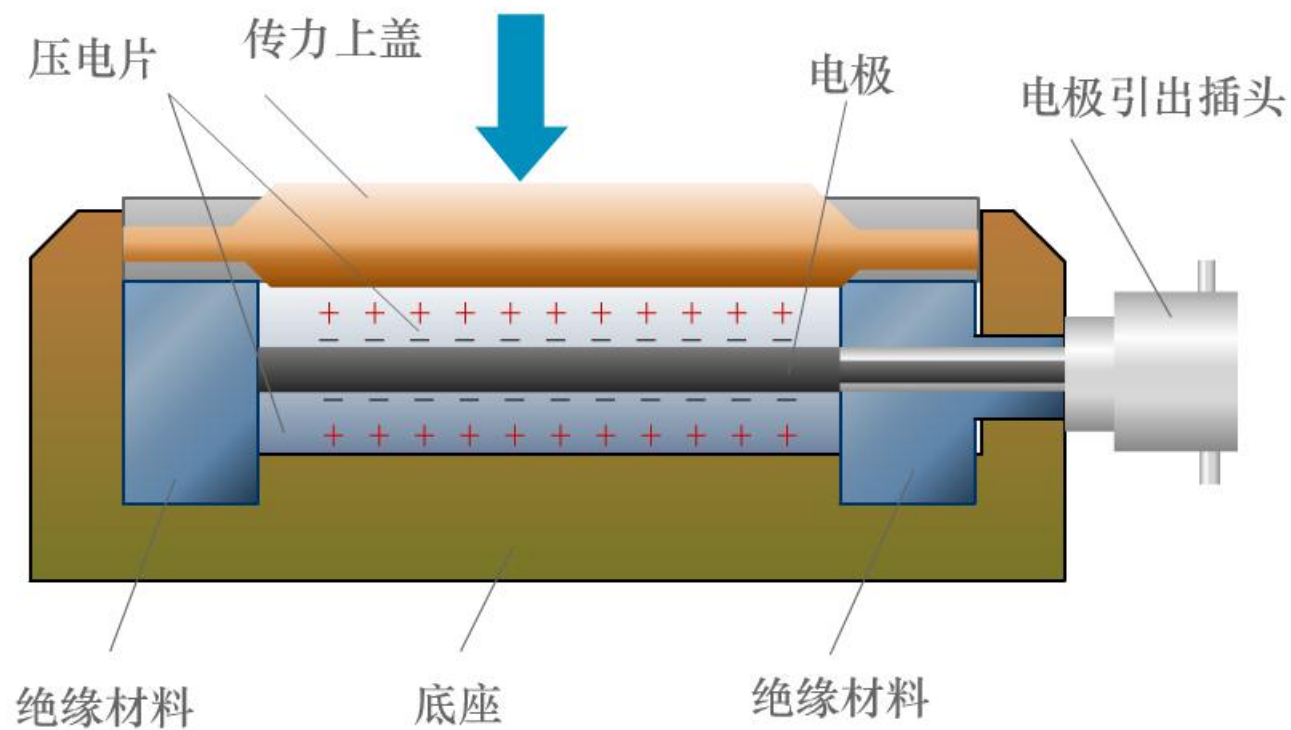




## 第七章 压电式传感器

---

- ◆ 压电效应（转换）一定性和定量 \*\*\*
- ◆ 几种压电材料及其机理（石英、压电陶瓷、高分子材料）
- ◆ 常用测量电路
- ◆ 应用实例



压电测力传感器



# 压电效应（转换）

---

- 压电效应一定性

- 某些电介质，当沿着一定方向对其施力而使它变形时，内部就产生极化现象，同时在它的两个表面上便产生符号相反的电荷，当外力去掉后，又重新恢复到不带电状态。
- 压电材料受力变形，在表面产生电荷——正压电效应
- 压电材料通电压，材料变形——逆压电效应

# 压电效应（转换）

## ■ 压电效应一定量（数学模型）压电转换

$$\text{输出} \rightarrow \mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \mathbf{D} \times \boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \leftarrow \text{输入}$$

- 分析对象：压电材料微单元—六面体
- 输入：微单元上的作用力—材料力学六应力（三正应力、三剪切应力）
- 输出：端面电荷—成对端面上的电荷（前后、左右、上下端面）
- 微单元压电转换—压电系数矩阵  $\tilde{q}_i = d_{ij} \sigma_j$
- 实际应用中：输入为单一应力，输出为该应力作用后的某对端面电量。

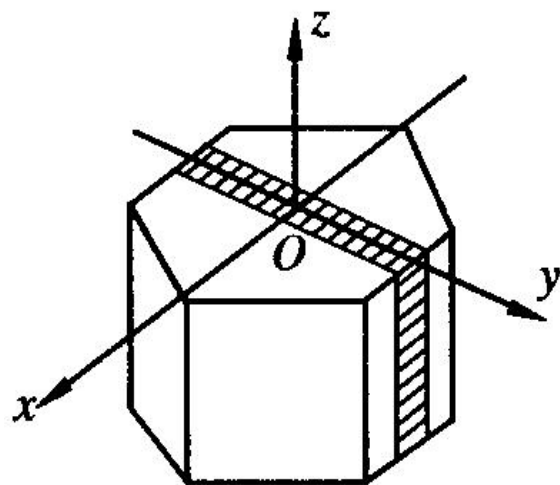
其中：i=1, 2, 3表示晶体极化方向，指的是与产生电荷的面垂直的方向；j=1, 2, 3, 4, 5, 6表示受力方向，1~3表示x, y, z向受力，4~6表示剪切力方向



## 压电材料的其他主要特性参数

- 压电常数是衡量材料压电效应强弱的参数, 它直接关系到压电输出的灵敏度。
- 压电常数的温度稳定性: 压电材料开始丧失压电特性的温度称为居里点温度, 选材时, 居里点越? 越好。 ■
- 在压电效应中,机械耦合系数等于转换输出能量(如电能)与输入的能量(如机械能)之比的平方根; 它是衡量压电材料机电能量转换效率的一个重要参数。
- 压电材料的绝缘电阻将减少电荷泄漏, 从而改善压电传感器的低频特性。
- 压电材料的弹性常数、刚度决定着压电器件的固有频率和动态特性。
- 对于一定形状、尺寸的压电元件, 其固有电容与介电常数有关; 而固有电容又影响着压电传感器的频率下限。

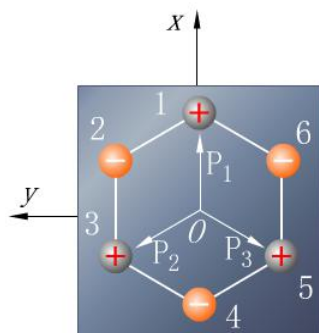
# 石英晶体的压电机理分析



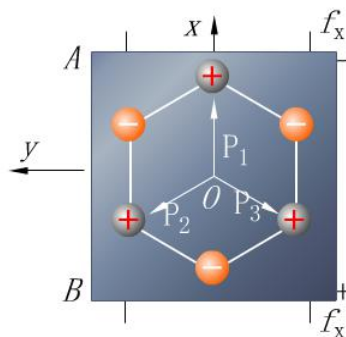
- 晶体结构：六方晶体系，化学式为 $\text{SiO}_2$ 。
- 定义：
  - x：两相邻（非平行）柱面内夹角等分线，垂直此轴压电效应最强。称为电轴。
  - y：垂直于平行柱面，在电场作用下变形最大，称为机械轴。
  - z：无压电效应，中心轴，也称光轴。
- 特性：
  - 在多个方向上均可能产生压电效应
  - 根据不同应用，对压电材料采取不同切片方式
    - 沿yoz平面切片
    - 在垂直于x轴的两端面上镀电极膜 ???
    - 微单元压电效应：  $q_1 = d_{11}\sigma_1$

## 电偶极距???

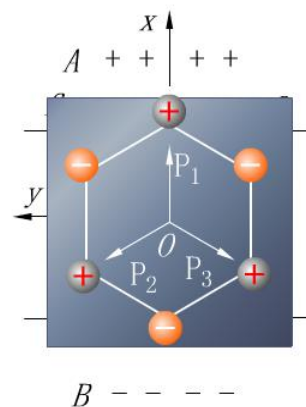
石英压电机理：晶体受力变形后，晶体内的电偶极距在某一方  
向上不再平衡，在该方向上产生电荷，产生电荷分布与总电偶  
极距方向相反。



(a) 不受力时

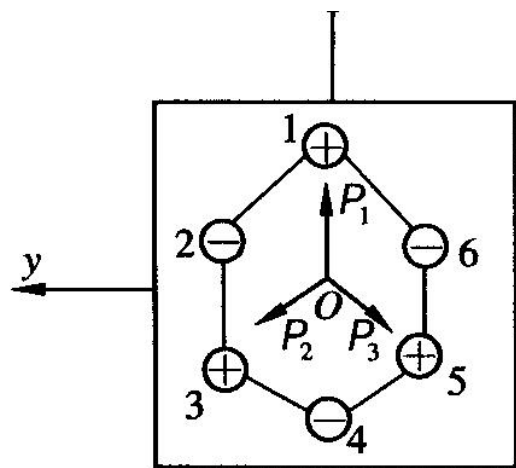


(b) x轴方向受力

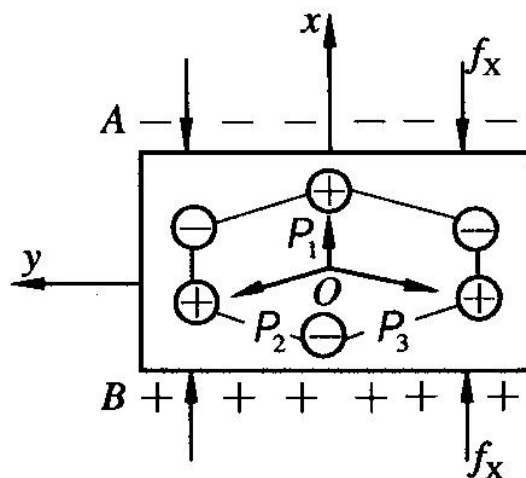


(c) y轴方向受力

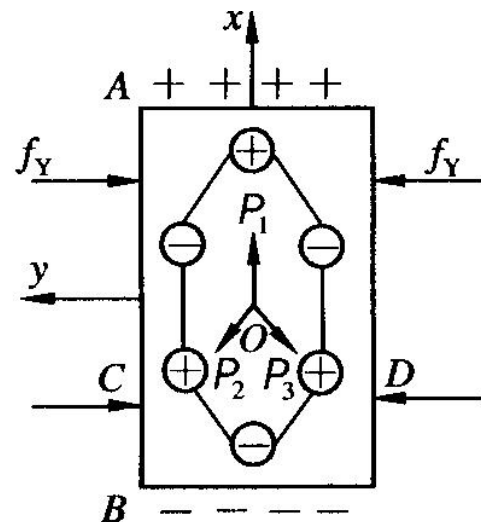
## 石英晶体压电模型



(a)



(b)



(c)

- 当石英晶体未受外力作用时, 正、负离子正好分布在正六边形的顶角上, 形成三个互成 $120^\circ$  夹角的电偶极矩 $\mathbf{P}_1$ 、 $\mathbf{P}_2$ 、 $\mathbf{P}_3$ ,  $\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_3 = 0$ , 所以晶体表面不产生电荷, 即呈中性。
- 当石英晶体受到沿x轴方向的压力作用时, 晶体沿x方向将产生压缩变形, 正负电荷重心不再重合, 在x轴的正方向出现正电荷, 电偶极矩在y方向上的分量仍为零, 不出现电荷。
- 当晶体受到沿y轴方向的压力作用时, 在x轴上出现电荷, 它的极性为x轴正向为负电荷。在y轴方向上不出现电荷。 ■
- 如果沿z轴方向施加作用力, 因为晶体在x方向和y方向所产生的形变完全相同, 所以正负电荷重心保持重合, 电偶极矩矢量和等于零。这表明沿z轴方向施加作用力, 晶体不会产生压电效应。 ■

结论:

$$d_{12} = -d_{11};$$

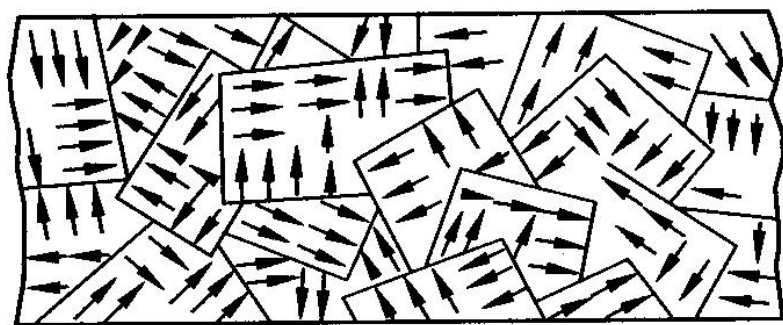
$$d_{25} = -d_{41};$$

$$d_{26} = -2d_{11};$$

电偶极距规律?

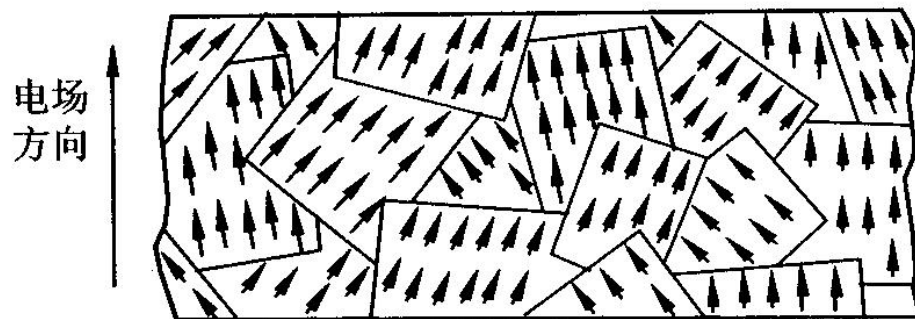


# 压电陶瓷的压电机理



(a)

电畴：自发极化方向相同的小区域



(b)

**极化现象：**压电陶瓷由无数细微的电畴组成，极化前，这些电畴因自发极化，方向呈任意排列；在一定温度下经强直流电场2~3小时极化后，各微单元电畴呈同一方向排列。

**压电机理：**极化后的压电陶瓷，其内部仍存在同向排列的电畴，受外力作用后，电畴的界限发生移动，电极距失衡，呈现压电效应。



# 压电陶瓷的压电机理

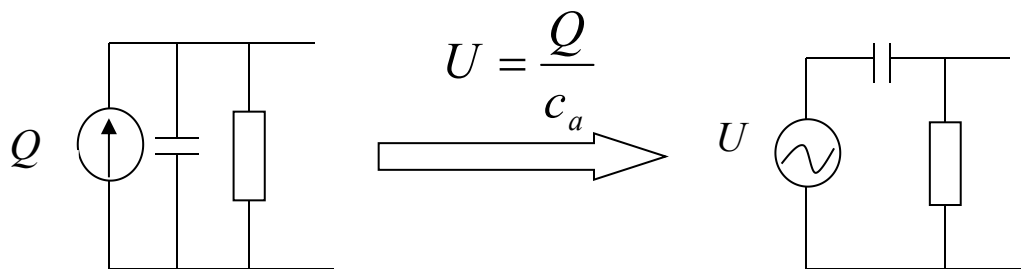
---

## 压电晶体与压电陶瓷的比较：

- 相同点：都是具有压电效应的压电材料。
- 不同点：
  - 压电陶瓷：
    - 优点：压电常数大，易于成型，成本低
    - 缺点：压电常数稳定性低，居里点低
  - 石英：
    - 优点：压电常数稳定性高，居里点高，机械强度高，绝缘性能好
    - 缺点：价格昂贵

# 压电式传感器的等效电路

- 压电式传感器是有源器件；聚集正负电荷的两表面够成电容。



压电传感器：电荷源

输出电流恒定、两端电压在变

压电传感器：电压源

输出电压恒定、流经电流在变

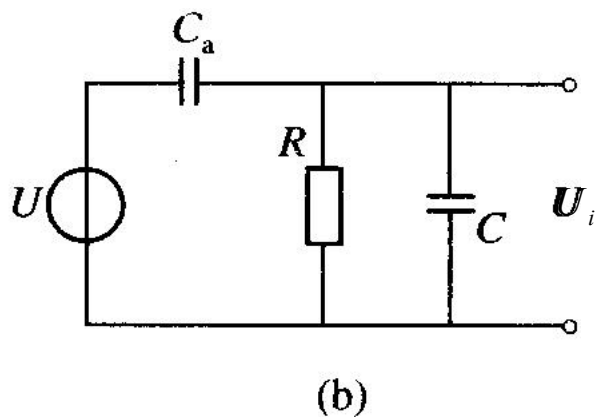
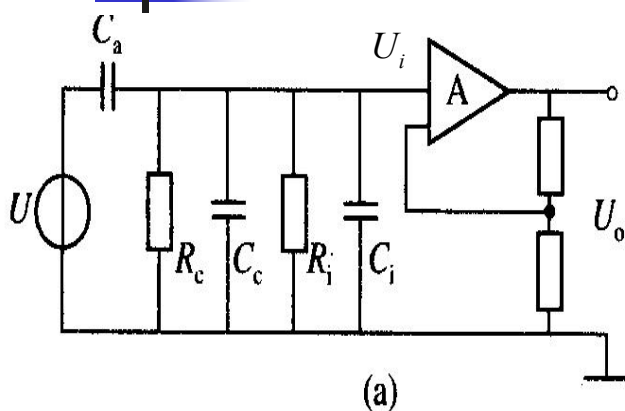


# 压电式传感器的测量电路

---

- 压电式传感器的特点：高阻抗，低能量。
- 接入高输入阻抗前置放大器的作用：把传感器的高输出阻抗变换为低输出阻抗。
- 压电式传感器的输出可以是电压信号，也可以是电荷信号。
  - 电压放大器
  - 电荷放大器

# 电压放大器



$$\left. \begin{aligned} Q &= dF \\ U &= \frac{Q}{C_a} \end{aligned} \right\} \Rightarrow U = \frac{dF}{C_a} \Rightarrow \dot{U} = \frac{d\dot{F}}{C_a}$$

$$\dot{U}_i = \dot{U} \cdot \frac{R \parallel \frac{1}{j\omega C}}{R \parallel \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{j\omega C_a}} = d\dot{F} \frac{j\omega R}{1 + j\omega R(C + C_a)}$$

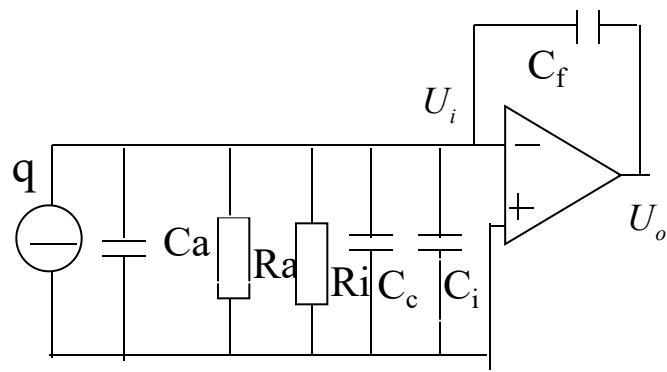
$$\Rightarrow \left\{ \begin{aligned} \text{幅频: } U_{im}(\omega) &= \frac{dF_m \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C + C_a)^2}} \\ \text{相频: } \phi(\omega) &= \frac{\pi}{2} - \text{tg}^{-1} \omega (C + C_a) R \end{aligned} \right.$$

当  $\omega \rightarrow \infty$  时,  $U_{im}(\infty) = \frac{dF_m}{C + C_a}$  与电缆电容有关

当  $\omega \rightarrow 0$  时,  $U_{im}(0) = 0$

**结论:** 不能放大压电传感器静态受力的输出信号;任何低于截止频率的压电信号,衰减很严重(见课本)

# 电荷放大器



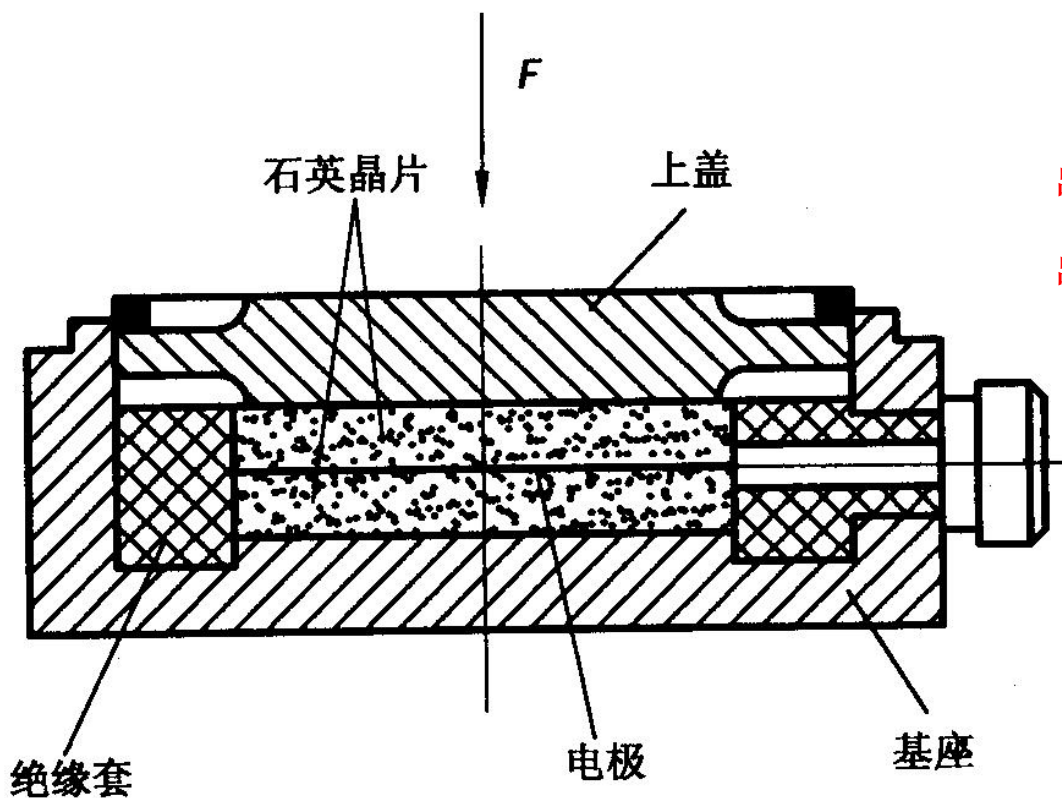
- 运算放大器输入阻抗很高，传感器绝缘电阻也很高，故可近似  
 $R_a = \infty$   $R_i = \infty$  并将反馈电容折算到输入端

$$\dot{U}_o = -A \cdot \dot{U}_i = -A \cdot \frac{q}{C_a + C_c + C_i + (1+A)C_F}$$
$$\approx -\frac{q}{C_F}$$

- 输出电压与电缆电容 $C_c$ 无关，且 $\omega$ 的影响不明显（由于作了简化假设，表达式上是无关的）
- 与 $q$ 成正比，呈线性输出特性
- 这些优点使得压电传感器基本上都用电荷放大器作为转换电路。

# 压电式传感器的应用

## ■ 压电式测力传感器



串联/并联接法??

串联/并联输出特性??