

第二篇 常用传感器的原理及应用

第8章 压电式传感器

1. 掌握传感器工作原理——压电效应
2. 掌握**测量电路**
3. 了解传感器的应用



压电式传感器是一种**可逆型换能器**，既可以将机械能转变为电能，又能将电能转变成机械能。其工作原理是利用某些物质的压电效应。

8.1 压电效应及压电材料

某些物质，如石英，受到外力作用时，不仅几何尺寸会发生变化，而且内部会被极化，表面产生电荷；当外力去掉时，又重新回到原来的状态，这种现象称为**压电效应**。



与压电效应相反，如果将具有压电效应的物质置于电场中，其几何尺寸也发生变化，这种由于外电场作用导致物体机械变形现象称为**逆压电效应**。

常见的压电材料分为三类：

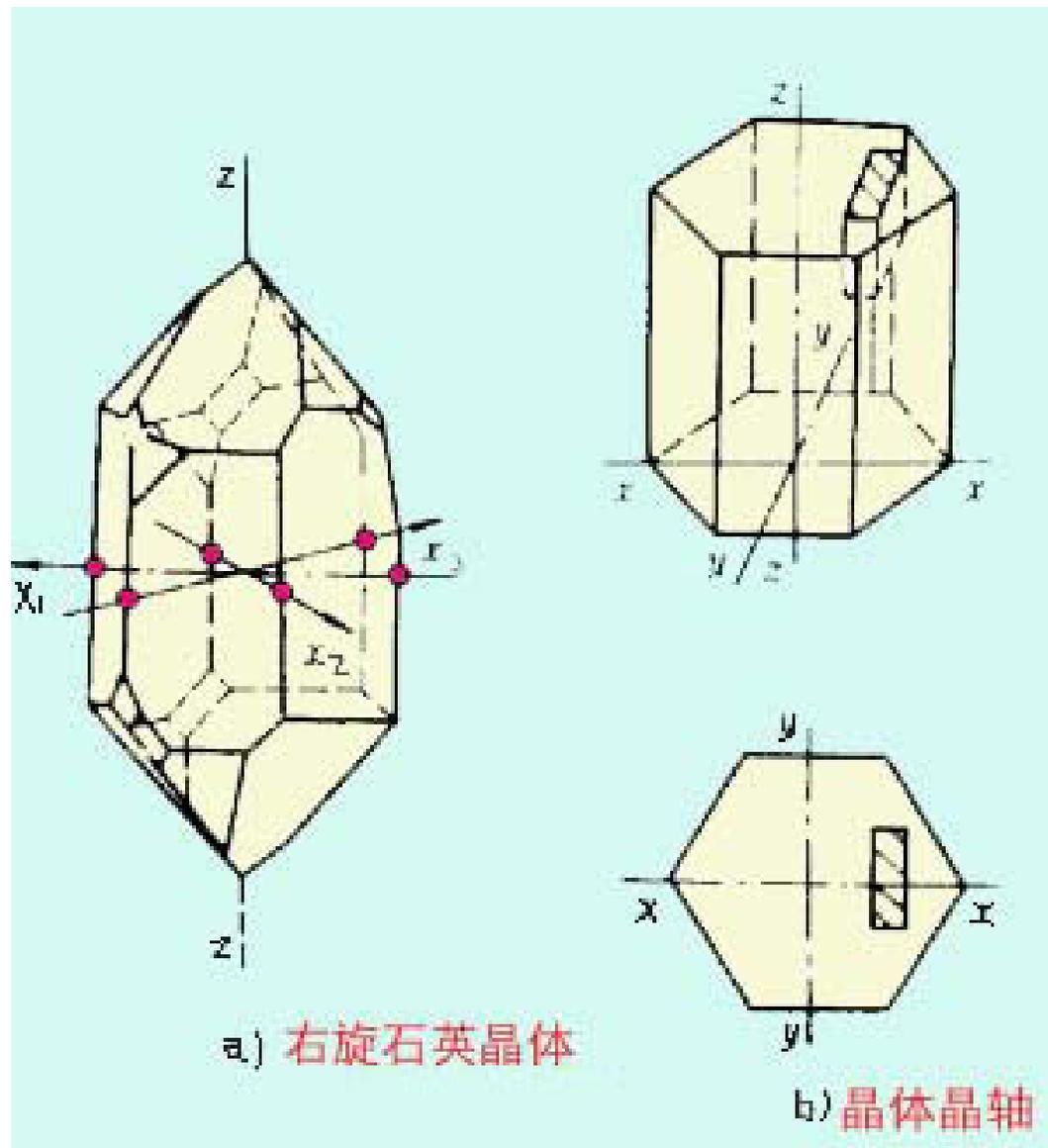
- 1) 单晶压电晶体(如石英、酒石酸钾钠等)
- 2) 多晶压电陶瓷(如钛酸钡、锆钛酸铅、铌镁酸铅等)
- 3) 高分子材料(聚偏二氟乙烯(PVDF))。



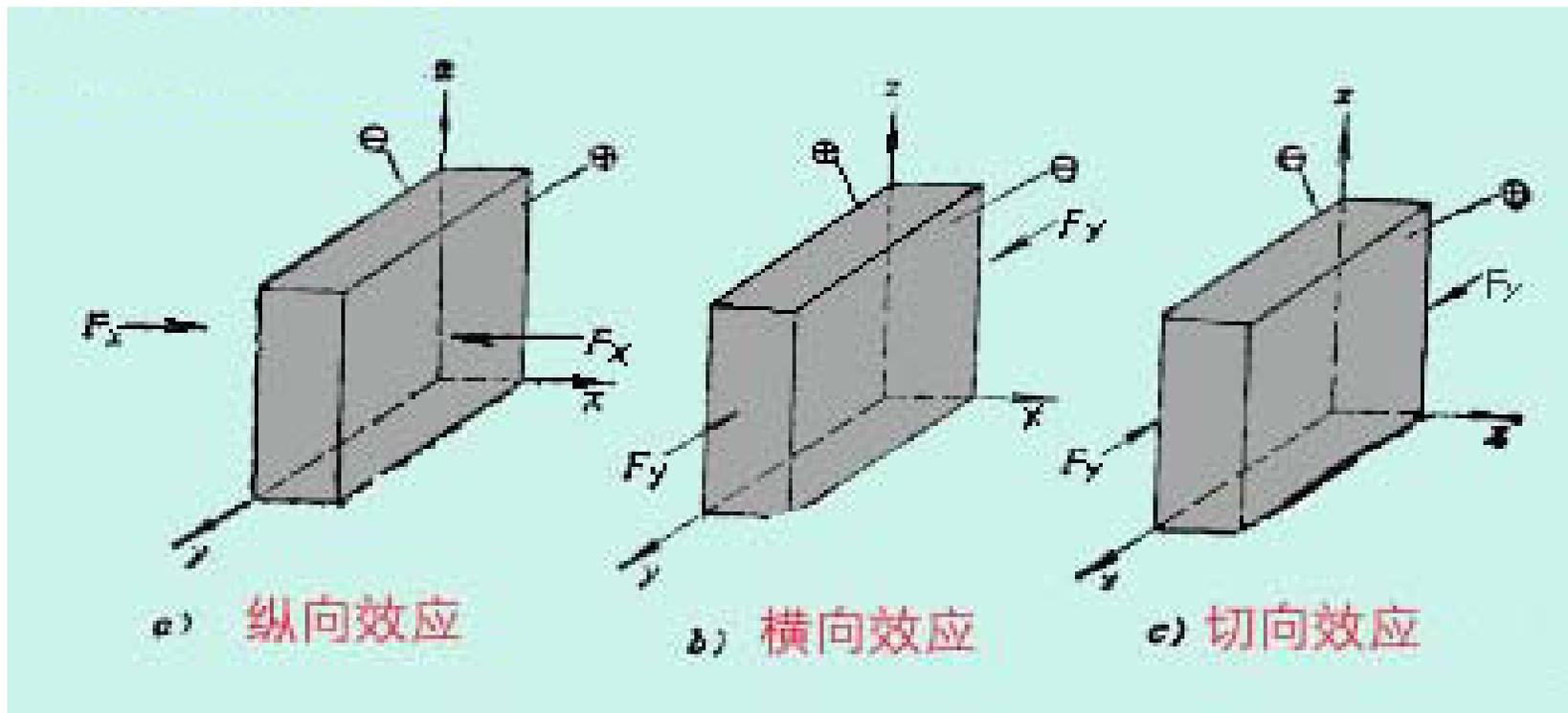
➤ 石英晶体的压电效应

理想形状：六棱柱，
两端为对称的棱锥，
共**30个晶面**。

纵轴 $z-z$ 称作**光轴**，
通过六棱柱棱线而
垂直于光轴的轴线
 $x-x$ 称作**电轴**，垂直
于棱面的轴线 $y-y$ 称
作**机械轴**——右螺
旋法则。



通常从晶体上沿三轴线切下一个平行六面体切片，即其晶面分别平行 z - z 、 y - y 、 x - x 轴线。切片在受到沿不同方向的作用力时，会产生不同的极化作用，主要的压电效应有**纵向效应**、**横向效应**和**切向效应**三种。



纵向压电效应：沿电轴（ x 轴）施加作用力，电荷出现在与 x 轴相垂直的表面上。产生的电荷量为：

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

其中， d_{11} ：纵向压电常数； F_x ：作用力。

横向压电效应：沿机械轴（ y 轴）施加作用力，电荷仍出现在与 x 轴相垂直的表面上。产生的电荷量为：

$$q_y = d_{12} \cdot F_y \cdot \frac{s_x}{s_y} = d_{12} \cdot F_y \cdot \frac{b}{a}$$

其中， d_{12} ：横向压电常数； F_y ：作用力
 s_x 、 s_y ：分别为与 x 轴、 y 轴相垂直的应变
 a ： x 轴方向厚度； b ： y 轴方向厚度

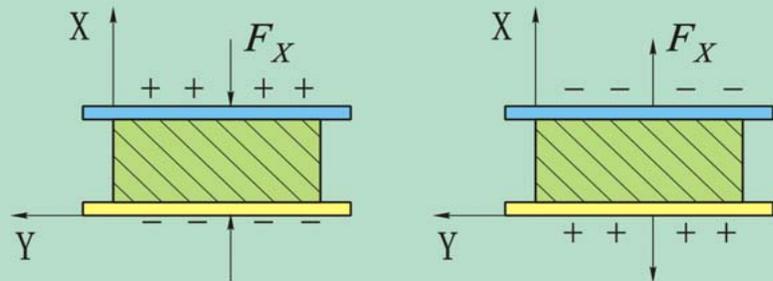
由于力所施加的表面与感生电荷的表面不同，电荷量与晶体尺寸有关。



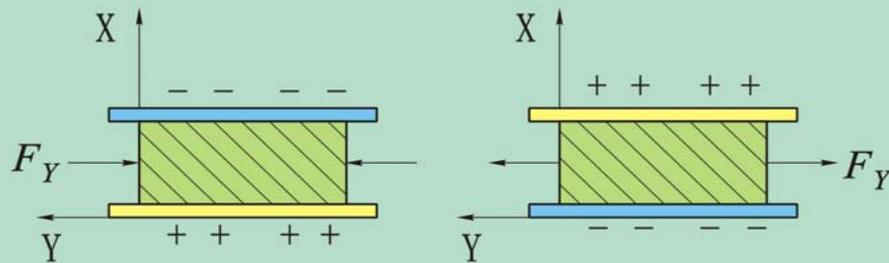
根据石英晶体轴对称的条件，

$d_{12} = -d_{11}$ ，从而：

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



纵向压电效应



横向压电效应

8-1-2

即横向压电效应产生的电荷与纵向压电效应产生的电荷极性相反。

切向压电效应：沿相对两棱加力(x 轴或 y 轴施加剪切力)，晶体表面产生电荷的现象。

沿 x 轴的剪切力产生的电荷出现在与 y 轴垂直的表面上（电荷量与剪切力成正比，与晶片尺寸无关）；

沿 y 轴的剪切力产生的电荷出现在与 x 轴垂直的表面上（电荷量与剪切力成正比，与晶片尺寸无关）。

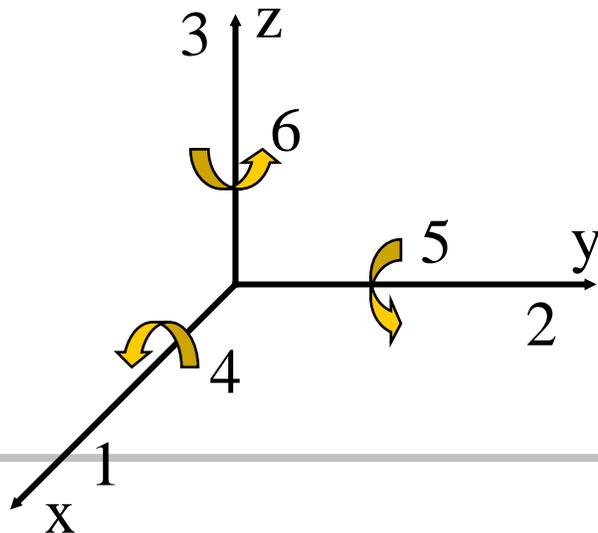
压电式传感器主要是利用**纵向压电效应**。



压电常数 d_{ij} 有两个下标:

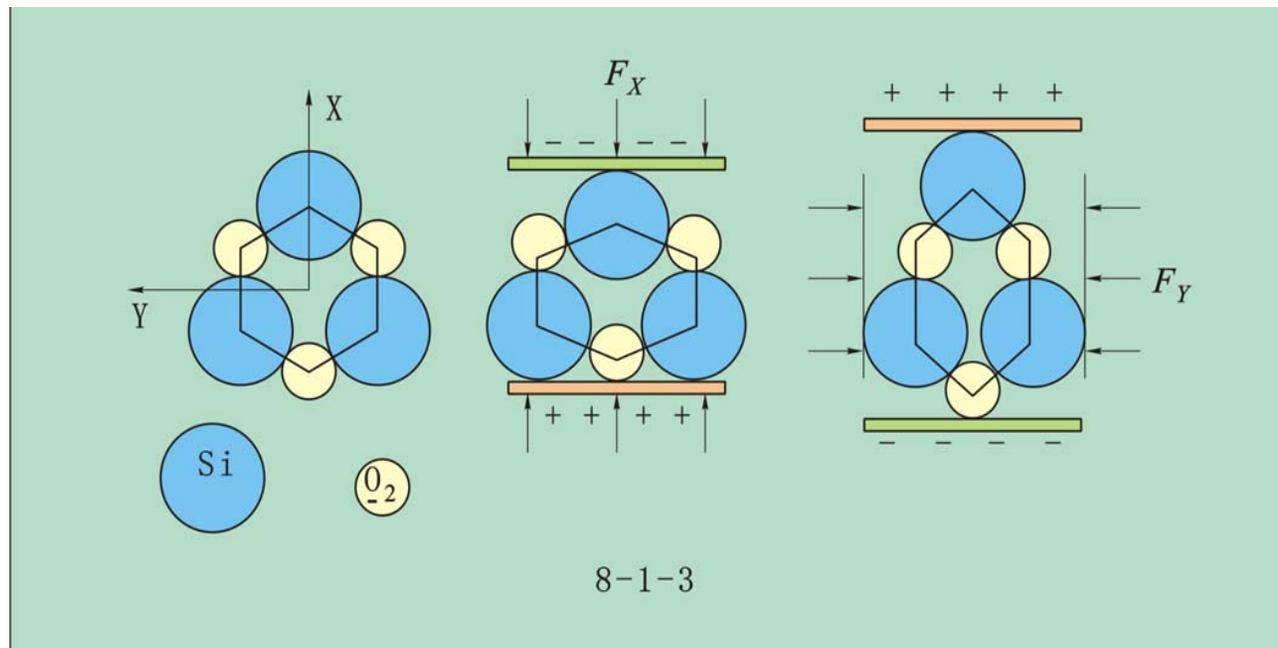
i ($i=1, 2, 3$) ——表示在 i 面上产生电荷, $i=1, 2, 3$ 分别表示在垂直于 x, y, z 轴的晶面, 即 x, y, z 面上产生电荷。

j ($j=1, 2, 3, 4, 5, 6$) ——其中 $j=1, 2, 3$ 分别表示晶体沿 x, y, z 轴方向承受单向力; $j=4, 5, 6$ 分别表示晶体在 yz 平面, zx 平面和 xy 平面上承受剪切力。



➤ 石英晶体产生压电效应的物理过程

每个晶体单元中，具有3个硅离子和6个氧离子，氧离子是成对的，构成六边的形状。在没有外力的作用时，电荷互相平衡，外部没有带电现象。



纵向压电效应

横向压电效应

➤ 压电材料

1) 压电单晶

□ 石英 (SiO_2)

天然或人工合成。具有良好的机械强度和压电效应。压电系数较小 ($d_{11} = 2.3 \times 10^{-12} \text{C/N}$)，但压电系数的时间和温度稳定性好。在 $20 \sim 200^\circ\text{C}$ 内，温度每升高 1°C ，压电系数仅减小 0.016% ，升高到 200°C 时，仅减小 5% ，达到 573°C 时，失去压电特性，此温度称为石英的**居里点**。介电常数为 4.5 。



□ 铌酸锂 (LiNbO_3)

居里点 1210°C ，具有良好的压电性，适用于高温环境，但比石英脆，抗冲击性差。

□ 钽酸锂 (LiTaO_3)

居里点 666°C ，压电常数为石英的3倍。

□ 酒石酸钾钠 ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)

压电系数较大 ($d_{11}=3 \times 10^{-9} \text{ C/N}$)，但机械强度低，机械强度、电阻率、居里点均较低，易受潮，性能不稳定。



2) 多晶压电陶瓷

由多种材料经烧结合成，制作方便，成本低。原始压电陶瓷须经**强电场极化处理**后才具有压电性。压电陶瓷的压电常数一般比石英高数百倍。**现代压电元件，大多采用压电陶瓷。**

□ 钛酸钡 ($B_aT_iO_3$)

碳酸钡 B_aCO_3 和二氧化钛 T_iO_2 按1 : 1混合烧结而成。压电常数约为石英的50倍，介电常数高(1200)，居里点约 $120^{\circ}C$ 。



□ 锆钛酸铅（PZT）系列压电陶瓷

居里点 300°C 左右，压电常数 $70\sim 800\times 10^{-12}\text{C/N}$ ，性能和稳定性均超过钛酸钡。其中有些产品可耐高温、高压。

3) 高分子有机压电材料

聚二氟乙烯（ PVF_2 ）、聚氟乙烯（PVF）、聚氯乙烯（PVC）、聚偏二氟乙烯（PVDF）等。

易于大量生产、面积大、柔软不易破碎，可制成阵列器件。用于微压和机器人触觉。

4) 压电半导体

具有压电和半导体两种特性，易于集成。



8.2 测量电路

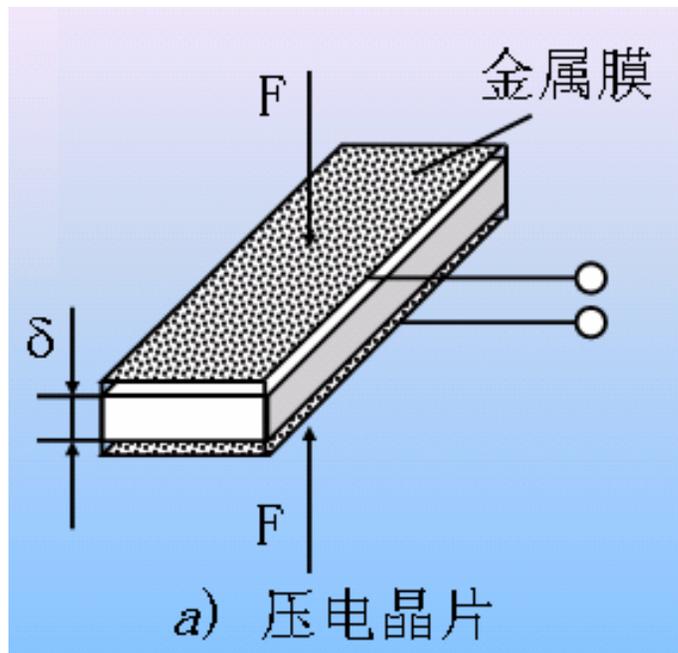
➤ 压电式传感器及其等效电路

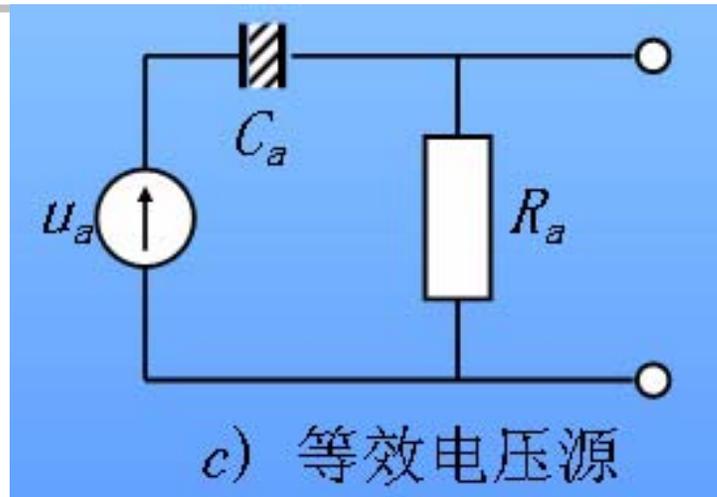
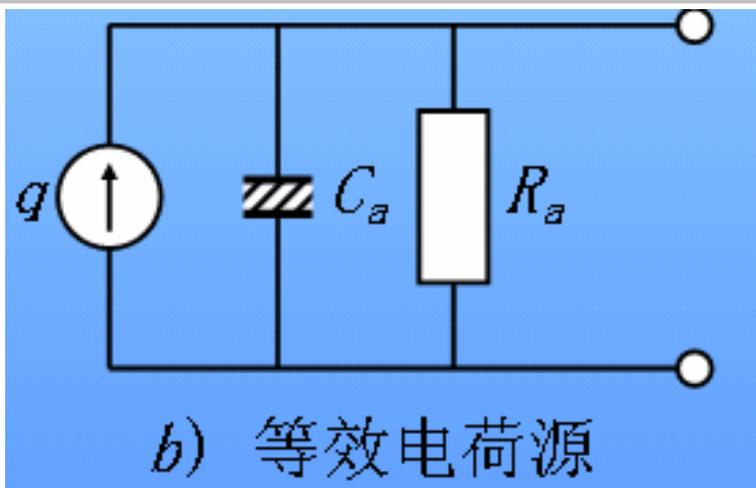
压电器件相当于具有一定电容的电荷源，其电容：

$$C_a = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{\delta}$$

电容两极板间开路电压为：

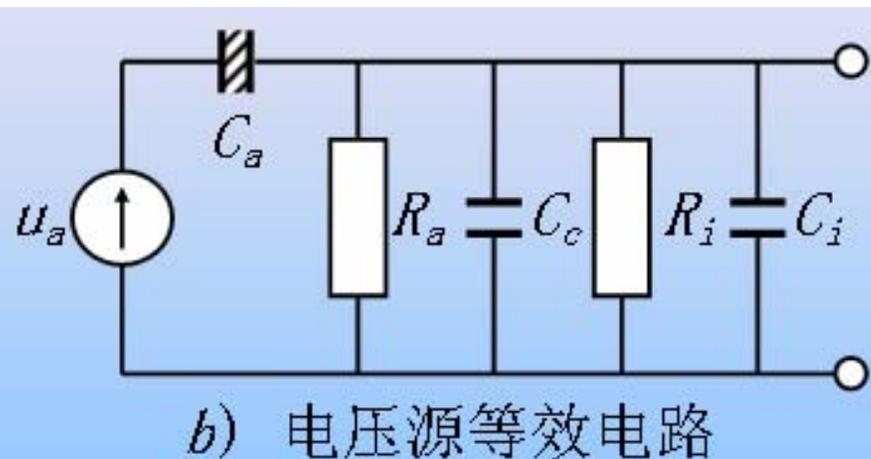
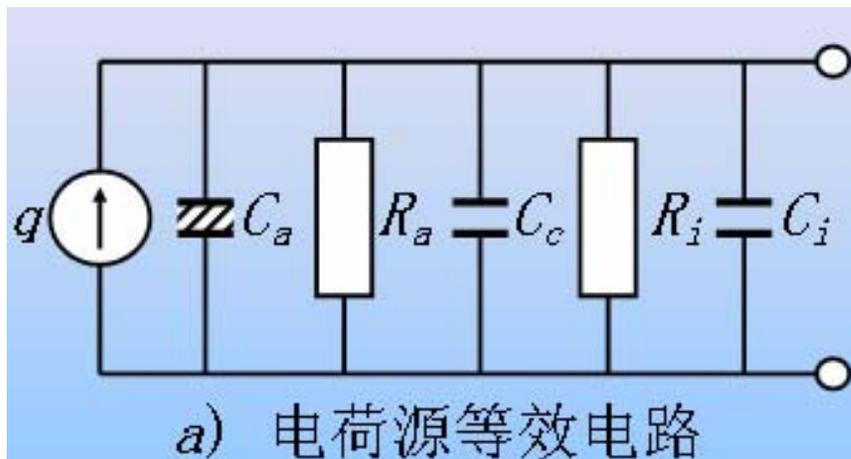
$$u_a = \frac{q}{C_a}$$





压电式传感器的等效电路

若考虑负载（测量电路），等效电路如下：



假设一恒定力 F 作用于压电器件，产生电量 q ，则输出电压：

$$u_a = \frac{q}{C} = \frac{q}{C_a + C_c + C_i}$$

✓ 压电传感器本身产生的电荷量很小，且传感器本身的内阻很大（压电元件漏电阻 R_a 一般在 $10^{13} \sim 10^{14} \Omega$ 以上），因此**输出信号很微弱**，给后续测量电路提出很高的要求。

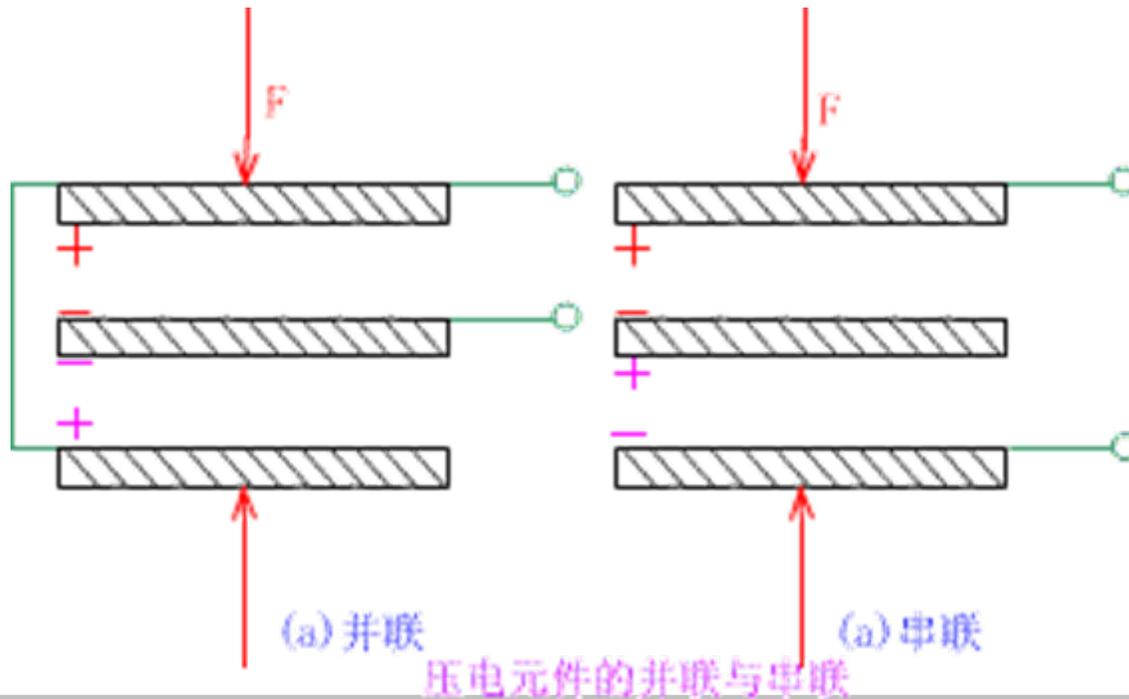
✓ 由于传感器的内阻及后续测量电路输入电阻 R_i 非无限大，电路将按指数规律放电，造成**测量误差**。电路放电时间常数 $\tau = (R_a // R_i) \cdot C \approx R_i \cdot C$ （一般 $R_a \gg R_i$ ），

为了减小误差， R_i 越大越好。



✓显然，电荷泄漏使得利用压电传感器测量静态或准静态量非常困难。通常压电传感器适宜作**动态测量**。

实际应用中为了增大输出值，压电传感器往往用两个或两个以上的晶体串联或并联：



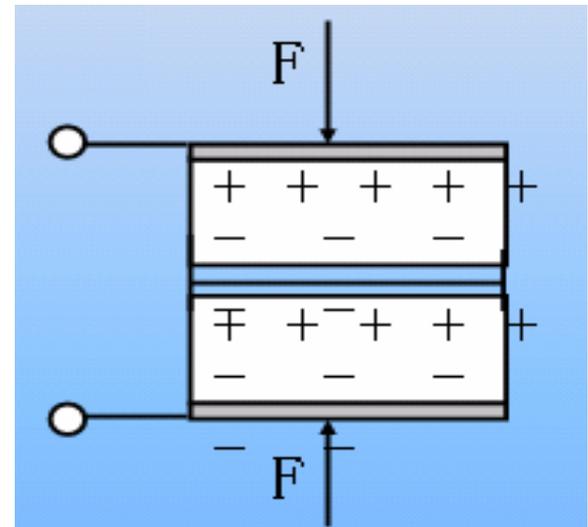
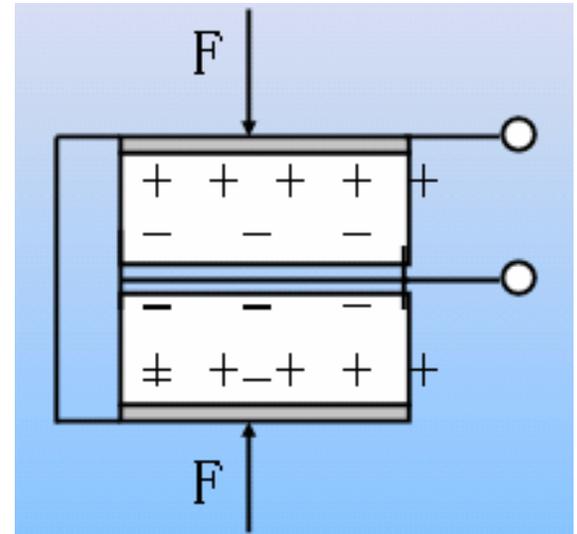
压电元件的并联与串联

并联时，输出电荷量大、电容大、时间常数大；

适宜测量缓变信号和以电荷输出的场合。

串联时，输出电压大、电容小、时间常数小。

适宜测量高频信号和以电压输出的场合。



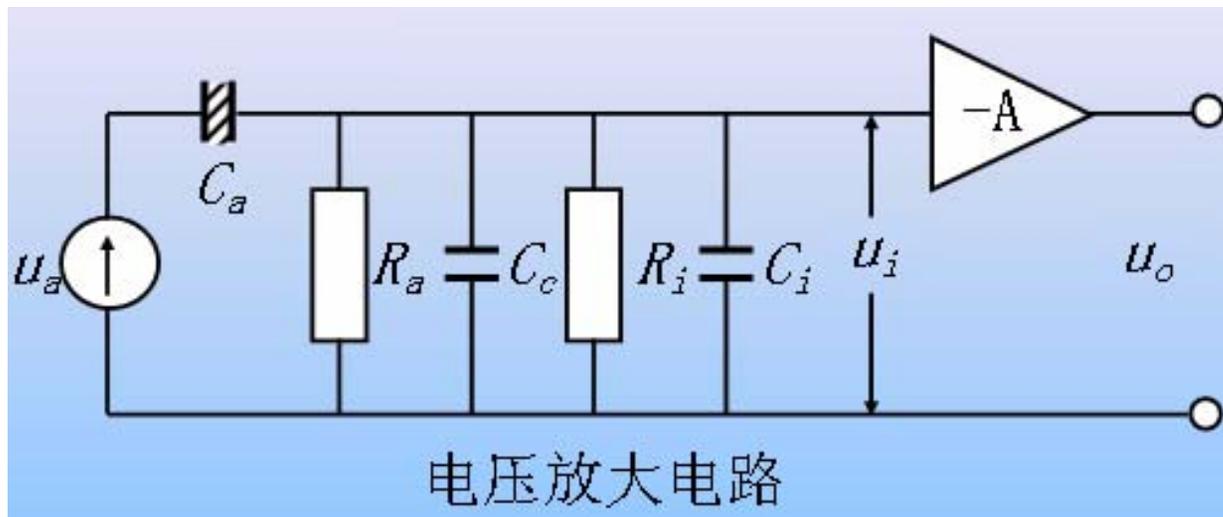
➤ 测量电路

由于压电式传感器的输出电信号很微弱，通常先把传感器信号先输入到高输入阻抗的**前置放大器**：**电压放大器**或**电荷放大器**，对传感器输出的电压或电荷信号进行放大处理，并实现阻抗变换，将传感器的高输出阻抗变为放大器的低输出阻抗，再用一般的放大检波电路输入到指示仪表或记录器。

前置放大器的作用：放大信号、阻抗变换



1) 电压放大器



设作用于压电晶片上的交变力 $F = F_0 \sin \omega t$ 。则：

$$q = d_c \cdot F = d_c \cdot F_0 \sin \omega t ,$$

$$u_a = \frac{q}{C_a} = \frac{d_c F_0}{C_a} \sin \omega t$$

而：

$$\frac{U_i(s)}{U_a(s)} = \frac{sRC_a}{sRC + 1}$$

其中， $R = R_a // R_i$ ， $C = C_a + C_c + C_i$ 。

即：
$$A(\omega) = \frac{\omega RC_a}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}$$

$$\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \text{arctg} \omega RC$$

从而：
$$u_i = \frac{\omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} d_c F_0 \sin(\omega t + \varphi(\omega))$$

输入端电压幅值：

输出端电压幅值：

$$U_{im} = \frac{\omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} d_c F_0$$

$$U_{om} \approx -AU_{im}$$

定义压电传感器输出电压灵敏度：

$$S_{u_o} = \frac{dU_{om}}{dF_0} = \frac{A\omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} d_c$$



当作用力频率 ω 与电路时间常数 RC 足够大时，

$(\omega RC)^2 \gg 1$ ，则：

$$U_{om} \approx A \frac{d_c}{C} F_0 = \frac{Ad_c}{C_a + C_c + C_i} F_0$$

$$S_{u_o} \approx \frac{Ad_c}{C_a + C_c + C_i}$$

显然：

- U_{om} 和 S_{u_o} 与 C_c 有关，当改变电缆长度或布线方法时， U_{om} 和 S_{u_o} 都会改变，从而导致测量误差。



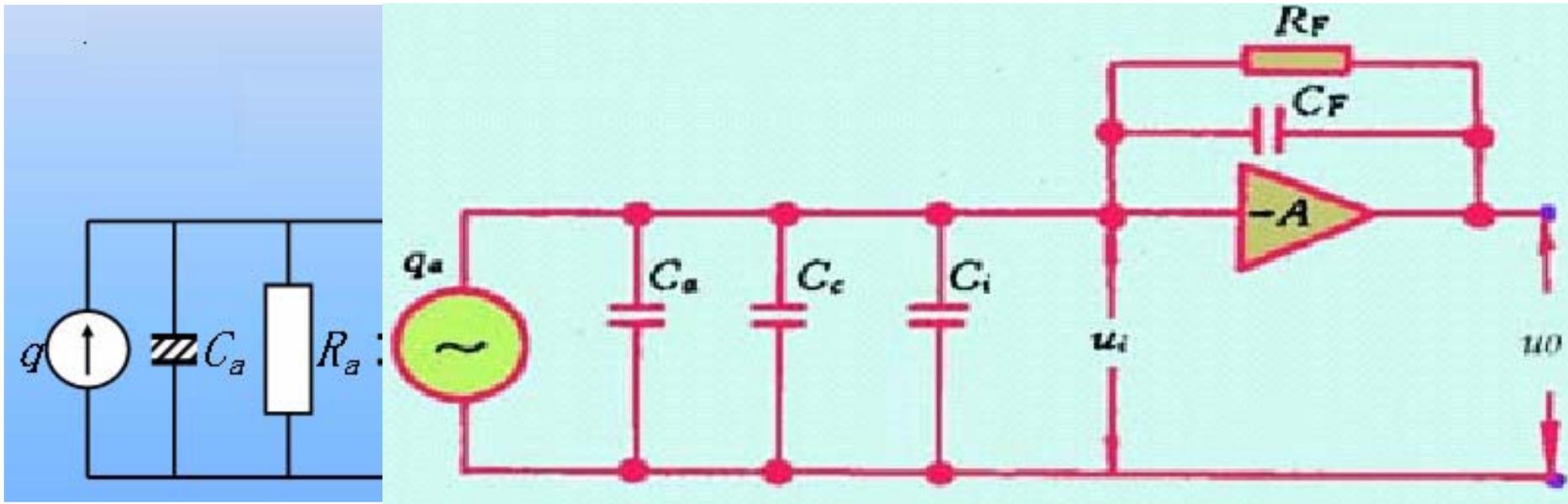
- 若压电器件上作用静态力 ($\omega = 0$)， U_{om} 和 S_{u_o} 均等于0。即压电传感器不能测量静态力。
- 若被测量是准静态量，必须增大测量回路时间常数，以维持 $(\omega RC)^2 \gg 1$ ，减少 ω 对 U_{om} 和 S_{u_o} 的影响。显然增加电容 C 会降低灵敏度，而一般 R_a 很大，故只有增加 R_i 。 R_i 越大，低频响应越好。下限频率：

$$f \approx \frac{1}{2\pi R_i C} \quad (\text{一般 } R_a \gg R_i)$$

- 对动态测量， ω 较大，易满足 $(\omega RC)^2 \gg 1$ ，此时 U_{om} 和 S_{u_o} 近似与 ω 无关，即压电传感器具有良好的高频响应特性。

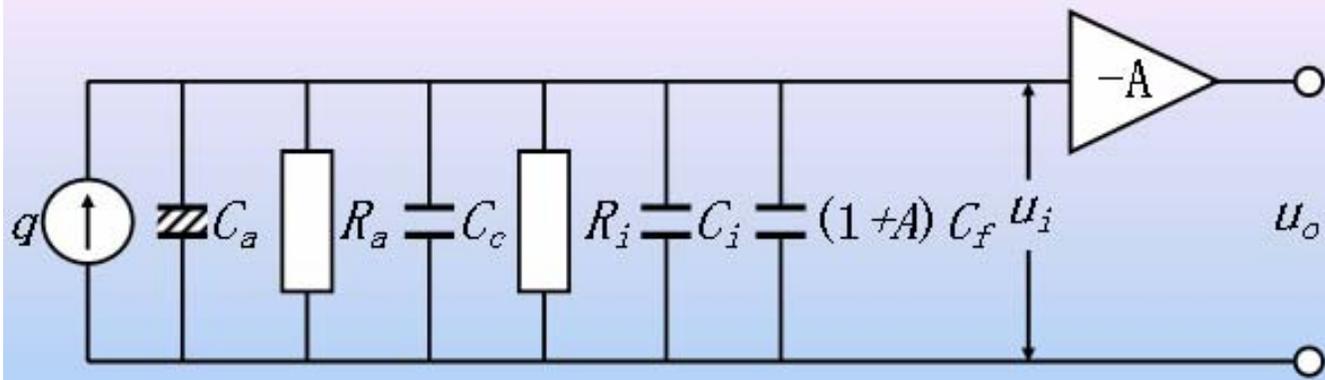


2) 电荷放大器



电荷放大器是一个高增益带电容负反馈的运算放大器，其输入阻抗极高（ $10^{12}\Omega$ 以上）。

电荷放大电路



同样可求得输入端电压幅值：

$$U_{im} = \frac{\omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} d_c F_0$$

其中， $R = R_a // R_i$ ， $C = C_a + C_c + C_i + (1+A)C_f$ 。

若 $(\omega RC)^2 \gg 1$ ，则：

$$U_{im} \approx \frac{d_c}{C_a + C_c + C_i + (1+A)C_f} F_0$$

从而：
$$U_{om} \approx -AU_{im} = \frac{-Ad_c}{C_a + C_c + C_i + (1+A)C_f} F_0$$

若A足够大（一般**100dB**以上），则：

$$(1+A)C_f \gg C_a + C_c + C_i$$

$$U_{om} \approx -\frac{d_c}{C_f} F_0$$

表明：在一定条件下，电荷放大器的输出电压与外力成正比，与反馈电容成反比，而与 C_a 、 C_c 和 C_i 无关。

电缆分布电容变化不会影响传感器灵敏度及测量结果是电荷放大器的突出优点。



✓在电荷放大器的实际电路中，考虑到被测量的大小，以及后续放大电路不致因输入信号太大而导致饱和，反馈电容 C_f 的容量做成可选择的，选择范围在100~10000pF之间。选择不同的反馈电容，可改变前置放大器的输出大小。

✓由于采用电容负反馈，电荷放大器对直流工作点相当于开环，因此零点漂移较大。为了减小零漂，使电荷放大器工作稳定，一般在**反馈电容两端并联一个大的反馈电阻 R_f （约 $10^{10} \sim 10^{14} \Omega$ ）**，作用是提供直流反馈。



✓ 电荷放大器的时间常数 $R_f C_f$ 很大（105 s 以上），因此其下限截止频率

$$f = \frac{1}{2\pi R_f C_f}$$

低达 $3 \times 10^{-6} \text{ Hz}$ 。

电压放大器和电荷放大器比较：

电荷放大器电路复杂，价格昂贵，电压放大器反之；但电压放大器下限频率较高，灵敏度与电缆分布电容有关，选用时宜综合考虑。



8.3 压电式传感器的应用

➤ 压电式传感器的特点

- ✓ 能量转换型（发电型）传感器
- ✓ 体积小，重量轻，刚性好，可以提高其固有频率，得到较宽的工作频率范围。
- ✓ 灵敏度高，稳定性好，可靠。对应用纵向压电效应的传感器，电荷量与晶体的变形无关，因而灵敏度与传感器刚度无关。
- ✓ 有比较理想的线性，且通常没有滞后现象
- ✓ 低频特性较差，主要用于动态测量

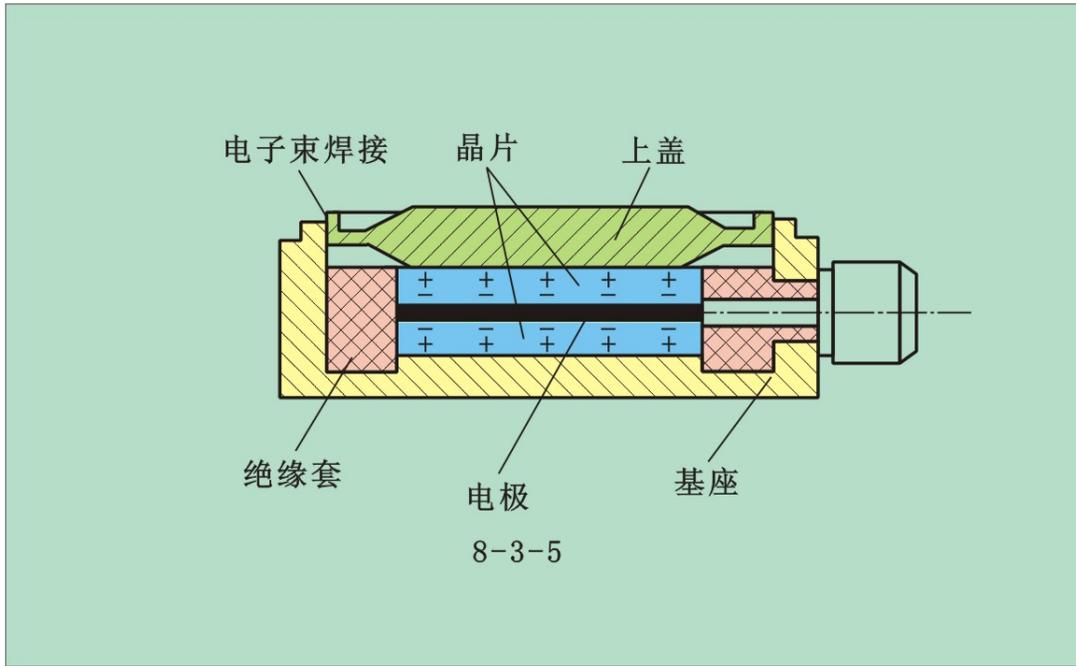


- ✓ 存在横向效应，影响测量结果
- ✓ 应用中要求采取严格的绝缘措施，并采用低电容、低噪声电缆。
- ✓ 工作原理可逆

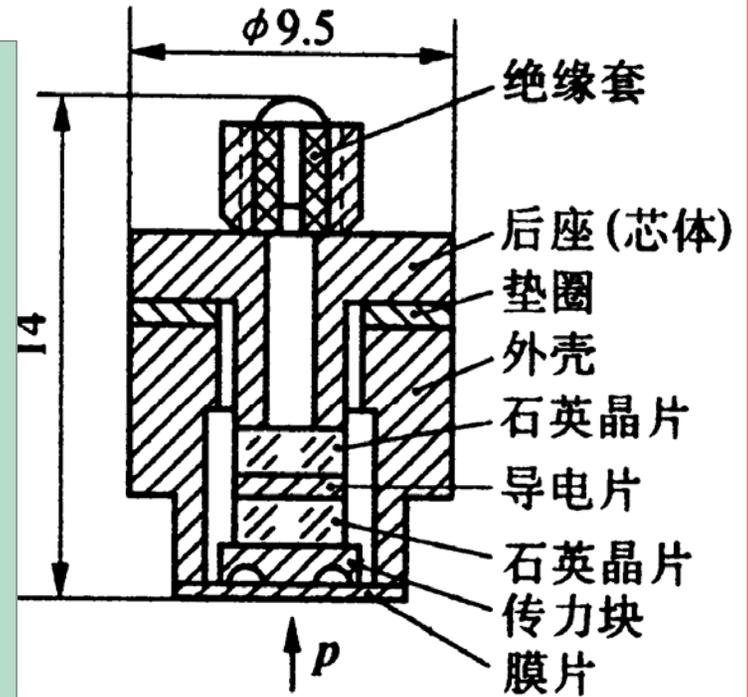
➤ 应用

广泛应用于冲击、振动及动态力的测量。



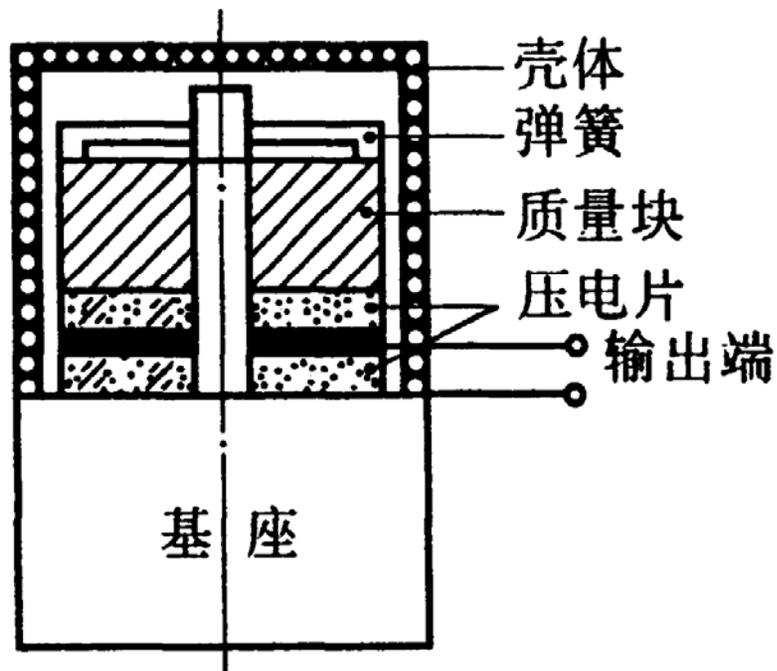


单向压电式力敏传感器结构图

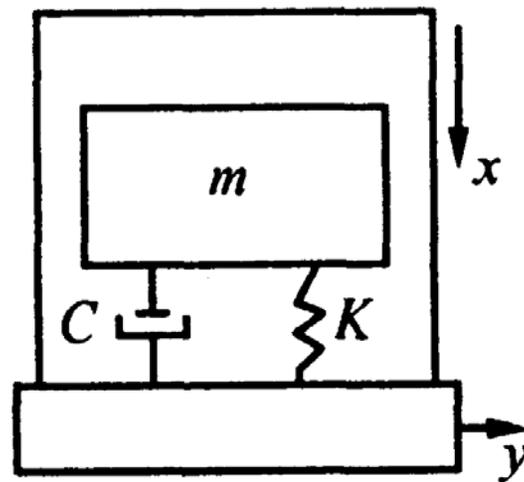


膜片式压电压力传感器

➤ 压电式加速度计



(a) 结构原理图



(b) 单自由度二阶力学系统

压缩型压电加速度传感器的结构原理图

压电元件—质量块—弹簧系统装在圆形中心支柱上，支柱与基座连接，基座与测试对象连接。

利用压电效应，在加速度计受振动时，质量块加在压电元件上的力($F=ma$)也随之变化。当被测振动频率远低于加速度计的固有频率时，则产生的电压(或电荷)与被测加速度成正比。

1) 灵敏度及其产生误差的原因

灵敏度有电压灵敏度和电荷灵敏度两种表示方法

$$S_q = \frac{q}{a}$$
$$S_v = \frac{U_a}{a}$$

选用压电系数
大的压电元件



对给定的压电材料而言，灵敏度随质量块的增大或压电元件的增多（串联或并联）而增大。

一般来说，加速度计尺寸越大，其固有频率越低。因此选用加速度计时应当权衡灵敏度和结构尺寸、附加质量的影响和频率响应特性之间的利弊。

$$a_1 = \frac{m}{m + m_T} a$$

$$f_{01} = \sqrt{\frac{m}{m + m_T}} f_0$$



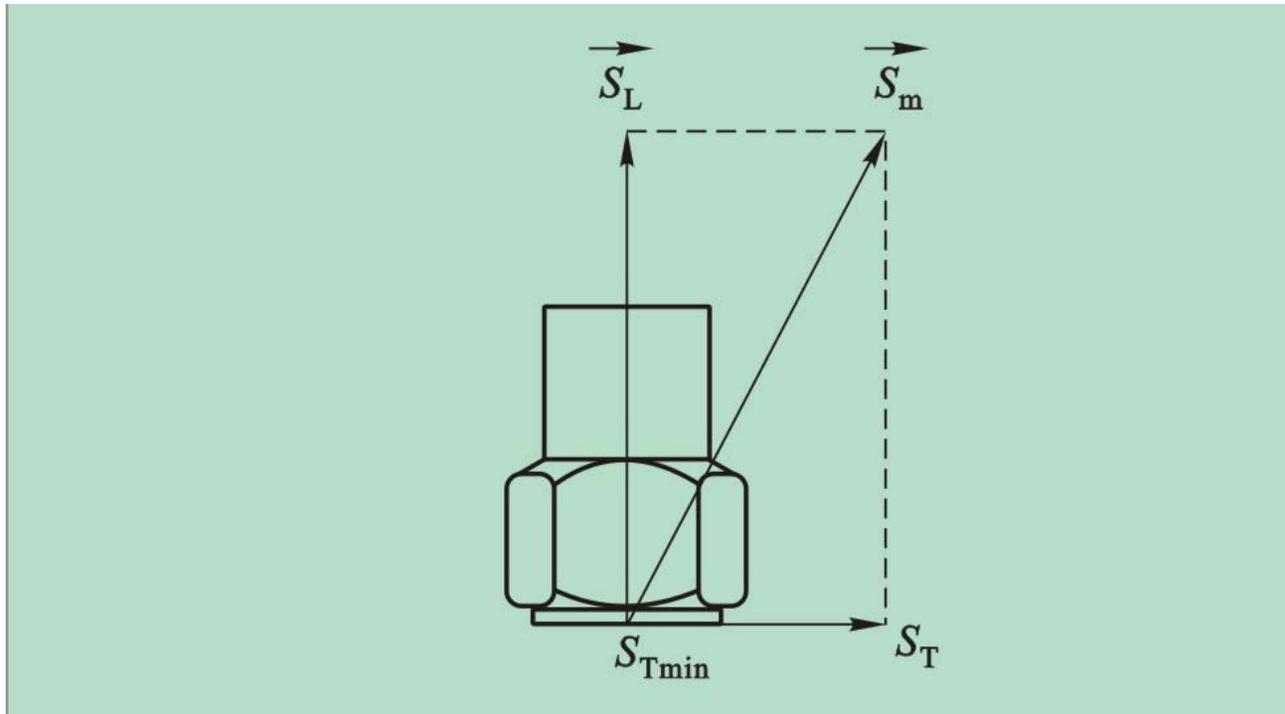
横向灵敏度:

理想情况是只有主轴加速度的作用产生输出，垂直于主轴加速度的作用不应有输出。压电加速度计的横向灵敏度表示它对横向（垂直于加速度计主轴线）振动的敏感程度。——**测量误差**

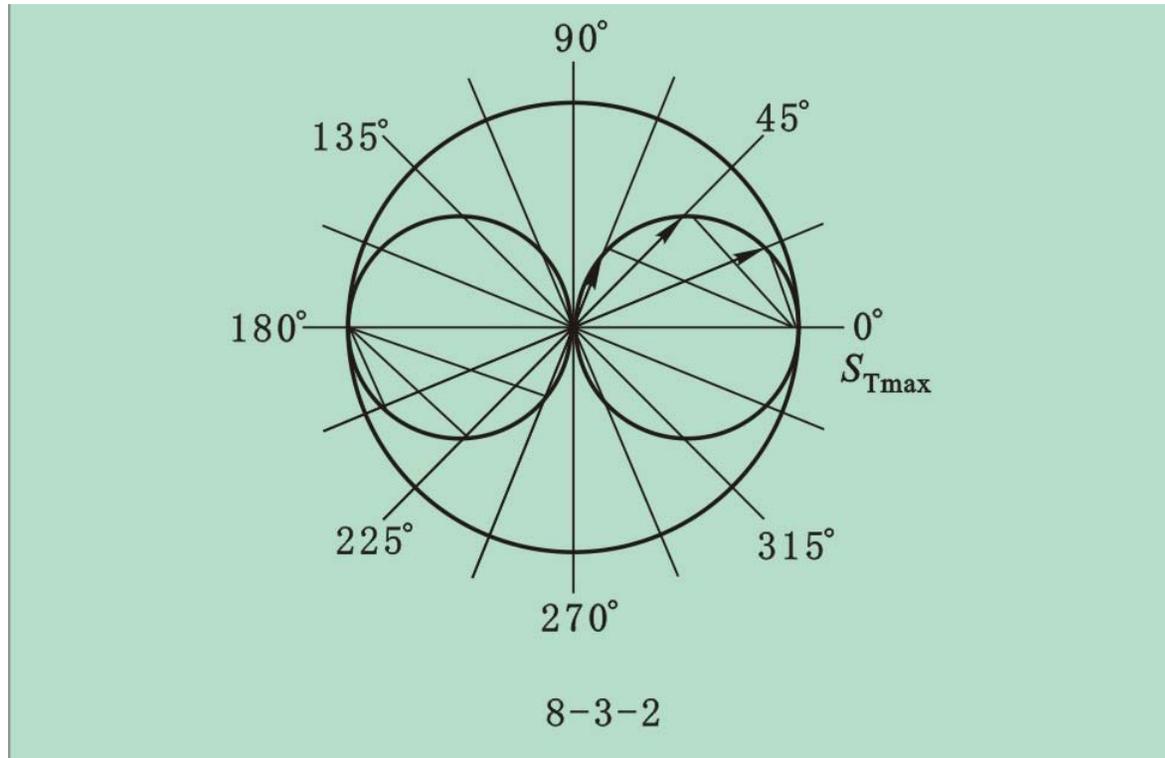
- ◆ 横向灵敏度常以主轴灵敏度（即加速度计的电压灵敏度或电荷灵敏度）的百分比表示。一个优良的加速度计的横向灵敏度应小于主轴灵敏度的3%。



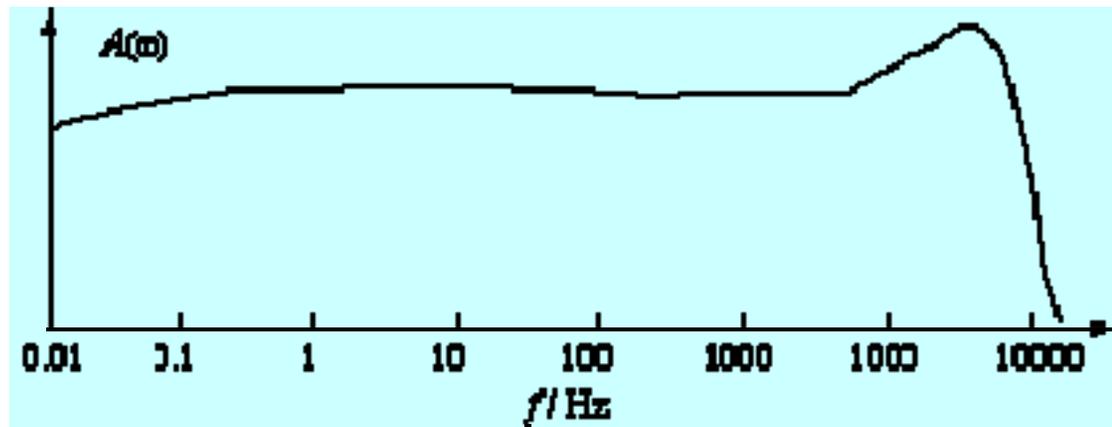
◆**产生横向灵敏度的原因：**晶片的切割误差、压电元件表面粗糙或两表面不平行、基座平面或安装表面与压电元件的最大灵敏度轴线不垂直等，造成传感器的最大灵敏度方向与主轴线不重合，造成测量误差。



◆横向灵敏度与横向加速度方向有关。一般在壳体上用小红点标出**最小横向灵敏度**方向，测量时该方向应对准存在最大横向干扰（最大横向加速度）方向，使横向加速度引起的误差最小。



2) 频率特性



压电式加速度计的幅频特性曲线

- 加速度计的使用上限频率取决于幅频曲线中的谐振频率。一般小阻尼 ($\xi \leq 0.1$) 的加速度计，上限频率若取为谐振频率的 $1/3$ ，便可保证幅值误差低于 1dB （即 12% ）；若取为谐振频率的 $1/5$ ，则可保证幅值误差小于 0.5dB （即 6% ），相移小于 3° 。

▪ 谐振频率与加速度计的固定状况有关，加速度计出厂时给出的幅频曲线是在**刚性连接**的固定情况下得到的。实际使用的固定方法往往难于达到刚性连接，因而谐振频率和使用上限频率都会有所下降。



某加速度计采用各种固定方法的谐振频率分别约为：钢螺栓固定法31kHz，云母垫片28kHz，涂簿蜡层29kHz，手持法2kHz，永久磁铁固定法7kHz。

加速度计的固定方法

■ 低端截止频率

- 在低频尤其小振幅振动时，加速度值小，传感器的灵敏度有限，因此输出的信号将很微弱，信噪比很低；另外电荷的泄漏，积分电路的漂移（用于测振动速度和位移）、器件的噪声都是不可避免的。
- 后续电路（电压放大器和电荷放大器具有**高通滤波**的特点）的频率特性影响，有一定的下限截止频率。
- 实际压电传感器低频端出现“**截止频率**”，约为**0.1~1Hz**左右。即可测量接近于静态变化的被测量。



■ 电缆噪声

✓ 电缆噪声完全是由电缆自身产生的。当电缆受到突然的弯曲或振动时，电缆芯线与绝缘体、绝缘体和金属屏蔽套之间就会发生相对移动，以致两者之间形成空隙。当相对移动很快时，在空隙中因相互摩擦而产生**静电感应电荷**，此静电荷与压电传感器的输出叠加后送到放大器中，从而在主信号中混杂较大的电缆噪声。

✓ 减小电缆噪声的方法：选用**低噪声电缆**（在电缆芯线与绝缘体、绝缘体与屏蔽套之间加入石墨层，减小相互摩擦）；**固紧电缆，避免相对运动**。等等。



■接地回路噪声

✓在振动测量中，通常测量仪器较多。若各仪器和传感器各自接地，由于不同的接地点之间存在电位差，从而在接地回路中形成回路电流，导致产生噪声信号。

✓防止接地回路噪声的方法：**一点接地**。



产品

压力变送器



加速度计



力传感器



产品



低噪声电缆线

磁座

本章小结:

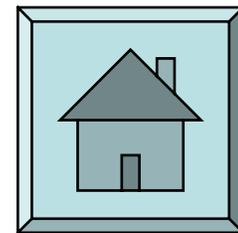
1. 工作原理及特性
2. 测量电路（等效电路及前置放大器）
3. 传感器的应用（压电加速度计）



习题与思考题：



P167——2、3、5、8



讨论题：

- 1、什么是压电效应？石英晶体为什么沿Y轴施加作用力时而在垂直于X轴的平面上产生压电现象？
- 2、常用压电材料有哪几种类型，各有何特性？
- 3、压电传感器的测量电路中为什么要加前置放大器？电荷放大器和电压放大器各有什么特点？
- 4、如何提高压电传感器的灵敏度？
- 5、压电加速度传感器使用时应注意哪些问题才能保证测量精度（频响特性）？

