



电动势式传感器

Electromotive Force Sensors





4 电动势式传感器

4.1 压电式传感器

4.2 CCD图像传感器



4.1 压电式传感器



雷送余音声袅袅，风生细响语喁喁。

——清代诗人苏履吉赞颂鸣沙



4.1 压电式传感器



在黑暗的环境中，将一块干燥的冰糖用榔头敲碎，冰糖在破碎的一瞬间，发出暗淡的蓝色闪光，产生闪光的机理是晶体的**压电效应**。



4.1 压电式传感器

4.1.1 压电效应与压电常数

4.1.2 压电材料

4.1.3 压电传感器的等效电路

4.1.4 压电传感器的信号调理电路

4.1.5 压电传感器的应用



4.1 压电式传感器

1. 压电效应

■ 正压电效应

- 某些电解质，当沿**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产生符号相反的电荷；当外力去除后，又重新恢复为不带电的状态。这种现象就称为**正压电效应**。
- 当**作用力方向改变**时，**电荷极性**随之改变。

（加力 \longrightarrow 变形 \longrightarrow 产生电荷）

- 压电效应是于1880年由Jacques and Pierre Curie 发现的。



1. 压电效应

皮埃尔·居里 (Pierre Curie)

- 出生地：法国巴黎
- 出生日期：1859年5月15日
- 逝世日期：1906年4月19日（马车车祸）
- 最著称的：居里夫人的丈夫



皮埃尔·居里与他的哥哥雅克·保罗·居里于1880年共同发现了压电效应。

1895年皮埃尔·居里和玛丽·斯克罗多夫斯卡结婚后，转而和她一起研究放射性，发现了钋 (Po) 和镭两种元素，在1903年获得诺贝尔物理学奖。



1. 压电效应

玛丽·居里 (Marie Curie)

- 出生地：波兰华沙
- 出生日期：1867年11月7日
- 逝世日期：1934年7月3日（白血病）
- 最著称的：钋和镭的发现者



1903年，居里夫妇和贝克勒尔由于对放射性的研究而共同获得诺贝尔物理学奖，1911年居里夫人又因发现钋和镭而获得诺贝尔化学奖，成为历史上第一个两获诺贝尔奖的人。

居里夫妇的长女伊雷娜因为在人工放射性方面的研究于1935年获得诺贝尔化学奖。



1. 压电效应

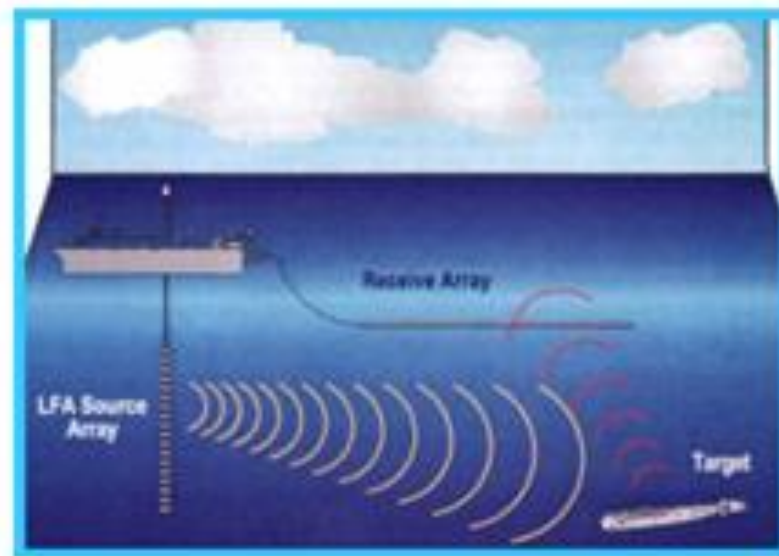
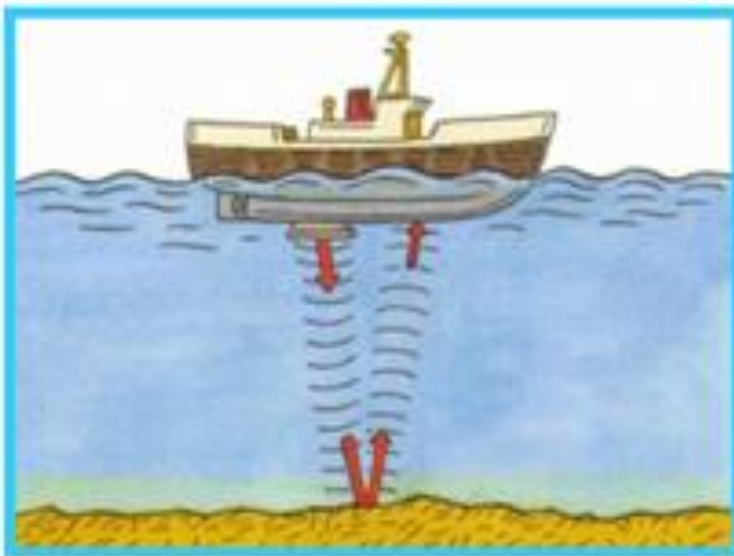
■ 逆压电效应

- 在压电材料的极化方向**施加交变电场**，它们能产生**机械振动**，这种现象称为“电致伸缩效应”，也叫做“逆压电效应”。

(施加电场 \longrightarrow 电介质产生变形 \longrightarrow 应力)

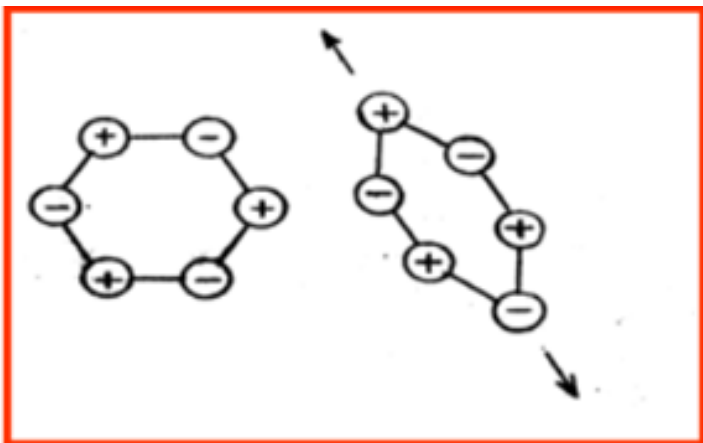


1. 压电效应

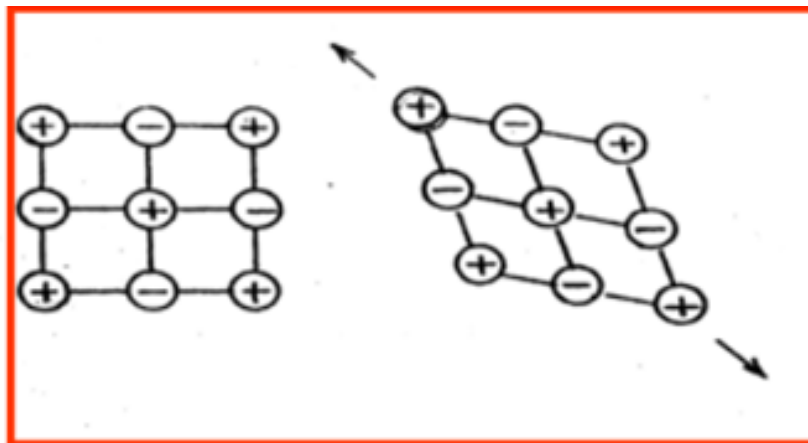


1. 压电效应

■ 压电效应有方向性



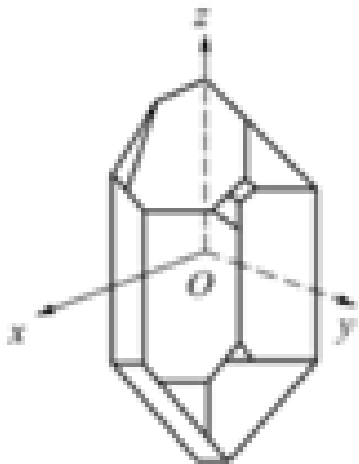
压电晶体：晶体形变时，正负电荷的中心发生分离。



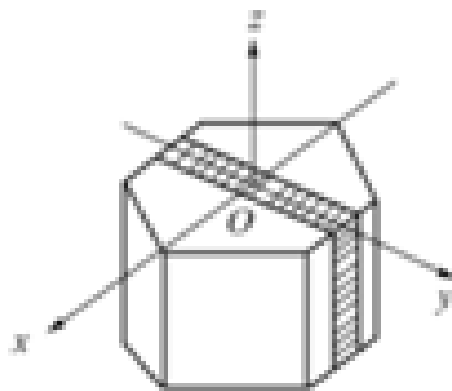
非压电晶体：具有中心对称的结构，晶体正负电荷中心总是重合在一起。

1. 压电效应

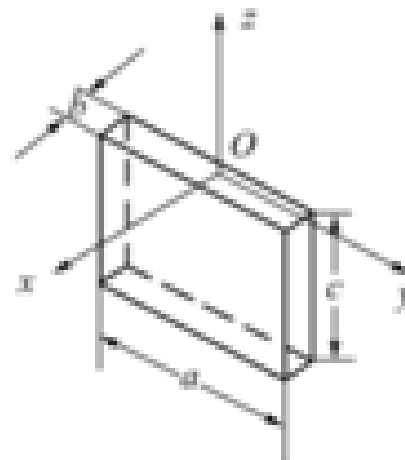
以石英晶体为例



(a) 晶体外形



(b) 切割方向



(c) 晶片

x 轴: 电轴

y 轴: 机械轴

z 轴: 中性轴



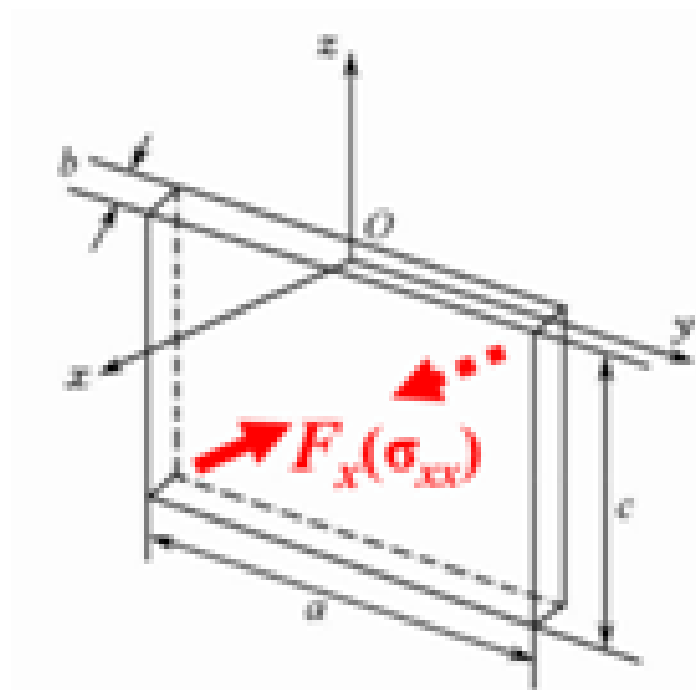
1. 压电效应

➤ 沿x轴方向施加作用力

$$Q_x = d_{11} \cdot F_x$$

$$q_{xx} = \frac{Q_x}{ac} \quad \sigma_{xx} = \frac{F_x}{ac}$$

$$q_{xx} = d_{11} \cdot \sigma_{xx}$$



q_{xx} ——垂直于x轴的表面上产生的电荷密度 (C/m²) ;

σ_{xx} ——沿x轴方向作用的应力 (N/m²) ;

d_{11} ——压电系数 (C/N) 。



1. 压电效应

➤ 沿y轴方向施加作用力

$$Q_x = d_{12} \frac{a}{b} F_y = -d_{11} \frac{a}{b} F_y$$

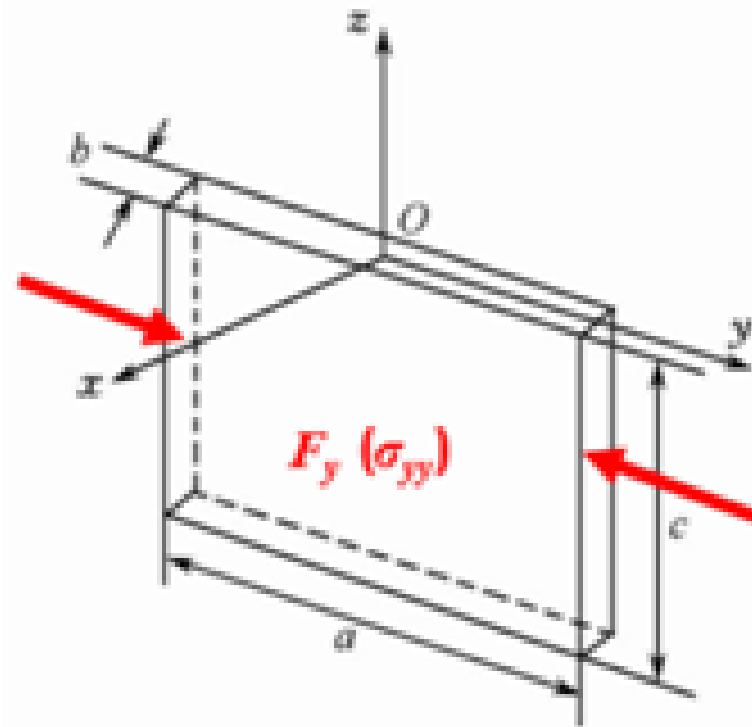
$$q_{xx} = \frac{Q_x}{ac} \quad \sigma_{yy} = \frac{F_y}{bc}$$

$$q_{xx} = d_{12} \cdot \sigma_{yy}$$

q_{xx} ——垂直于x轴的表面上产生的电荷密度 (C/m²) ;

σ_{yy} ——沿y轴方向作用的应力 (N/m²) ;

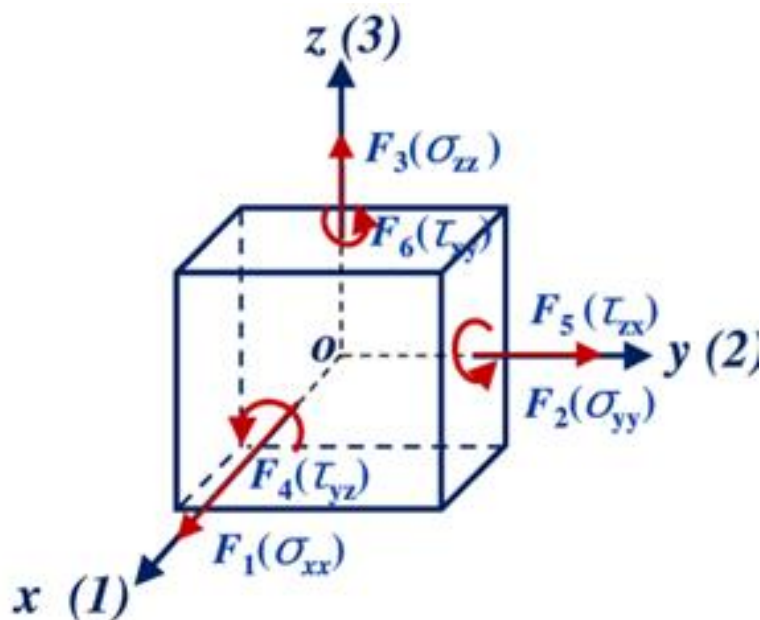
d_{12} ——压电系数 (C/N) 。





2. 压电常数

■ 压电效应的表达式



石英晶体切片的力-电分布

压电元件受到沿一定方向的外力 F 作用时，在相应的表面产生表面电荷 Q ：

$$Q = d_{ij} \cdot F$$

$$q = d_{ij} \cdot \sigma$$

压电常数 (C/N)
(piezoelectric constant)

q ——电荷密度 (C/m²) ；

σ ——应力 (N/m²) ；



1. 压电常数

■ 压电常数 d_{ij} 两个下角注的含义

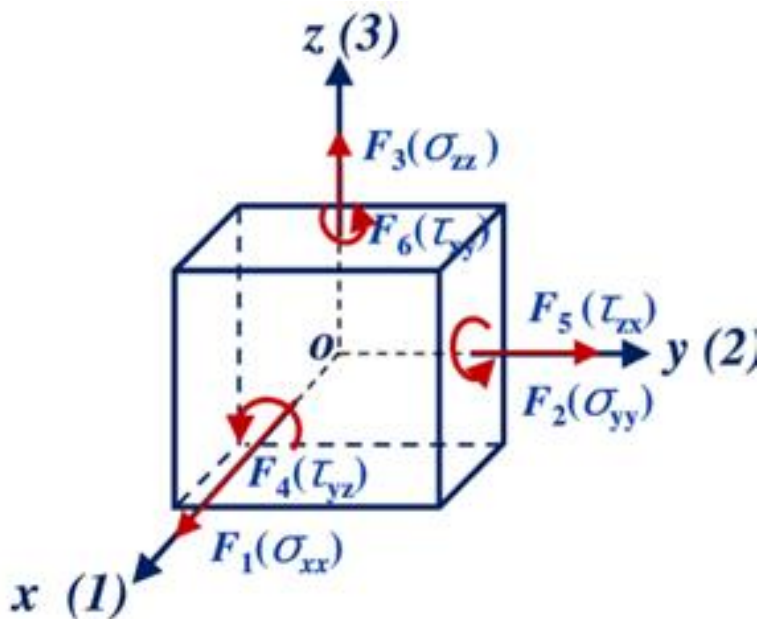
——正压电效应

➤ i -晶体极化方向

$i=1、2、3$ ，分别表示产生电荷的表面垂直于 $x、y、z$ 轴。

➤ j -受力性质

$j=1、2、3、4、5、6$ ，分别表示沿 $x、y、z$ 轴方向作用的单向应力和在垂直于 $x、y、z$ 轴的平面内作用的剪切力。





1. 压电常数

■ 压电常数 d_{ij} 两个下角注的含义

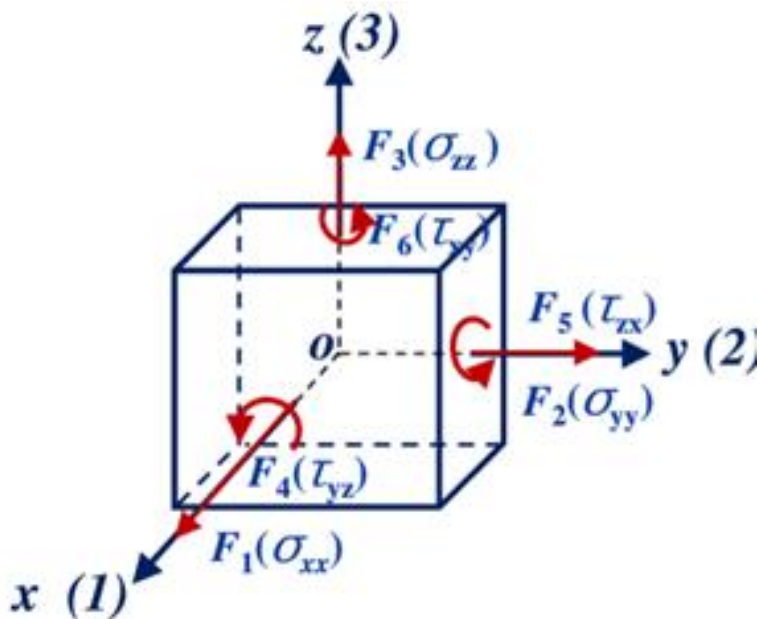
——逆压电效应

➤ i -所加电场的方向

$i=1、2、3$ ，分别表示施加的电场方向沿 $x、y、z$ 轴。

➤ j -产生应变的方向

$j=1、2、3、4、5、6$ ，分别表示沿 $x、y、z$ 轴方向产生的单向应变和垂直于 $x、y、z$ 轴的平面内产生的剪切应变。





1. 压电常数

举例

d_{12}

在沿着Y方向施加力的时候，在X方向产生电场。（正）

在沿着X方向施加电场的时候，在Y方向产生应变。（逆）

d_{25}

在垂直于Y轴的平面施加剪切力的时候，在Y方向产生电场。（正）

在沿着Y方向施加电场的时候，在垂直于Y轴的平面产生剪切应变。（逆）



2. 压电材料

■ 对压电材料的要求

- 1) 转换性能：压电效应强弱、灵敏度
- 2) 机械性能：强度高、刚度大
- 3) 电性能：电阻率高、介电常数大
- 4) 温度和湿度稳定性：居里点
- 5) 时间稳定性



2. 压电材料

■ 石英晶体



化学成分：二氧化硅, SiO_2

晶体结构：六角棱柱体

颜色：透明 (如果没有杂质)



2. 压电材料

■ 石英晶体



乳白色石英



金红石英



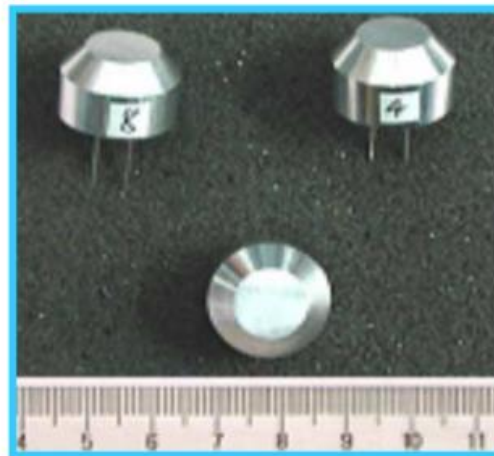
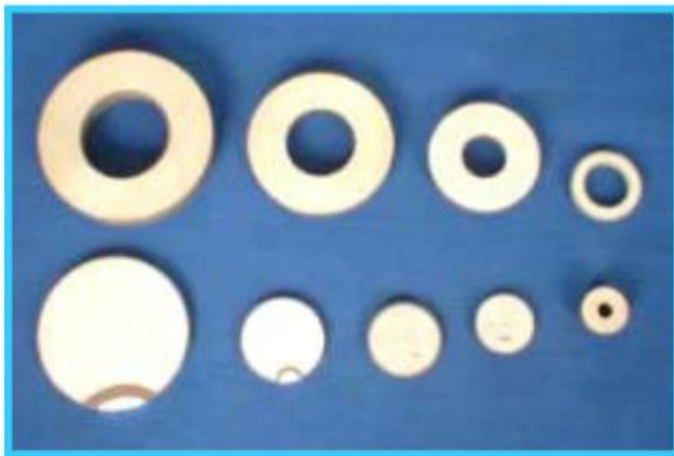
蔷薇石英



2. 压电材料

■ 压电陶瓷

压电陶瓷是人工制造的多晶压电材料，它比石英晶体的**压电灵敏度**高得多，制造**成本也较低**。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）。





2. 压电材料

■ 压电陶瓷

比 较

- **石英晶体**：居里点温度高（高达 573°C ），稳定性好，无热释电现象。但压电常数小，成本高。
- **压电陶瓷**：压电常数大，成本低。但居里点温度低，稳定性不如石英晶体，有**热释电现象**，会给传感器带来热干扰。利用热释电现象特性可以制作热电传感器，如红外探测。



2. 压电材料

■ 新型压电材料

1) 压电半导体材料

如ZnO、CdTe、GaAs，既具有压电特性，又具有半导体特性。

2) 有机高分子材料

- 典型的高分子压电材料有聚偏二氟乙烯（ PVF_2 或PVDF）、聚氟乙烯（PVF）、改性聚氯乙烯（PVC）等。
- 它是一种**柔软**的压电材料，可根据需要制成**薄膜或电缆套管**等形状。
- 它不易破碎，具有防水性，可以大量连续拉制，制成较**大面积或较长的尺度，价格便宜，频率响应范围较宽。**



2. 压电材料

■ 新型压电材料

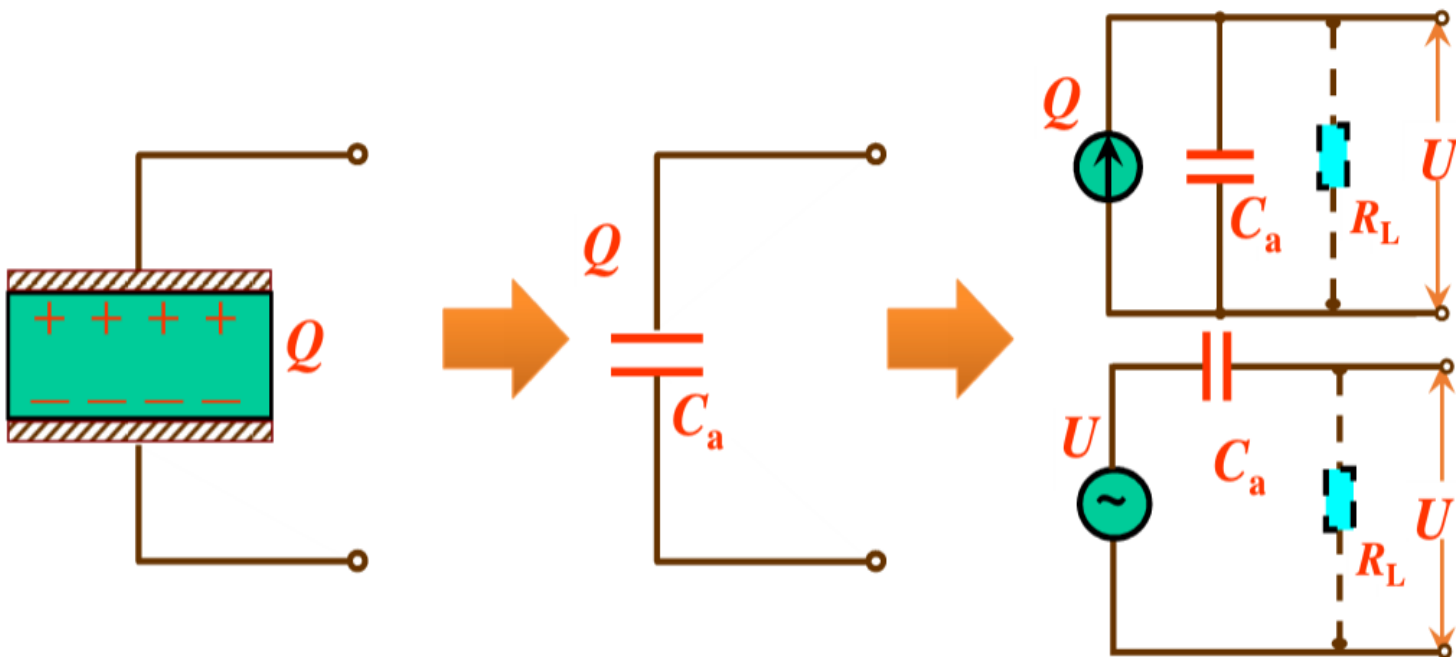
高分子压电薄膜制作的压电喇叭 (逆压电效应)





3. 等效电路

■ 传感器的等效电路



电荷源 Q 与电容 C_a 并联的电荷源等效电路

电压源 $U=Q/C_a$ 和电容 C_a 串联的电压源等效电路



3. 等效电路

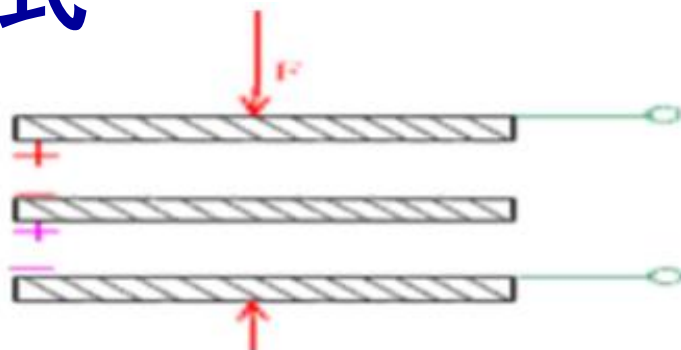
■ 压电元件的联接方式



(a) 并联

$$Q' = 2Q; U' = U; C' = 2C$$

传感器的电容量大、输出电荷量大、时间常数也大，适用于测量缓变信号及电荷量输出信号



(b) 串联

$$Q' = Q; U' = 2U; C' = \frac{1}{2}C$$

传感器本身的电容量小、响应快、输出电压大，适用于测量以电压作输出的信号和频率较高的信号



3. 等效电路

例题

某压电传感器由两片石英晶片并联而成，每片尺寸为 $(50 \times 4 \times 0.3) \text{mm}^3$ ，石英的相对介电常数为4.5，当1MPa的压力沿电轴垂直作用时，求传感器输出的电荷量和极间电压值。（真空中的介电常数 $8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ；压电系数 $d_{11} = 2.31 \times 10^{-12} \text{C/N}$ ）

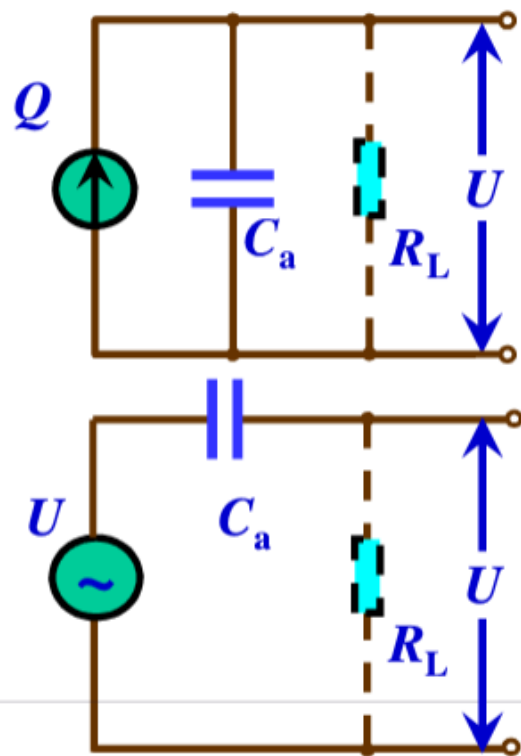
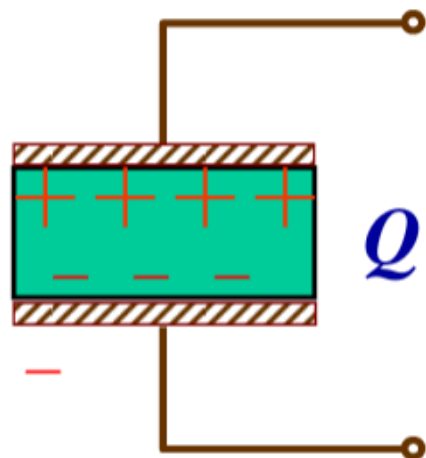
【解】

$$Q = 2d_{11}F_x = 2d_{11}PS = 2 \times 2.31 \times 10^{-12} \times 1 \times 10^6 \times 50 \times 4 \times 10^{-6} = 924 \text{pC}$$

$$C = 2 \times \frac{\epsilon S}{h} = 2 \times \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 4.5 \times 50 \times 4 \times 10^{-6}}{0.3 \times 10^{-3}} = 5.31 \text{pF}$$

$$U = Q/C = 174$$

4. 信号调理电路



放大

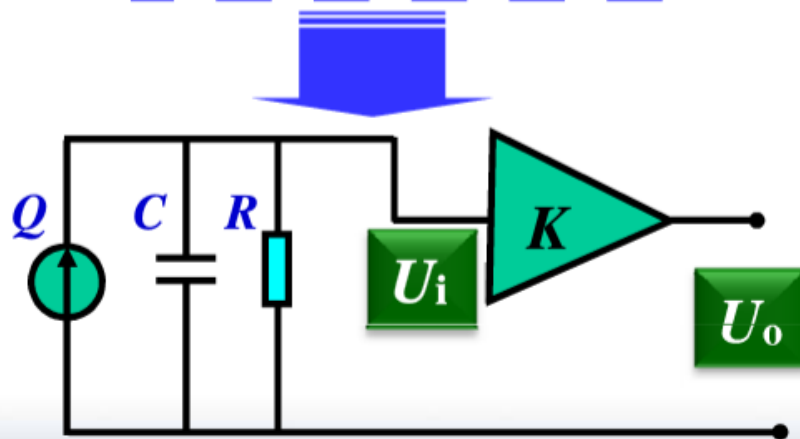
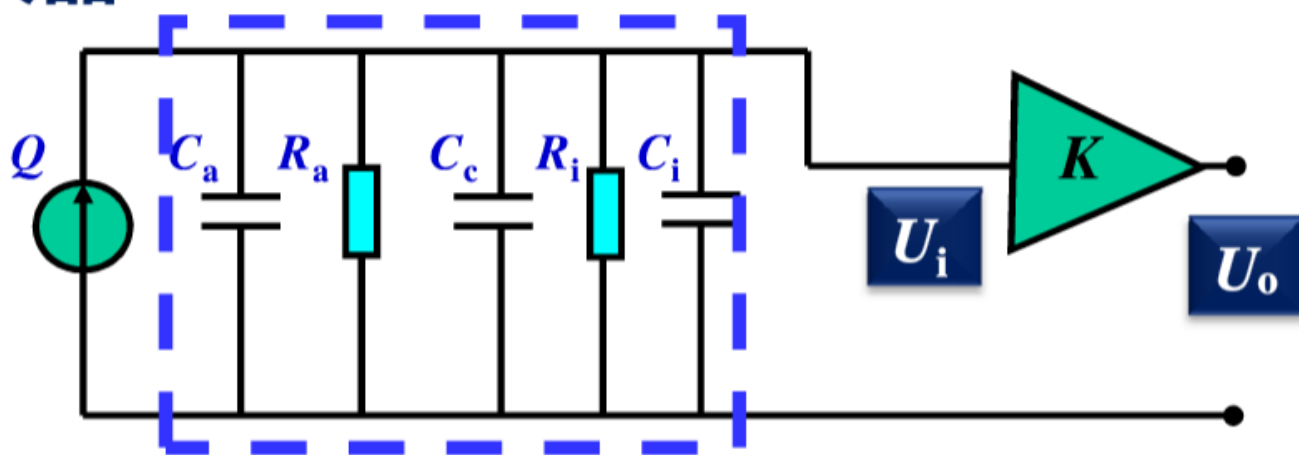
阻抗变换

- 压电式传感器是有源电容器
- 高内阻；弱信号



4. 信号调理电路

电压放大器



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

$$C = C_a + C_c + C_i$$

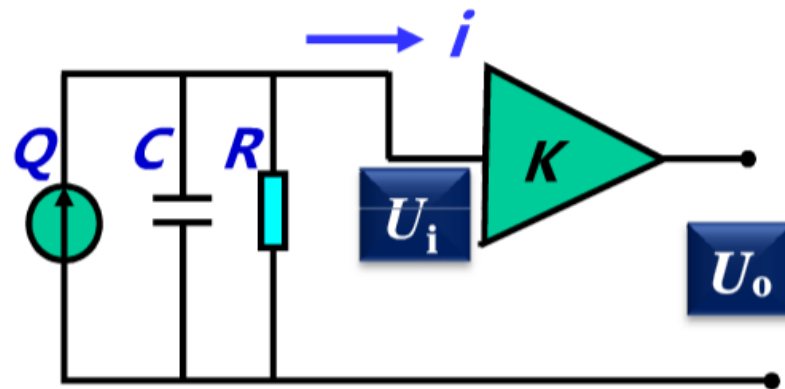


4. 信号调理电路

■ 电压放大器

放大器输入电压 $\dot{U}_i = \dot{I} \frac{R}{1 + j\omega RC}$

压电元件受正弦力作用



$$f = F_m \sin \omega t \rightarrow Q = d_{ij} f = d_{ij} \cdot F_m \sin \omega t \rightarrow i = \frac{dQ}{dt} = \omega d_{ij} \cdot F_m \cos \omega t$$

$$\rightarrow \dot{I} = j\omega d_{ij} \cdot \dot{F}$$

放大器输入电压可写成 $\dot{U} = j\omega d_{ij} \dot{F} \frac{R}{1 + j\omega RC}$

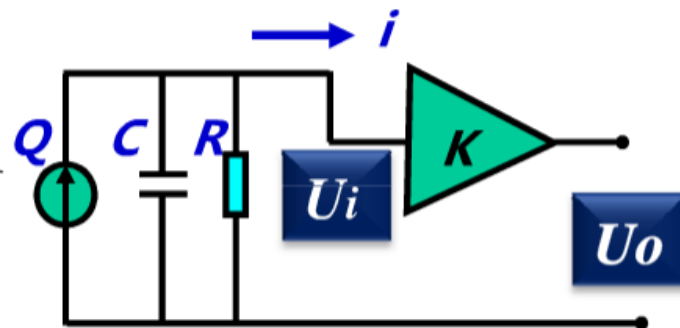
放大器输入电压的幅值 $U_{im} = |\dot{U}_i| = \frac{d_{ij} F_m \omega R}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$



4. 信号调理电路

■ 电压放大器

➤ 电压灵敏度 : $S_v = \frac{|\dot{U}_i|}{F_m} = \frac{d_{ij}\omega R}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} = \frac{d_{ij}\omega R}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}$



其中 : $\tau = RC = \frac{R_a R_i}{R_a + R_i} (C_a + C_c + C_i)$

$$U_{im} = |\dot{U}_i| = \frac{d_{ij} F_m \omega R}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}$$

➤ 分析 :

- 1) $\omega\tau \ll 1$ 时 , $S_v \approx d_{ij}\omega R$, 即 S_v 是随 ω 而变的 ;
- 2) $\omega = 0$ 时 , $S_v = 0$, 即不能测量静态物理量 ;
- 3) $\omega\tau \gg 1$ 时 , $S_v = d_{ij} / C$, S_v 不随 ω 变化 , 即高频特性好。



4. 信号调理电路

■ 电压放大器

➤ 提高 τ 的途径有二：

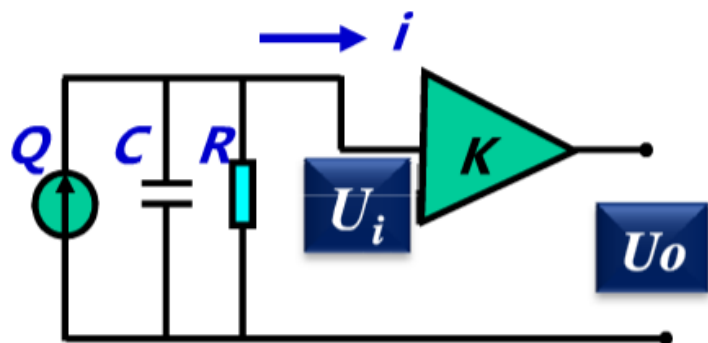
- 1) 增大 C ，**但不可取**，会使 S_V 下降；
- 2) 增大 R

➤ **电压放大器的优点**：电路可做得简单，成本低，工作可靠。

➤ **电压放大器的缺点**： S_V 受 C_c 的影响。

➤ **解决 C_c 影响的办法**：

- 1) 缩短电缆；
- 2) 用下面介绍的电荷放大器电路。



$$U_{im} = |\dot{U}_i| = \frac{d_{ij} F_m \omega R}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$



4. 信号调理电路

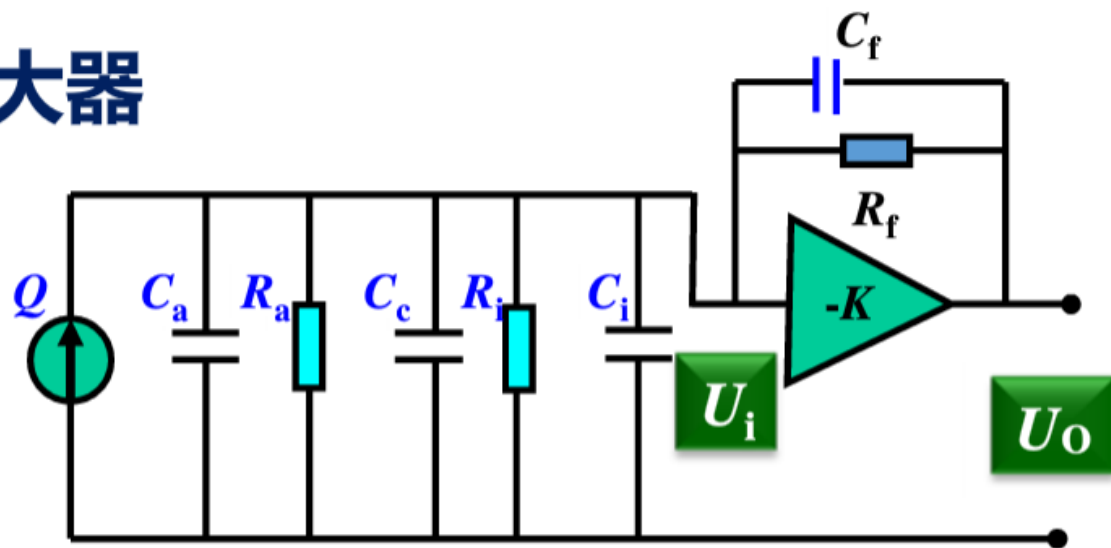
■ 电荷放大器

- 将高内阻的电荷源转换为低内阻的电压源（输入阻抗高达 $10^{10} \sim 10^{12} \Omega$ ，而输出阻抗小于 100Ω ）。
- 输出电压正比于输入电荷。



4. 信号调理电路

■ 电荷放大器



图中， K 是放大器的开环增益； R_f 是阻值相当大反馈电阻，视为开路。
由理想放大器的特性可得：

$$U_0 = -U_{cf} = -\frac{Q}{C_f}$$

传感器的灵敏度与**电缆电容无关**。



4. 信号调理电路

■ 电荷放大器

输出电压与电缆电容无关是有一定条件的。

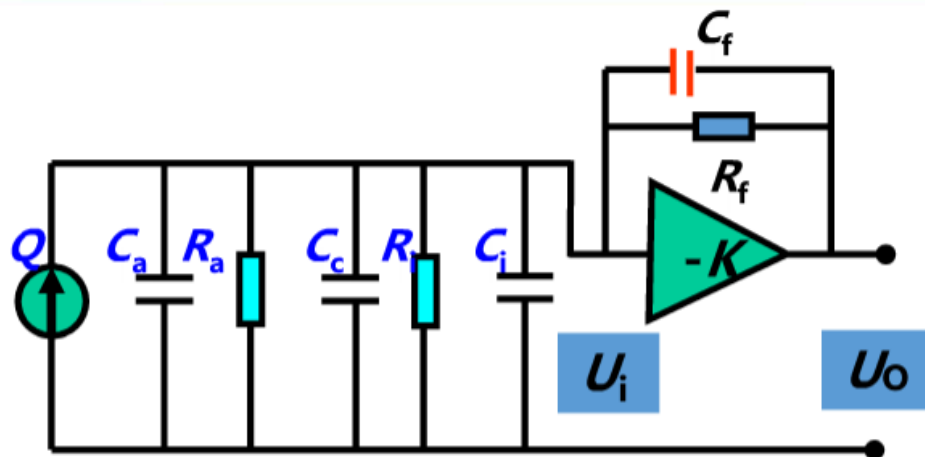
分析： $U_0 = -KU_i$

$$\begin{aligned} C_f \text{ 上的电荷量 } Q_f &= (U_i - U_0)C_f \\ &= [U_i - (-KU_i)]C_f = (1 + K)C_f U_i \end{aligned}$$

$$C_a、C_c、C_i \text{ 上的电荷量之和为 } Q_r = U_i(C_a + C_c + C_i)$$

$$\begin{aligned} \text{总电荷量等于压电元件受力时产生的电荷量 } Q \quad Q_f + Q_r &= Q \\ (1 + K)C_f U_i + U_i(C_a + C_c + C_i) &= Q \end{aligned}$$

$$\text{得： } U_i = \frac{Q}{C_a + C_c + C_i + C_f(1 + K)}$$



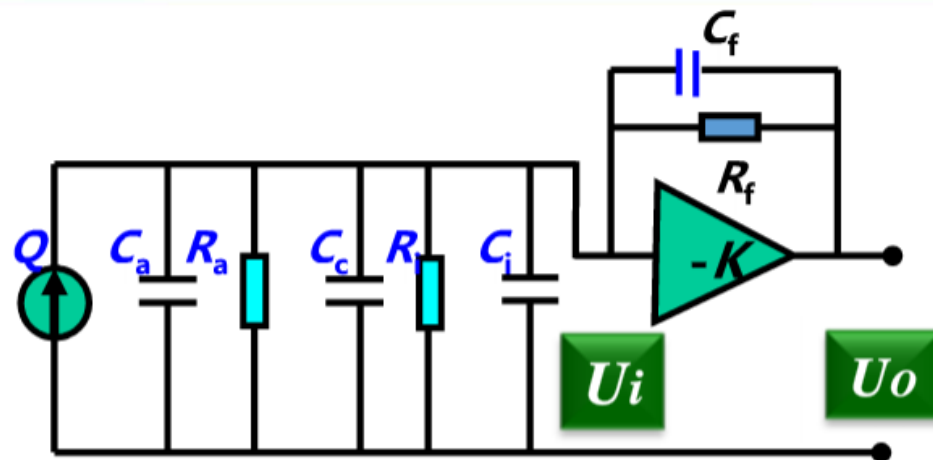
图中反馈电阻 R_f 相当大，视为开路。



4. 信号调理电路

■ 电荷放大器

$$U_i = \frac{Q}{C_a + C_c + C_i + C_f(1+K)}$$



输出 $U_0 = -KU_i = -\frac{KQ}{C_a + C_c + C_i + C_f(1+K)}$

当 $(1+K)C_f \gg C_a + C_c + C_i$ 时 $U_0 = -\frac{Q}{C_f}$

4. 信号调理电路

■ 电荷放大器

电荷放大器能将压电传感器输出的电荷转换为电压（ Q/U 转换器），但并无放大电荷的作用，只是一种习惯叫法。



四通道电荷放大器外形



5. 应用

广义地说，凡是利用压电材料各种物理效应构成的种类繁多的传感器，都可称为压电式传感器。

如：

力 - 电：力、压力、加速度传感器、拾音器、应变仪、声纳、气体点火器、血压计、压电陀螺。

热 - 电：温度计。

光 - 电：热电红外检测器等。

5. 应用

产品

压力变送器



加速度计

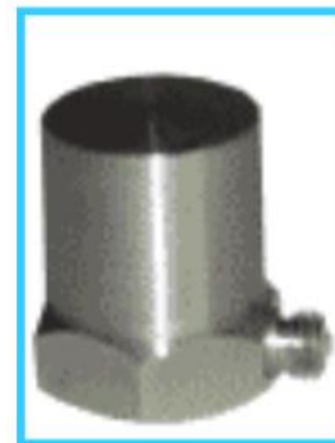
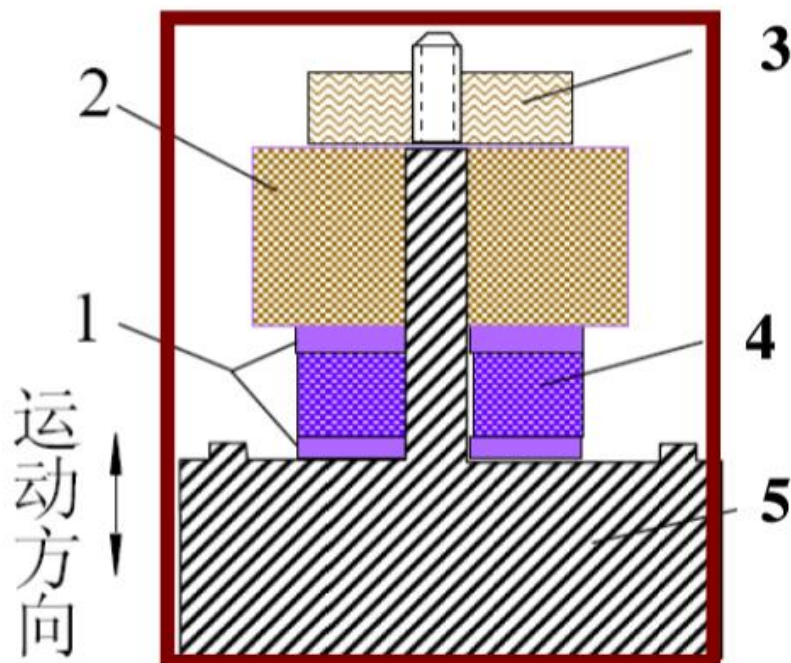


力传感器



5. 应用

■ 压电式加速度传感器



1-电极 ; 2-质量块 ; 3-螺母 ; 4-压电材料 ; 5-基座