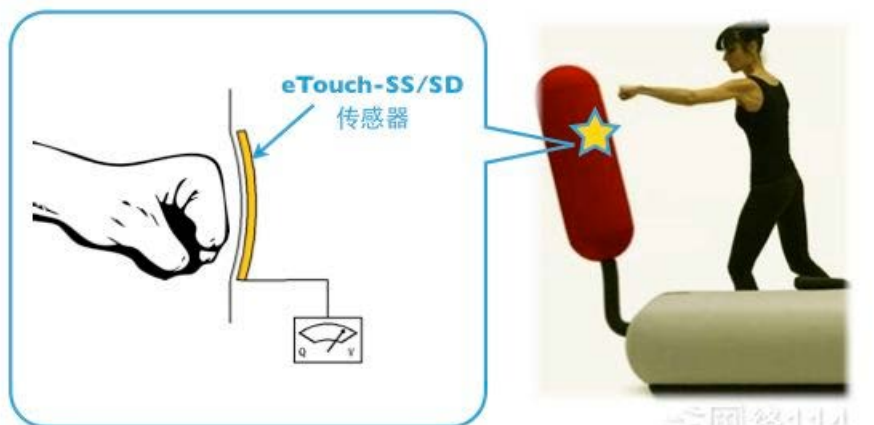


压电传感器

主讲教师：宋宏

詹舒越2019-4-16修订

压电传感器 (Piezo sensor/ transducer)



压电传感器

- 作用：
是力敏传感器，将压力、重力，以及与力有关的量转化为压电器件表面的电荷量，以实现非电量的测量。
- 有源传感器，发电型传感器
- 原理：
基于压电晶体、压电陶瓷等某些材料的压电效应能量的转换

本节主要内容

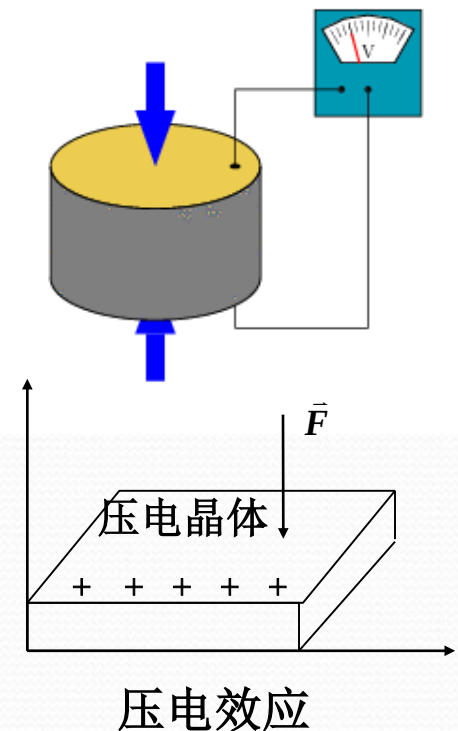
- 压电效应和压电方程
- 压电材料
- 压电传感器的信号调理电路
- 压电式加速度传感器
- 压电逆效应的应用
- 超声波传感器

压电效应和压电方程

压电效应(piezo-electricity effect)

压电材料在一定方向上受力，产生机械形变，表面聚集电荷；撤掉外力，重新返回不带电状态。（**正压电效应**）

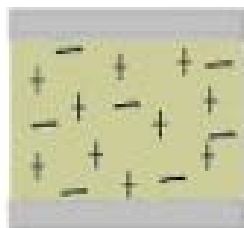
比如：单晶体 SiO_2 ，受机械外力时，晶体内部产生极化现象（类磁铁），晶体产生内部电场，表面相反电荷
外力撤销，极化消失，恢复



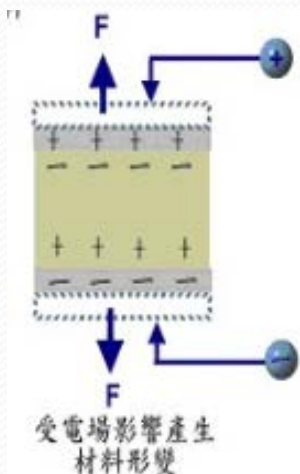
逆压电效应

若对上述电介质施加电场作用时，同样会引起它内部的正负电荷中心相对转移而导致电介质产生形变，且其应变 S 与外电场强度 E 成正比。这种现象称为**逆压电效应**，或称电致伸缩。

具有压电特性的电介质(压电材料)能够实现**机—电**能量的相互转换，可逆



未受電場及應力
影響之壓電材料



受電場影響產生
材料形變



(b)

压电效应和压电方程

- 非压电材料介质电容，施加外力T：

$$S = sT \quad D = \varepsilon E$$

D是电位移矢量（electric displacement, 或电通量密度）；

ε 是介电常数(permittivity)；

E是外界作用在极板上的电场强度(electric field strength)；

S是弹性范围内的变形(strain)；

T是外加力形成的应力(stress)；

s为柔量（ compliance ）。

电容极板电荷： $Q=D*A$. A为极板面积。

柔量：弹性常数，=应变/应力

对一个完善的弹性材料来说，它是弹性模量的倒数，即材料每单位应力的变形率。常见的实验测定的柔量有拉伸柔量、剪切柔量、蠕变柔量等。

压电效应和压电方程

- 绝缘的非压电材料介质电容，施加外力 T ：

$$S = sT \quad D = \varepsilon E$$

D 是位移矢量（或电通量密度）； ε 是介电常数； S 是弹性范围内的变形； T 是外加力形成的应力； E 是作用在极板上的电位差形成的电场； s 为柔量。

- 如果压电材料为介质，在低频上有

正压电： $D = dT + \varepsilon^T E$ （应力引起电荷）

逆压电： $S = s^E T + d' E$ （电场引起应变）

表面积不变时， $d=d'$ ； d 是**压电系数**，量纲为C/N； ε^T 是在恒定应力下的介电常数； s^E 是在恒定电场下的柔量。

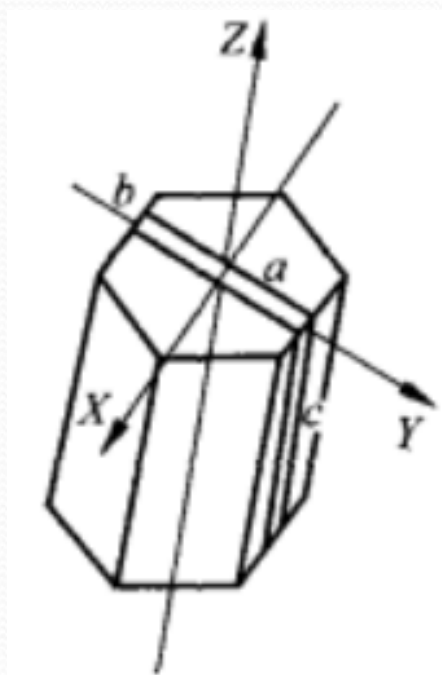
本节主要内容

- 压电效应和压电方程
- 压电材料
- 压电传感器的信号调理电路
- 压电式加速度传感器
- 压电逆效应的应用
- 超声波传感器

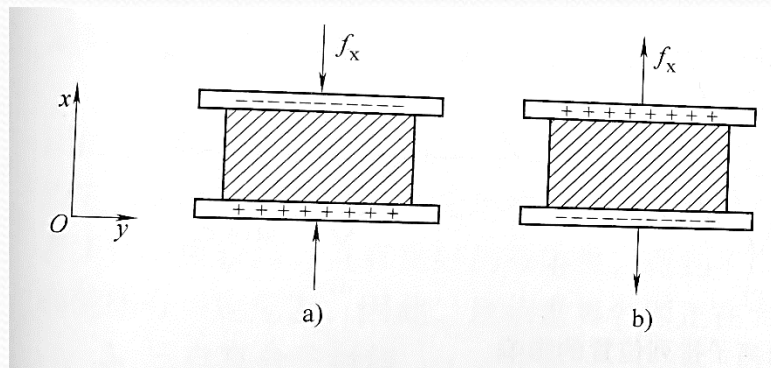
压电材料

一、压电晶体

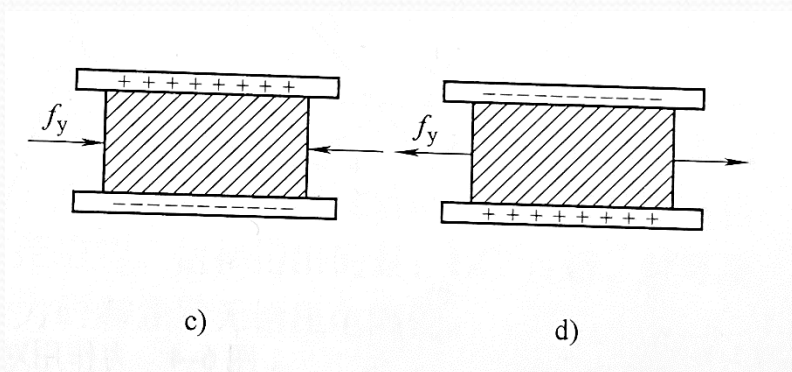
- 石英晶体（单晶体）Z中轴称之为**光轴**（Z轴无压电效应）；
- X轴称为**电轴**：力X、Y→电荷始终在X轴，正向压电效应最强
- Y轴称为机械轴：机械形变最明显



纵向压电效应

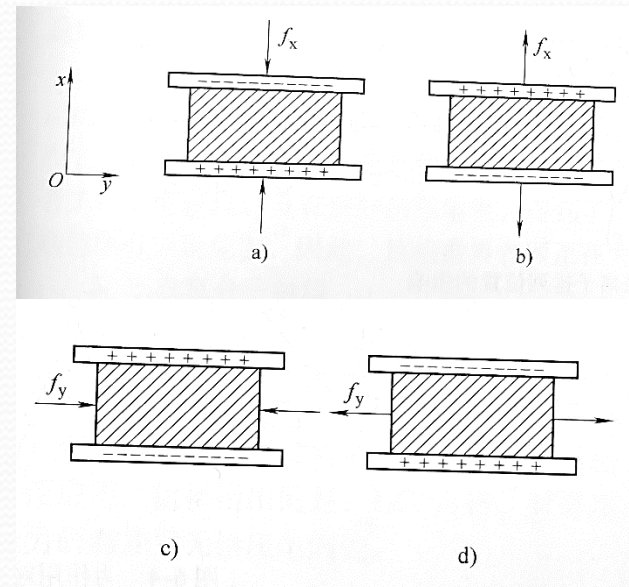
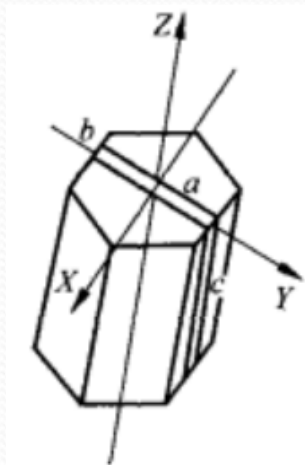


横向压电效应

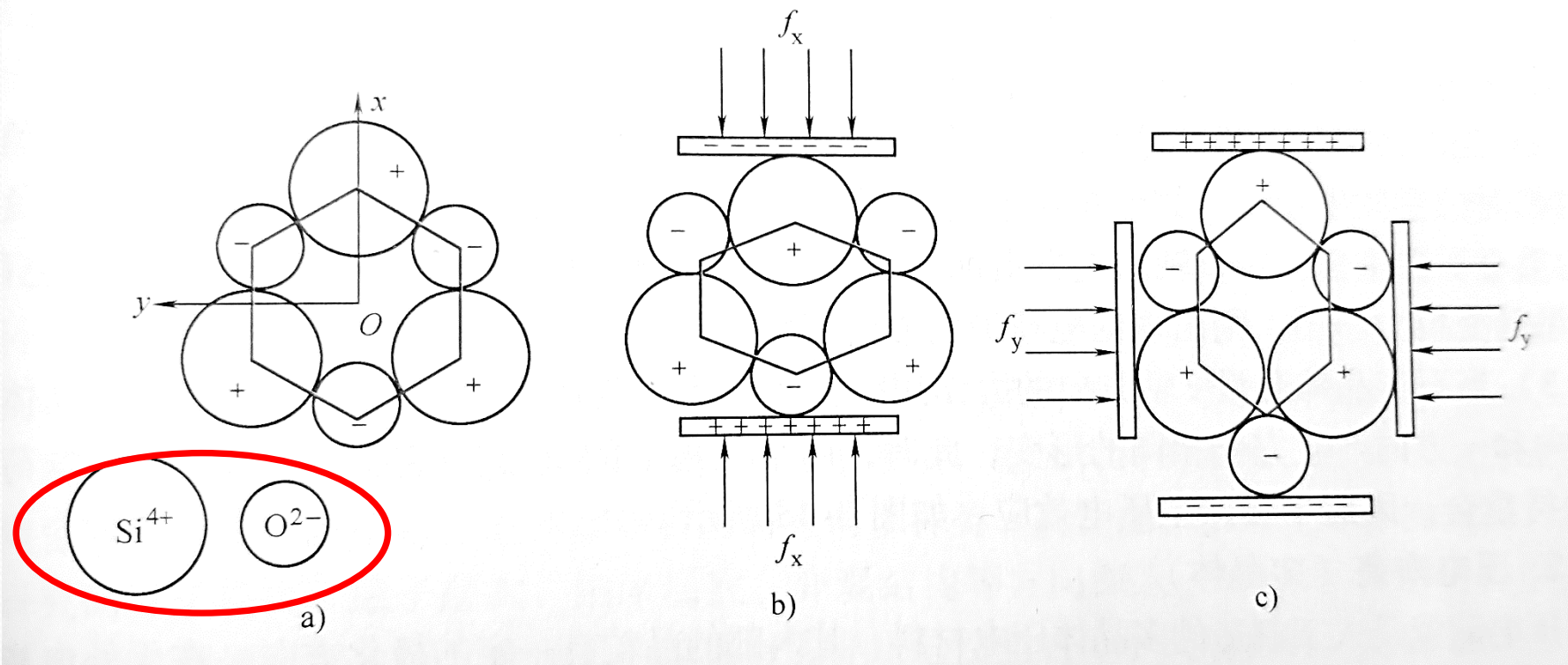


纵向、横向压电效应

- 纵向 (longitudinal) : 力与电荷同方向
 F_x , X轴压电效应最强
- 横向 (transversal) : 力与电荷方向垂直
 F_y , Y轴机械变化最明显



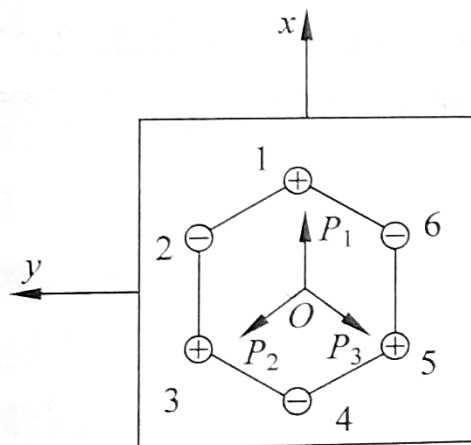
示例压电晶体： SiO_2



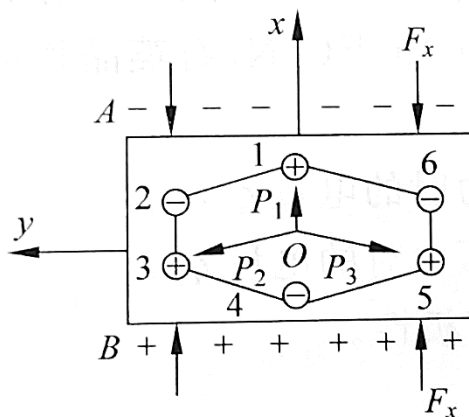
- (a) 正负电荷是互相平衡的，所以外部没有带电现象。
(b) 在X轴方向压缩，表面A上呈现负电荷、B表面呈现正电荷。
(c) 沿Y轴方向压缩，在A和B表面上分别呈现正电荷和负电荷

压电材料

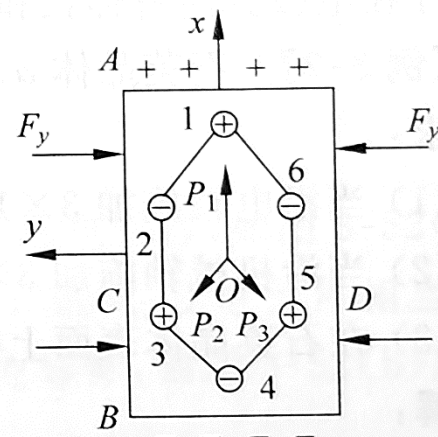
电荷方向



(a)



(b)



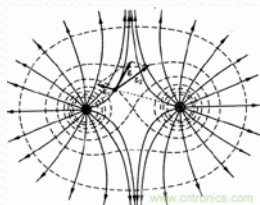
(c)

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3 = 0$$

$$(\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3)_X < 0$$

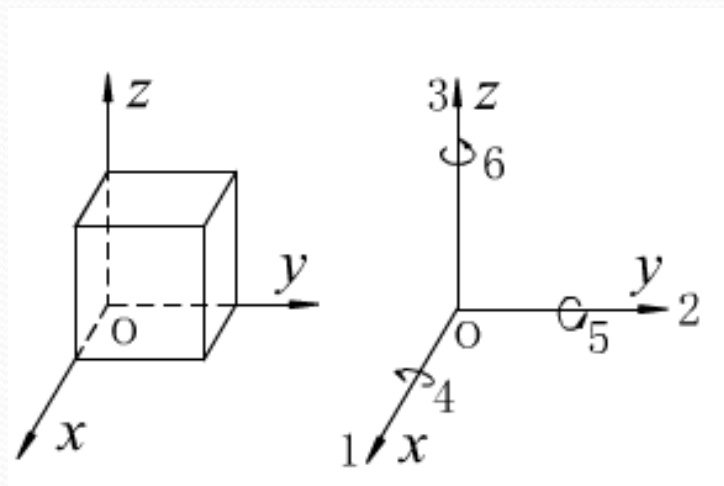
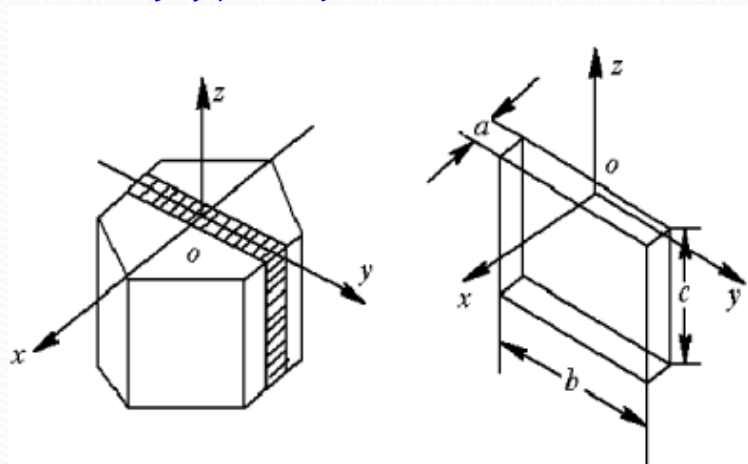
$$(\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3)_X > 0$$

P: 电偶极矩, =电量*矢径



压电材料

电荷大小



$$q_i = d_{ij} f_j$$

q : 电荷量, 极化强度, C

i : X, Y, 或者Z方向, $i=1,2,3$

j : 延各轴的单位应力或者剪切力, $j=1,2,3,4,5,6$

d : 压电系数, C/N

f : 作用力

压电材料

电荷大小

压电材料的压电特性可用压电系数矩阵表示

$$q_i = d_{ij} f_j$$

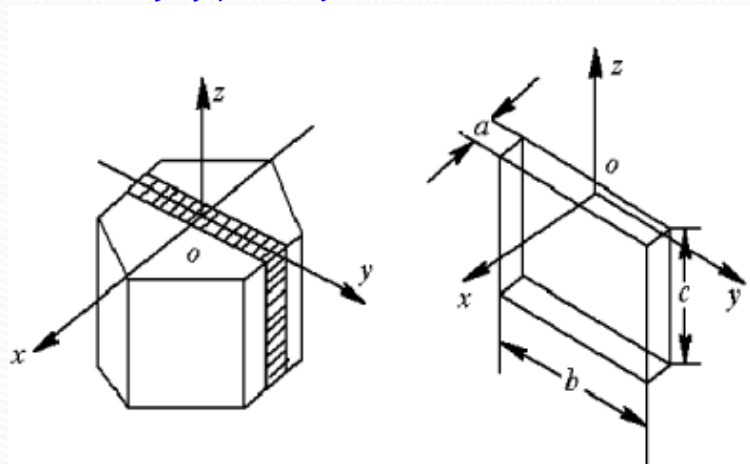


$$\begin{bmatrix} q_X \\ q_Y \\ q_Z \end{bmatrix} = ? \times \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix}$$

压电系数越小，压电材料的电荷产生能力越？对应传感器灵敏度越？

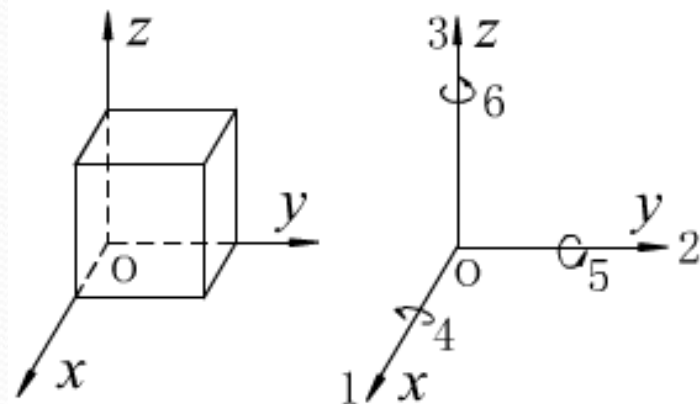
压电材料

电荷大小



沿**x轴**施加作用力:

$$q_X = d_{11} f_X$$

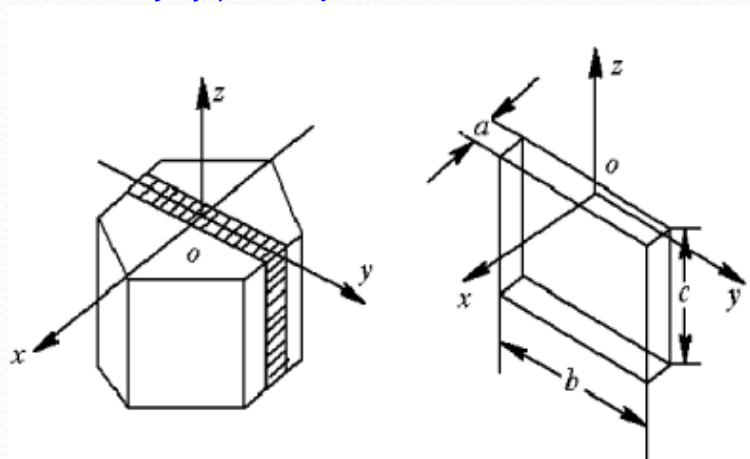


q_x : yz平面上产生的电荷量
 d_{11} : x方向受力的**压电系数**
 f_x : x轴方向作用力

- 压缩力时电荷方向为负;
- 电荷量与切片几何尺寸无关;

压电材料

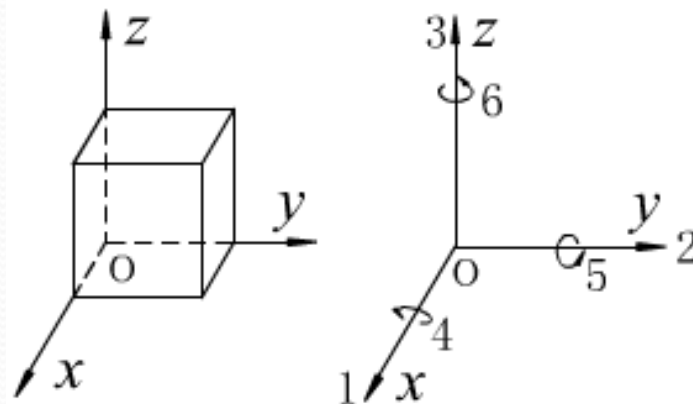
电荷大小



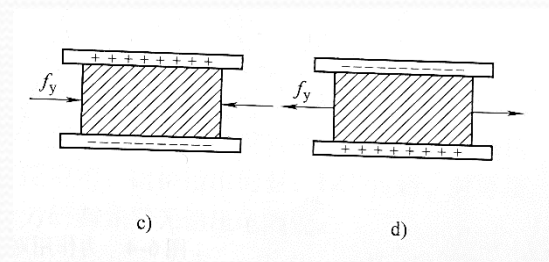
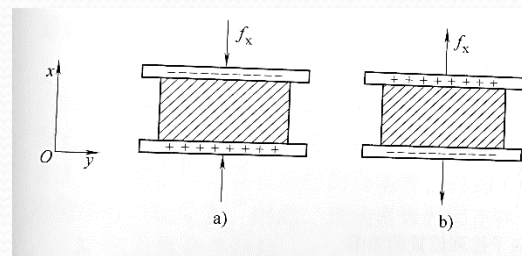
沿y轴施加作用力:

$$q_X = d_{12} \frac{b}{a} f_Y$$

- 压缩力时电荷方向为正;
- 电荷量与切片几何尺寸有关;

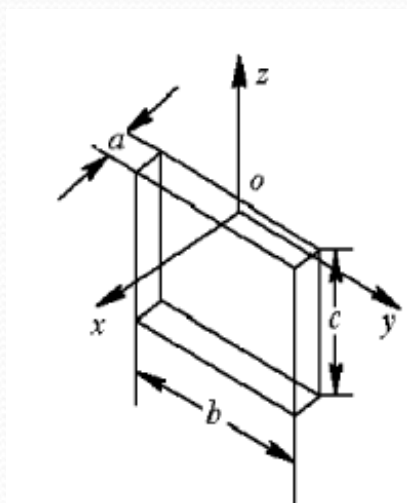


d_{12} : y方向受力的压电系数
(石英轴对称, $d_{12} = -d_{11}$)



石英晶体 d_{11} 为 $2.3 \times 10^{-12} \text{C/N}$ ，石英晶片的长度是宽度的2倍、是厚度的3倍。求：

- (1) 当沿电轴施加 $3 \times 10^6 \text{N}$ 压力时的电量。
- (2) 当沿机械轴施加同样压力时的电量。
- (3) 在石英晶体表面上标出电荷极性。



压电材料

压电石英的性能特点

- 压电系数小，灵敏度低；
- 压电系数几乎不随温度变化，时间和温度稳定性好；
- 机械强度和品质因数高，刚度大，固有频率高，动态特性好；
- 无热释电性，绝缘性、重复性好。

常用于：

- 测大的作用力*、加速度
- 用于准确度和稳定性要求高的压力测量
- 用于制作标准器件。

压电材料

二、压电陶瓷

- 压电陶瓷是人工制造的多晶体压电材料，它比石英晶体的压电灵敏度高得多，而制造成本却较低。常用的压电陶瓷材料有锆钛酸铅系列压电陶瓷（PZT）及非铅系压电陶瓷（如 BaTiO_3 等）。
- 压电系数高，灵敏度较石英材料高，但工作温度低，温度稳定性和机械强度都不如石英。



压电陶瓷谐振器

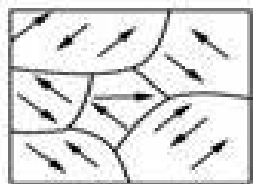


超声波医学压电陶瓷晶片

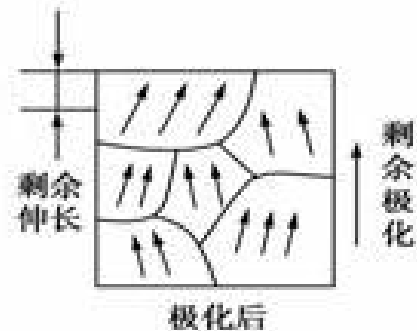
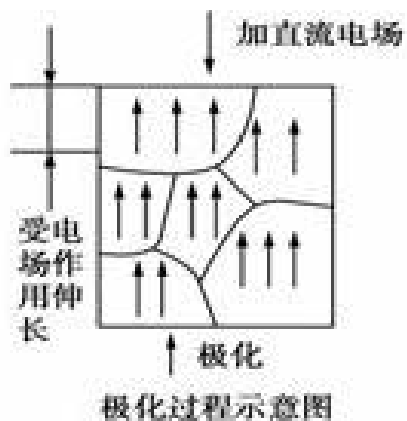
压电材料

压电陶瓷的极化

电畴



极化前



需要外电场和压力的共同作用

压电材料

二、压电陶瓷的特点

- 特性不稳定，传感器需经常校准
- 常作为电能转换为机械能的执行控制器件
- 局限性：
 - 具热释性，会给压电传感器造成干扰，降低稳定性

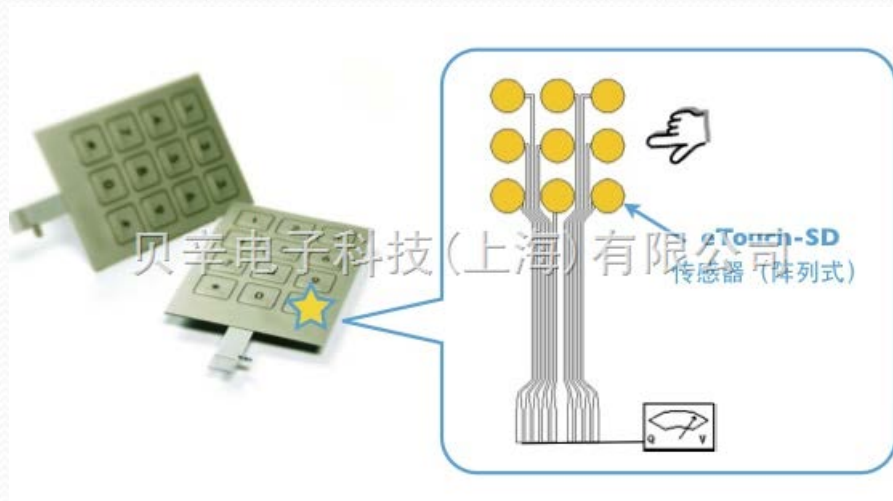
压电材料

三、压电薄膜

- 压电薄膜是高分子聚合物的薄膜，简称PVDF(聚偏氟乙烯)。
PVDF具有高弹性、柔软性好、耐强电场等优点。
- 高介电强度，可达 $75\text{V}/\mu\text{m}$ ，此时压电陶瓷在强电场下性能已经开始退化
- PVDF薄膜的压电系数 ($23 \times 10^{-12}\text{C/N}$) 约为石英晶体 ($2.31 \times 10^{-12}\text{C/N}$) 的10倍，压电陶瓷为 $100 \times 10^{-12} \sim 500 \times 10^{-12}\text{C/N}$ ；
- 响应频带宽 ($0.001 \sim 10^9\text{Hz}$)，动态测量范围宽 ($10^{-8} \sim 10^6\text{Psi}$)。
- PVDF薄膜的价格便宜，可以用作压电计数开关，振动冲击传感器等。

压电材料

三、压电薄膜



压电材料的主要特性参数

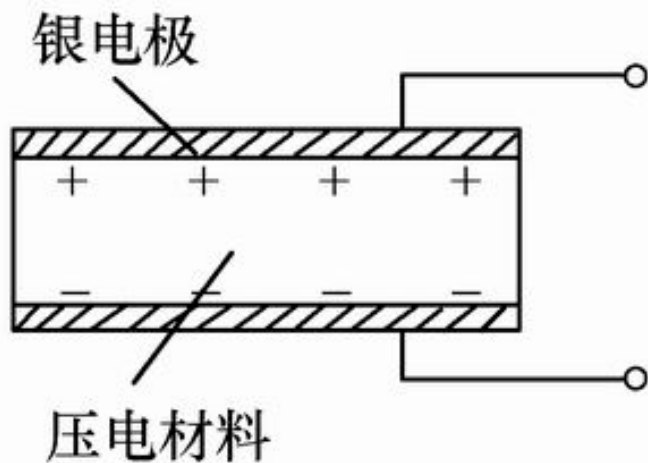
- 压电常数：衡量材料压电效应强弱，影响压电输出灵敏度
- 弹性常数：决定压电器件的固有频率和动态特性
- 介电常数：影响元件的固有电容，随之影响传感器的频率下限
- 机电耦合系数：衡量压电材料的能量转换效率
- 电阻：减少电荷泄漏，从而改善低频特性
- 居里点：保持压电特性的临界温度

$$k = \sqrt{\frac{d^2}{\varepsilon^T S^E}}$$

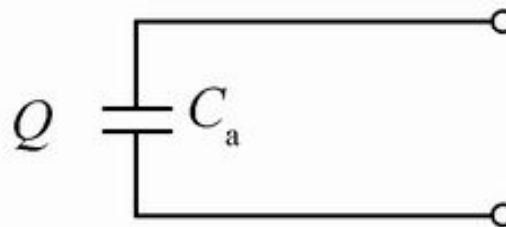
本节主要内容

- 压电效应和压电方程
- 压电材料
- 压电传感器的信号调理电路
- 压电式加速度传感器
- 压电逆效应的应用
- 超声波传感器

压电元件等效电路



(a)



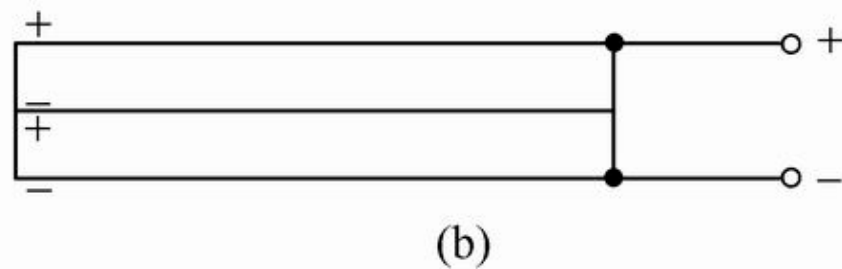
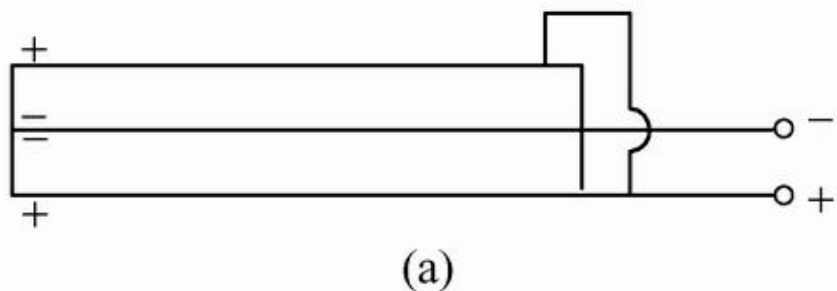
(b)

$$C_a = \frac{\varepsilon \cdot S}{h} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{h}$$

$$U = \frac{Q}{C_a}$$

S: 极化面积, h: 压电片厚度

两个压电片的联结方式



(a) “并联”， $Q'=2Q$ ， $U'=U$ ， $C'=2C$

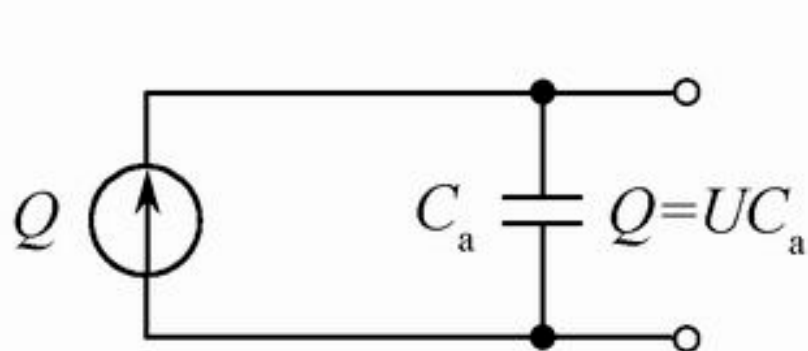
并联接法输出电荷大，本身电容大，时间常数大，
适宜用在测量慢变信号并且以电荷作为输出量的场合

(b) “串联” $Q'=Q$ ， $U'=2U$ ， $C'=C/2$

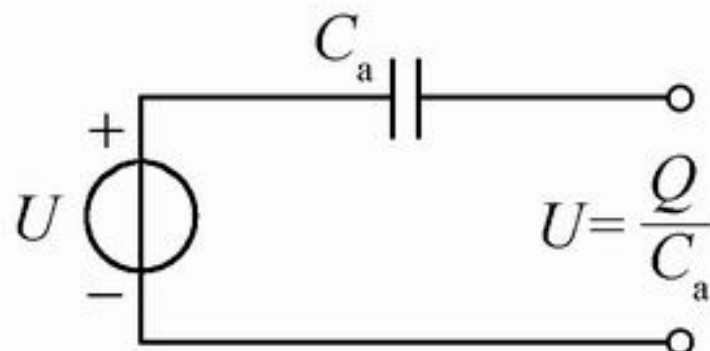
而串联接法输出电压大，本身电容小。

适宜用于以电压作输出信号，且测量电路输入阻抗很高、频率较高的场合。

压电传感器等效电路



(a) 电荷等效电路

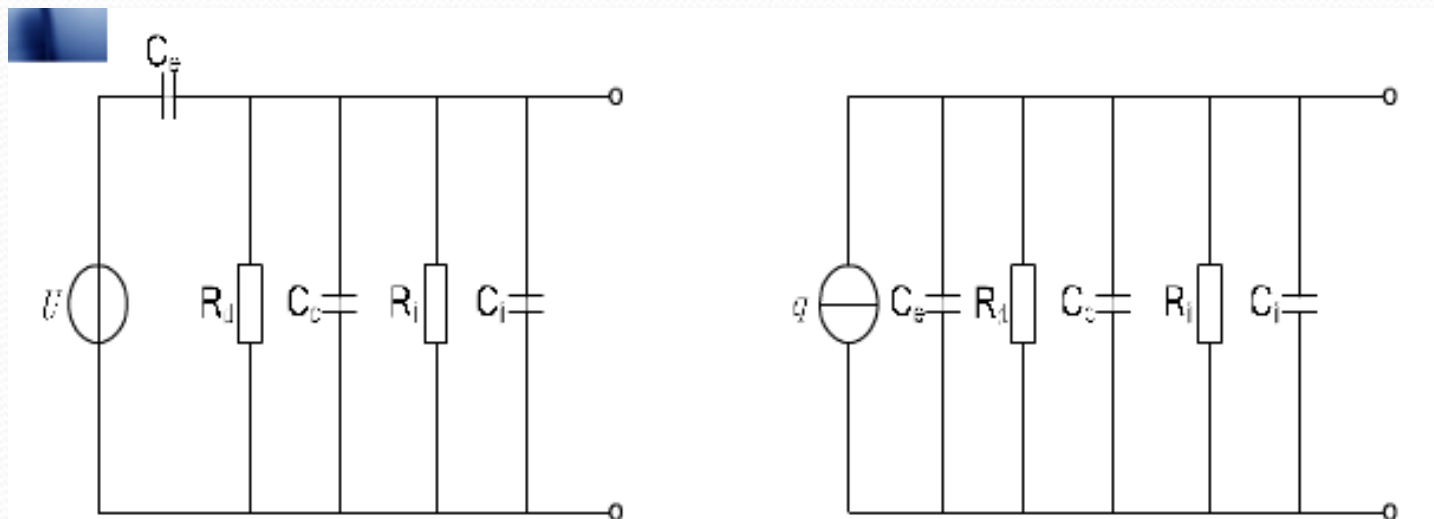


(b) 电压等效电路

(a) 等效为一个电荷源 Q 与一个电容 C_a 并联的电路

(b) 等效成一个电源 $U = Q/C_a$ 和一个电容 C_a 的串联电路

实际应用中，压电传感器等效电路



C_c : 连接电缆等效电容

C_i : 放大器输入电容

R_i : 放大器输入电阻

R_d : 传感器泄漏电阻

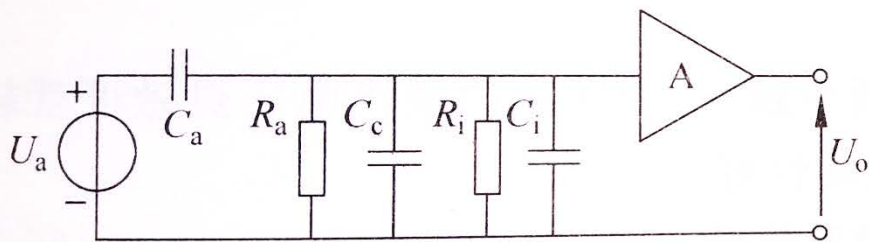
压电式传感器信号调理电路

- 压电传感器本身的内阻抗很高，输出能量较小，负载电阻 R_L 必须有很大的数值，才能使测量误差小到一定数值以内。因此常先接入一个高输入阻抗的前置放大器，然后再接一般的放大电路及其它电路。
- 前置放大器两个作用：
 - 把传感器的高阻抗输入变换为低阻抗输出。
 - 把压电式传感器的微弱信号放大；

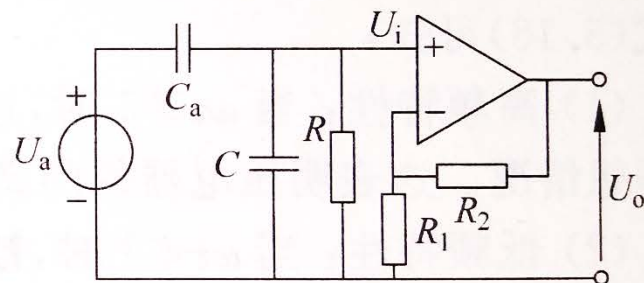
前置放大器形式：

- 电压放大器，用电阻反馈，其输出电压与输入电压成正比；
- 电荷放大器，用电容板反馈，其输出电压与输入电荷成正比。

(1) 电压放大电路:



(a) 传感器的实际等效电路



(b) 电压放大电路

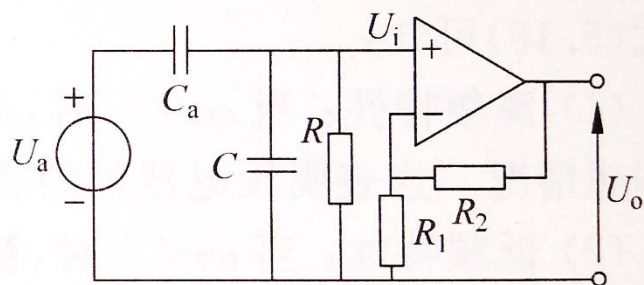
$$R = \frac{R_a R_i}{R_a + R_i}$$

$$C = C_c + C_i$$

- C_a : 传感器的电容
 R_a : 传感器的漏电阻
 C_c : 连接电缆的等效电容
 R_i : 放大器的输入电阻
 C_i : 放大器的输入电容

$$\frac{U_o}{U_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \approx \frac{R_2}{R_1}$$

(1) 电压放大电路:



(b) 电压放大电路

若压电元件材料受正弦力作用，则产生的电压值为

$$\dot{F} = F_m \sin \omega t \quad \longrightarrow \quad \dot{U}_a = \frac{dF_m}{C_a} \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$

F_m —作用力的幅值 $U_m = \frac{dF_m}{C_a}$ —电压幅值

$$\dot{U}_i = \frac{R // C}{C_a + R // C} \dot{U}_a = \frac{j\omega R}{1 + j\omega R(C_a + C)} dF_m \sin \omega t$$

$$U_{im} = \frac{dF_m \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

$$\tau = R(C_a + C_c + C_i)$$

$$\omega^2 \tau^2 \gg 1$$

$$K_u = \frac{U_{im}}{F_m} = \frac{\omega R d}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} \approx \frac{d}{C_a + C_c + C_i}$$

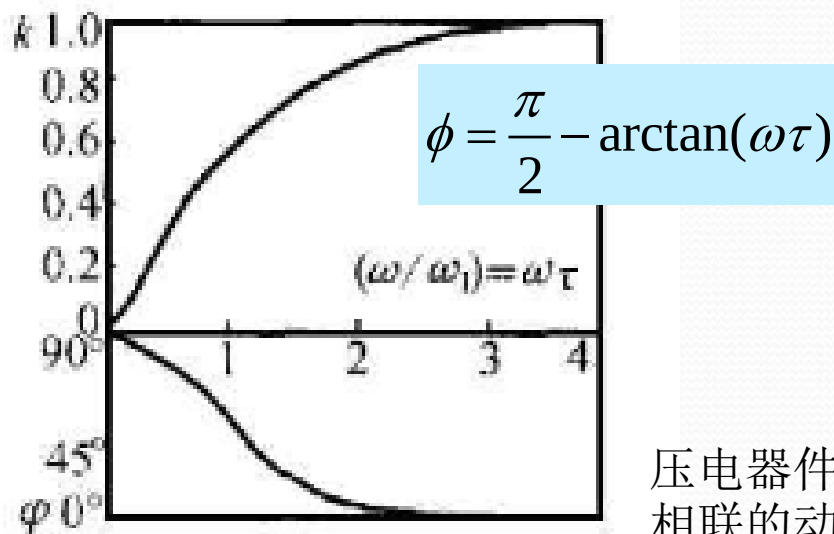
$$\phi = \frac{\pi}{2} - \arctan(\omega \tau)$$

(1) 电压放大电路:

$$K_u = \frac{U_{im}}{F_m} = \frac{\omega R d}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} \approx \frac{d}{C_a + C_c + C_i}$$

$$U'_{im} = \frac{dF_m}{C_a + C_c + C_i}$$

$$k = \frac{U_{im}}{U'_{im}}$$



压电器件与测量电路相联的动态特性曲线

(1) 当 $\omega=0$ 时 $K_u=0$,所以压电传感器不能测静态量;

(2) 当 $\omega \tau \gg 1$ 时, 被测量高频时, 灵敏度与被测信号频率无关, 说明压电式传感器的高频响应好;

(3) 灵敏度与电路电容大小成反比, 为得到好的低频响应特性, d 应大些, R 越大越好;

(压电晶体)

(4) 灵敏度与连接电缆有关, 更换电缆需要重新标定; (线的长度、直径)

(5) 当 $\omega \tau \ll 1$ 时, 被测量低频时, 动态误差加大。

(2) 压电传感器电荷放大电路

放大器的输入阻抗极高，放大器输入端没有电流，电荷只对反馈电容 C_f 充电，充电电压 = 放大器输出电压

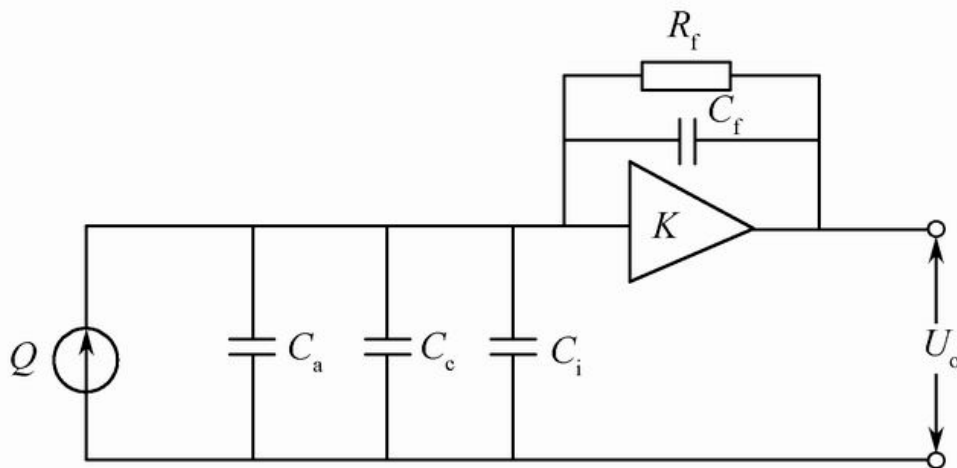
$$C'_f = (1 + K)C_f$$

$$\begin{cases} U_i = \frac{Q}{C + C'_f} \\ U_o = -KU_i \end{cases}$$

$$U_o = \frac{-KQ}{C + (1 + K)C_f}$$

$$U_o \approx -\frac{Q}{C_f} = U_f$$

C_f : 反馈电容
 C_a : 传感器的漏电容
 C_c : 电缆的分布电容
 C_i : 放大器输入电容



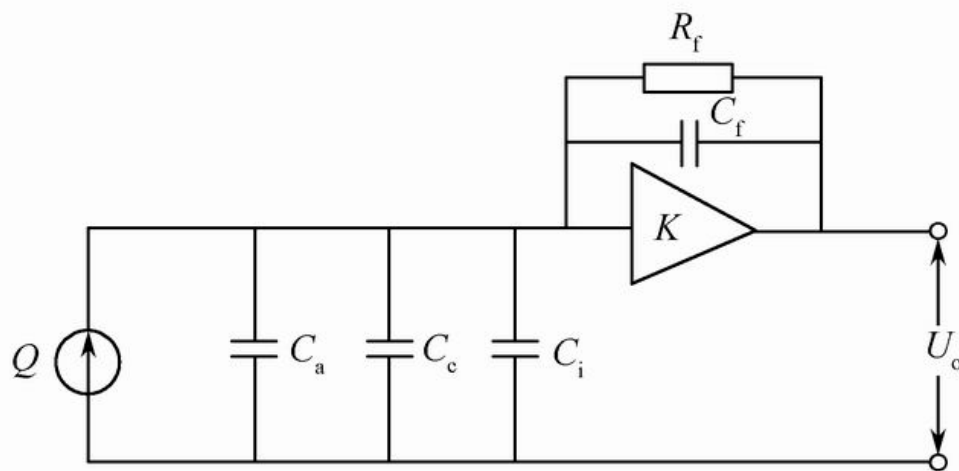
电荷放大器等效电路

$$U_o \approx -\frac{Q}{C_f} = U_f$$

几点结论：

- 当 $(1+K) C_f \gg C_a + C_c + C_i$ 时，即当放大倍数K足够大时，电荷放大器的输出电压仅与输入电容量（电荷）和反馈电容有关，认为传感器的灵敏度与电缆电容无关。若保持 C_f 数值不变，输出电压正比于输入电荷量（与压力成线性关系）
- 为了得到必要的测量精度， C_f 的温度和时间稳定性要好，实际电路中， C_f 的容量做成可选择的。
- 电容负反馈线路在直流工作时，对噪声比较敏感，放大器的零点漂移比较大，一般在反馈电容的两端并联一个电阻 R_f ($10^{10} \sim 10^{14} \Omega$) 提高直流反馈。
- 狭义的测量误差较小

例：压电陶瓷片 $d_{33}=5 \times 10^{-10}\text{C/N}$ ，用反馈电容 $C_f=0.01\mu\text{F}$ 的电荷放大器测出输出电压幅值 $U_o=0.4\text{V}$ ，求所受力的的大小？



本节主要内容

- 压电效应和压电方程
- 压电材料
- 压电传感器的信号调理电路
- 压电式加速度传感器
- 压电逆效应的应用
- 超声波传感器

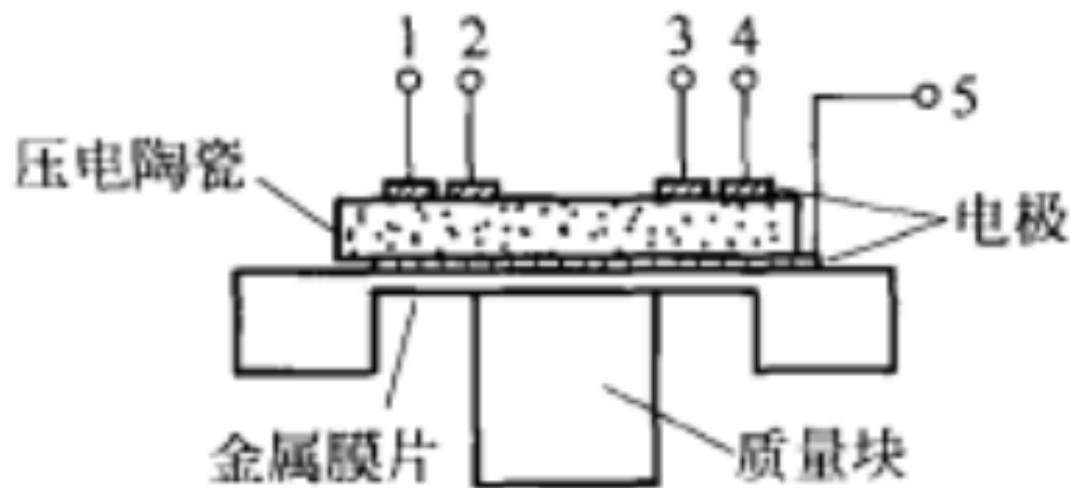
压电式加速度传感器

压电陶瓷板与金属膜片粘贴在一起，膜片中央有重块。在加速度作用下，压电陶瓷板发生变形，各极板相应地产生电压。压电陶瓷多个电极的电压可能有所不同，分析各电极的电压分布，可以检测加速度的方向。

注意传感器的环境的温湿度的影响。

温湿度的变化将导致压电材料压电常数、介电常数、电阻率、弹性系数等机电常数发生变化，进而影响传感器的工作性能。

传感器敏感轴（重力轴）的安装误差



压电式加速度传感器

压电材料的应用



本节主要内容

- 压电效应和压电方程
- 压电材料
- 压电传感器的信号调理电路
- 压电式加速度传感器
- 压电逆效应的应用
- 超声波传感器

压电逆效应的应用

压电逆效应可以用作力和运动（位移、速度、加速度）的发生器，用作压电驱动器。基于压电逆效应的压电驱动器可以用于精密位移控制，它具有许多优势

- 位移量程范围小
- 定位精度高
- 响应速度快
- 力产生效率高
- 不需要机械传动机构把转动变为直线运动，从而避免了机构误差
- 尺寸小，发热少
- 无杂散磁场
- 位移分辨率可达纳米级

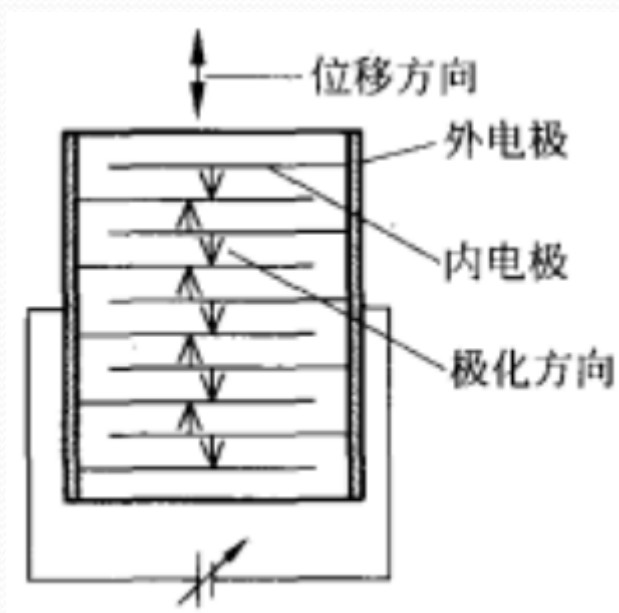
压电陶瓷PZT是微机电一体化系统中的核心技术。

压电逆效应的应用

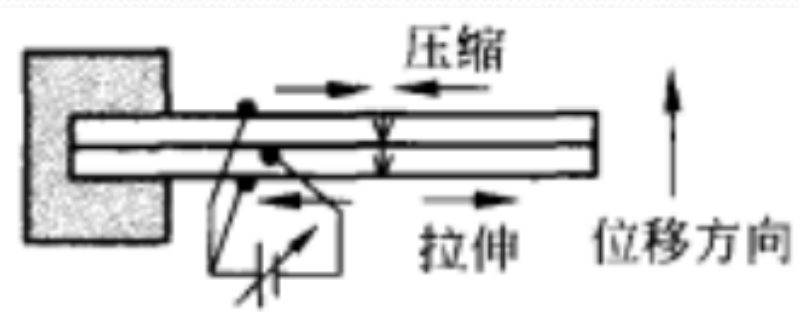
压电执行器

可用低电压驱动执行器，获得较大的累计位移量和高速响应
应用于微型xy控制台、打印机头的高精度位置控制上

位移量大，机械力度小
应用于照相机压电快门、录像机磁头的跟踪器上



叠片型

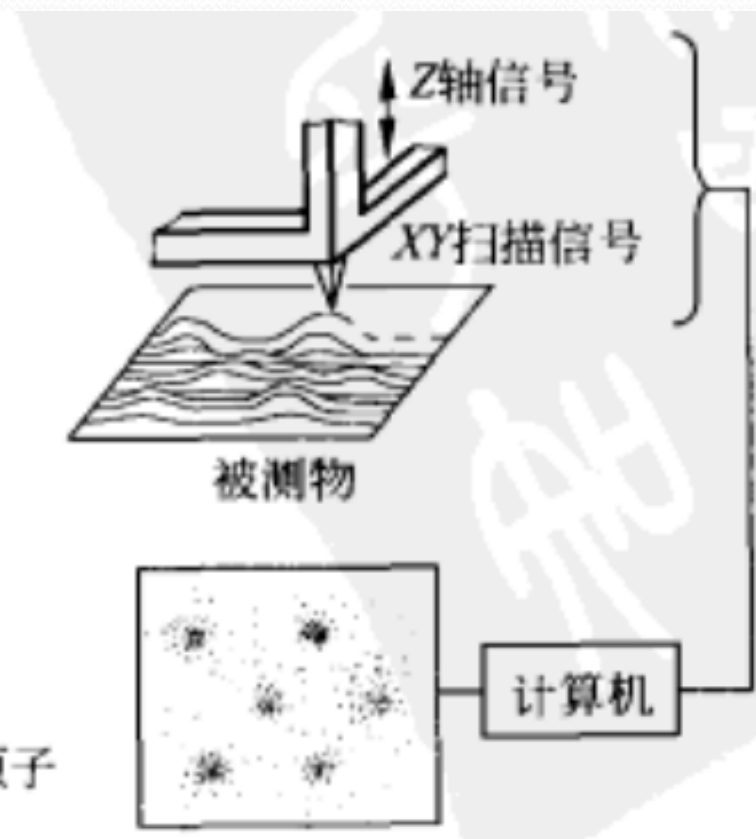
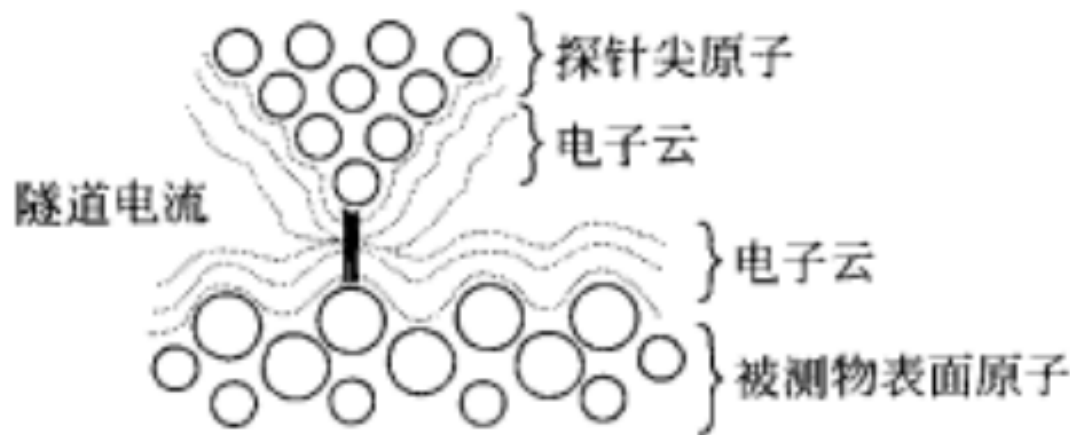


双层型

压电逆效应的应用

扫描隧道显微镜

隧道显微镜可观察和定位单个原子，并可在低温下（4K）利用探针尖端精确操纵原子，它在纳米科技既是重要的测量工具又是加工工具。

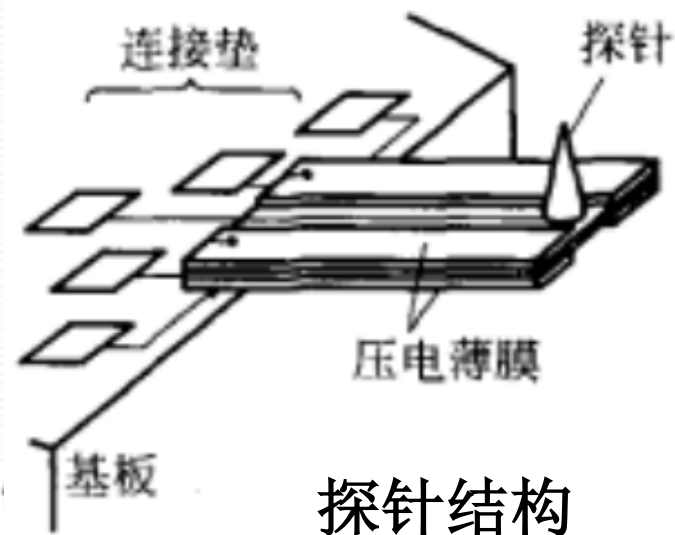


扫描隧道显微镜的原理

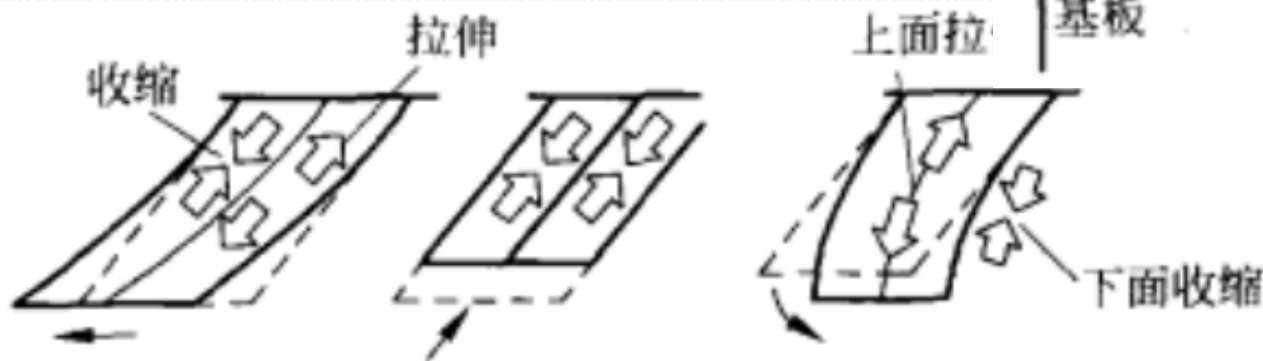
压电逆效应的应用

XYZ方向压电探针

如图，通过驱动悬臂梁上的压电薄膜，可以实现悬臂梁自由端探针XYZ三维位移控制。组合驱动四片压电薄膜的伸缩，可以使悬臂梁自由端左右、前后、上下振动，即实现XYZ三维方向上的位移控制。



探针结构



探针位移控制方法

本节主要内容

- 压电效应和压电方程
- 压电材料
- 压电传感器的信号调理电路
- 压电式加速度传感器
- 压电逆效应的应用
- 超声波传感器

超声波传感器

基于压电正逆效应

声波：频率在20-20000Hz间的机械波，

超声波：高于20000Hz的波

课程评分方法的建议

编辑: hytcydc 时间: 2018年03月29日 访问次数:2

由于春学期“传感器与检测技术”部分的内容与夏学期“探测与调查”部分区别较大,因此建议春学期结束的期中考试作为本课程期末考试的50%,夏学期结束的期末考试不再含有“传感器”部分的内容。

从而,春学期“传感器与检测技术”占本课程50%的分值,即50分。其中,实验总分15分,期中考试总分25分,作业总分7分,点到总分3分。