



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

传感器技术

主讲人： 吴琼水

武汉大学电子信息学院



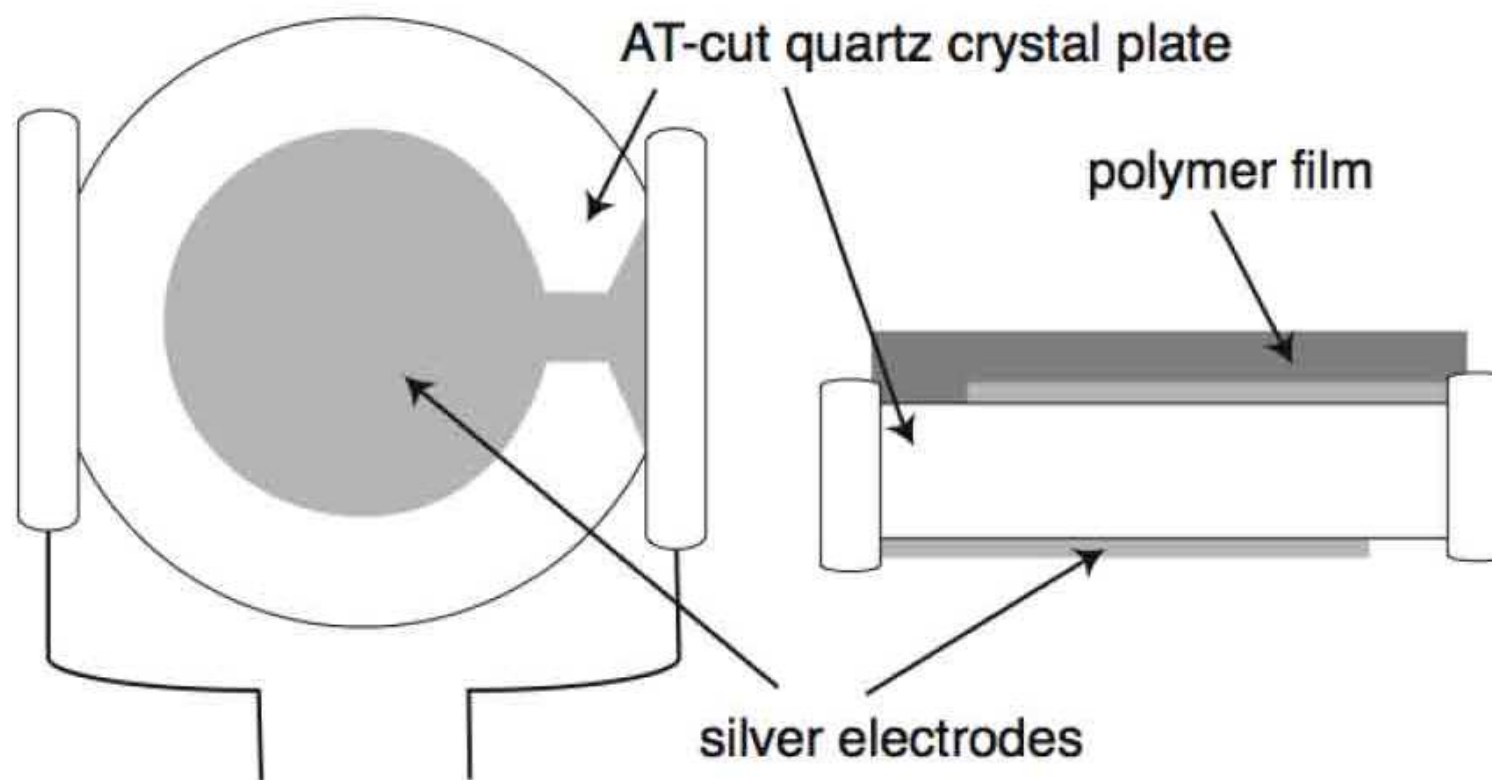
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

第5章

压电式传感器

概述

思考题：如何测量纳克级的质量变化？



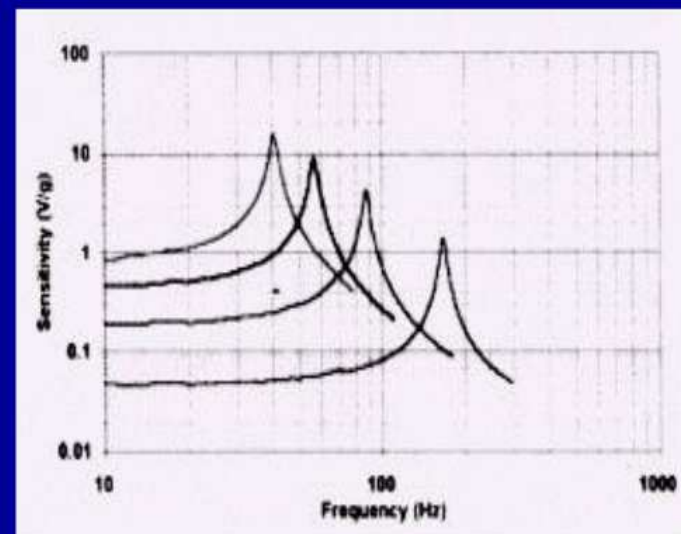
石英晶体微天平

概述



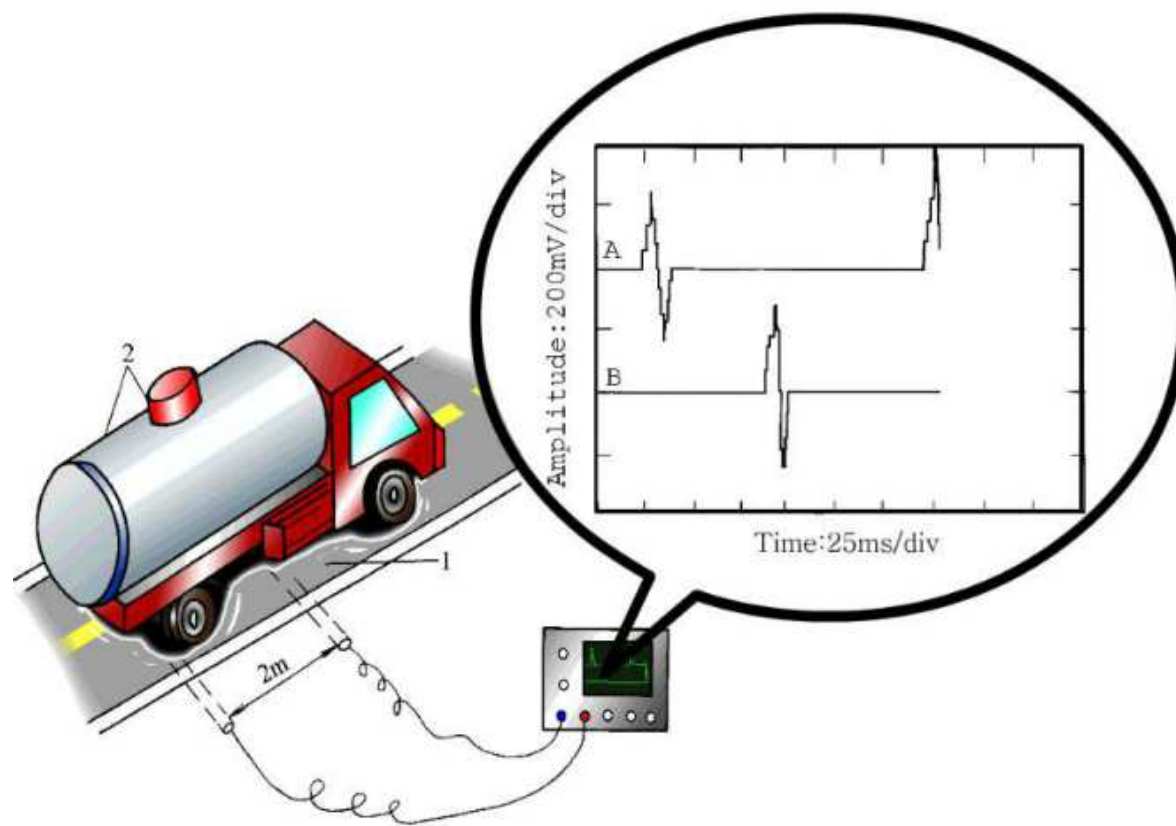
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

将长的压电电缆埋在泥土的浅表层，可起分布式地下麦克风或听音器的作用，可在几十米范围内探测人的步行，对轮式或履带式车辆也可以通过信号处理系统分辨出来。右图为测量系统的输出波形。



压电周界报警

概述



交通数据采集

概述



压电式传感器是一种典型的有源(发电型)传感器，以电介质的压电效应为基础，外力作用下在电介质表面产生电荷，从而实现非电量测量。

压电传感元件是力敏感元件，其可以对各种动态力、机械冲击和振动进行测量，在声学、医学、力学、石油勘探、导航方面都得到广泛的应用。

压电式传感器具有响应频带宽、灵敏度高、信噪比大、结构简单、工作可靠、重量轻等优点。

概述



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY



压电加速度计



压电陶瓷超声换能器



压电陶瓷位移器



石英晶体在振荡电路中工作时，压电效应与逆压电效应交替作用，从而产生稳定的振荡输出频率。



第5章 压电式传感器

5.1 压电效应

5.2 压电材料

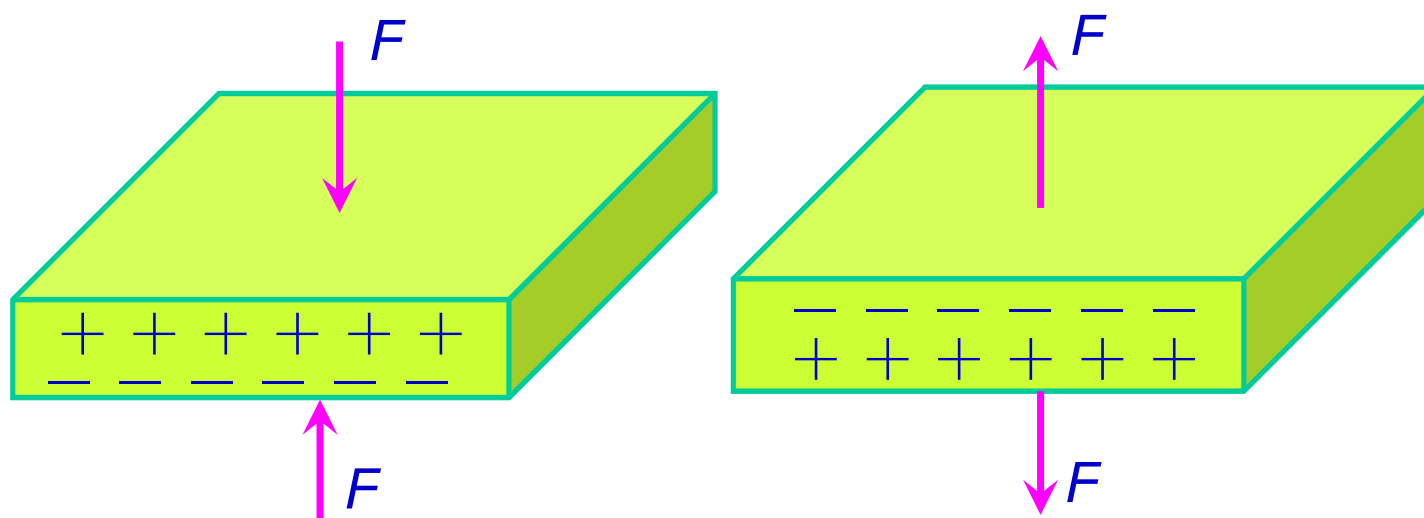
5.3 测量电路

5.4 应用

5.1 压电效应



正压电效应（顺压电效应）：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，同时它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。

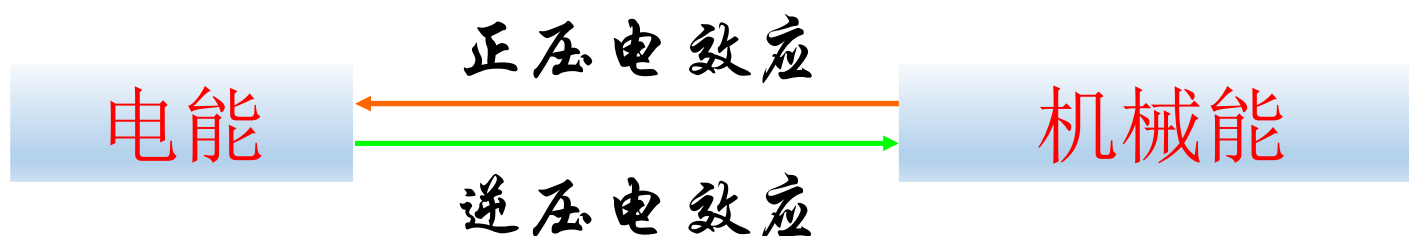


正（顺）压电效应示意图

5.1 压电效应



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。



5.1 压电效应



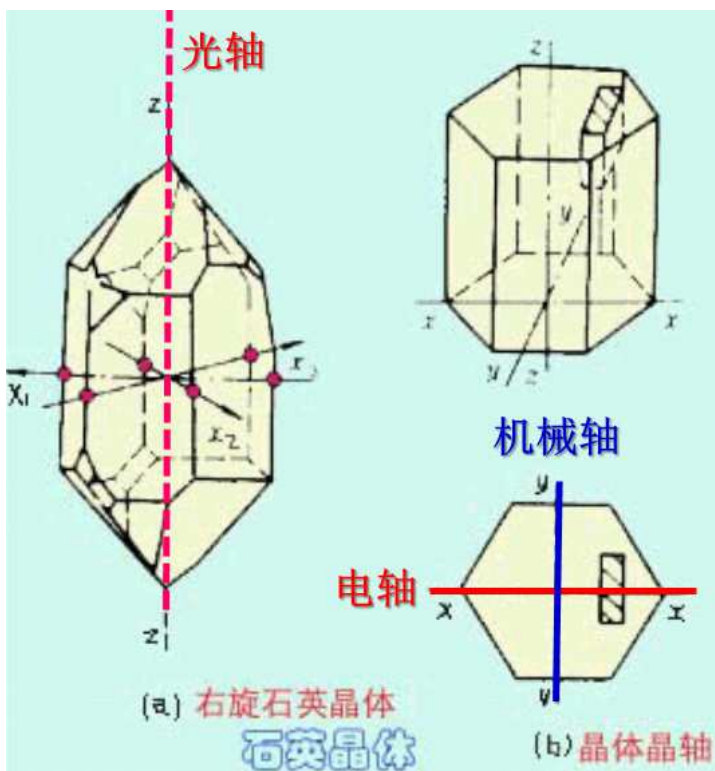
常见的压电材料可分为两类，即压电单晶体和多晶体压电陶瓷。

压电单晶体有石英(包括天然石英和人造石英)、水溶性压电晶体(包括酒石酸钾钠、酒石酸乙烯二铵、酒石酸二钾、硫酸铯等)；

多晶体压电陶瓷有钛酸钡压电陶瓷、锆钛酸铅系压电陶瓷、铌酸盐系压电陶瓷和铌镁酸铅压电陶瓷等。

一、石英晶体压电效应

天然石英晶体，其结构形状为一个六角形晶柱，两端为一对称棱锥。



一、石英晶体压电效应



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► z 轴

与 c 轴重合，称为**光轴**（也称为中性轴）

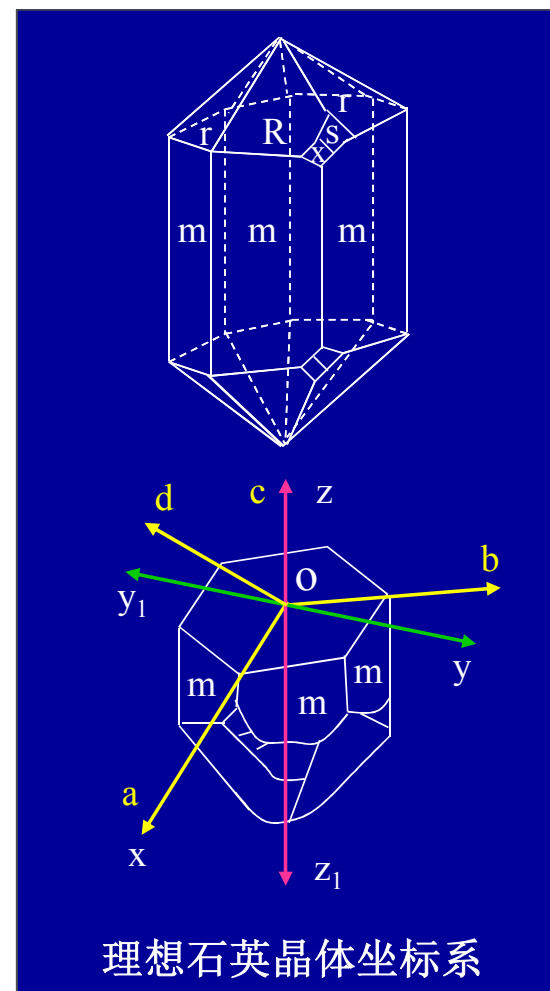
此轴可用光学的方法测定，即光线沿该轴通过石英体时，无折射。

► x 轴

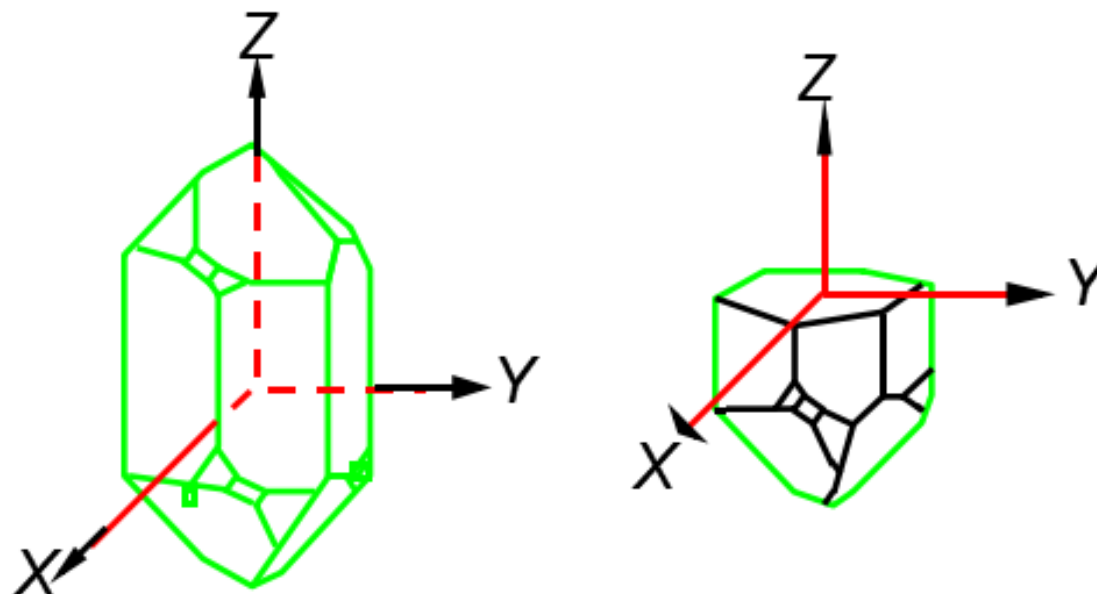
与a（或b、d）轴重合，它穿过 m 面六棱柱的棱角，与z轴成 90° 角，称为**电轴**。

► y 轴

与 x 轴在同一个平面上且与 x 轴成 90° 角垂直 m 柱面，垂直于z轴，称为**机械轴**。



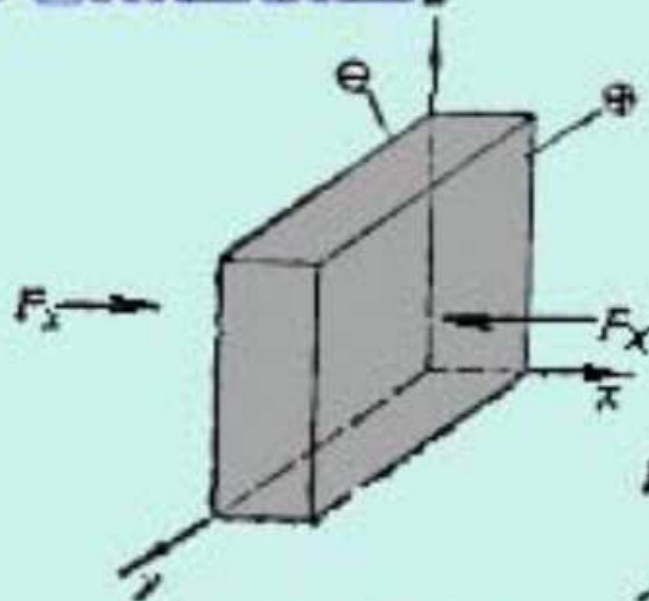
一、石英晶体压电效应



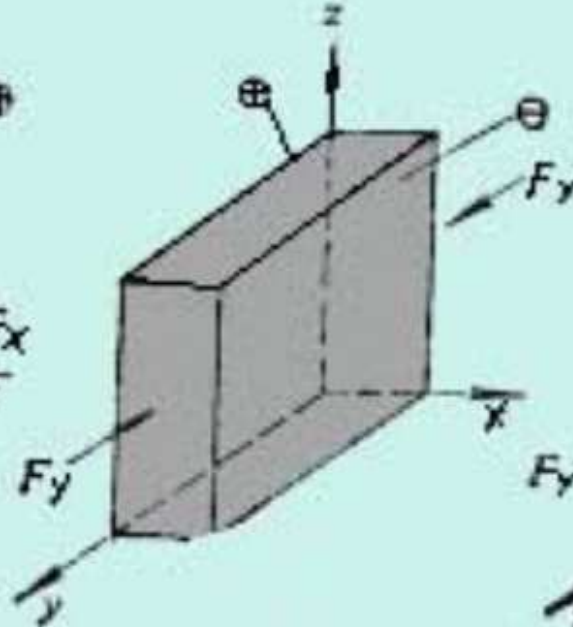
通常把沿电轴 $X-X$ 方向的力作用下产生电荷的压电效应称为“**纵向压电效应**”，而把沿机械轴 $Y-Y$ 方向的力作用下产生电荷的压电效应称为“**横向压电效应**”，沿光轴 $Z-Z$ 方向受力则**不产生压电效应**。

一、石英晶体压电效应

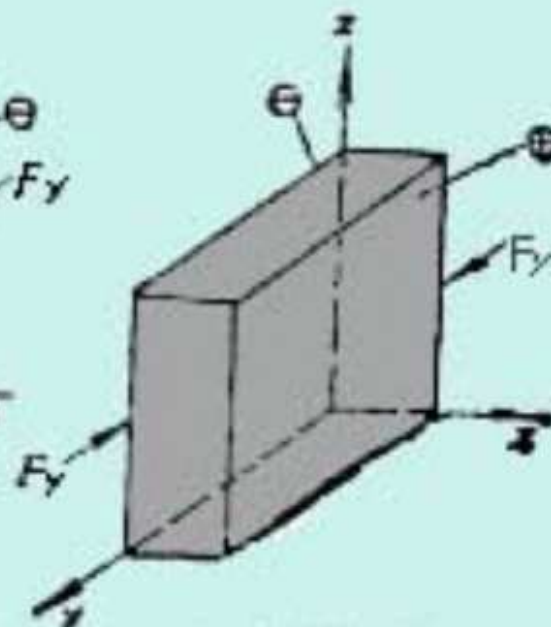
压电效应模型



(a) 纵向效应



(b) 横向效应



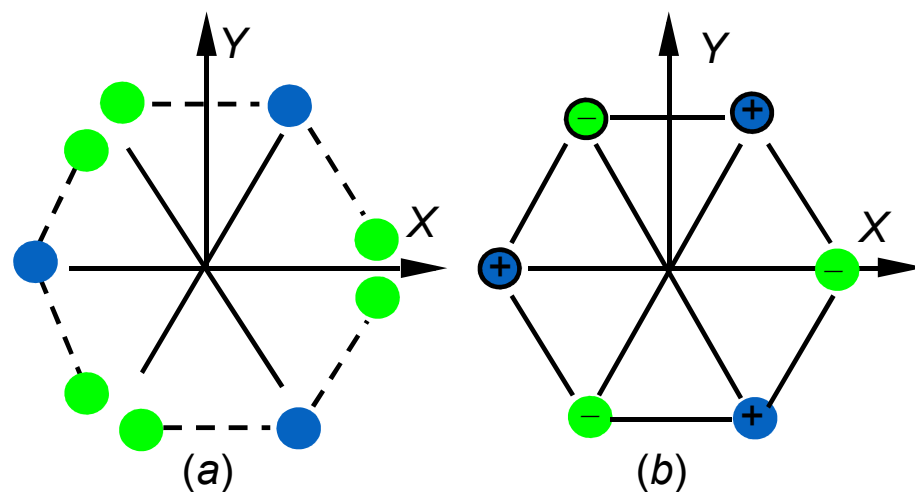
(c) 切向效应

一、石英晶体压电效应



石英晶体产生压电效应的微观机理

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“ \oplus ”代表 Si^{4+} ，“ \ominus ”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

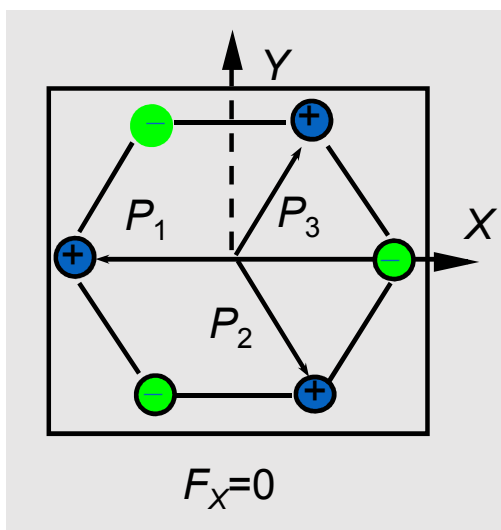
(b) 等效为正六边形排列的投影

一、石英晶体压电效应



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 ，此时正负电荷中心重合，电偶极矩的矢量和等于零，即：

$$P_1 + P_2 + P_3 = 0$$



一、石英晶体压电效应



当晶体受到沿**X**方向的压力作用时，正、负离子相对位置随之发生变化，此时**正、负电荷中心不再重合**。

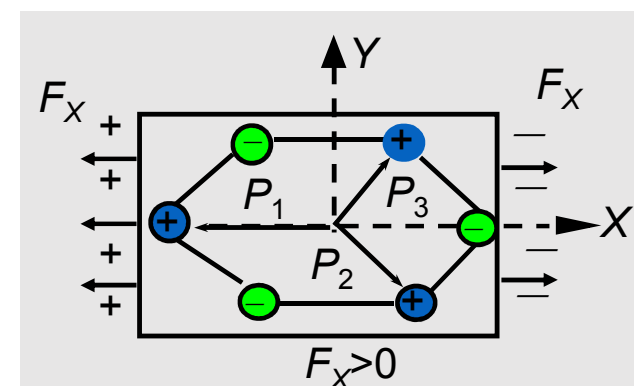
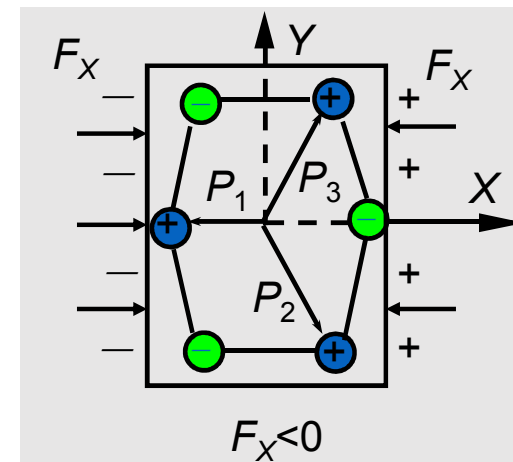
电偶极矩在**X**、**Y**、**Z**方向的分量为：

$$\begin{aligned} F_x < 0 \text{ 时: } & (P_1 + P_2 + P_3)_x > 0 \\ & (P_1 + P_2 + P_3)_y = 0 \\ & (P_1 + P_2 + P_3)_z = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_x > 0 \text{ 时: } & (P_1 + P_2 + P_3)_x < 0 \\ & (P_1 + P_2 + P_3)_y = 0 \\ & (P_1 + P_2 + P_3)_z = 0 \end{aligned}$$

因此，在**X轴出现电荷**，在**Y、Z轴方向则不出现电荷**。

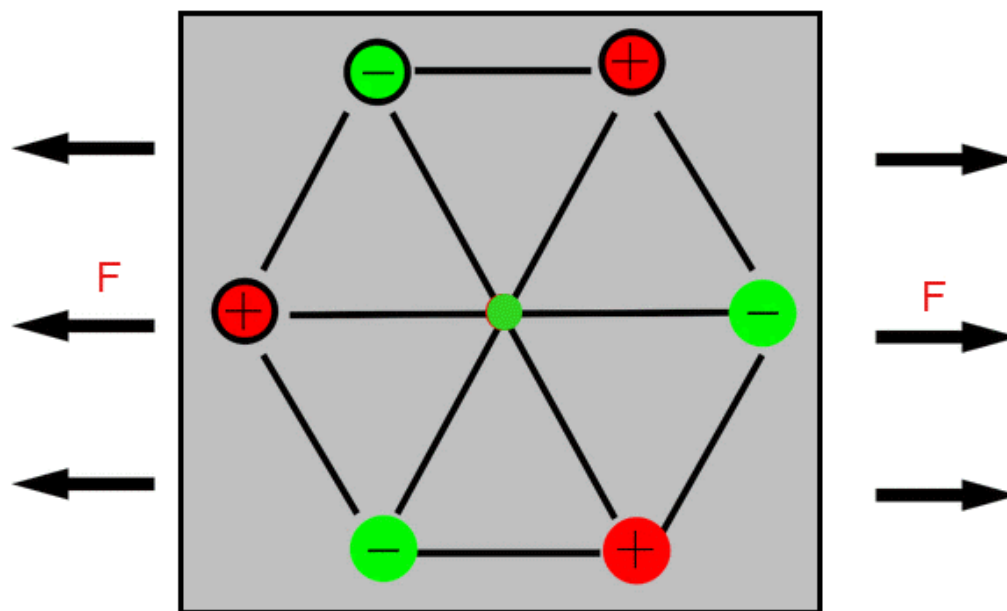
可见，当晶体受到沿**X**(电轴)方向的力 **F_x** 作用时，它在**X**方向产生正压电效应，而**Y、Z**方向则**不产生压电效应**。



一、石英晶体压电效应



SiO₂压电效应演示

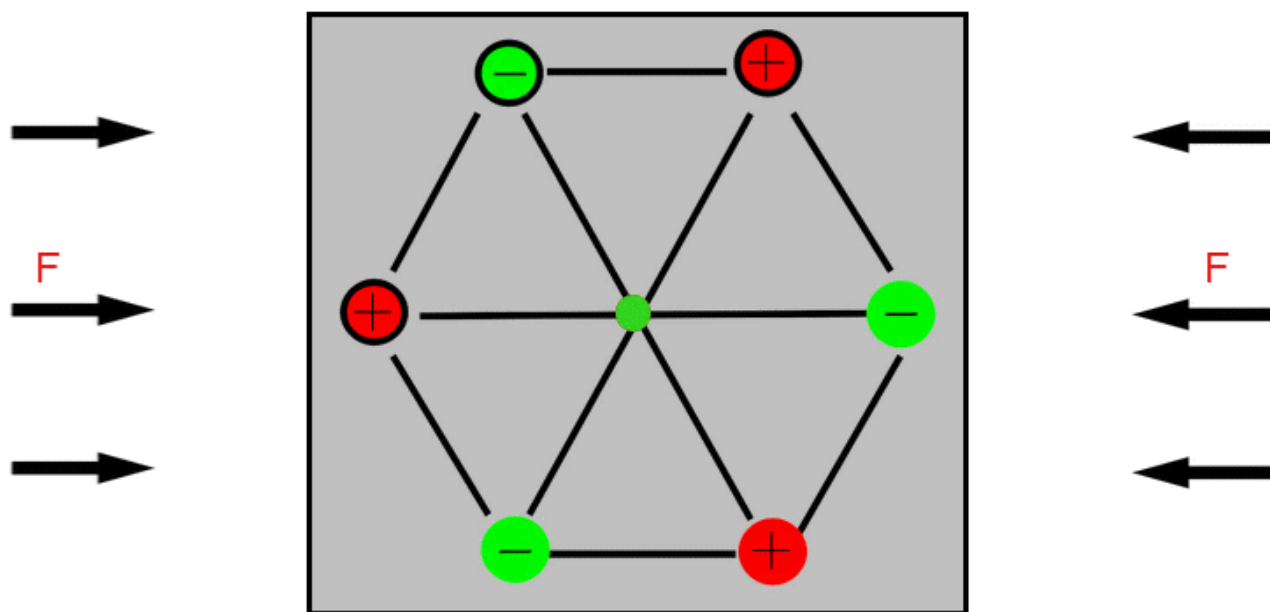


武汉大学电子信息学院传感器技术课程组qswu制作 201604

一、石英晶体压电效应



SiO₂压电效应演示

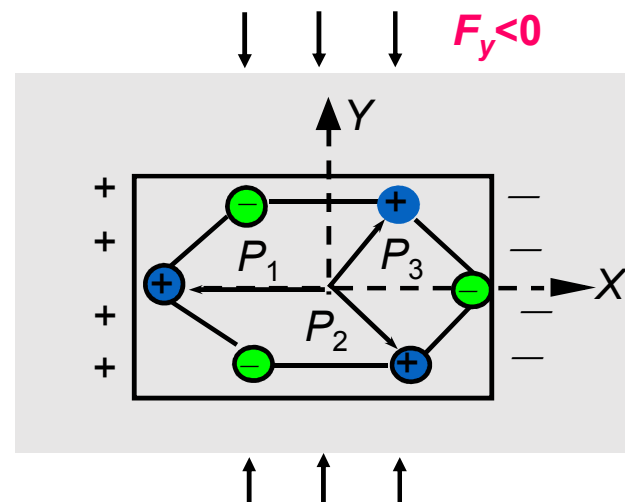
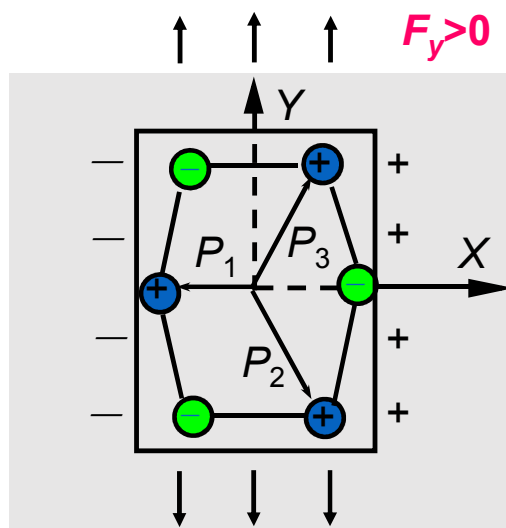


武汉大学电子信息学院传感器技术课程组qswu制作 201604

一、石英晶体压电效应



晶体在 Y 轴(机械轴)方向力 F_Y 作用下的情况:



晶体在 Y (即机械轴)方向的力 F_Y 作用下, 效果与 F_X 相似, 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。

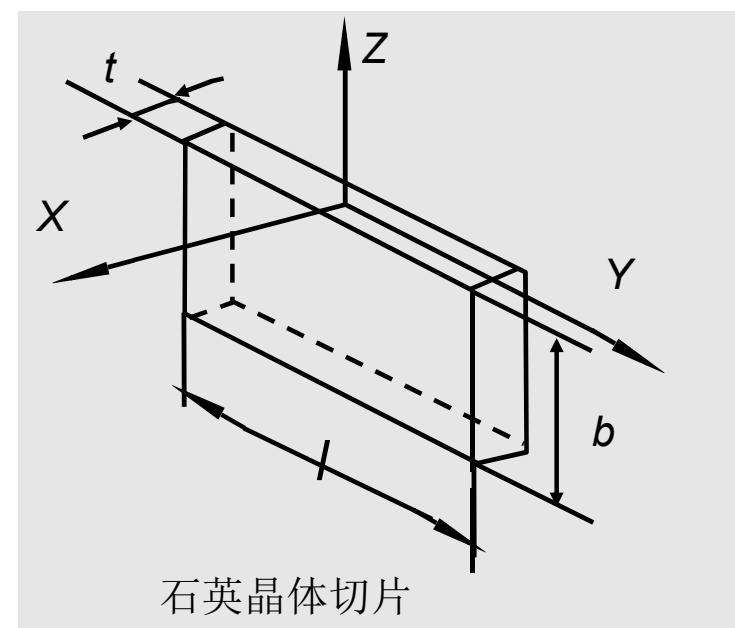
一、石英晶体压电效应



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。

假设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_{xx} 作用时，晶片将产生厚度变形，并发生极化现象。在晶体线性弹性范围内，极化强度 P_{xx} 与应力 σ_{xx} 成正比，即：



一、石英晶体压电效应



$$P_{XX} = d_{11} \sigma_{XX} = d_{11} \frac{F_X}{lb}$$

式中 F_X —— X 轴方向的压力大小；

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_{XX} 在数值上等于晶面上的电荷密度，即

$$P_{XX} = \frac{q_X}{lb}$$

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
$$C_X = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r lb}{t}$$
 ——电极面间电容。

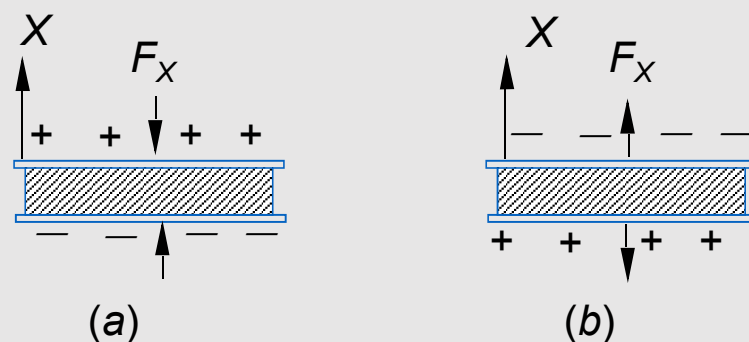
一、石英晶体压电效应

根据逆压电效应，晶体在**X**轴方向将产生伸缩，即 $\Delta t = d_{11} U_X$

或用应变表示，则 $\frac{\Delta t}{t} = d_{11} \frac{U_X}{t} = d_{11} E_X$

式中 E_X ——**X**轴方向上的电场强度。

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)。



一、石英晶体压电效应



如果在同一晶片上作用力是沿着机械轴的方向，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

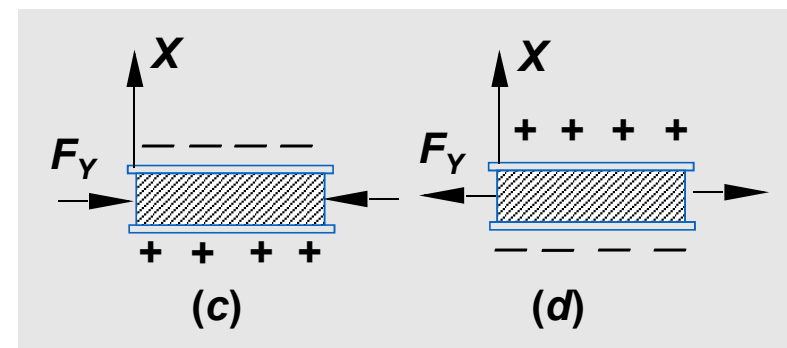
$$q_{XY} = d_{12} \frac{lb}{tb} F_Y = d_{12} \frac{l}{t} F_Y$$

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

$$q_{XY} = -d_{11} \frac{l}{t} F_Y$$

式中 t ——晶片厚度。
则其极间电压为：

$$U_X = \frac{q_{XY}}{C_X} = -d_{11} \frac{l}{t} \frac{F_Y}{C_X}$$



一、石英晶体压电效应

根据逆压电效应，晶片在Y轴方向将产生伸缩变形，即：

$$\Delta l = -d_{11} \frac{l}{t} U_X$$

或用应变表示：

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

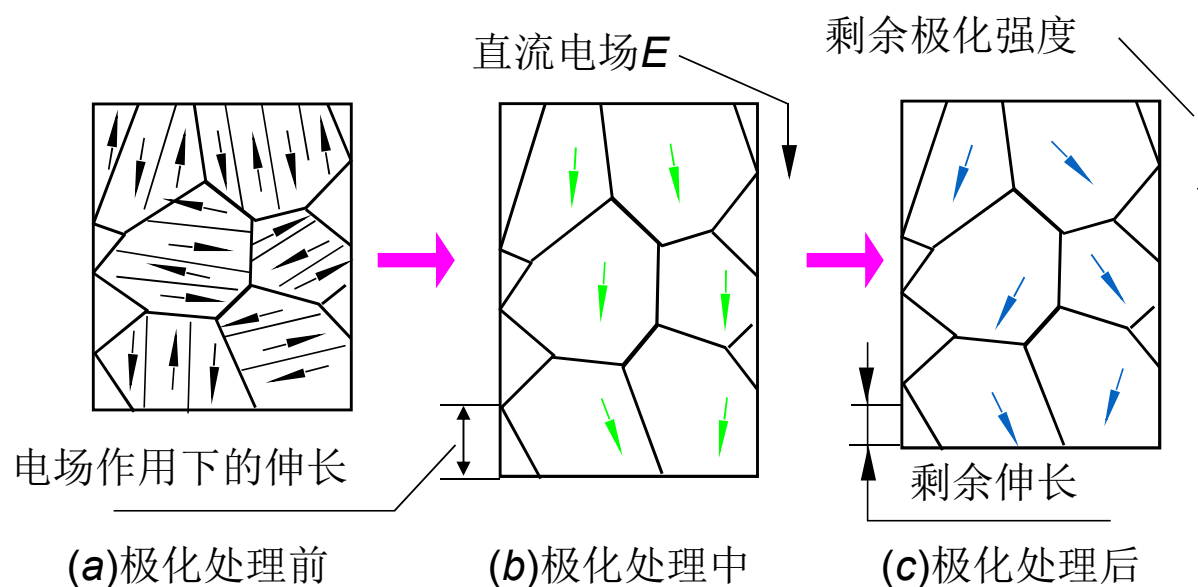
由上述可知：

- 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。

二、压电陶瓷的压电效应



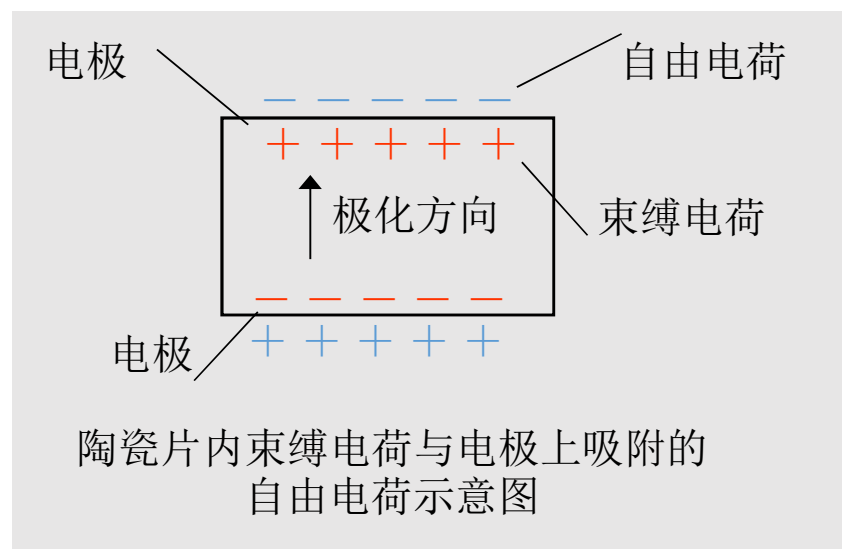
压电陶瓷属于铁电体一类的物质，是人工制造的多晶压电材料，它具有类似铁磁材料磁畴结构的电畴结构。电畴是分子自发形成的区域，它有一定的极化方向，从而存在一定的电场。在无外电场作用时，各个电畴在晶体上杂乱分布，它们的极化效应被相互抵消，因此原始的压电陶瓷内极化强度为零，见图（a）。



二、压电陶瓷的压电效应

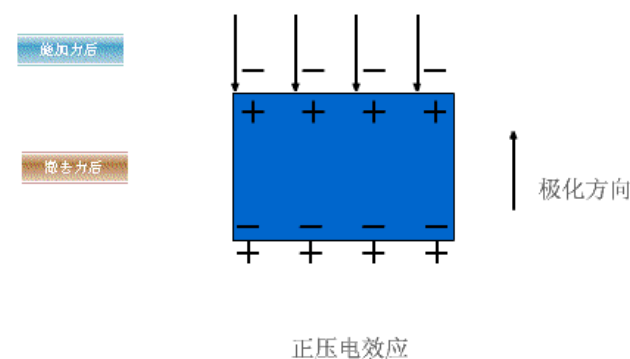
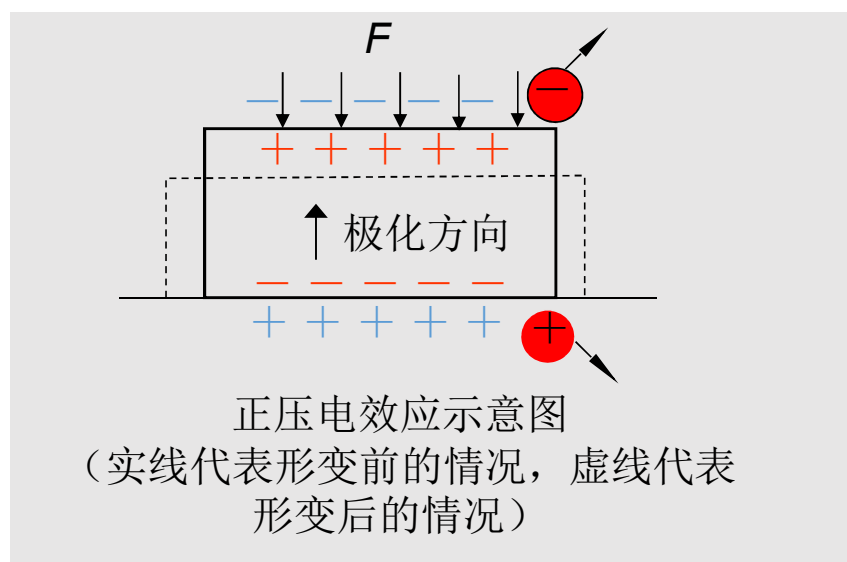


但是，当把电压表接到陶瓷片的两个电极上进行测量时，却无法测出陶瓷片内部存在的极化强度。这是因为陶瓷片内的极化强度总是以**电偶极矩**的形式表现出来，即在陶瓷的一端出现正束缚电荷，另一端出现负束缚电荷。由于束缚电荷的作用，在陶瓷片的电极面上**吸附**了一层**来自外界**的自由电荷。这些自由电荷与陶瓷片内的束缚电荷符号相反而数量相等，它起着屏蔽和抵消陶瓷片内极化强度对外界的作用。所以电压表不能测出陶瓷片内的极化程度，如图。



二、压电陶瓷的压电效应

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。

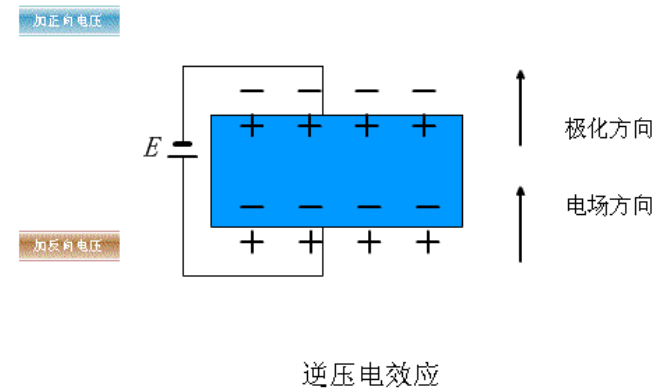
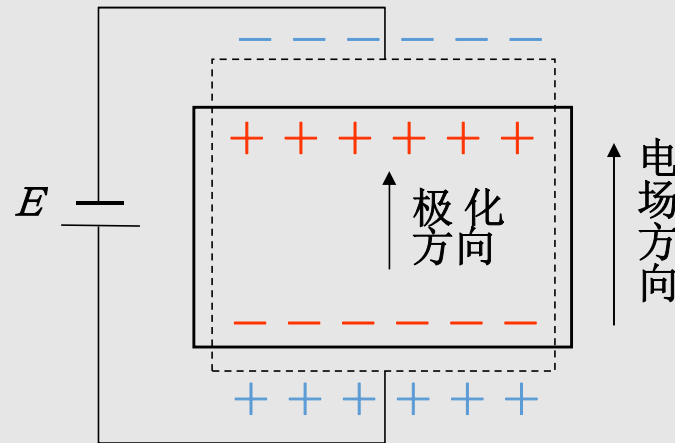


二、压电陶瓷的压电效应



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)



二、压电陶瓷的压电效应



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。

二、压电陶瓷的压电效应



压电陶瓷的压电系数比石英晶体的大得多，所以采用压电陶瓷制作的压电式传感器的灵敏度较高。极化处理后的压电陶瓷材料的剩余极化强度和特性与温度有关，它的参数也随时间变化，从而使其压电特性减弱。

最早使用的压电陶瓷材料是钛酸钡（ BaTiO_3 ）。它是由碳酸钡和二氧化钛按1：1摩尔分子比例混合后烧结而成的。它的压电系数约为石英的50倍，但居里点温度只有 115°C ，使用温度不超过 70°C ，温度稳定性和机械强度都不如石英。





第5章 压电式传感器

5.1 压电效应

5.2 压电材料

5.3 测量电路

5.4 应用

5.2 压电材料

压电材料应具备以下几个主要特性：

- ①转换性能。要求具有较大的压电常数。
- ②机械性能。机械强度高、刚度大。
- ③电性能。高电阻率和大介电常数。
- ④环境适应性。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。

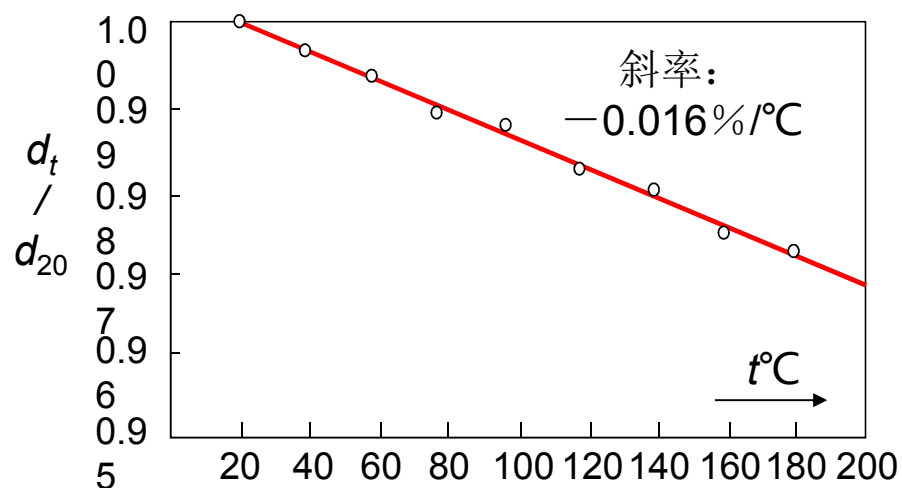
压电材料



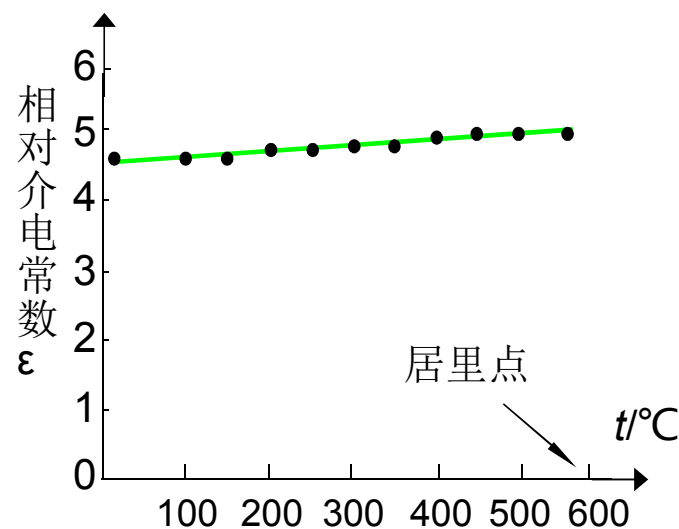
(一) 石英晶体

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



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。为了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。

石英晶片的切型符号表示方法：

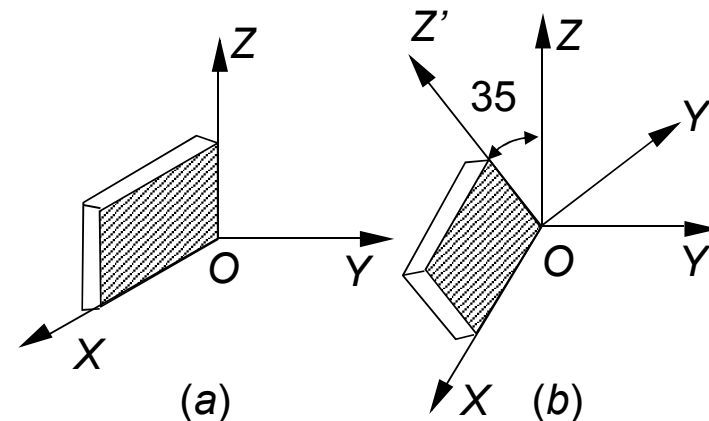
- ◆ **IRE**标准规定的切型符号表示法；
- ◆ 习惯符号表示法。

石英晶体



IRE标准规定的切型符号包括一组字母（ X 、 Y 、 Z 、 t 、 l 、 b ）和角度。用 X 、 Y 、 Z 中任意两个字母的先后排列顺序，表示石英晶片厚度和长度的原始方向；用字母 t （厚度）、 l （长度）、 b （宽度）表示旋转轴的位置。当角度为正时，表示逆时针旋转；当角度为负时，表示顺时针旋转。例如： $(YXI) 35^\circ$ 切型，其中第一个字母 Y 表示石英晶片在原始位置（即旋转前的位置）时的厚度

沿 Y 轴方向，第二个字母 X 表示石英晶片在原始位置时的长度沿 X 轴方向，第三个字母 l 和角度 35° 表示石英晶片绕长度逆时针旋转 35° ，如图。



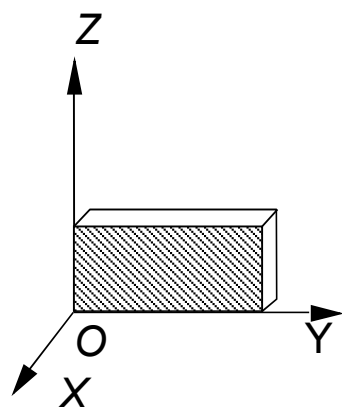
(YXI) 35° 切型
(a) 石英晶片原始位置
(b) 石英晶片的切割方位

石英晶体

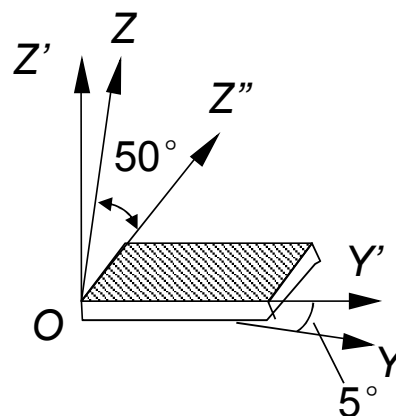


又如 (XYt/l) $5^\circ/-50^\circ$ 切型，它表示石英晶片原始位置的厚度沿 X 轴方向，长度沿 Y 轴方向，先绕厚度 t 逆时针旋转 5° ，再绕长度 l 顺时针旋转 50° ，如图。

习惯符号表示法是石英晶体特有的表示法，它由两个大写的英文字母组成。例如，AT、BT、CT、DT、NT、MT和FC等。



(a)石英晶片原始位置



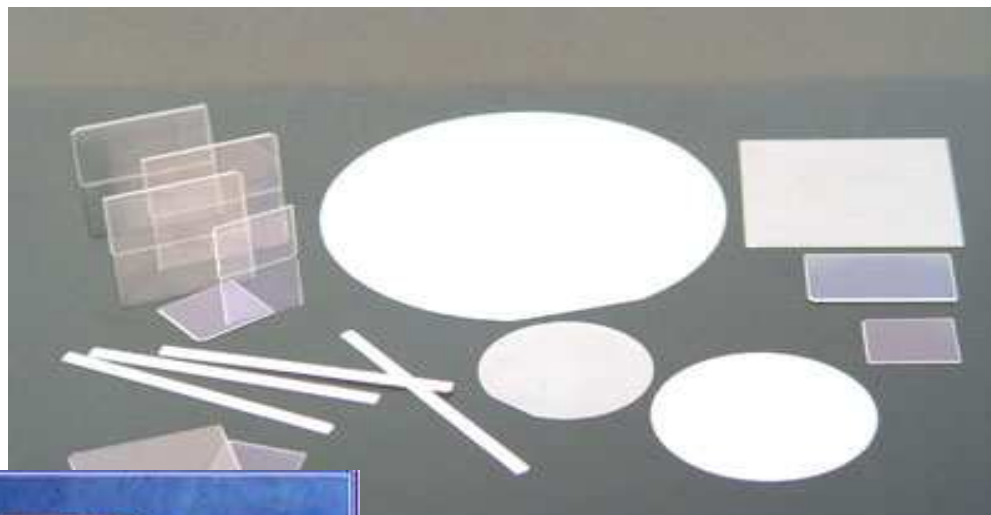
(b)石英晶片的切割方位

石英晶体

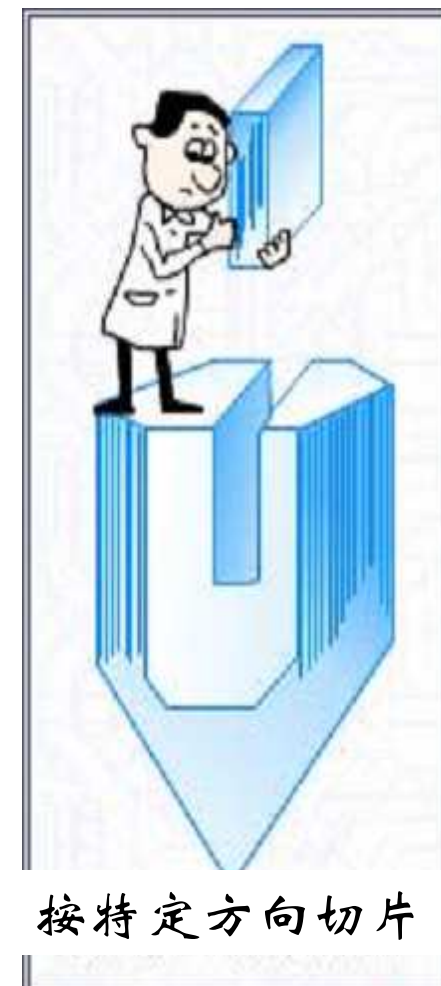


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

压电晶片



人工合成水晶



按特定方向切片

(二) 压电陶瓷

1、 钛酸钡压电陶瓷

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**）

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。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（**PVF₂**）是目前发现的压电效应较强的**聚合物薄膜**，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。

4、 压电半导体材料

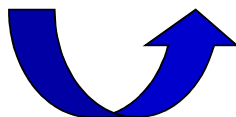
如**ZnO**、**CdS**、**ZnO**、**CdTe**，这种力敏器件具有灵敏度高，响应时间短等优点。此外用**ZnO**作为表面声波振荡器的压电材料，可测取力和温度等参数。

常用压电材料的主要特性



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

材料	形状	压电系数 (10^{-12}C/N)	相对介电系数	居里温度 ($^{\circ}\text{C}$)	密度 (10^3kg/m^3)	机械品质因数
石英 $\alpha\text{-SiO}_2$	单晶	$d_{11}=-2.31$ $d_{14}=0.727$	4.6	573	2.65	10^5
钛酸钡 BaTiO_3	陶瓷	$d_{33}=190$ $d_{31}=-78$	1700	120	5.7	300
锆钛酸铅 PZT	陶瓷	$d_{33}=71\sim590$ $d_{31}=-100\sim200$	460~3400	180~350	7.5~7.6	65~1300
硫化镉 CdS	单晶	$d_{33}=1.03$ $d_{31}=-5.2$ $d_{15}=-14$	10.3 9.35		4.82	
氧化锌 ZnO	单晶	$d_{33}=12.4$ $d_{31}=-5.0$ $d_{15}=-8.3$	11.0 9.26		5.68	
聚二氟乙烯 PVF_2	延伸薄膜	$d_{31}=6.7$	5	120	1.8	
复合材料 PVF_2+PZT	薄膜	$d_{31}=15\sim25$	100~200		5.5~6	





第5章 压电式传感器

5.1 压电效应

5.2 压电材料

5.3 测量电路

5.4 应用

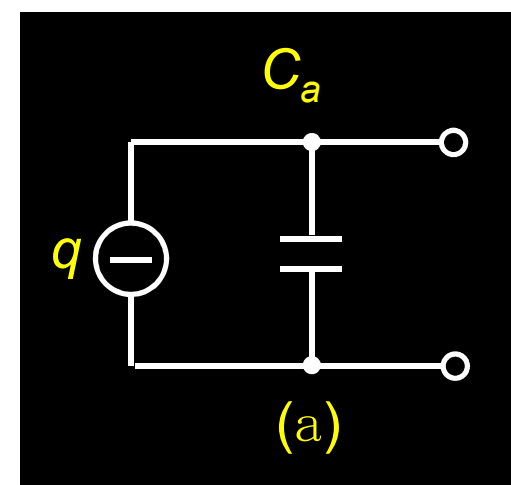
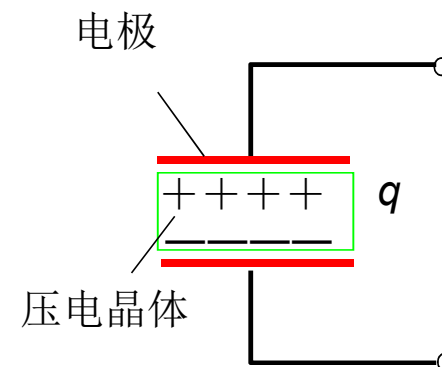
测量电路

当压电晶体承受应力作用时，在它的两个极面上出现极性相反但电量相等的电荷。故可把压电传感器看成一个电荷源与一个电容并联的电荷发生器。

其电容量为：

$$C_a = \frac{\epsilon S}{t} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{t}$$

其中： t-晶体厚度

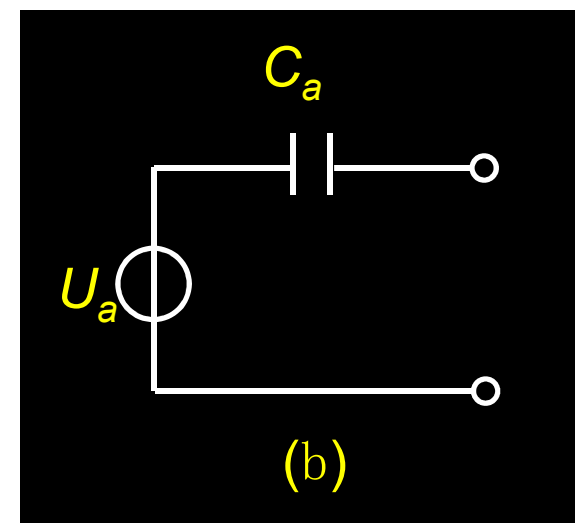
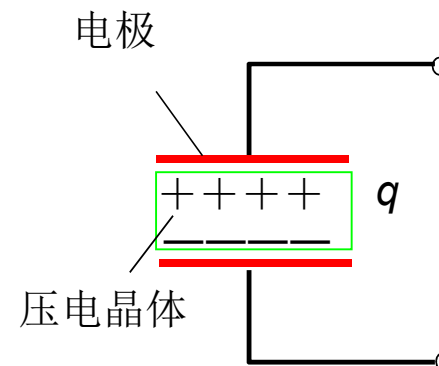


测量电路

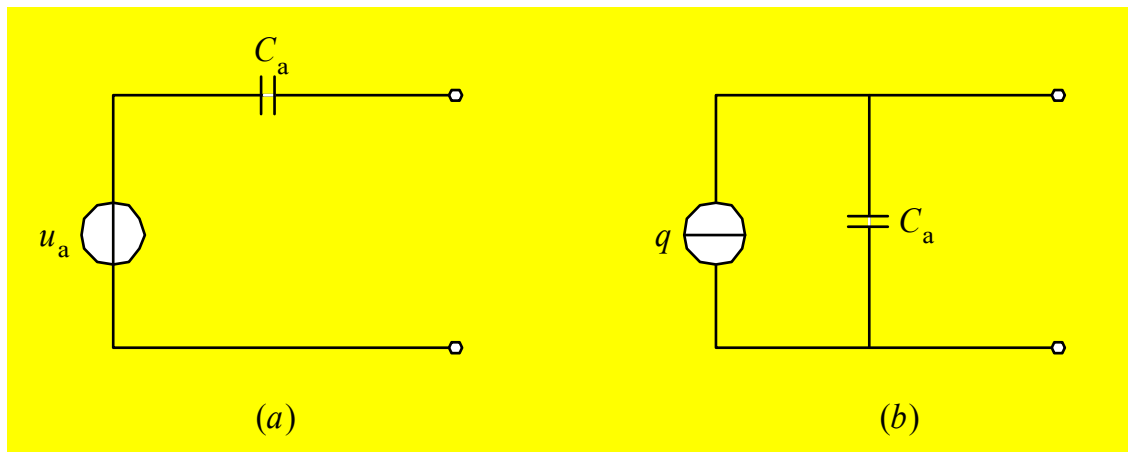
当两极板聚集异性电荷时，板间就呈现出一定的电压，其大小为：

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

因此，压电传感器还可以等效为电压源 U_a 和一个电容器 C_a 的串联电路，如图 (b)。

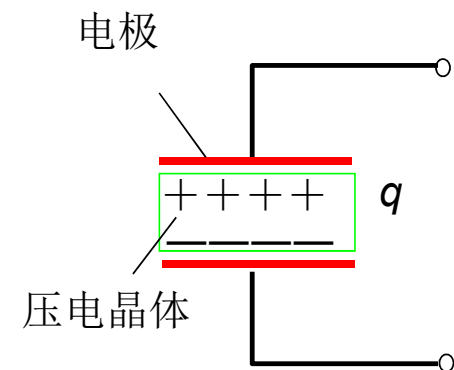


测量电路



压电传感器的等效电路

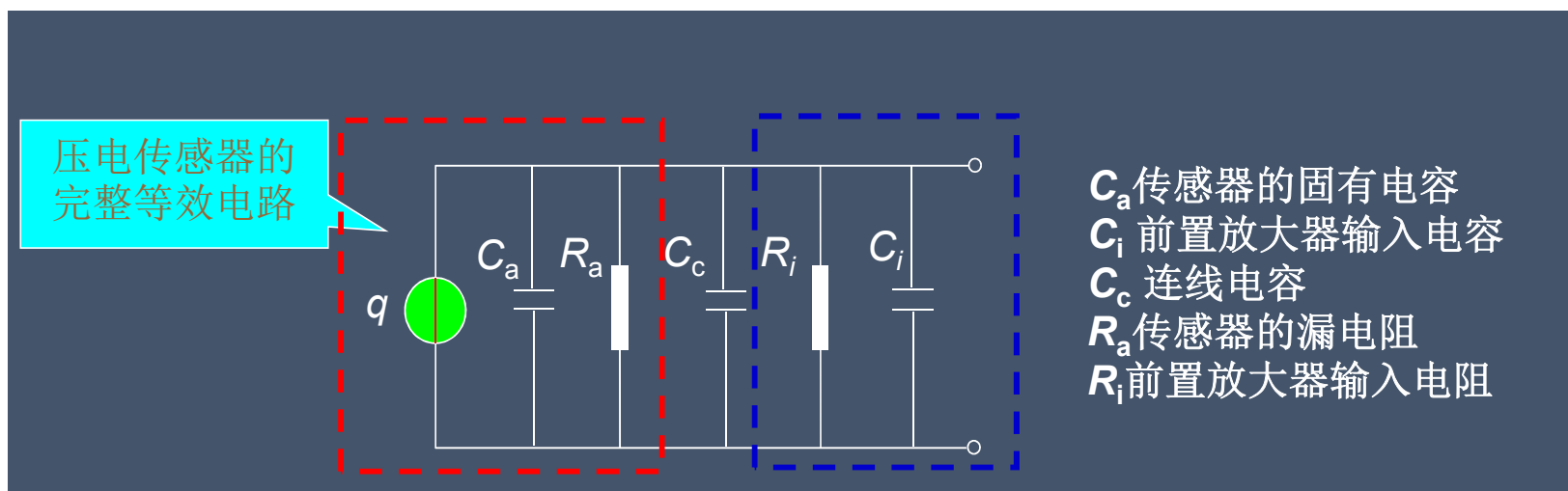
(a) 电压源; (b) 电荷源



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。

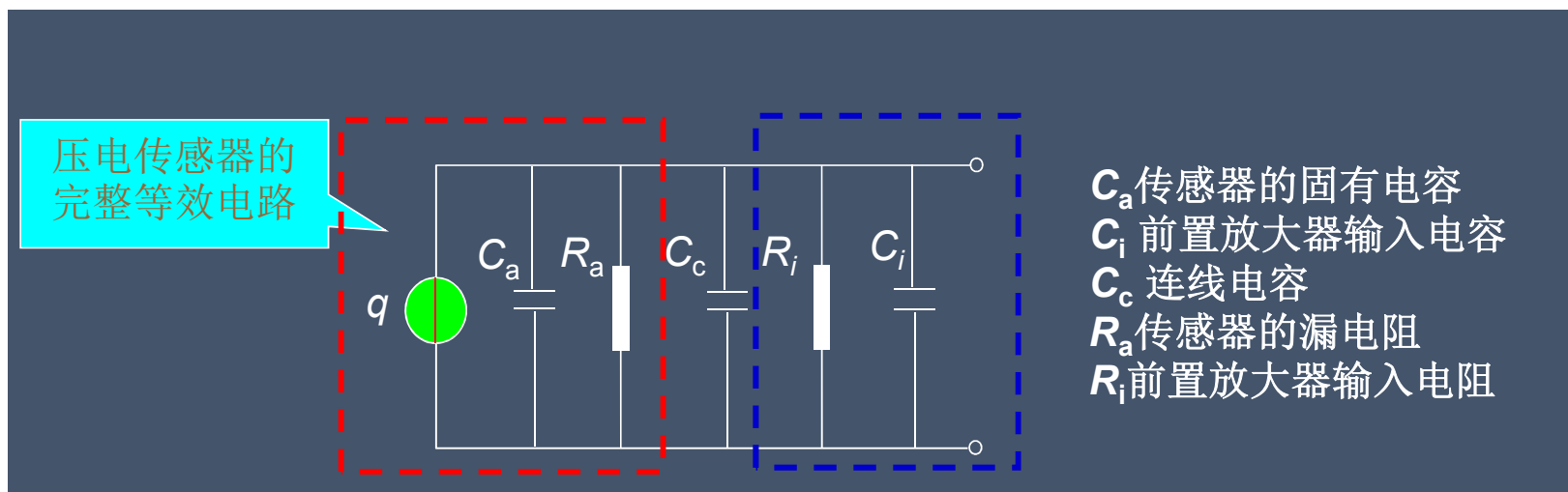
测量电路

当考虑了压电元件的绝缘电阻 R_a 以后，压电传感器完整的等效电路可表示为：



压电传感器的完整等效电路

测量电路



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。

测量电路



由于压电式传感器的输出电信号很微弱，通常先把传感器信号先输入到高输入阻抗的前置放大器中，经过阻抗交换以后，方可用一般的放大检波电路再将信号输入到指示仪表或记录器中。(其中，测量电路的关键在于高阻抗输入的前置放大器。)

测量电路

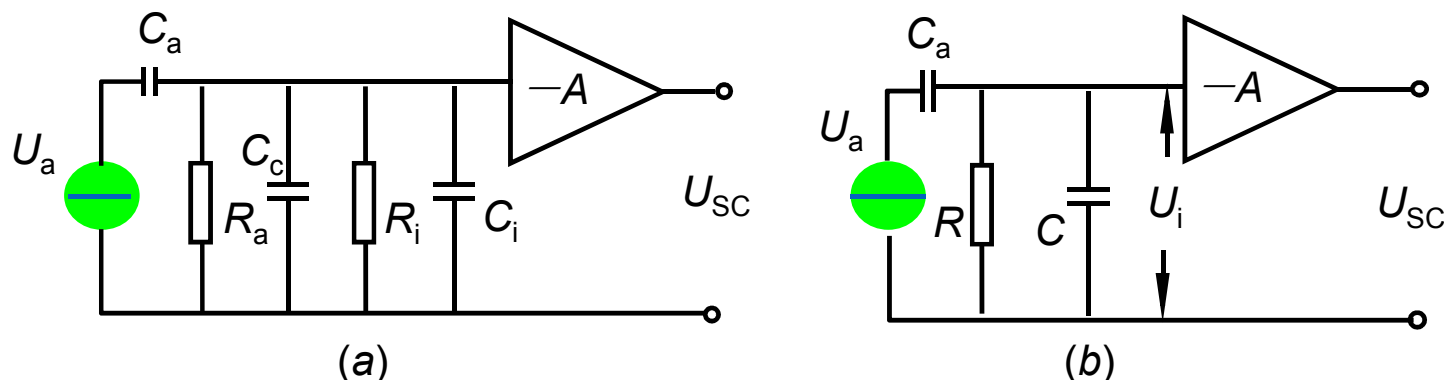


前置放大器的作用：一是将传感器的高阻抗输出变换为低阻抗输出；二是放大传感器输出的微弱电信号。

前置放大器电路有两种形式：一是用电阻反馈的**电压放大器**，其**输出电压与输入电压**(即传感器的输出)**成正比**；另一种是用带电容板反馈的**电荷放大器**，其**输出电压与输入电荷成正比**。由于电荷放大器电路的**电缆长度变化的影响不大**，几乎可以忽略不计，故而电荷放大器应用日益广泛。



(一) 电压放大器



电压放大器等效电路示意图

图(b)中, 等效电阻 R 为 $R = \frac{R_a \cdot R_i}{R_a + R_i}$ 等效电容为 $C = C_c + C_i$

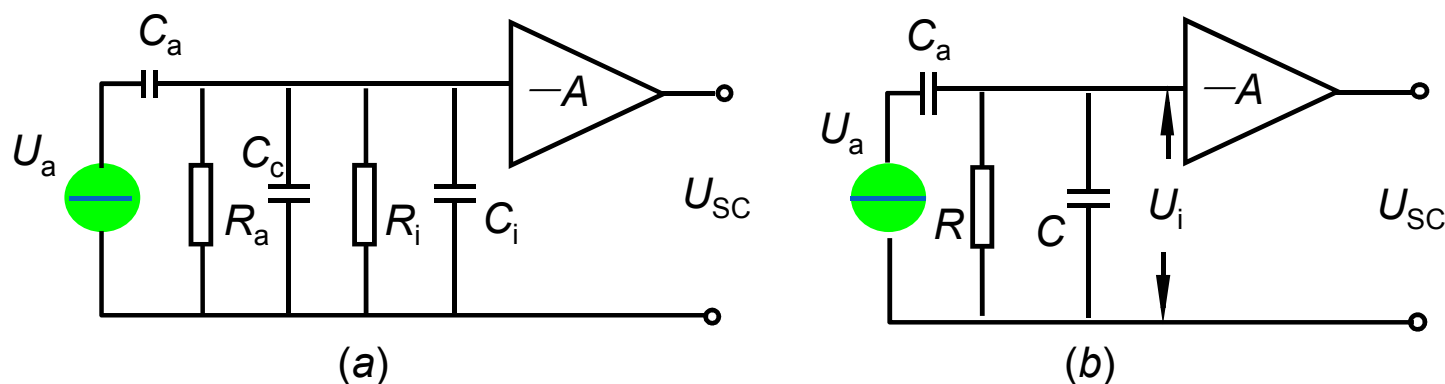
而 $U_a = \frac{q}{C_a}$, 若压电元件所受正弦力 $F = F_m \sin \omega t$

则其电压为: $U_a = \frac{dF_m}{C_a} \sin \omega t = U_m \sin \omega t$

式中: F_m ——作用力的幅值; U_m ——压电元件输出电压幅值,

$U_m = dF_m / C_a$; d ——压电系数。

(一) 电压放大器



$$U_a = \frac{dF_m}{C_a} \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$

若压电元件材料是压电陶瓷，其压电系数为 d_{33} ，则放大器的输入电压为：

$$U_i = d_{33} F_m \frac{j\omega R}{1 + j\omega R(C_a + C)}$$

(一) 电压放大器

$$U_i = d_{33} F_m \frac{j\omega R}{1 + j\omega R(C_a + C)}$$

U_i 的幅值 U_{im} 为

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

输入电压和作用力之间相位差为

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



(一) 电压放大器

U_i 的幅值 U_{im} 为

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

输入电压和作用力之间相位差为

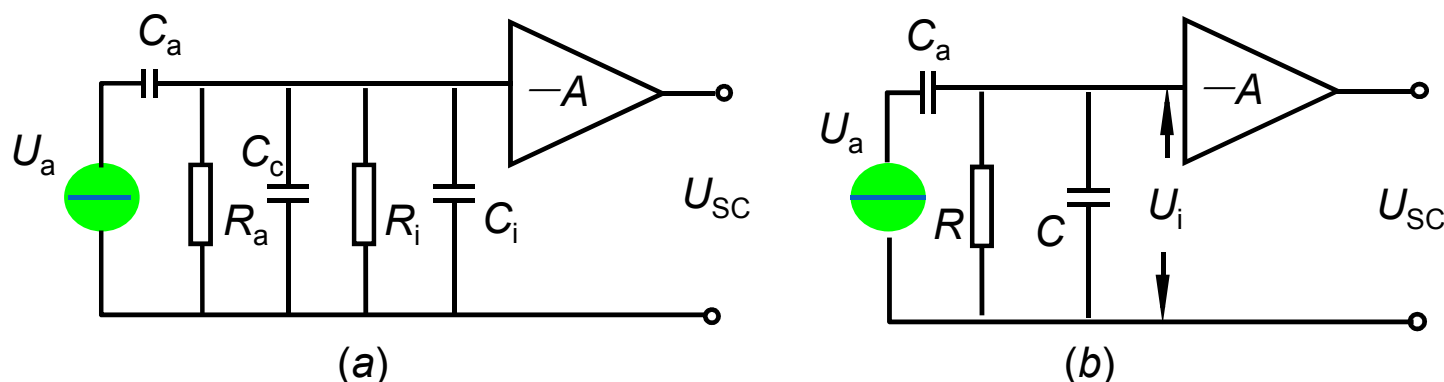
$$\phi = \frac{\pi}{2} - \arctan[\omega(C_a + C_c + C_i)R]$$

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

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

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 $\omega/\omega_0 \geq 3$, 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。

(一) 电压放大器



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

但是，当作用于压电元件的力为静态力（ $\omega=0$ ）时，前置放大器的输出电压等于零，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的测量。

(一) 电压放大器

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：

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

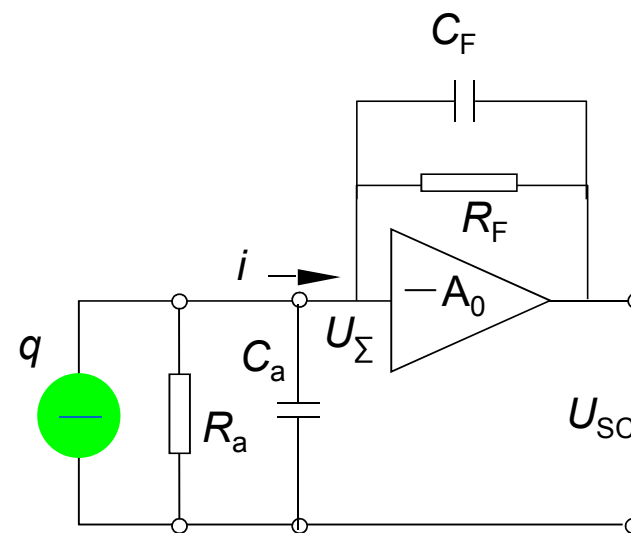
因为 $\omega R \gg 1$ ，故上式可以近似为：
$$K_u \approx \frac{d_{33}}{C_a + C_c + C_i}$$

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。

(二) 电荷放大器

电荷放大器是一个具有深度负反馈的高增益放大器，其基本电路如图。若放大器的开环增益 A_0 足够大，并且放大器的输入阻抗很高，则放大器输入端几乎没有分流，运算电流仅流入反馈回路 C_F 与 R_F 。由图可知 i 的表达式为：

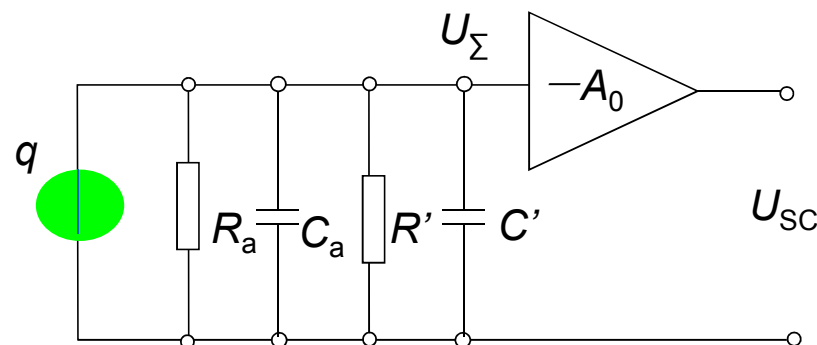
$$\begin{aligned}
 i &= (U_{\Sigma} - U_{SC}) \left(j\omega C_F + \frac{1}{R_F} \right) \\
 &= [U_{\Sigma} - (-A_0 U_{\Sigma})] \left(j\omega C_F + \frac{1}{R_F} \right) \\
 &= U_{\Sigma} \left[j\omega (A_0 + 1) C_F + (A_0 + 1) \frac{1}{R_F} \right]
 \end{aligned}$$



电荷放大器原理电路图

(二) 电荷放大器

根据上式画出等效电路图



C_F 、 R_F 等效到 A_0 的输入端时，电容 C_F 将增大 $(1+A_0)$ 倍。电导 $1/R_F$ 也增大了 $(1+A_0)$ 倍。所以图中 $C'=(1+A_0)C_F$ ； $1/R'=(1+A_0)/R_F$ ，这就是所谓“密勒效应”的结果。

运放输入电压

$$U_{\Sigma} = \frac{j\omega q}{\left[\frac{1}{R_a} + (1+A_0)\frac{1}{R_F} \right] + j\omega [C_a + (1+A_0)C_F]}$$

输出电压

$$U_{SC} = -A_0 U_{\Sigma} = \frac{-j\omega q A_0}{\left[\frac{1}{R_a} + (1+A_0)\frac{1}{R_F} \right] + j\omega [C_a + (1+A_0)C_F]}$$

(二) 电荷放大器

若考虑电缆电容 C_c ，则有

$$U_{SC} = -A_0 U_\Sigma = \frac{-j\omega q A_0}{\left[\frac{1}{R_a} + (1 + A_0) \frac{1}{R_F} \right] + j\omega [C_a + C_c + (1 + A_0) C_F]}$$

当 A_0 足够大时,传感器本身的电容和电缆长短将不影响电荷放大器的输出。因此输出电压 U_{SC} 只决定于输入电荷 q 及反馈回路的参数 C_F 和 R_F 。由于 $1 / R_F \ll \omega C_F$,则

$$U_{SC} \approx -\frac{A_0 q}{(1 + A_0) C_F} \approx -\frac{q}{C_F}$$

可见当 A_0 足够大时,输出电压与 A_0 无关,只取决于输入电荷 q 和反馈电容 C_F ,改变 C_F 的大小便可得到所需的电压输出。 C_F 一般取值100-10⁴pF。

(二) 电荷放大器

运算放大器的开环放大倍数 A_0 对精度有影响，当频率很高时，则

及
$$U_{SC} \approx \frac{-A_0 q}{C_a + C_c + (1 + A_0) C_F}$$

$$U'_{SC} \approx -\frac{q}{C_F}$$

则可计算产生的误差为
$$\delta = \frac{U'_{SC} - U_{SC}}{U'_{SC}} \approx \frac{C_a + C_c}{(1 + A_0) C_F}$$

例： $C_a=1000\text{pF}$, $C_F=100\text{pF}$, $C_c=(100\text{pF/m}) \times 100\text{m}=10^5\text{pF}$, 当要求 $\delta \leq 1\%$ 时，则有

$$\delta = 0.01 = \frac{1000 + 10^4}{(1 + A_0) \times 100}$$

由此得 $A_0 > 10^5$ 。对线性集成运算放大器来说，这一要求是不难达到的。

(二) 电荷放大器

当工作频率 ω 很低时，分母中的电导 $[1/R_a + (1+A_0)/R_F]$ 与电纳 $j\omega[C_a + C_c + (1+A_0)C_F]$ 的值相当，电导就不可忽略。此时 A_0 足够大，则

$$U_{SC} \approx \frac{-j\omega q A_0}{(1+A_0)\frac{1}{R_F} + j\omega(1+A_0)C_F} \approx -\frac{j\omega q}{\frac{1}{R_F} + j\omega C_F}$$

其幅值为

$$U_{SC} = \omega q / \sqrt{\frac{1}{R_F^2} + \omega^2 C_F^2}$$

当 $1/R_F = \omega C_F$ 时 $U_{SC} = q / (C_F \sqrt{2})$

可见这是截止频率点的输出电压，增益下降3dB时对应的下限截止频率为：

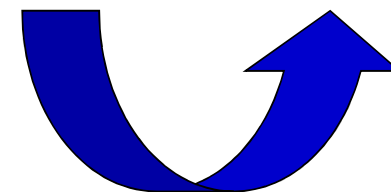
$$f_L = \frac{1}{2\pi R_F C_F}$$

(二) 电荷放大器

U_{sc} 与 q 间的相位误差:

$$\phi = 90^\circ - \arctan \frac{1}{\omega R_F C_F}$$

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。所以当给定工作频带下限截止频率 f_L 时, 反馈电阻 R_F 值也可确定。如当 $C_F=1000\text{pF}$, $f_L=0.16\text{Hz}$ 时, 则要求 $R_F>10^9\Omega$ 。





第5章 压电式传感器

5.1 压电效应

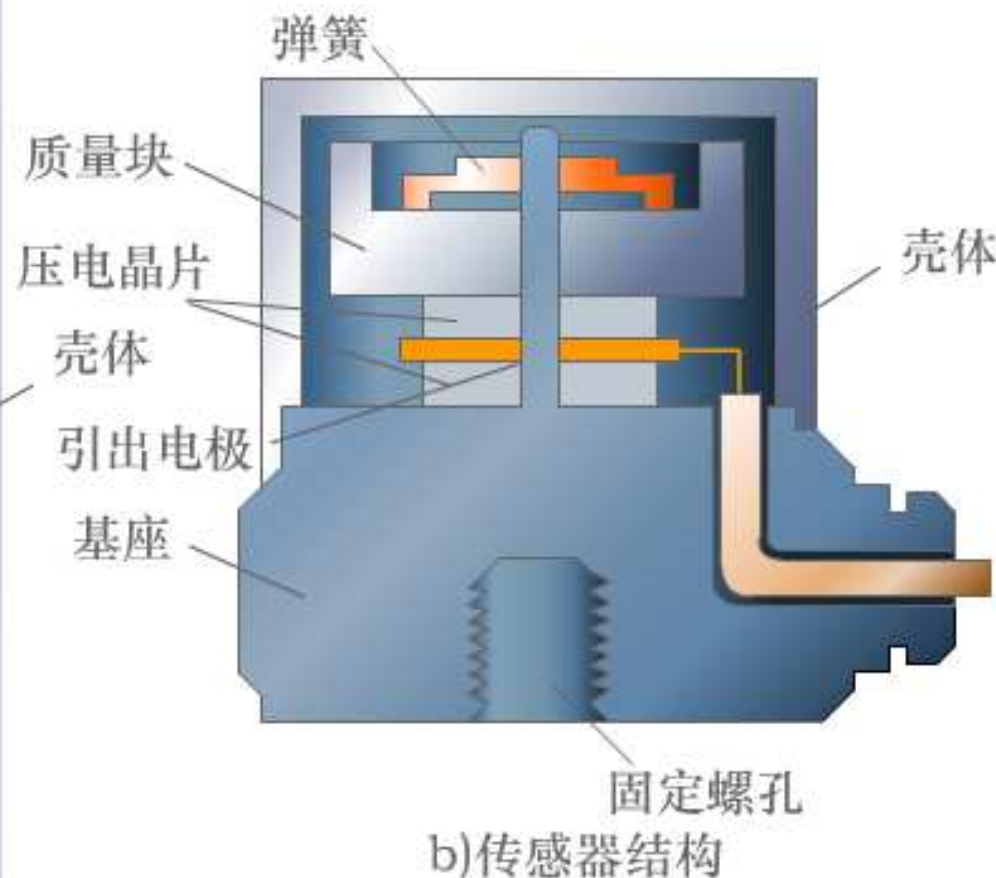
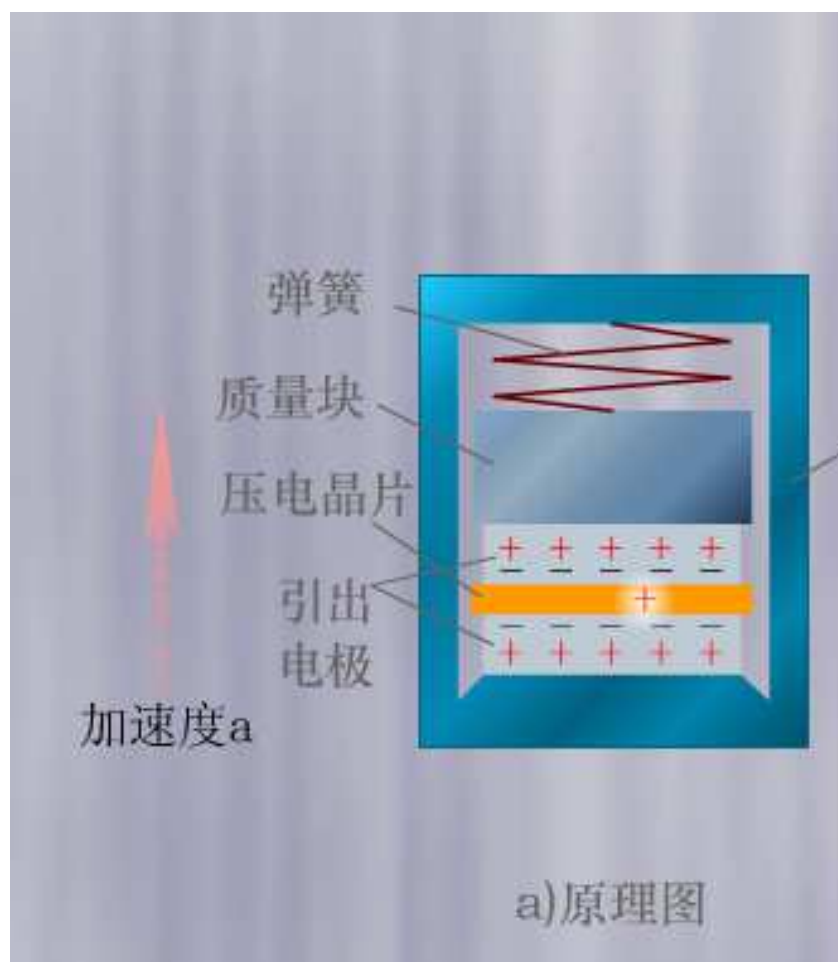
5.2 压电材料

5.3 测量电路

5.4 应用



(一) 压电式加速度传感器



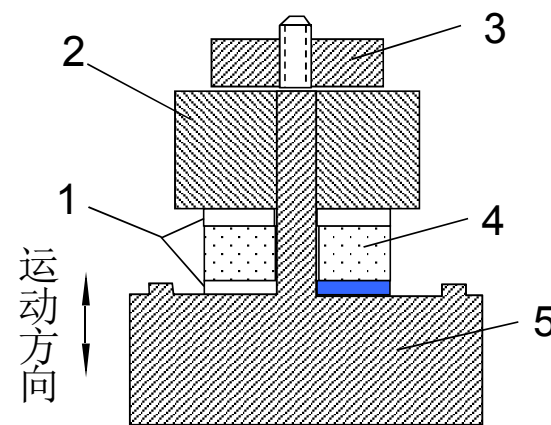
(一) 压电式加速度传感器

当传感器感受振动时， $F=ma$ ，在压电陶瓷片上产生电荷为：

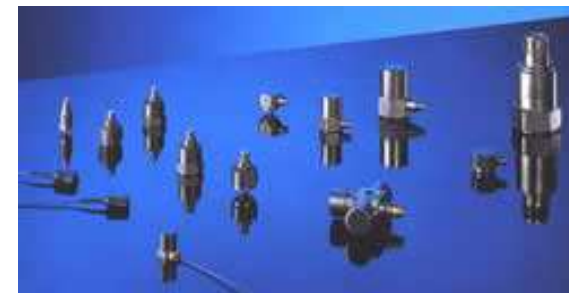
$$q = d_{33}F = d_{33}ma$$

此式表明电荷量直接反映加速度大小。其灵敏度与压电材料压电系数和质量块质量有关。为了提高传感器灵敏度，一般选择**压电系数大的压电陶瓷片**。

若增加质量块质量会影响被测振动，同时会降低振动系统的固有频率，因此**一般不用增加质量办法来提高传感器灵敏度**。此外用**增加压电片数目**和采用**合理的连接方法**也可提高传感器灵敏度。

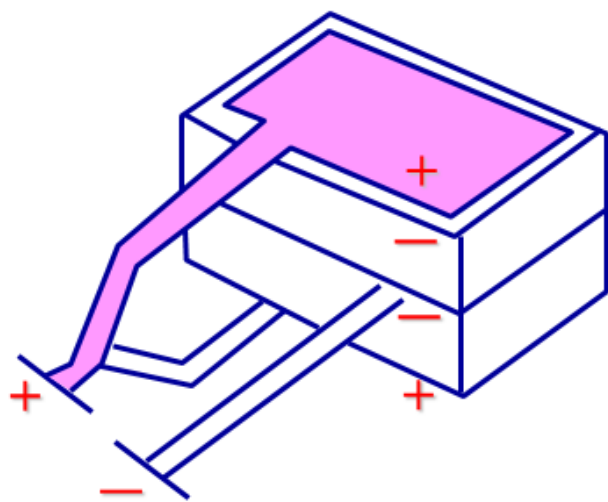


纵向效应型加速度传感器的截面图

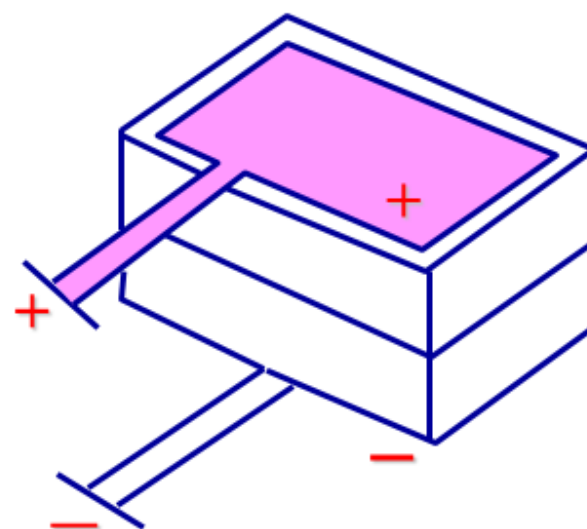


压电晶片的连接方式

在实际应用中，由于单片的输出电荷或电压很小，因此，组成压电式传感器的晶片不止一片，常常将两片或两片以上的晶片粘结在一起。粘结的方法有两种，即**并联**和**串联**。



(a) 并联



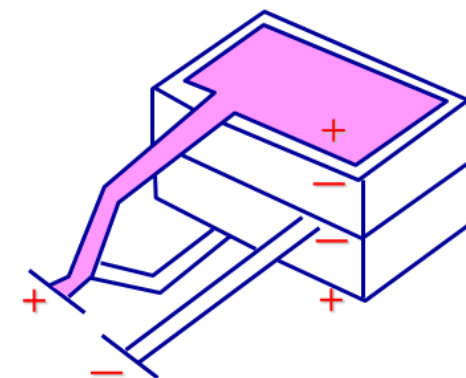
(b) 串联

并联方法两片压电晶片的负电荷集中在中间电极上，正电荷集中在两侧的电极上，传感器的电容量大、输出电荷量大、时间常数也大，故这种传感器适用于测量缓变信号及电荷量输出信号。

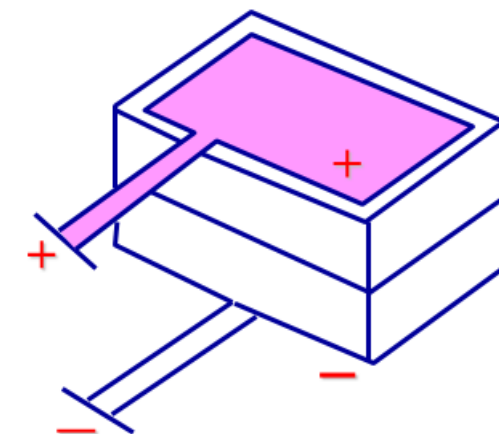
$$q' = 2q; \quad U' = U; \quad C' = 2C$$

串联方法正电荷集中于上极板，负电荷集中于下极板，传感器本身的电容量小、响应快、输出电压大，故这种传感器适用于测量以电压作输出的信号和频率较高的信号。

$$q' = q; \quad U' = 2U; \quad C' = \frac{1}{2}C$$



(a) 并联

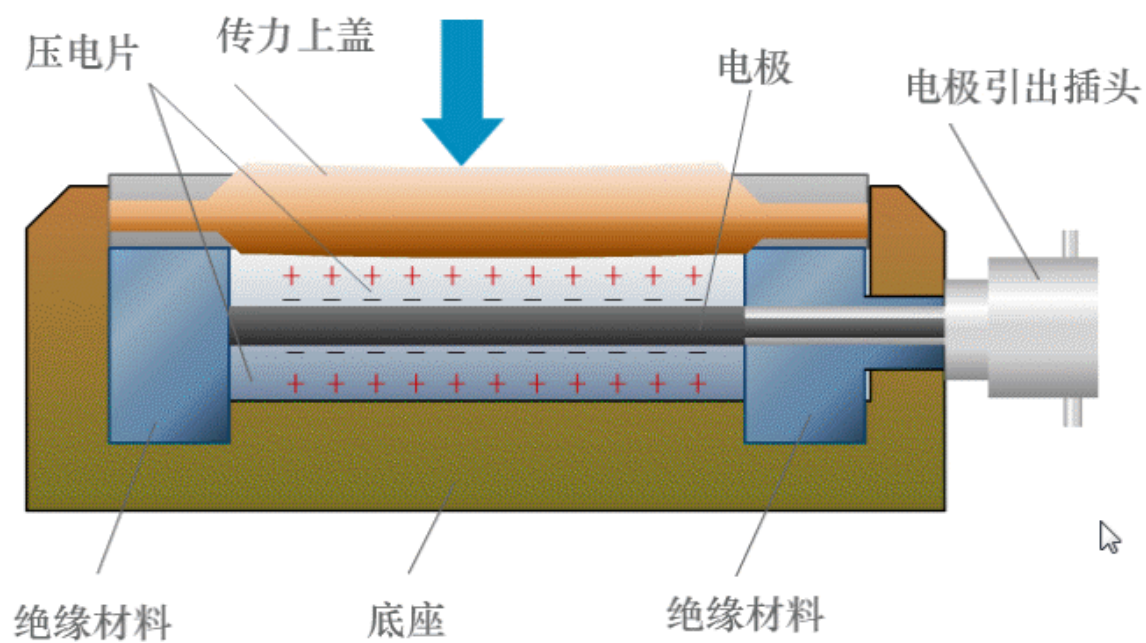


(b) 串联

(二) 压电式压力传感器



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY



压电测力传感器

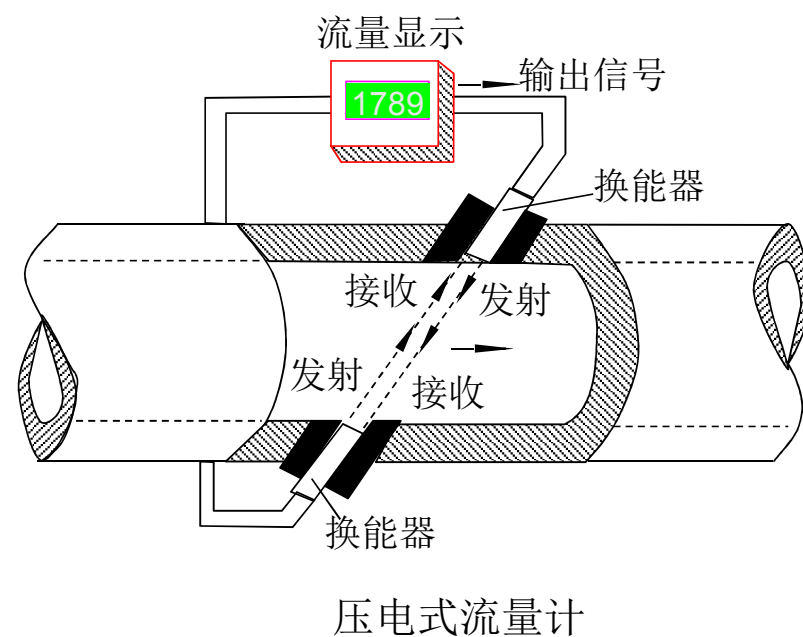
东方仿真COPYRIGHT

(三) 压电式流量计

利用超声波在顺流方向和逆流方向的传播速度进行测量。其测量装置是在管外设置两个相隔一定距离的收发两用压电超声换能器，每隔一段时间(如**1/100s**)，发射和接收互换一次。在顺流和逆流的情况下，发射和接收的相位差与流速成正比。据这个关系，可精确测定流速。流速与管道横截面积的乘积等于流量。

此流量计可测量各种液体的流速，中压和低压气体的流速，不受该流体的导电率、粘度、密度、腐蚀性以及成分的影响。其准确度可达**0.5%**，有的可达到**0.01%**。

根据发射和接收的相位差随海洋深度深度的变化，测量声速随深度的分布情况

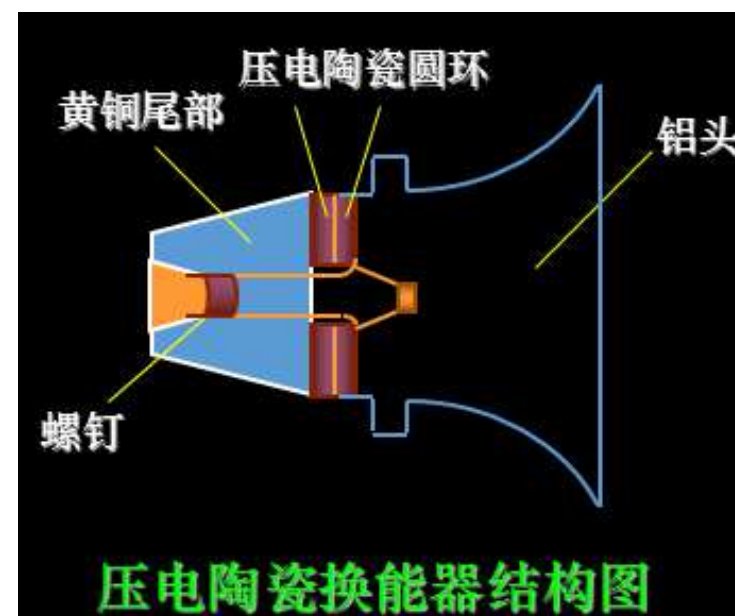




压电式声传感器

当交变信号加在压电陶瓷片两端面时，由于压电陶瓷的逆压电效应，陶瓷片会在电极方向产生周期性的伸长和缩短。

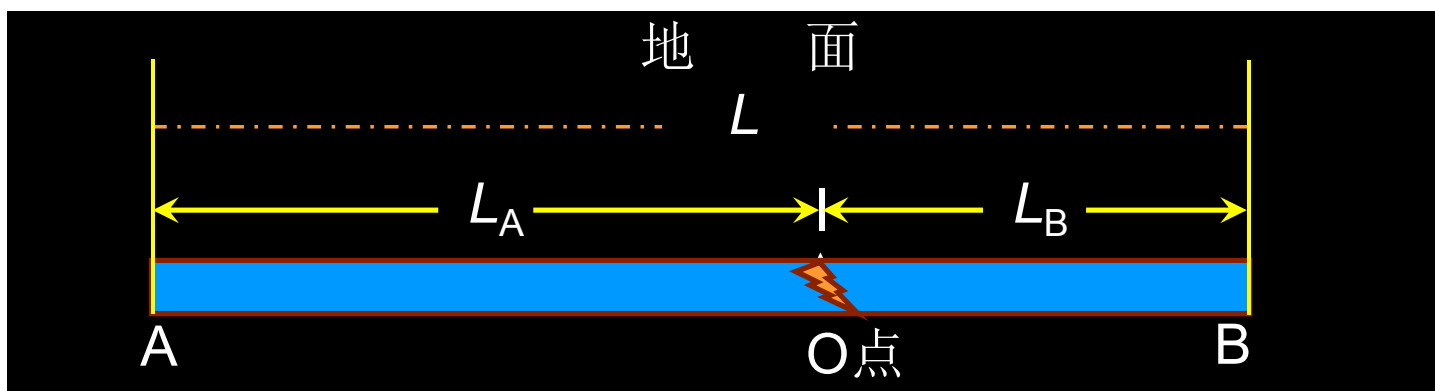
如果换能器中压电陶瓷的振荡频率在超声波范围，则其发射或接收的声频信号即为超声波，这样的换能器称为**压电超声换能器**。



当一定频率的声频信号加在换能器上时，换能器上的压电陶瓷片受到外力作用而产生压缩变形，由于压电陶瓷的正压电效应，压电陶瓷上将出现充、放电现象，即将声频信号转换成了交变电信号。这时的声传感器就是**声频信号接收器**。

(四) 压电式传感器测漏

如果地面下一均匀的自来水直管道某处O发生漏水，水漏引起的振动从O点向管道两端传播，在管道上A、B两点放两只压电传感器，由从两个传感器接收到的由O点传来的 t_0 时刻发出的振动信号所用时间差可计算出 L_A 或 L_B 。



两者时间差为 $\Delta t = t_A - t_B = (L_A - L_B) / v$

又 $L = L_A + L_B$ ，所以

$$L_A = \frac{L + \Delta t \cdot v}{2} \quad L_B = \frac{L - \Delta t \cdot v}{2}$$



(五) 压电声传感器超声速测量

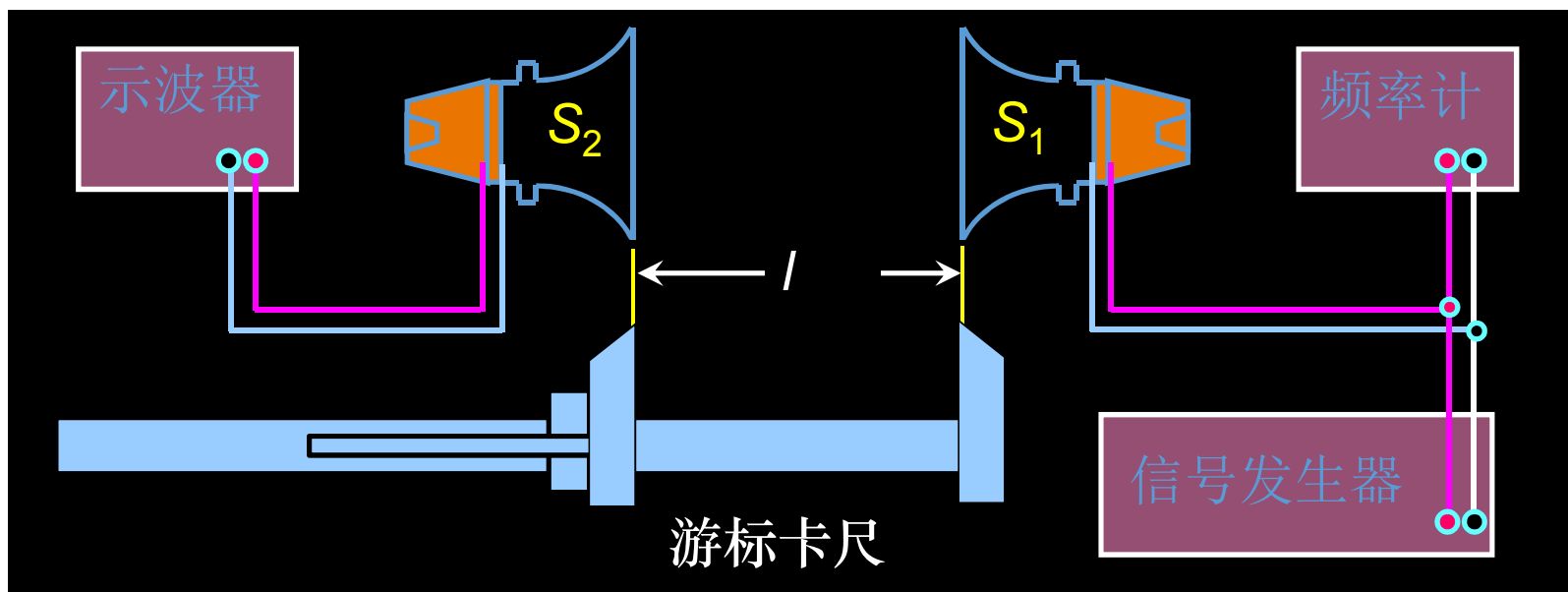


图 超声速测量实验装置

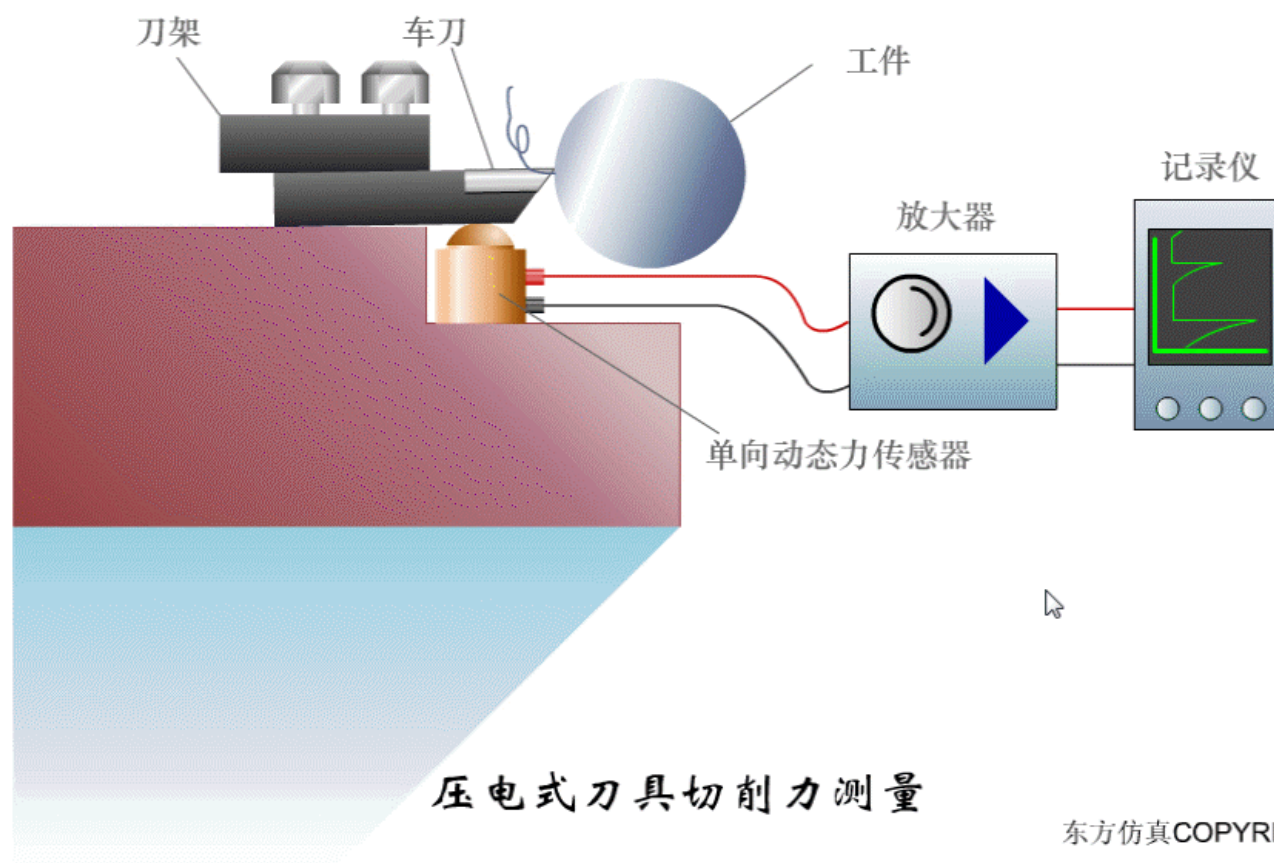
当信号发生器产生的正弦交流信号加在压电陶瓷片两端面时，压电陶瓷片将产生机械振动，在空气中激发出声波。所以，换能器 S_1 是**音频信号发生器**。

当 S 发出的声波信号经过空气传播到达换能器 S_2 时，空气振动产生的压力作用在 S_2 的压电陶瓷片上使之出现充、放电现象，在示波器上就能检测出该交变信号。所以，换能器 S_2 是**音频信号接收器**。

(六) 压电式金属加工切削力测量



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

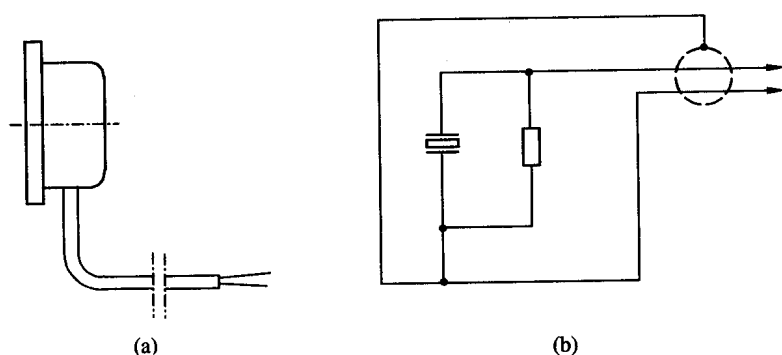


东方仿真COPYRIGHT

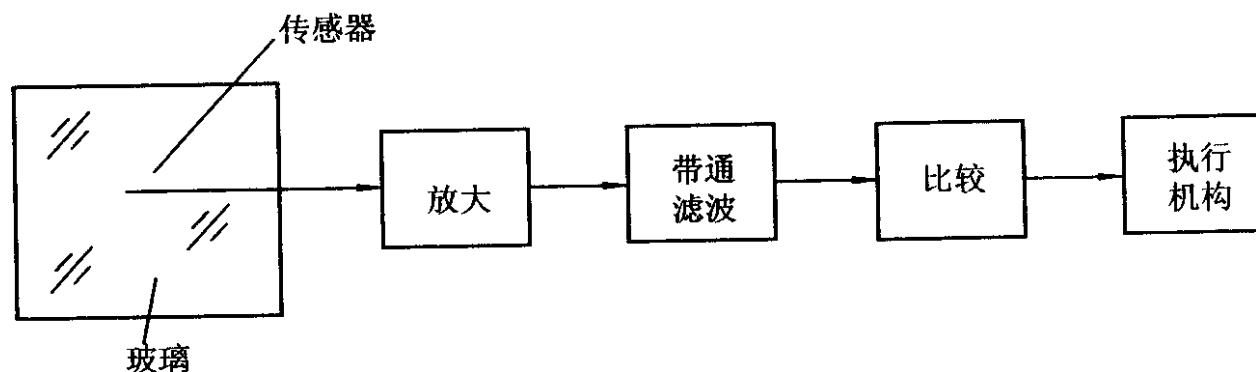
由于压电陶瓷元件的自振频率高，特别适合测量变化剧烈的载荷。图中压电传感器位于车刀前部的下方，当进行切削加工时，切削力通过刀具传给压电传感器。



(七) 压电式玻璃破碎报警器



BS—D2压电式传感器是专门用于检测玻璃破碎的一种传感器，它利用压电元件对振动敏感的特性来感知玻璃受撞击和破碎时产生的振动波。

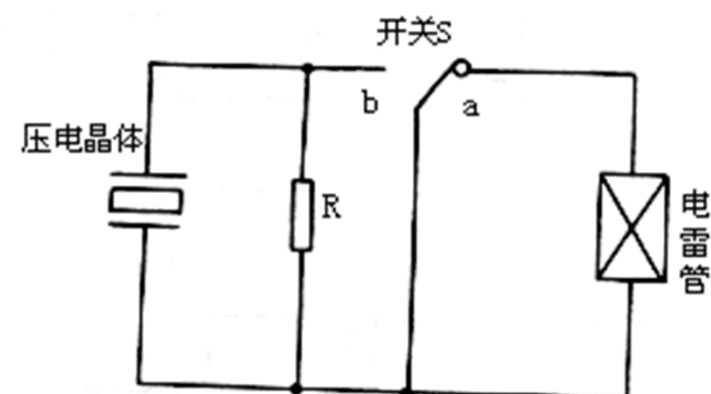
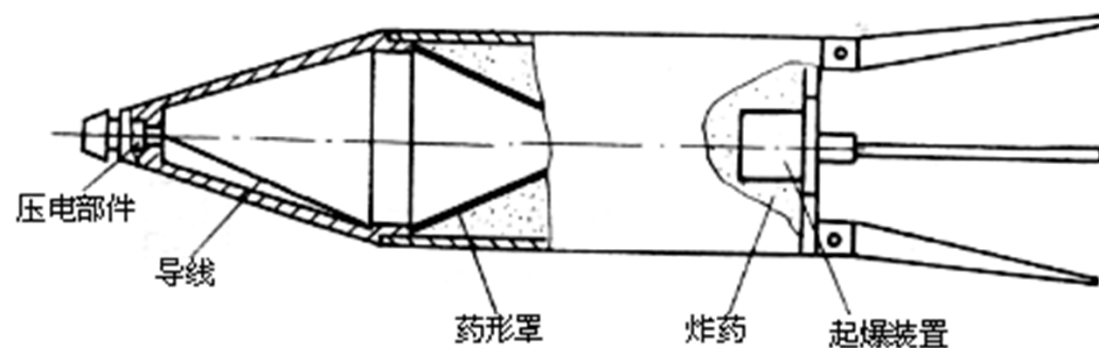


由于玻璃振动的波长在音频和超声波的范围内，这就使滤波器成为电路中的关键。当传感器输出信号高于设定的阈值时，才会输出报警信号，驱动报警执行机构工作。



(八) 压电引信

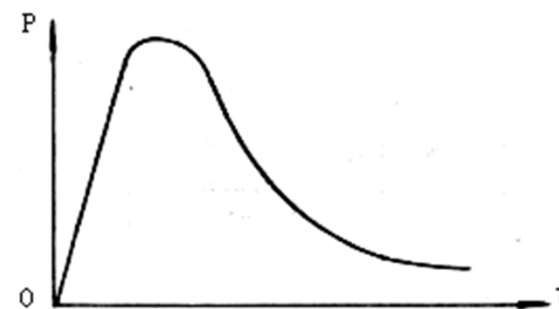
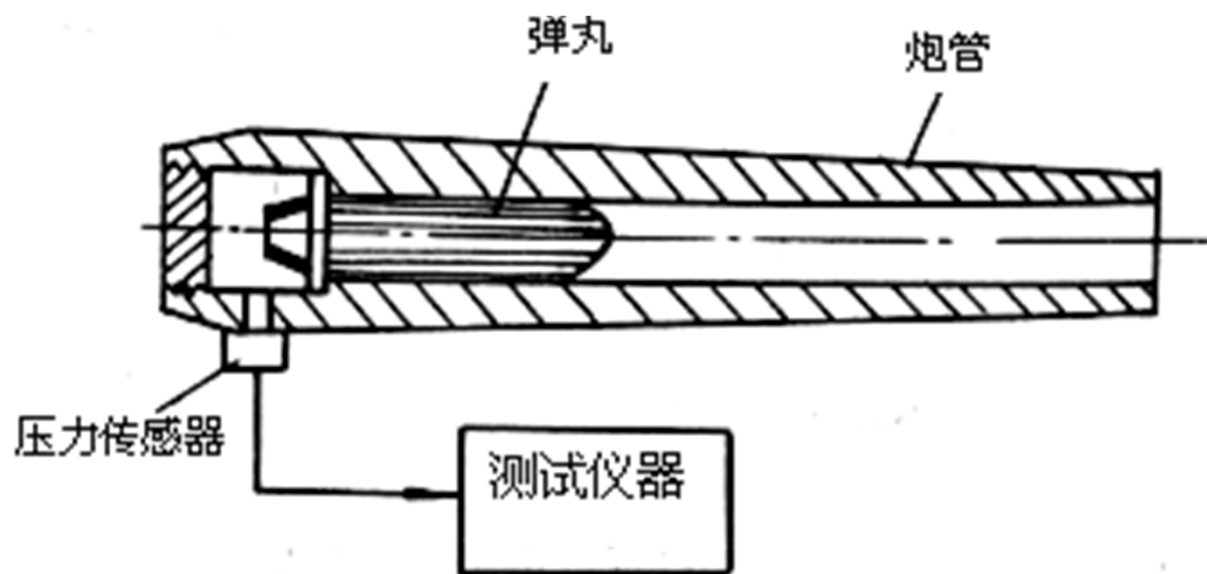
压电陶瓷：弹丸起爆装置——破甲弹

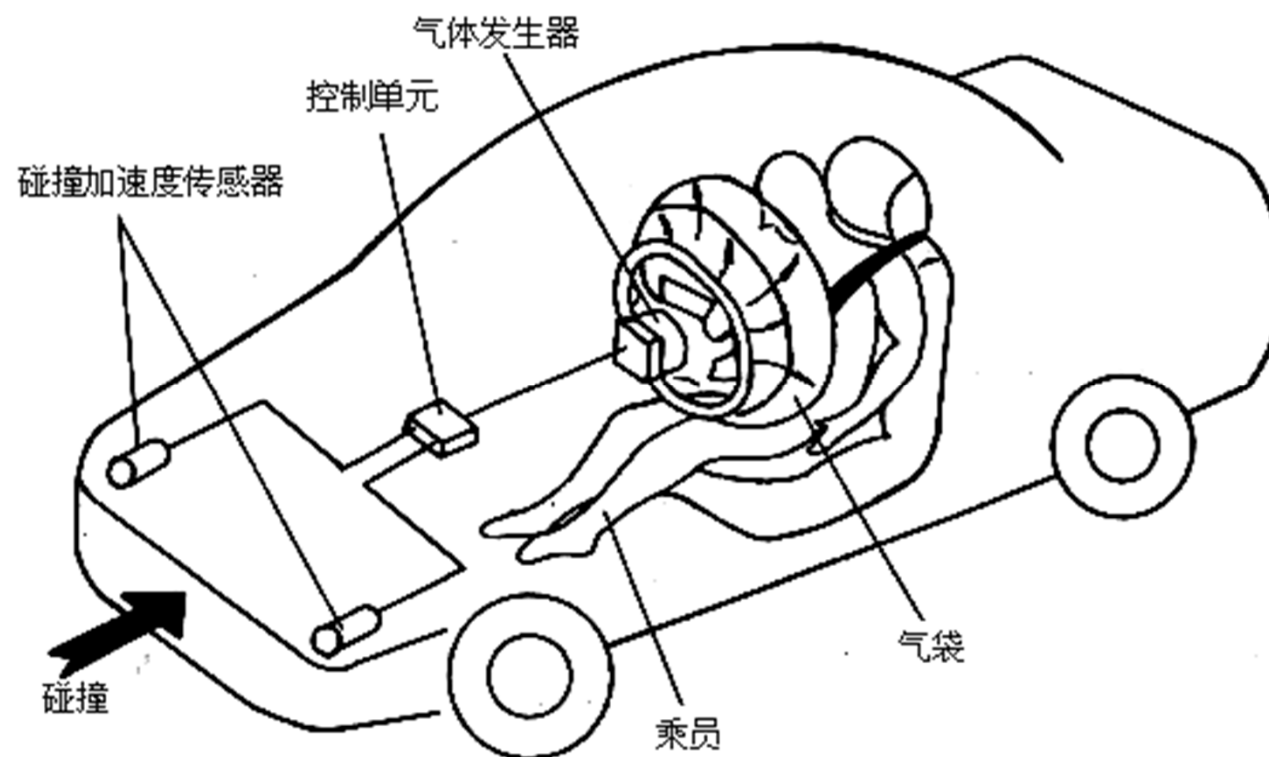


(九) 火炮膛内压力测试

火药在膛内燃烧形成压力完成炮弹的发射。

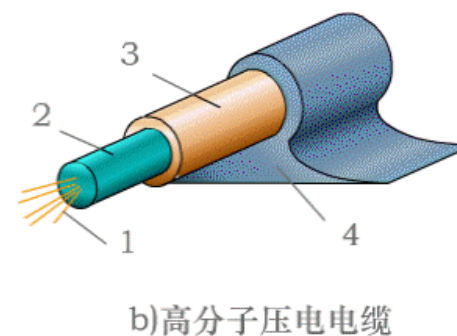
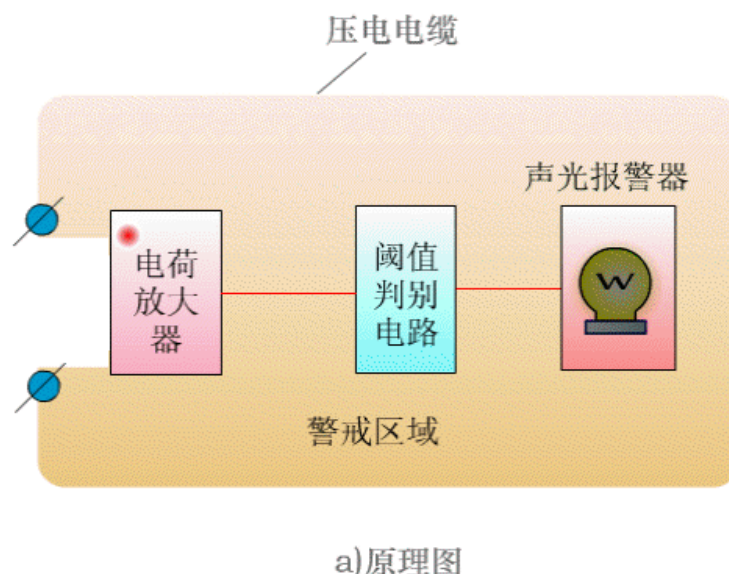
膛内压力的大小，不仅决定着炮弹的飞行速度，而且与火炮、弹丸的设计有着密切关系。





事故性碰撞： 点火信号、电点火管、气体发生剂、
气体、充气、弹性体

压电式周界报警系统



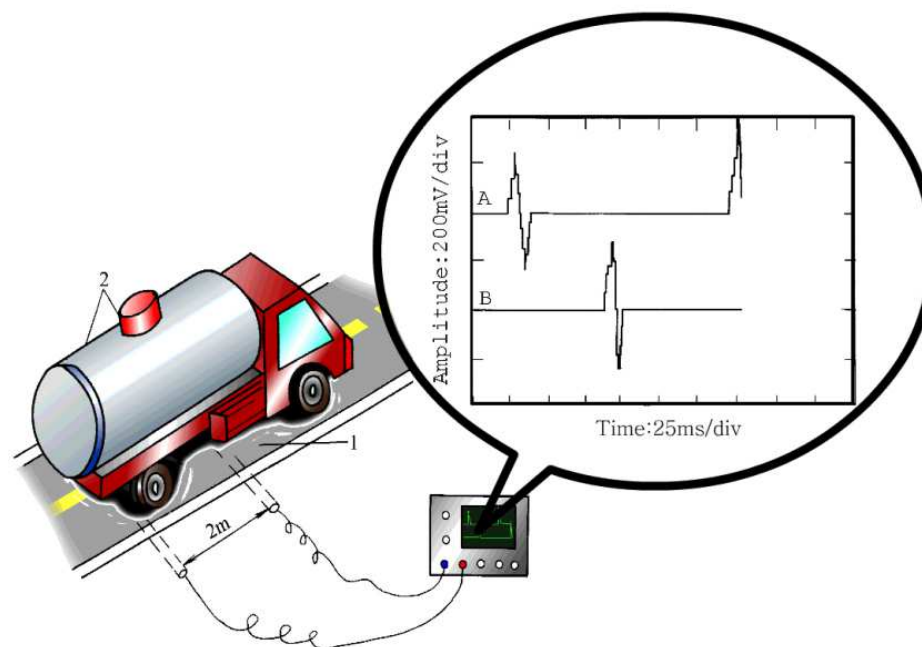
- 1.铜芯线(分布电容内电极) 2.管状高分子压电塑料绝缘层
3.铜网屏蔽层(分布电容外电极) 4.橡胶保护层(承压弹性元件)

压电式周界报警系统

东方仿真COPYRIGHT

将长的压电电缆埋在泥土的浅表层，可起分布式地下麦克风或听音器的作用，可在几十米范围内探测人的步行，对轮式或履带式车辆也可以通过信号处理系统分辨出来。

交通监测

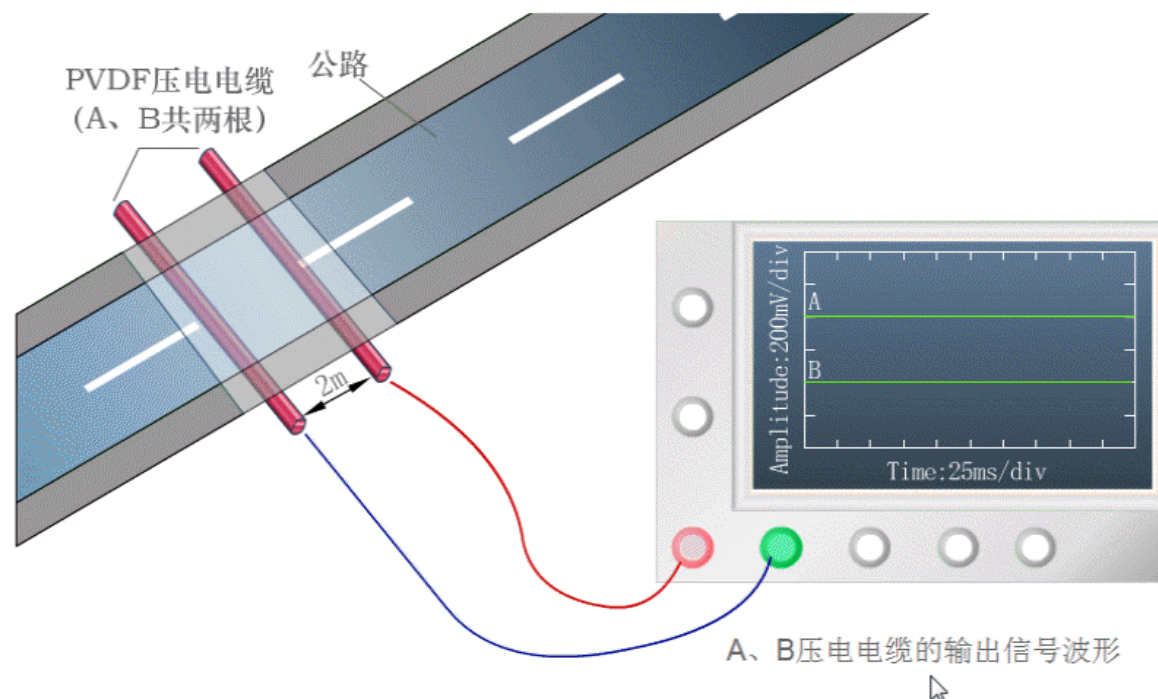


将高分子压电电缆埋在公路上，可以获取车型分类信息（包括轴数、轴距、轮距、单双轮胎）、车速监测、收费站地磅、闯红灯拍照、停车区域监控、交通数据信息采集（道路监控）及机场滑行道等。



交通监测

高分子压电 电缆的应用



PVDF压电电缆测速原理

东方仿真COPYRIGHT

将两根高分子压电电缆相距若干米，平行埋设于柏油公路的路面下约5cm，可以用来测量车速及汽车的载重量，并根据存储在计算机内部的档案数据，判定汽车的车型。

交通监测

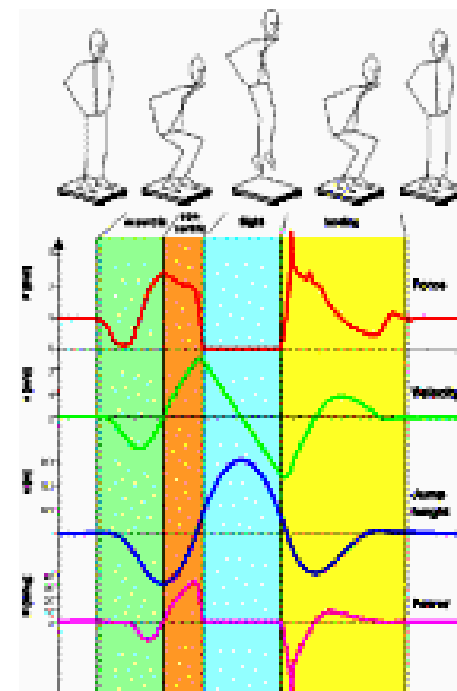


压电式步态分析跑台



压电式纵跳 训练分析装置

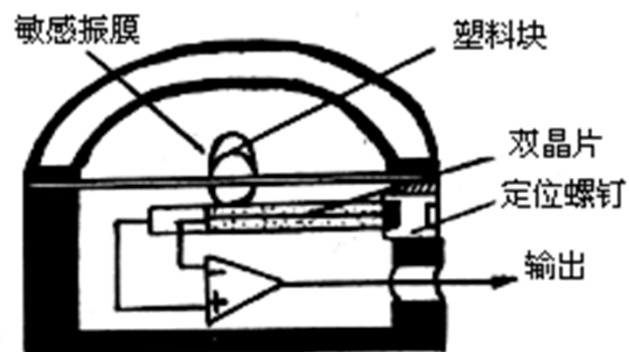
压电传感器测量双腿跳的动态力



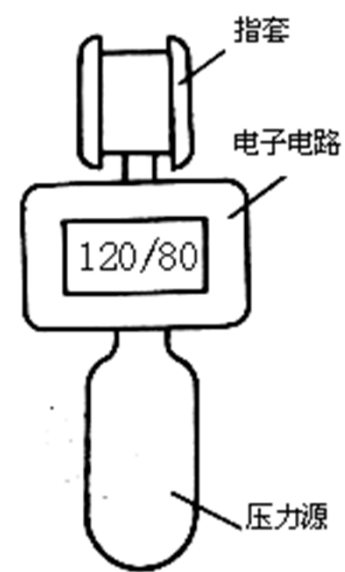
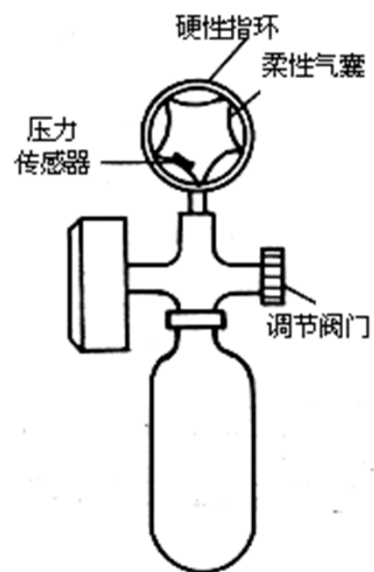


其它应用

压电式血压传感器



指套式电子血压计

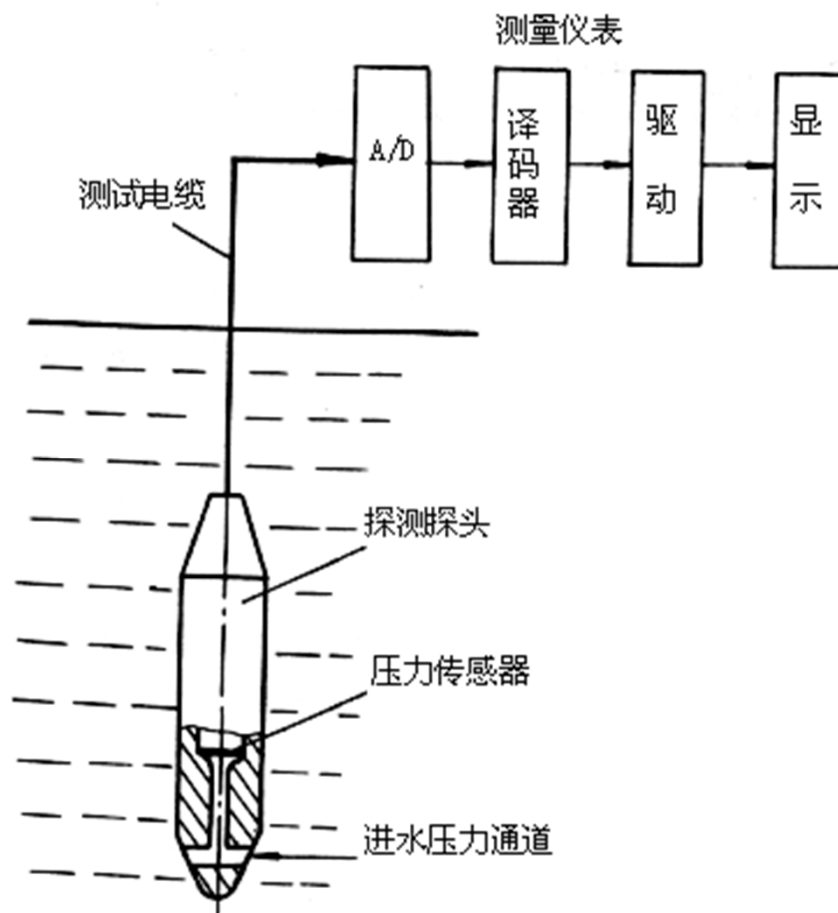




其它应用

$0.01\text{MPa}/\text{m}$

水深测量仪





其它应用

压电打火

