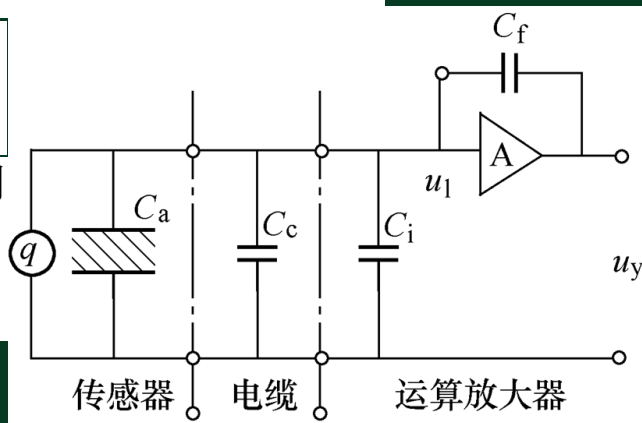
$$\begin{aligned}q &= u_i(C_a + C_c + C_i) + (u_i - u_y)C_f \\ &= u_i C + (u_i - u_y)C_f\end{aligned}$$

$$\therefore u_y = -Au_i$$

$$\therefore u_y = \frac{-Aq}{(C + C_f) + AC_f}$$

当A足够大, 使 $AC_f \gg (C + C_f)$ , 则

$$u_y \approx \frac{-q}{C_f}$$



电荷放大器: 输出电压与传感器的电荷量近似成正比, 且只与反馈电容有关, 不受电缆电容的影响。

# 小结



在线开放课程

掌握压电效应、压电传感器的测量电路特点