

# 第3章 压电式传感器



## 3.1 压电效应及压电元件



## 3.2 压电式传感器的等效电路



## 3.3 压电式传感器的测量电路



## 3.4 压电式传感器的应用





# 概述

压电式传感器的工作原理是基于某些介质材料的压电效应，是典型的有源传感器。

- ◆当某些材料受力作用而变形时，其表面会有电荷产生，从而实现非电量测量。
- ◆压电式传感器具有体积小，重量轻，工作频带宽、灵敏度高、工作可靠、测量范围广等特点，因此在各种动态力、机械冲击与振动的测量，以及声学、医学、力学、宇航等方面都得到了非常广泛的应用。





## 3.1 压电效应及压电材料

某些电介质，当沿着一定方向对其施力而使它变形时，其内部就产生极化现象，同时在这它的两个表面上便产生符号相反的电荷，当外力去掉后，其又重新恢复到不带电状态，这种现象称压电效应。

- ◆ 当作用力方向改变时，电荷的极性也随之改变。有时人们把这种机械能转为电能的现象，称为“正压电效应”。相反，当在电介质极化方向施加电场，这些电介质也会产生变形，这种现象称为“逆压电效应”（电致伸缩效应）。



## 3.1 压电效应及压电材料

- ◆具有压电效应的材料称为压电材料，压电材料能够实现机—电能量的相互转换，如图3-1所示。



图3-1 压电效应可逆性





## 3.1 压电效应及压电材料

- ◆ 石英晶体、钛酸钡、锆钛酸铅等材料是性能优良的压电材料。
- ◆ 压电材料可以分为两大类：压电晶体和压电陶瓷。前者为晶体，后者为极化处理的多晶体。
- ◆ 他们都具有较大的压电常数，机械性能良好，时间稳定性好，温度稳定性好等特性，所以是比较理想的压电材料。





## 3.1 压电效应及压电材料

### ◆ 压电材料的主要特性参数有：

- (1) 压电常数：压电常数是衡量材料压电效应强弱的参数，它直接关系到压电输出的灵敏度。
- (2) 弹性常数：压电材料的弹性常数、刚度决定着压电器件的固有频率和动态特性。
- (3) 介电常数：对于一定形状、尺寸的压电元件，其固有电容与介电常数有关；而固有电容又影响着压电传感器的频率下限。
- (4) 机械耦合系数：在压电效应中，其值等于转换





## 3.1 压电效应及压电材料

输出能量（如电能）与输入的能量（如机械能）之比的平方根；它是衡量压电材料机电能量转换效率的一个重要参数。

(5) 电阻压电材料的绝缘电阻：将减少电荷泄漏，从而改善压电传感器的低频特性。

(6) 居里点：压电材料开始丧失压电特性的温度称为居里点。



# 3.1 压电效应及压电材料

## 3.1.1 石英晶体

- ◆ 石英晶体化学式为 $\text{SiO}_2$ （二氧化硅），是单晶体结构
- ◆ 它的转换效率和转换精度高、线性范围宽、重复性好、固有频率高、动态特性好、工作温度高达 $550^\circ\text{C}$ （压电系数不随温度而改变）、工作湿度高达100%、稳定性好。

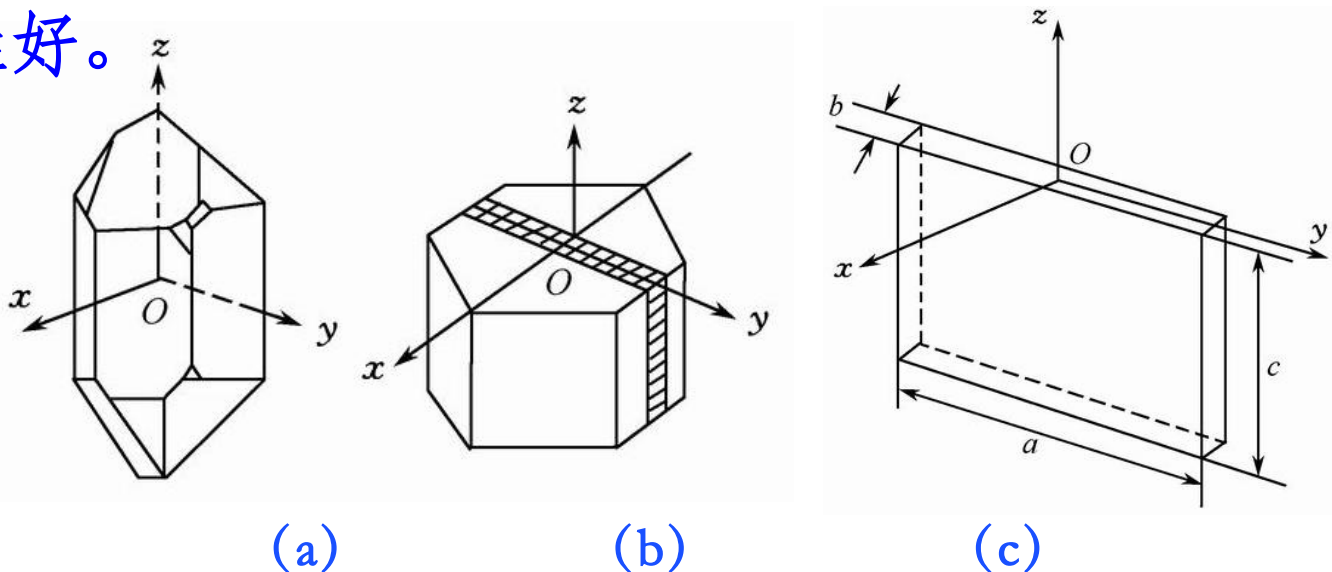


图3-2 石英晶体







## 3.1 压电效应及压电材料

- ◆图3-2 (a) 表示了天然结构的石英晶体外形。它是一个正六面体。石英晶体各个方向的特性是不同的。
- ◆其中纵向轴 $z$ 称为光轴，经过六面体棱线并垂直于光轴的 $x$ 轴称为电轴，与 $x$ 和 $z$ 轴同时垂直的轴 $y$ 称为机械轴。
- ◆通常把沿电轴 $x$ 方向的力作用下产生电荷的压电效应称为“纵向压电效应”，而把沿机械 $y$ 方向的作用下产生电荷的压电效应称为“横向压电效应”。而沿光轴 $z$ 方向受力时不产生压电效应。



## 3.1 压电效应及压电材料

- ◆若从晶体上沿y方向切下一块如图3-2 (c) 所示晶片，当在电轴方向施加作用力 $F_x$ 时，在与电轴x垂直的平面上将产生电荷 $Q_x$ ，其大小为

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

式中：

$d_{11}$ ——x方向受力的压电系数；

$F_x$ ——作用力。

- ◆若在同一切片上，沿机械轴y方向施加作用力 $F_y$ ，则仍在与x轴垂直的平面上产生电荷 $Q_y$ ，其大小为：





## 3.1 压电效应及压电材料

$$Q_y = d_{12} \cdot F_y$$

式中：

$d_{12}$ ——y轴方向受力的压电系数， $d_{12} = -d_{11}$

**a、b**——晶体切片长度和厚度。

电荷 $Q_x$ 和 $Q_y$ 的符号由所受力的性质决定。



# 3.1 压电效应及压电材料

◆ 石英晶体的上述特性与其内部分子结构有关。图3-3是一个单元组体中构成石英晶体的硅离子和氧离子，在垂直于z轴的xy平面上的投影，等效为一个正六边形排列。图中“+”代表 $Si^{4+}$ 离子，“-”代表氧离子 $O^{2-}$

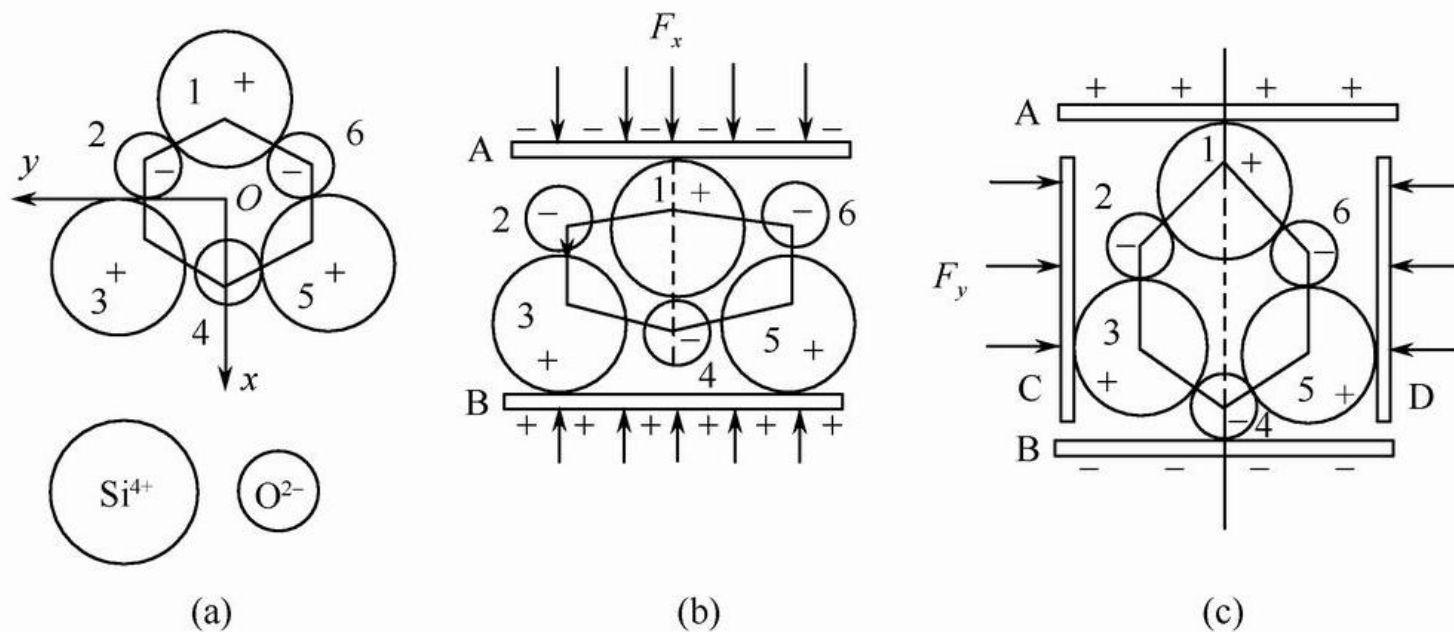


图3-3 石英晶体压电模型



## 3.1 压电效应及压电材料

- ◆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 $120^\circ$  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。
- ◆当石英晶体受到沿 $x$ 轴方向的压力作用时，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。如图3-3 (b) 所示，此时正负电荷重心不再重合，即  $(P_1+P_2+P_3)_x > 0$ 。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。





## 3.1 压电效应及压电材料

- ◆当晶体受到沿 $y$ 轴方向的压力作用时，晶体变形如图3-3 (c) 所示，与图3-3 (b) 情况相似， $P_1$  增大， $P_2$ 、 $P_3$  减小。在 $x$ 轴上出现电荷，它的极性为 $x$ 轴正向为负电荷。在 $y$ 轴方向上不出现电荷。
- ◆如果沿 $z$ 轴方向施加作用力，因为晶体在 $x$ 方向和 $y$ 方向所产生的形变完全相同，所以正负电荷重心保持重合，电偶极矩矢量和等于零。这表明沿 $z$ 轴方向施加作用力，晶体不会产生压电效应。
- ◆当作用力 $F_x$ 、 $F_y$ 的方向相反时，电荷的极性也随之改变。



## 3.2 压电式传感器的等效电路

由压电元件的工作原理可知，压电式传感器可以看作一个电荷发生器。同时，它也是一个电容器，晶体上聚集等量的正负电荷的两表面相当于电容的两个极板，极板间物质等效于一种介质，则其电容量为：

$$C_a = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d} \quad (5-4)$$

式中：

A——压电片的面积；

d——压电片的厚度；

$\varepsilon_0$ ——空气介电常数（其值为  $8.86 \times 10^{-4} F/cm$ ）；

$\varepsilon_r$ ——压电材料的相对介电常数。

## 3.2 压电式传感器的等效电路

- ◆ 压电传感器可以等效为一个与电容相串联的电压源。如图3-5 (a) 所示，电容器上的电压 $U_a$ 、电荷量 $Q$ 和电容量 $C_a$ 三者关系为：

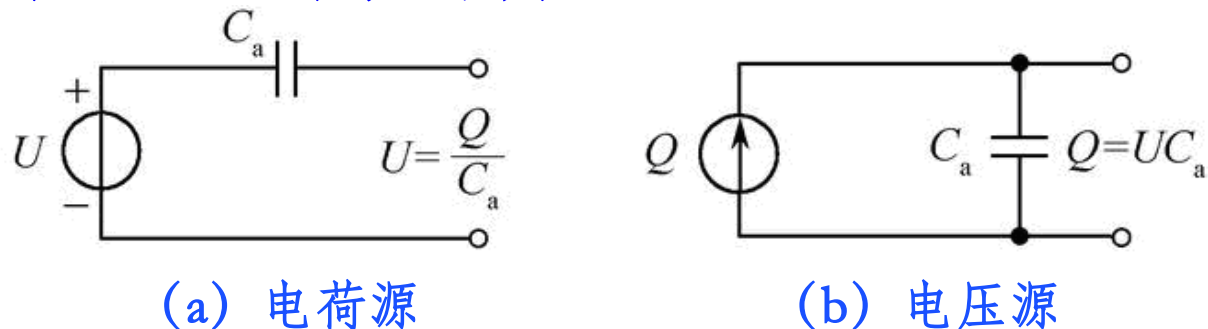


图3-5 压电传感器的等效电路

- ◆ 由图可知，只有在外电路负载无穷大，且内部无漏电时，受力产生的电压 $U$ 才能长期保持不变；如果负载不是无穷大，则电路要以时间常数 $R_L C_e$ 按指数规律放电。压电传感器也可以等效为一个电荷源于电容相并联电路，如图3-5 (b) 所示。



## 3.2 压电式传感器的等效电路

- ◆ 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 $R_a$ ，这样压电传感器在测量系统中的实际等效电路，如图3-6所示。

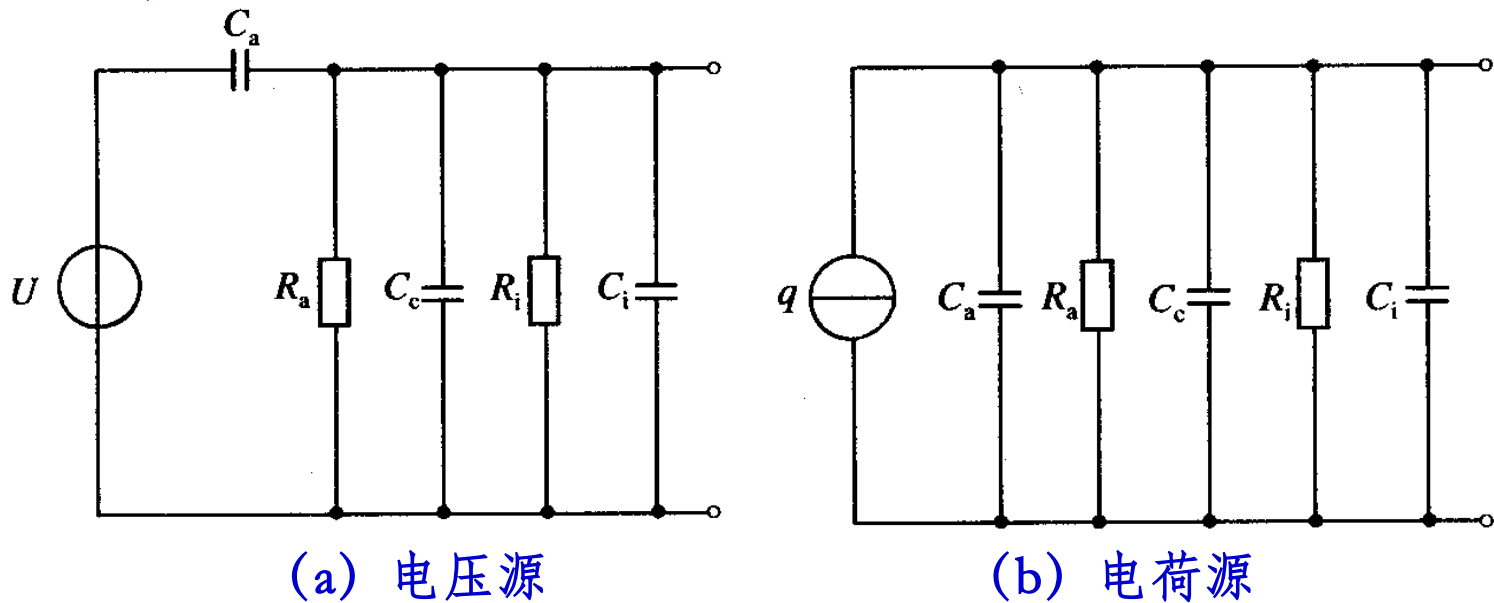


图3-6 压电传感器的实际等效电路



## 3.3 压电式传感器的测量电路

压电传感器本身的内阻抗很高，输出能量较小。

- ◆ 为了保证压电传感器的测量误差较小，它的测量电路通常需要接入一个高输入阻抗的前置放大器，其作用为：
  - 一是把它的高输出阻抗变换为低输出阻抗；
  - 二是放大传感器输出的微弱信号。
- ◆ 压电传感器的输出可以是电压信号，也可以是电荷信号，因此前置放大器也有两种形式：电压放大器和电荷放大器。



## 3.3 压电式传感器的测量电路

### 1. 电压放大器（阻抗变换器）

- ◆ 如图3-6(a)，设电阻  $R = R_a R_i / (R_a + R_i)$ ，电容  $C = C_c + C_i$ ，而压电传感器的开路电压  $u = q / C_a$ ，若压电元件受正弦力  $f = F_m \cdot \sin \omega t$  的作用，则其电压为

$$U = \frac{dF_m}{C_a} \cdot \sin \omega t = U_m \sin \omega t \quad (5-6)$$

式中：

$U_m$ ——压电元件输出电压幅值  $U_m = df_m / C_a$ ；

$d$ ——压电系数。

- ◆ 由此可得放大器输入端电压  $U_i$ ，其复数形式为

$$\dot{U}_i = df \frac{j\omega R}{1 + j\omega R(C_i + C_a + C_c)} \quad (5-7)$$

## 3.3 压电式传感器的测量电路

◆  $\dot{U}_i$  的幅值为  $U_{im}$

$$U_{im} = \frac{dF_m \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_a + C_c + C_i)^2}} \quad (5-8)$$

◆ 输入电压和作用力之间相位差为

$$\Phi = \frac{\pi}{2} - \text{tg}^{-1}[\omega(C_a + C_c + C_i)R] \quad (5-9)$$

◆ 在理想情况下，传感器的绝缘电阻  $R_a$  的电阻值与前置放大器的输入电阻  $R_i$  都为无限大，即  $(\omega R)^2 \cdot (C_a + C_c + C_i)^2 \ll 1$  也无电荷泄漏，那么由式(3-8)可知，理想情况下输入电压幅值  $U_{im}$  为

$$U_{im} = \frac{dF_m}{C_a + C_c + C_i} \quad (5-10)$$



### 3.3 压电式传感器的测量电路

- ◆ 上式表明前置放大器输入电压  $U_{im}$  与频率无关。一般认为  $\omega/\omega_0 > 3$  时，就可以认为  $U_{im}$  与  $\omega$  无关， $\omega_0$  表示测量电路时间常数之倒数，即  $\omega_0 = 1/[R(C_a + C_c + C_i)]$
- ◆ 这表明压电传感器有很好的高频响应，但是，当作用于压电元件的力为静态力 ( $\omega=0$ ) 时，则前置放大器的输入电压等于零，因为电荷会通过放大器输入电阻和传感器本身漏电阻漏掉，所以压电传感器不能用于静态力测量。
- ◆ 式 (3-10) 中  $C_c$  为连接电缆电容，当电缆长度改变时， $C_c$  也将改变，因而  $U_{im}$  也随之变化。因此，压电传感器与前置放大器之间连接电缆不能随意更换，否则将引入测量误差。

## 3.3 压电式传感器的测量电路

- ◆ 图3-7给出了一个电压放大器的具体电路。它具有很高的输入阻抗( $1000M\Omega$ )和很低的输出阻抗( $<100\Omega$ )，因此使用该阻抗变换器可将高阻抗的压电传感器与一般放大器匹配。

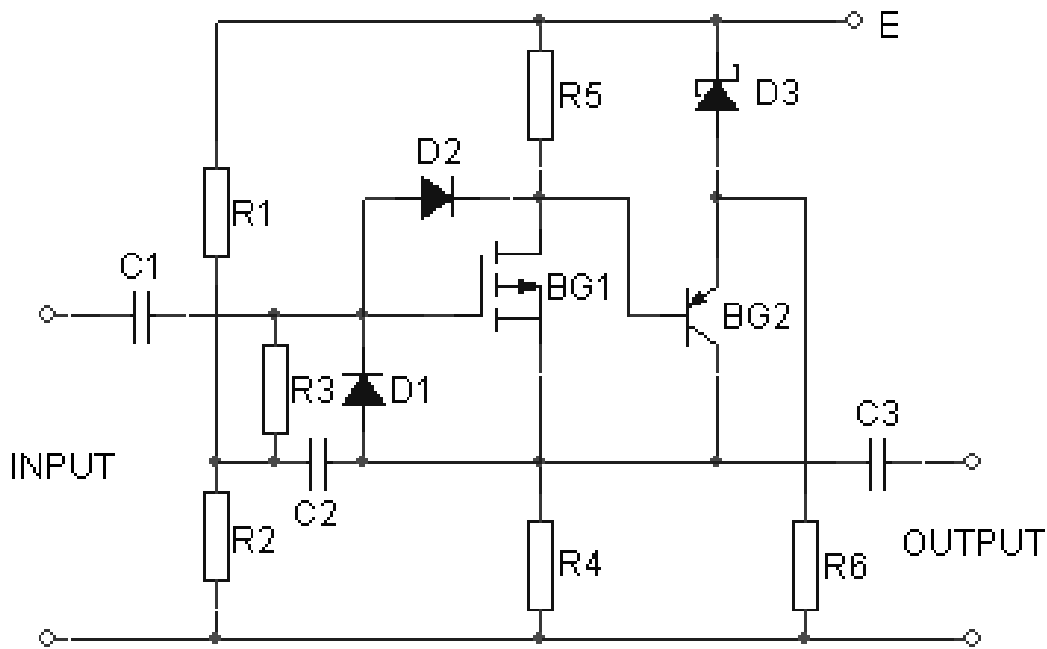


图3-7 电压放大器

### 3.3 压电式传感器的测量电路

- ◆ BG<sub>1</sub>为MOS场效应管，做阻抗变换， $R_3 \geq 100\text{M}\Omega$ ；BG<sub>2</sub>管对输入端形成负反馈，以进一步提高输入阻抗。R<sub>4</sub>既是BG<sub>1</sub>的源极接地电阻，也是BG<sub>2</sub>的负载电阻，R<sub>4</sub>上的交变电压通过C<sub>2</sub>反馈到场效应管BG<sub>1</sub>的输入端，使A点电位提高，保证较高的交流输入阻抗。由BG<sub>1</sub>构成的输入极，其输入阻抗为：

$$R_i = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (5-11)$$

- ◆ 引进BG<sub>2</sub>，构成第二级对第一级负反馈后，其输入阻抗为：

$$R_{if} = \frac{R_i}{1 - A_u} \quad (5-12)$$

- ◆ 式中A<sub>u</sub>是BG<sub>1</sub>源极输出器的电压增益，其值接近1。

## 3.3 压电式传感器的测量电路

- ◆ 所以 $R_{if}$ 可以提高到几百到几千兆欧。由BG1所构成的源极输出器，其输出阻抗为

$$R_0 = \frac{1}{g_m} // R_4 \quad (5-13)$$

式中 $g_m$ 为场效应管的跨导。

- ◆ 电压放大器的应用具有一定的应用限制，压电式传感器在与电压放大器配合使用时，连接电缆不能太长。电缆长，电缆电容 $C_c$ 就大，电缆电容增大必然使传感器的电压灵敏度降低。不过由于固态电子器件和集成电路的迅速发展，微型电压放大电路可以和传感器做成一体，这样这一问题就可以得到克服，使它具有广泛的应用前景。



## 3.3 压电式传感器的测量电路

### 2. 电荷放大器

- ◆ 电荷放大器常作为压电传感器的输入电路，由一个带反馈电容 $C_f$ 的高增益运算放大器构成，电荷放大器可用图3-8所示等效电路，图中 $A$ 为运算放大器增益， $-A$ 表示放大器的输入与输出反向。

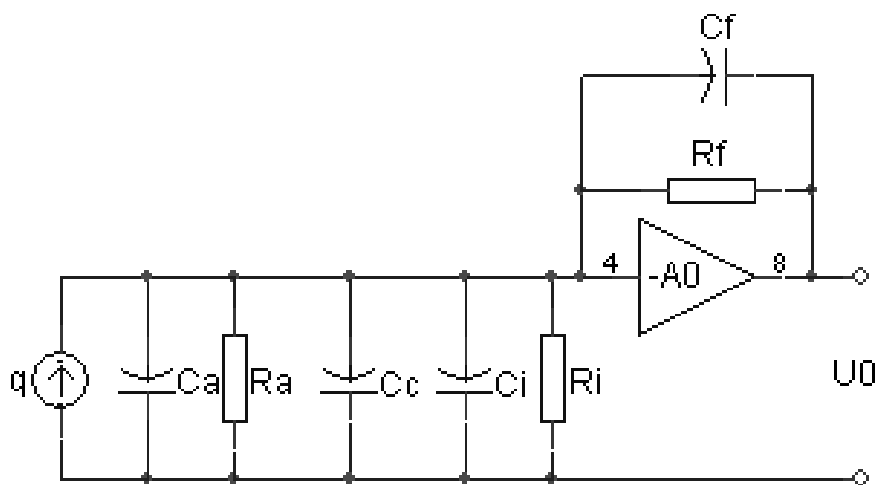


图3-8 电荷放大器等效电路

## 5.3 压电式传感器的测量电路

- ◆ 由于运算放大器输入阻抗极高，放大器输入端几乎没有分流，其输出电压 $U_0$ 为：

$$U_0 = -\frac{KQ}{C_a + C_c + C_i + (1+A)C_f} \quad (5-14)$$

式中：

$U_0$ ——放大器输出电压；

$U_{cf}$ ——反馈电容两端电压。

- ◆ 通常 $A=10^4 \sim 10^6$ ，因此若满足 $(1+K)C_f \ll C_a + C_c + C_i$ 时上式可表示为

$$U_o \approx -\frac{Q}{C_f} \quad (5-15)$$



## 5.3 压电式传感器的测量电路

- ◆由式 (3-15) 可见, 电荷放大器的输出电压  $U_0$  与电缆电容  $C_c$  无关, 且与  $Q$  成正比, 这是电荷放大器的最大特点。
- ◆但电荷放大器的价格比电压放大器高, 电路较复杂, 调整也较困难。
- ◆要注意的是, 在实际应用中, 电压放大器和电荷放大器都应加过载放大保护电路, 否则在传感器过载时, 会产生过高的输出电压。

