

# 第6章 压电传感器

6.1 晶体的压电效应

6.2 压电加速度传感器

6.3 压电谐振式传感器

6.4 声表面波传感器



# 6.1 晶体的压电效应

## 6.1.1 晶体压电效应的说明

当某些晶体沿一定方向伸长或压缩时，在其表面上会产生电荷(束缚电荷)，这种效应称为压电效应。晶体的这一性质称为压电性。具有压电效应的晶体称为压电晶体。压电效应是可逆的，即晶体在外电场的作用下要发生形变，这种效应称为反向压电效应。

晶体的压电效应可用图6.1来加以说明。



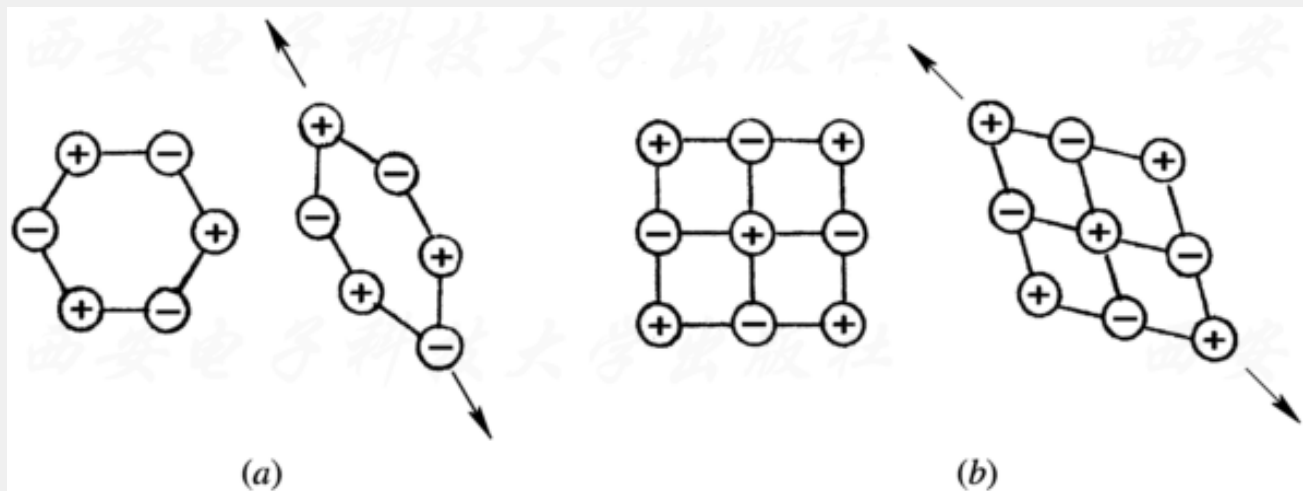


图 6.1 晶体的压电效应

(a) 具有压电效应的晶体；(b) 不具有压电效应的晶体

## 6.1.2 压电方程

晶体的压电效应是一种机电耦合效应。它是由力学量应力 $T$ 和应变 $S$ 与电学量电场强度 $E$ 和电位移 $D$ 之间互相耦合产生的。对于具有压电效应的晶体，不仅电学量 $E$ 和 $D$ 以及力学量 $T$ 和 $S$ 存在着直接的关系，同时还存在力学量和电学量之间的耦合效应。压电方程就是描写力学量间、电学量间以及力学量和电学量相互之间互相联系的关系式。实际上力学量和电学量之间的关系式还和热学量(温度和熵)有关。但对于较快的变化，例如声频或更高的频率，可认为是等熵(绝热)过程。下面的压电方程假定均适合绝热情况。对于等温情况需另加说明。

在电场强度、电位移和应力、应变这四组变量中，可以任选一组力学量和一组电学量作自变量，这就有四种情况，有四组压电方程。

(1) 选取应变分量 $S_k$ 和电位移分量 $D_j$ 为独立变量，得到h型压电方程

$$T_h = c_{hk}^D S_k - h_{jh} D_j \quad i, j = 1, 2, 3$$

$$E_i = -h_{ik} S_k + \beta_{ij}^S D_j \quad h, k = 1, 2, \dots, 6$$

(2) 选取电场强度分量 $E_j$ 和应力分量 $T_k$ 为独立变量，得到d型压电方程

$$S_h = s_{hk}^E T_k + d_{jh} E_j \quad i, j = 1, 2, 3$$

$$D_i = d_{ik} T_k + \epsilon_{ij}^T E_j \quad h, k = 1, 2, \dots, 6$$

(3) 选取应力分量 $T_k$ 与电位移 $D_j$ 为独立变量，得到g型压电方程

$$\begin{aligned} S_h &= s_{hk}^D T_k + g_{jh} D_j & i, j &= 1, 2, 3 \\ E_i &= -g_{ik} T_k + \beta_{ij}^T D_j & h, k &= 1, 2, \dots, 6 \end{aligned}$$

(4) 选取应变分量 $S_k$ 与电场强度分量 $E_j$ 为独立变量，得到e型压电方程

$$\begin{aligned} T_h &= c_{hk}^E S_k - e_{jh} E_j & i, j &= 1, 2, 3 \\ D_i &= e_{ik} S_k + \epsilon_{ij}^S E_j & h, k &= 1, 2, \dots, 6 \end{aligned}$$

在压电方程中，弹性常数、柔性常数各有 36 个，压电常数有 18 个，介电常数、介电隔离率各有 9 个。由于晶体的对称性，独立的常数将有不同程度的减少。例如常用的压电材料，石英晶体和压电陶瓷的压电方程如下：

石英晶体属 32 点群(三角晶系)，由其常数矩阵可写出其 d 型压电方程，即

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + s_{12}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + s_{14}^E T_4 + d_{11} E_1 \quad (\text{纵向振动})$$

$$S_2 = s_{12}^E T_1 + s_{11}^E T_2 + s_{13}^E T_3 - s_{14}^E T_4 - d_{11} E_1 \quad (\text{横向振动})$$

$$S_3 = s_{13}^E T_1 + s_{13}^E T_2 + s_{33}^E T_3$$

$$S_4 = s_{14}^E T_1 - s_{14}^E T_2 + s_{44}^E T_4 + d_{14} E_1 \quad (\text{轮廓切变})$$

$$S_5 = s_{44}^E T_5 + 2s_{14}^E T_6 - d_{14} E_2 \quad (\text{轮廓切变})$$

$$S_6 = 2s_{14}^E T_5 + 2(s_{11}^E - s_{12}^E) T_6 - 2d_{11} E_2 \quad (\text{厚度切变})$$

$$D_1 = d_{11} T_1 - d_{11} T_2 + d_{14} T_4 + \epsilon_{11}^T E_1$$

$$D_2 = -d_{14} T_5 - 2d_{11} T_6 + \epsilon_{11}^T E_2$$

$$D_3 = \epsilon_{33}^T E_3$$

压电陶瓷的常数矩阵同六角晶系 6 mm 点群。其 d 型压电方程如下：

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + s_{12}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3 \quad (\text{横向振动})$$

$$S_2 = s_{12}^E T_1 + s_{11}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3 \quad (\text{横向振动})$$

$$S_3 = s_{13}^E T_1 + s_{13}^E T_2 + s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3 \quad (\text{纵向振动})$$

$$S_4 = s_{44}^E T_4 + d_{15} E_2 \quad (\text{厚度切变})$$

$$S_5 = s_{44}^E T_5 + d_{15} E_1 \quad (\text{厚度切变})$$



$$S_6 = 2(s_{11}^E - s_{12}^E) T_6$$

$$D_1 = d_{15} T_5 + \epsilon_{11}^T E_1$$

$$D_2 = d_{15} T_4 + \epsilon_{11}^E E_2$$

$$D_3 = d_{31} T_1 + d_{31} T_2 + d_{33} T_3 + \epsilon_{33}^T E_3$$

### 6.1.3 压电材料

石英晶体是最早应用的压电材料，至今石英仍是最重要的也是用量最大的振荡器、谐振器和窄带滤波器等元件的压电材料。随着压电传感器的大量应用，在石英之后研制出了许多人造晶体，如罗息盐、ADP、KDP、EDT、DKT和LH等压电单晶体。但由于它们的性能存在某些缺陷，后来随着人造压电石英的大量生产和压电陶瓷性能的提高，这些人造单晶体已逐渐被取代了。

现今压电传感器的材料大多用压电陶瓷。压电陶瓷的压电机理与单晶不同，是利用多晶压电陶瓷的电致伸缩效应。极化后的压电陶瓷可以当作压电晶体来处理。当前常用的压电陶瓷是锆钛酸铅(PZT)。

另外，铌酸锂和钽酸锂大量用作声表面波(SAW)器件。此外，氧化锌和氮化铝等压电薄膜已是当今微波器件的关键材料。

压电单晶和压电陶瓷都是脆性材料。而以聚偏二氟乙烯(PVDF)为代表的压电高聚物薄膜，压电性强，柔性好，特别是声阻抗与水和生物组织接近，是制作传感器的良好材料。用压电陶瓷和高聚物复合而成的压电复合材料也已在压电传感器领域中得到应用。



## 6.2 压电加速度传感器

### 6.2.1 压电加速度传感器的工作原理

#### 1. 原理

图6.2为压电加速度传感器的原理图。它由质量块、压电元件和支座组成。支座与待测物刚性地固定在一起。当待测物运动时，支座与待测物以同一加速度运动，压电元件受到质量块与加速度相反方向的惯性力的作用，在晶体的两个表面上产生交变电荷(电压)。当振动频率远低于传感器的固有共振频率时，传感器的输出电荷(电压)与作用力成正比。电信号经前置放大器放大，即可由一般测量仪器测试出电荷(电压)大小，从而得知物体的加速度。

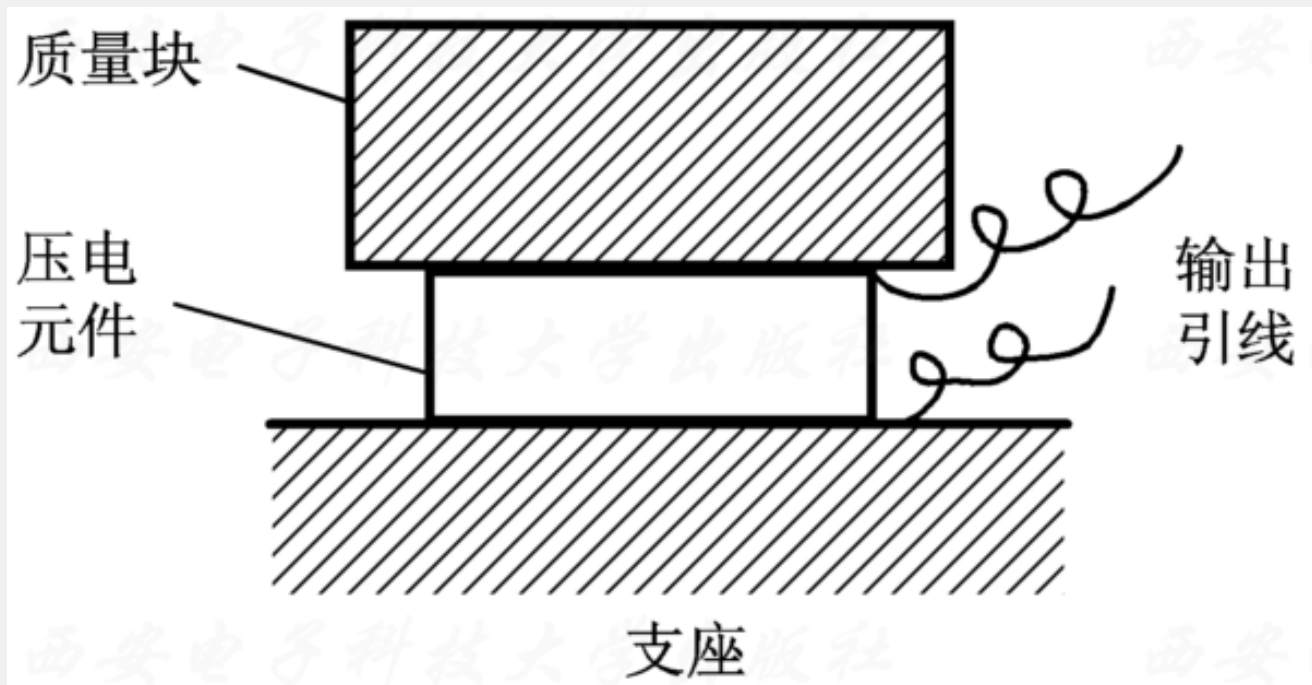


图 6.2 压电加速度传感器原理图

## 2. 灵敏度公式的推导

如图6.3所示，作用于压电元件两边的力为

$$F_{\text{上}} = Ma$$

$$F_{\text{下}} = (M+m)a$$

式中， $M$ 为质量块质量， $m$ 为晶片质量， $a$ 为物体振动加速度，晶片中的任一截面上的力为

$$F = Ma + ma \left(1 - \frac{z}{l}\right)$$

式中， $l$ 为晶片厚度。平均力为

$$\bar{F} = \frac{1}{l} \int_0^l \left[ Ma + ma \left(1 - \frac{z}{l}\right) \right] dz = \left( M + \frac{1}{2}m \right) a$$

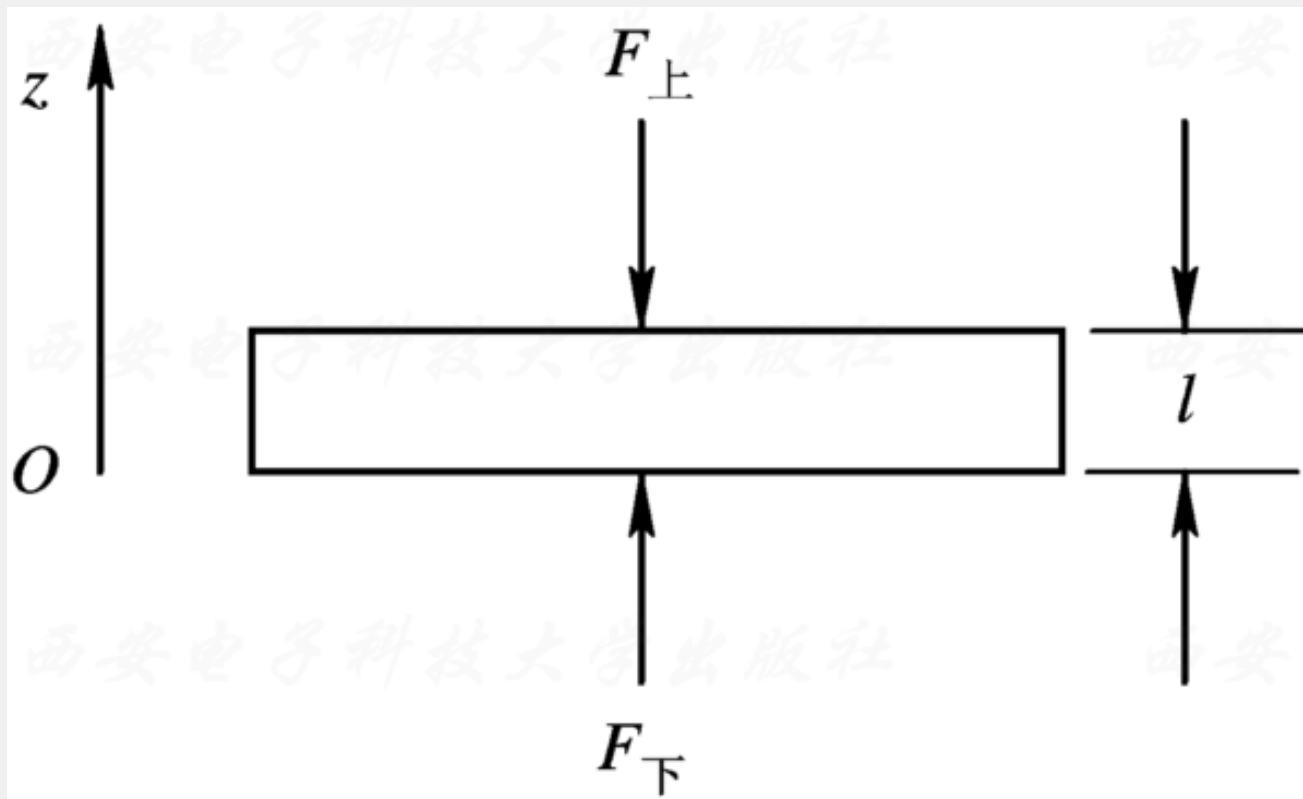


图6.3 作用于压电元件两边的力

设晶片为压电陶瓷，极化方向在厚度方向(z方向)。由于作用力沿着z方向，故这时只有 $T_3$ 不等于零，其平均值为

$$\bar{T}_3 = \frac{1}{A} \left( M + \frac{1}{2}m \right) a$$

选用d型压电方程，得

$$D_3 = d_{33} \bar{T}_3$$

$$Q = D_3 A = d_{33} \left( M + \frac{1}{2}m \right) a$$

式中， $A$ 为晶片电极面面积。质量块一般采用质量大的金属如钨或其他金属制成，而晶片很薄，即有 $M \gg m$ ，故上式通常写为

$$Q = d_{33} M a$$

$a=g$ (重力加速度)时得到的电荷 $Q$ 值, 常称为灵敏度, 单位记为 $C/g$ , 即灵敏度为一个 $g$ 产生的电荷。上式为灵敏度的电荷表示法。灵敏度亦可用开路输出电压表示, 因为

$$U = \frac{Q}{C_d}$$

式中,  $C_d$ 为晶片的低频电容(自由电容)

$$C_d = \frac{\epsilon_{33}^T A}{l}$$

所以

$$U = \frac{d_{33} l M a}{\epsilon_{33}^T A}$$



### 3. 固有共振频率

由上面的灵敏度公式可见，在低频时灵敏度是一常数，它和压电常数成正比，和质量块的质量成正比。在较高的频率下该公式不适用，特别到传感器的固有共振频率附近，灵敏度急剧变化(增大)，该公式一般在传感器固有共振频率的 $1/2 \sim 1/5$ 以下使用。可以近似地把质量块看成一个纯质量(忽略其弹性)，晶片看成一纯弹性元件(忽略其质量)来计算传感器的固有频率。如将晶片看成一弹簧，则由定义可求出其劲度系数为

$$k = \frac{A}{S_{33}l} = \frac{EA}{l}$$

式中， $E$ 为压电晶片的杨氏模量。则固有频率

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$$

### 6.2.2 压电加速度传感器的结构

图 6.4(a)为常用的压缩式压电加速度传感器。这是目前最常见的一种。结构简单，装配较为方便。为便于装配和增大电容量常用两片极化方向相反的晶片，电学上并联输出。采用石英晶片时也有采用四片晶片并联的方式。

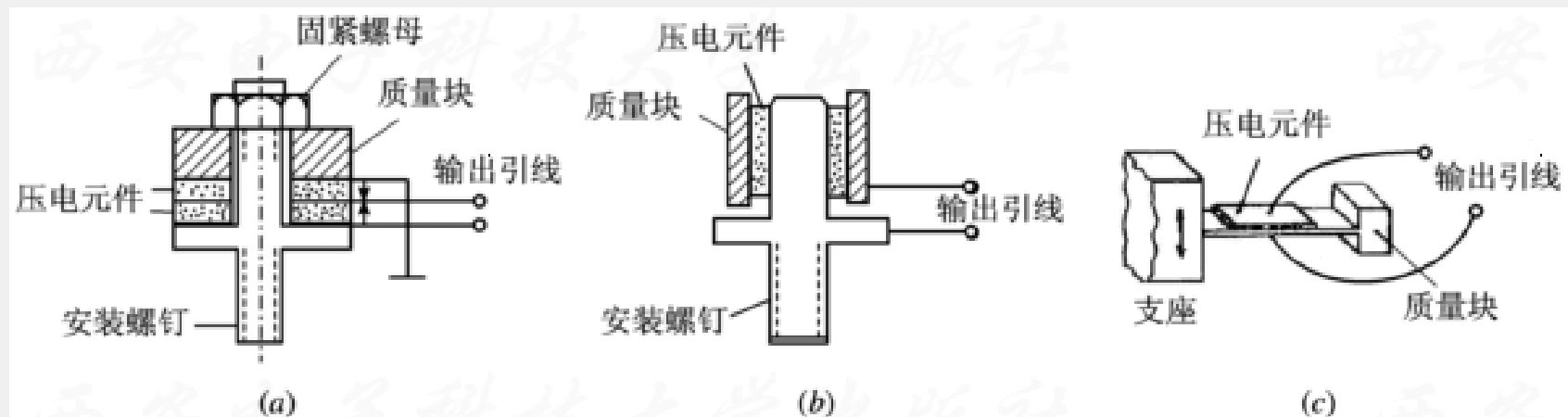


图 6.4 压电加速度传感器的几种结构

图6.4(b)是剪切式压电加速度传感器，采用剪切应力实现压电转换。管式压电元件(极化方向平行于轴线，电极面在内外圆柱面上)紧套在金属圆柱上，在压电元件外径上再套上惯性质量块，相互之间用导电胶粘结。工作原理是：如传感器感受向上的运动，金属圆柱向上运动，由于惯性质量环保持滞后，这样压电元件就受剪切应力作用，从而在压电元件的内外表面上产生电荷；如果传感器感受向下的运动，则压电元件内外表面上的电荷极性相反。这种结构形式的传感器灵敏度高，横向灵敏度小，而且能减小基座应变的影响。剪切式压电传感器容易小型化，有很高的固有频率，所以频响范围宽，适于测量高频振动。但是，由于压电元件、金属圆柱以及惯性质量环之间粘结较难，装配成功率较低。

图6.4(c)为弯曲式压电加速度传感器。压电晶片粘贴在悬臂梁的侧面，悬臂梁的自由端装配质量块，固定端与基座连接。振动时，悬臂梁弯曲，侧面受到拉伸压缩，使压电元件发生形变，从而输出电信号。也可用圆板代替悬臂梁，在圆周装配质量块，在圆板表面上安装压电元件。弯曲式压电加速度传感器固有共振频率低，灵敏度高，适用于低频测量。缺点是体积大，机械强度较前两种差。

采用不同的结构设计和选用不同性能的压电材料，可以得到满足各种使用要求的压电加速度传感器。表 6.1 给出了三种基本结构的加速度传感器的一般性能。

表 6.1 加速度传感器的一般性能

结构类型	压缩型	切变型	弯曲型
灵敏度/PC/g	170	300	4900
电容量/pF	1000	900	7000
频率响应/Hz	4~8000	2~7000	1~100
固有振动频率/Hz	32 000	30 000	1200
耐振性/g	4000	2500	50

表 6.2 列出了一种市售压电加速度传感器的主要技术指标，供参考。这种压电加速度传感器采用剪切设计，内装集成电路，是一种低阻抗电压输出加速度传感器。图 6.5 是这种压电加速度传感器的外形图。

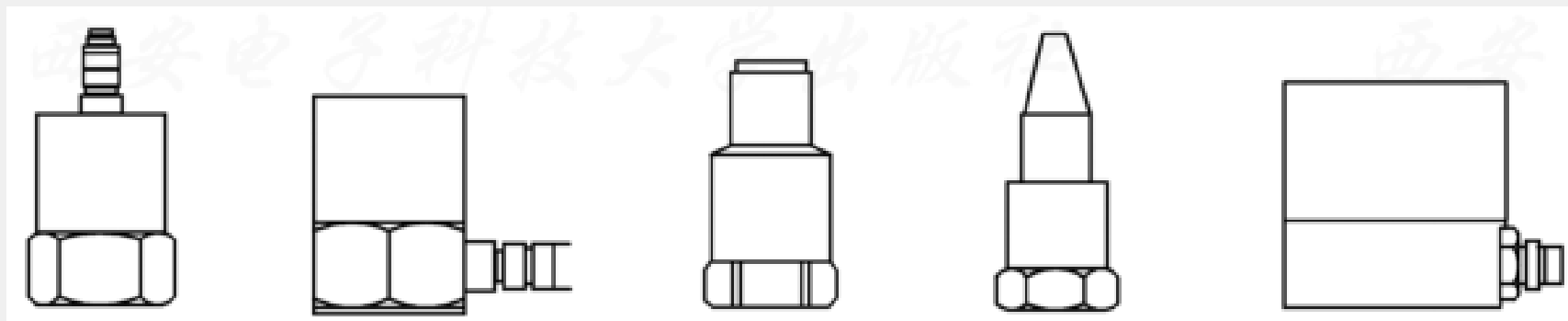


图 6.5 一种压电加速度传感器的外形

## 表 6.2 一种市售压电加速度传感器的主要技术指标

技术指标/单位	型号	111/112	121/122	131/132	141/142	151/152	161/162
灵敏度/ $\text{mV}/\text{ms}^{-2}$		1	2	5	10	25	50
频率范围( $\pm 5\%$ )/Hz		0.5~10000	0.5~8000	0.5~6000	0.5~8000	0.5~400	0.5~2500
频率范围( $\pm 10\%$ )/Hz		0.35~12000	0.35~12000	0.35~10000	0.35~10000	0.35~6000	0.35~4000
分辨率/ $\text{ms}^{-2} \cdot \text{rms}$		0.02	0.01	0.004	0.002	0.001	0.004
输出阻抗/ $\Omega$		<100	<100	<100	<100	<100	<100
安装谐振频率/kHz		48	40	32	29	18	15
最大加速度/ $\text{m}/\text{s}^2$		10000	5000	1000	500	250	100
直流偏置电压/V		12	12	12	12	12	12
基座应变灵敏度/ $\text{s}^{-2}/\text{m}\epsilon$		<0.05	<0.05	<0.02	<0.02	<0.01	<0.005
供电电源/V		18~30	18~30	18~30	18~30	18~30	18~30
重量/g		12	13	14	15	25	38
外形尺寸-顶端输出/mm		13×19×26	13×19×26	13×19×26	13×19×26	16×21×28	18×27×34
外形尺寸-侧端输出/mm		13×18×19	13×18×19	13×18×19	13×18×19	16×21×22	18×27×34
安装螺钉		M5	M5	M5	M5	M5	M5



### 6.2.3 压电加速度传感器的等效电路

压电元件是压电式传感器的敏感元件。当它受到外力作用时，就会在电极上产生电荷，因此，可以把压电式传感器等效为一个电荷源与一个电容并联的电荷发生器，等效电路如图6.6(a)所示。由于电容上的(开路)电压

$$U = \frac{q}{C_d}$$

因此压电式传感器也可以等效为一个电压源和一个电容串联的电压源，等效电路如图6.6(b)所示。

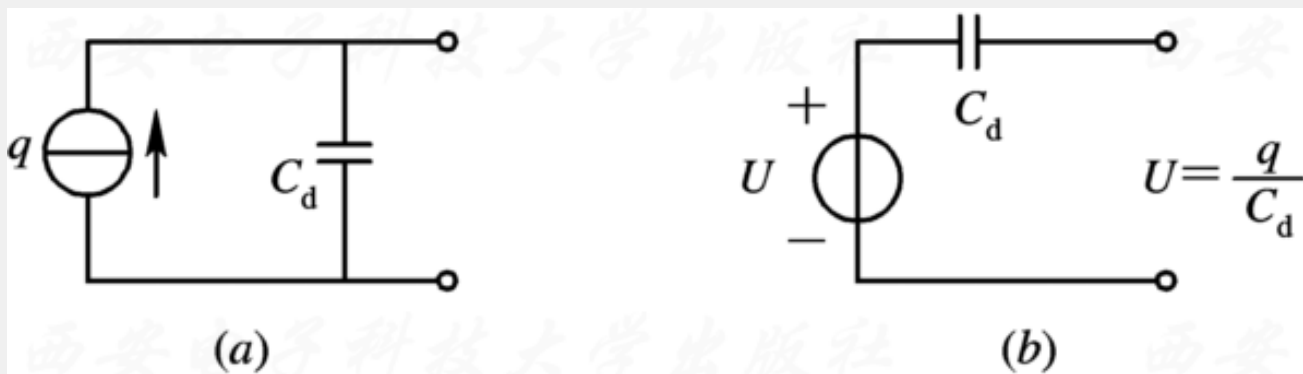


图 6.6 压电加速度传感器的等效电路

(a) 等效电荷源；(b) 等效电压源

当压电式传感器与测量电路配合使用时，方块图如图6.7所示。这样在等效电路中就必须将前置放大器的输入电阻 $R_i$ 、输入电容 $C_i$ ，以及低噪声电缆的电容 $C_c$ 包括进去。因此，当考虑了压电元件的绝缘电阻 $R_d$ 以后，完整的等效电路可表示成如图6.8所示的电荷等效电路(a)和电压等效电路(b)。这两种等效电路是完全等效的。

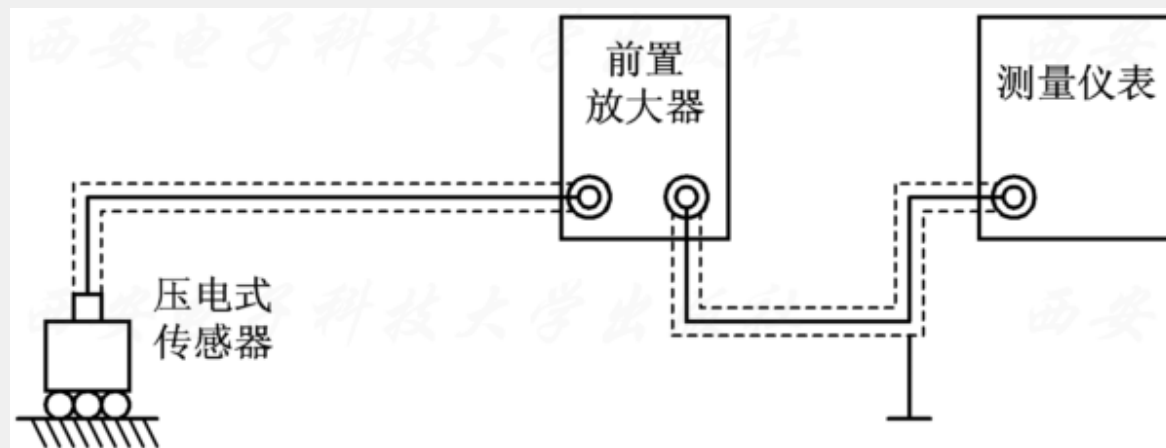


图6.7 测量电路方块图

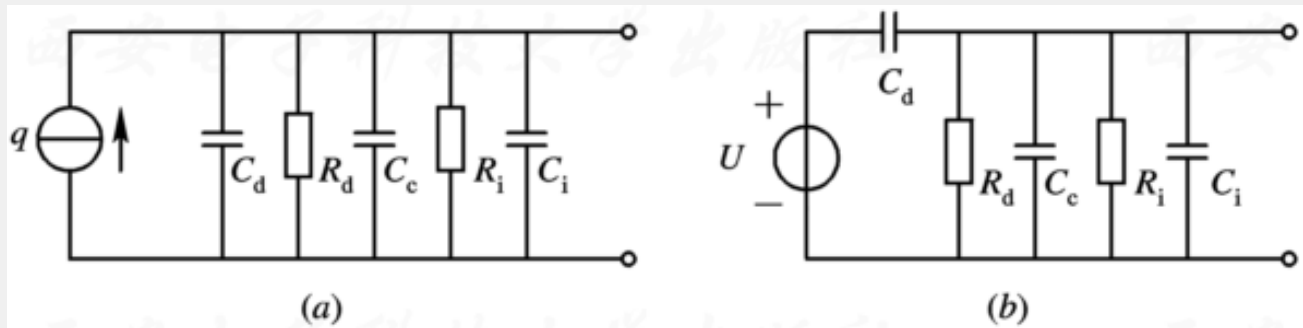


图 6.8 完整的等效电路

(a) 电荷等效电路；(b) 电压等效电路

由于压电传感器的内阻抗很高、输出电信号很弱，一般需将电信号经高输入阻抗的前置放大器放大再进行传输、处理和测量。前置放大器的主要作用是将压电传感器的高阻抗输出变换成低阻抗输出，也起放大弱信号的作用。压电传感器的输出信号经过前置放大器的阻抗变换和放大后，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。前置放大器应距传感器尽量近，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输入阻抗的前置放大器。

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成比例；另一种是电荷放大器，其输出电压与输入电荷成比例。这两种放大器的主要区别是：使用电压放大器时，测量系统的输出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差不多可以忽略不计，允许使用很长的电缆，但它与电压放大器比较，价格要高得多，电路也比较复杂，调整又比较困难。有关电压放大器和电荷放大器的原理和电路，请参阅第十一章。



## 6.3 压电谐振式传感器

### 6.3.1 石英晶体谐振式温度传感器

#### 1. 工作原理

压电谐振式传感器是利用压电晶体谐振器的共振频率随被测物理量变化而变化进行测量的。压电晶体谐振器常采用厚度切变振动模式AT切或BT切型的石英晶体制作。当电极上加上电激励信号时，利用逆压电效应，振子将按其固有共振频率或其泛音产生机械振动，与此同时按照正压电效应电极板上又将出现交变电荷，通过与外电路连接的电极对振子予以适当的能量补充，便可构成使电和机械的振荡等幅地持续下去的振荡电路。图6.9为放大器表示法的压电晶体振荡电路。

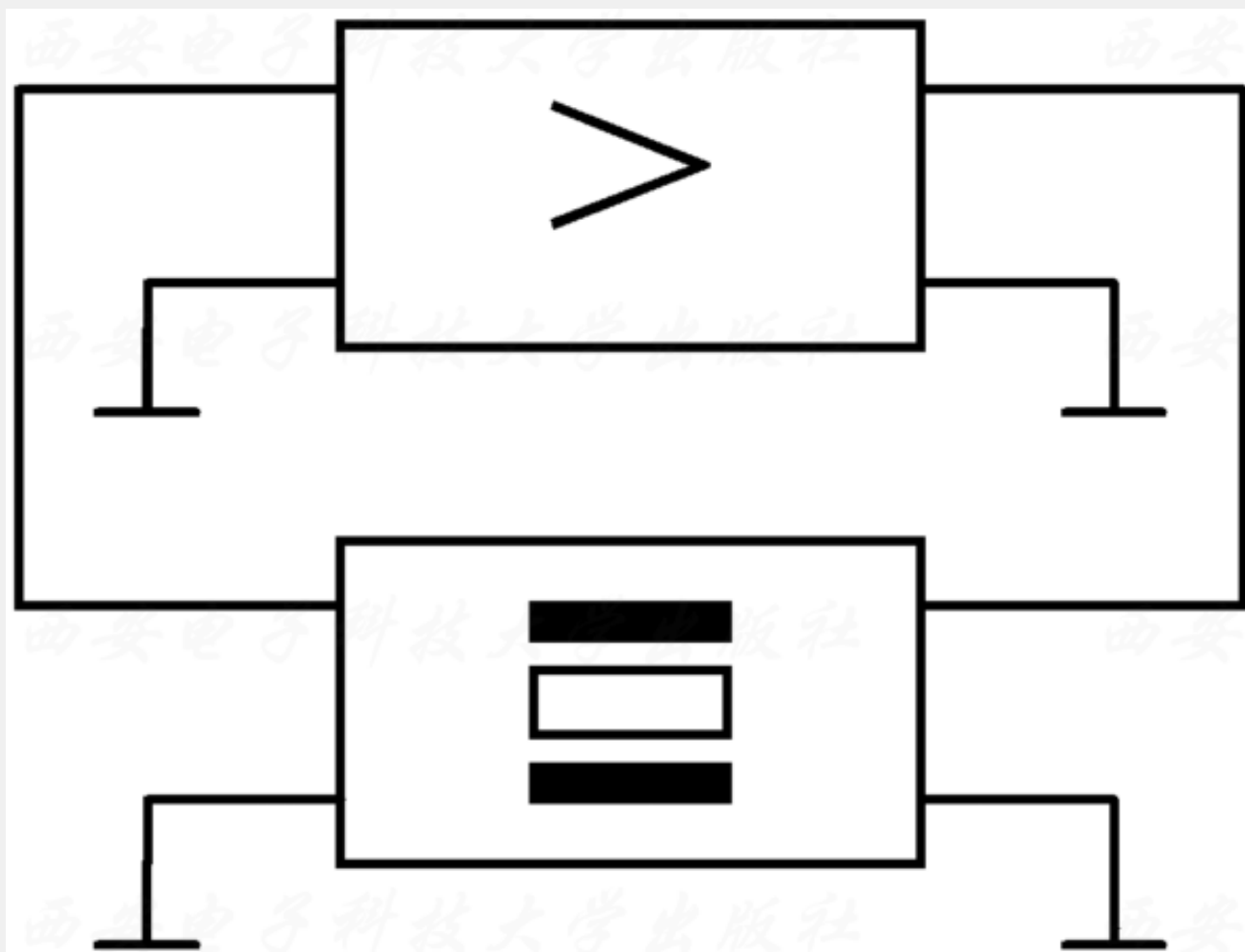


图 6.9 压电晶体振荡电路



石英晶体谐振式温度传感器属于热敏感型压电式谐振传感器，其工作原理基于压电谐振器对温度的热敏感性。用于稳频的石英晶体振荡器要求很高的温度稳定性，为此通常选

择频率温度系数很小的AT切—— $(yxl)35\frac{1}{4}^{\circ}$ 、BT切——

—— $(yxl)-49^{\circ}$ 晶片。相反，石英晶体作为温度敏感元件时，则要求有较大的频率温度系数。

Y切的晶体作厚度剪切模振动时有正的频率温度系数，在长度方向上振动时有负的频率温度系数。总的温度系数可以从 $-20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 到 $+100 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。X切的晶体在厚度方向上振动时，频率温度系数近似为 $-20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。可根据对频率温度系数的要求加以选择。🌿

可根据温度每变化 $1^{\circ}\text{C}$ 振荡频率变化若干Hz的要求与晶体的频率温度系数来确定振荡电路的基本共振频率。🌿

一种具有线性温度—频率特性的石英切型，是如图6.10所示的LC切—— $(yxw1)11^{\circ}10'/9^{\circ}24'$ 的平凸透镜形谐振器。当谐振器的直径为6.25 mm，表面曲率半径约为125 mm时，谐振频率取28 MHz (三次谐波)，可满足上例要求。



图 6.10 LC切平凸透镜形谐振器

## 2. 结构和电路框图

谐振器置于充氦气TO-5型三极管壳内，管壳内压力约133 Pa。为了降低热惰性，压电元件置于外壳的上盖附近，使其与上盖的间隙尽量小。该温度传感器在10~9000 Hz的频率范围内，经受单次冲击达 $10^4$  g、振动加速度幅值达 $10^4$  m/s<sup>2</sup>的情况下，仍能保持其初始灵敏度。其他性能指标为：分辨率0.0001 °C，绝对误差0.02 °C，温度频率特性的非线性为0.05 °C(0~100 °C)，热惰性时间常数为1 s(在水中)。与该传感器配套的测温仪电路框图如图6.11所示。

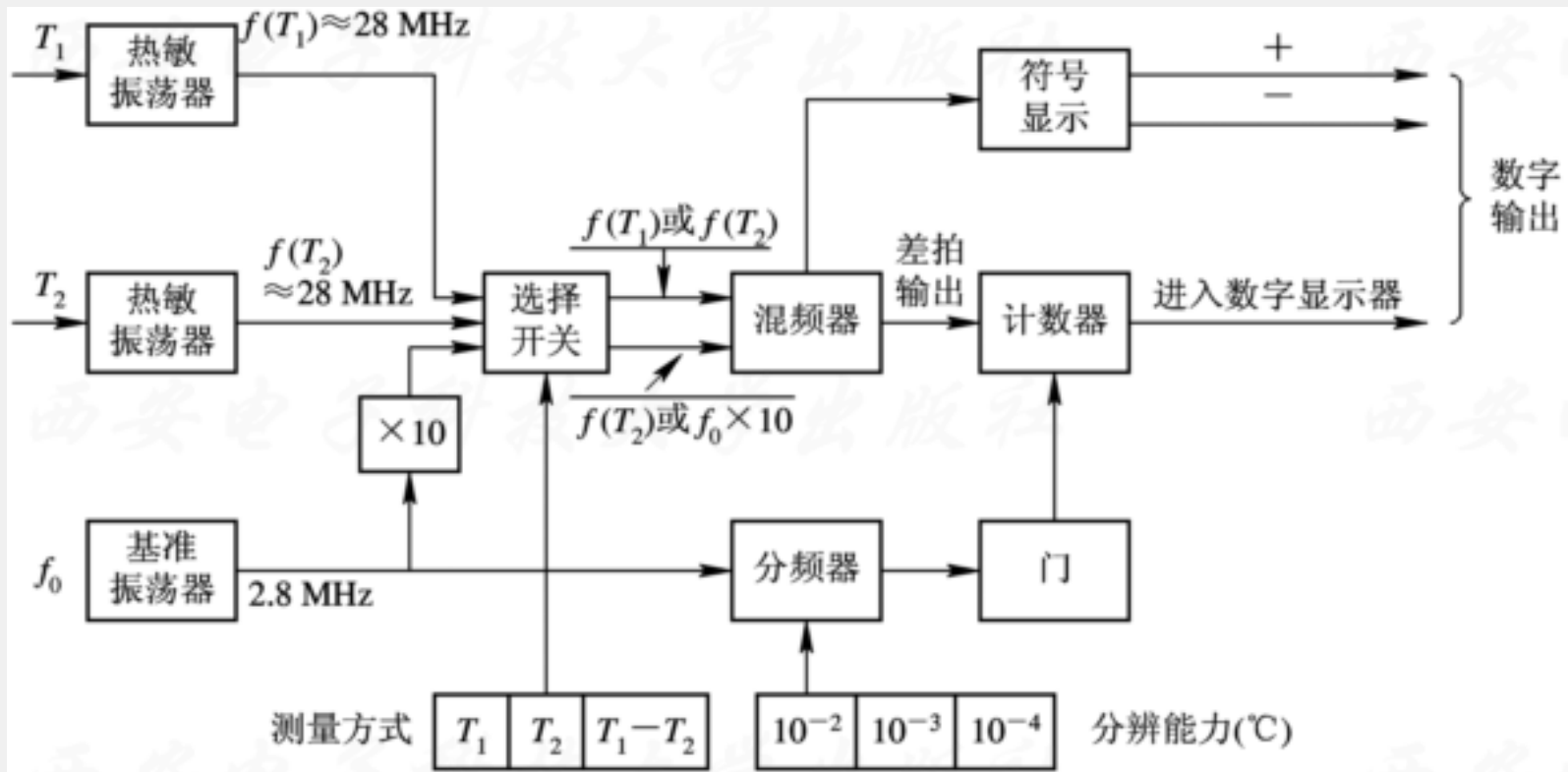


图 6.11 测温仪电路框图

## 6.3.2 石英晶体谐振式压力传感器

### 1. 工作原理

厚度剪切模的石英振子固有共振频率为

$$f = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{C_{66}^D}{\rho}}$$

可见，频率与厚度 $h$ 、密度 $\rho$ 、厚度剪切模量 $C_{66}^D$ 三者均有关系。当石英振子受静态压力作用时，振子的共振频率将发生变化，并且频率的变化与所加压力呈线性关系。这一特有的静应力—频移效应主要是因 $C_{66}^D$ 随着压力变化产生的。图6.12示出了AT切型振子频率与(不同应力作用角 $\alpha$ )压应力的关系曲线。

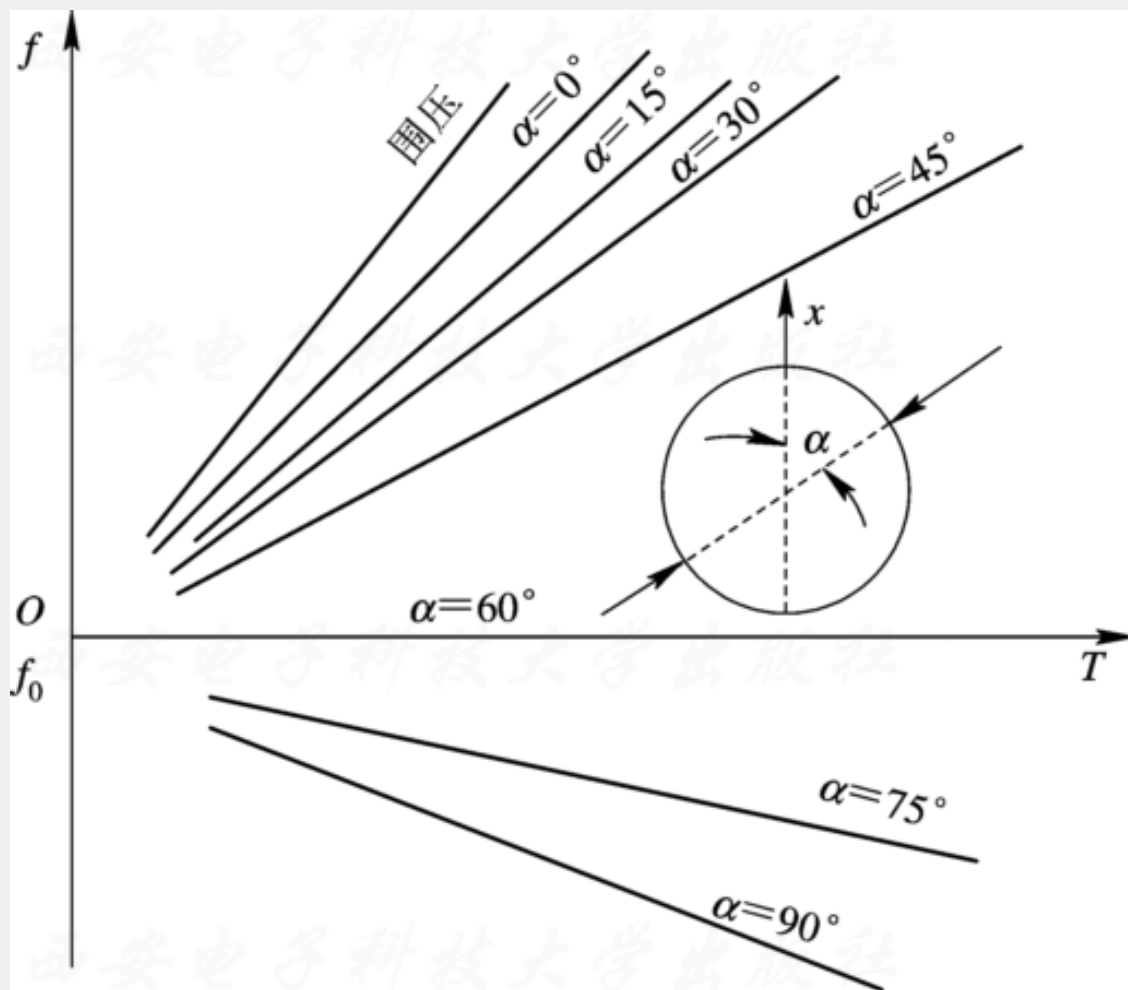


图 6.12 AT切型振子频率与压应力的关系曲线

## 2. 结构和电路框图

一种较好的石英谐振压力传感器的石英谐振器QPT的结构如图6.13所示。它由石英的薄壁圆柱筒(3)、石英谐振器(2)、石英端盖(1、4)以及电极(6、7)等部分组成。其关键元件是一个频率为5 MHz的精密透镜形石英谐振器，位于石英圆柱筒内。圆柱筒空腔(5、8)内充氦气，用石英端盖进行密封。为了消除热应力，筒和盖相对于结晶轴的取向一致，以保证所有方向的线膨胀系数相等，或者振子和圆筒为整体结构，由一块石英晶体加工而成。石英圆筒能有效地传递振子周围的压力，并有增压作用。在传感器内部采用双层恒温器，以保证传感器工作温度的稳定(误差不大于 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ )。被测压力通过隔离膜片由高弹性低线胀系数的液体介质传递给石英谐振器。这种传感器可以测量液体的压力，量程达到70 MPa。



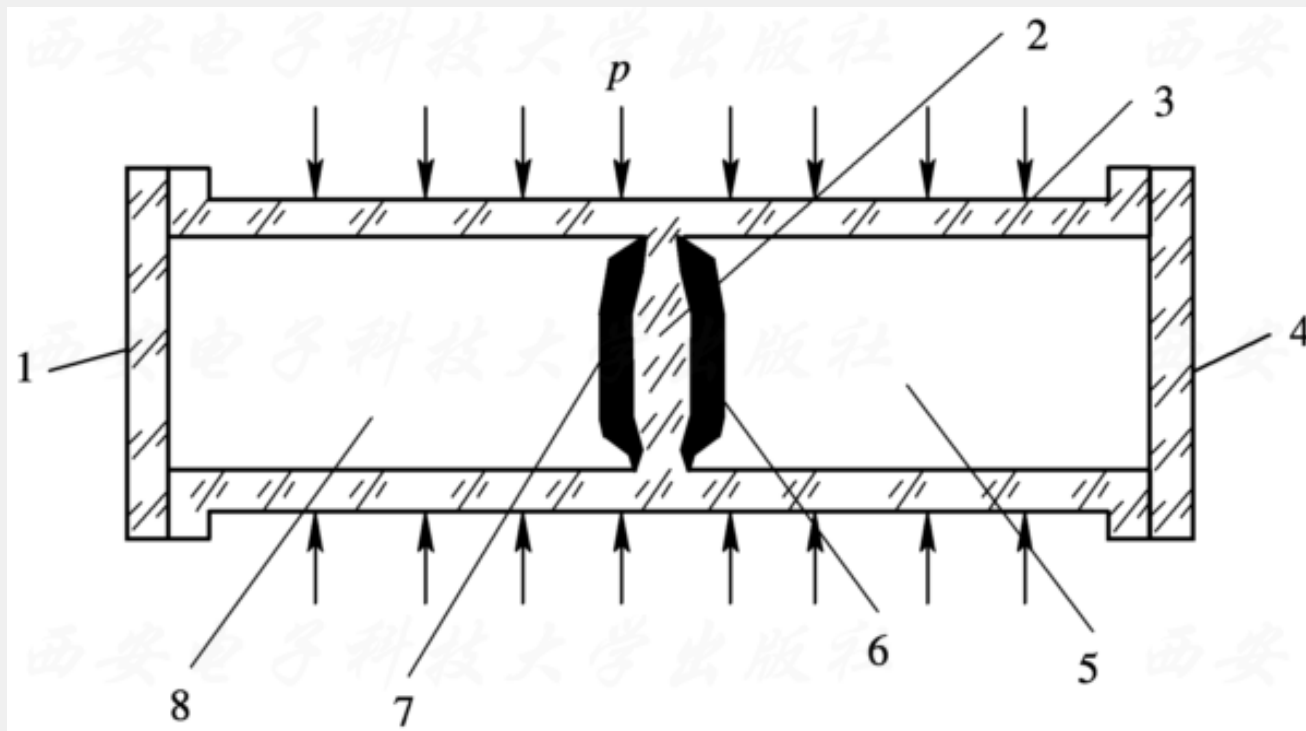


图 6.13 石英谐振器QPT的结构

图6.14为这种石英谐振式压力传感器的结构。图中QPT靠薄弹簧片N悬浮于传压介质油O中。压力容器由铜套筒C和钢套筒S构成，隔膜D与钢套筒S连接，E为QPT的电接头。QPT的温度由内加热器HI和外加热器HO控制。当传感器工作时，可使QPT保持在 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温以内，从而使振子达到零温度系数。隔膜D是容器内的油和外压力介质的分界层。液体油O(合成磷酸盐脂溶液)热膨胀系数比较低，以便减小因温度变化引起的液体油压变化而造成的(温度)读数误差。端盖用不锈钢制造，P为压力进口。

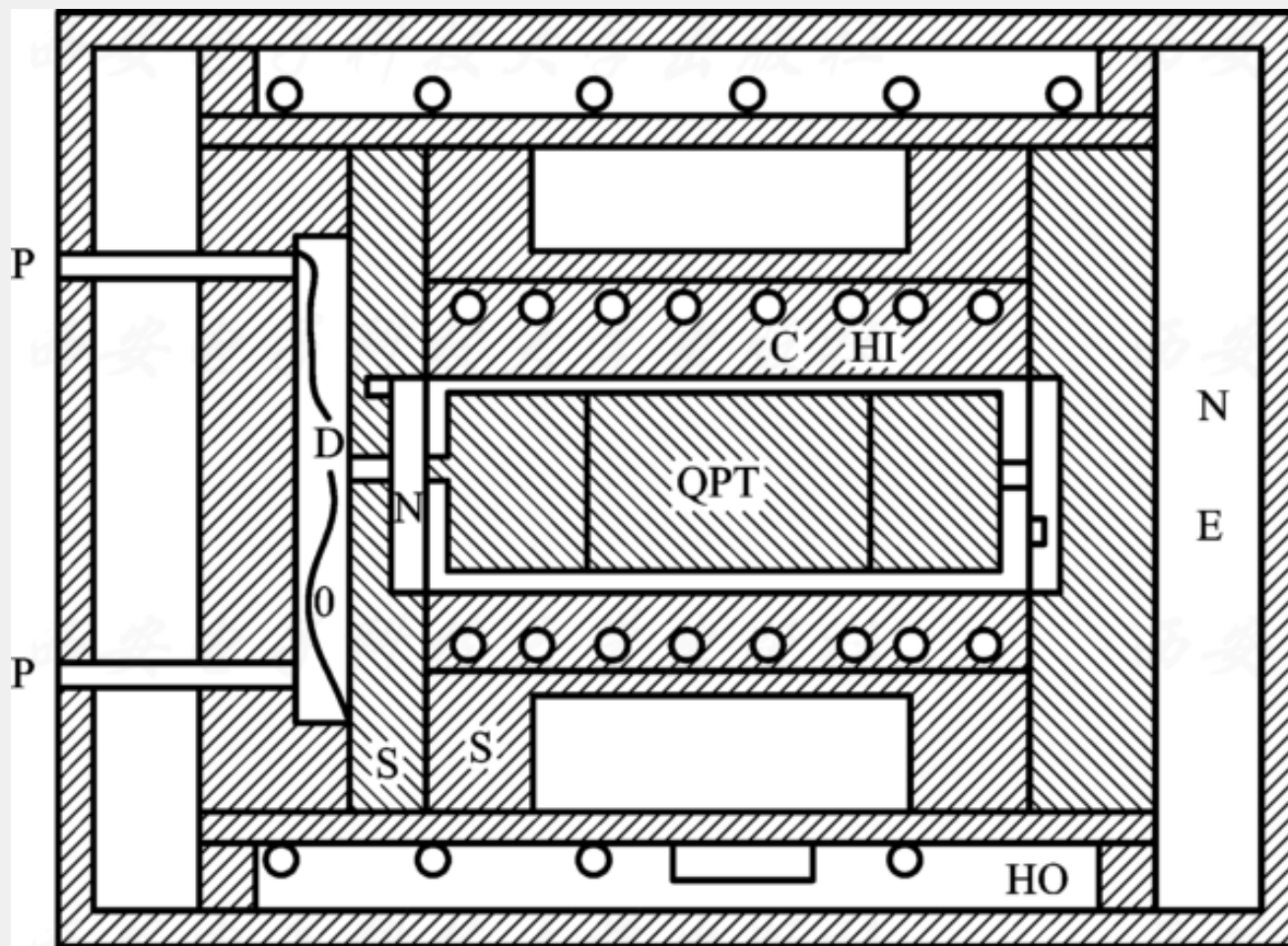


图6.14 石英谐振式压力传感器的结构

与传感器配套实现数字测量的电路框图如图6.15所示。

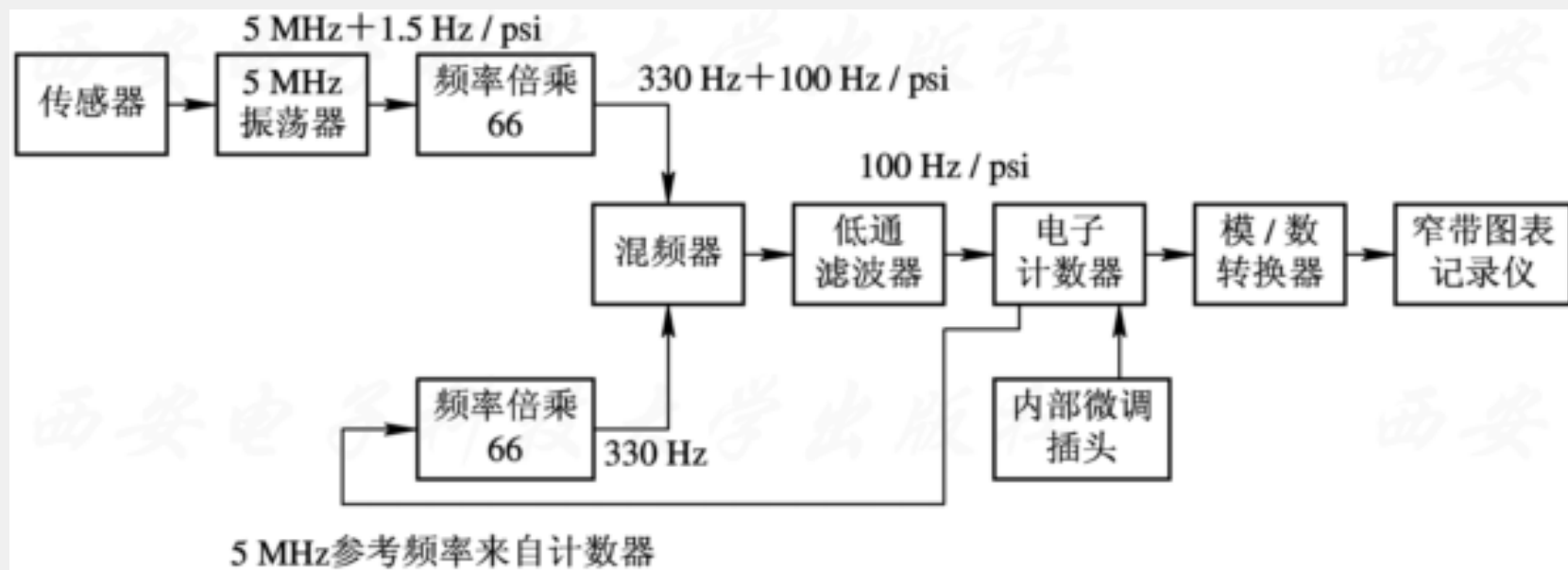


图6.15 与传感器配套实现数字测量的电路框图

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/277111143112006112>