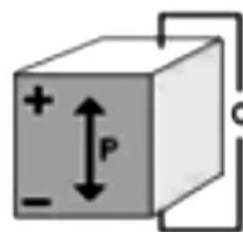




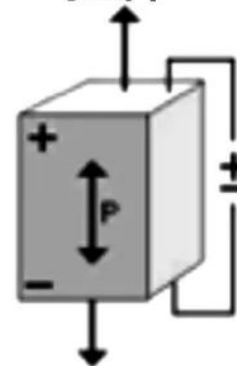
第五章 压电式传感器



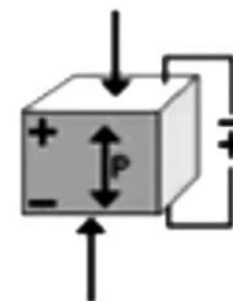
正常状态



拉伸



压缩



本章主要内容

- **0 引言：压电效应的发现**
- **1 压电效应的定义**
- **2 压电传感器的测量电路**
- **3 压电式加速度传感器**
- **4 影响压电传感器性能的一些因素**

压电效应的发现

1880 年

皮埃爾·居里 (Pierre Curie) 發現石英壓電現象

1905~1909 年

義大利人喬治·史佩茲 (George Spezi) 成功以高壓釜培育人工水晶

1922 年

美國學者凱帝 (Cady) 發明石英晶體振盪器

1969 年

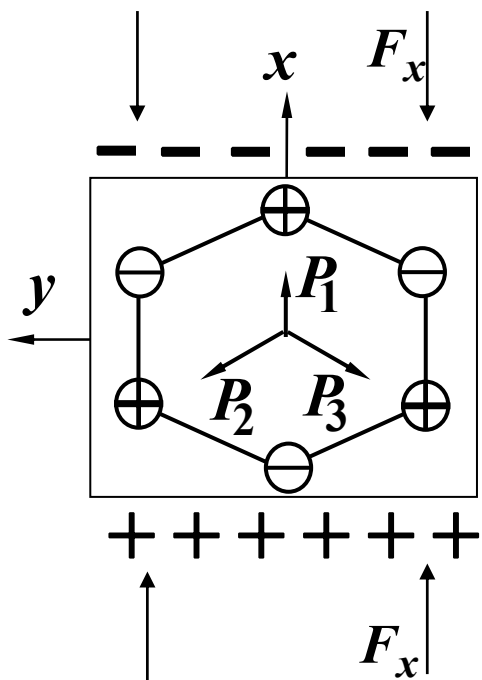


世界首款石英手錶：革命性的
Seiko Quartz Astron 35SQ 正式發售

1980 年代

錄放影機及個人電腦興起，使得石英元件也大放異彩

1 压电效应的定义



(正) 压电效应示意图

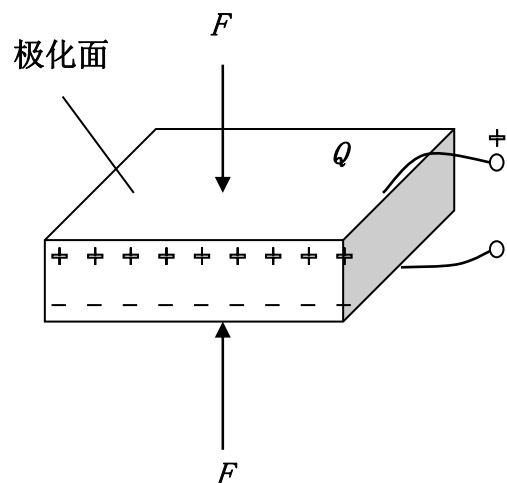
1) 某些电介质，当沿着一定方向对其施力而使它变形时，内部就产生极化现象，同时在它的一定表面上产生电荷。

2) 当外力去掉后，又重新恢复不带电状态的现象。

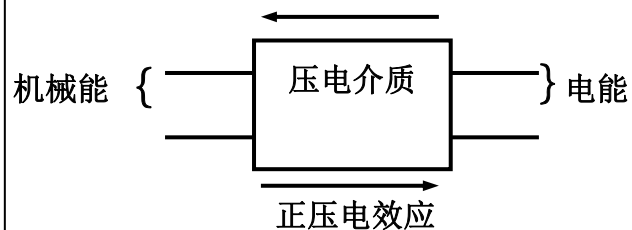
3) 当作用力方向改变时，电荷极性也随着改变。

分为纵向、横向、切向压电效应。

1 压电效应的定义



逆压电效应

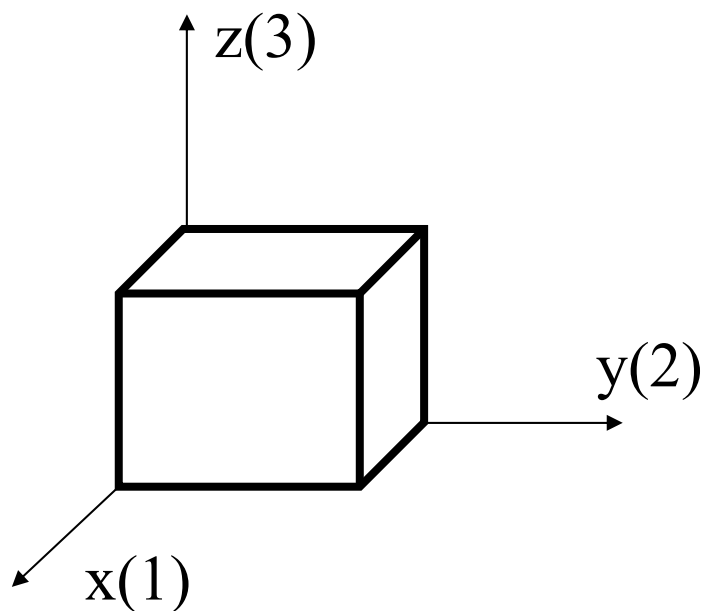


当在电介质的极化方向施加电场，某些电介质在一定方向上将产生机械变形或机械应力,当**外电场撤去**后，变形或应力也随之消失，这种物理现象称为**逆压电效应**。



相机里的超声波马达

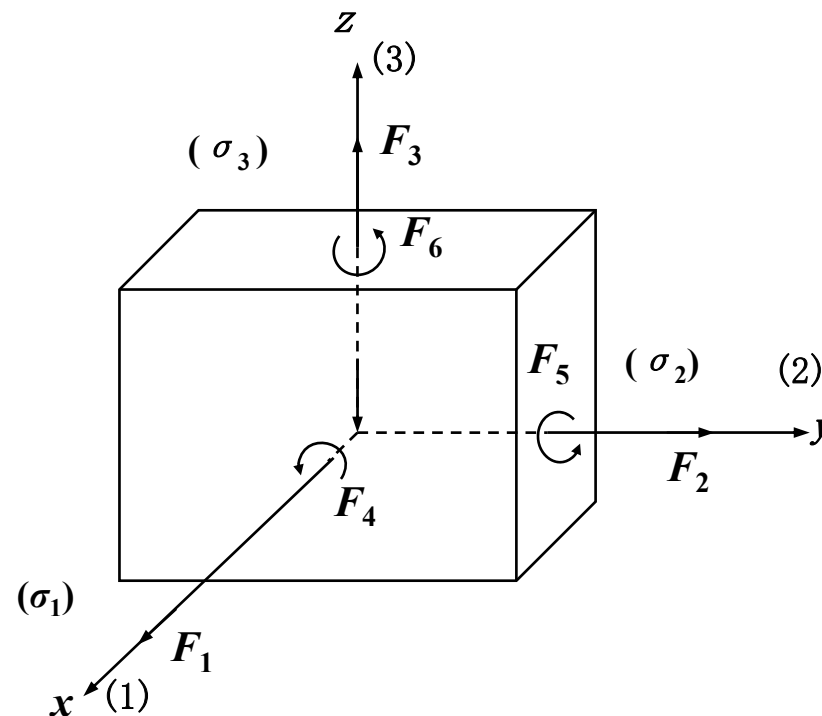
1.2 压电性能参数的一般描述



$i(i=1,2,3)$:

表示晶体的极化方向，即在 i 面上产生电荷；

$1,2,3$ 分别表示垂直于 x 、 y 、 z 轴的晶片表面。



$j(j=1,2,3,4,5,6)$:

$1,2,3$ 表示沿 x,y,z 方向作用的单向应力；

$4,5,6$ 表示在 yz,zx,xy 平面上承受的剪切应力。

1.2 压电性能参数的一般描述

压电常数矩阵

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_{i,j} = d_{i,j} \cdot T_j$$

T_j : j 方向的应力

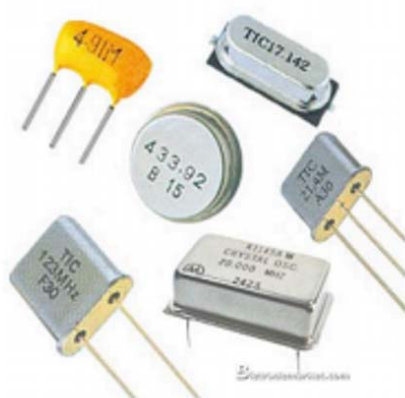
d_{ij} : j 方向的力使得*i*面产生电荷的压电常数

σ_{ij} : j 方向的力在*i*面产生的电荷密度

1.3 压电材料

天然(人工制备?)

压电晶体：石英；铌酸锂等。



人工制备

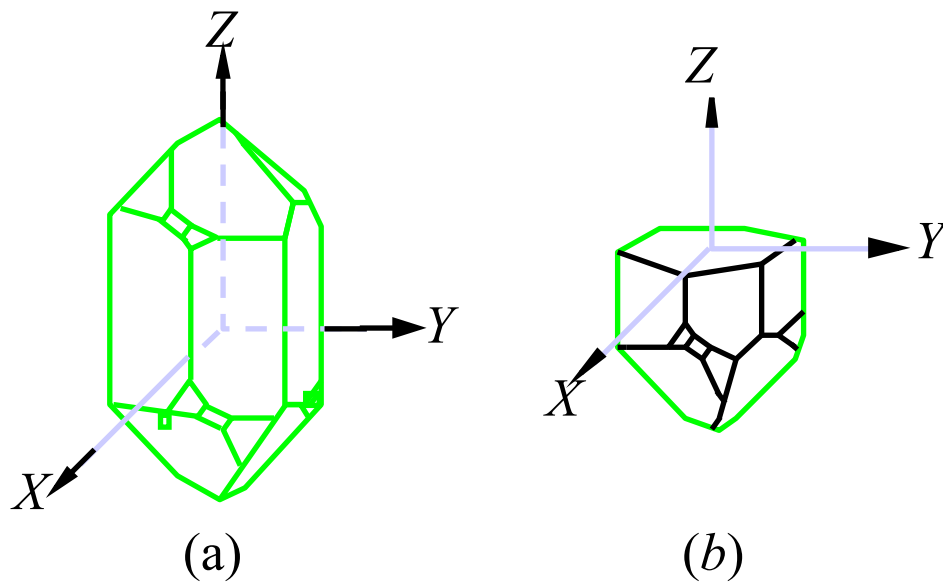
• 压电陶瓷：钛酸钡；锆钛酸铅系列（PZT系列）等。

• 压电半导体和高分子压电材料（含压电薄膜）等。



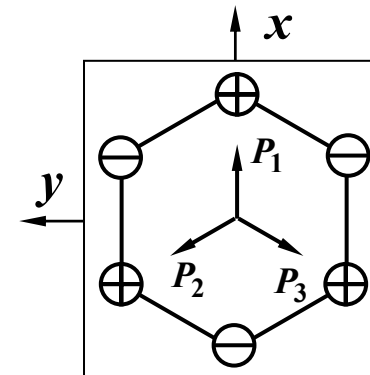
1.3 压电材料：单（石英）晶体材料

- 1) 纵向轴Z-Z 称为**光轴**;
- 2) 经过正六面体棱线, 并垂直于光轴的X-X轴称为**电轴**;
- 3) 与X-X和Z-Z轴同时垂直的Y-Y 轴 (垂直于正六面体的棱面) 称为**机械轴**。



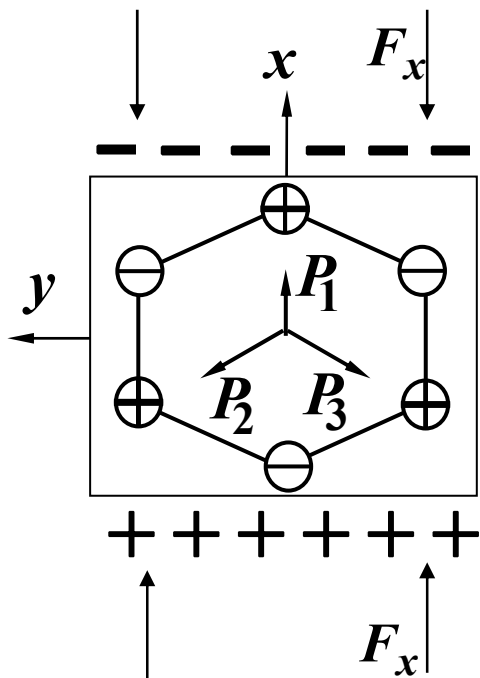
(a)理想石英晶体的外形 (b) 坐标系

- 1) 组成石英晶体的硅离子 Si^{4+} 和氧离子 O^{2-} 在Z平面投影。硅、氧离子等效为正六边形排列, “ \oplus ”代表 Si^{4+} , “ \ominus ”代表 O^{2-} 。
- 2) 压电效应是由于单晶受外应力时其内部晶格结构变形, 使原来宏观表现的电中性状态 (正负电荷中心重合) 被破坏而产生电极化。

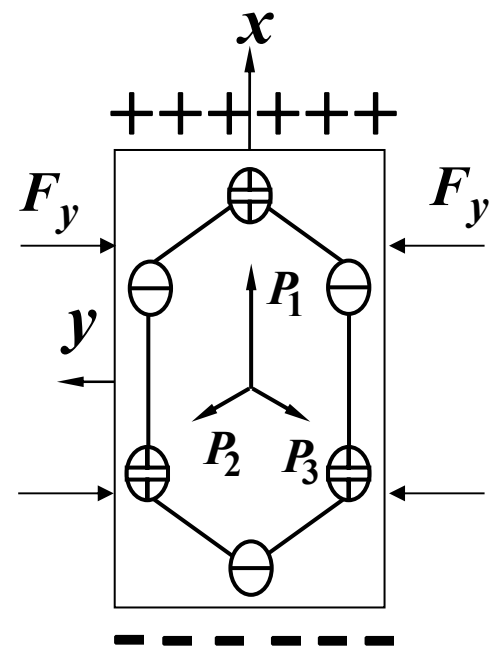


沿光轴Z-Z方向不产生压电效应。

1.3 压电材料：单（石英）晶体材料



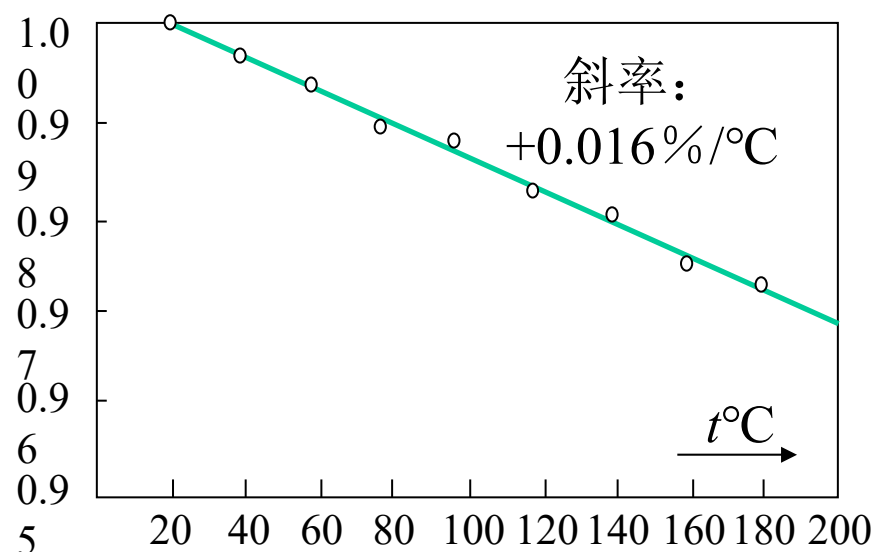
沿电轴X-X方向的力作用下产生电荷的压电效应，称为纵向压电效应。



沿机械轴Y-Y方向的力作用下产生电荷的压电效应，称为横向压电效应。

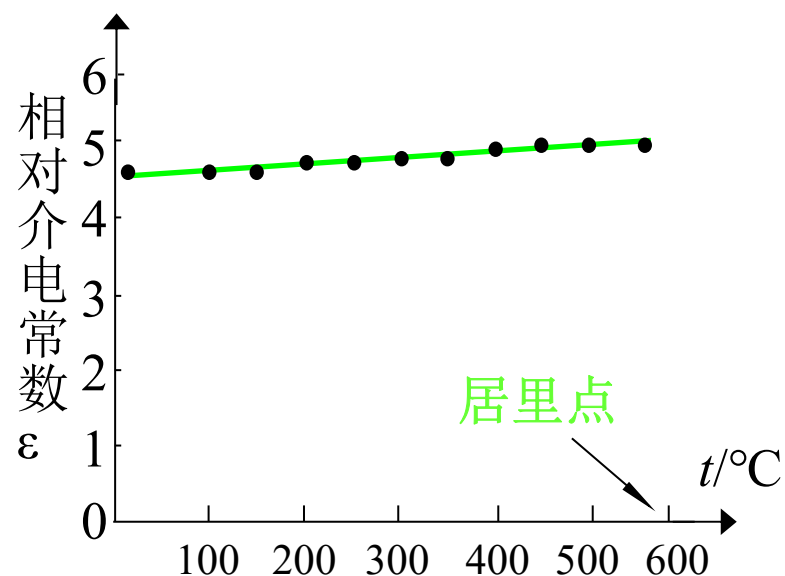
1.3 压电材料：单（石英）晶体材料

在20°C至200 °C温度范围内，温度每升高1 °C，压电系数仅减少0.016%，当温度达到573 °C时（居里点），石英晶体丧失压电特性。



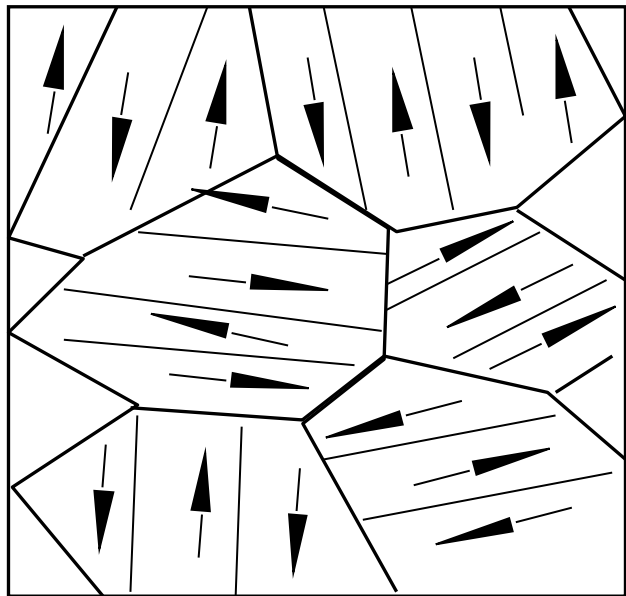
石英的 d_{11} 系数相对于20°C的 d_{11} 温度变化特性

希望具有高电阻率和大介电常数，以减弱外部分布电容的影响并获得良好的低频特性；



石英在高温下相对介电常数的温度特性

1.3 压电材料：压电陶瓷的极化机理取决于其内部结构



箭头表示电畴

- **极化前**，各个电畴在晶体上杂乱分布，极化效应被相互抵消，原始的压电陶瓷内**极化强度为零**

- 压电陶瓷是由一颗颗小晶粒无规则地“镶嵌”而成，每个小晶粒可看为一个**小单晶**。

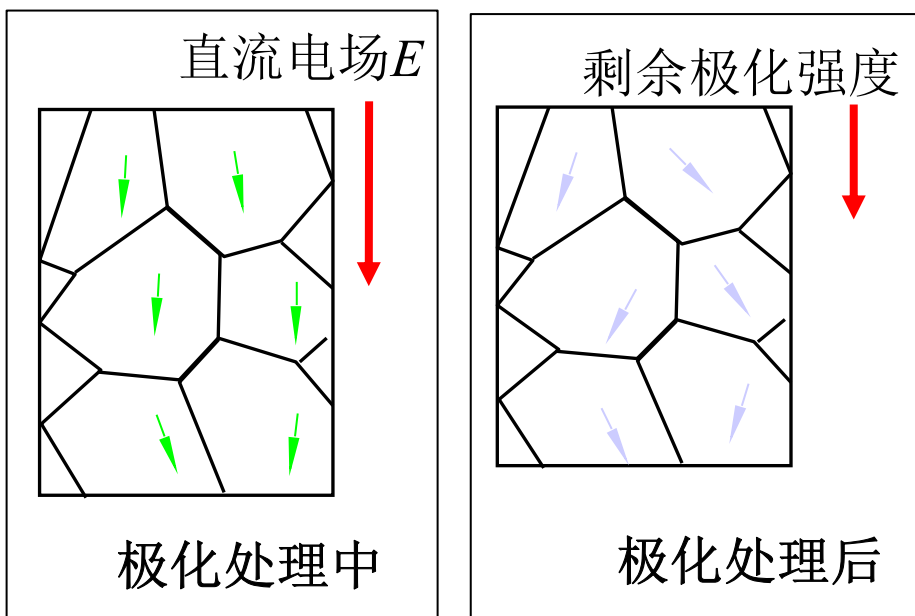
- 在描述晶体结构时，通常将结构分为许多小的重复单位，称为**晶胞**。

- 为了使压电陶瓷处于能量(静电能与弹性能)最低状态，晶粒中就会出现若干小区域，**每个小区域内晶胞自发极化有相同的方向**，但邻近区域之间的自发极化方向则不同。

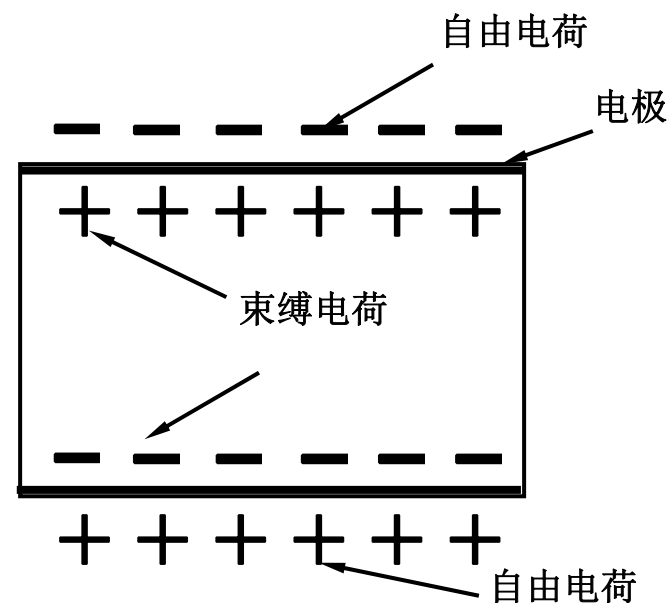
- **自发极化方向一致的区域称为电畴**，整块陶瓷包括许多电畴。

单晶 > 电畴 (**自发极化方向一致的区域**) > 晶胞

1.3 压电材料：压电陶瓷



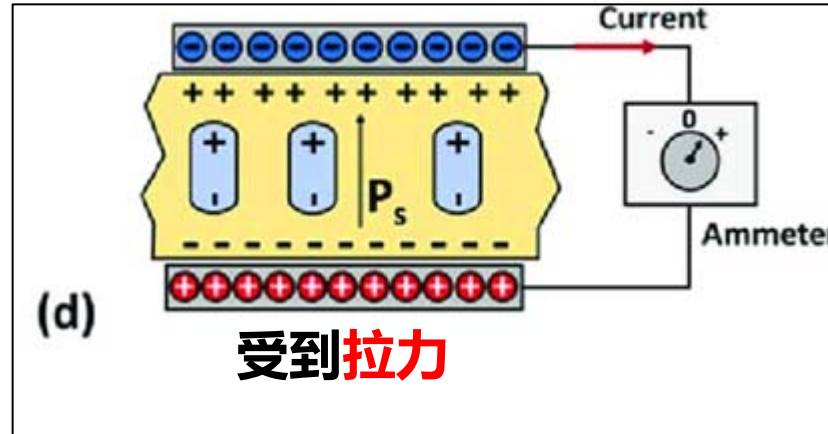
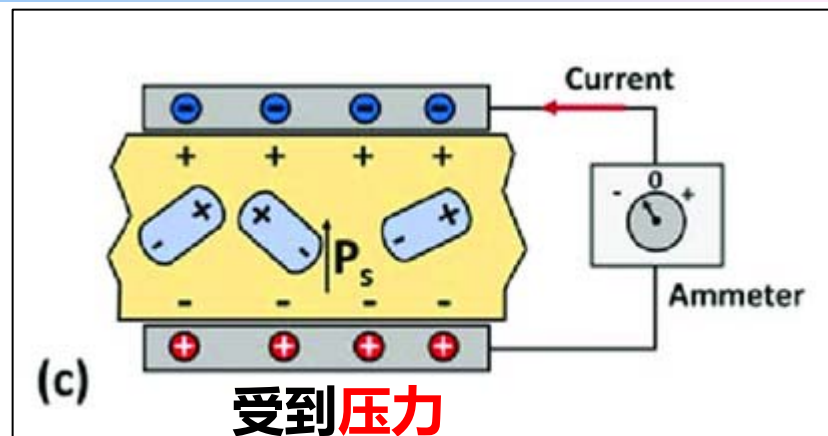
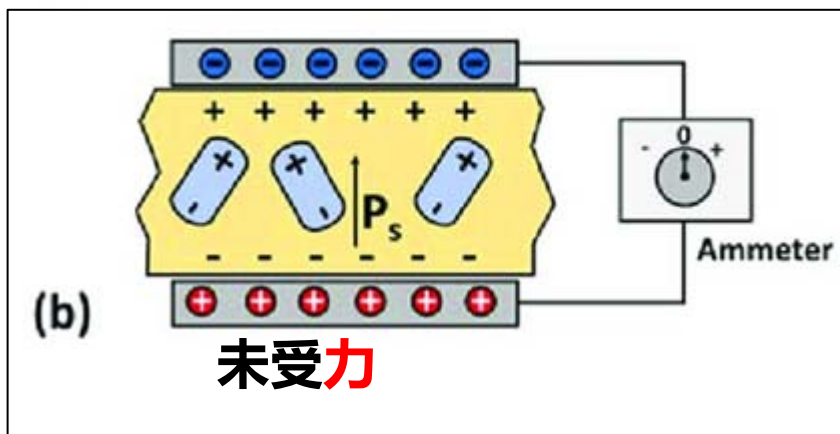
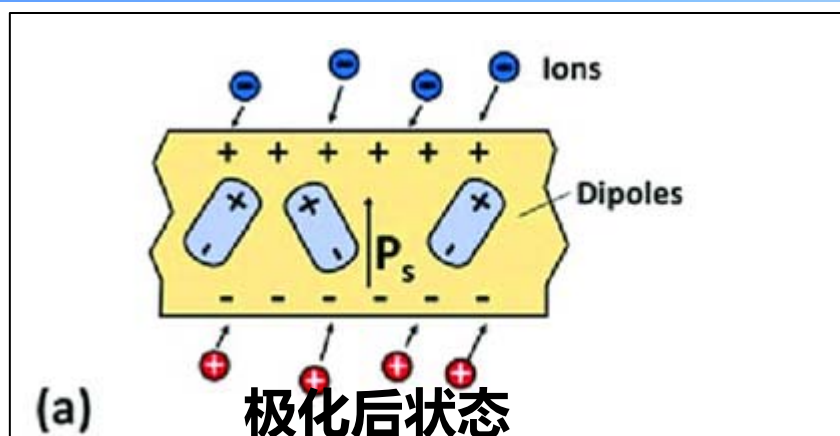
- 在外电场作用下，电畴的极化方向趋向于按外电场的方向；
- **极化处理后**，陶瓷内部仍存在有很强的**剩余极化强度**。



束缚电荷和自由电荷排列示意图

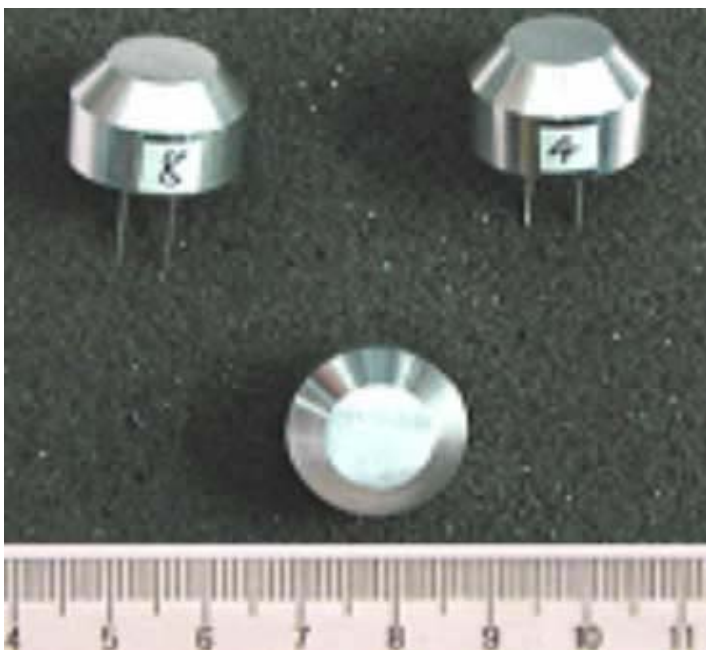
剩余极化强度受到所吸附的自由电荷的中和作用，表现出宏观不带电的状态。

1.3 压电材料：压电陶瓷



- 受到压力后，剩余极化强度变小，表面自由电荷过剩出现放电现象。
- 受到拉力后，剩余极化强度变大，表面自由电荷不足出现充电现象。
- 面电荷密度 $\sigma_s = |\text{电极化矢量 } P_s|$,
$$i = A \frac{dP_s}{dt} = A \frac{dP_s}{dF} \frac{dF}{dt}$$

1.3 压电材料：压电陶瓷



压电陶瓷的性能:

- ①很高的压电系数;
- ②居里点温度低;
- ③有热释电现象;
- ④稳定性不如石英晶体;
- ⑤人工制造, 成本低。



无铅压电陶瓷

1.3 压电材料：压电陶瓷

表 6 - 1 常用压电材料性能

性 能 \ 压电材料	石 英	钛 酸 钡	锆钛酸铅 PZT - 4	锆钛酸铅 PZT - 5	锆钛酸铅 PZT - 8
压电系数/(pC/N)	$d_{11}=2.31$ $d_{14}=0.73$	$d_{15}=260$ $d_{31}=-78$ $d_{33}=190$	$d_{15}\approx 410$ $d_{31}=-100$ $d_{33}=230$	$d_{15}\approx 670$ $d_{31}=-185$ $d_{33}=600$	$d_{15}\approx 330$ $d_{31}=-90$ $d_{33}=200$
相对介电常数/ ϵ_r	4.5	1200	1050	2100	1000
居里点温度/ $^{\circ}\text{C}$	573	115	310	260	300
密度/(10^3 kg/m^3)	2.65	5.5	7.45	7.5	7.45
弹性模量/(10^3 N/m^2)	80	110	83.3	117	123
机械品质因数	$10^5\sim 10^6$		≥ 500	80	≥ 800
最大安全应力/(10^5 N/m^2)	95~100	81	76	76	83
体积电阻率/ $\Omega\cdot\text{m}$	$>10^{12}$	$10^{10}(25^{\circ}\text{C})$	$>10^{10}$	$10^{11}(25^{\circ}\text{C})$	
最高允许温度/ $^{\circ}\text{C}$	550	80	250	250	
最高允许湿度/%	100	100	100	100	

压电晶体

压电陶瓷

2 压电式传感器的测量电路：2.1 等效电路

当压电传感器承受机械应力作用时，在它两极板上出现极性相反的等量电荷。因此可以把压电传感器看成**静电发生器**，也可看成两极板充有电荷的电容器。

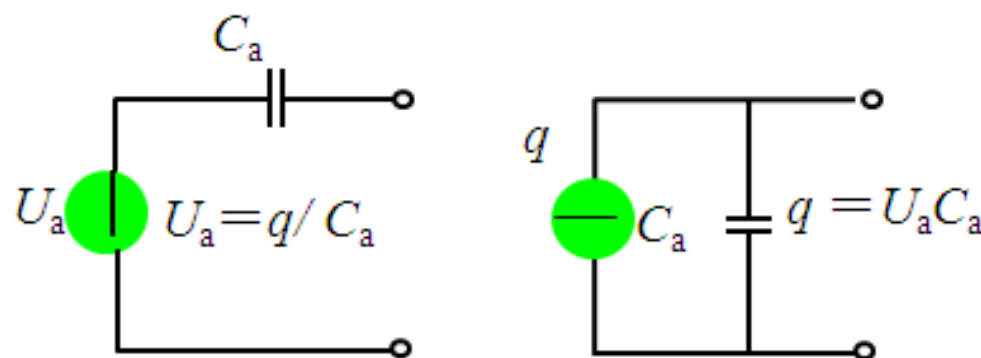
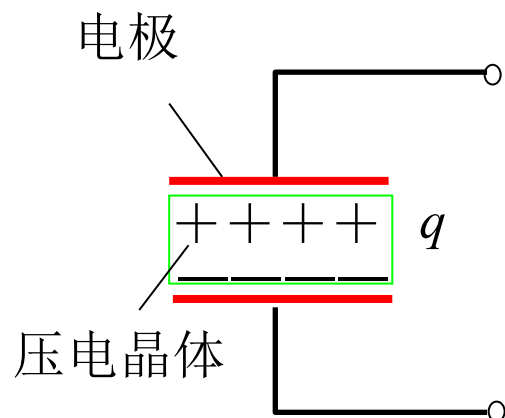


图 压电传感器等效电路

(a) 电压等效电路 (b) 电荷等效电路

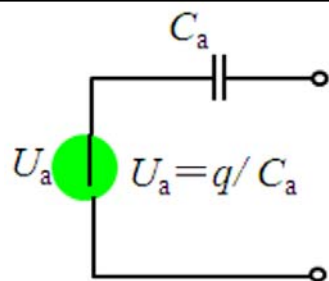
其电容量为：

$$C_a = \frac{\varepsilon S}{t} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{t}$$

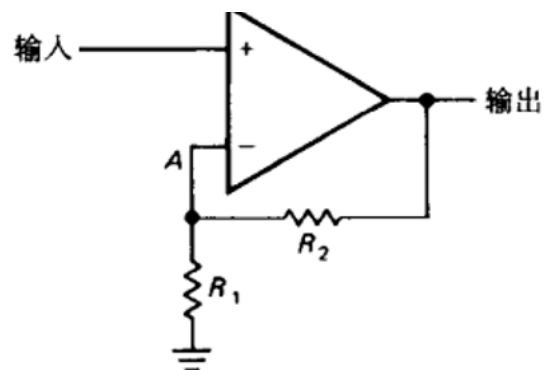
其中 t ：晶体厚度 (m)

传感器内部信号电荷无“漏损”，外电路负载为无穷大时，传感器产生的电压或电荷才能长期保存，否则电路将以某时间常数按指数规律放电。

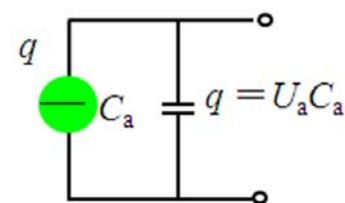
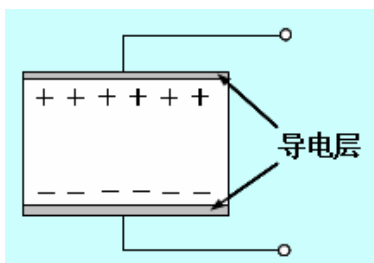
2.2 测量电路对灵敏度（压电常数）的影响



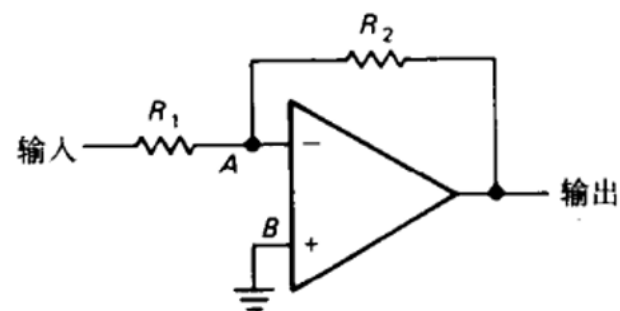
电压等效电路



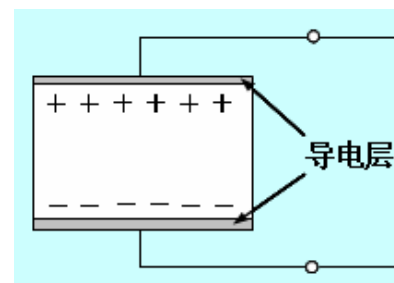
同相放大器



电荷等效电路

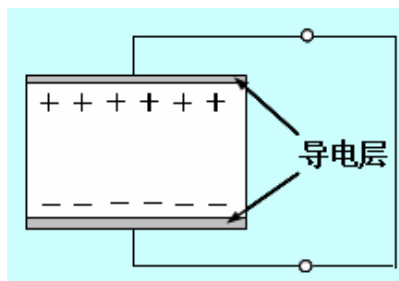


反相放大器



2.2 测量电路对灵敏度（压电常数）的影响

电边界为
短路状态

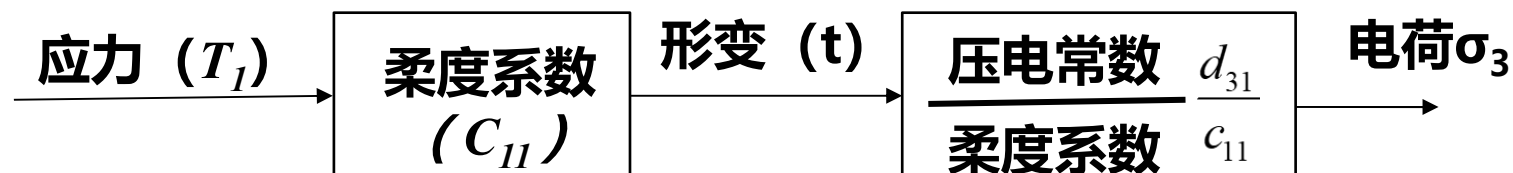


$$t = c_{11} T_1;$$

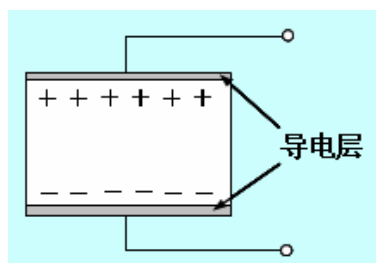
$$\sigma_3 = d_{31} T_1 = \frac{d_{31}}{c_{11}} t$$

特点:

信号流是单向的



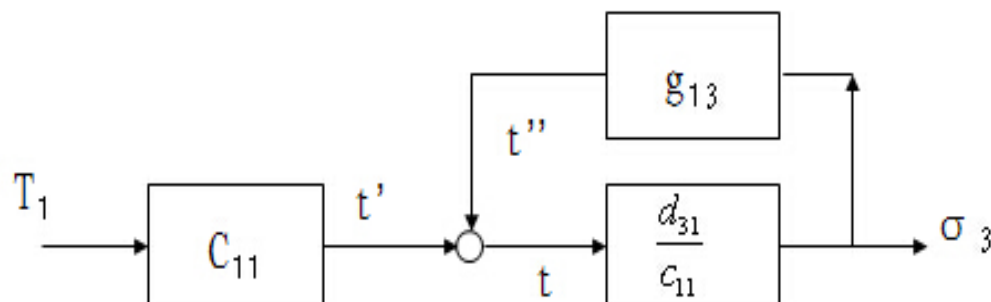
电边界为
开路状态



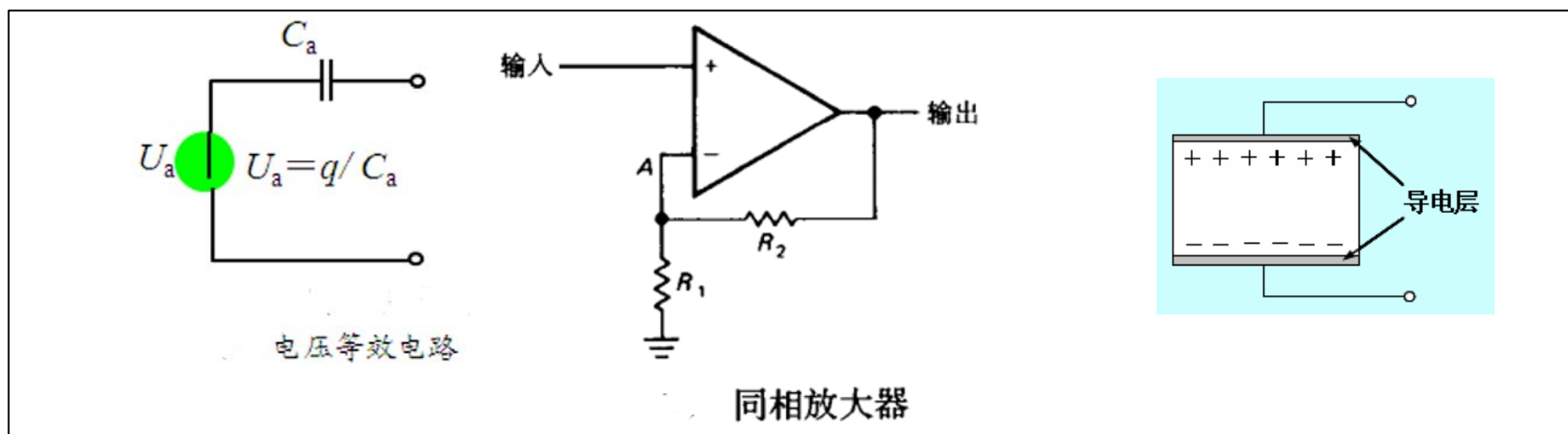
$$\sigma_3 = \frac{d_{31}}{1 + g_{13} \times \frac{d_{31}}{c_{11}}} T_1 = d_{ef} T_1$$

特点:

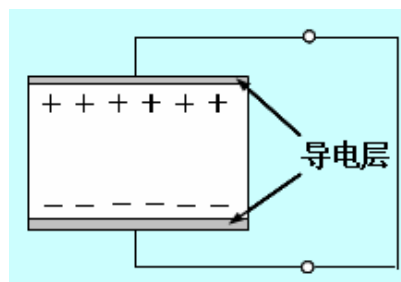
有信号环流



2.2 电压放大器对灵敏度（压电常数）的影响



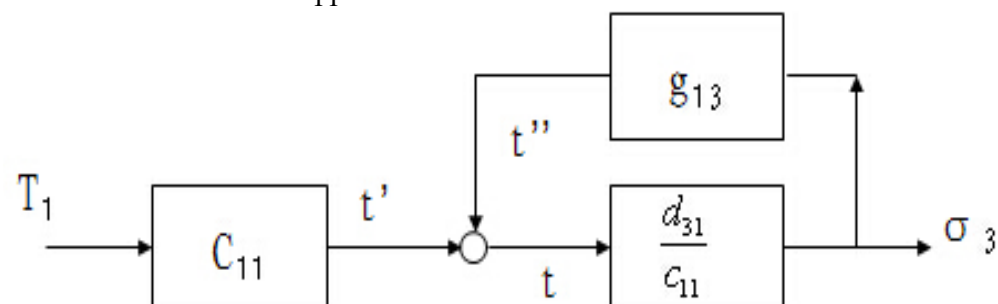
**电边界为
开路状态**



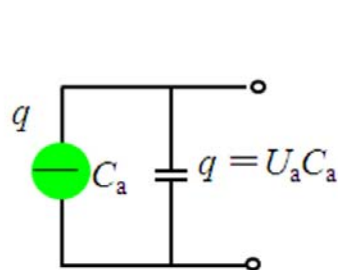
$$\sigma_3 = \frac{d_{31}}{1 + g_{13} \times \frac{d_{31}}{c_{11}}} T_1 = d_{ef} T_1$$

特点:

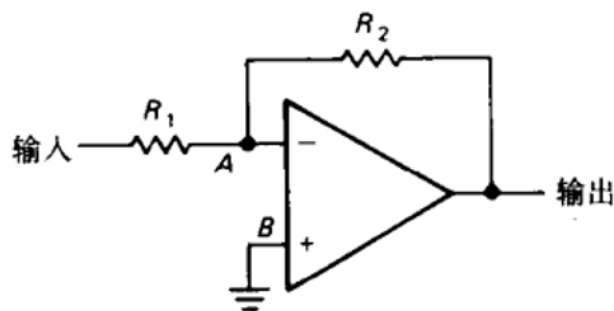
有信号环流



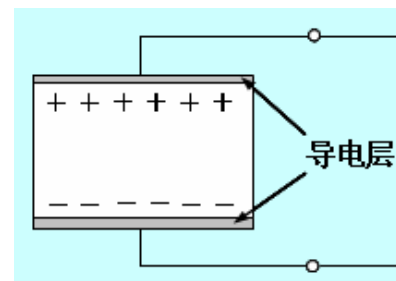
2.2 电流放大器对灵敏度（压电常数）的影响



电荷等效电路



反相放大器

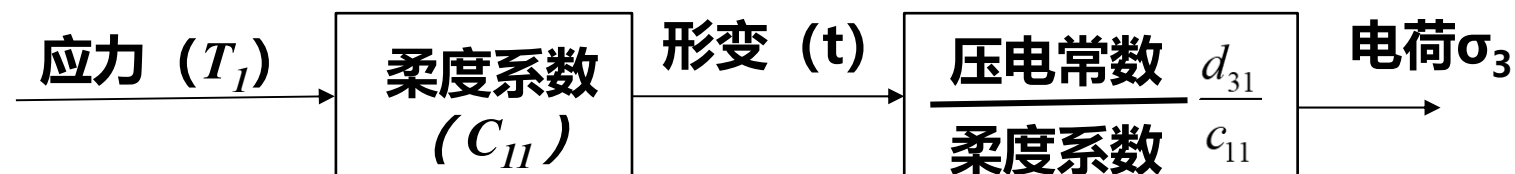


$$t = c_{11} T_1;$$

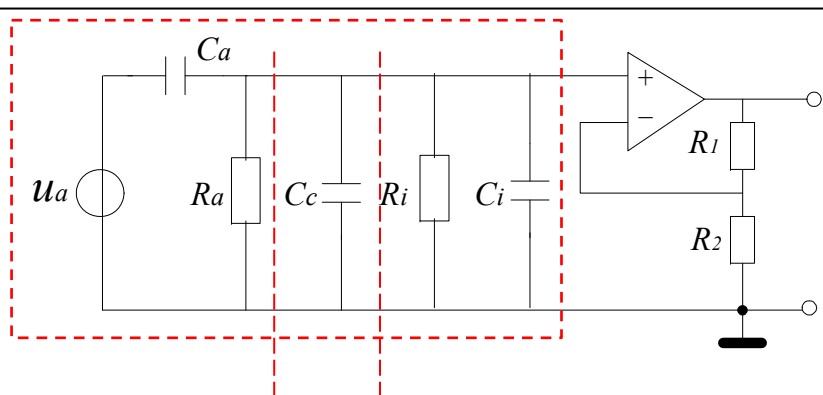
$$\sigma_3 = d_{31} T_1 = \frac{d_{31}}{c_{11}} t$$

特点:

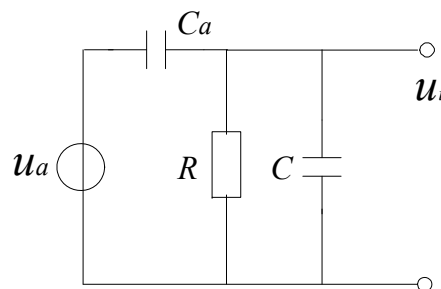
信号流是单向的



2.3 电边界开路条件下连接电缆的影响



C_a —传感器的固有电容;
 R_a —包括连接导线在内的
传感器绝缘电阻;
 C_c —连接导线对地电容;
 R_i —前置放大器输入电阻;
 C_i —前置放大器输入电容。

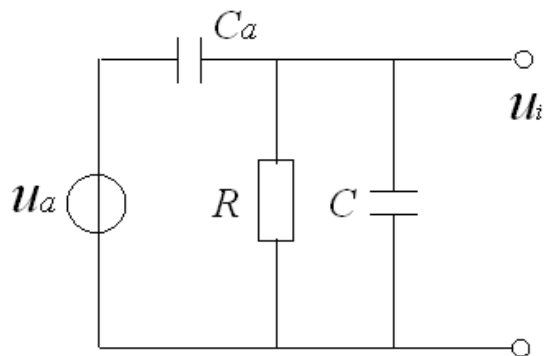


$$U_a = \frac{q}{C_a}$$

等效电阻为: $R = \frac{R_a R_i}{R_a + R_i}$

等效电容为: $C = C_c + C_i$

$$U_i = U_a \cdot \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_a} + \frac{\frac{1}{j\omega C} R}{\frac{1}{j\omega C} + R}} \cdot \frac{\frac{1}{j\omega C} R}{\frac{1}{j\omega C} + R}$$
$$= U_a \cdot \frac{j\omega C_a R}{1 + j\omega R(C + C_a)}$$



$$U_i = U_a \cdot \frac{j\omega C_a R}{1 + j\omega R(C + C_a)}$$

压电材料所受作用力F为:

$$\dot{F} = F_m \sin \omega t$$

若压电材料的压电系数为 d_{33}

$$\dot{U}_a = \frac{d_{33} F_m}{C_a} \sin \omega t$$

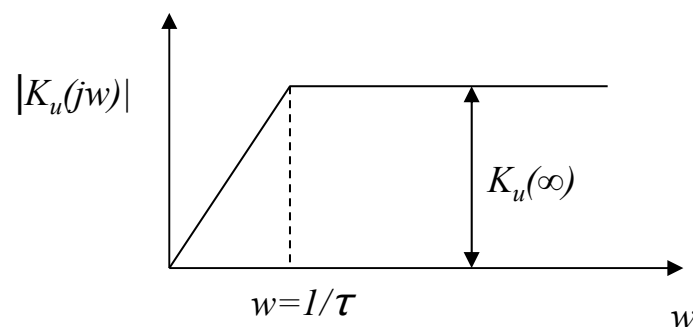
综合以上三式:

$$\begin{aligned} \dot{U}_i &= \frac{d_{33} \dot{F}}{C_a} \frac{j\omega C_a R}{1 + j\omega R(C + C_a)} \\ &= d_{33} \dot{F} \frac{j\omega R}{1 + j\omega R(C + C_a)} \end{aligned}$$

$$U_{im} = \frac{d_{33} F_m \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_a + C_c + C_i)^2}} = \frac{d_{33} F_m \omega R}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$

令 $\tau = R(C_a + C_c + C_i)$, 令 $\omega_0 = 1/\tau$,

$$K_u = \frac{U_{im}}{F_m} = \frac{d_{33}}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega_0 R}\right)^2}}$$



当 $\omega \ll 1/\tau$ 时 $|K_u(j\omega)| \approx d_{33} \omega R$

当 $\omega \gg 1/\tau$ 时 $|K_u(j\omega)| \approx \frac{d_{33}}{C} = \frac{d_{33}}{C_a + C_c + C_i}$

例题

已知某压电式传感器测量最低信号频率 $f=1\text{Hz}$,现在要求在 1Hz 信号频率时其灵敏度下降不超过 5% , 若采用电压前置放大器输入回路总电容 $C_i=500\text{pF}$ 。求该前置放大器输入总电阻 R_i 是多少?

解: 根据电压前置放大器实际输入电压与理想输入电压幅值公式及题意得

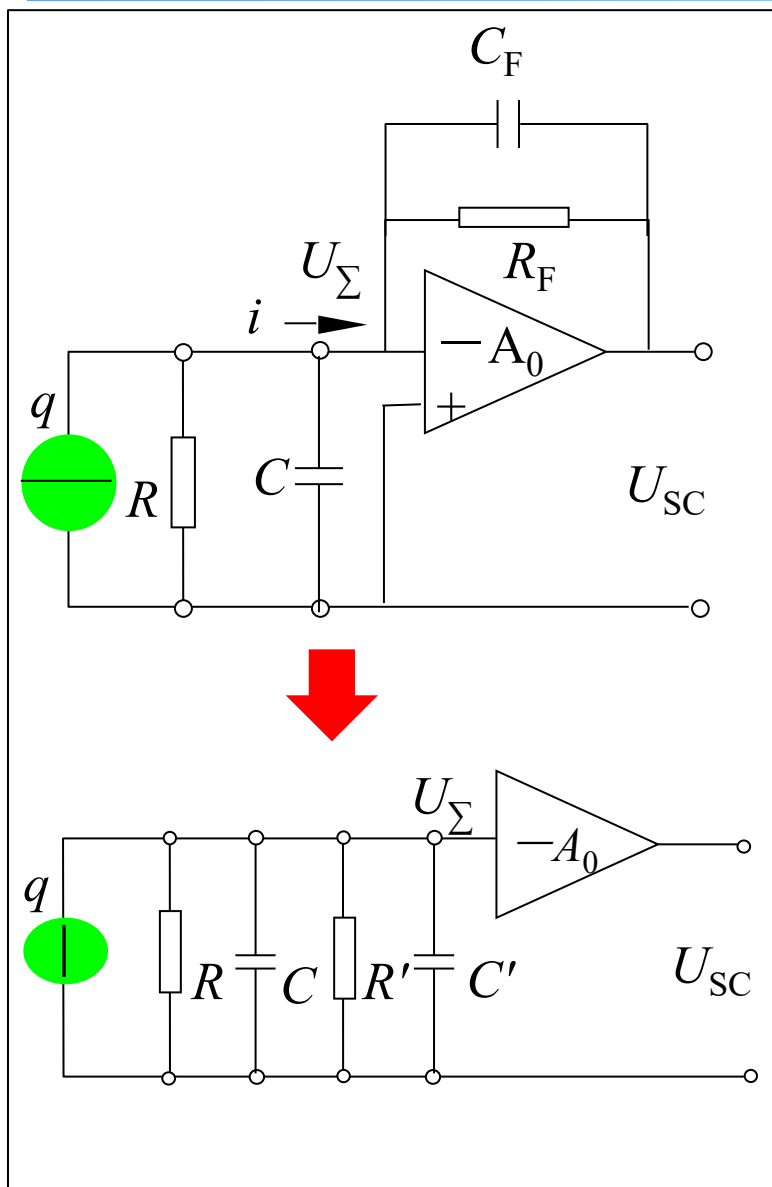
$$K = \frac{\omega\tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} = 1 - 5\%$$

解方程可得 $\omega\tau = 3.04$ 。

将 $\omega = 2\pi f$ 及 $\tau = R_i C_i$ 代入上式计算 $2\pi f * R_i * 5 * 10^{-10} = 3.04$

$$\text{得 } R_i = \frac{3.04}{2\pi * 1 * 5 * 10^{-10}} = 969 M\Omega$$

2.4 电边界短路条件下连接电缆的影响



C_F 、 R_F 等效到 A_0 的输入端时，
电容 C_F 将增大 $(1+A_0)$ 倍。

$$C' = (1 + A_0)C_F$$

电导 $1/R_F$ 也增大了 $(1+A_0)$ 倍。

$$1/R' = (1 + A_0)/R_F$$

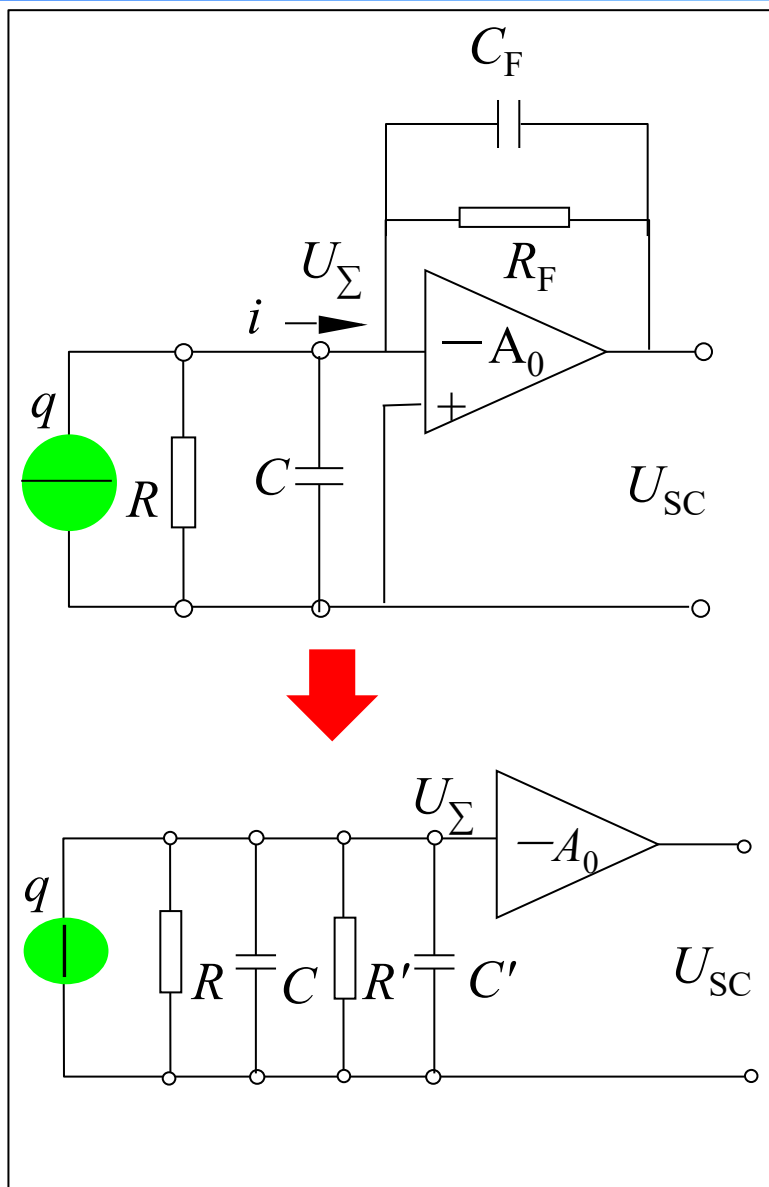
这就是所谓的“密勒效应”。

$$\dot{U}_{SC} = -A_0 \dot{U}_\Sigma$$

$$= A_0 \frac{-j\omega \dot{q}}{\left[\frac{1}{R_a} + (1 + A_0) \frac{1}{R_F} \right] + j\omega [C + (1 + A_0)C_F]}$$

$$\text{当 } \omega \gg \frac{1}{C_F R_F}, \text{ 且当 } A_0 \text{ 足够大时, } \dot{U}'_{SC} \approx -\frac{\dot{q}}{C_F}$$

2.4 电边界短路条件下连接电缆的影响



A_0 带来的误差为:

$$\dot{U}'_{SC} \approx -\frac{\dot{q}}{C_F} \quad \dot{U}_{SC} \approx \frac{-A_0 \dot{q}}{C + (1 + A_0)C_F}$$

$$\delta = \frac{\dot{U}'_{SC} - \dot{U}_{SC}}{\dot{U}'_{SC}} \approx \frac{C + C_c}{(1 + A_0)C_F}$$

若: $C = 1000\text{pF}$, $C_F = 100\text{pF}$,

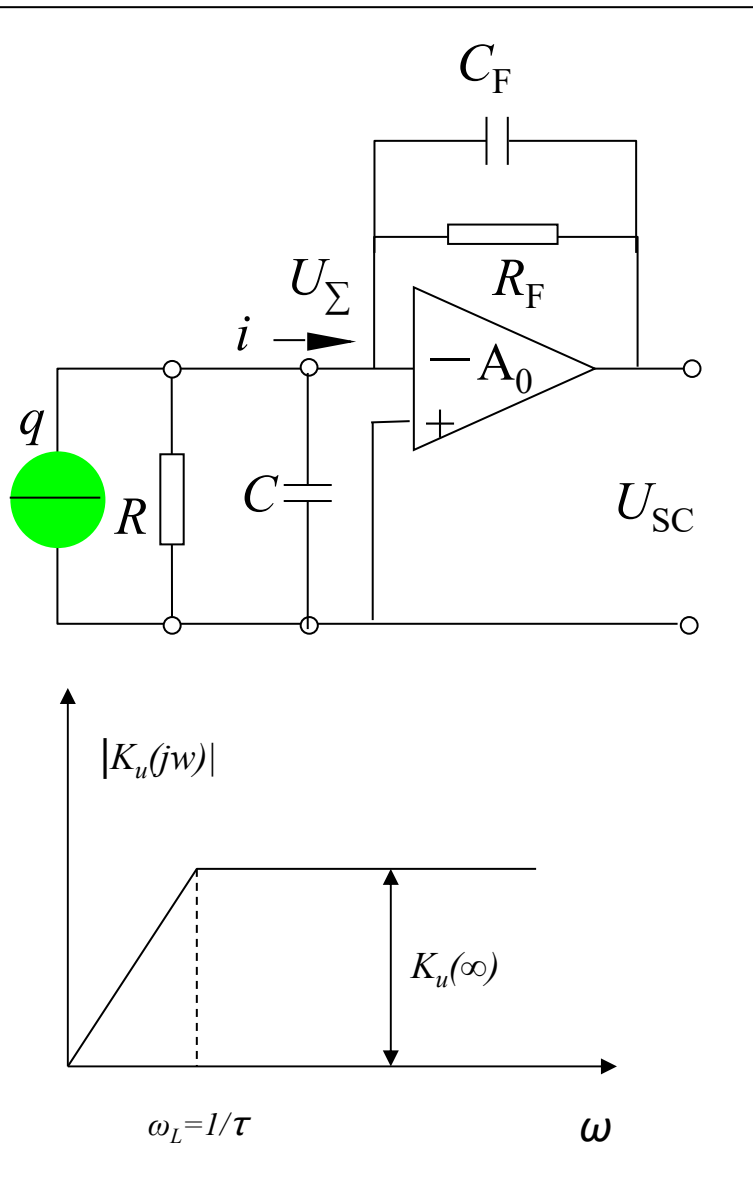
$$C_c = (100\text{pF/m}) \times 100\text{m} = 10^4\text{pF}$$

当要求 $\delta \leq 1\%$,

$$\delta = 0.01 = \frac{1000 + 10^4}{(1 + A_0) \times 100}$$

则有 $A_0 \geq 10^4$ 。对线性集成运算放大器来说, 这一要求是不难达到的。

2.4 电边界短路条件下连接电缆的影响



$$\dot{U}_{SC} = A_0 \frac{-j\omega\dot{q}}{\left[\frac{1}{R_a} + (1 + A_0)\frac{1}{R_F}\right] + j\omega[C + (1 + A_0)C_F]}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{SC} &\approx \frac{-j\omega\dot{q}A_0}{(1 + A_0)\frac{1}{R_F} + j\omega(1 + A_0)C_F} \\ &\approx -\frac{\dot{q}}{C_F} \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega\tau}}\end{aligned}$$

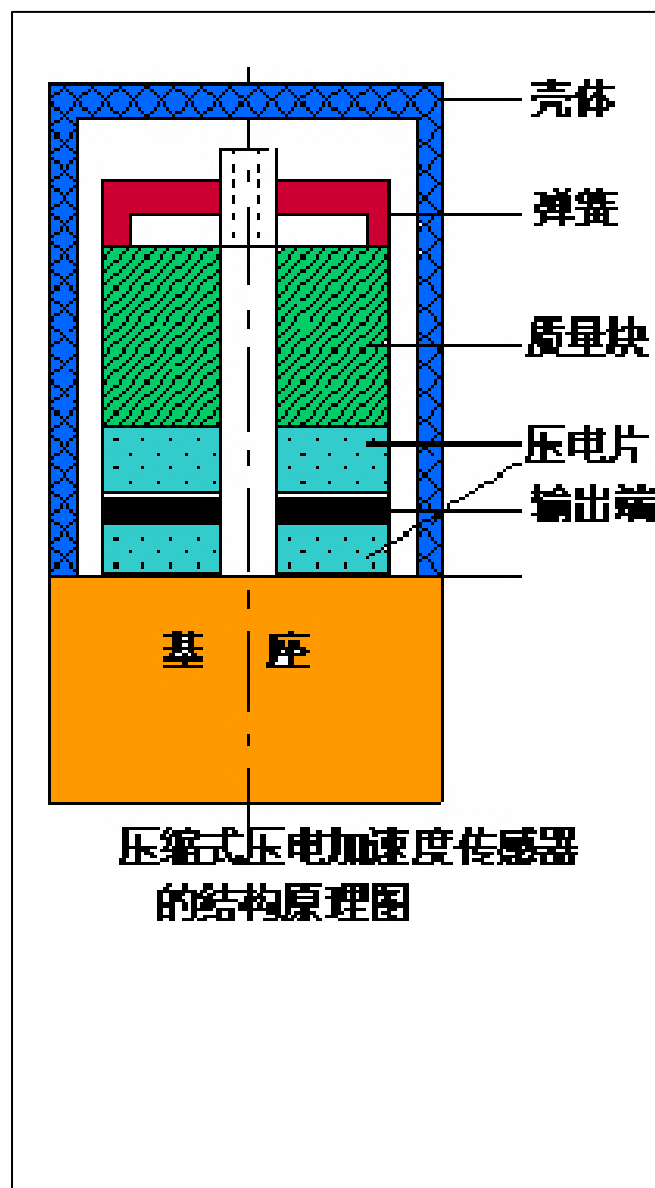
当工作频率 $\omega \gg 1/R_F C_F$ 时,

$$|K(j\omega)| = \left| \frac{\dot{U}_{SC}}{\dot{F}} \right| \approx \frac{d_{33}\omega\tau}{C_F\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \approx \frac{d_{33}}{C_F}$$

3 压电式加速度传感器

3.1 结构及工作原理

- ◆压电陶瓷片和质量块为**环型**，通过螺母弹簧对质量块预先加载，使之压紧在压电陶瓷片上。测量时将传感器基座与被测对象牢牢紧固在一起。
- ◆当传感器感受振动时，质量块感受与传感器基座相同的振动，并受到与加速度方向相反的惯性力的作用。这样，质量块就有一正比于加速度的交变力作用在压电片上。由于压电片压电效应，两个表面上就产生交变电荷，当**振动频率远低于传感器的固有频率**时，传感器的**输出电荷（电压）与作用力成正比**，亦即与试件的加速度成正比。
- ◆一般有**纵向效应型**、**横向效应型**和**剪切效应型**三种，纵向效应型最常见。



3.2 力学系统对应的动态特性（电容式加速度传感器）

由于质量块与被测振动体相对位移 s ，也就是压电元件受力后产生的变形量，于是压电元件所受力为

$$F = k_y(x_m - x_0)$$

其中 K_y : 电元件弹性系数

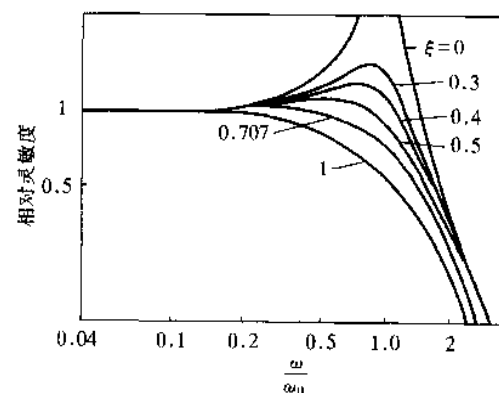
产生的电荷为:

$$q = d_{33}F = d_{33}k_y(x_m - x_0)$$

压电元件与力学系统的动态特性为:

$$\frac{q}{a} = \frac{d_{33}k_y / \omega_0^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)\right]^2}}$$

$$\omega \ll \omega_0 \text{ 时, } \frac{q}{a} \approx \frac{d_{33}k_y}{\omega_0^2}$$



加速度传感器的频响特性

3.2 灵敏度

$$q = d_{33}F = d_{33}ma$$

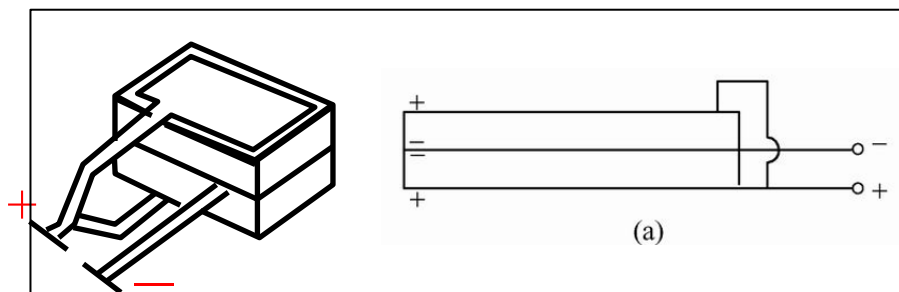
质量块感受的惯性力 $F = ma$

$$\begin{cases} k_u = \frac{u_a}{a} = \frac{d_{33}m}{c_a} \\ k_q = \frac{q}{a} = d_{33}m \end{cases}$$

(1) 为了提高传感器的灵敏度, 一般选择**压电系数大**的压电陶瓷片。

(2) 灵敏度虽然正比于质量块的质量, 但会影响被测振动, 同时会**降低**振动系统的固有频率, 因此一般不用增加质量的方法来
提高传感器灵敏度。

3.2 灵敏度：叠层式压电元件的串联和并联来提高灵敏度

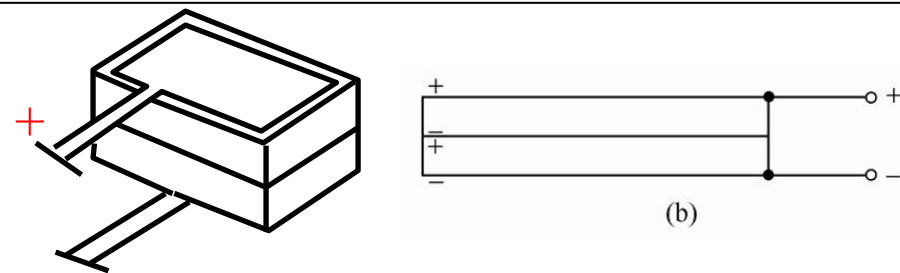


(a) 并联

$$q' = 2q, U' = U_a, C' = 2C_a$$

$$\begin{cases} k_u' = \frac{u'}{a} = k_u \\ k_q' = \frac{q'}{a} = 2k_q \end{cases}$$

➤ **并联接法** 输出电荷大，时间常数大，宜用于测量缓变信号，并且适用于以电荷为输出量的场合。



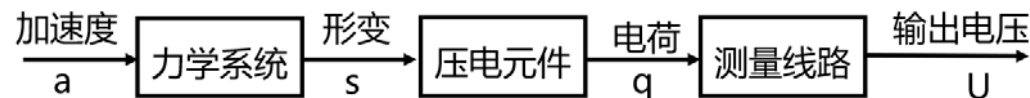
(b) 串联

$$q' = q, U' = 2U_a, C' = \frac{1}{2}C_a$$

$$\begin{cases} k_u' = \frac{u'}{a} = 2k_u \\ k_q' = \frac{q'}{a} = k_q \end{cases}$$

➤ **串联接法** 输出电压大，本身电容小，适用于以电压作为输出信号，且测量电路输入阻抗很高的场合。

3.3 频率响应

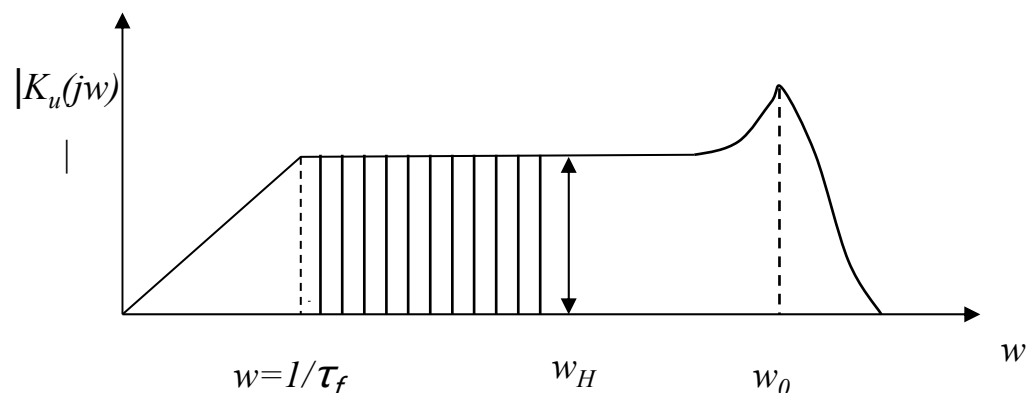


系统的幅频特性

$$|\Phi(j\omega)| = \frac{1}{\omega_0^2 \sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2]^2 + 4\xi^2 (\frac{\omega}{\omega_0})^2}} k d_{33} \frac{\omega\tau}{C_f \sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

以 $\omega_0^2 = k/m$ 代入上式得:

$$|\Phi(j\omega)| = \frac{d_{33}m}{C_f} \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2]^2 + 4\xi^2 (\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

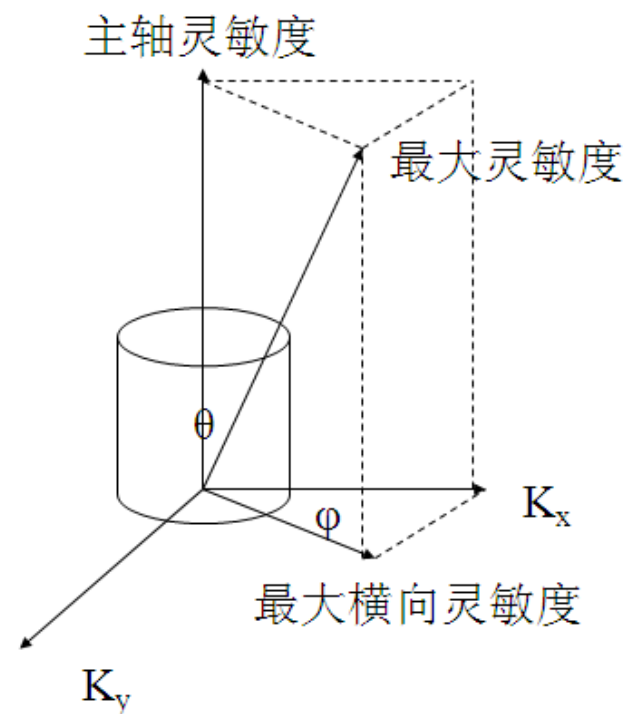
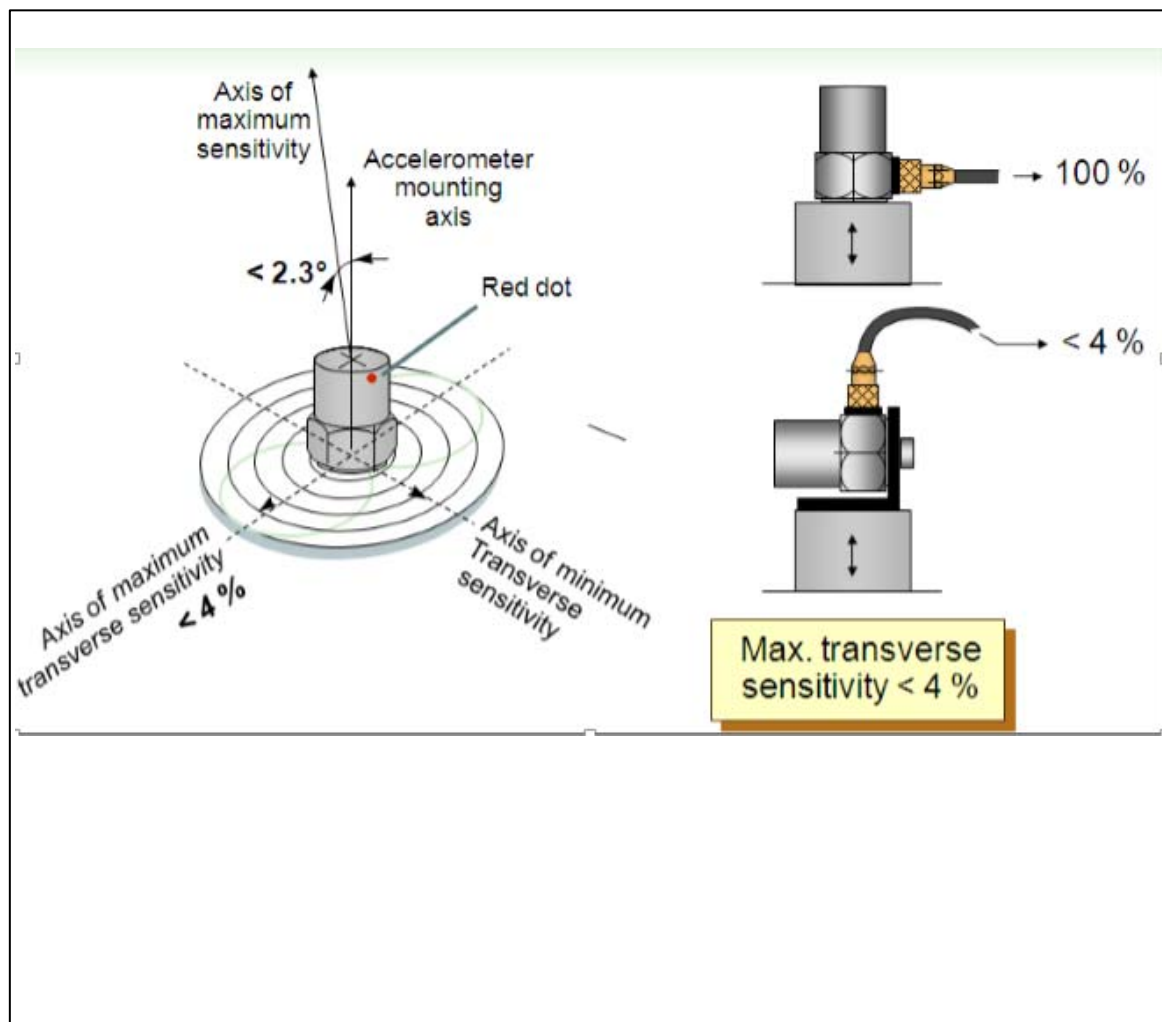


●测量线路的频率响应决定系统的低频性能;

●系统的高频部分受到力学系统的固有频率限制;

●压电元件的性能则对系统的灵敏度起重要作用。

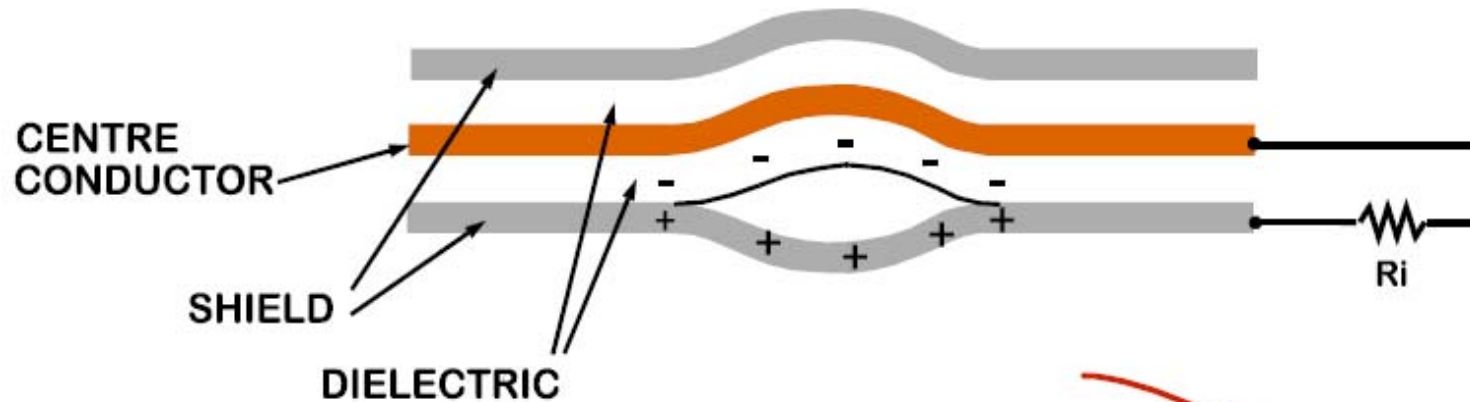
4 影响性能的一些因素 4.1 横向灵敏度



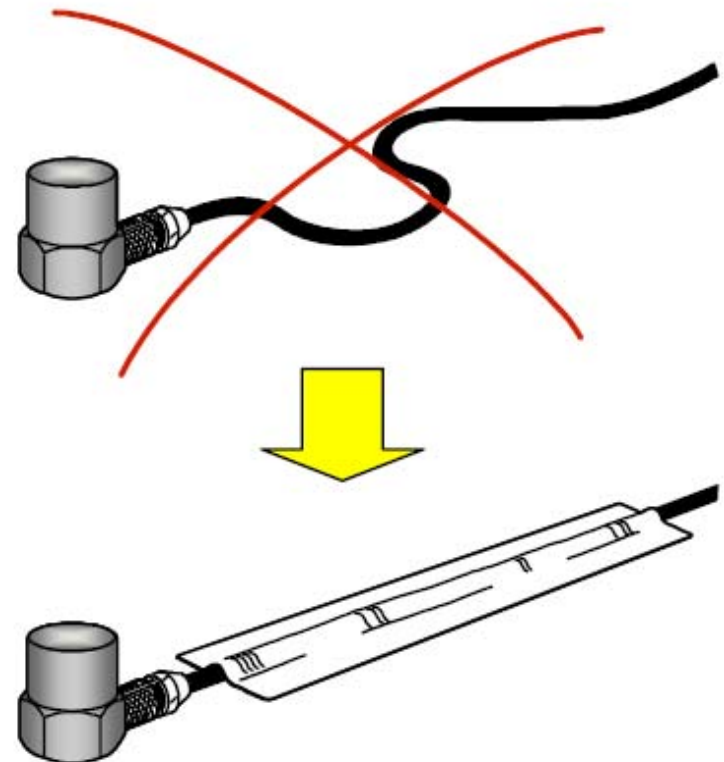
传感器最大灵敏度方向与主轴不重合。

Triboelectric effect

4.2 电缆及器件噪声



- Charge error signal caused by cable motion
- Tie down cable
- It is essential to use good quality low-noise cable with piezoelectric accelerometers
- Alternatively use IEPE, PR or VC accelerometers.



本章作业

- 1、习题：7、8、10、11、12
- 2、什么压电效应？
- 3、说明压电传感器的两种等效电路
- 4、说明电边界短路条件下对应的测量电路
- 5、说明电边界开路条件下对应的测量电路及其等效压电系数
- 6、叠层式压电元件的串联和并联来提高灵敏度的原理
- 7、计算说明压电式加速度传感器的频带特性。
- 8、简述横向灵敏度的定义。
- 9、说明抑制电缆噪声的方法。