

第6章

压电式传感器

一、压电式传感器基本原理

- 某些晶体电介质，施加一定方向外力使之变形，其表面产生电荷；外力去除后，介质表面电荷消失

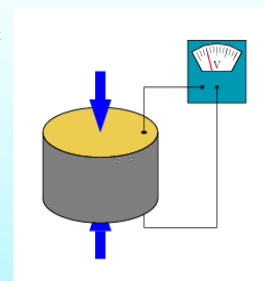
——正压电效应

- 对其表面施以电场，则介质将产生机械变形

——逆压电效应

- 压电效应具有极性

外加作用力从**压力**变为**拉力**，
介质表面上产生的电荷会改变**符号**



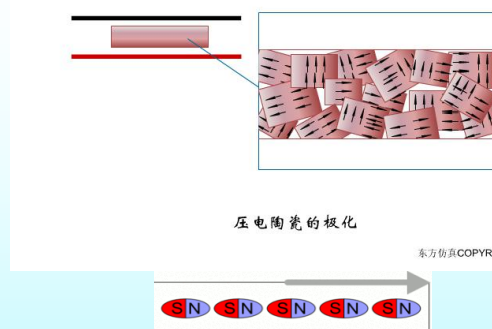
- 压电材料：具有压电效应的材料
- 压电晶体：天然单晶体(如天然石英晶体等)
- 压电陶瓷：人造多晶体(如钛酸钡、锆钛酸铅-PZT等)
- 压电薄膜：有机聚合物的铁电体加工而成的柔性薄膜
常用的有聚偏氟乙烯(PVF2)等
适于特殊表面上的测力

- 压电晶体与压电陶瓷比较

相同点：均具有压电效应。

不同点：石英的介电和压电常数的温度稳定性好，工作温度范围宽，机械性能好。

压电陶瓷极化后，受外力变形时电极矩重新定位而产生电荷，压电系数是石英的几十倍至几百倍，灵敏度较高，但稳定性不如石英，居里点低。



压电陶瓷的极化

东方仿真COPYRIGHT

- 人造压电材料(压电陶瓷和压电薄膜等)需极化处理后才具有压电性能
- 极化处理：人造压电材料在高压电场下放置数小时，使内部晶体整齐排列
极化处理后才能实际应用

天然石英晶体的结晶体

- 天然石英晶体的结晶体是一种六角形晶柱，化学式为 SiO_2
- 三根轴线。

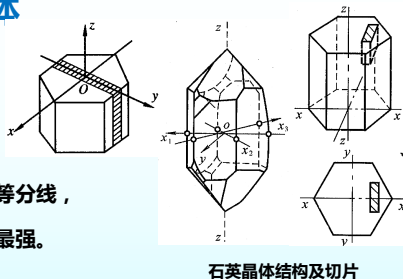
- (1) $0x$ -电轴：两平行柱面内夹角等分线，垂直此轴压电效应最强。

- (2) $0y$ -机轴：垂直于平行柱面，
在电场作用下变形最大。

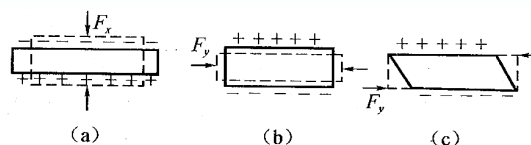
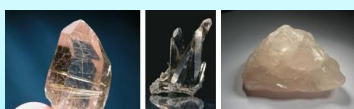
- (3) $0z$ -光轴：无压电效应，中心轴。

从石英晶体内取出一片长方体晶片

其各棱边与各轴平行



石英晶体结构及切片



- 受力方向不同，引起压电晶体切片的不同变形
可在不同表面上测得**电荷**

- 实用压电效应有三种类型(见上图)

虚线：压电晶体切片的**原始形状**

实线：压电晶体切片的**受力变形后的形状**

- 图(a)是**纵向压电效应**，压电片在 x 方向上受**正向应力**
在垂直于 x 方向的平面上产生**电荷**
- 图(b)是**横向压电效应**，压电片在 y 方向上受**正向应力**
在垂直于 x 方向的平面上产生**电荷**
- 图(c)是**切向压电效应**，压电片在 y 方向上受**切向应力**
在垂直于 x 方向的平面上产生**电荷**

特定平面上产生的电荷量 q 由下式决定：

$$q \propto DF \propto DK \propto$$

式中： q ——在某特定面上产生的电荷量；

D ——压电常数，

与压电片材料、切片方向以及受力方向及性质

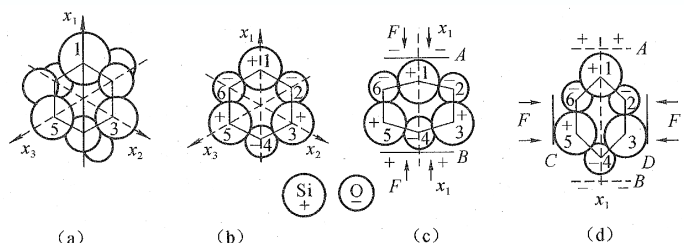
(正应力或切应力)、在何平面上测量电荷等因素有关(可查表)；

K ——压电片的刚度；

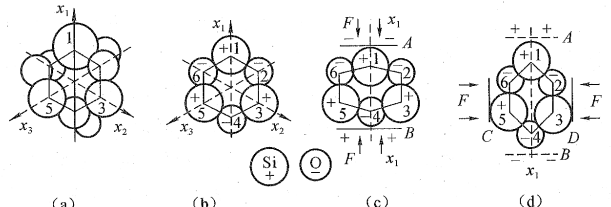
δ ——压电片的变形量。

压电材料主要特性参数

- 压电常数：材料压电效应强弱,与压电输出的灵敏度直接有关。
- 弹性常数与 刚度：决定压电器件固有频率和动态特性。
- 固有电容与介电常数：对于一定形状尺寸的压电元件, 两者有关; 固有电容又影响压电传感器频率下限。
- 机械耦合系数：转换输出能量（如电能）与输入的能量（如机械能）之比的平方根; 是衡量压电材料机电能量转换效率的重要参数。
- 绝缘电阻：其值越大, 电荷泄漏越小, 可改善压电传感器低频特性。
- 居里点温度：压电材料开始丧失压电特性的温度。



- 石英晶体受力表面上产生电荷，其机理可用晶胞模型说明
- 石英晶体是一种二氧化硅(SiO_2)结晶体
- 从 z 方向观察, 大圆为硅原子, 小圆为氧原子, 硅原子带4个单位正电荷, 氧原子带2个单位负电荷, 各原子的电荷平衡, 晶胞呈中性, 如图(a)所示
- 让每个氧原子带4个单位负电荷, 得图(b)的晶胞模型, 其各方向对称



- 在 x 轴方向上施加压力, 使晶胞变形(图c), 带正电荷的硅原子1与带负电荷的氧原子4之间距离变小, 氧原子2、6与硅原子3、5更接近两表面, 原子间电场不平衡, 使沿 x 轴方向改变距离的两种原子两端出现极性相反的游离电荷——纵向压电效应
- 在 y 轴方向上施加压力(图d), 硅原子3、5和氧原子2、6皆被压入在 y 轴两端电场相对平衡, y 轴两端没有游离电荷, 在 x 方向两端电场失去平衡而产生电荷——横向压电效应
- 应用压电晶体受力变形产生表面电荷的原理, 可以做成两种类型的传感器

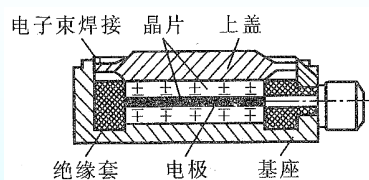
二、压电传感器

- 采用两片压电晶体片对放

提高传感器的灵敏度

- 被测力作用在弹性顶盖上

直接传递到压电片上



压电式力传感器的结构

- 压电片受力变形产生电荷, 由引线输出

输出的电荷大小反映了作用力数值

二、压电传感器

- 三向力传感器

可分别测出 x, y, z 方向分量的合成力

- 内部含有感知三个方向力的压电片元件(图a)

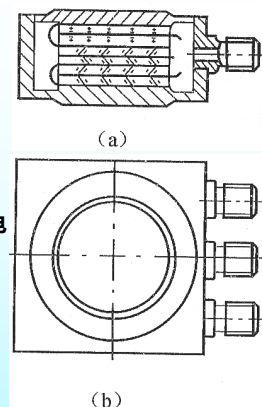
- 每一方向有两片敏感压电片

- 为了能分别感知三个方向的分力, 三组压电片利用了两种不同的压电效应

横向或纵向压电效应感受 z 方向正压力

剪切压电效应感受 x 和 y 方向侧向压力

- 三对压电片电荷分别反映三个方向力的分量



三、压电式传感器测量电路

- 压电晶体在受力变形后所产生的电荷量极微弱，能量低
- 压电片的内阻（阻抗）很大，压电片输出的功率极微弱
- 后续放大电路主要有两个方面的特殊要求

高灵敏度

高输入阻抗

只有满足这两个要求，才能测出微弱电荷信号

- 接入高输入阻抗前置放大器的作用

把传感器的高输出阻抗变换为低输出阻抗

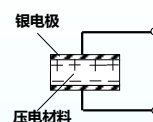
- 压电式传感器的输出可以是电压或电荷信号，可采用下列两种形式

电压放大器

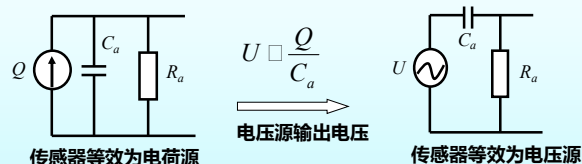
电荷放大器

三、压电式传感器测量电路(续)

压电式传感器等效电路



压电式传感器是有源器件；聚集正负电荷的两表面构成电容。

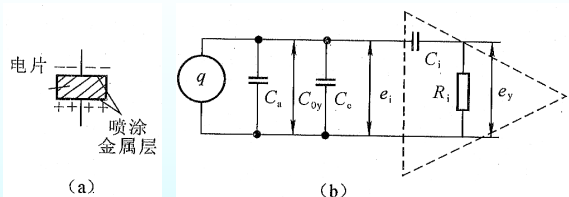


使用时，要考虑连接电缆的等效电容，后续电路中放大器的输入电阻、输入电容和压电传感器的泄漏电阻。

三、压电式传感器测量电路(续)

1. 电压放大器

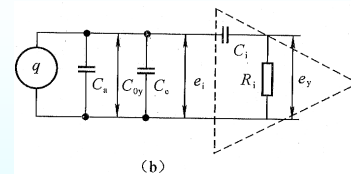
电压放大器的等效原理线路



- 为有效集中电荷，在压电晶体片两个工作表面镀覆薄金属层(图a)
- 压电晶体片接入电路，既是电荷源(q)，又是小电容器(C_a) (图b)
- 压电片至放大器之间的两输出引线间存在着寄生电容(C_c)，也在微弱电荷测量中起作用，需考虑输入等效电路
- 后续放大器从输入端观察，可等效为总的等效电容(C_i)和等效电阻(R_i)

三、压电式传感器测量电路(续)

1. 电压放大器(续)

压电片未接入电路，若它两表面存在电荷量 q ，两极板电位差为： $e_{oy} = \frac{q}{C_a}$ 在接入后续电路后，放大器的输入电压为： $e_i = \frac{q(C_a + C_c + C_i)}{(C_a + C_c)C_i}$

若后续放大器为线性放大，则最终输出为：

$$e_y = K e_i \approx K \frac{q[C_a + C_c + C_i]}{[C_a + C_c]C_i}$$

三、压电式传感器测量电路(续)

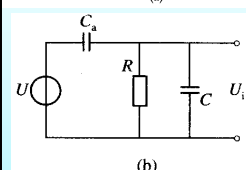
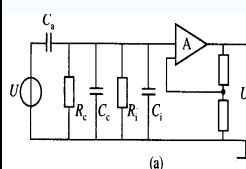
1. 电压放大器(续)

$$e_y = K e_i \approx K \frac{q[C_a + C_c + C_i]}{[C_a + C_c]C_i}$$

- 上式中，常规接出电荷输出，经放大后其电压输出与输入电荷成正比
——这是所希望的特性
- 输入电压还与各部分的电容有关
- 压电晶体 C_a 与后续放大器的等效电容 C_i 通常不变，引出电缆线的电容 C_c 随长度和形状变化
——会给测量带来输出不稳定的因素
- 振动测试中，若电缆随着被测物体一起振动，还会引起噪声干扰
- 使用时需特别注意使电缆长度保持标定时值不变
——布置时需妥善安排电缆的形状、位置以免引起输出的变动和干扰

三、压电式传感器测量电路(续)

1. 电压放大器(续)



$$\begin{aligned} U &= \frac{Q}{C_a} \Rightarrow U \approx \frac{dF}{C_a} \Rightarrow U \approx \frac{dF}{C_a} \\ U_i &= U \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} \approx dF \frac{j\omega R}{1 + j\omega R(C + C_a)} \\ U_{im}(\omega) &= \frac{dF_m R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C + C_a)^2}} \quad (\text{幅频}) \\ |U_i(\omega)| &= \frac{dF}{2} \frac{1}{\omega} \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C + C_a)^2}} \quad (\text{相频}) \end{aligned}$$

当 $\omega \rightarrow 0$ 时， $U_{im}(\omega) \approx \frac{dF_m}{C_a + C_c + C_i}$ ，与电缆电容有关；当 $\omega \rightarrow \infty$ 时， $U_{im}(\omega) \rightarrow 0$

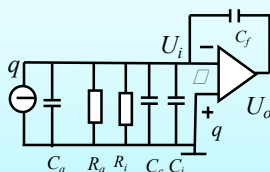
三、压电式传感器测量电路(续)

2. 电荷放大器

运算放大器输入阻抗很高, 故可近似 $R_a \rightarrow \infty$, $R_i \rightarrow \infty$, 将反馈电容折算到输入端

$$U_o \approx A U_i \approx A \frac{q}{C_a \square C_c \square C_i \square (1 \square A) C_F} \approx \frac{q}{C_F}$$

- 输出电压与电缆电容 C_c 无关, ω 影响不明显 (由于作了简化假设, 表达式中无关)
- 输出电压与 q 成正比
- 该优点使压电传感器基本上都用电荷放大器作为转换电路。



三、压电式传感器测量电路(续)

2. 电荷放大器 (续)

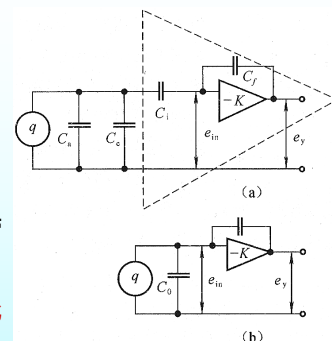
- 为解决电压放大器中寄生电容的影响, 使输出电压仅取决于电荷

——出现了电荷放大器

- 主要变化是在放大器输入端增加一个带有反馈电容 C_f 的运算放大器

- 先将电容 C_a , C_c , C_i 按并联计算简化折算成一个电容 C_0 , 则:

$$C_0 \approx C_a \square C_c \square C_i \quad (3-38)$$



电荷放大器等效电路

三、压电式传感器测量电路(续)

2. 电荷放大器 (续)

- 电荷 q 分布在 C_0 和 C_f 上, 两个电容满足:

$$q = e_{in} C_0 + C_f (e_{in} - e_y) \quad (3-39)$$

因 e_{in} 对运算放大器作反向端输入, 故:

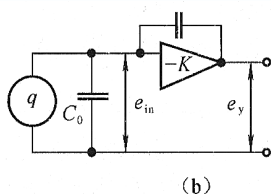
$$\frac{e_y}{e_{in}} = -K \quad (3-40)$$

式中, K 为运算放大器的增益。将式(3-40)代入式(3-39)作简化后得:

$$e_y \approx \frac{Kq}{C_0 \square C_f \square k} \quad (3-41)$$

由于 K 值极大, 所以 $1-K \approx -K$, 又 $C_f(1-K) \gg C_0$, C_0 可以略去而得:

$$e_y \approx \frac{Kq}{C_f K} \approx \frac{q}{C_f}$$



三、压电式传感器测量电路(续)

2. 电荷放大器 (续)

- 输电压与电荷成正比
- 制作线路时若使 C_f 为稳定的数值, 输出电压唯一地取决于电荷量 q

其他因素可忽略

- 电压放大器与电荷放大器各有优点

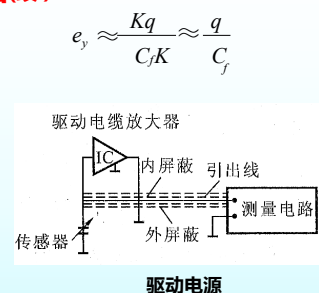
均有实际使用

- 电荷放大器屏除了电缆电容等影响因素

输出稳定准确、线路较复杂、价格较高

- 电压放大器虽受其他因素影响大

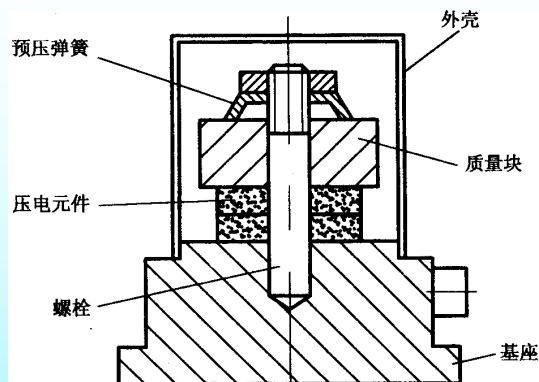
但线路简单、价格低, 可在要求不高的测量中选用



驱动电源

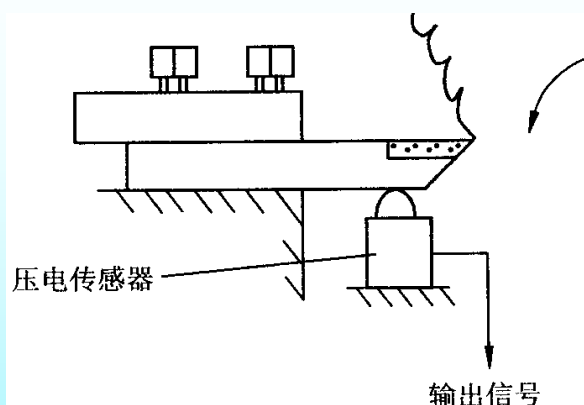
四、压电式传感器的应用 (续)

压电式加速度传感器



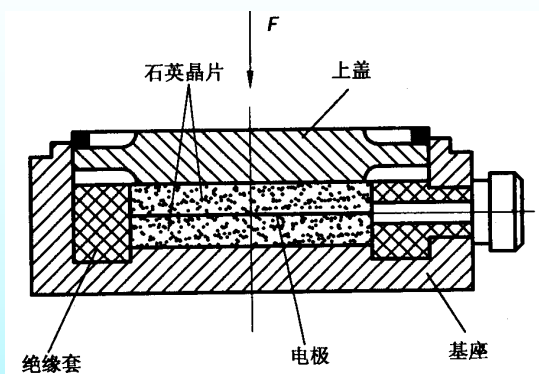
四、压电式传感器的应用 (续)

压电式金属加工切削力测量



四、压电式传感器的应用 (续)

压电式测力传感器



The End