

5.3 压电式传感器的测量电路

5.3.1 压电晶片的连接方式

制作压电传感器时,为了提高其灵敏度,通常是把两片或两片以上同型号的压电元件粘贴在一起。由于压电晶片有电荷极性,因此连接方式有并联和串联两种形式,如图 5-13 所示。

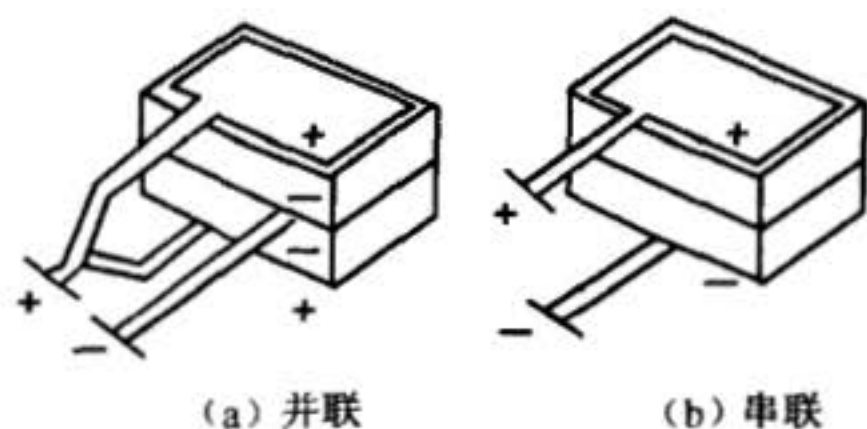


图 5-13 叠层式压电元件

图 5-13 (a) 为并联形式,片上的负极集中在中间极上,其输出电容 C' 为单片电容 C 的两倍,但输出电压 U' 等于单片电压 U ,极板上电荷量 q' 为单片电荷量 q 的两倍,即

$$q' = 2q, U' = U, C' = 2C \quad (5-14)$$

图 5-13 (b) 为串联形式,正电荷集中在上极板,负电荷集中在下极板,而中间的极上上片产生的负电荷与下片产生的正电荷相互抵消,故输出的总电荷 q' 等于单片电荷 q ,而输出电压 U' 为单片电压 U 的两倍,总电容 C' 为单片电容 C 的一半,即

$$q' = q, U' = 2U, C' = \frac{1}{2}C \quad (5-15)$$

由此可见,并联接法虽然输出电荷大,但由于本身电容也大,故时间常数大,只适宜测量缓变信号,并且是以电荷作为输出量的场合;串联接法输出电压高,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。

5.3.2 压电式传感器的等效电路

当压电式传感器中的压电晶体承受被测机械应力的作用时,在它的两个极面上出现极性相反但电量相等的电荷。因此,可把压电式传感器看成一个电荷源与一个电容并联的电荷发生器,如图 5-14 (a) 所示。其电容量为

$$C_s = \frac{\epsilon S}{\delta} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{\delta} \quad (5-16)$$

式中: S 为极板面积;

ϵ 为压电材料的介电常数;

ϵ_r 为压电材料的相对介电常数(石英晶体为 4.58);

ϵ_0 为真空介电常数 ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$);

δ 为晶体的厚度。

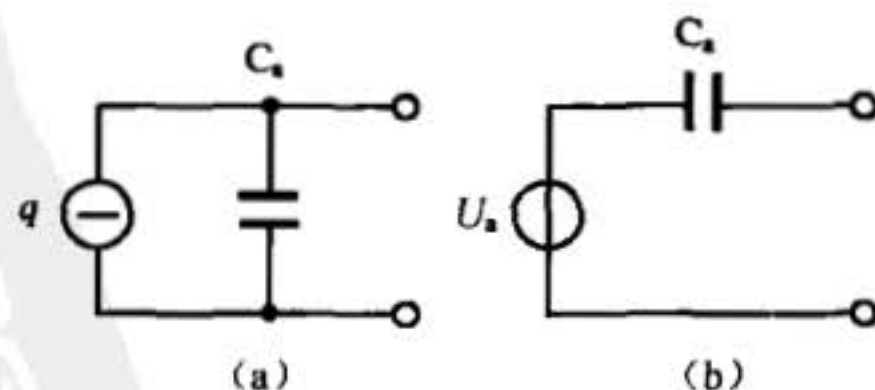


图 5-14 压电式传感器的等效电路

当两极板聚集异性电荷时,板间就呈现出一定的电压,其大小为

$$U_s = \frac{q}{C_s} \quad (5-17)$$

式中: q 为极板上聚集的电荷电量;

C_s 为两极板间等效电容。

因此,压电传感器还可以等效为电压源 U_s 和一个电容器 C_s 的串联电路,如图 5-14 (b) 所示。

只有当传感器内部信号电荷无“漏损”、外电路负载无穷大时,压电传感器受力后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。这对于静态标定以及低频准静态测量极为不利,必然带来误差。事实上,传感器内部不可能没有泄漏,外电路负载也不可能无穷大,只有外力以较高频率不断地作用,传感器的电荷才能得以补充,因此,压电晶体不适合于静态测量。

实际使用时,压电传感器通过导线与测量仪器相连接,连接导线的等效电容 C_c 、前置放大器的输入电阻 R_i 、输入电容 C_i 对电路的影响就必须一起考虑进去。当考虑了压电元件的绝缘电阻 R_s 以后,压电传感器完整的等效电路可表示成图 5-15 (a) 所示的电压等效电路和图 5-15 (b) 所示的电荷等效电路。这两种等效电路是完全等效的。

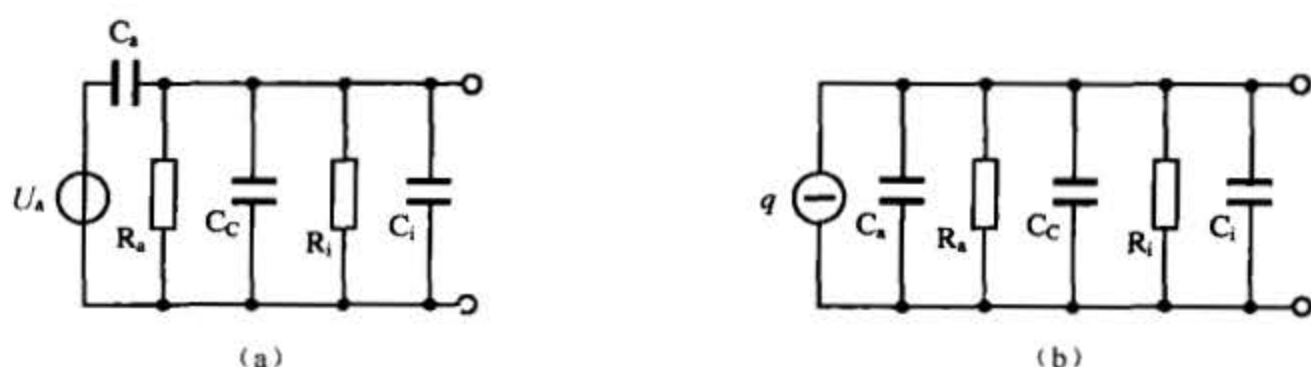


图 5-15 压电传感器的完整等效电路

可见,压电传感器的绝缘电阻 R_s 与前置放大器的输入电阻 R_i 相并联。为保证传感器和测试系统有一定的低频或准静态响应,要求压电传感器的绝缘电阻应保持在 $10^{13} \Omega$ 以上,才能使内部电荷泄漏减少到满足一般测试精度的要求。与之相对应,测试系统则应有较大的时间常数,亦即前置放大器要有相当高的输入阻抗,否则传感器的信号电荷将通过输入电路泄漏,产生测量误差。

5.3.3 压电式传感器的测量电路分析

压电式传感器的内阻抗很高,而输出的信号微弱,因此一般不能直接显示和记录,须将电信号经高输入阻抗的前置放大器放大后再进行传输、处理和测量,这样才能防止电荷迅速泄漏而使测量误差变大。压电式传感器的前置放大器有两个作用:一是把传感器的高阻抗输出变换为低阻抗输出,二是把传感器的微弱信号进行放大。压电传感器的输出信号经前置放大器进行阻抗变换和放大后,就可以采用一般的放大、检波指示或通过功率放大至记录和数据处理设备。前置放大器应尽可能距传感器近,为此,常将其与传感器装配在一起,或集成在一起,否则,传感器的输出信号需由低噪声电缆输入到高阻抗的前置放大器。

按照压电式传感器的工作原理及其等效电路,传感器可看成电压发生器,也可看成电荷发

生器，因此前置放大器也有两种形式：一种是电压放大器，一般称作阻抗变换器，其输出电压与输入电压（传感器的输出电压）成正比；另一种是电荷放大器，其输出电压与输入电荷成正比。这两种放大器的主要区别是：使用电压放大器时，测量系统对电缆电容的变化很敏感，连接电缆长度的变化明显影响测量系统的输出；而使用电荷放大器时，电缆长度变化的影响几乎可忽略不计。但与电压放大器相比，电荷放大器价格要高得多，电路也较复杂，调整起来也较困难。

1. 电压放大器

压电式传感器接电压放大器的等效电路如图 5-16 (a) 所示。图 5-16 (b) 所示是简化后的等效电路，其中， U_i 为放大器输入电压。

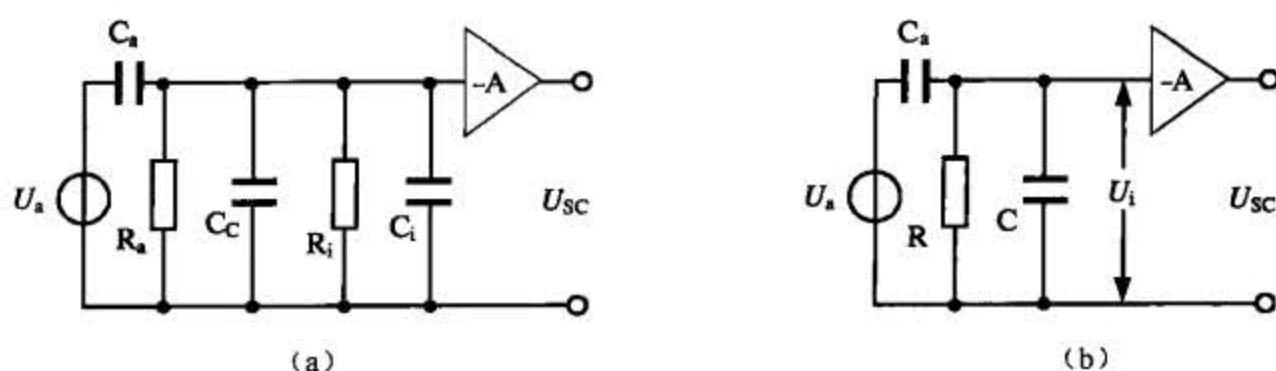


图 5-16 压电式传感器接放大器的等效电路

图 5-16 (b) 中，等效电阻 R 为

$$R = \frac{R_a R_i}{R_a + R_i} \quad (5-18)$$

等效电容为

$$C = C_c + C_i \quad (5-19)$$

而由 (5-17) 式

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

如果在压电元件上沿电轴方向施加交变力 $F = F_m \sin \omega t$ (式中 F_m 为作用力的幅值)，若压电元件的材料是压电陶瓷，其压电系数为 d_{33} ，则在外力 F 的作用下，压电元件产生的电荷和电压均按正弦规律变化。其电压值为

$$U_a = \frac{q}{C_a} = \frac{d_{33} F_m \sin \omega t}{C_a} = U_m \sin \omega t \quad (5-20)$$

式中： $U_m = \frac{d_{33} F_m}{C_a}$ ，为压电元件输出电压幅值。

由图 5-16 (b) 可得放大器输入端的电压 U_i ，其复数形式为

$$\dot{U}_i = \frac{\frac{R \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}}}{\frac{1}{j\omega C_a} + \frac{R \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}}} \dot{U}_a = \frac{j\omega R}{1 + j\omega R(C + C_a)} d_{33} \dot{F} \quad (5-21)$$

U_i 的幅值 U_{im} 为

$$U_{im} = \frac{d_{33} F_m \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_a + C_c + C_i)^2}} \quad (5-22)$$

输入电压与作用力之间的相位差 φ 为

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctan[\omega R (C_a + C_c + C_i)] \quad (5-23)$$

令 $\tau = R(C_a + C_c + C_i)$, 称为测量回路的时间常数, 并令 $\omega_0 = 1/\tau$, 则可得

$$U_{im} = \frac{d_{33} F_m \omega R}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_0)^2}} \approx \frac{d_{33} F_m}{C_a + C_c + C_i} \quad (5-24)$$

可见, 如果 $\omega/\omega_0 \gg 1$, 即作用力变化频率与测量回路时间常数的乘积远大于 1 时, 前置放大器的输入电压 U_{im} 与频率无关。一般认为 $\omega/\omega_0 \geq 3$ 时, 可近似看作输入电压与作用力频率无关。这说明, 在测量回路时间常数一定的条件下, 压电式传感器具有相当好的高频响应特性。

但是, 当 $\omega = 0$ 时, 即作用在压电元件上的力是静态力时, 前置放大器的输入电压 $U_i = 0$, 这是因为实际上放大器的输入阻抗不可能为无穷大, 而压电传感器也不能绝对绝缘, 因此产生的电荷就会通过放大器的输入电阻和传感器本身的泄漏电阻漏掉。这就从原理上说明了为什么压电式传感器不能测量静态物理量。

当被测动态量变化缓慢, 而测量回路时间常数不大时, 会造成传感器灵敏度下降, 因而要扩大工作频带的低频段, 就必须提高测量回路的时间常数 τ 。但是靠增大测量回路的电容来提高时间常数会影响传感器的灵敏度。根据传感器电压灵敏度 K_V 的定义得

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

因为 $\omega R \gg 1$, 故上式可以近似为

$$K_V \approx \frac{d_{33}}{C_a + C_c + C_i} \quad (5-25)$$

可见, K_V 与回路电容成反比, 增加回路电容必然使 K_V 下降。因此只有通过提高电阻的方法来提高传感器的时间常数。为了提高电阻就要选择输入阻抗高的放大器。为此常将输入内阻 R_i 很大的前置放大器接入回路。其输入内阻越大, 测量回路的时间常数越大, 则传感器低频响应也越好。

由 (5-25) 式还可以看出, 当改变连接传感器与前置放大器的电缆长度时, C_c 也将改变, 放大器的输出电压就会随之发生变化, 前置放大器的输出电压 $U_{sc} = -AU_{im}$ (A 为前置放大器的增益) 也就发生变化。在设计时, 通常把电缆长度定为一常数, 使用时如要改变电缆长度, 则必须重新校正电压灵敏度值。

2. 电荷放大器

电荷放大器实际上是一个具有反馈电容的高增益运算放大器。如果略去 R_a 和 R_i 的并联电阻后, 电荷放大器的等效电路可用图 5-17 表示。图中 C_F 为放大器的反馈电容。其余符号的意义与电压放大器相同。

考虑到电容负反馈线路在直流工作时相当于开路状态, 因此对电缆噪声比较敏感, 放大器的零点漂移也比较

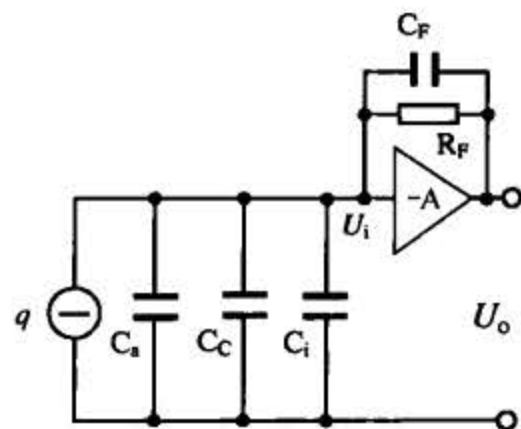


图 5-17 电荷放大器等效电路

大。为了减小零点漂移,提高放大器工作的稳定性,一般在反馈电容的两端并联一个大电阻 R_F ($10^{10} \sim 10^{14} \Omega$) 来提供直流反馈,用以稳定放大器的直流工作点。若忽略 R_s 、 R_i 及 R_F 的影响,则输入到放大器的电荷量为

$$q_i = q - q_F \quad (5-26)$$

由图 5-17 可知

$$U_o = -AU_i = -A \frac{q_i}{C_i + C_c + C_s}$$

式中: A 为放大器的开环增益。所以

$$q_i = -\frac{U_o}{A} (C_i + C_c + C_s) \quad (5-27)$$

而

$$q_F = (U_i - U_o)C_F = \left(-\frac{U_o}{A} - U_o\right)C_F = -(1+A)\frac{U_o}{A}C_F \quad (5-28)$$

将 (5-27) 式、(5-28) 式代入 (5-26) 式,有

$$-\frac{U_o}{A}(C_i + C_c + C_s) = q - \left[-(1+A)\frac{U_o}{A}C_F\right] = q + (1+A)\frac{U_o}{A}C_F$$

将上式整理,得放大器的输出电压为

$$U_o = \frac{-Aq}{C_i + C_c + C_s + (1+A)C_F} \quad (5-29)$$

当 $A \gg 1$, 而 $(1+A)C_F \gg (C_i + C_c + C_s)$ 时,上式可简化为

$$U_o \approx -\frac{q}{C_F} \quad (5-30)$$

由 (5-30) 式可以看出,当 A 足够大时,输出电压与 A 无关,电荷放大器的输出电压仅与传感器产生的电荷量 q 及放大器的反馈电容 C_F 有关,改变 C_F 的容量大小便可得到所需的电压输出 (C_F 一般取值 $100 \sim 10^4 \text{ pF}$)。而传感器本身的电容 C_s 和电缆电容 C_c 将不影响电荷放大器的输出。

电荷放大器的灵敏度为

$$K = \frac{U_o}{q} = -\frac{1}{C_F} \quad (5-31)$$

由 (5-31) 式可以看出,放大器的输出灵敏度取决于 C_F 。在实际电路中是采用切换运算放大器负反馈电容 C_F 的办法来调节灵敏度的。 C_F 越小则放大器的灵敏度越高。