



第五章 压电式传感器



本章主要内容

- 0 引言
- 1 压电效应和材料及机电转换
- 2 压电传感器的测量电路
- 3 传感器系统的频率响应
- 4 压电传感器的误差分析
- 5 压电传感器的应用

0 引言

压电传感器的特点:

- 压电式传感器是一种典型的**有源传感器**（或发电型传感器）。
- 压电传感元件是**力敏感元件**-----能测量力、压力、加速度等。
- 具有响应**频带宽**、灵敏度高、信噪比高、结构简单、工作可靠、质量轻等优点。

思考问题：

- 何谓压电效应？
- 压电敏感元件特点？
- 传感器前置调理电路的特点？
- 如何确定压电传感器的动态响应？
- 误差产生原因及抑制措施
- 应用

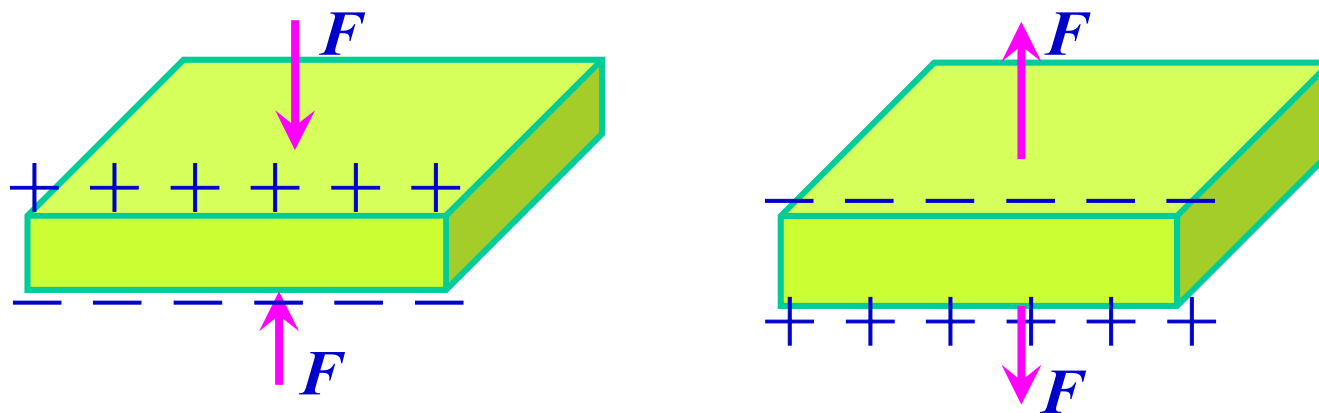
1 压电效应及压电材料

1.1 压电效应

1.1.1 定义

◆ 正压电效应

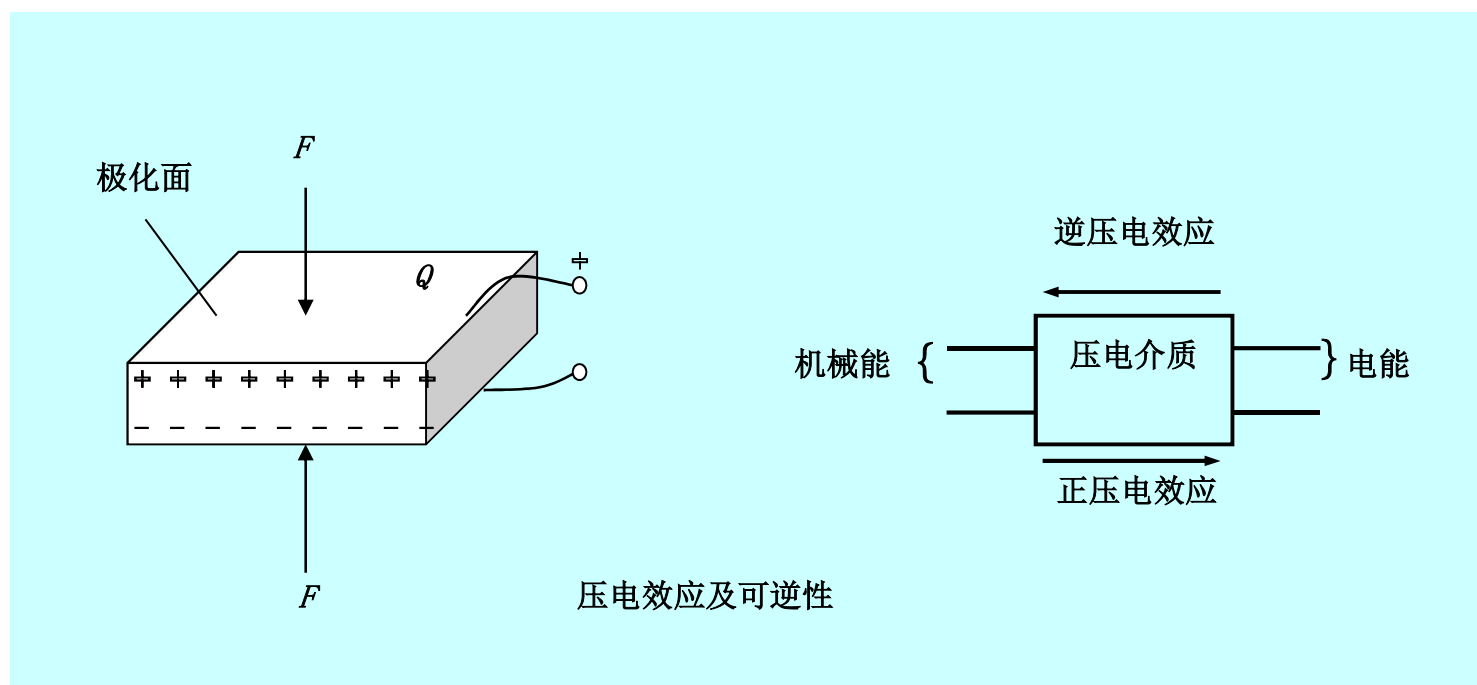
某些电介质，当沿着一定方向对其施力而使它变形时，内部就产生极化现象，同时在它的一定表面上产生电荷，当外力去掉后，又重新恢复不带电状态的现象。当作用力方向改变时，电荷极性也随着改变。

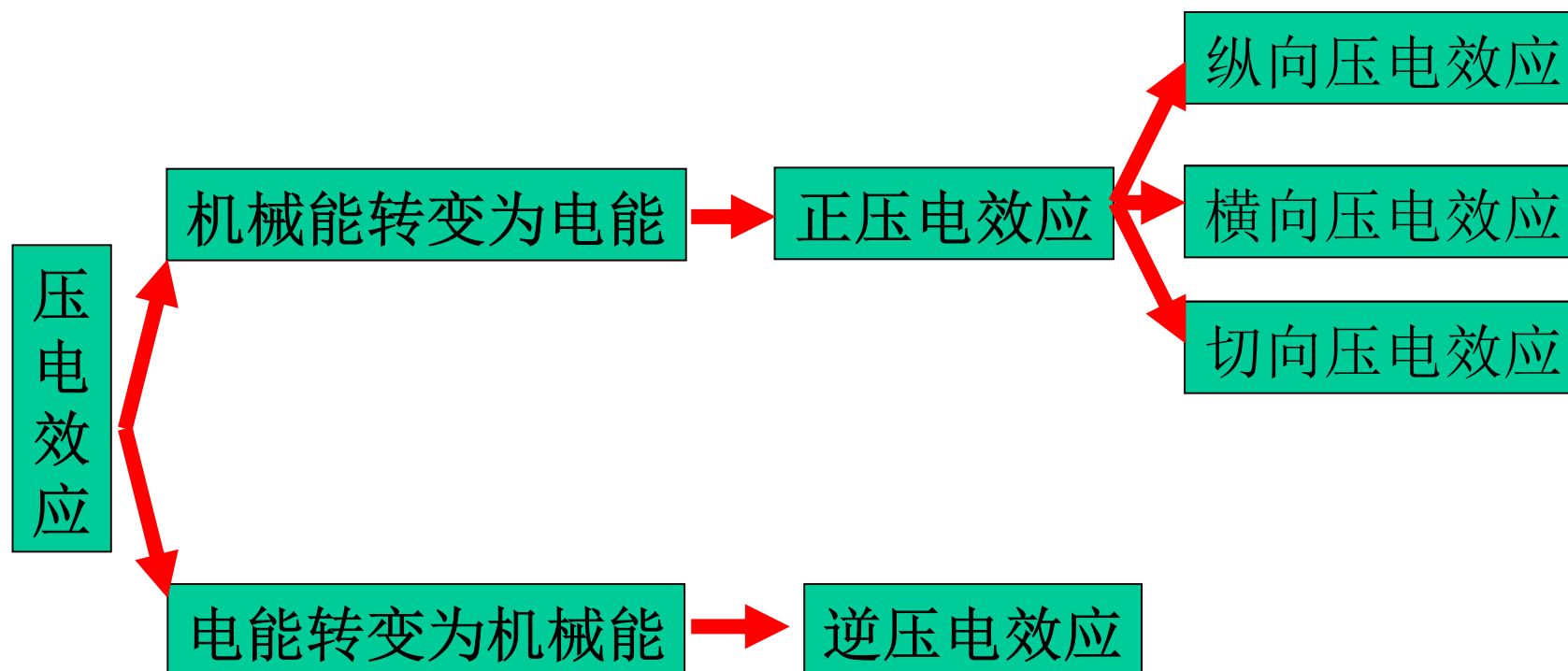


(正) 压电效应示意图

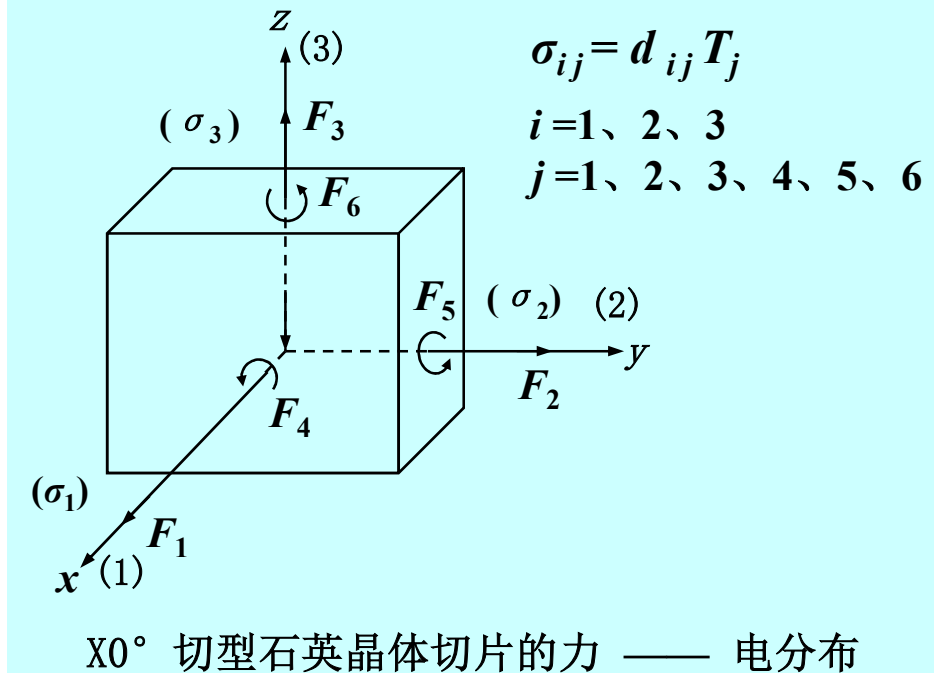
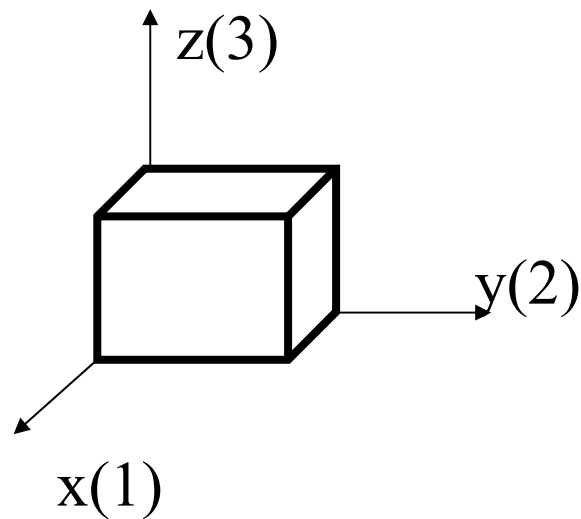
◆ 逆压电效应

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。





1.1.2 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

➤ 压电效应的表达式:

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

压电常数矩阵

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

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

1.2 压电材料

- 自然界中大多数晶体具有压电效应，但压电效应十分微弱。

- 性能优良的压电材料

(转换性能、机械性能、电性能、环境适应性、时间稳定性)

- 实际应用的压电材料

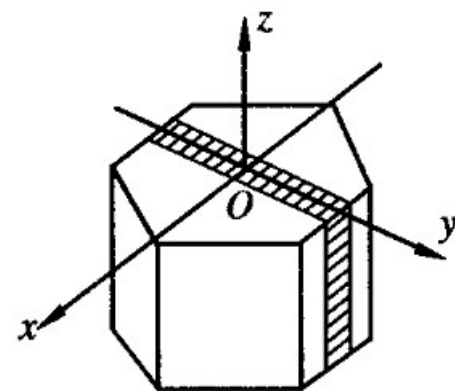
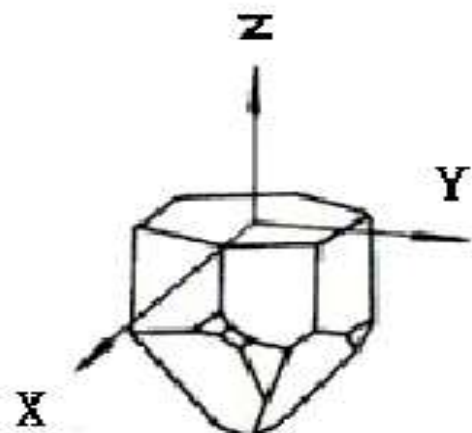
- (1) 压电晶体（单晶体）：石英；铌酸锂等。

- (2) 压电陶瓷：钛酸钡；锆钛酸铅系列（PZT系列）等。

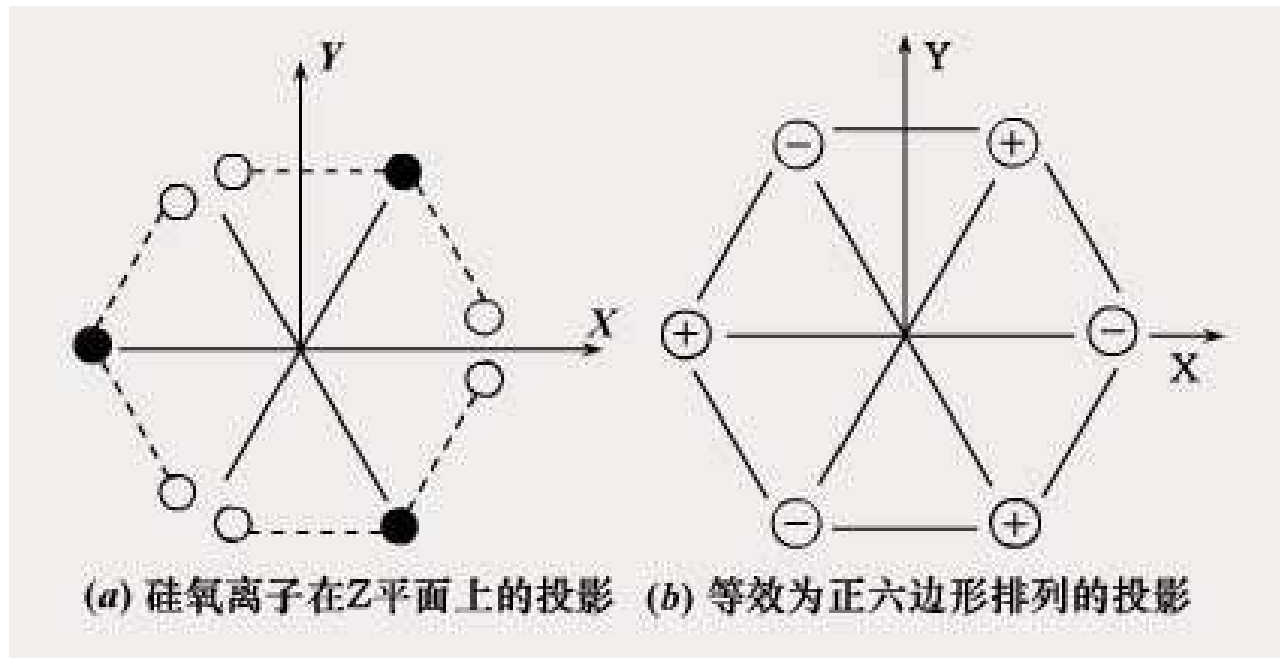
- (3) 压电半导体和高分子压电材料（含压电薄膜）等。

1.2.1 单（石英）晶体材料

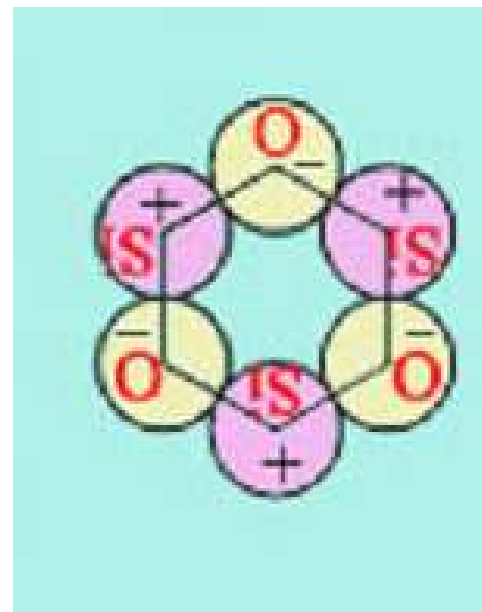
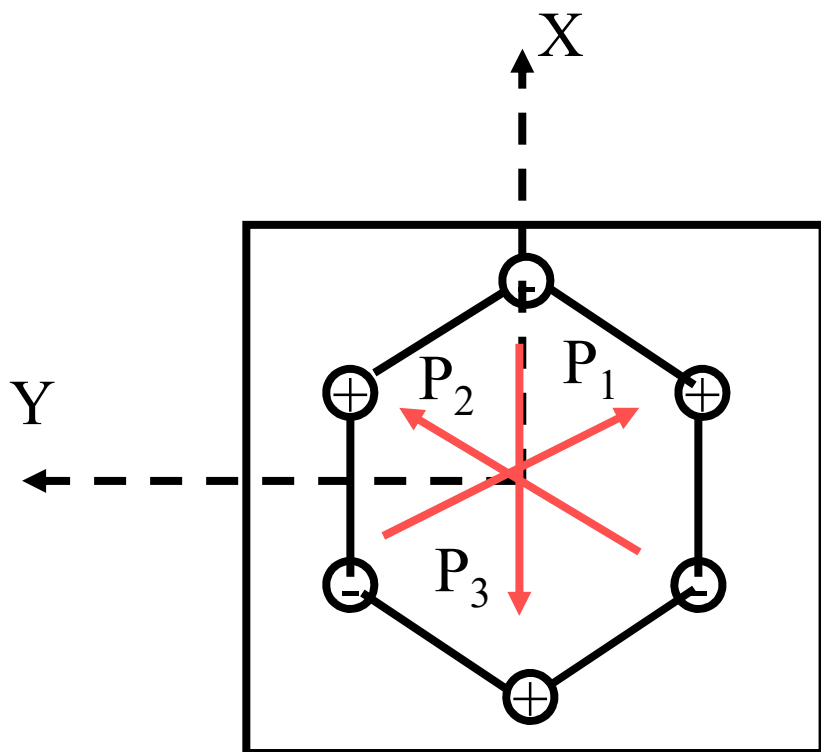
- **光学轴**（基准轴，**Z**轴）：光沿该方向通过没有双折射现象，
- **电轴**（**X**轴）：经过晶体棱线，垂直于该轴的表面上压电效应最强。
- **机械轴**（**Y**轴）：垂直**xz**面，在电场作用下，该轴方向的机械变形最明显。



➤ 石英晶体压电效应机理



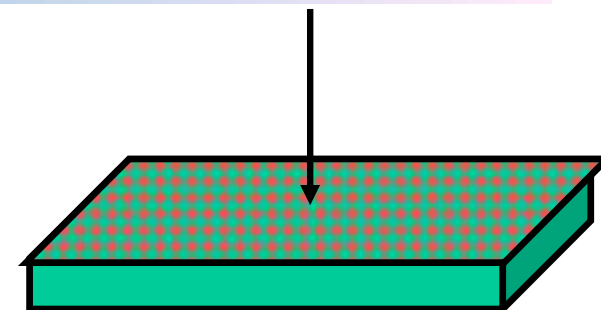
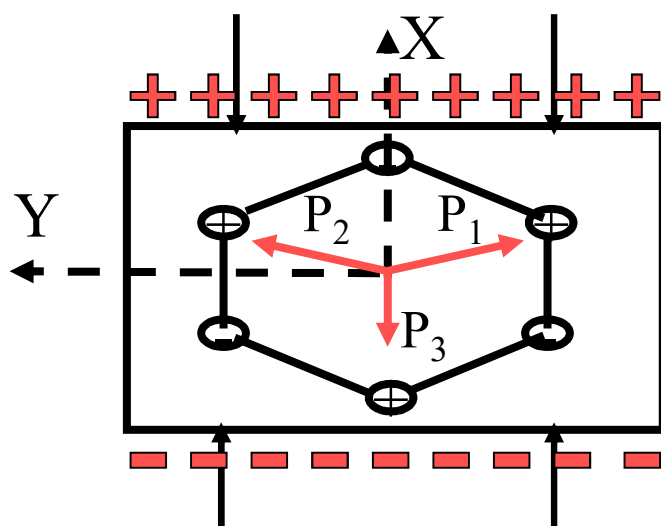
电偶极矩 $P=qL$, q 为电荷量, L 为正负电荷之间距离。



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

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° 夹角的电偶极矩 P_1 、 P_2 、 P_3 。此时正负电荷重心重合，电偶极矩的矢量和等于零，即 $P_1 + P_2 + P_3 = 0$ ，所以晶体表面不产生电荷，即呈中性。

受到X方向的力—**纵向压电效应**



厚度受压型

$(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3)_x > 0$ ✓ 晶体沿x方向将产生压缩变形, 正负离子的相对位置也随之变动。此时正负电荷重心不再重合。

$(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3)_y = 0$ ✓ 电偶极矩在x方向上的分量由于 \mathbf{P}_3 的减小和 \mathbf{P}_1 、 \mathbf{P}_2 的增加而不等于零, 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。

$(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3)_z = 0$ ✓ 当作用力方向相反时, 电荷的极性也随之改变。

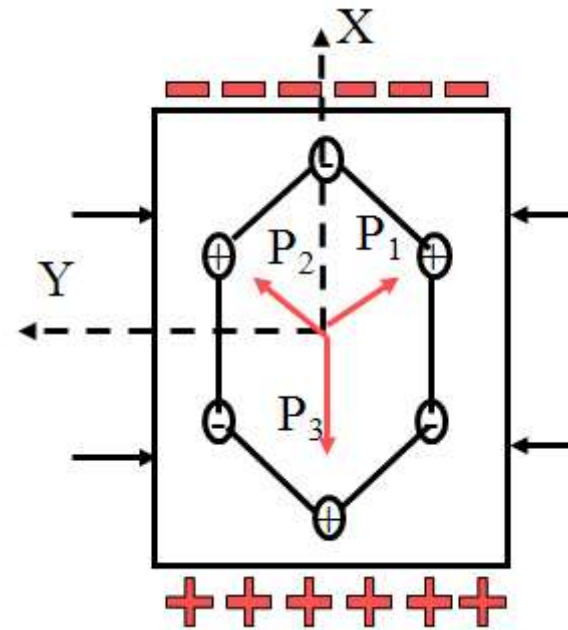
受到Y方向的力—**横向压电效应**

$$(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3)_x < 0$$

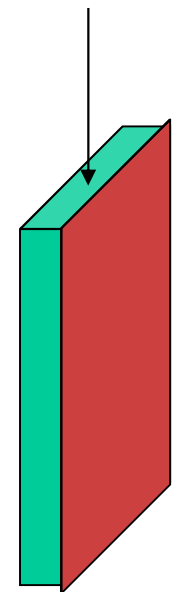
$$(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3)_y = 0$$

$$(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3)_z = 0$$

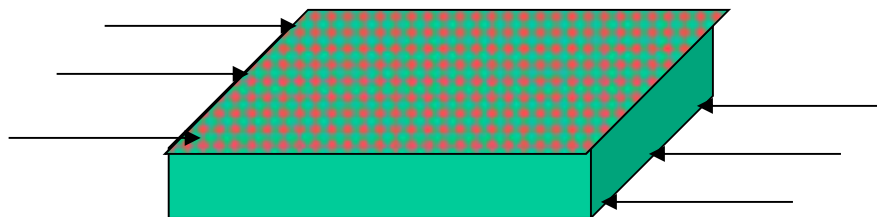
- ✓当晶体受到沿y轴方向的压力作用时, P_3 增大, P_1 、 P_2 减小。
- ✓在垂直x轴表面上出现电荷, 它的极性为x轴正向为负电荷。在y轴方向上不出现电荷。
- ✓当作用力方向相反时, 电荷的极性也随之改变。



长度受压型



受到平面切向力—*剪切压电效应*



厚度切变型

石英晶体压电常数矩阵:

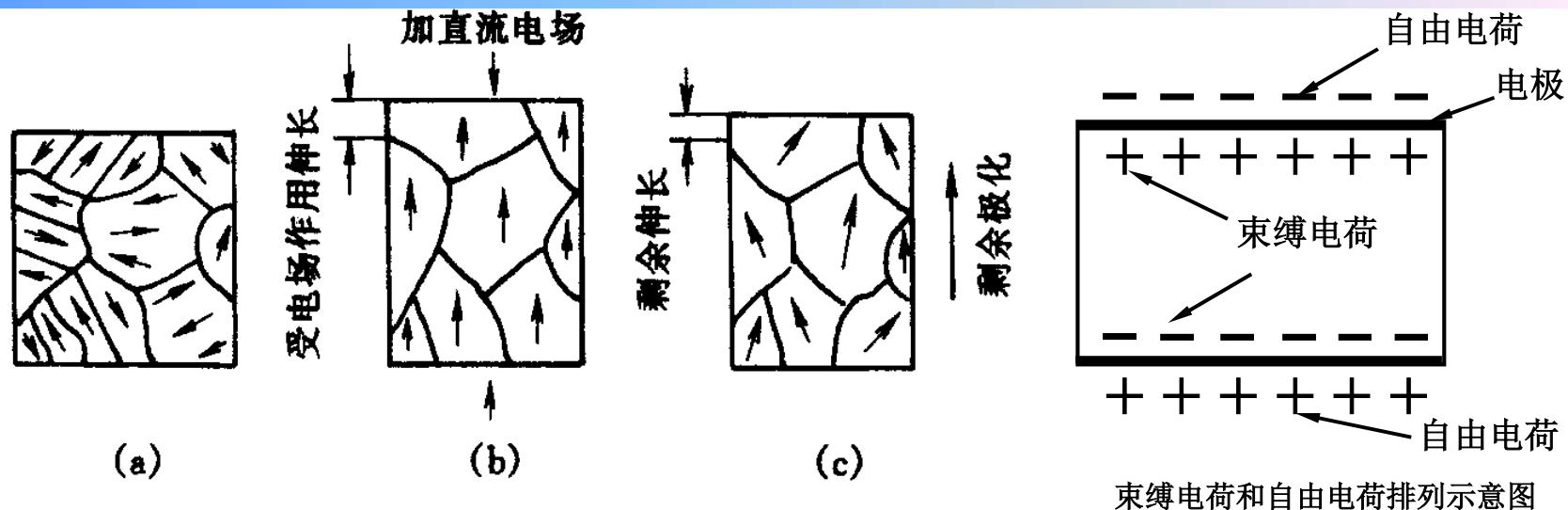
$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix}$$

独立压电常数: $d_{11} = \pm 2.31 \times 10^{-12} \text{ C/N}$

$d_{14} = \pm 0.73 \times 10^{-12} \text{ C/N}$

- ① 压电系数的**温度稳定性好**。在20℃至200℃温度范围内，温度每升高1℃，压电系数仅减少0.016%，当温度达到573℃时（居里点），石英晶体丧失压电特性。
- ② 各向异性的晶体，按不同方向切割的晶片，其物理性质相差很大。

1.2.2 压电陶瓷材料



BaTiO_3 压电陶瓷的极化

(a) 极化前；(b) 极化；(c) 极化后

- **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**；
- 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**。
- 受到压力后，自由电荷过剩出现放电现象。受到拉力，出现充电现象。

压电陶瓷变形形式：

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix}$$
$$d_{33} = 190 \times 10^{-12} (c/N)$$
$$d_{31} = d_{32} = -0.41 d_{33}$$
$$d_{15} = -d_{24} = 250 \times 10^{-12} (c/N)$$

- 厚度变形： \mathbf{d}_{33}
- 长度变形： \mathbf{d}_{31} 、 \mathbf{d}_{32}
- 剪切变形： \mathbf{d}_{24} 、 \mathbf{d}_{15}
- 体积变形： \mathbf{d}_{31} 、 \mathbf{d}_{32} 、 \mathbf{d}_{33}

压电陶瓷外形



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。



无铅压电陶瓷及其换能器外形

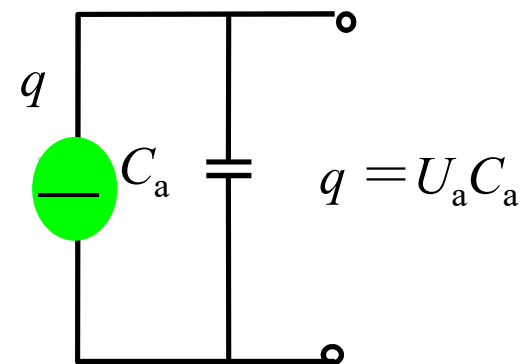
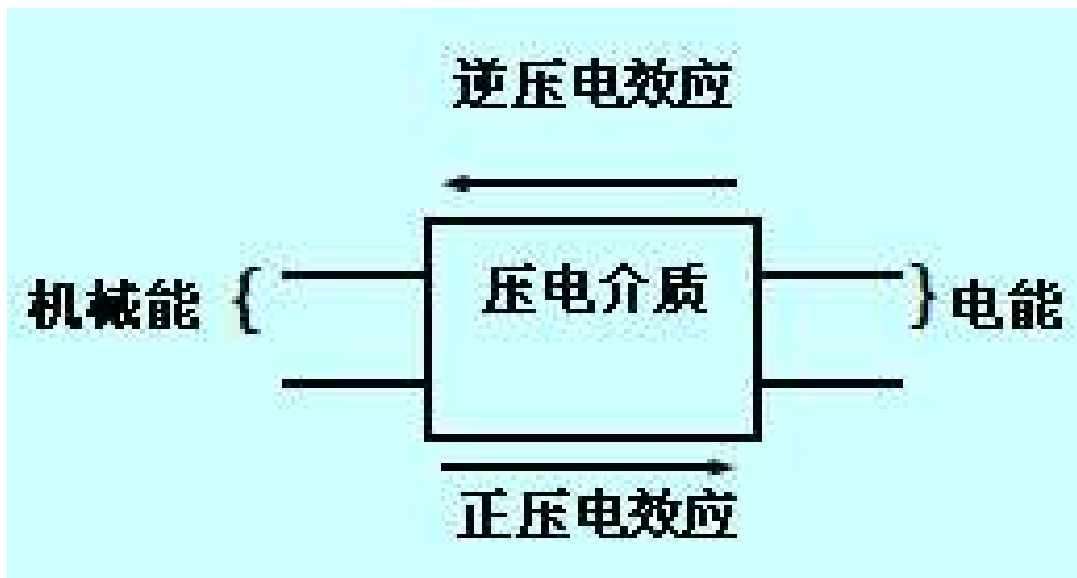
表 6-1 常用压电材料性能

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

1.3 压电元件的机电转换模型



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

1.3 压电元件的机电转换模型 (续)

电边界为短路状态:

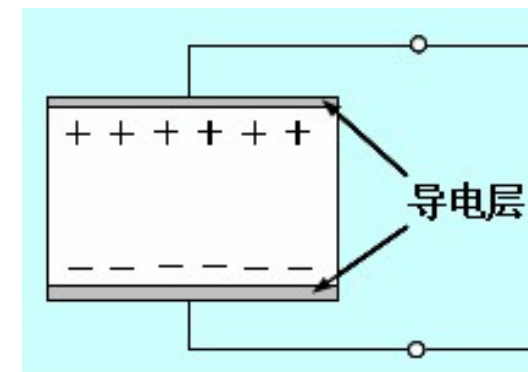
①应力 T_1 与形变 t 关系为: $t = C_{11}T_1$

式中: C_{11} 为压电陶瓷固有的柔度系数;

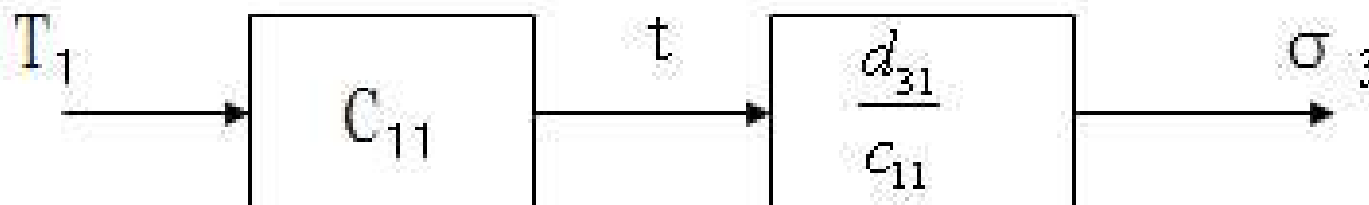
②与 T_1 作用下产生的变形对应束缚电荷 $\sigma_3 = d_{31}T_1$;

所以有: $t = c_{11}T_1$;

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

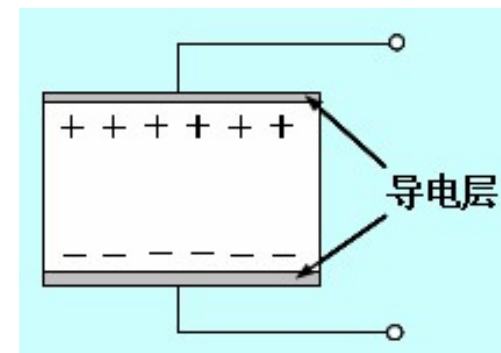
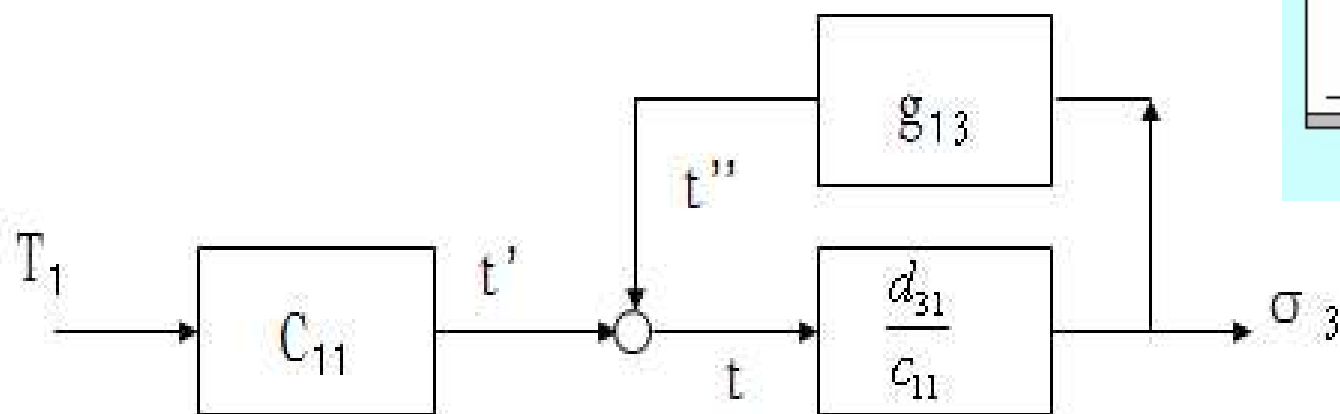


特点: 信号流是单向的。



1.3 压电元件的机电转换模型 (续)

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：信号流有环路。

2 压电式传感器的测量电路

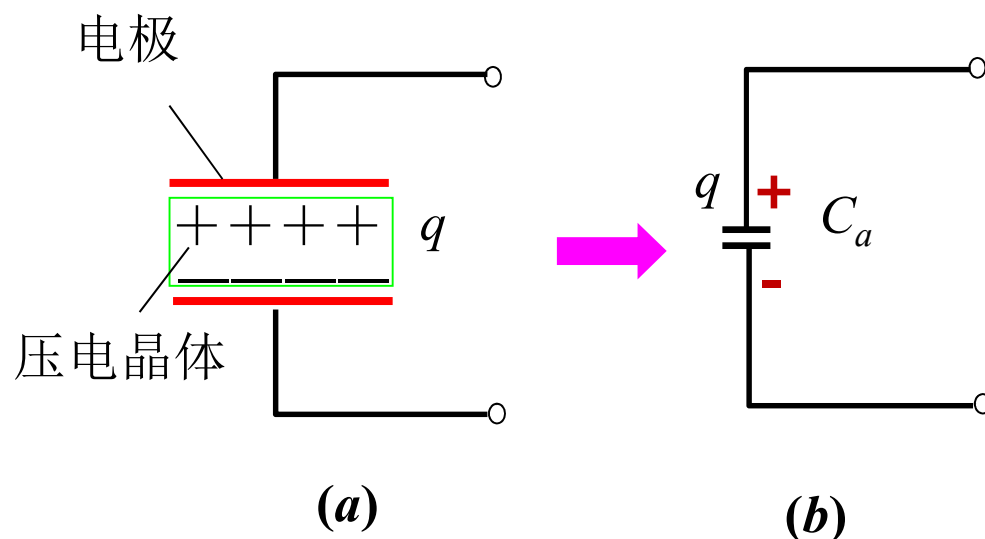
2.1 传感器的等效电路

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一**静电发生器**，也可看成两极板充有电荷的电容器。

其电容量为：

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

t ：晶体厚度（m）



压电传感器的等效电路

2.1 传感器的等效电路（续）

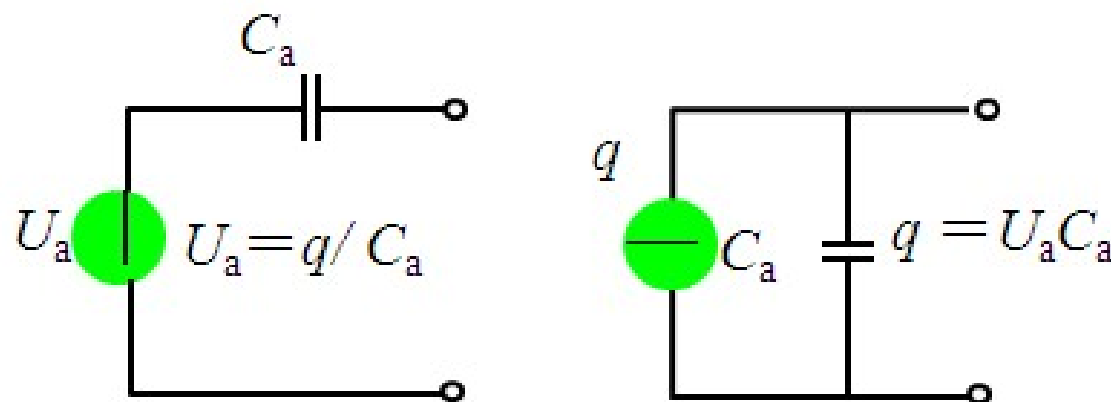


图 压电传感器等效电路

(a) 电压等效电路

(b) 电荷等效电路

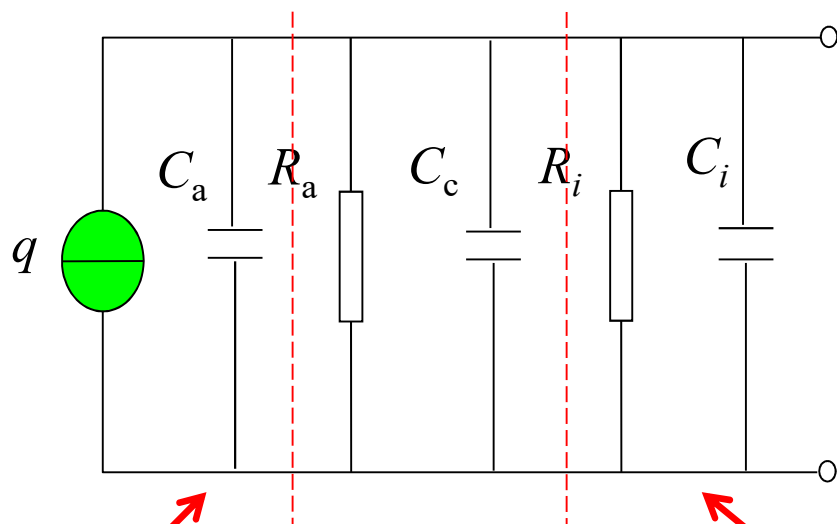
由等效电路可知，只有传感器内部信号电荷无“漏损”，外电路负载为无穷大时，传感器产生的电压或电荷才能长期保存，否则电路将以某时间常数按指数规律放电。

◆ 不适合于静态测量

2.2 压电传感器的前置测量电路

➤ 压电传感器的实际等效电路

压电传感器在实际使用时总要与测量仪器或测量电路相连接, 因此还须考虑连接电缆的等效电容 C_c , 放大器的输入电阻 R_i , 输入电容 C_i 以及压电传感器的泄漏电阻 R_a ,



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。

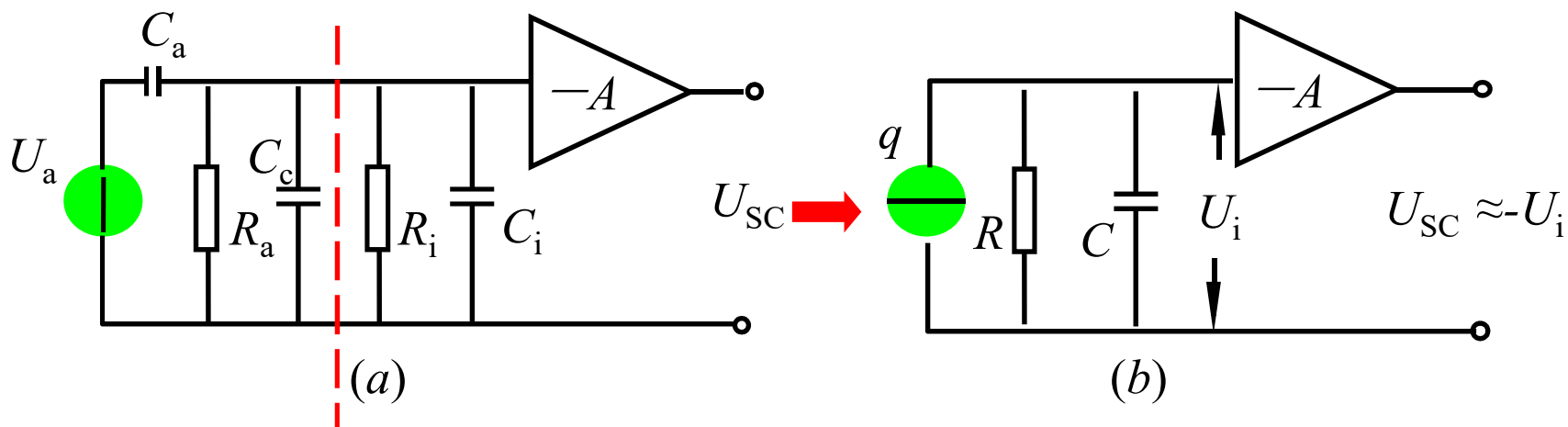
- ① 电荷等效电路
- ② 电压等效电路

前置放大电路输入

2.2 压电传感器的前置测量电路（续）

➤ 电压放大器_阻抗变化器

压电传感器连接电压放大器：



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

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

等效电容:
$$C = C_a + C_c + C_i$$

设压电材料所受作用力F为

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

若压电材料为压电陶瓷，其压电系数为 d_{33} ，则在外力作用下，压电元件产生的电荷值为

$$\dot{q} = d_{33} \dot{F}$$

$$q = d_{33} F_m \sin \omega t$$

由图 (b) 可得送入放大器输入端的电压 U_i ，将其写为复数形式，为

$$\dot{U}_i = j\omega q \cdot (R // \frac{1}{j\omega c})$$

$$\dot{U}_i = d_{33} \dot{F} \frac{j\omega R}{1 + j\omega RC}$$

U_i 的幅值 U_{im} 为

$$\begin{aligned} U_{im} &= \frac{d_{33} \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_a + C_c + C_i)^2}} F_m \\ &= \frac{d_{33} \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} F_m \end{aligned}$$

令 $\tau = R(C_a + C_c + C_i) = RC$, τ 为测量回路的时间常数, 则可得

$$U_{sc} \approx U_{im} = \frac{1}{C} \cdot \frac{d_{33} F_m \omega \tau}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}}$$

电压灵敏度为:

$$|K_u(j\omega)| = \left| \frac{\dot{U}_i}{\dot{F}} \right| = \frac{d_{33}}{C} \cdot \frac{\omega \tau}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}}$$

$$|K_u(j\omega)| = \left| \frac{\dot{U}_i}{\dot{F}} \right| = \frac{d_{33}}{C} \cdot \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

当 $\omega\tau \ll 1$ 时

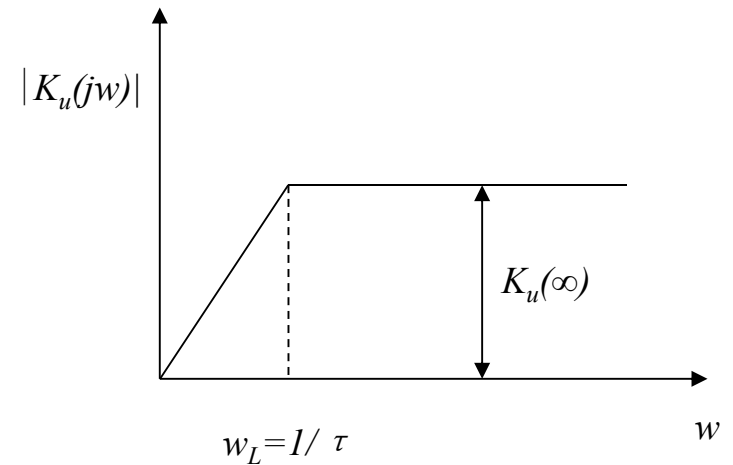
$$|K_u(j\omega)| \approx d_{33}\omega R$$

当 $\omega\tau \gg 1$ 时

$$|K_u(j\omega)| \approx \frac{d_{33}}{C} = \frac{d_{33}}{C_a + C_c + C_i} = |K_u(j\infty)|$$

$$\therefore \omega_L = 2\pi f_L = \frac{1}{\tau}$$

$$\therefore f_L = \frac{1}{2\pi RC}$$



理想输出: $U_0 = \frac{d_{33}}{C} F$

$$C = C_a + C_c + C_i$$

实际输出: $U'_0 = \frac{d_{33}}{C} \cdot \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} F$

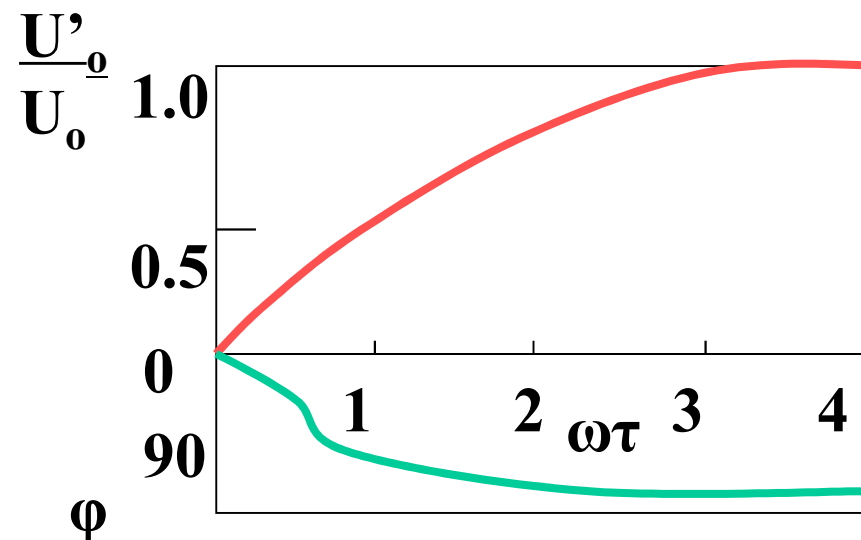
$$\frac{U'_0}{U_0} = \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

$$|K_u(j\omega)| \approx \frac{d_{33}}{c} = |K_u(j\infty)|$$

分析:

(1) 当 $\omega\tau=0$ (静态力) 时,

(2) 当 $\omega\tau > 3$ 时
($U'/U=0.95$)



改善低频响应 $\rightarrow \downarrow \omega_0 = \frac{1}{\tau} \rightarrow \uparrow \tau \rightarrow \begin{cases} R \uparrow \\ C \uparrow \rightarrow K_u \downarrow \end{cases}$

$$\tau = RC$$

R_i 越大, 时间常数越大, 则低频响应也越好。

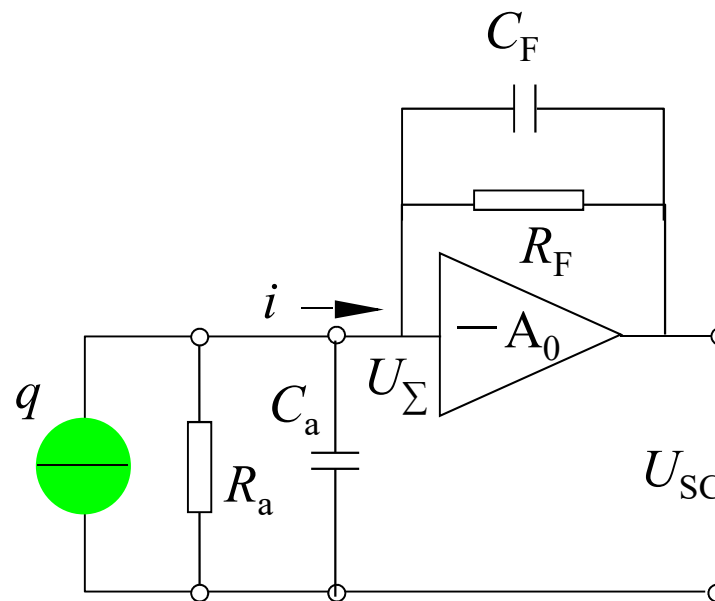
(3) K_u 受电缆分布电容的影响较大, 改变电缆长度 C_c 将改变, 须重新校准灵敏度值。

2.2 压电传感器的前置测量电路（续）

➤ 电荷放大器

电荷放大器是一个具有深度负反馈的高增益放大器，其等效电路如图所示。若开环增益 A_0 足够大，并且输入阻抗很高，则放大器输入端几乎没有分流，电流仅流入反馈回路 C_F 与 R_F 。由图可知电流 i 的表达式为：

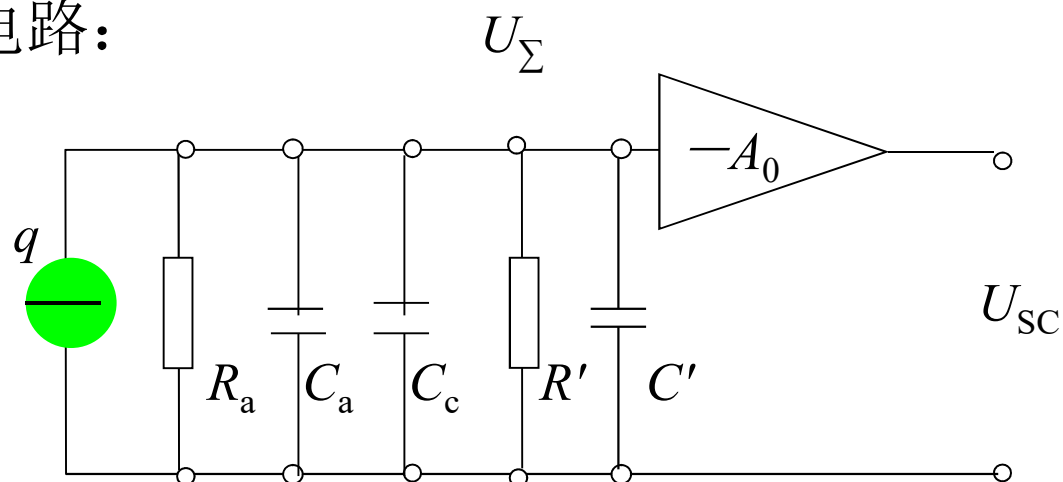
$$\begin{aligned} i &= (\dot{U}_\Sigma - \dot{U}_{SC}) \left(j\omega C_F + \frac{1}{R_F} \right) \\ &= [\dot{U}_\Sigma - (-A_0)\dot{U}_\Sigma] \left(j\omega C_F + \frac{1}{R_F} \right) \\ &= \dot{U}_\Sigma \left[\underbrace{j\omega(A_0 + 1)C_F}_{C'_F} + (A_0 + 1) \underbrace{\frac{1}{R_F}}_{1/R'} \right] \end{aligned}$$



电荷放大器原理电路图

2.2 压电传感器的前置测量电路（续） ➤ 电荷放大器

等效电路：



考虑电缆电容 C_c

图5-20 压电传感器接至电荷放大器的等效电路图

“密勒效应”

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

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

2.2 压电传感器的前置测量电路（续） ➤ 电荷放大器

运放输入电压为

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

运放输出电压为

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

2.2 压电传感器的前置测量电路 (续) ➤ 电荷放大器

当 A_0 足够大时,

$$\left| \frac{\dot{U}_{sc}}{\dot{q}} \right| \approx \left| \frac{-j\omega A_0}{(1 + A_0)(1/R_F + j\omega C_F)} \right|$$
$$\left| \frac{\dot{U}_{sc}}{\dot{q}} \right| \approx \left| \frac{-j\omega}{(1/R_F + j\omega C_F)} \right| = \frac{1}{C_F} \cdot \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \quad \tau = R_F C_F$$

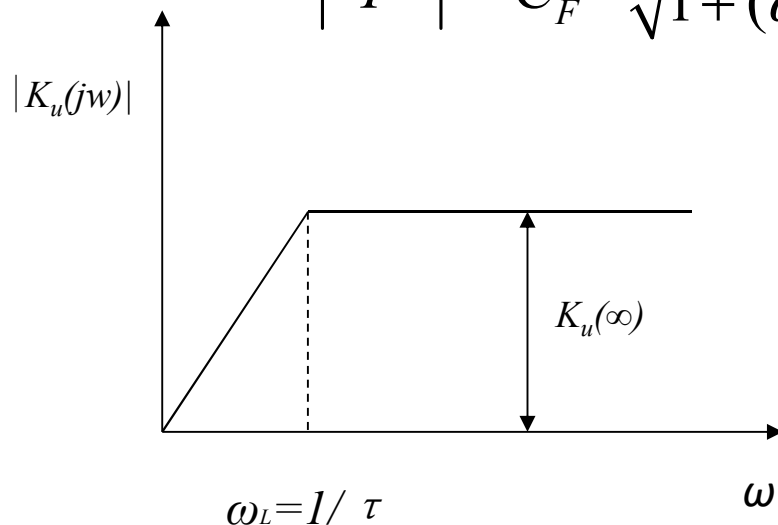
若 $q = d_{33}F$, 则

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

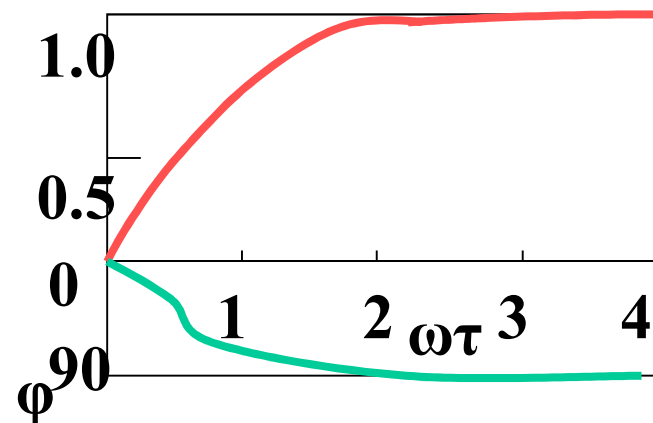
2.2 压电传感器的前置测量电路（续） ➤ 电荷放大器

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

$$\tau = R_F C_F$$



$$f_L = \frac{\omega_L}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_F C_F}$$



$$\omega R_F C_F \gg 1 \text{ 时, } |K(j\omega)| = \left| \frac{\dot{U}_{SC}}{F} \right| \approx \frac{d_{33}}{C_F}$$

理论值: $|K(j\omega)| = \frac{d_{33}}{C_F}$

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

$$\because R_a \rightarrow \infty$$

$$\begin{aligned} \therefore \dot{U}_{sc} &= \frac{-j\omega\dot{q}A_0}{\left[(1+A_0)\frac{1}{R_F} \right] + j\omega \left[C_a + C_c + (1+A_0)C_F \right]} \\ &= \frac{-j\omega\dot{q}A_0 R_F}{(1+A_0) \left[1 + j\omega R_F \left(\frac{C_a + C_c}{1+A_0} + C_F \right) \right]} \end{aligned}$$

$$\text{当 } \omega R_F C_F \gg 1 \text{ 时, } U_{SC} \approx \frac{-A_0 q}{C_a + C_c + (1 + A_0) C_F} \quad U'_{SC} \approx -\frac{q}{C_F}$$

$$\text{则误差为 } \delta = \frac{U'_{SC} - U_{SC}}{U'_{SC}} = \frac{C_a + C_c + C_F}{C_a + C_c + (1 + A_0) C_F}$$

$$\text{若 } C_a = 1000 \text{ pF, } C_F = 100 \text{ pF, } C_c = (100 \text{ pF/m}) \times 100 \text{ m} = 10^4 \text{ pF}$$

当要求 $\delta \leq 1\%$ ，则有

$$\delta = 0.01 = \frac{1000 + 100 + 10000}{1000 + 10000 + (1 + A_0) \times 100} \quad \text{得 } A_0 \geq 10^4$$

$$\text{若 } \delta = 0.0001 = \frac{1000 + 100 + 10000}{1000 + 10000 + (1 + A_0) \times 100} \quad \text{得 } A_0 \geq 10^6$$

**对线性集成运算放大器来说，这些要求是不难达到的，因此
放大倍数 A_0 对测量精度影响通常可忽略。**

- 用高增益的运算放大器形成电短路的边界条件;
- 更换电缆无需重新校准灵敏度;
- 灵敏度取决于已知的、固定的 C_F , 有利于灵敏度的稳定和调整;
- 电荷放大器时间常数相当大, 可用于准静态测量。

3 传感器系统的频响分析

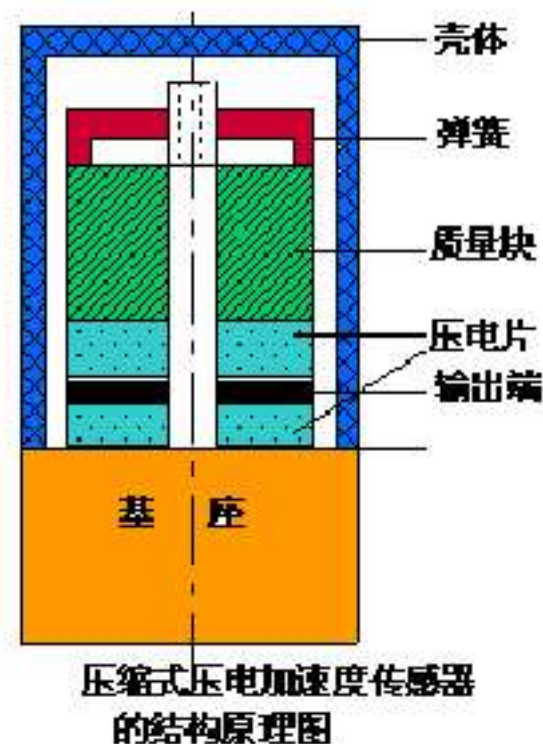
3.1 结构及工作原理

—以纵向压缩型加速度计为例

结构：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。

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。输出信号由电极引出。

工作原理：



3 传感器系统的频响分析 (续)

3.2 灵敏度

质量块感受的惯性力 $F = ma$

$$q = d_{33}F = d_{33}ma \quad \left\{ \begin{array}{l} k_u = \frac{u_a}{a} = \frac{d_{33}m}{c_a} \\ k_q = \frac{q}{a} = d_{33}m \end{array} \right.$$

分析:

- (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 传感器系统的频响分析（续）

3.2 灵敏度

根据被测对象及测量要求选择不同质量的传感器。

质量范围： $0.x \text{ g} \sim x \text{ kg}$

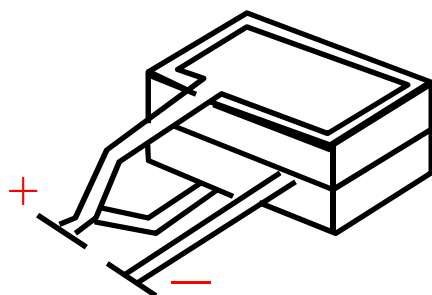


3 传感器系统的频响分析 (续)

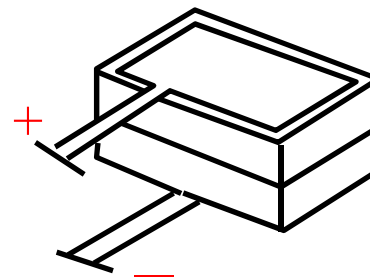
3.2 灵敏度

(3) 增加压电片数目来提高灵敏度

连接方式： **并联形式**和**串联形式**



(a) 并联



(b) 串联

叠层式压电元件的串联和并联图

3 传感器系统的频响分析 (续)

3.2 灵敏度

并联形式：

$$q' = 2q, U' = U_a, C' = 2C_a \longrightarrow \begin{cases} k_u' = \frac{u'}{a} = k_u \\ k_q' = \frac{q'}{a} = 2k_q \end{cases}$$

串联形式：

$$q' = q, U' = 2U_a, C' = \frac{1}{2}C_a \longrightarrow \begin{cases} k_u' = \frac{u'}{a} = 2k_u \\ k_q' = \frac{q'}{a} = k_q \end{cases}$$

- **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。
- **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。

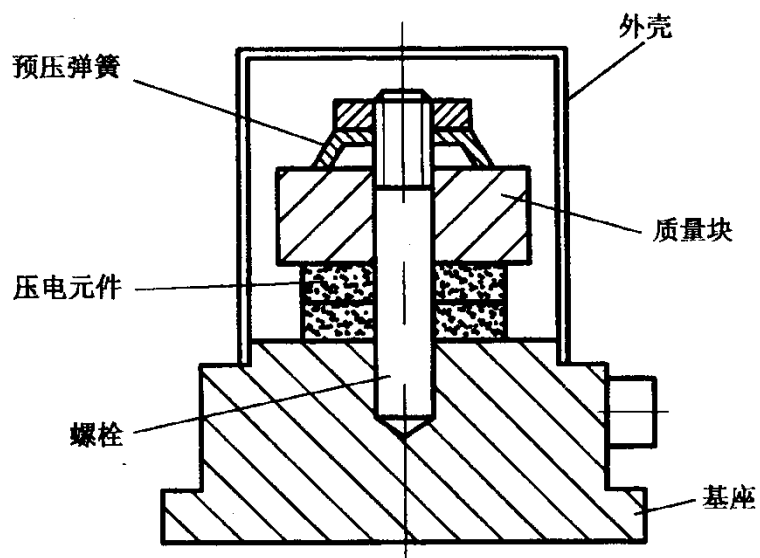
3 传感器系统的频响分析（续）

3.3 系统响应（动态响应）



- 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。

(1) 力学系统:



压电式加速度传感器结构图

3.3 系统响应 (动态响应)

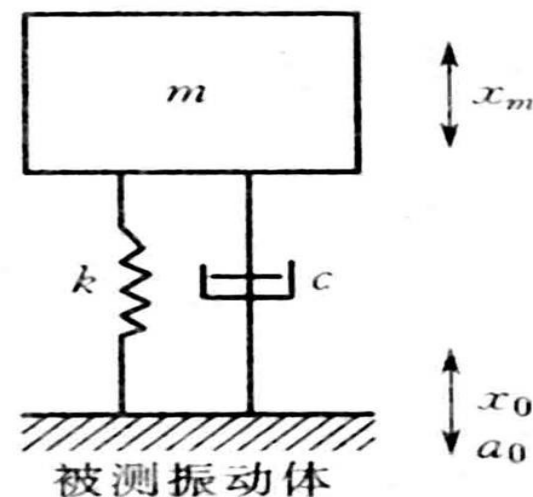


图5-23 二阶系统模拟

则

$$m \frac{d^2 x_m}{dt^2} = -c \frac{dx_i}{dt} - kx_i$$

$$m \frac{d^2 x_m}{dt^2} = -c \frac{d(x_m - x_0)}{dt} - k(x_m - x_0)$$

设被测振动体位移 x_0 , 质量块相对位移 x_m , 则质量块与被测振动体的相对位移为 x_i , 即

$$x_i = x_m - x_0$$

3.3 系统响应 (动态响应)

将上式改写为

$$\frac{d^2(x_m - x_0)}{dt^2} + \frac{c}{m} \frac{d(x_m - x_0)}{dt} + \frac{k}{m}(x_m - x_0) = -\frac{d^2 x_0}{dt^2}$$

设加速度 $a_0 = \frac{d^2 x_0}{dt^2}$, 输出为 $(x_m - x_0)$, 并引入算子 $D = \frac{d}{dt}$, 则

$$\frac{x_m - x_0}{a_0} = \frac{-1}{D^2 + 2\xi\omega_0 D + \omega_0^2}$$

式中 ξ ——相对阻尼系数, $\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ ω_0 ——固有频率, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

将上式写为频率传递函数, 则有

$$\frac{x_m - x_0}{a_0}(j\omega) = \frac{-(1/\omega_0)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)j}$$

其幅频特性为

3.3 系统响应（动态响应）

$$\left| \frac{x_m - x_0}{a_0} (j\omega) \right| = \frac{(1/\omega_0)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \left[2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \right]^2}} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$
$$= \left| \frac{S}{a_0} (j\omega) \right|$$

相频特性

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2} - 180^\circ$$

3.3 系统响应（动态响应）

(2) 压电元件

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

$$F = k \cdot s \quad k \text{——压电元件弹性系数}$$

则产生的电荷为：

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

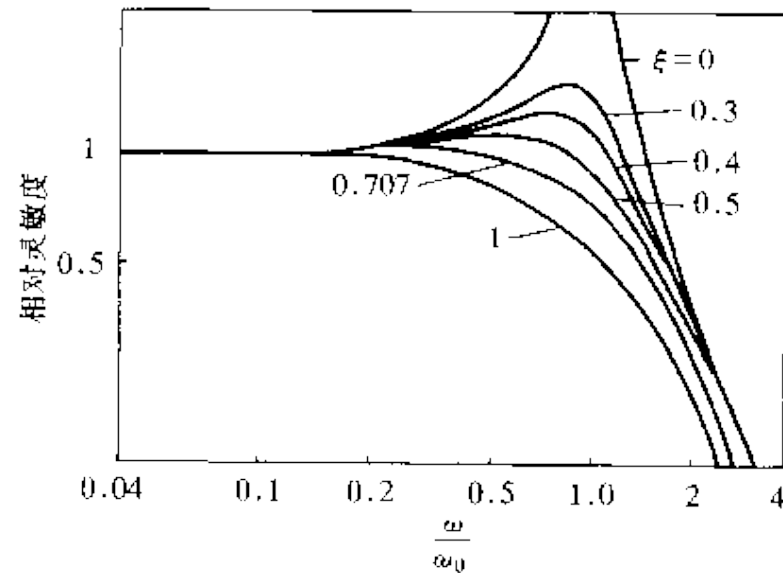
3.3 系统响应（动态响应）

则压电元件与力学系统的动态特性为：

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

$\omega \ll \omega_0$ 时，

$$\frac{q}{a} \approx \frac{d_{33}k}{\omega_0^2}$$



加速度传感器的频响特性

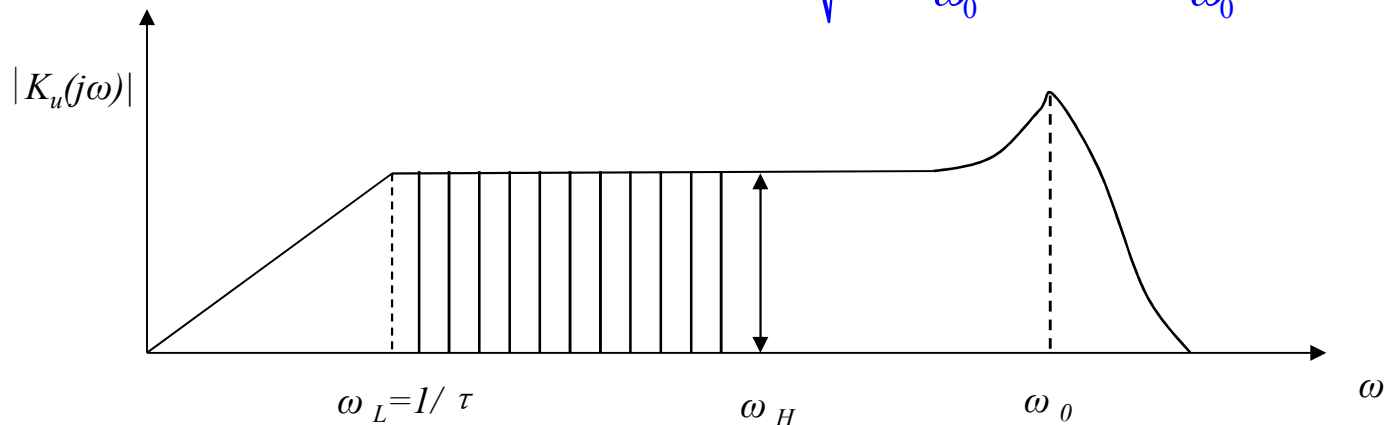
3.3 系统响应（动态响应）

(3) 系统输出电压和加速度的关系

系统的幅频特性 $|\Phi(j\omega)| = \left| \frac{S(j\omega)}{a(j\omega)} \right| \cdot \left| \frac{Q(j\omega)}{S(j\omega)} \right| \cdot \left| \frac{U_0(j\omega)}{Q(j\omega)} \right| = \left| \frac{U_0(j\omega)}{a(j\omega)} \right|$

$$= \frac{1}{\omega_0^2 \sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2]^2 + 4\xi^2 (\frac{\omega}{\omega_0})^2}} kd_{33} \frac{\omega\tau}{C\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

以 $\omega_0^2 = k/m$ 代入上式得: $|\Phi(j\omega)| = \frac{d_{33}m}{C_f} \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2]^2 + 4\xi^2 (\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$



4 压电式传感器的误差分析

4.1 频率响应误差

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

理想条件下：

$$|\Phi(j\omega)| = \frac{|u_o|}{|a|} = \frac{d_{33}m}{C_f} \quad u_o = \frac{d_{33}m}{C_f} a$$

4.1 频率响应误差 (续)

低频:
$$u_o' = \frac{d_{33}m}{C_f} \frac{\omega\tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} a$$

$$\delta_L = \frac{|u_o - u_o'|}{u_o} = \left| 1 - \frac{\omega\tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \right|$$

$$(\approx \frac{1}{2(\omega\tau)^2})$$

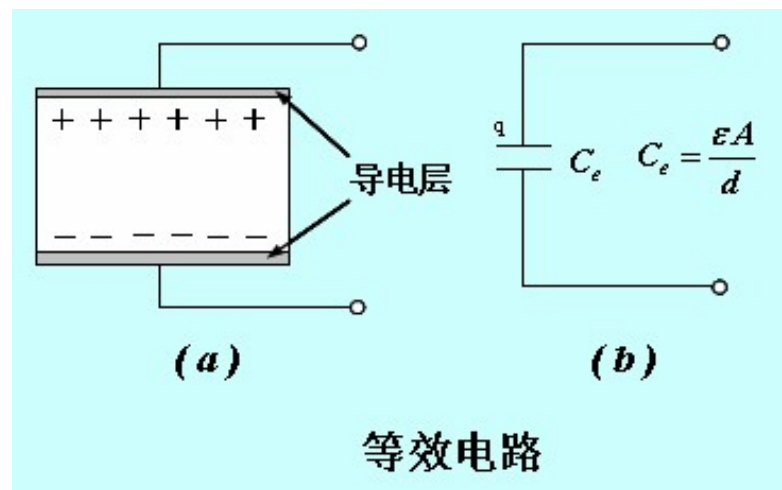
高频:
$$\delta_H = \left| \frac{u_o - u_o'}{u_o} \right| = \left| 1 - \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2]^2 + 4\xi^2 (\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \right|$$

4.2 温度的影响

外界温度变化将影响压电传感器的灵敏度。

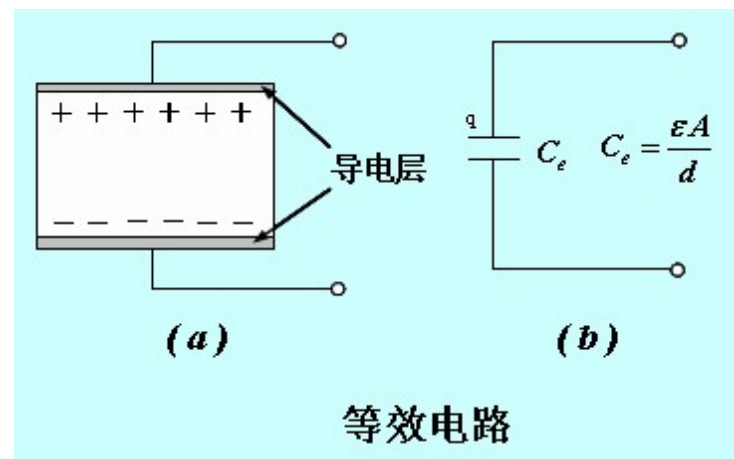
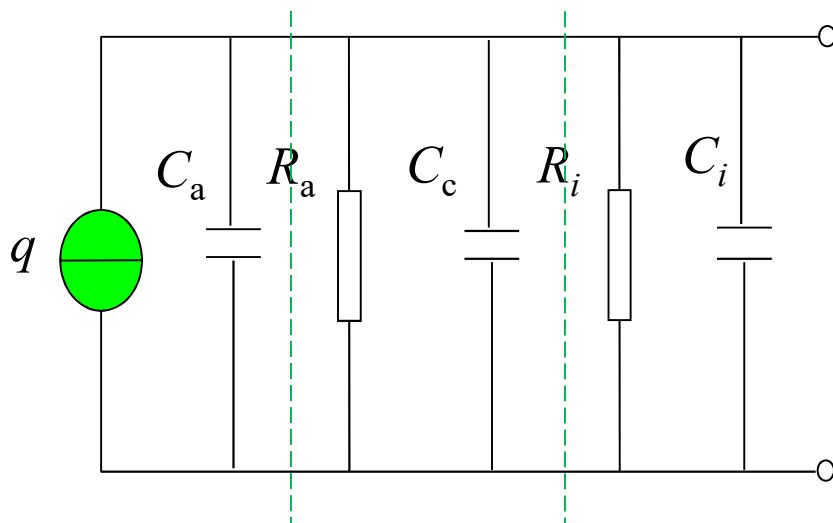
- 压电系数、等效电容量发生变化；
- 缓变温度的影响：热释电效应(压电陶瓷)，影响低频测量
- 瞬变温度的影响：导致传感器中晶体元件受力状态的变化，需补偿。

(爆炸冲击波测量)



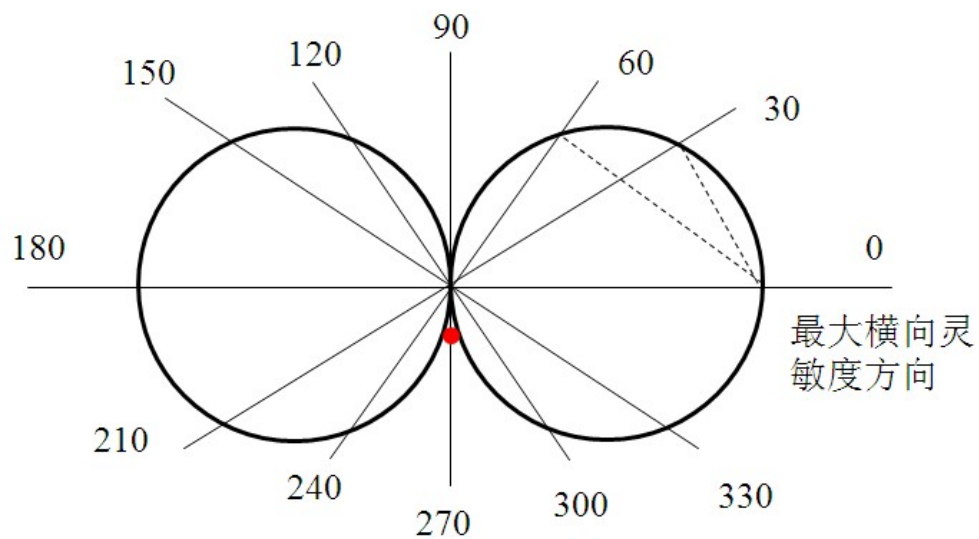
4.3 环境湿度的影响

外界湿度变化将影响压电传感器的绝缘电阻。

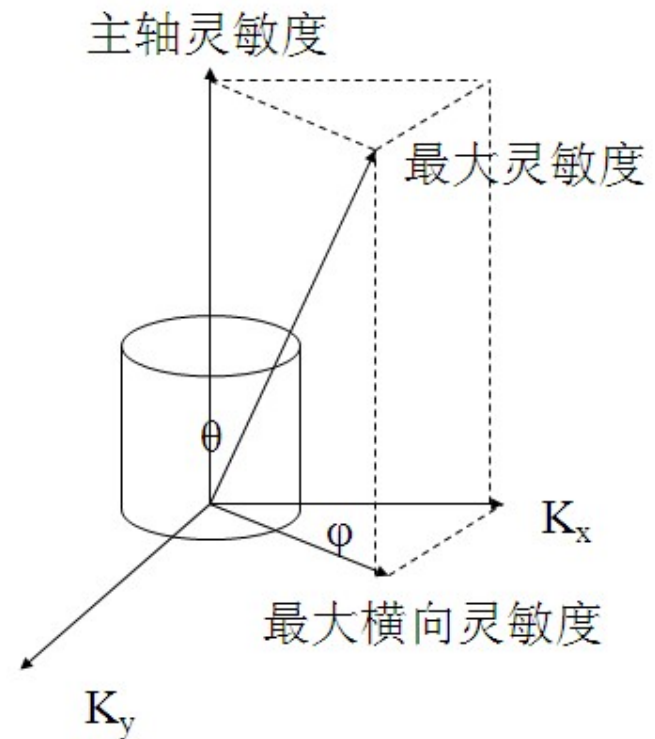


4.4 横向灵敏度

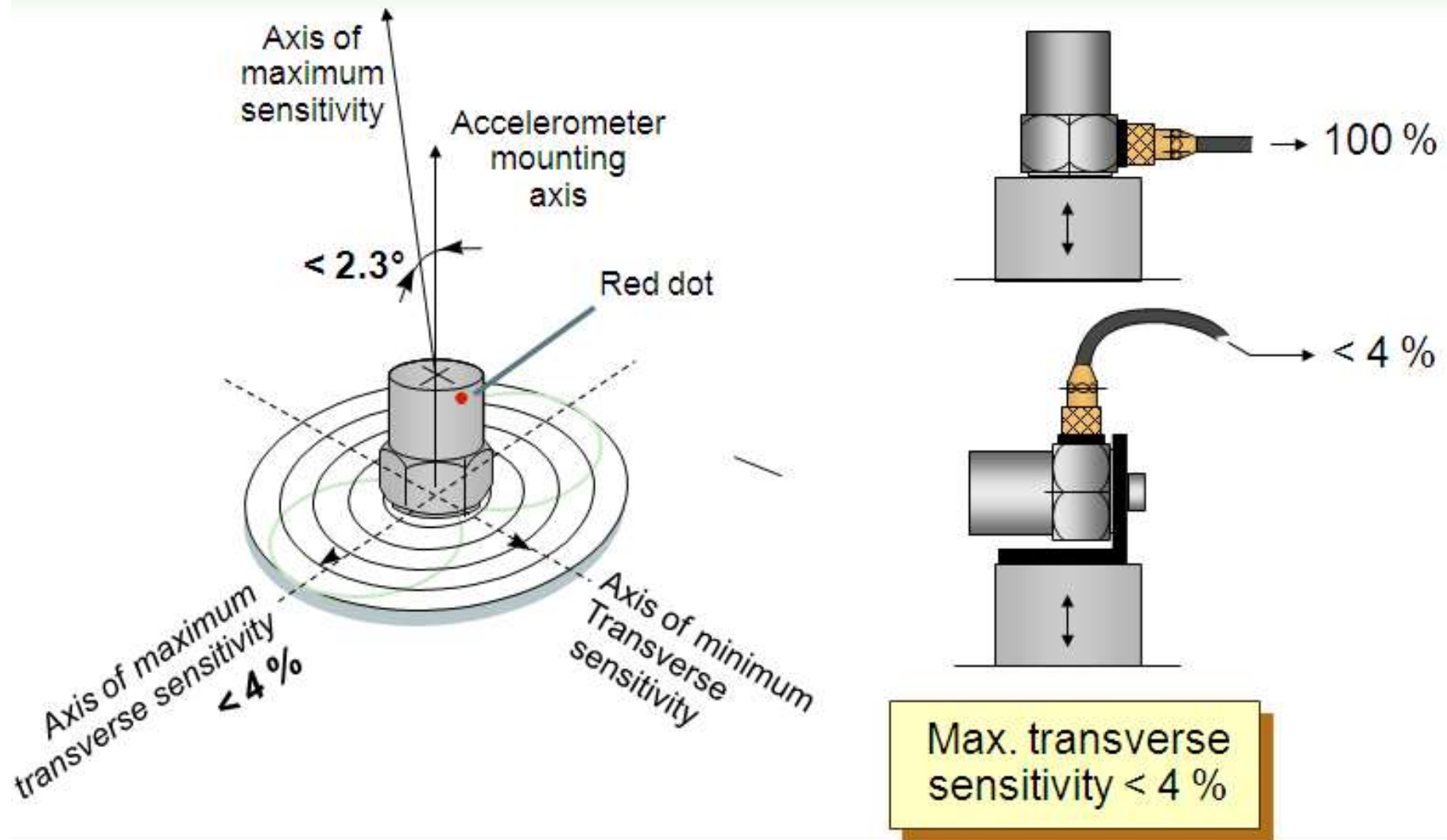
传感器最大灵敏度
方向与主轴不重合。



横向灵敏度与加速度方向的关系图



Transverse Sensitivity



4.5 电缆及器件噪声

问题:

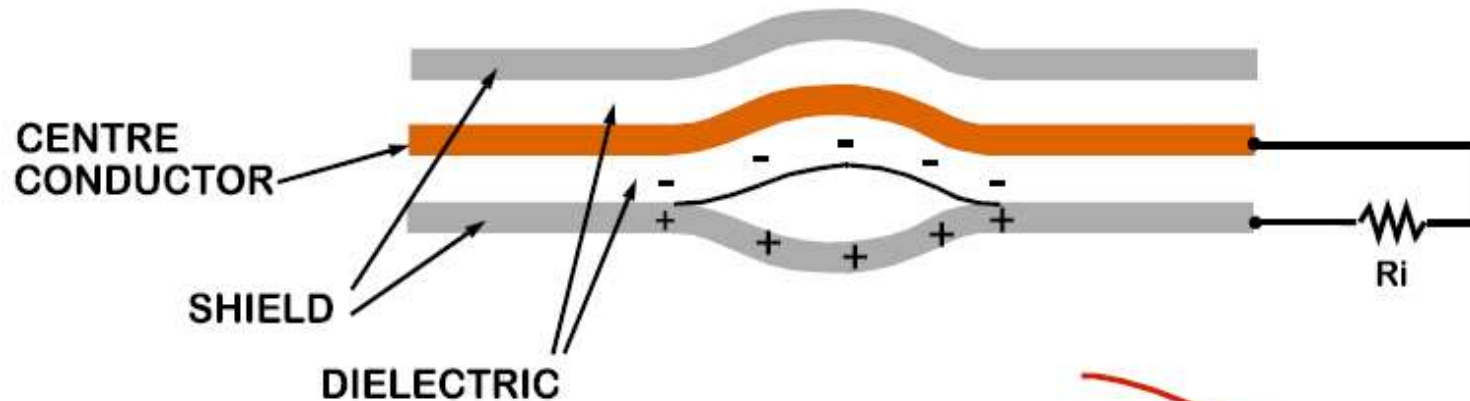
- 压电传感器的内阻很大→任何微小的干扰→产生较大的误差
- 为屏蔽掉外部干扰→采用屏蔽电缆
- 传感器电缆承受机械振动和弯曲变形→屏蔽层与绝缘层分离
- 摩擦生电→分离部分的内表面上将产生电荷
- 感生电荷叠加在压电元件输出的电荷上→形成噪声电荷输出

解决办法1: icp (integrated circuits piezoelectric) 传感器

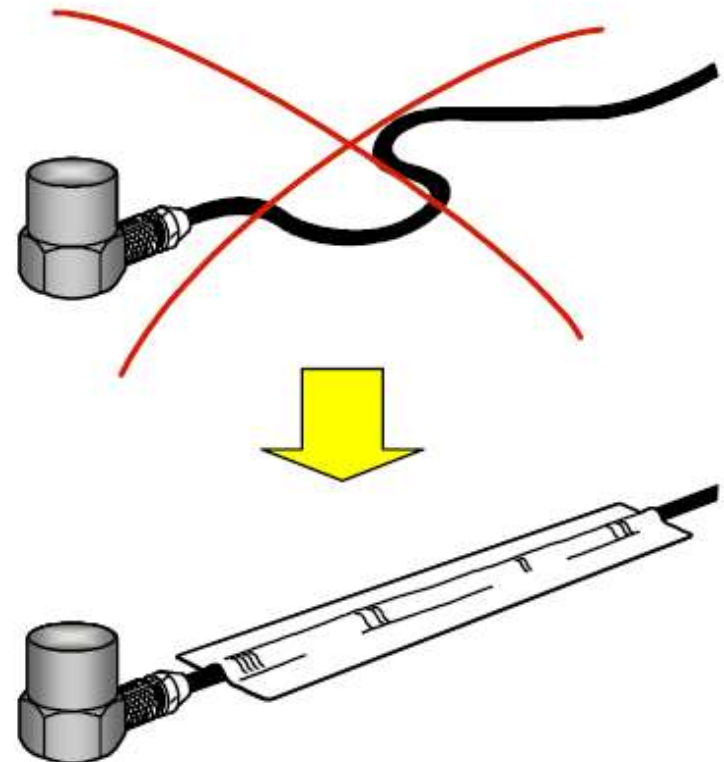
解决办法2:

- 将屏蔽线固定;
- 采用特制低噪声同轴射频电缆。这种电缆的内绝缘层和屏蔽层之间涂有减摩擦材料硅油和导电石墨层, 它可以有效地防止电缆振动和弯曲而产生的摩擦生电效应, 从而减少电缆噪声。

Triboelectric effect



- 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.



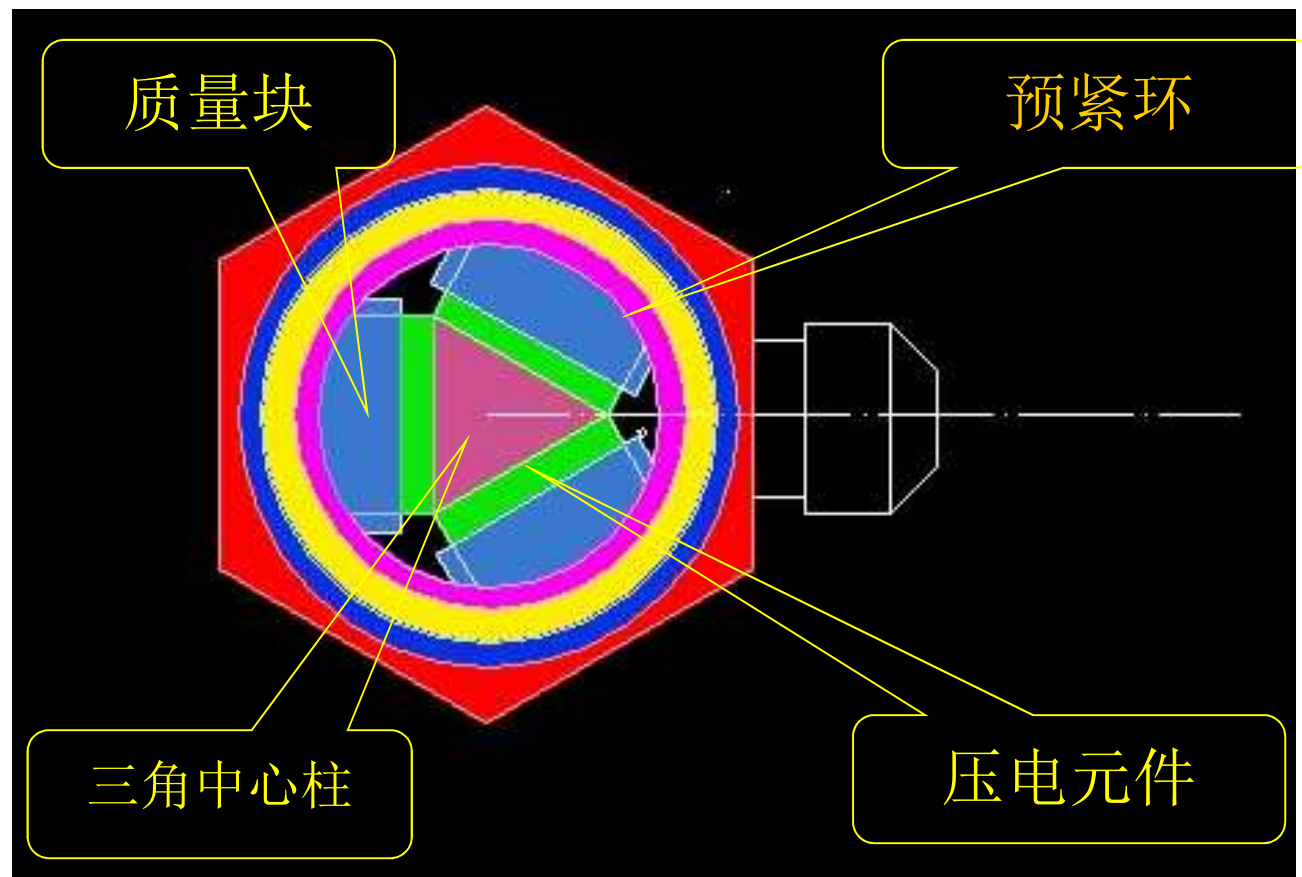
5 压电式传感器的应用

5.1 压电式加速度传感器_结构与工作原理

(1) 压缩型

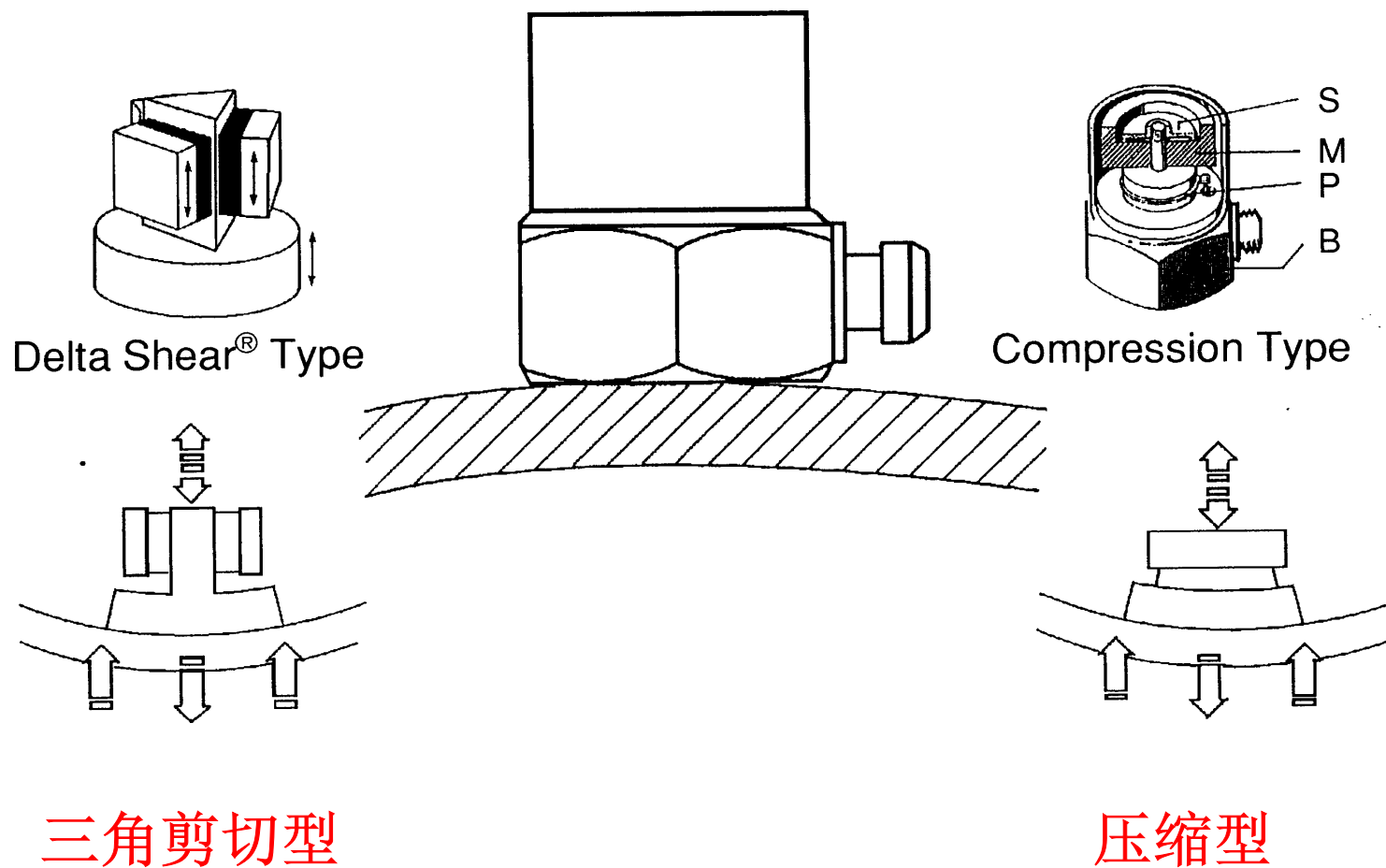
(2) 剪切型

三角剪切型



5.1 压电式加速度传感器_结构与工作原理 (续)

_结构特点与分析



5.2 压电式压力传感器

图5-25是压电式测压传感器的原理简图。它由引线1、壳体2、基座3、压电晶体4、受压膜片5及导电片6组成。

当膜片5受到压力P作用后，在一片压电元件上产生的电荷q为

$$q = d_{11}F = d_{11}SP$$

式中 F ——作用于压电片上的力；

d_{11} ——压电系数；

P ——压强， $P = \frac{F}{S}$ ；

S ——膜片的有效面积。

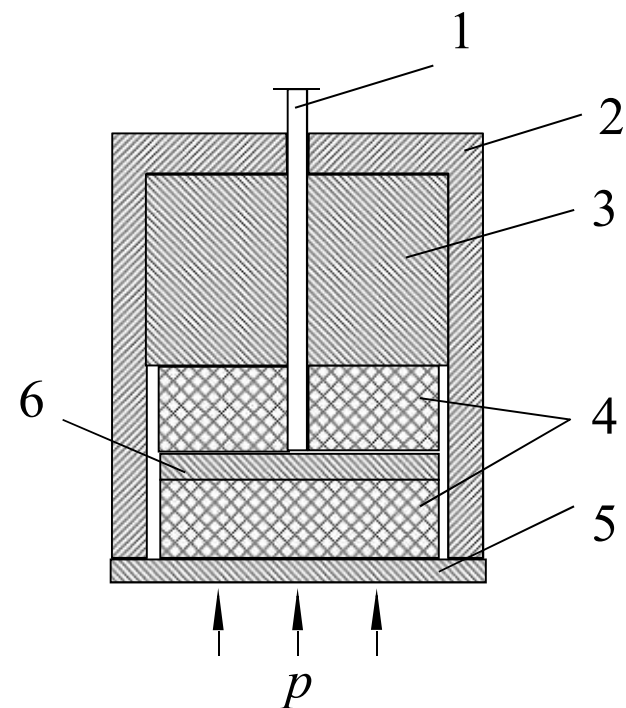
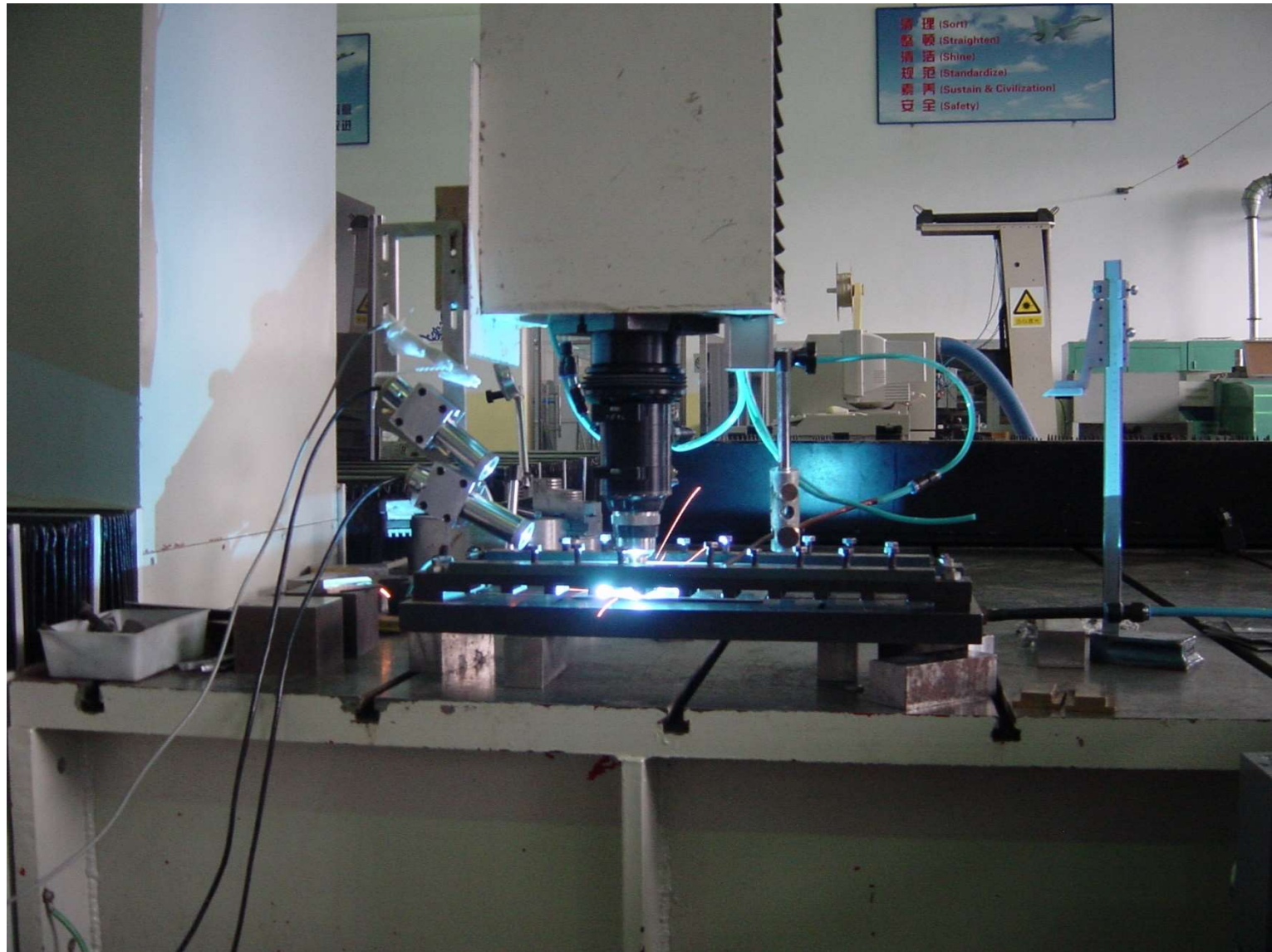


图5-25 压电式测压传感器原理图

5.3 激光焊接质量监测





5.4 玻璃打碎报警装置

玻璃打碎报警装置①

将高分子压电测振薄膜粘贴在玻璃上，可以感受到玻璃破碎时会发出的振动，并将电压信号传送给集中报警系统。

问题：

灵敏度调节问题。

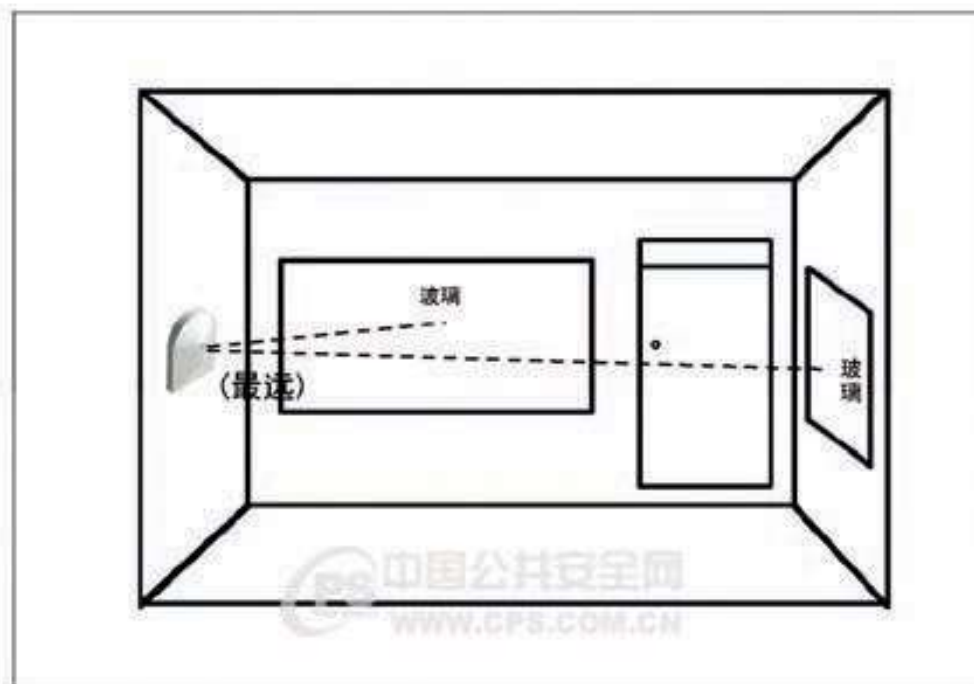


玻璃打碎报警装置（续）

②改进--基于破碎声音测量的玻璃破碎传感器

原理：

- 破碎时发出的响亮刺耳的声音频率：处于大约10 ~ 15kHz的高频段。
- 带通放大器的带宽选在10 ~ 15KHz的范围内，取出玻璃破碎所产生高频声音。
- 优点：对人的脚步声、说话声、雷雨声等具有较强的抑制作用，以降低误报率。
- 另一类是双技术玻璃破碎探测器，其中包括声控-震动型和次声波-玻璃破碎高频声响型。



玻璃打碎报警装置（续）

③次声波—玻璃破碎高频声响双技术玻璃破碎探测器

- 次声波： 频率低于20Hz的声波，属于不可闻声波。

- 发生时刻：

A：玻璃破碎前，会产生一个属于次声波超低频的弹性振动波。当玻璃破碎时，才会发出一高频的声音。

B：入侵者入室时，必打开一个通道。由于室内外环境不同所造成的气压、气流差，会产生超低频的次声波，其频率甚至可低于10Hz以下。

- 当入侵者在打碎玻璃强行人室作案的瞬间，不仅会产生玻璃破碎时的可闻声波和相关物体(如窗框、墙壁等)的振动，还会产生次声波，并在短时间充满室内空间。

5.5 压电踏板

- 根据需要制成薄膜或电缆套管等形状。
- 不易破碎，具有防水性，可以制成较大面积或较长的尺度。



压电式脚踏报警器

5.6 其它

水听器、传声器

作业：

6-1, 6-3（简答）

6-6, 6-7, 6-8

下周二交作业