



传感器原理与工程应用

Principle and Application of Sensors

第5章 压电式传感器·加速度测量

电子工业出版社

本章内容

- 5.1 压电效应与压电方程
- 5.2 压电材料及其主要特性
- 5.3 压电元件的常用结构形式
- 5.4 压电式传感器的等效电路与测量电路
- 5.5 加速度测量基本知识
- 5.6 压电式加速度传感器设计
- 5.7 其它加速度传感器

概述

压电式传感器是一种自发电式传感器。它以某些电介质的压电效应为基础，在外力作用下，在电介质表面产生电荷，从而实现非电量电测的目的。

压电传感元件是力敏感元件，它可以测量最终能变换为力的那些非电物理量，例如动态力、动态压力、振动加速度等，但不能用于静态参数的测量。

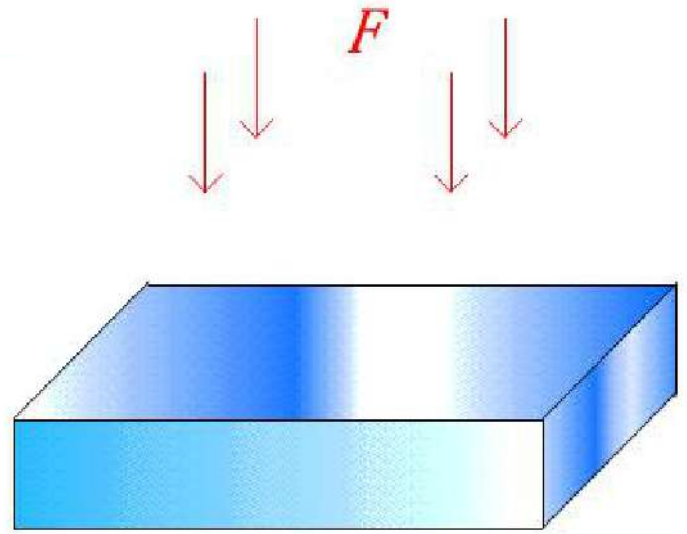
压电式传感器具有体积小、质量轻、频响高、信噪比大等特点。由于它没有运动部件，因此结构坚固、可靠性、稳定性高。

5.1 压电效应与压电方程

5.1.1 压电效应

(Piezoelectric-effect)

某些电介质，当沿着**一定方向**对其施力而使它变形时，内部就产生极化现象，同时在它的**一定表面**上产生电荷，当外力去掉后，又重新恢复不带电状态的现象。当作用力方向改变时，电荷极性也随着改变。输出电压的频率与动态力的频率相同；当动态力变为静态力时，电荷将由于表面漏电而很快泄漏、消失。



压电效应演示

逆压电效应（电致伸缩效应）：

当在电介质的极化方向施加电场，这些电介质就在一定方向上产生机械变形或机械压力，当外加电场撤去时，这些变形或应力也随之消失的现象。



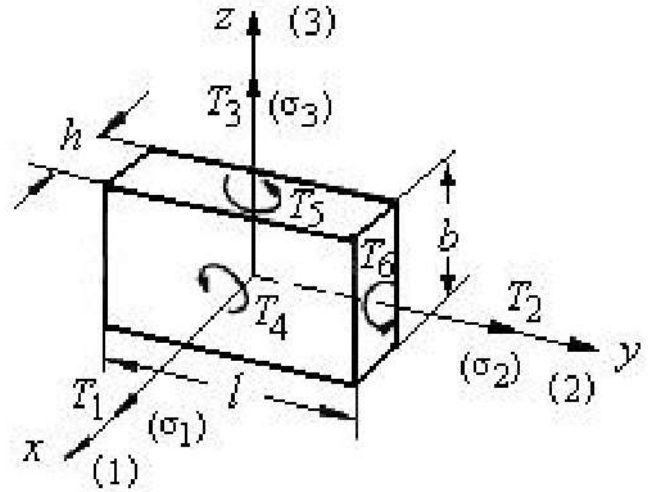
压电材料在外力作用下产生的表面电荷常用压电方程描述，为：

$$q_i = d_{ij} \sigma_j \quad \text{或} \quad Q_i = d_{ij} F_j$$

式中， q_i — i 面上的电荷密度 (C / cm^2)； Q_i — i 面上的总电荷量 (C)； σ_j — j 方向的应力 (N / cm^2)； F_j — j 方向的作用力； d_{ij} —压电常数 (C / N)，($i=1, 2, 3, j=1, 2, 3, 4, 5, 6$)。

压电方程中两个下标的含义如下：下标 i 表示晶体的极化方向，当产生电荷的表面垂于 x 轴（ y 轴或 z 轴）时，记 $i=1$ （或 $2, 3$ ）。下标 $j=1$ 或 $2, 3, 4, 5, 6$ ，分别表示沿 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的单向应力，和在垂直于 x 轴、 y 轴、 z 轴的平面（即 yz 平面、 zx 平面、 xy 平面）内作用的剪切力。

单向应力的符号规定拉应力为正，压应力为负；剪切力的符号用右手螺旋定则确定，如图中表示的方向。此外，还需要对因逆压电效应在晶体内产生的电场方向也作一规定，以确定 d_{ij} 的符号，使得方程组具有更普遍的意义。当电场方向指向晶轴的正向时为正，反之为负。



晶体在任意受力状态下所产生的表面电荷密度可由下列方程组决定：

$$\begin{cases} q_1 = d_{11}\sigma_1 + d_{12}\sigma_2 + d_{13}\sigma_3 + d_{14}\sigma_4 + d_{15}\sigma_5 + d_{16}\sigma_6 \\ q_2 = d_{21}\sigma_1 + d_{22}\sigma_2 + d_{23}\sigma_3 + d_{24}\sigma_4 + d_{25}\sigma_5 + d_{26}\sigma_6 \\ q_3 = d_{31}\sigma_1 + d_{32}\sigma_2 + d_{33}\sigma_3 + d_{34}\sigma_4 + d_{35}\sigma_5 + d_{36}\sigma_6 \end{cases}$$

式中， q_1 、 q_2 、 q_3 —垂直于 x 轴、 y 轴、 z 轴的平面上的电荷面密度；

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 —沿着 x 轴、 y 轴、 z 轴的单向应力；

σ_4 、 σ_5 、 σ_6 —垂直于 x 轴、 y 轴、 z 轴的平面内的剪切应力；

d_{ij} ($i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)—压电常数。

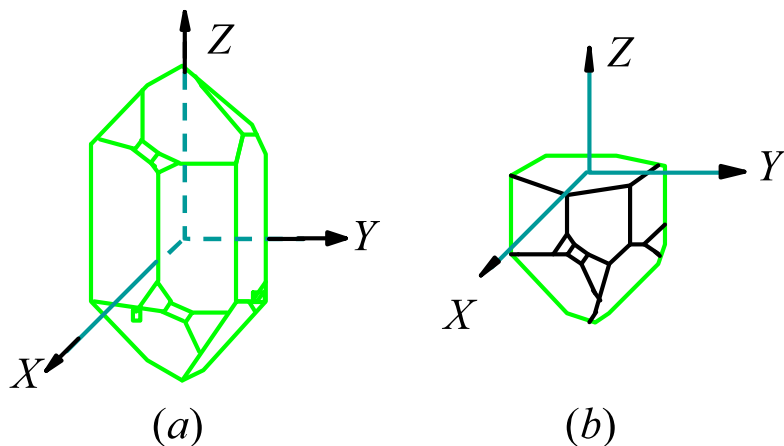
5.2 压电材料和它的主要特性

5.2.1 石英晶体

1. 石英晶体的压电效应

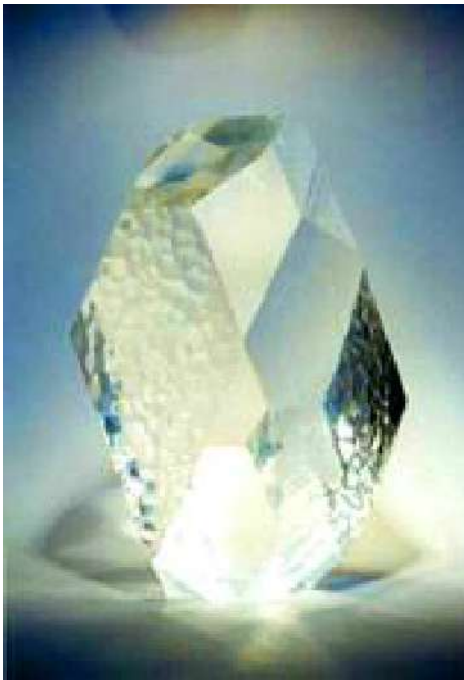
天然结构石英晶体的理想外形是一个正六面体，在晶体学中它可用三根互相垂直的轴来表示，其中纵向轴 $Z-Z$ 称为**光轴**；经过正六面体棱线，并垂直于光轴的 $X-X$ 轴称为**电轴** (*electrical axis*)；与 $X-X$ 轴和 $Z-Z$ 轴同时垂直的 $Y-Y$ 轴（垂直于正六面体的棱面）称为**机械轴**。

通常把沿电轴 $X-X$ 方向的力作用下产生电荷的压电效应称为“**纵向压电效应**”，而把沿机械轴 $Y-Y$ 方向的力作用下产生电荷的压电效应称为“**横向压电效应**”，沿光轴 $Z-Z$ 方向受力则不产生压电效应。



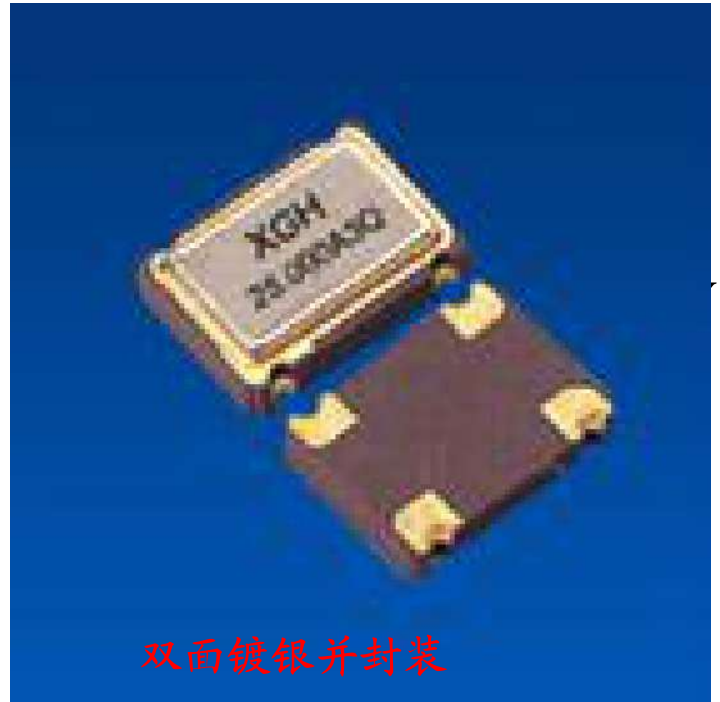
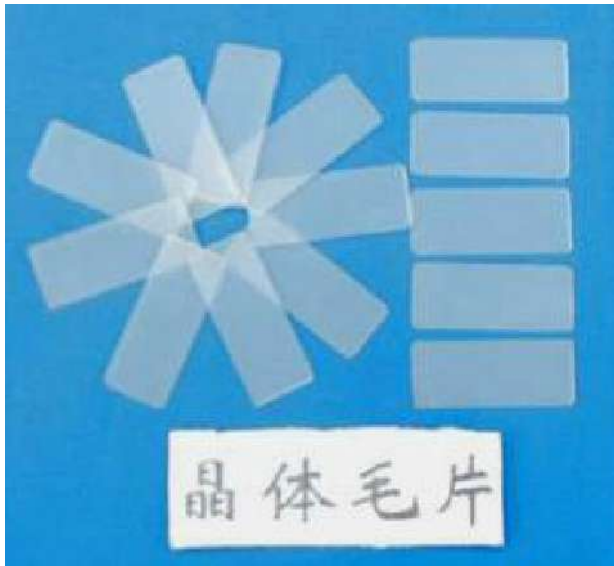
(a)理想石英晶体的外形 (b)坐标系

天然形成的石英晶体外形



Part A 压电式传感器

从石英晶体上切下一片平行六面体——晶体切片，使它的晶面分别平行于 X 、 Y 、 Z 轴，如图。并在垂直 X 轴方向两面用真空镀膜或沉银法得到电极面。





当晶片受到沿 X 轴方向的压缩应力 σ_X 作用时，晶片将产生厚度变形，即**纵向压电效应** (*Thickness expansion*)，并发生极化现象。

在晶体线性弹性范围内，极化强度 P_X 与应力 σ_X 成正比，即

$$P_X = d_{11} \sigma_X = d_{11} \frac{F_X}{lb}$$

式中， F_X —— X 轴方向的作用力；

d_{11} ——压电系数，当受力方向和变形不同时，压电系数也不同，石英晶体 $d_{11} = 2.3 \times 10^{-12} \text{CN}^{-1}$ ；

l 、 b ——石英晶片的长度和宽度。

极化强度 P_X 在数值上等于晶面上的电荷密度，即

$$P_X = \frac{Q_X}{lb}$$

式中 Q_X ——垂直于 X 轴平面上的电荷。

将上两式整理，得 $Q_X = d_{11} F_X$

其极间电压为 $U_X = \frac{Q_X}{C_X} = d_{11} \frac{F_X}{C_X}$

式中 $C_X = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r lb}{t}$ — 电极面间电容。

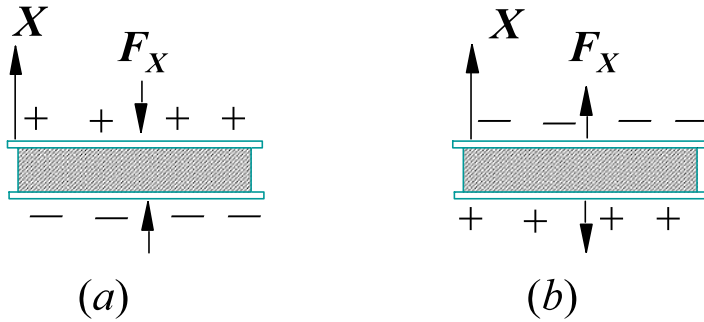
根据逆压电效应，如在X轴方向上施加强度为 E_X 的电场，晶体在X轴方向将产生伸缩，即：

$$\Delta h = d_{11} U_X$$

或用应变表示，则

$$\frac{\Delta h}{h} = d_{11} \frac{U_X}{h} = d_{11} E_X$$

综上所述，在 X 轴方向施加压力时，左旋石英晶体的 X 轴正向带正电；如果作用力 F_X 改为拉力，则在垂直于 X 轴的平面上仍出现等量电荷，但极性相反，见图(a)、(b)。

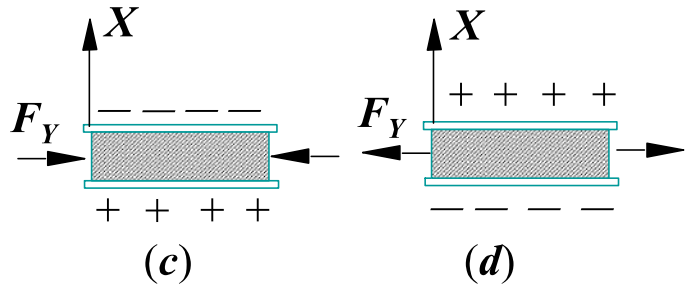


注：按前述坐标系为左旋石英晶体，右旋石英晶体的结构与左旋石英晶体成镜像对称，压电效果极性相反。

Part A 压电式传感器

如果在同一晶片上作用力是沿着机械轴的方向，则为**横向压电效应** (*Transverse expansion*)，其电荷仍在与X轴垂直平面上出现，其极性见图 (c)、(d)，此时电荷的大小为

$$Q_X = d_{12} \frac{lb}{hb} F_Y = d_{12} \frac{l}{h} F_Y$$



式中 d_{12} ——石英晶体在Y轴方向受力时的压电系数。

根据石英晶体轴对称条件： $d_{11} = -d_{12}$ ，则上式为

$$Q_X = -d_{11} \frac{l}{h} F_Y$$

式中 h ——晶片厚度。

则其极间电压为：

$$U_X = \frac{Q_X}{C_X} = -d_{11} \frac{l}{h} \frac{F_Y}{C_X}$$

根据逆压电效应，晶片在 Y 轴方向将产生伸缩变形，即

$$\Delta l = -d_{11} \frac{l}{H} U_Y$$

或用应变表示：

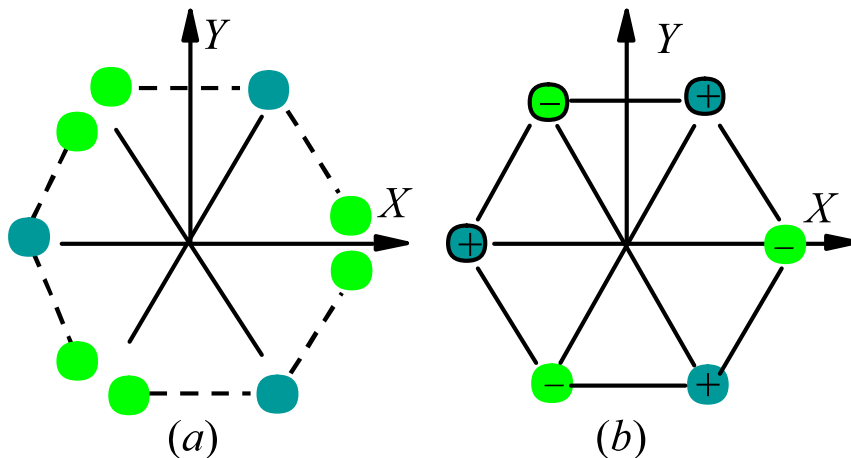
$$\frac{\Delta l}{l} = -d_{11} E_Y$$

由上述可知：

- ① 无论是正或逆压电效应，其作用力（或应变）与电荷（或电场强度）之间呈线性关系；
- ② 晶体在哪个方向上有正压电效应，则在此方向上一定存在逆压电效应；
- ③ 石英晶体不是在任何方向都存在压电效应的。

2. 石英晶体产生压电压电效应的机理

石英晶体具有压电效应，是由其内部结构决定的。组成石英晶体的硅离子 Si^{4+} 和氧离子 O^{2-} 在 Z 平面投影，如图(a)。为讨论方便，将这些硅、氧离子等效为图(b)中正六边形排列，图中“+”代表 Si^{4+} ，“-”代表 2O^{2-} 。



硅氧离子的排列示意图

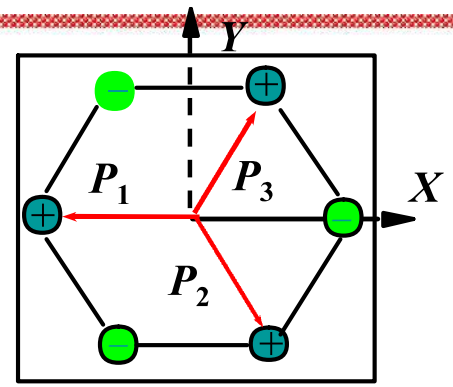
(a) 硅氧离子在 Z 平面上的投影

(b) 等效为正六边形排列的投影



➤ 当作用力 $F_x=0$ 时，正、负离子（即 Si^{4+} 和 2O^{2-} ）正好分布在正六边形顶角上，形成三个互成 120° 夹角的偶极矩 P_1 、 P_2 、 P_3 ，如图（a）所示。此时正负电荷中心重合，电偶极矩的矢量和等于零，即

$$P_1 + P_2 + P_3 = 0$$



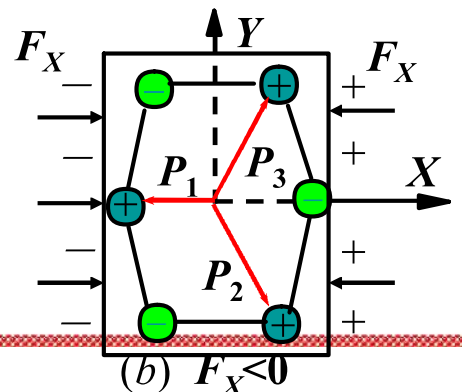
(a) $F_x=0$

➤ 当晶体受到沿 X 方向的压力（ $F_x < 0$ ）作用时，晶体沿 X 方向将产生收缩，正、负离子相对位置随之发生变化，如图（b）所示。此时正、负电荷中心不再重合，电偶极矩在 X 方向的分量为 $(P_1+P_2+P_3)_x > 0$ ；在 Y 、 Z 方向上的分量为

$$(P_1+P_2+P_3)_y = 0 \quad (P_1+P_2+P_3)_z = 0$$

由上式看出，在 X 轴的正向出现正电荷，在 Y 、 Z 轴方向则不出现电荷。压电常数

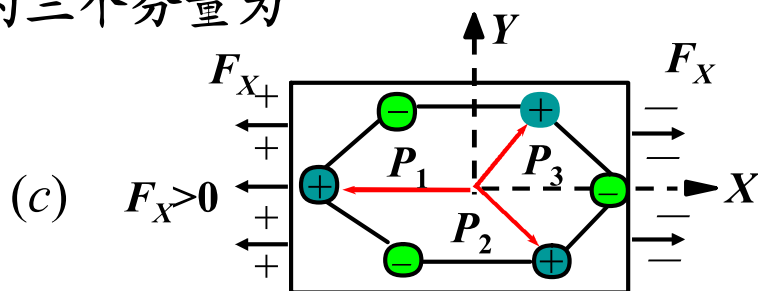
$$d_{11} \neq 0, d_{21} = d_{31} = 0$$



(b) $F_x < 0$

▶ 当晶体受到沿 X 方向的拉力 ($F_X > 0$) 作用时，其变化情况如图 (c)。此时电极矩的三个分量为

$$\begin{aligned} (P_1 + P_2 + P_3)_{X} &< 0 \\ (P_1 + P_2 + P_3)_{Y} &= 0 \\ (P_1 + P_2 + P_3)_{Z} &= 0 \end{aligned}$$



在 X 轴的正向出现负电荷，在 Y 、 Z 方向则不出现电荷。

▶ 可见，当晶体受到沿 X (电轴) 方向的力 F_X 作用时，它在 X 方向产生正压电效应，而 Y 、 Z 方向则不产生压电效应。

▶ 晶体在 Y 轴方向力 F_Y 作用下的情况与 F_X 相似。当 $F_Y > 0$ 时，晶体的形变与图 (b) 相似；当 $F_Y < 0$ 时，则与图 (c) 相似。由此可见，晶体在 Y (即机械轴) 方向的力 F_Y 作用下，使它在 X 方向产生正压电效应，在 Y 、 Z 方向则不产生压电效应。压电常数

$$d_{12} = -d_{11} \neq 0, d_{22} = d_{32} = 0$$

➤ 晶体在Z轴方向力 F_z 的作用下，因为晶体沿X方向和沿Y方向所产生的正应变完全相同，所以，正、负电荷中心保持重合，电偶极矩矢量和等于零。这就表明，沿Z(即光轴)方向的力 F_z 作用下，晶体不产生压电效应。压电常数：

$$d_{13} = d_{23} = d_{33} = 0$$

➤ 当受切应力 $\sigma_4(\tau_{yz})$ 时，在x方向有伸缩应变，故产生压电效应，压电常数： $d_{14} \neq 0, d_{15} = d_{16} = 0$

➤ 当受切应力 $\sigma_5(\tau_{zx})$ 或 $\sigma_6(\tau_{xy})$ 时，在y方向有压电效应，压电常数：

$$d_{15} = 0, d_{25} = -d_{14} \neq 0, d_{35} = 0$$

$$d_{16} = 0, d_{26} = -2d_{11} \neq 0, d_{36} = 0$$

压电常数矩阵:

$$(d_{ij}) = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & d_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$d_{11} = 2.31 \text{ pC/N}; d_{14} = 0.727 \text{ pC/N}$$

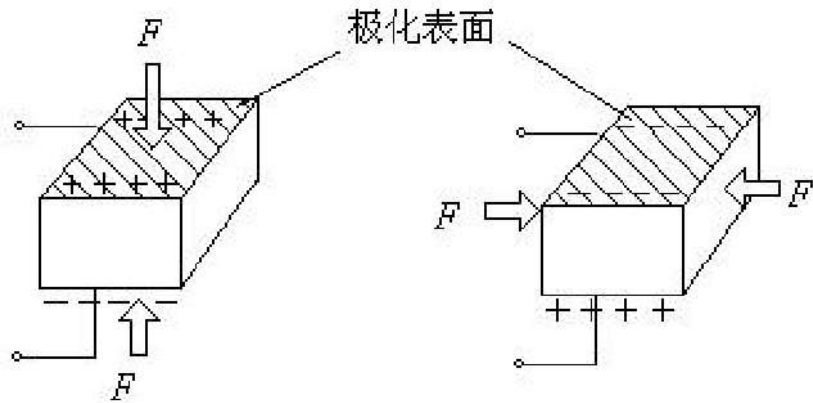
5.2.2 压电陶瓷

1. 压电陶瓷的压电效应

当作用力沿极化方向时，在极化面上出现电荷:

$$Q = d_{33} F$$

d_{33} —压电陶瓷的纵向压电常数。



当作用力垂直极化方向时，在极化面上出现电荷：

$$Q = -d_{32} \frac{S_x}{S_y} F = -d_{31} \frac{S_x}{S_y} F$$

式中， S_x —极化面的面积；

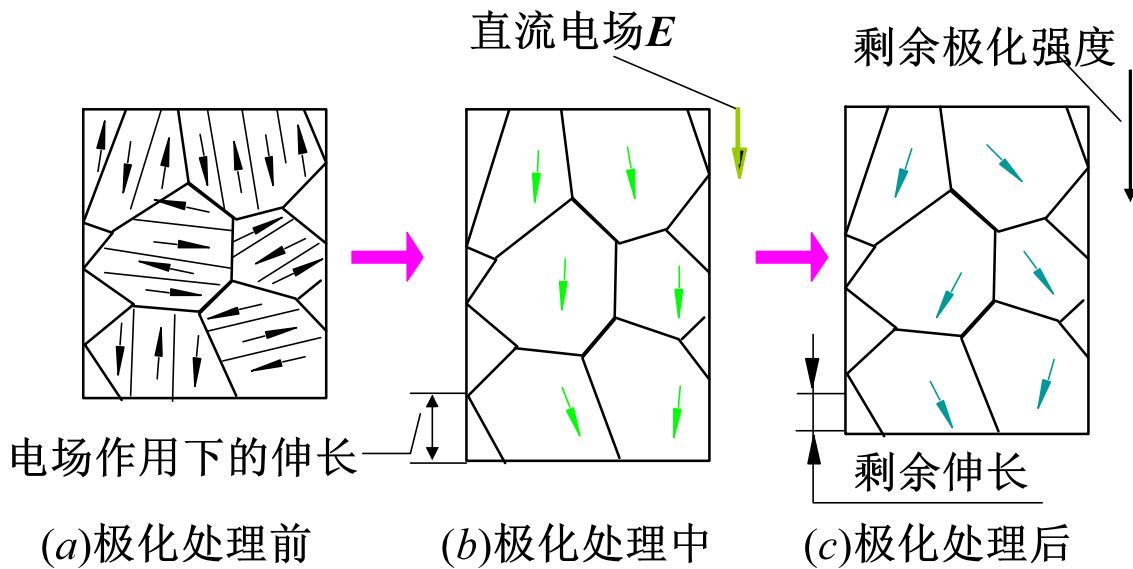
S_y —受力面的面积

沿z轴方向极化的钛酸钡压电陶瓷的压电常数矩阵为

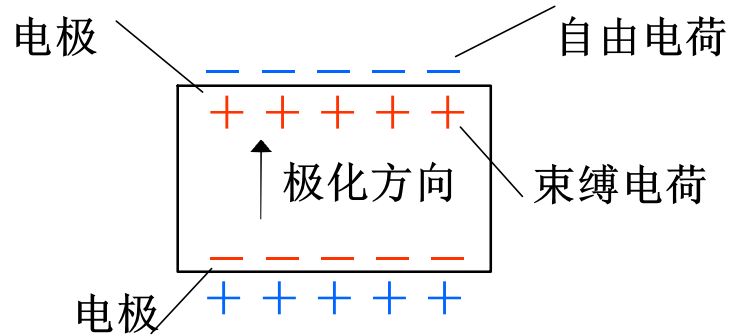
$$(d_{ij}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2. 压电陶瓷压电效应产生的机理

压电陶瓷属于铁电体一类的物质，是人工制造的多晶压电材料，它具有类似铁磁材料磁畴结构的电畴结构。电畴是分子自发形成的区域，它有一定的极化方向，从而存在一定的电场。在无外电场作用时，各个电畴在晶体上杂乱分布，它们的极化效应被相互抵消，因此原始的压电陶瓷内极化强度为零，见图（a）。

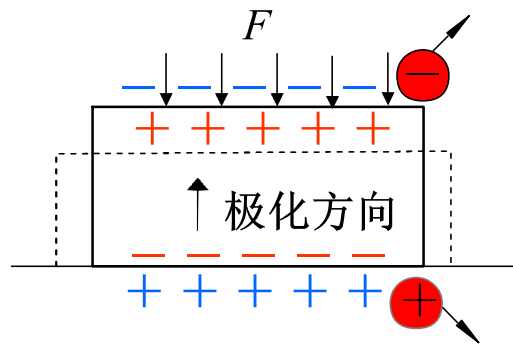


但是，当把电压表接到陶瓷片的两个电极上进行测量时，却无法测出陶瓷片内部存在的极化强度。这是因为陶瓷片内的极化强度总是以**电偶极矩**的形式表现出来，即在陶瓷的一端出现正束缚电荷，另一端出现负束缚电荷。由于束缚电荷的作用，在陶瓷片的电极面上吸附了一层来自外界的自由电荷。这些自由电荷与陶瓷片内的束缚电荷符号相反而数量相等，它起着屏蔽和抵消陶瓷片内极化强度对外界的作用。所以电压表不能测出陶瓷片内的极化程度，如图。



陶瓷片内束缚电荷与电极上吸附的自由电荷示意图

如果在陶瓷片上加一个与极化方向平行的压力 F ，如图，陶瓷片将产生压缩形变（图中虚线），片内的正、负束缚电荷之间的距离变小，极化强度也变小。因此，原来吸附在电极上的自由电荷，有一部分被释放，而出现放电现象。当压力撤消后，陶瓷片恢复原状（这是一个膨胀过程），片内的正、负电荷之间的距离变大，极化强度也变大，因此电极上又吸附一部分自由电荷而出现充电现象。这种由机械效应转变为电效应，或者由机械能转变为电能的现象，就是正压电效应。

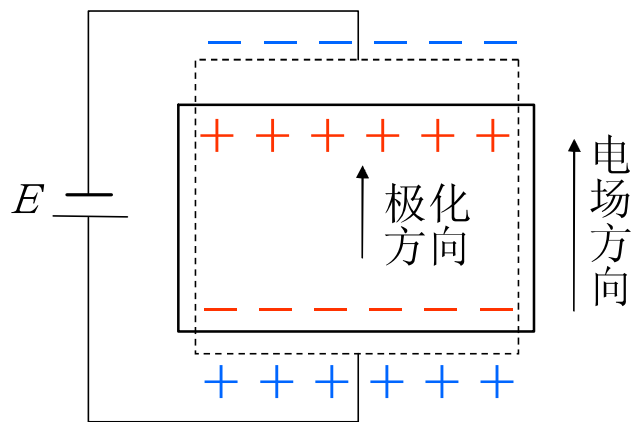


正压电效应示意图
(实线代表形变前的情况，
虚线代表形变后的情况)



同样，若在陶瓷片上加一个与极化方向相同的电场，如图，由于电场的方向与极化强度的方向相同，所以电场的作用使极化强度增大。这时，陶瓷片内的正负束缚电荷之间距离也增大，就是说，陶瓷片沿极化方向产生伸长形变（图中虚线）。同理，如果外加电场的方向与极化方向相反，则陶瓷片沿极化方向产生缩短形变。这种由于电效应而转变为机械效应或者由电能转变为机械能的现象，就是逆压电效应。

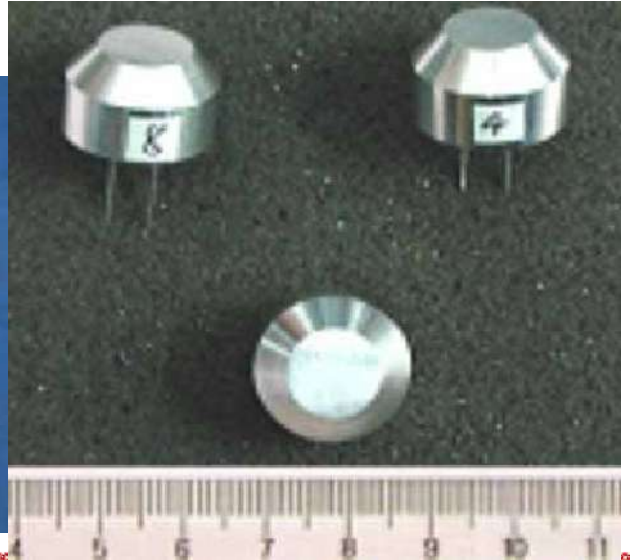
逆压电效应示意图
(实线代表形变前的情况，
虚线代表形变后的情况)



Part A 压电式传感器

由此可见，压电陶瓷所以具有压电效应，是由于陶瓷内部存在**自发极化**。这些自发极化经过极化工序处理而被迫取向排列后，陶瓷内即存在剩余极化强度。如果外界的作用（如压力或电场的作用）能使此极化强度发生变化，陶瓷就出现压电效应。此外，还可以看出，陶瓷内的**极化电荷是束缚电荷**，而不是自由电荷，这些束缚电荷不能自由移动。所以在陶瓷中产生的放电或充电现象，是通过陶瓷内部极化强度的变化，引起电极面上自由电荷的释放或补充的结果。

压电陶瓷外形



5.2.3 压电材料的主要特性

压电材料主要特性:

- ①转换性能。要求具有较大压电常数。
- ②机械性能。压电元件作为受力元件，希望它的机械强度高、刚度大，以期获得宽的线性范围和高的固有振动频率。
- ③电性能。希望具有高电阻率和大介电常数，以减弱外部分布电容的影响并获得良好的低频特性。
- ④环境适应性强。温度和湿度稳定性要好，要求具有较高的居里点，获得较宽的工作温度范围。
- ⑤时间稳定性。要求压电性能不随时间变化。

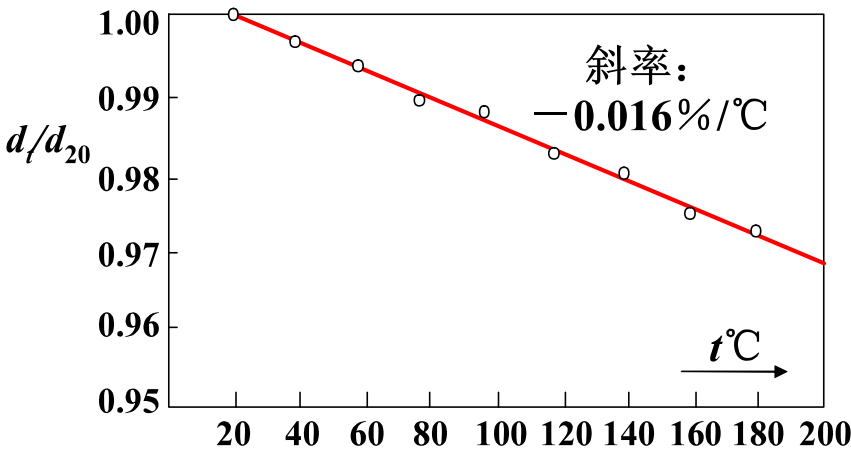
压电材料可以分为两大类：压电晶体(单晶体)，压电陶瓷(多晶体)。

1. 压电晶体

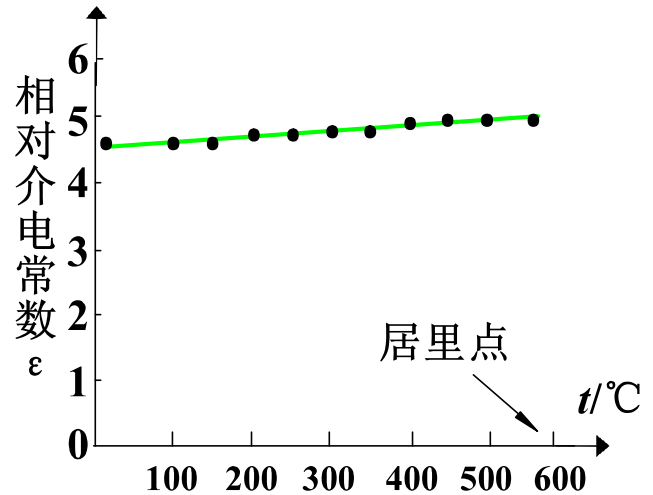
(1) 石英晶体

石英 (SiO_2) 是一种具有良好压电特性的压电晶体。其介电常数和压电系数的温度稳定性相当好，在常温范围内这两个参数几乎不随温度变化，如下两图。

由图可见，在 $20^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 范围内，温度每升高 1°C ，压电系数仅减少 0.016% 。但是当到 573°C 时，它完全失去了压电特性，这就是它的居里点。



石英的 d_{11} 系数相对于 20°C 的 d_{11} 温度变化特性



石英在高温下相对介电常数的温度特性

石英晶体的突出优点是性能非常稳定，机械强度高，绝缘性能也相当好。但石英材料价格昂贵，且压电系数比压电陶瓷低得多。因此一般仅用于**标准仪器**或要求较高的传感器中。

因为石英是一种各向异性晶体，因此，按不同方向切割的晶片，其物理性质（如弹性、压电效应、温度特性等）相差很大。在设计石英传感器时，根据不同使用要求正确地选择石英片的切型。

(2) 水溶性压电晶体

属于单斜晶系的有酒石酸钾钠 ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)，酒石酸乙烯二铵 ($\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_6$ ，简称EDT)，酒石酸二钾 ($\text{K}_2\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ，简称DKT)，硫酸锂 ($\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)。属于正方晶系的有磷酸二氢钾 (KH_2PO_4 ，简称KDP)，磷酸二氢氨 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ，简称ADP)，砷酸二氢钾 (KH_2AsO_4 ，简称KDA)，砷酸二氢氨 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{AsO}_4$ ，简称ADA)。

2. 压电陶瓷

(1) 钛酸钡压电陶瓷

钛酸钡 (BaTiO_3) 是由碳酸钡 (BaCO_3) 和二氧化钛 (TiO_2) 按1: 1分子比例在高温下合成的压电陶瓷。

它具有很高的介电常数和较大的压电系数 (约为石英晶体的50倍)。不足之处是居里温度低 (120°C)，温度稳定性和机械强度不如石英晶体。

(2) 锆钛酸铅系压电陶瓷 (PZT)

锆钛酸铅是由 PbTiO_3 和 PbZrO_3 组成的固溶体 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 。它与钛酸钡相比，压电系数更大，居里温度在 300°C 以上，各项机电参数受温度影响小，时间稳定性好。此外，在锆钛酸中添加一种或两种其它微量元素 (如铌、锶、锡、锰、钨等) 还可以获得不同性能的PZT材料。因此锆钛酸铅系压电陶瓷是目前压电式传感器中应用最广泛的压电材料。

(3) 压电聚合物

聚二氟乙烯 (PVF_2) 是目前发现的压电效应较强的聚合物薄膜, 这种合成高分子薄膜就其对称性来看, 不存在压电效应, 但是它们具有“平面锯齿”结构, 存在抵消不了的偶极子。经延展和拉伸后可以使分子链轴成规则排列, 并在与分子轴垂直方向上产生自发极化偶极子。当在膜厚方向加直流高压电场极化后, 就可以成为具有压电性能的高分子薄膜。这种薄膜有可挠性, 并容易制成大面积压电元件。这种元件耐冲击、不易破碎、稳定性好、频带宽。为提高其压电性能还可以掺入压电陶瓷粉末, 制成混合复合材料 (PVF_2 —PZT)。

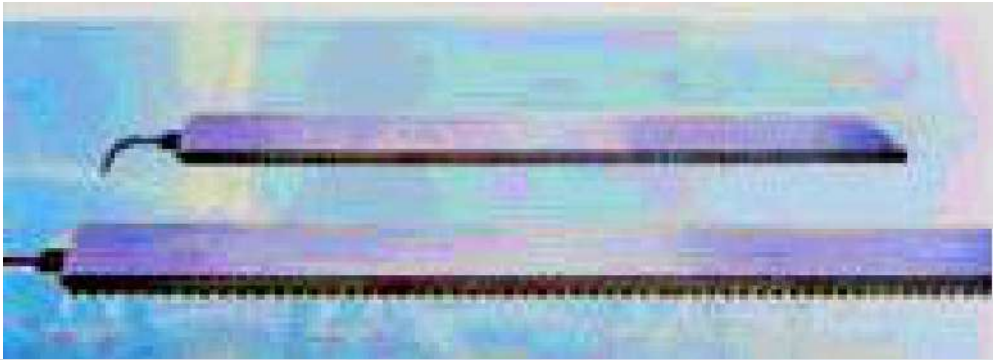


高分子压电薄膜及拉制





高分子压电材料制作的压电薄膜和电缆





Part A 压电式传感器

可用于波形分析及报警的高分子压电踏板



压电式脚踏报警器



电子工业出版社

高分子压电薄膜制作的压电喇叭

(逆压电效应)



(4) 压电半导体材料

如ZnO、CdS、ZnO、CdTe，这种力敏器件具有灵敏度高，响应时间短等优点。此外用ZnO作为表面声波振荡器的压电材料，可测取力和温度等参数。

(5) 铌酸盐系压电陶瓷。

5.3 压电元件的常用结构形式

5.3.1 压电元件的基本变形方式

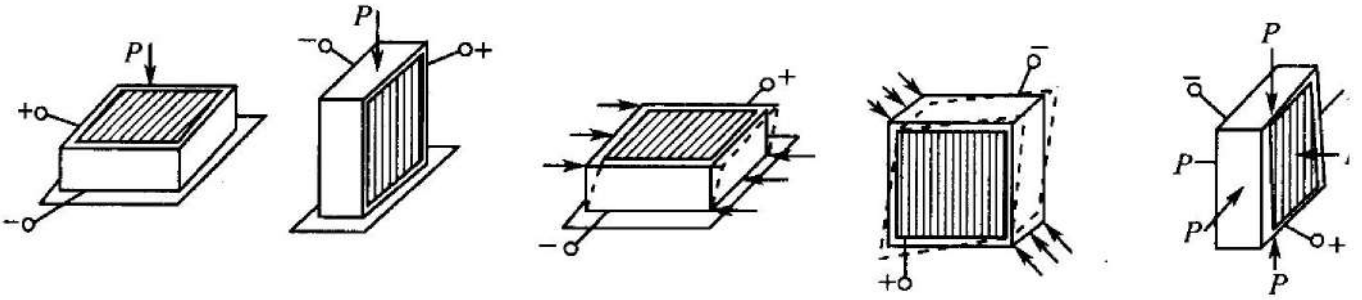
1.对能量转换有意义的石英晶体变形方式：

(1)厚度变形（*TE*方式）：利用石英晶体的纵向压电效应

$$Q_x = d_{11} \cdot F_x \quad \text{或} \quad q_x = d_{11} \cdot \sigma_x$$

(2)长度变形（*LE*方式）：利用石英晶体的横向压电效应

$$Q_y = d_{12} \cdot F_y \cdot S_{xx} / S_{yy} \quad \text{或} \quad q_x = d_{12} \cdot \sigma_y$$



(a) 厚度变形 (b) 长度变形 (c) 面剪切变形 (d) 厚度剪切变形 (e) 体积变形

(3) 面剪切变形 (FS (Face shear)方式) :

$$q_x = d_{14} \cdot \tau_{yz} \quad (X\text{切晶体})$$

$$q_y = d_{25} \cdot \tau_{xy} \quad (Y\text{切晶体})$$

(4) 厚度剪切变形 (TS (thickness shear)方式) :

$$q_y = d_{26} \cdot \tau_{xy} \quad (Y\text{切晶体})$$

(5) 弯曲变形 (BS (Bending shear)方式) :

2. 压电陶瓷的变形方式

(1) 厚度变形 (TE方式) : $Q=d_{33} \cdot F$

(2) 长度变形 (LE方式) :

$$Q=-d_{32} \cdot F \cdot S_X/S_Y=-d_{31} \cdot F \cdot S_X/S_Y$$

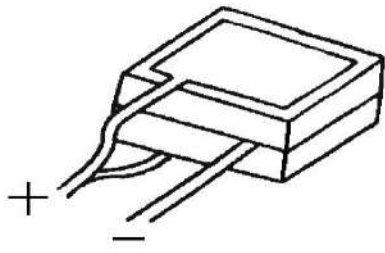
(3) 体积变形方式 (VE : *volume expansion*方式) :

$$q_x=d_{31} \cdot \sigma_x+d_{32} \cdot \sigma_y+d_{33} \cdot \sigma_z$$

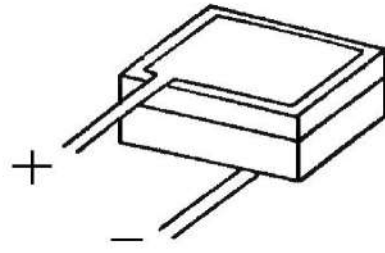
由于 $\sigma_x=\sigma_y=\sigma_z=\sigma$, 且 $d_{31}=d_{32}$,

所以 : $q_x=(2d_{31}+d_{33}) \sigma$

5.3.2 压电元件的结构形式



(a) 压电晶片的并联



(b) 压电晶片的串联

并联: $C_{\text{并}} = 2C, U_{\text{并}} = U, Q_{\text{并}} = 2Q$

串联: $Q_{\text{串}} = Q, U_{\text{串}} = 2U, C_{\text{串}} = C/2$

在这两种接法中，并联接法输出电荷量大、本身电容大、时间常数大，适宜用测量慢信号并且以电荷作为输出量的情况。而串联接法输出电压大、电容小，适宜用于以电压作为输出信号、并且测量电路输入阻抗很高的场合。

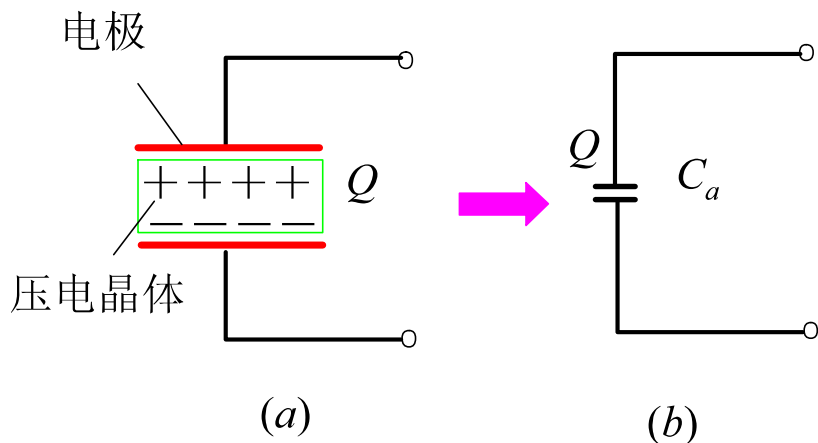
5.4 等效电路与测量电路

当压电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。可把压电传感器看成一个**静电发生器**，如图 (a)。也可把它视为两极板上聚集异性电荷，中间为绝缘体的**电容器**，如图 (b)。其电容量为

$$C_a = \frac{\varepsilon S}{h} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{h}$$

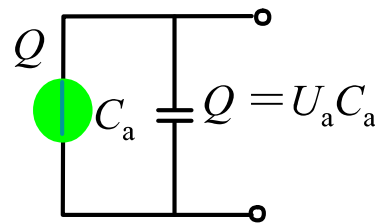
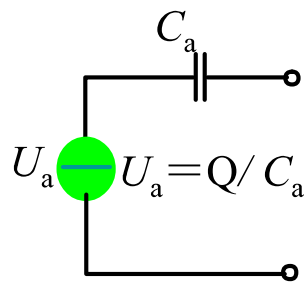
当两极板聚集异性电荷时，则两极板呈现一定的电压，其大小为

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



压电传感器的等效电路

因此，压电传感器可等效为电压源 U_a 和一个电容器 C_a 的串联电路，如图 (a)；也可等效为一个电荷源 Q 和一个电容器 C_a 的并联电路，如图 (b)。

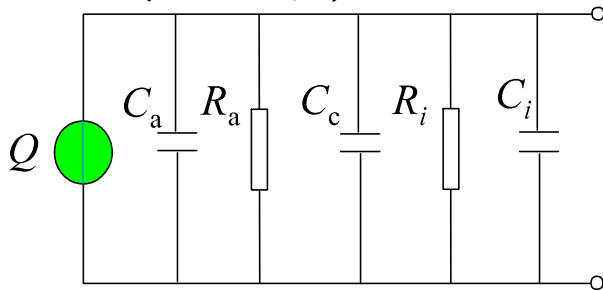


(a) 电压等效电路 (b) 电荷等效电路
压电传感器等效原理

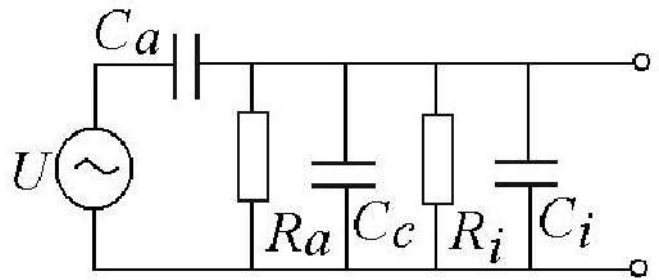
传感器内部信号电荷无“漏损”，外电路负载无穷大时，压电传感器受力后产生的电压或电荷才能长期保存，否则电路将以某时间常数按指数规律放电。这对于静态标定以及低频准静态测量极为不利，必然带来误差。事实上，传感器内部不可能没有泄漏，外电路负载也不可能无穷大，只有外力以较高频率不断地作用，传感器的电荷才能得以补充，因此，压电晶体不适合于静态测量。

Part A 压电式传感器

如果用导线将压电传感器和测量仪器连接时,则应考虑连线的等效电容,前置放大器的输入电阻、输入电容。



电压源等效电路



电荷源等效电路

C_i 前置放大器输入电容; C_c 连线电容; R_a 传感器的漏电阻; R_i 前置放大器输入电阻

可见,压电传感器的绝缘电阻 R_a 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。与上相适应,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,即产生测量误差。

压电式传感器的灵敏度有两种定义：

(1) **电压灵敏度**， $K_u = U / F$ ，它表示单位力所产生的电压；

(2) **电荷灵敏度**， $K_q = Q / F$ ，它表示单位力所产生的电荷。

它们之间的关系为：

$$K_u = K_q / C_a$$

5.4.2 压电式传感器的信号调理电路

压电式传感器的前置放大器有两个作用：

- ◆ 把压电式传感器的高输出阻变换成低阻抗输出；
- ◆ 放大压电式传感器输出的弱信号。

前置放大器形式：

- ◆ 电压放大器，其输出电压与输入电压（传感器的输出电压）成正比；
- ◆ 电荷放大器，其输出电压与输入电荷成正比。

1、电压前置放大器

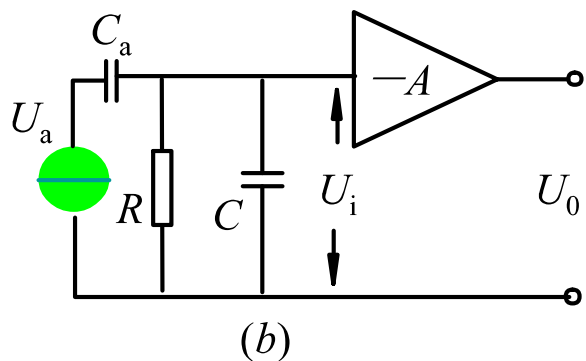
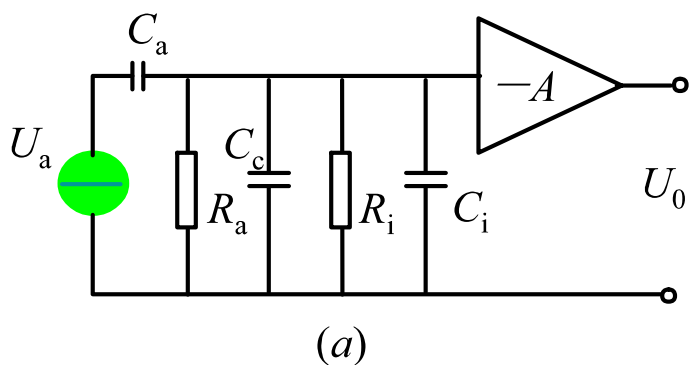


图 (b) 中, 等效电阻 R 为

$$R = \frac{R_a \cdot R_i}{R_a + R_i}$$

而

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

等效电容为 $C = C_c + C_i$

设压电元件所受作用力 $F = F_m \sin \omega t$ F_m ——作用力的幅值

若压电元件材料是压电陶瓷, 其压电系数为 d_{33} , 则在外力作用下, 压电元件产生的电压值为

$$U_a = U_m \sin \omega t$$

U_m 为电压幅值: $U_m = \frac{Q}{C_a} = \frac{d_{33} F_m}{C_a}$

由图 (b) 可得放大器输入端的电压 U_i , 其复数形式为

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

U_i 的幅值 U_{im} 为

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

输入电压与作用力之间的相位差 ϕ 为

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

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

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

可见，如果 $\omega/\omega_n \gg 1$ ，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 $\omega/\omega_n \geq 3$ ，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端，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_u 的定义得

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

因为 $\omega R \gg 1$ ，故上式可以近似为 $K_u \approx \frac{d_{33}}{C_a + C_c + C_i}$

可见， K_u 与回路电容成反比，增加回路电容必然使 K_u 下降。为此常将 R_i 很大的前置放大器接入回路。其输入内阻越大，测量回路时间常数越大，则传感器低频响应也越好。当改变连接传感器与前置放大器的电缆长度时 C_c 将改变，必须重新校正灵敏度值。

实际输入电压幅值 U_{im} 与理想条件下的幅值 U_{am} 之比为

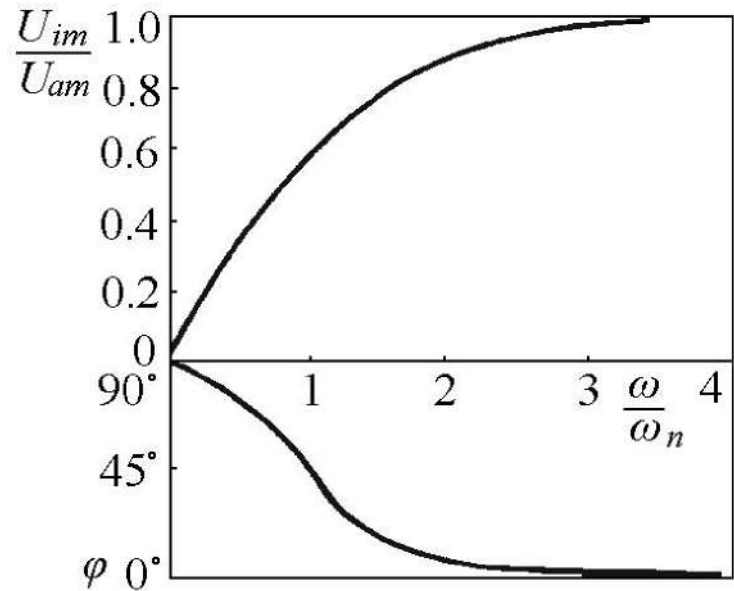
$$K(\omega) = \frac{U_{im}}{U_{am}} = \frac{\omega R(C_a + C_c + C_i)}{\sqrt{1 + (\omega R)^2 (C_a + C_c + C_i)^2}}$$

令 $\omega_n = 1/\tau = 1/R(C_a + C_c + C_i)$ ，则

$$K(\omega) = \frac{U_{im}}{U_{am}} = \frac{\omega / \omega_n}{\sqrt{1 + (\omega / \omega_n)^2}}$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctan(\omega / \omega_n)$$

电压幅值比和相角与频率比的关系曲线如图。



根据以上公式，对采用电压前置放大器的压电传感器电路，分析如下。

(1) $\omega=0$ 时， $U_i=0$ ，说明压电传感器不能测静态量。

(2) 当 $\omega/\omega_n \gg 1$ (一般满足 $\omega/\omega_n \geq 3$ 即可) 时， $U_{im}=U_{am}$ ，即输入前置放大器的电压与作用力的频率无关。这说明压电式传感器的高频响应相当好，这是压电式传感器的一个突出优点。

(3) 如果被测物理量是缓慢变化的动态量 (ω 很小)，而测量回路的时间常数 τ 又不大，则造成传感器灵敏度下降，低频动态误差为

$$\delta = 1 - \frac{\omega/\omega_n}{\sqrt{1+(\omega/\omega_n)^2}}$$

压电式传感器的-3dB截止频率下限为 (取 $K(\omega)=1/\sqrt{2}$)

$$f_L = \frac{1}{2\pi R(C_a + C_c + C_i)}$$

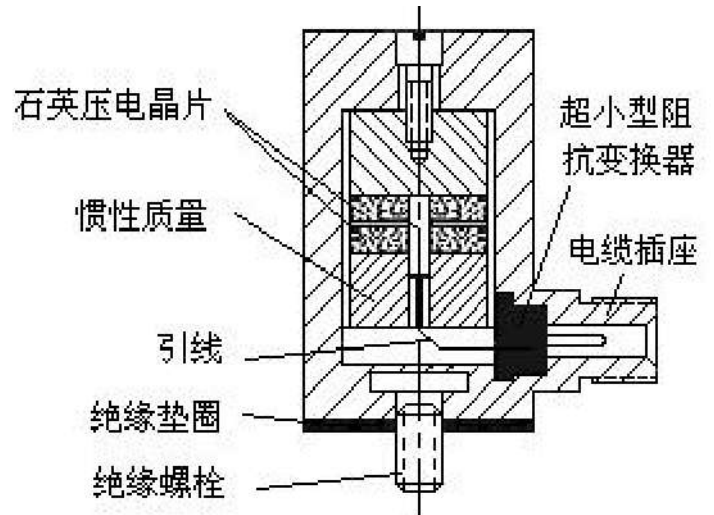
一般情况下可实现 $f_L < 1\text{Hz}$ ，低频响应也较好。

(4) 为了满足阻抗匹配的要求，压电式传感器一般都采用专门的前置放大器。电压前置放大器（阻抗变换器）因其电路不同而分为几种型式，但都具有很高的输入阻抗（ $10^9\Omega$ 以上）和很低的输出阻抗（小于 $10^2\Omega$ ）。

(5) 电压前置放大器电缆长度对传感器测量精度的影响较大。因为，当电缆长度改变时， C_c 也将改变，因而放大器的输入电压 U_{im} 也随之变化，进而使前置放大器的输出电压改变。

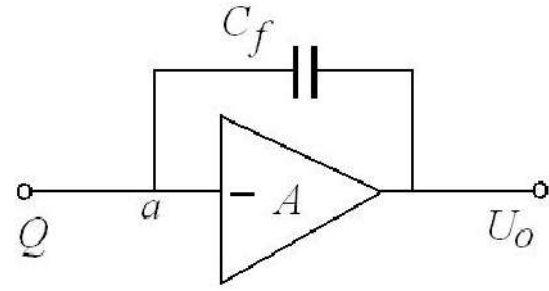
因此，压电式传感器与前置放大器之间的连接电缆不能随意更换。如有变化时，必须重新校正其灵敏度，否则将引入测量误差。

解决电缆分布电容问题的办法是将放大器装入传感器之中，组成一体化传感器，如图



2、电荷前置放大器

电荷放大器能将高内阻的电荷源转换为低内阻的电压源，而且输出电压正比于输入电荷，因此它也能起着阻抗变换的作用，其输入阻抗可高达 $10^{10} \sim 10^{12} \Omega$ ，而输出阻抗可小于 100Ω 。

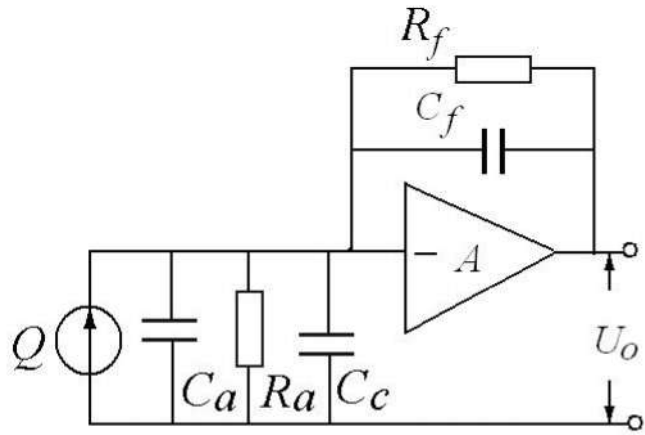


电荷放大器实际上是一种具有深度电容负反馈的高增益放大器，其等效电路如图所示。若放大器的开环增益 A 足够大，则放大器的输入端 a 点的电位接近于“地”电位；并且由于放大器的输入级采用了场效应晶体管，放大器的输入阻抗很高。所以放大器输入端几乎没有分流，运算电流仅流入反馈回路，电荷 Q 只对反馈电容 C_f 充电，充电电压接近于放大器的输出电压：

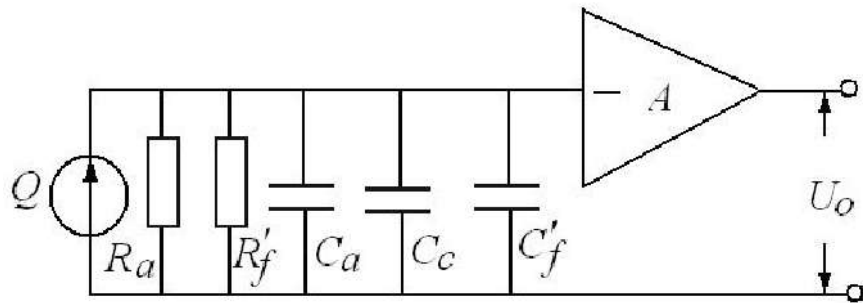
$$U_0 \approx u_{C_f} = -Q/C_f$$

式中， U_0 —放大器输出电压； u_{C_f} —反馈电容两端电压。

压电式传感器与电荷放大器连接的基本电路及等效电路如下。



电荷前置放大器基本电路



电荷前置放大器等效电路

由“虚地”原理可知，将反馈电容 C_f 和电阻 R_f 折合到放大器输入端：

$$\begin{cases} C'_f = (1 + A)C_f \\ \frac{1}{R'_f} = (1 + A)\frac{1}{R_f} \end{cases}$$

根据等效电路得放大器输出为

$$\dot{U}_0 = \frac{-j\omega\dot{Q}A}{\left[\frac{1}{R_a} + (1+A)\frac{1}{R_f} \right] + j\omega[C_a + C_c + (1+A)C_f]}$$

对电荷前置放大器电路的特性，讨论如下。

(1) 当A足够大，且频率足够高时，满足 $(1+A)C_f \gg (C_a + C_c)$ ， $1/(1+A)R_f \gg 1/R_a$ ，和 $\omega C_f \gg 1/R_f$ ，放大器输出电压即为

$$U_0 \approx -\frac{Q}{C_f}$$

可见输出电压只取决于输入电荷Q和反馈电容 C_f ，改变 C_f 的大小即可得到所需的电压输出。在电荷放大器的实际电路中，考虑到被测物理量的不同量程，以及后级放大器不致因输入信号太大而引起饱和，反馈电容 C_f 的容量是可调的，一般在 $100 \sim 10^4 \text{pF}$ 范围之内。

(2) 当频率足够高时, 式 $\dot{U}_0 = \frac{-j\omega\dot{Q}A}{\left[\frac{1}{R_a} + (1+A)\frac{1}{R_f}\right] + j\omega[C_a + C_c + (1+A)C_f]}$

变为:

$$U_0' \approx \frac{-AQ}{C_a + C_c + (1+A)C_f}$$

可见运算放大器的开环放大倍数 A 对精度有影响, 相对误差为:

$$\delta = \frac{U_0 - U_0'}{U_0} \approx \frac{C_a + C_c}{(1+A)C_f}$$

例如, 要求输出误差 $\delta \leq 1\%$, 由上式计算可得 $A > 10^5$ 。对线性集成运算放大器来说, 这一要求是容易达到的。

(3) 电荷放大器通常在反馈电容的两端并联一个大的反馈电阻 $R_f = 10^8 \sim 10^{10} \Omega$ ，其功能是提供直流反馈，以提高电荷放大器工作稳定性和减小零漂。当工作频率很低，但放大倍数 A 仍足够大，式

$$\dot{U}_0 = \frac{-j\omega\dot{Q}A}{\left[\frac{1}{R_a} + (1+A)\frac{1}{R_f}\right] + j\omega[C_a + C_c + (1+A)C_f]}$$

变为：

$$\dot{U}_0 \approx \frac{-j\omega\dot{Q}A}{(1+A)\frac{1}{R_f} + j\omega(1+A)C_f} \approx -\frac{j\omega\dot{Q}}{\frac{1}{R_f} + j\omega C_f}$$

表明，输出电压不仅与 Q 有关，而且与反馈网络的元件参数 C_f 、 R_f 和传感器信号频率 ω 有关，其幅值为：

$$U_0 = \frac{-\omega Q}{\sqrt{(1/R_f)^2 + \omega^2 C_f^2}}$$

当 $1/R_f = \omega C_f$ 时, 有
$$U_o = \frac{Q}{\sqrt{2}C_f}$$

此时放大器输出电压仅为高频时输出的 $1/\sqrt{2}$, 由此可得电荷放大器增益下降3dB的下限截止频率为:

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

低频时, 输出电压与输入电荷之间的相位差为

$$\phi = \arctan\left(\frac{1/R_f}{\omega C_f}\right) = \arctan(1/\omega R_f C_f)$$

在截止频率 f_L 处 $\phi = 45^\circ$ 。

可见压电式传感器配用电荷放大器时, 其低频幅值误差和截止频率只决定于反馈电路的参数 R_f 和 C_f , 其中 C_f 的大小可以由所需要的电压输出幅度决定, 当给定工作频带下限截止频率 f_L 时, 反馈电阻 R_f 值可由下限截止频率公式计算确定。

四通道电荷放大器外形



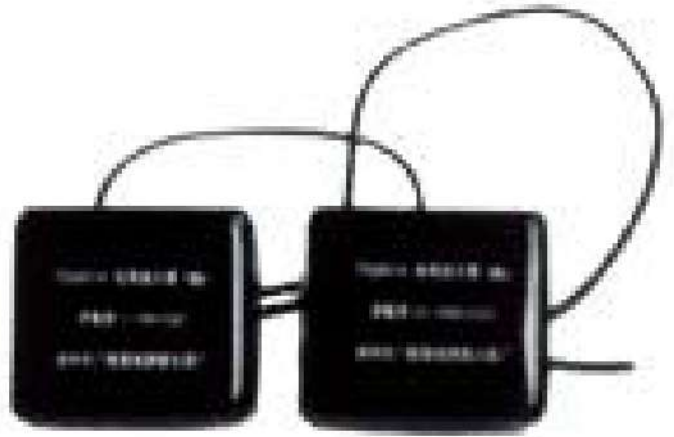
灵敏度: $0.1 \sim 1000\text{mV/pC}$; 频率范围: $0.3 \sim 100\text{KHz}$;

准确度: 1%; 最大输出: $\pm 10\text{V}/10\text{mA}$;

噪声(最大增益): 折合至输入端小于 $5\mu\text{V}$;

电 源: $220\text{V}/50\text{Hz}$; 控制方式: 计算机或手动

超小型电荷放大器模块



主要指标:

灵敏度: 1、10、100mV/pC (任选一档)

频率范围: 0.3 ~ 100KHz (上、下限可选)

噪声 (最大灵敏度): 输出端小于1mV

归一化: 外接电阻调整

线性误差: 1%

最大输出: $\pm 5V$ 或 $\pm 10V$

电 源: $\pm 6V \sim \pm 15V$

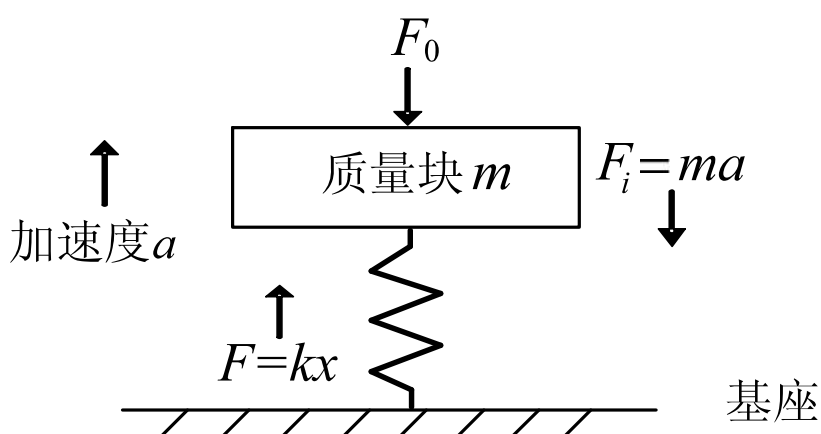
特点: 可组成经济的多点测试系统

5.5 加速度测量基本知识

5.5.1 加速度测量的基本原理

加速度是表征物体在空间运动本质的一个基本物理量。因此，可以通过测量加速度来测量物体的运动状态。

对于加速度，常用绝对法测量，即把惯性型测量装置安装在运动体上进行测量。如图所示。



质量块受力平衡时，有：

$$F - F_0 - F_i = kx - F_0 - ma = 0$$

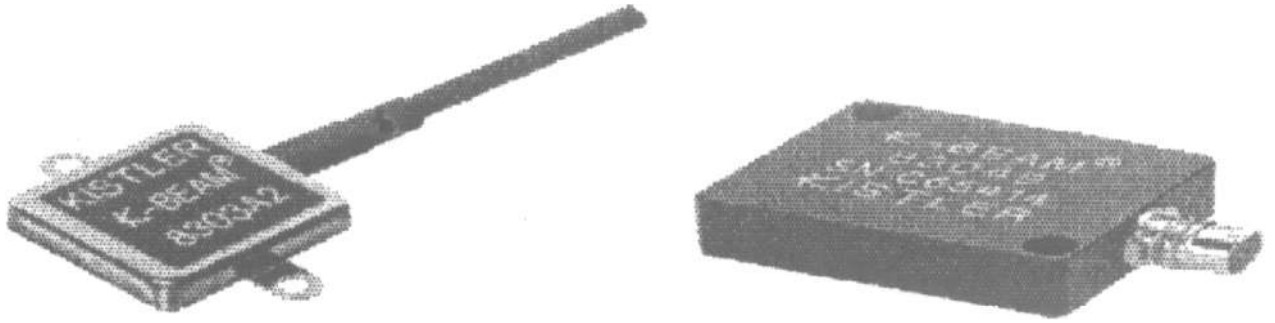
可知，质量块相对于基座的位移与加速度成正比例，故可通过该位移或惯性力来测量加速度。

5.5.2 加速度传感器

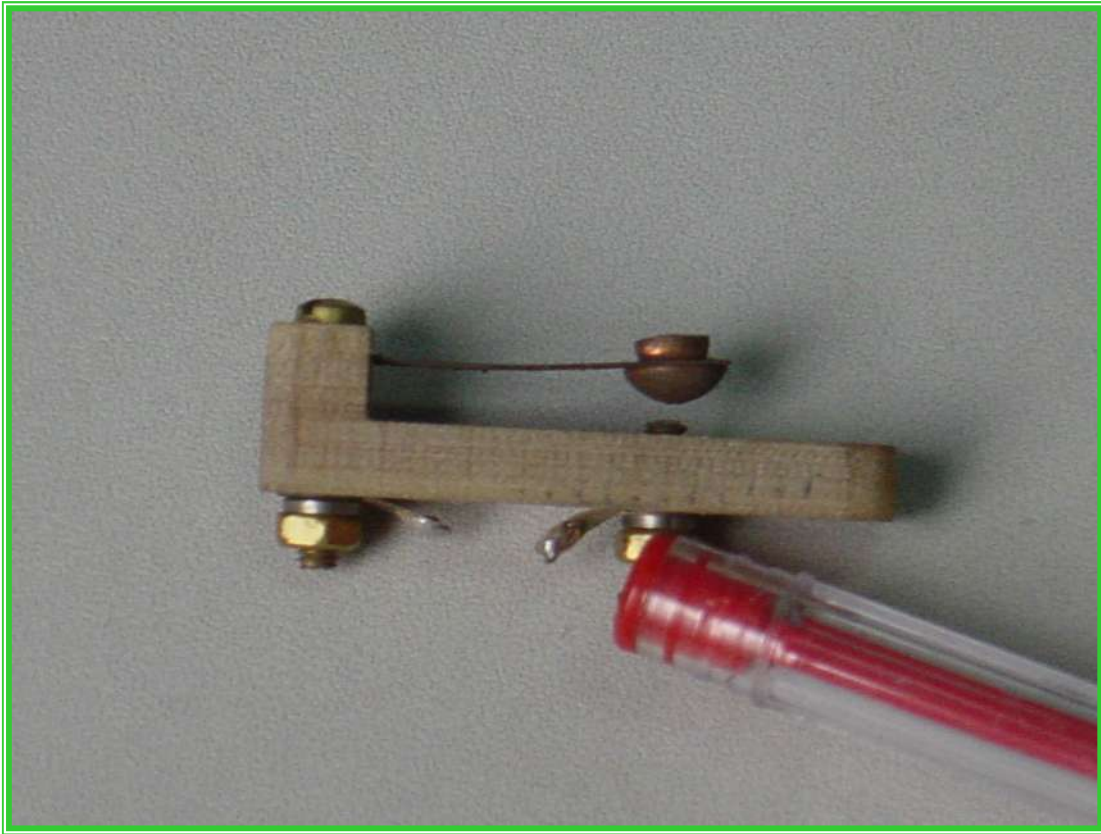
压电式加速度传感器实物图



电容式加速度传感器实物图



电阻应变式加速度传感器实物图



5.6 压电式加速度传感器设计

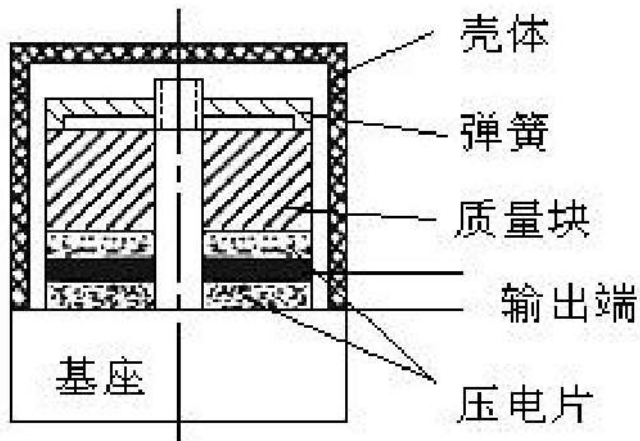
5.6.1 压电式加速度传感器的结构

压电式加速度传感器是一种常用的加速度计，占有所有加速度传感器的80%以上。因其固有频率高，有较好的频率响应(几千赫至几十千赫)，如果配以电荷放大器，低频响应也很好(可低至零点几赫)。另外，压电式传感器体积小、重量轻。缺点是要经常校正灵敏度。

压电加速度传感器结构形式主要有压缩型和剪切型。

1. 压缩式

常见的压电式加速度传感器的结构一般是利用压电陶瓷的纵向效应，图示为压缩式压电加速度传感器的结构原理图。测量时，将传感器基座与试件刚性固定在一起。当传感器感受振动时，因

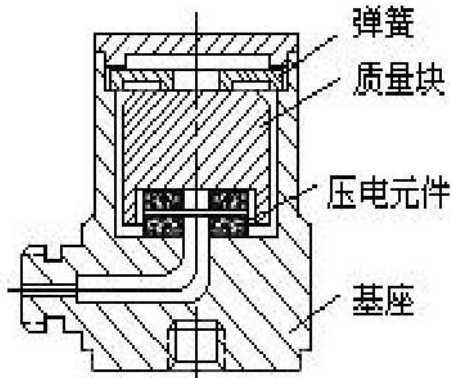


质量块的质量 m 相对被测物体的质量 M 小得多，因此传感器的质量 m 感受到与传感器基座 M 相同的振动，并受到与加速度 a 方向相反的惯性力，此力为 $F=ma$ 。惯性力作用在压电陶瓷上产生的电荷：

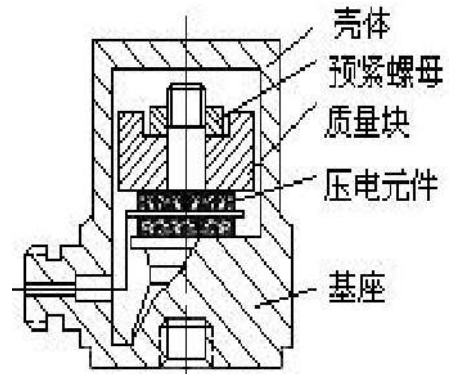
$$Q=d_{33} \cdot F=d_{33} \times m \times a$$

当振动频率远低于传感器的固有频率时，传感器的输出电荷（电压）与作用力成正比，亦即与试件的加速度成正比。

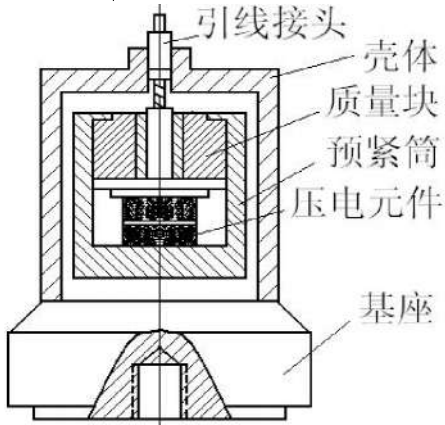
压缩式的压电式加速度的其它结构



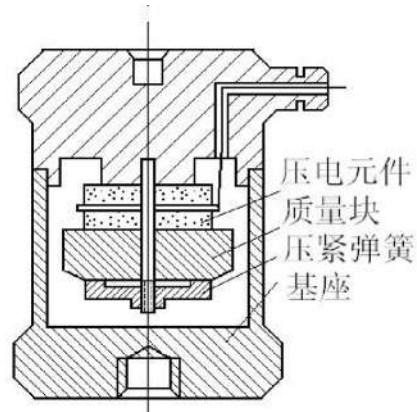
(a) 中央安装压缩式



(b) 隔离基座压缩式



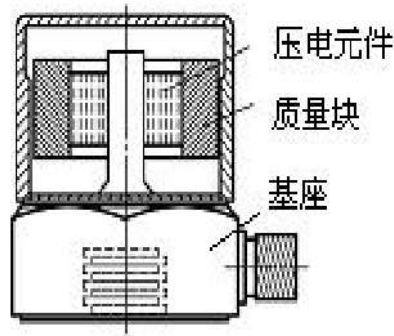
(c) 隔离预载筒压缩式



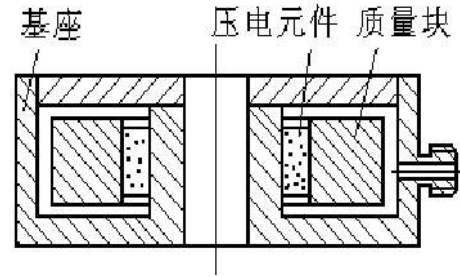
(d) 倒挂中心压缩型

2. 剪切型

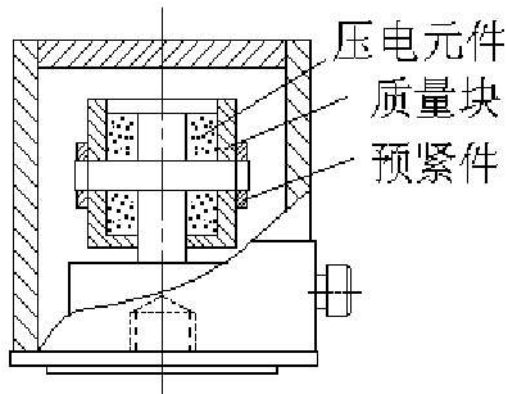
与压缩式加速度传感器相比，剪切式加速度传感器是一种很有发展前途的传感器，并有替代压缩式的趋势。



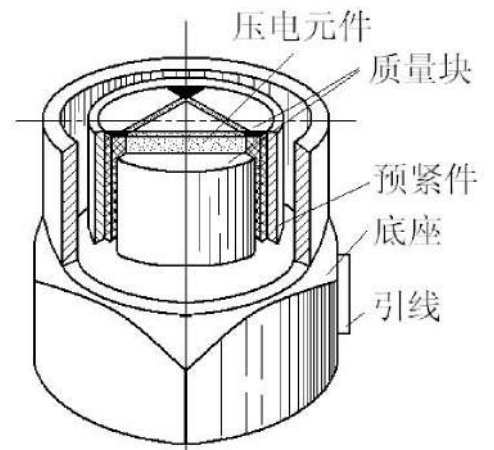
(a) 环形剪切式结构



(b) 扁环形剪切式结构

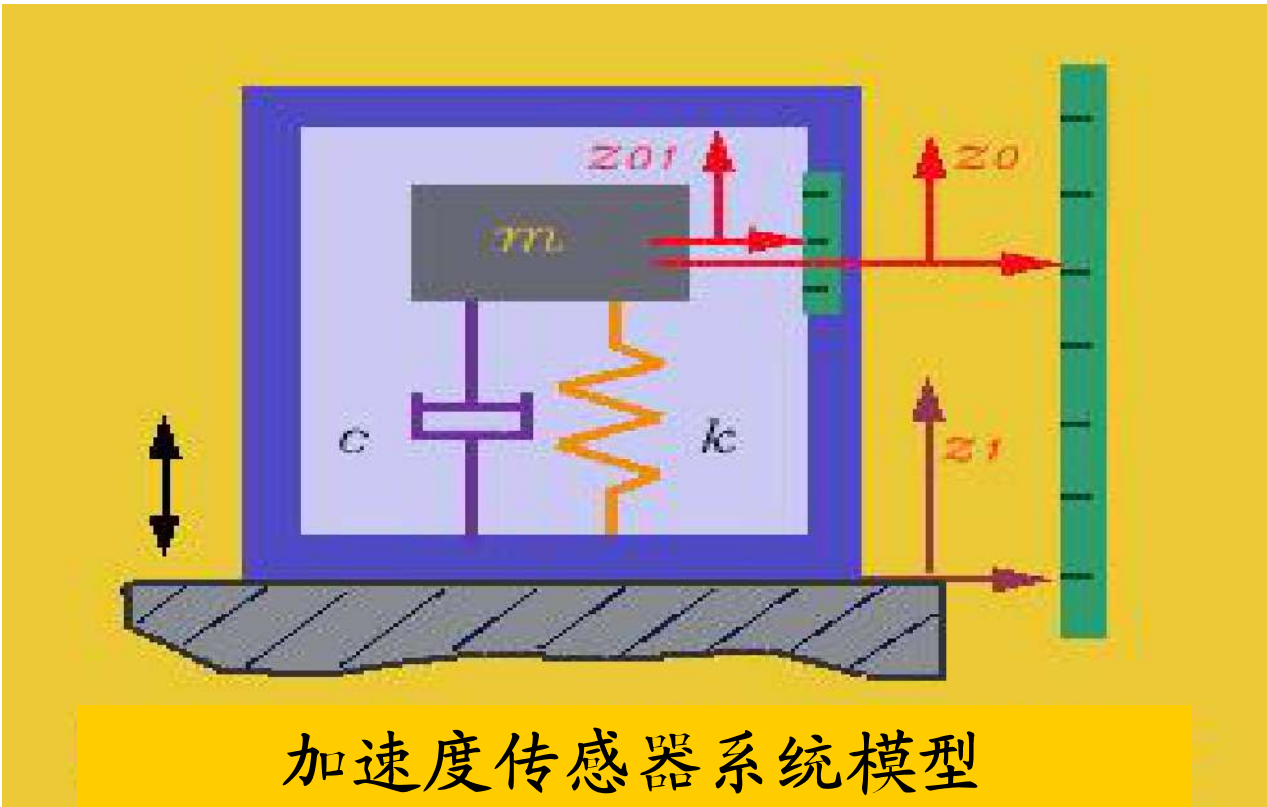


(c) H形剪切式结构



(d) 三角形剪切式结构

5.6.2 压电加速度传感器的动态特性



Part B 加速度测量

质量块的动力学方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = ma$$

式中 x 为振动时质量块相对振动体的位移。

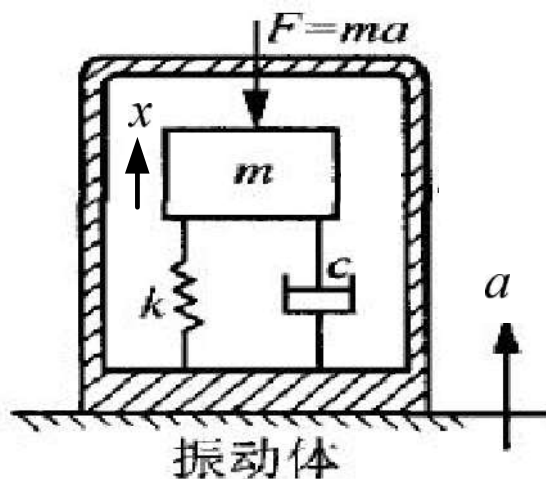
得幅频特性函数：

$$A(\omega) = \left| \frac{x}{a} \right| = \frac{K}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2}}$$

其中, K 为传感器**静态灵敏度**: $K = \left| \frac{x}{a} \right| = \frac{m}{k} = \frac{1}{\omega_n^2}$

$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ——固有频率; $\xi = \frac{c}{\sqrt{mk}}$ ——阻尼比;

则 $A(\omega) = \left| \frac{x}{a} \right| = \frac{1/\omega_n^2}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2}} = A_n(\omega) \frac{1}{\omega_n^2}$



由于质量块相对振动体的位移 x 是压电元件受惯性力 F 作用后产生的变形，在其线性弹性范围内有 $F=kx$ 。由此产生的压电效应 $Q = d_{33}F = d_{33}kx$

则得压电加速度传感器的电荷灵敏度幅频特性为

$$A_q(\omega) = \left| \frac{Q}{a} \right| = A_n(\omega) \frac{d_{33}k}{\omega_n^2}$$

$$\text{式中, } A_n(\omega) = 1 / \sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2}$$

当时 $\omega/\omega_n \ll 1$, $A_n(\omega) \rightarrow 1$ 压电加速度传感器输出为线性，其灵敏度不随 ω 变化。这时，传感器本身的灵敏度近似为常数，为

$$\frac{Q}{a} = \frac{d_{33}k}{\omega_n^2}$$

在应用中，由于压电加速度传感器的阻尼很小，（一般 $\xi \ll 0.1$ ），当 $\omega = \omega_n/3$ 时，动态误差可低于1dB；若取 $\omega = \omega_n/5$ ，动态误差可低于0.5 dB，因此，压电加速度传感器的上限工作频率为 $\omega = (1/5 \sim 1/3)\omega_n$ 。

压电加速度传感器的下限测量频率取决于采用什么样的测量系统。

◆ 接入电荷前置放大器电路

一般电荷放大器的开环放大倍数很大，且 R_f 足够大，放大器输出电压为 $U_o \approx Q/C_f$ ，则接入电荷放大器后压电传感器的灵敏度为

$$\frac{U_o}{a} \approx \frac{d_{33}k}{C_f \omega_n^2}$$

在与电荷前置放大器配合使用时，传感器的低频响应受电荷放大器的3dB下限截止频率的限制。而一般电荷放大器的 f_L 可低至 10^{-2}Hz 数量级，因此测量系统具有很好的低频响应特性，可以测量接近静态变化非常缓慢的物理量。

◆接入电压前置放大器电路

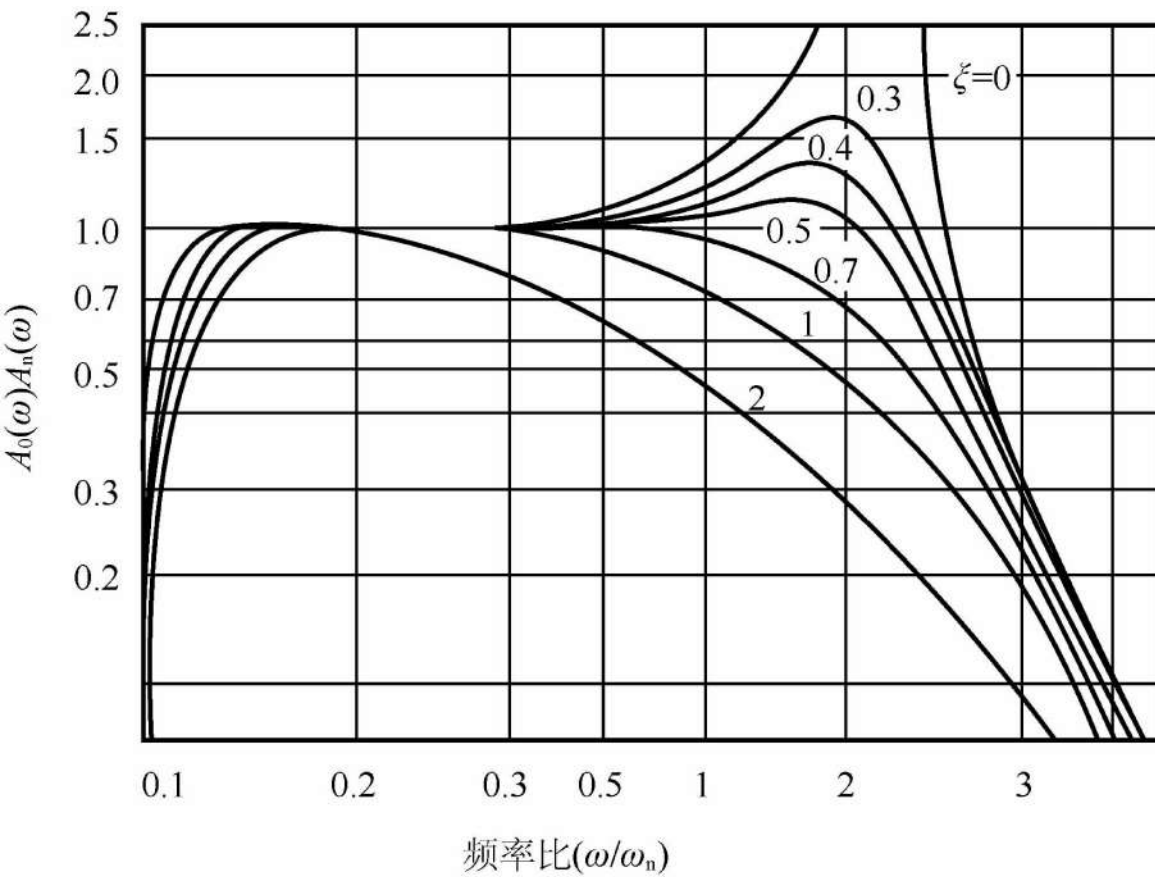
带电压前置放大器的压电加速度传感器的幅频特性为

$$A_U(\omega) = \left| \frac{U_o}{a} \right| = A_0(\omega) A_n(\omega) \frac{Ad_{33}k}{C\omega_n^2}$$

式中， $A_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_0/\omega)^2}}$ 为由电压放大器回路固有角频率

$\omega_0 = 1/RC$ 决定的幅频特性。

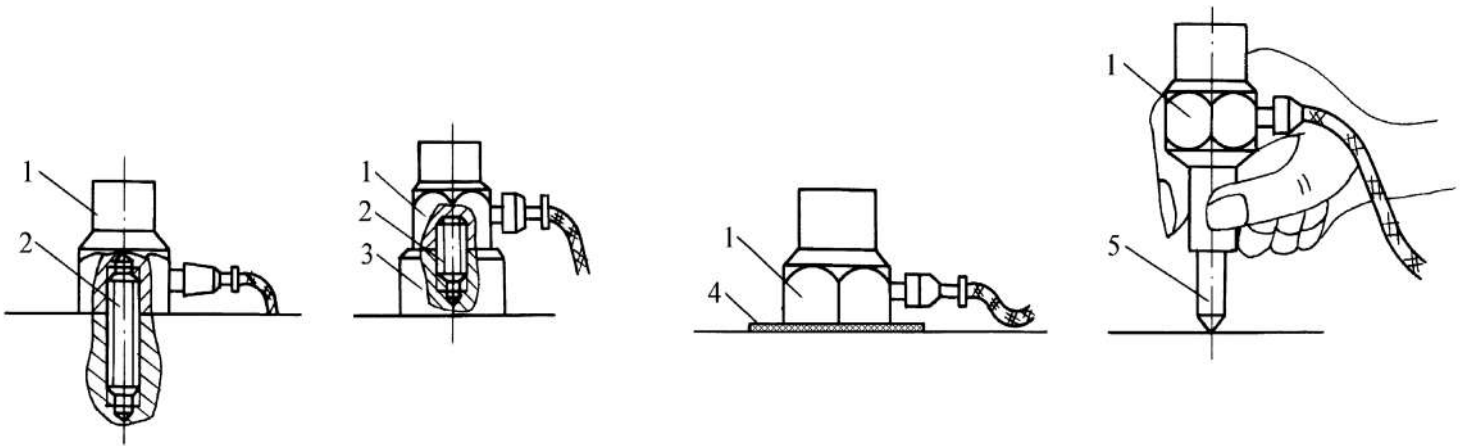
电压放大器测量系统的相对频率特性曲线



当 $\omega/\omega_n \ll 1$ 和 ω_0 传感器的灵敏度为常数:

$$\frac{U_o}{a} \approx \frac{d_{33}kA}{C\omega_n^2}$$

压电加速度传感器的安装及使用

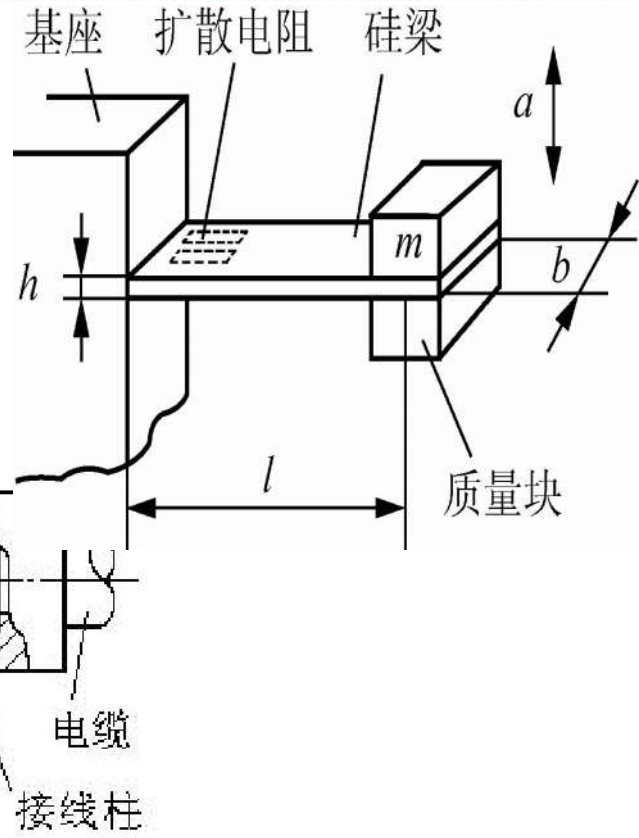
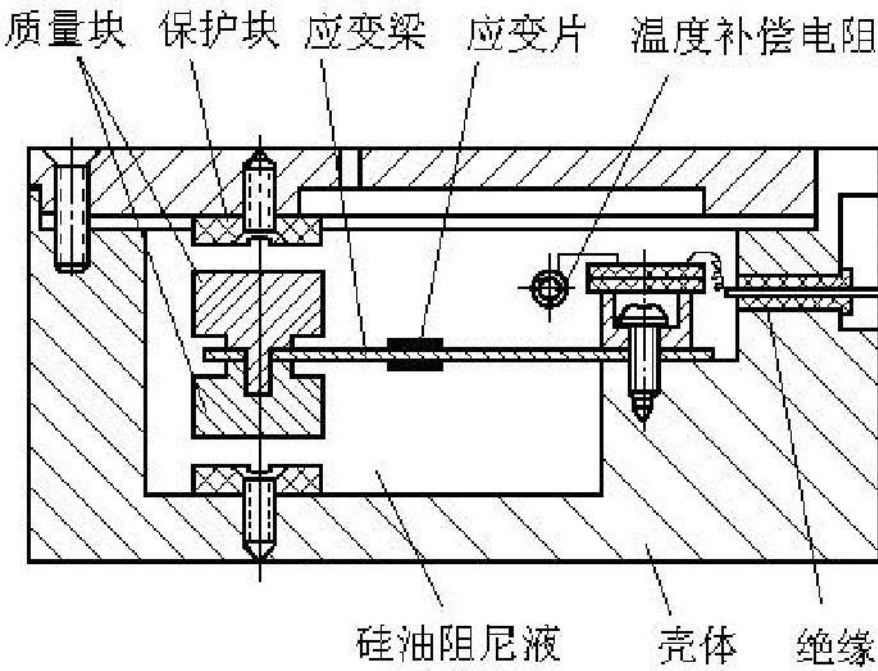


a) 双头螺丝固定 b) 磁铁吸附 c) 胶水粘结 d) 手持探针式

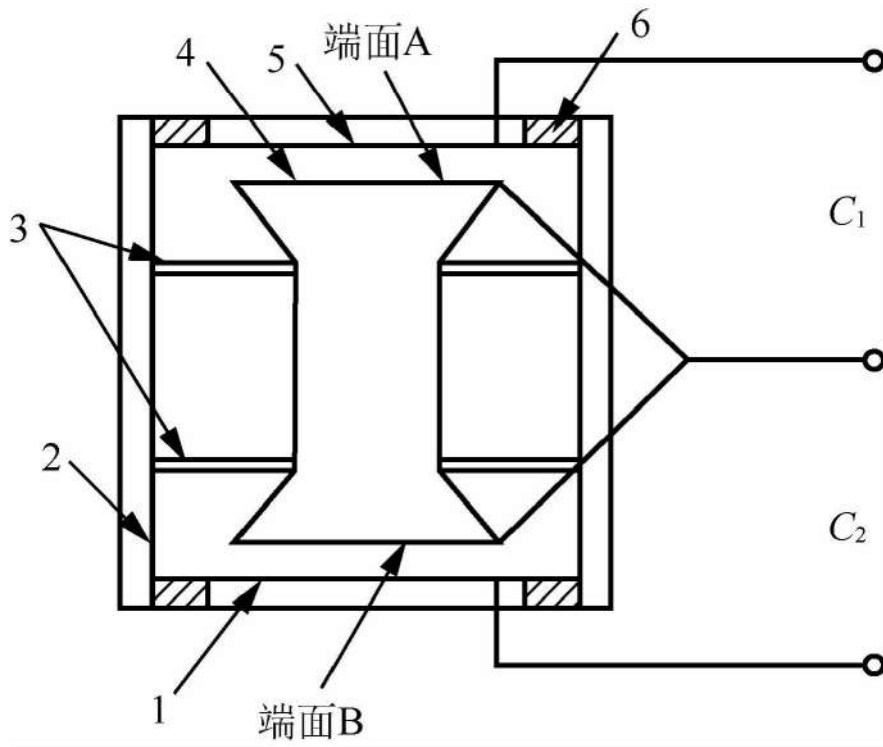
1—压电式加速度传感器； 2—双头螺栓； 3—磁钢； 4—粘接剂； 5—顶针

5.7 其它加速度传感器

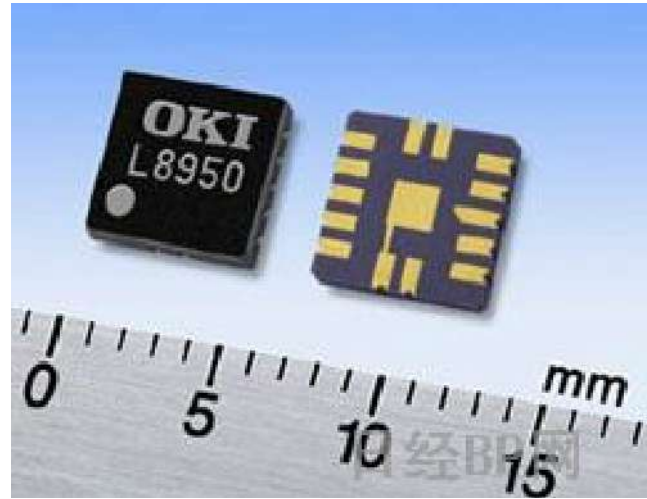
5.7.1 电阻应变/压阻式加速度传感器



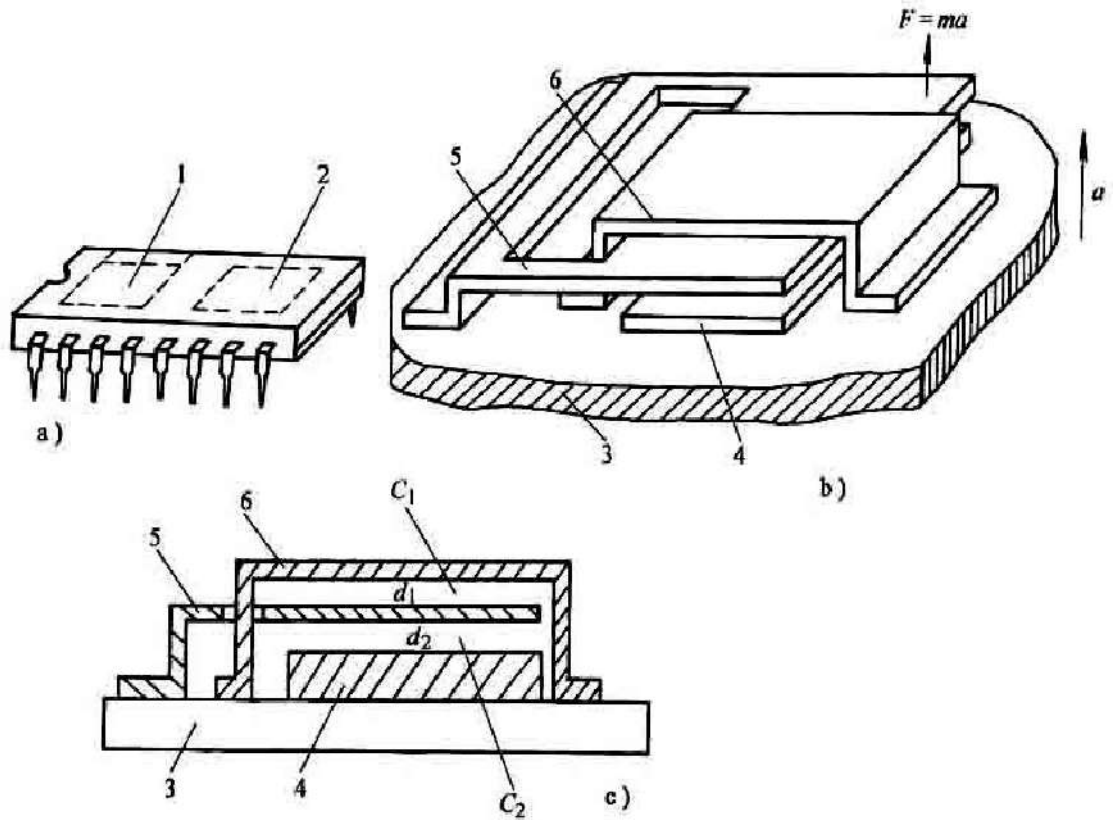
5.7.2 电容式加速度传感器



图示电容加速度传感器以微细加工技术为基础，既能测量交变加速度（振动），也可测量惯性力或重力加速度。其工作电压为2.7~5.25V，加速度测量范围为数个g，可输出与加速度成正比的电压也可输出占空比正比于加速度的PWM脉冲。



Part B 加速度测量



1—加速度测试单元；2—信号处理电路；3—衬底；
4—底层多晶硅（下电极）；5—多晶硅悬臂梁；6—顶层多晶硅（上电极）

加速度传感器在汽车中的应用



装有传感器的
假人

气囊

加速度传感器安装在轿车上，可以作为碰撞传感器。当测得的负加速度值超过设定值时，微处理器据此判断发生了碰撞，于是就启动轿车前部的折叠式安全气囊迅速充气而膨胀，托住驾驶员及前排乘员的胸部和头部。

5.7.3 差动变压器式加速度传感器

