



第5章 压电式传感器



是以某些电介质的**压电效应**为基础，在外力作用下，在电介质的表面上产生**电荷**，从而实现非电量测量。

压电传感元件是**力敏感元件**，所以它能够测量那些最终能变换为力的物理量，例如：力、压力、加速度等。

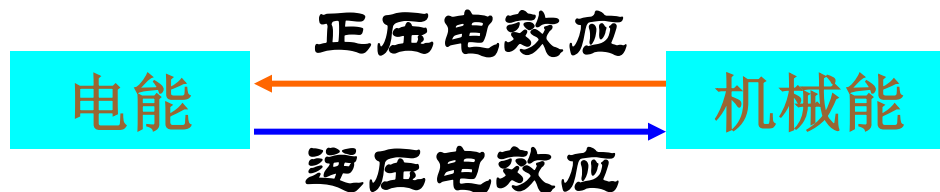
压电式传感器具有响应频带宽、灵敏度高、信噪比大、结构简单、工作可靠、重量轻等优点。近年来，由于电子技术的飞速发展，随着与之配套的二次仪表以及低噪声、小电容、高绝缘电阻电缆的出现，使压电传感器的使用更为方便。因此，在工程力学、生物医学、石油勘探、声波测井、电声学等许多技术领域中获得了广泛的应用。



一、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。

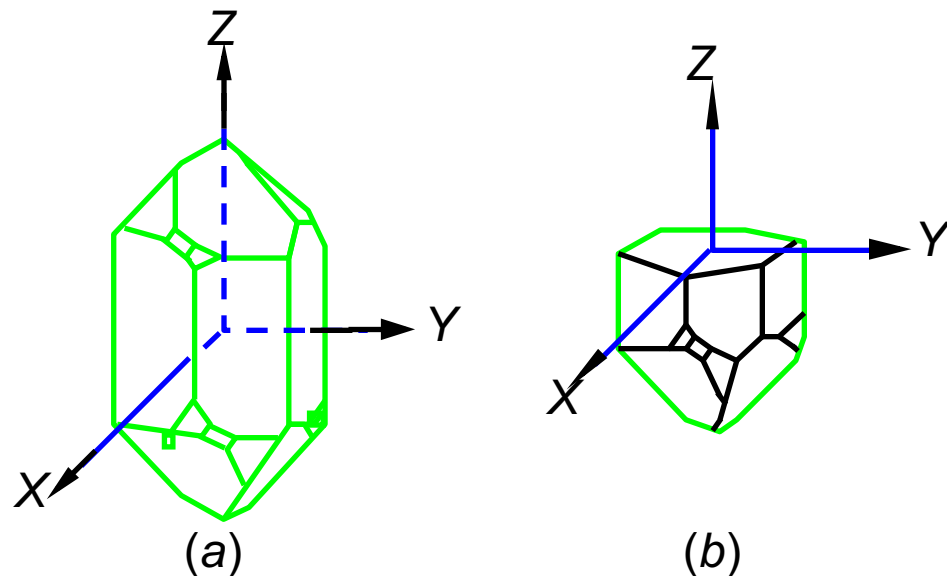
逆压电效应（电致伸缩效应）：当在电介质的**极化方向**施加**电场**，这些电介质就在**一定方向**上产生机械**变形**或机械**应力**，当外加电场撤去时，这些变形或应力也随之消失的现象。



(一) 石英晶体的压电效应

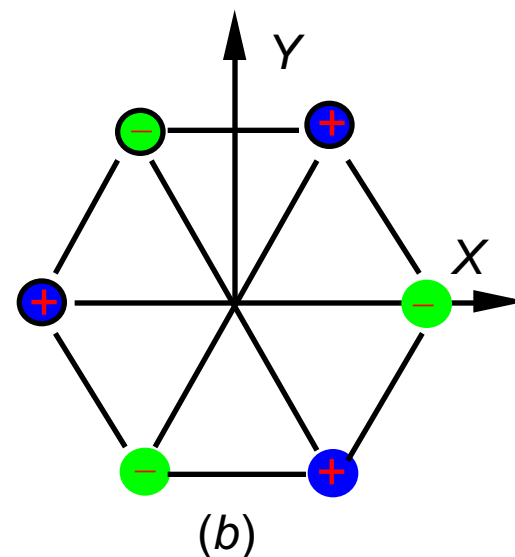
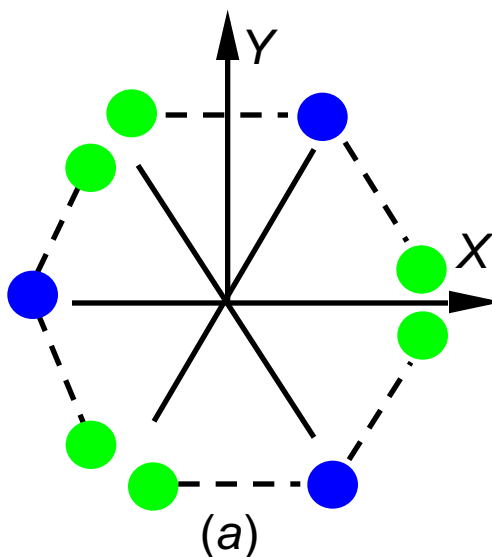
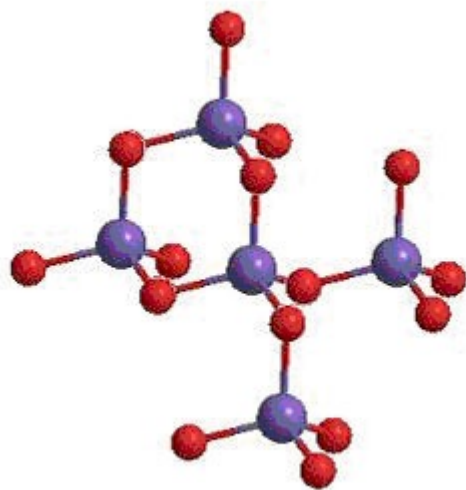
天然结构石英晶体的理想外形是一个正六面体，在晶体学中它可用三根互相垂直的轴来表示，其中纵向轴 $Z-Z$ 称为**光轴**；经过正六面体**棱线**，并垂直于光轴的 $X-X$ 轴称为**电轴**；与 $X-X$ 轴和 $Z-Z$ 轴同时垂直的 $Y-Y$ 轴（垂直于正六面体的**棱面**）称为**机械轴**。

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**。



石英晶体
(a)理想石英晶体的外形 (b)坐标系

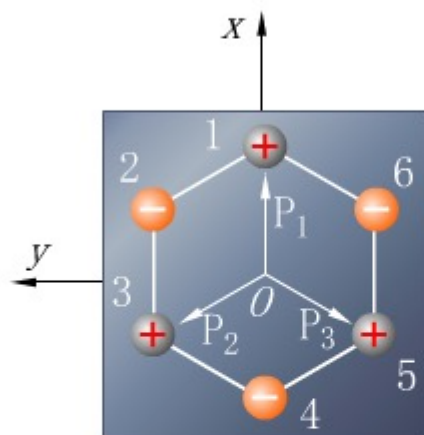
石英晶体具有压电效应，是由其内部结构决定的。组成石英晶体的硅离子 Si^{4+} 和氧离子 O^{2-} 在 Z 平面投影，如图(a)。为讨论方便，将这些硅、氧离子等效为图(b)中正六边形排列，图中“ \oplus ”代表 Si^{4+} ，“ \ominus ”代表 2O^{2-} 。



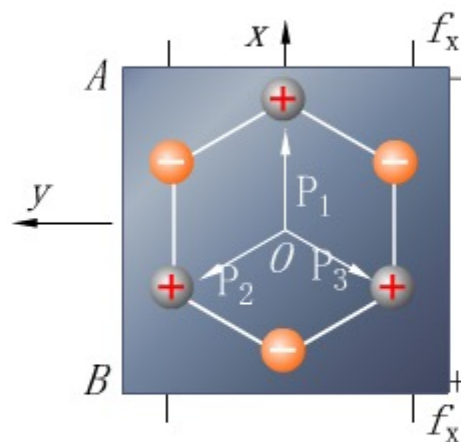
硅氧离子的排列示意图

(a) 硅氧离子在 Z 平面上的投影

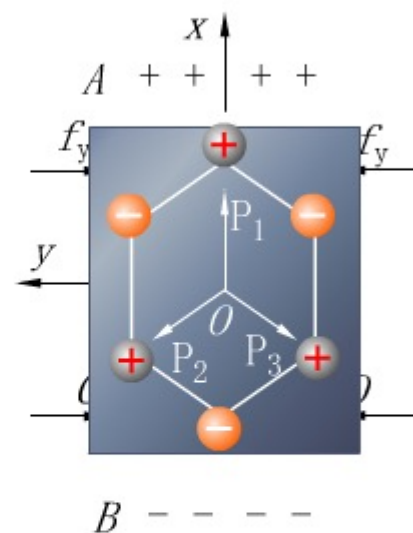
(b) 等效为正六边形排列的投影



(a) 不受力时



(b) x轴方向受力



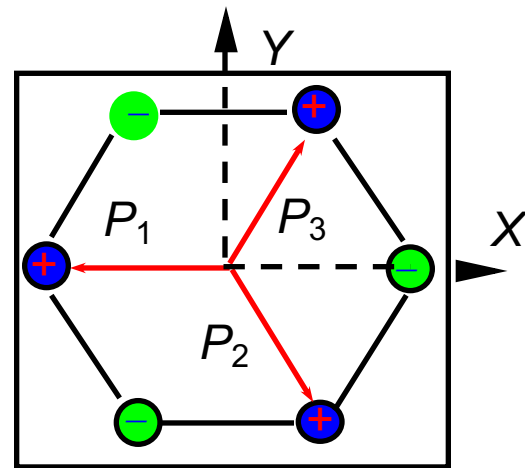
(c) y轴方向受力

石英晶体压电模型

东方仿真COPYRIGHT

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° 夹角的电偶极矩 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

$$P_1 + P_2 + P_3 = 0$$



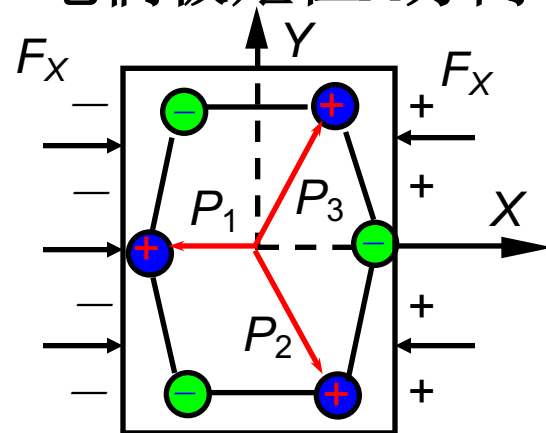
(a) $F_x=0$

当晶体受到沿 X 方向的压力（ $F_x < 0$ ，表示 F_x 的方向）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。



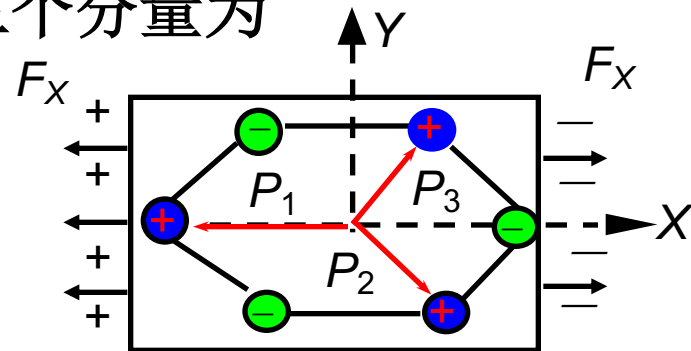
(b) $F_x < 0$

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

$$(P_1 + P_2 + P_3)_x < 0$$

$$(P_1 + P_2 + P_3)_y = 0$$

$$(P_1 + P_2 + P_3)_z = 0$$



(c) $F_x > 0$

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。

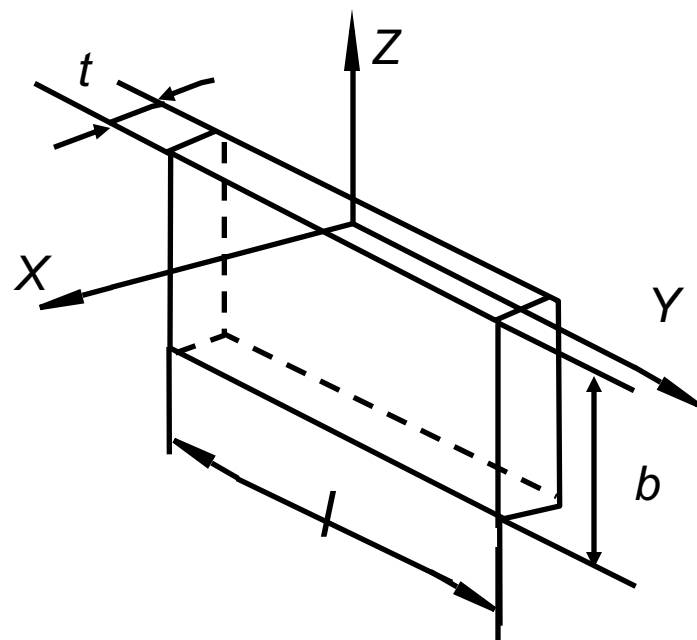
晶体在***Y***轴方向力 F_y 作用下的情况与 F_x 相似。当 $F_y > 0$ 时，晶体的形变与图（**b**）相似；当 $F_y < 0$ 时，则与图

（**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。

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，即可得到如下公式：



石英晶体切片

极化强度 P_{XX} 与应力 σ_{XX} 成正比:

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

式中 F_X ——沿晶轴X方向施加的压力;

d_{11} ——压电系数, 当受力方向和变形不同时, 压电系数也不同

l 、 b ——石英晶片的长度和宽度。

又由于, 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:

$$q_X = d_{11}F_X$$

又由于其极间电压公式为: $U_X = \frac{q_X}{C_X} = d_{11}\frac{F_X}{C_X}$, 从而得到电压与压力的对应关系。

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

根据逆压电效应，晶体在X轴方向将会产生伸缩，即：

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

d_{11} —压电系数

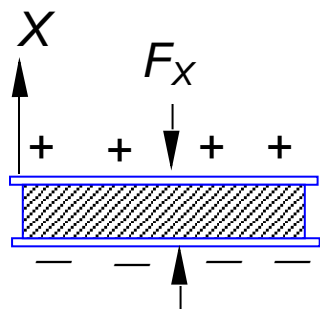
U_X —极间电压

或用应变表示，即：

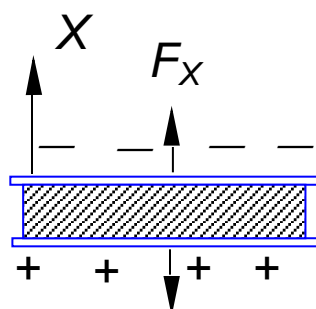
$$\frac{\Delta t}{t} = d_{11} \frac{U_X}{t} = d_{11} E_X \quad t \text{—晶片厚度}$$

式中 E_X —X轴方向上的电场强度，从而得到电场强度与晶片厚度变化的对应关系。

在X轴方向施加压力时，则在石英晶体的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)。



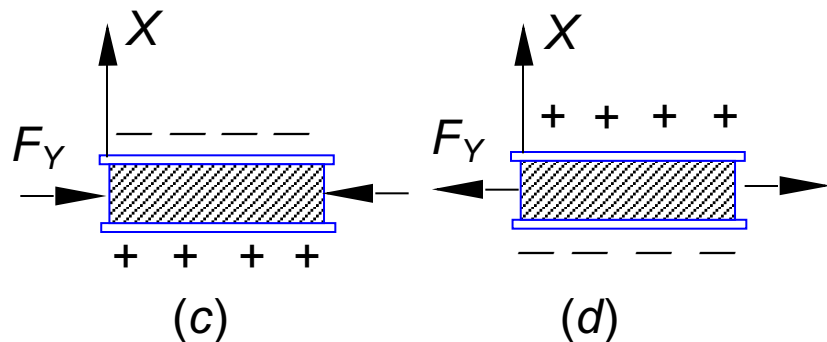
(a)



(b)

如果在同一晶片上作用力是沿着机械轴（**Y-Y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：

(与**F_x**产生的**U_x**有什么不同？)

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

C_X —电极面间电容

根据逆压电效应，晶片在Y轴方向将产生伸缩变形，即：

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

U_X —极间电压

或用应变表示： $\frac{\Delta l}{l} = -d_{11} E_X$ E_X —X轴方向上的电场强度。

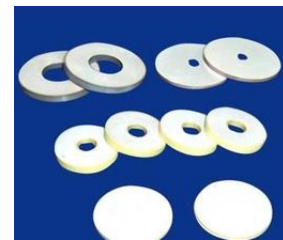
d_{11} —石英晶体在X轴方向受力时的压电系数

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；

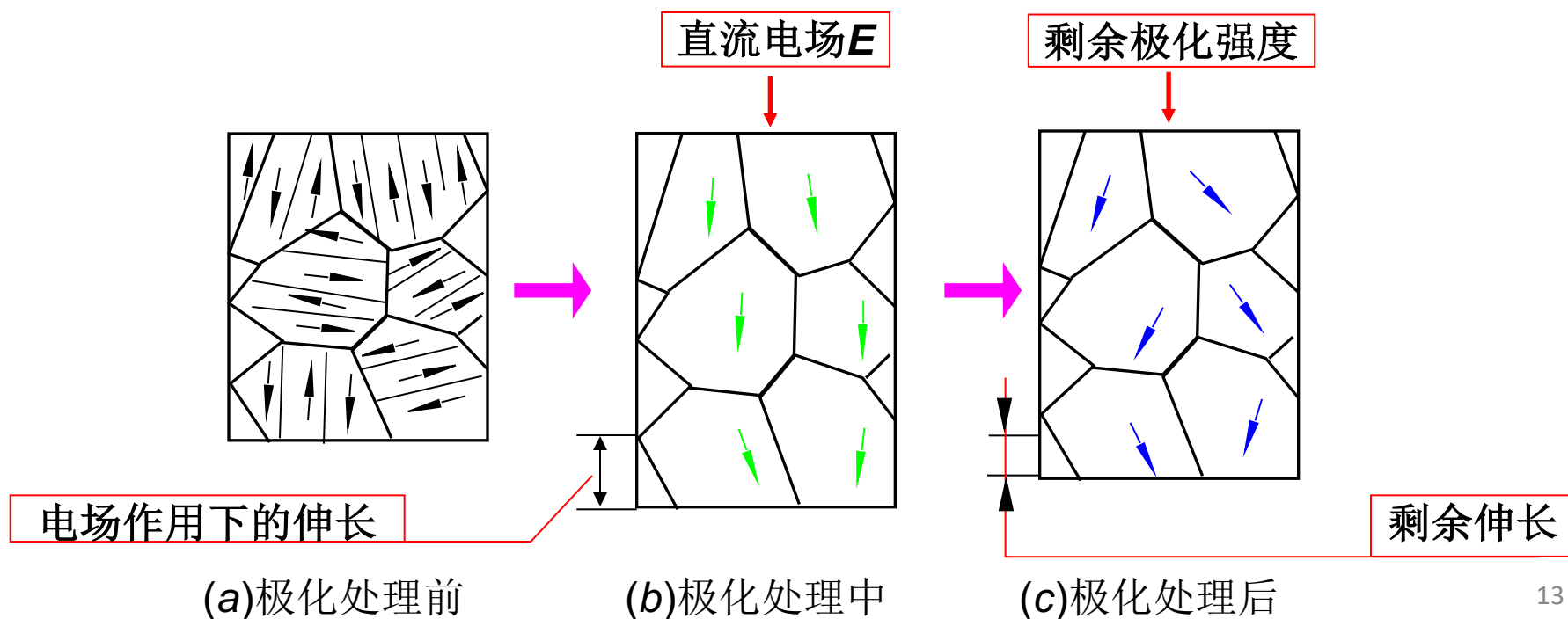
③石英晶体不是在任何方向都存在压电效应的。

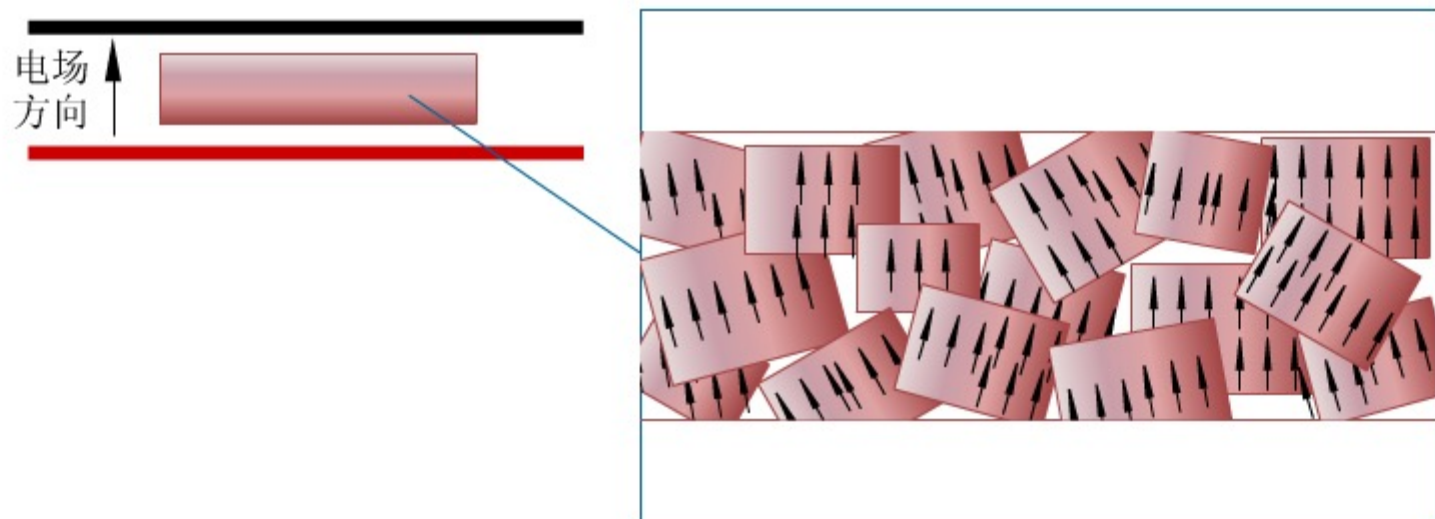


(二) 压电陶瓷的压电效应

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，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）。

在压电陶瓷上加一足够高的直流电场，并保持一定的温度和时间，迫使其电畴转向，或者说迫使其自发极化作定向排列。极化的三要素：极化电场、极化温度和极化时间。极化方法，有：油浴极化法、空气极化法、空气高温极化方法。



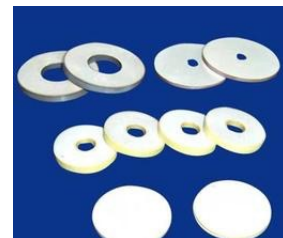
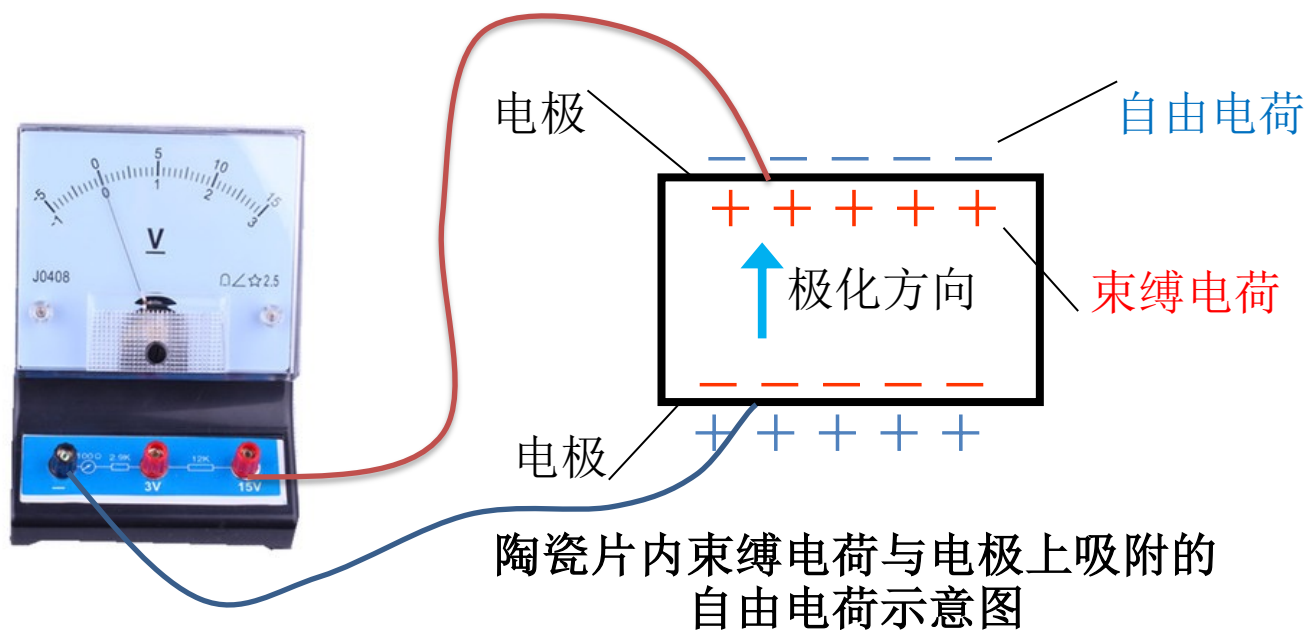


压电陶瓷的极化

东方仿真COPYRIGHT

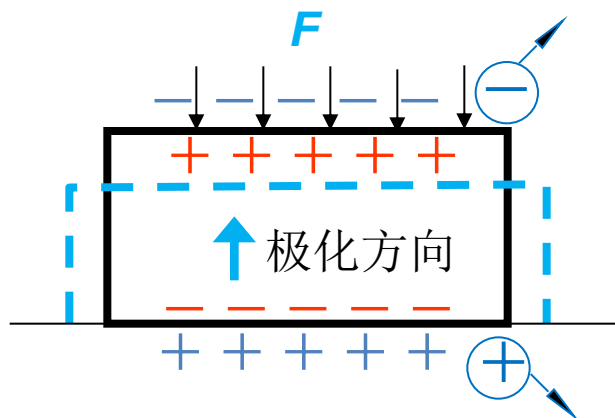
但是，当把电压表接到陶瓷片的两个电极上进行测量时，却无法测出陶瓷片内部存在的极化强度。这是因为陶瓷片内的极化强度总是以电偶极矩的形式表现出来，即在陶瓷的一端出现正束缚电荷，另一端出现负束缚电荷。

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的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。

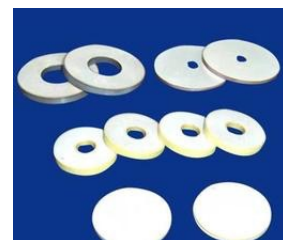


如果在陶瓷片上加一个与极化方向平行的**压力 F** ，如图，陶瓷片将产生**压缩形变**（图中**虚线**），片内的正、负束缚电荷之间的**距离变小，极化强度也变小**。因此，原来吸附在电极上的自由电荷，有一部分被释放，而出现**放电现象**。

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**压电陶瓷的正压电效应**。



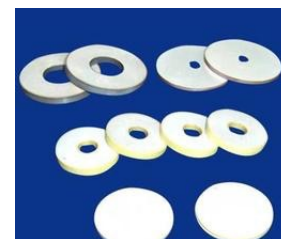
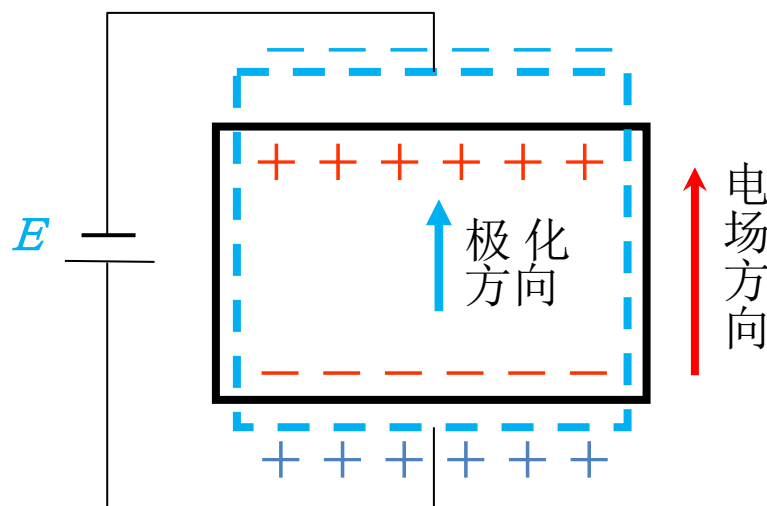
正压电效应示意图
（实线---代表形变前的情况
虚线---代表形变后的情况）



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，就是压电陶瓷的逆压电效应。

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)



总结：

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，**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、压电材料

种类：

- 压电晶体，如石英等；
- 压电陶瓷，如钛酸钡、锆钛酸铅等；
- 压电半导体，如硫化锌、碲化镉等。

对压电材料特性要求：

①转换性能。要求具有较大压电常数。

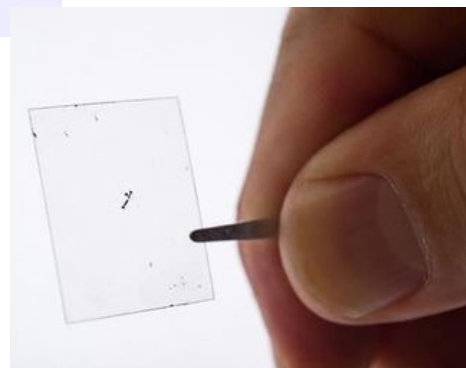
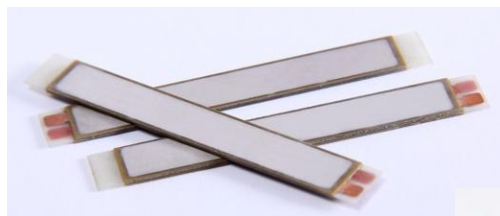
②机械性能。压电元件作为受力元件，希望它的机械强度高、刚度大，以期获得宽的线性范围和高的固有振动频率。

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。

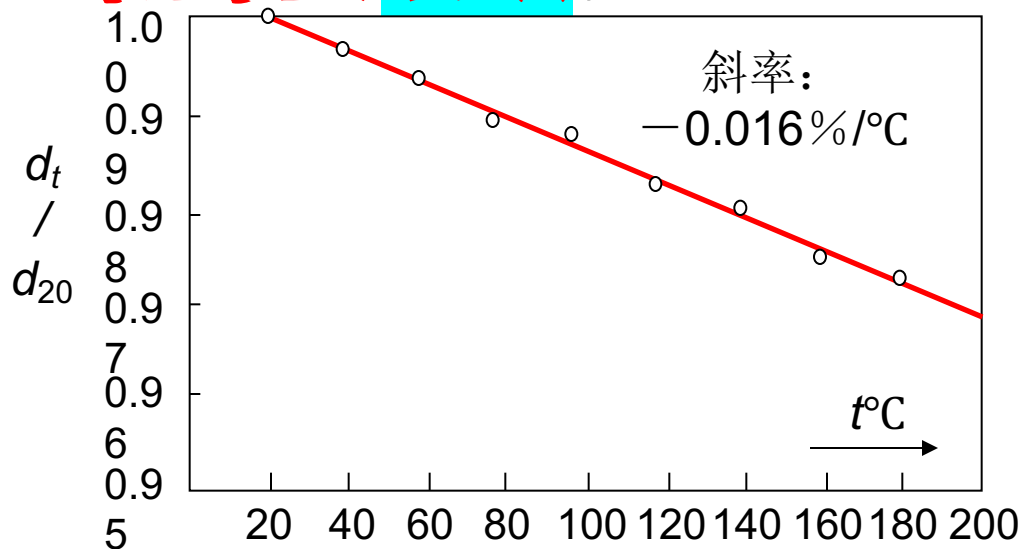
19世纪末，著名物理学家皮埃尔·居里（居里夫人的丈夫）在自己的实验室里发现磁石的一个物理特性，就是当磁石加热到一定温度时，原来的磁性就会消失。后来，人们把这个温度叫“居里点”。



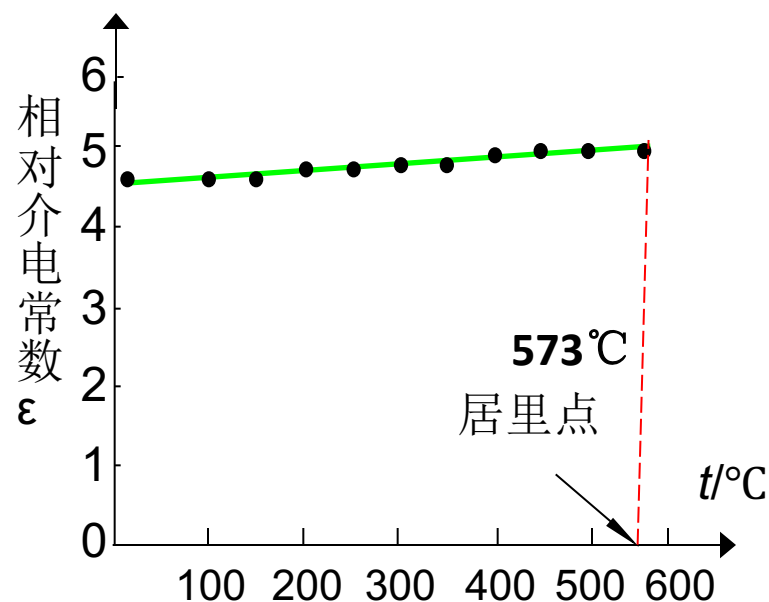
(一) 石英晶体

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，其压电系数比压电陶瓷的压电系数低得多。因此一般仅用于标准仪器或要求较高的传感器中。

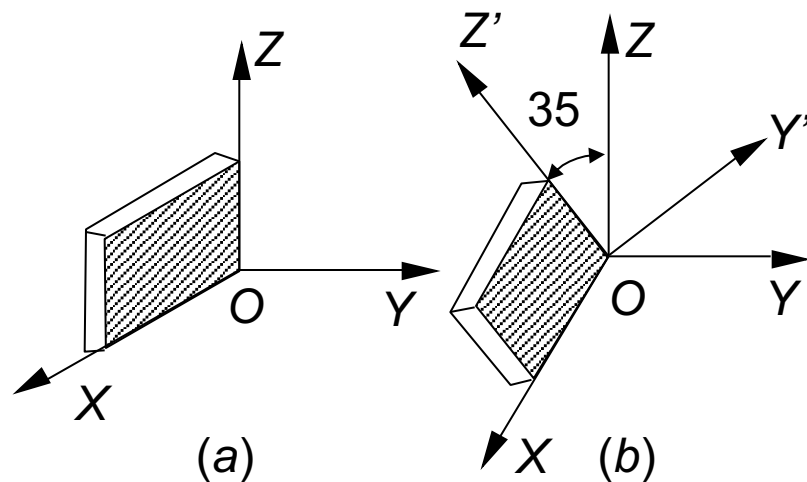
因为石英是一种各向异性晶体，因此，按不同方向切割的晶片，其物理性质（如：弹性、压电效应、温度特性等）相差很大。为了在设计石英传感器时，根据不同使用要求需要正确地选择石英片的切型。

石英晶片的切型符号表示方法：

- ◆ IRE (无线电工程师协会)标准规定的切型符号表示法；
- ◆ 习惯符号表示法(按照与IRE标准规定的切型符号表示法有对应表进行转换即可)。

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：(YXl) 35° 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。

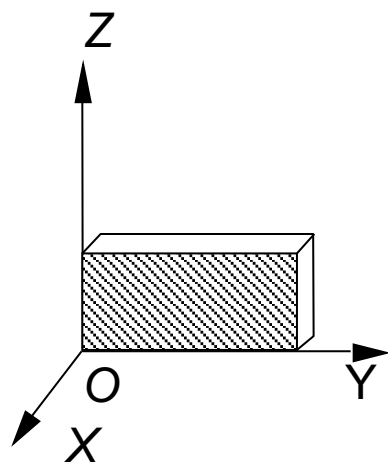


(YXl) 35° 切型

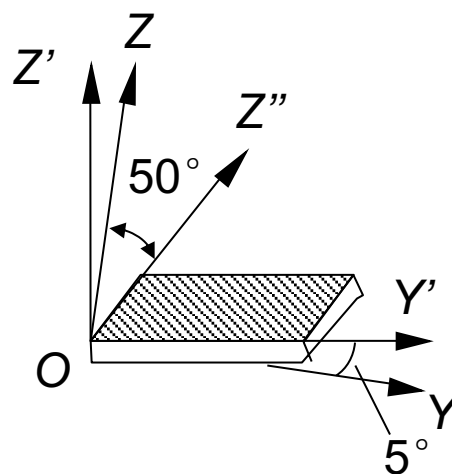
(a) 石英晶片原始位置

(b) 石英晶片的切割方位

又如 ($XYtl$) $5^\circ/-50^\circ$ 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。



(a)石英晶片原始位置



(b)石英晶片的切割方位

(二) 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)。不足之处是居里点温度低 (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 (钛酸铅) 和 PbZrO_3 (锆酸铅) 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，居里点温度在 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 (锆钛酸铅系压电陶瓷) 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。

这种薄膜具有可挠性，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)。

4、压电半导体材料

如: ZnO (氧化锌)、 CdS (硫化镉)、 CdTe (碲化镉)，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，可测量：力和温度等参数。



三、 压电式传感器的测量电路

(一) 等效电路

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：

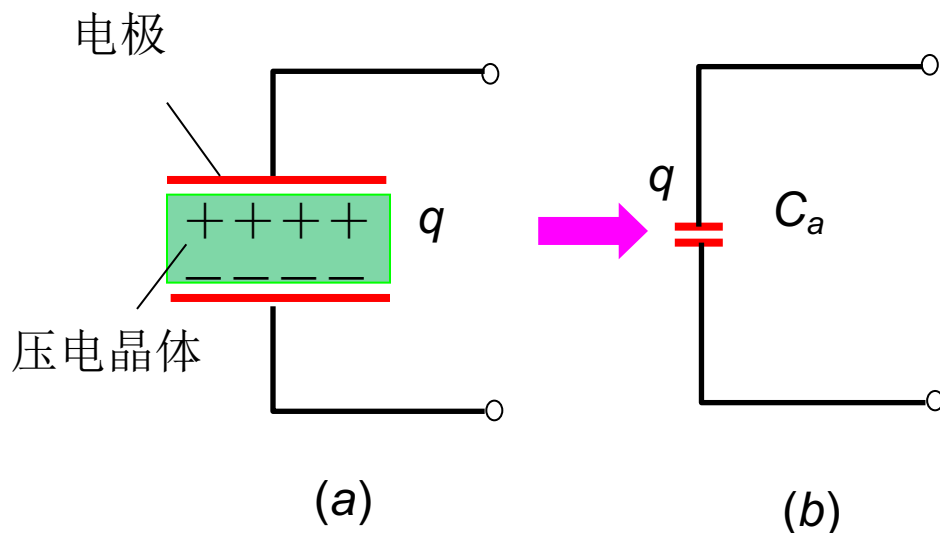
$$C_a = \frac{\varepsilon S}{t} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{t}$$

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：

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

q —板极上聚集的电荷电量(C)

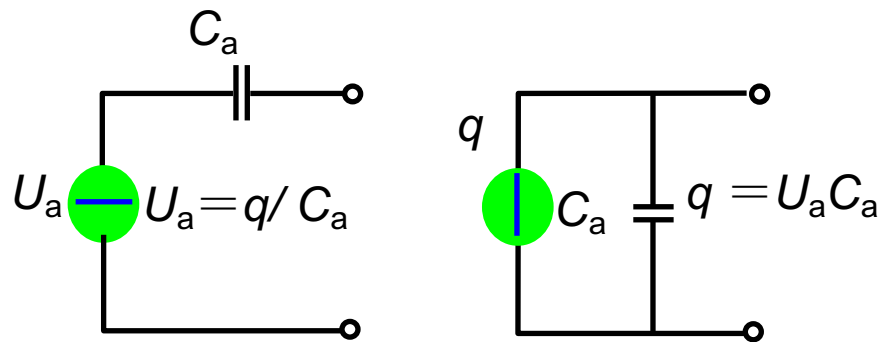
C_a —两极板间等效电容(F)



压电传感器的等效电路

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

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)。

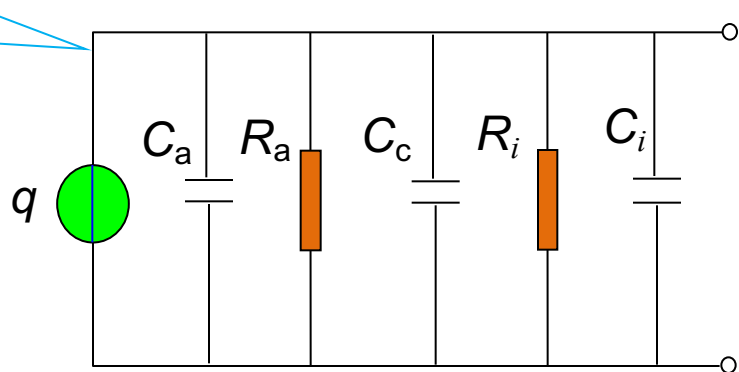


(a) 电压等效电路 (b) 电荷等效电路
压电传感器等效原理

* 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。

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、考虑前置放大器的输入电阻、输入电容。

压电传感器的
完整等效电路



C_a 传感器的固有电容

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。测试系统则应有较大的时间常数, (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。

四、压电式传感器的应用

(一) 压电式**加速度**传感器

(二) 压电式**压力**传感器

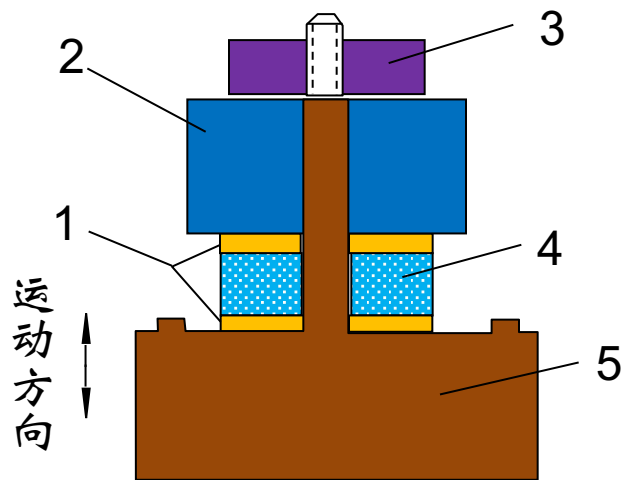
(三) 压电式**流量计**

(四) **集成**压电式传感器

(一) 压电式加速度传感器

其结构一般有**纵向**效应型、**横向**效应型和**剪切**效应型三种。

纵向效应是最常见的,如图。**压电陶瓷4**和**质量块2**为环型,通过**螺母3**对质量块预先加载,使之压紧在压电陶瓷上。测量时将传感器**基座5**与被测对象牢牢地紧固在一起。输出信号由**电极1**引出。



纵向效应型加速度传感器的截面图

当传感器感受振动时,因为质量块相对被测体质量较小,因此,质量块感受与传感器基座相同的振动,并受到与加速度方向相反的**惯性力** $F=ma$ 。同时惯性力作用在压电陶瓷片上产生电荷为:

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

d_{33} - 压电系数
 a - 加速度



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

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的质量有关。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。若增加质量块的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。

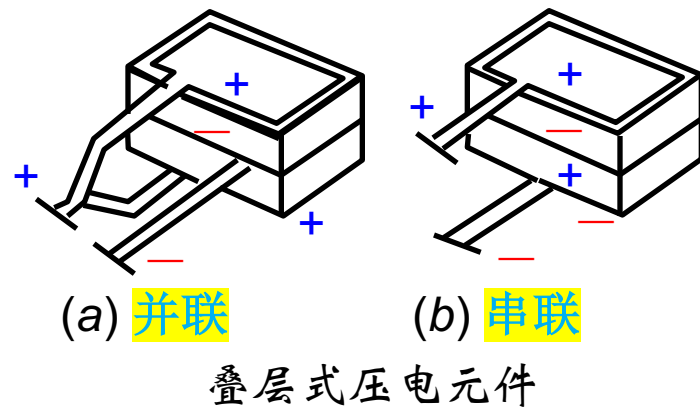


连接方式:

图(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**。 $q' = 2q$; $U' = U$; $C' = 2C$

图(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**中间的极板上产生的负电荷与下片产生的正电荷相互抵消**。从图中可知，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**二倍**，**总电容 C'** 为单片电容 **C** 的**一半**，即：

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



- 并联接法，输出电荷大，时间常数大，宜用于测量**缓变信号**，并且，适用于以电荷作为输出量的场合。
- 串联接法，输出电压大，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。

(二) 压电式压力传感器

根据使用要求不同，压电式测压传感器有各种不同的结构形式。但它们的基本原理相同。

压电式测压传感器的原理简图。它由**引线-1、壳体-2、基座-3、压电晶片-4、受压膜片-5及导电片-6**组成。当膜片5受到压力 P 作用后，则在压电晶片上产生电荷。在一个压电片上所产生的电荷 q 为：

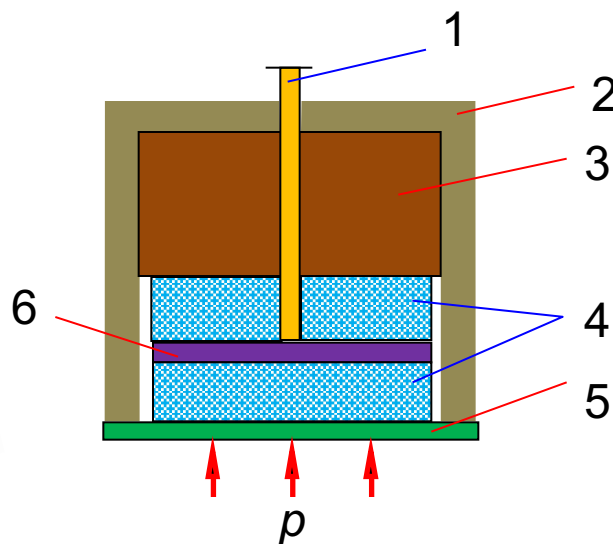
$$q = d_{11}F = d_{11}SP$$

F ——作用于压电片上的力；

d_{11} ——压电系数；

P ——压强， $P = \frac{F}{S}$ ；

S ——膜片的有效面积。



压电式测压传感器原理图

若测压传感器的输入量为压强 P ，如果传感器只由一个压电晶片组成，则根据灵敏度的定义有：

$$\text{电荷灵敏度: } k_q = \frac{q}{P}$$

$$\text{电压灵敏度: } k_u = \frac{U_0}{P}$$

又因为： $q = d_{11}F = d_{11}SP$ 所以，电荷灵敏度也可表示为： $k_q = d_{11}S$

因为 $U_0 = \frac{q}{C_0}$ ，所以，电压灵敏度也可表示为： $k_u = \frac{d_{11}S}{C_0}$

U_0 ——压电片输出电压； C_0 ——压电片等效电容

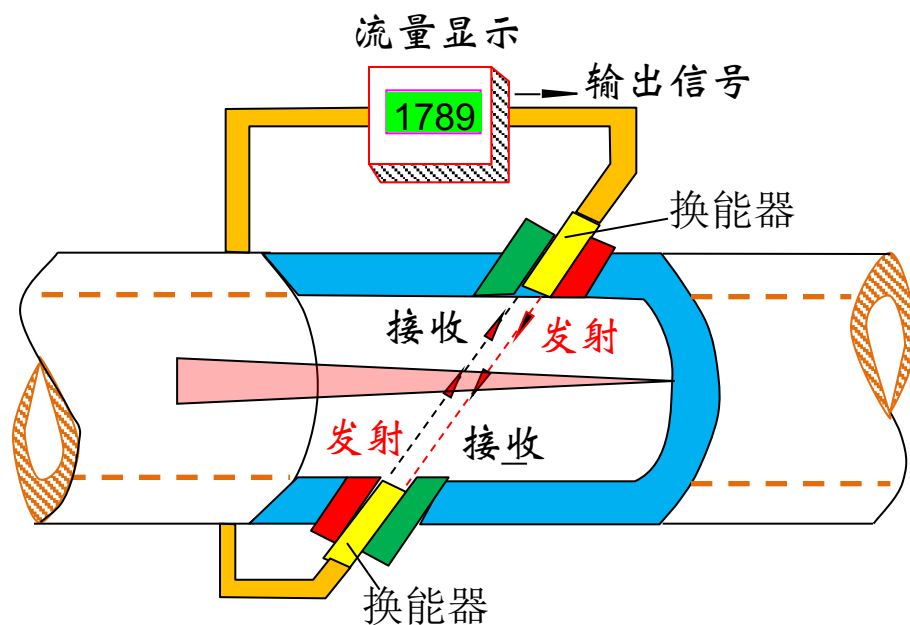
(三) 压电式流量计

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。准确度可达 **$0.01\% \sim 0.5\%$** 。

根据同一道理，可以用于直接测量随海洋深度而变化的声速分布。即以一定距离放置**两个正对**着的**陶瓷换能器**，一个为发射器、一个为接收器。根据测定的发射和接收的**相位差**随**深度**的变化，即可得到**声速随深度的分布**情况。

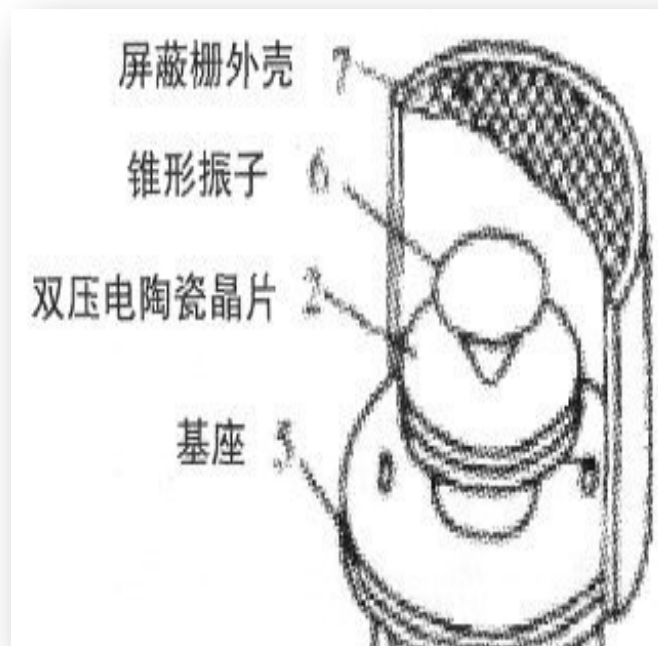
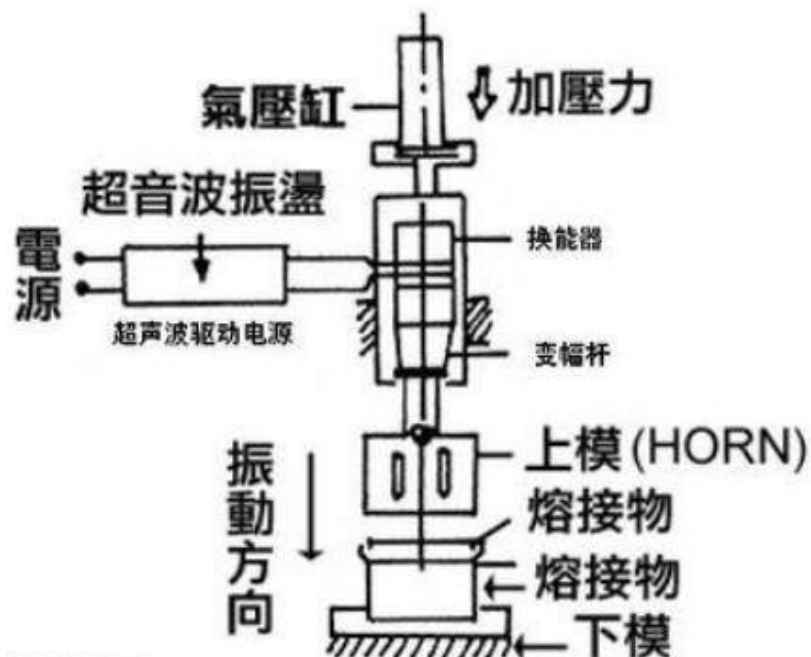


压电式流量计

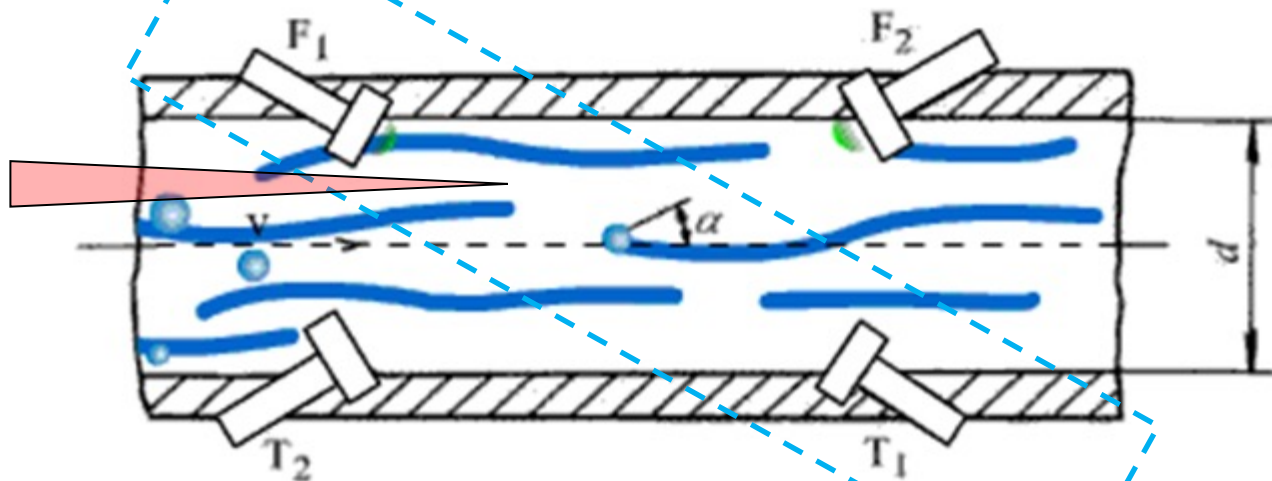
压电式超声波传感器的基本工作原理

压电式**超声波发送器**实际上是利用压电晶体的**逆向压电效应**来工作的。超声波发生器内部结构如图所示，它主要由**两个压电晶片**和一个**锥形振子**构成。当它的**两极**外加**电压脉冲信号**，压电元件就**变形**引起空气振动，当**脉冲信号频率**等于压电晶片的**固有振荡频率**时，压电晶片将会发生**共振**，并带动锥形振子振动，便产生超声波，超声波以疏密波形式传播，传送给超声波接收器。

而**超声波接收器**是利用**正向压电效应**制成，如果压电晶片两电极间未外加电压，当**锥形振子**接收到的超声波时，促使接收器的振子**随着相应频率进行振动**，由于存在**正向压电效应**，将机械能转换为电信号，就产生与**超声波频率相同的高频电压**。当然这种电压非常小，必须采用放大器进行**放大**。

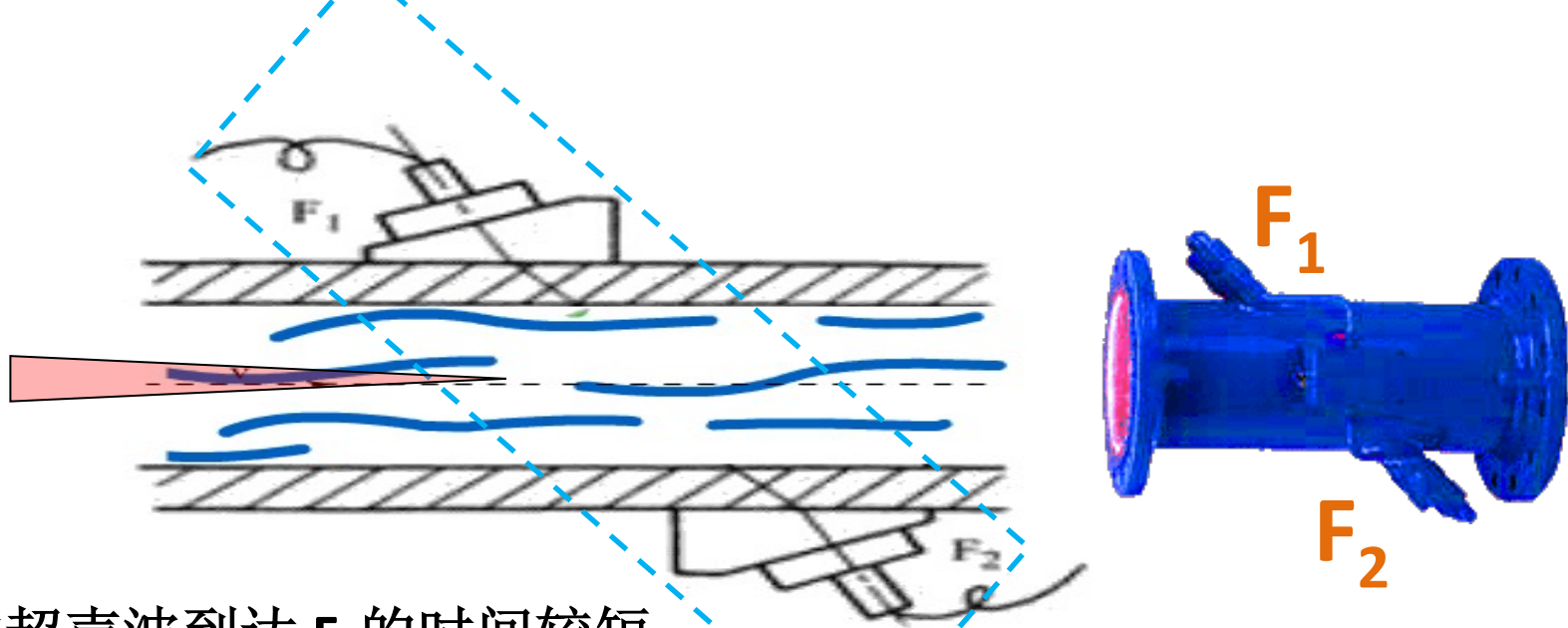


一、超声波流量计



F_1 发射的超声波先到达 T_1

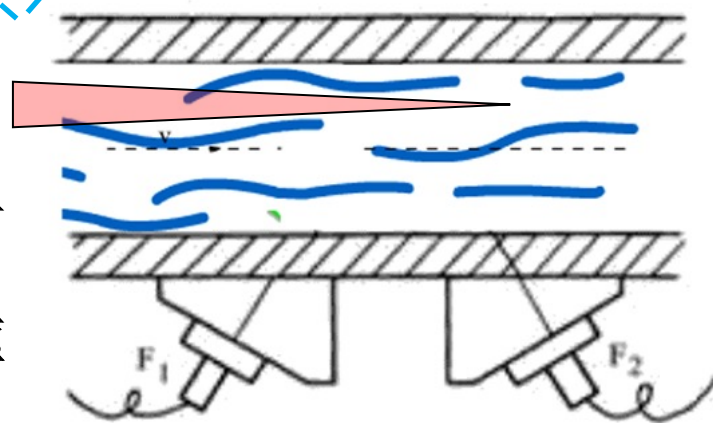
***时间差法**测量流量原理：在被测管道**上游、下游**的一定距离上，分别安装**两对**超声波发射和接收探头（ F_1 ， T_1 ）、（ F_2 ， T_2 ），其中 F_1 ， T_1 的超声波是**顺流**传播的，而 F_2 ， T_2 的超声波是**逆流**传播的。由于这两束超声波在液体中传播速度的不同，测量两接收探头上超声波传播的时间差 Δt ，可得到**流体的平均速度及流量**。



F_1 发射的超声波到达 F_2 的时间较短

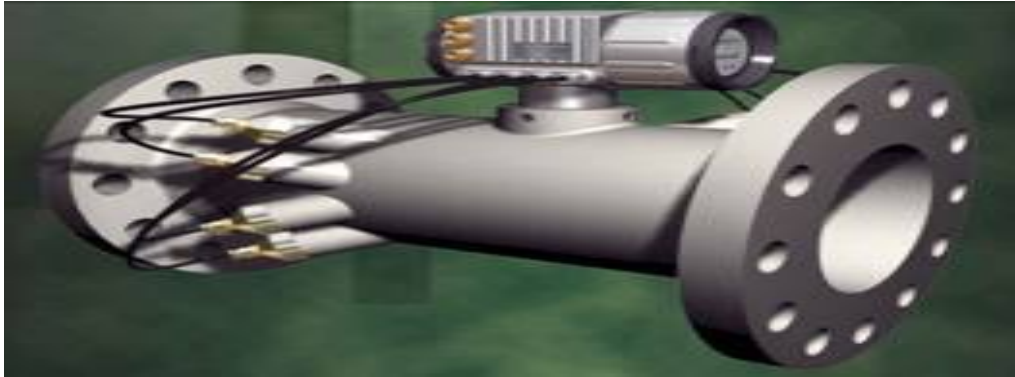
*频率差法测量流量原理：

F_1 、 F_2 是完全相同的超声探头，安装在管壁外面，通过电子开关的控制，交替地作为超声波发射器与接收器用。首先由 F_1 发射出第一个超声脉冲，它通过管壁、流体及另一侧管壁被 F_2 接收，此信号经放大后再次触发 F_1 的驱动电路，使 F_1 发射第二个声脉冲。紧接着，由 F_2 发射超声脉冲，而 F_1 作接收器，可以测得 F_1 的脉冲重复频率为 f_1 。同理可以测得 F_2 的脉冲重复频率为 f_2 。顺流发射频率 f_1 与逆流发射频率 f_2 的频率差 Δf 与被测流速 v 成正比。



发射、接收探头也可以
安装在管道的同一侧

同侧式超声波流量计的使用



(参考北京菲波仪表有限公司资料)

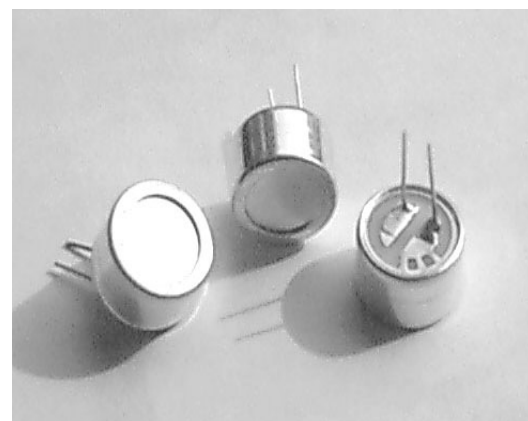


(四) 集成压电式传感器

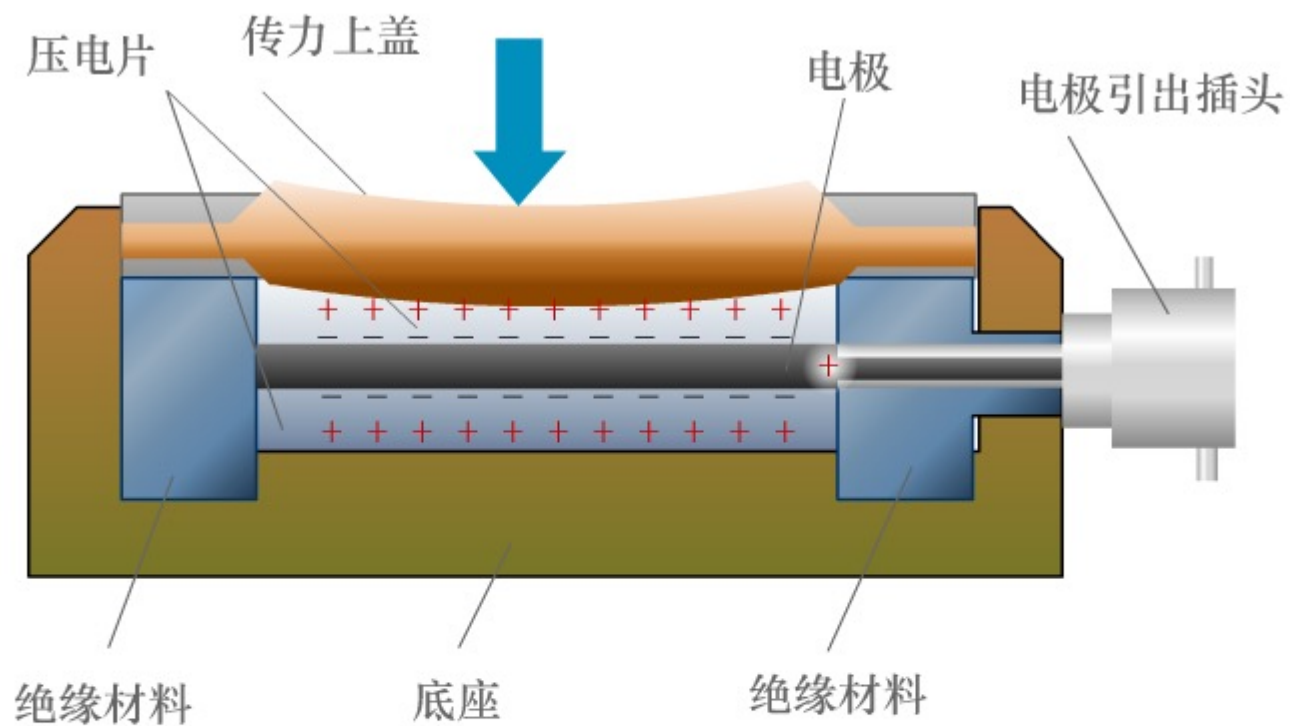
是一种高性能、低成本**动态微压传感器**，产品采用**压电薄膜**作为换能材料，动态压力信号通过薄膜变成**电荷量**，再经传感器内部放大电路转换成**电压**输出。该传感器具有灵敏度高，抗过载及冲击能力强，抗干扰性好，操作简便，体积小、重量轻、成本低等特点，广泛应用于医疗、工业控制、交通、安全防卫等领域。

典型应用：

- **脉搏计数**探测
- 按键键盘，触摸键盘
- 振动、冲击、碰撞报警
- 振动加速度测量
- 管道压力波动
- 其它机电转换、动态力检测等

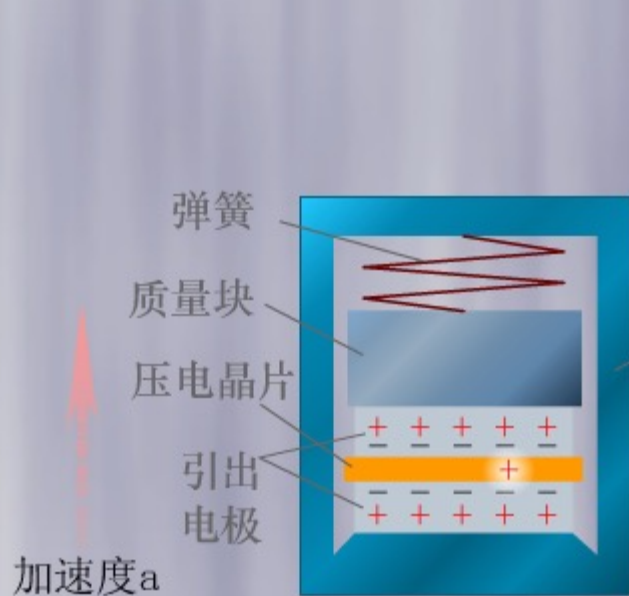


脉搏计照片

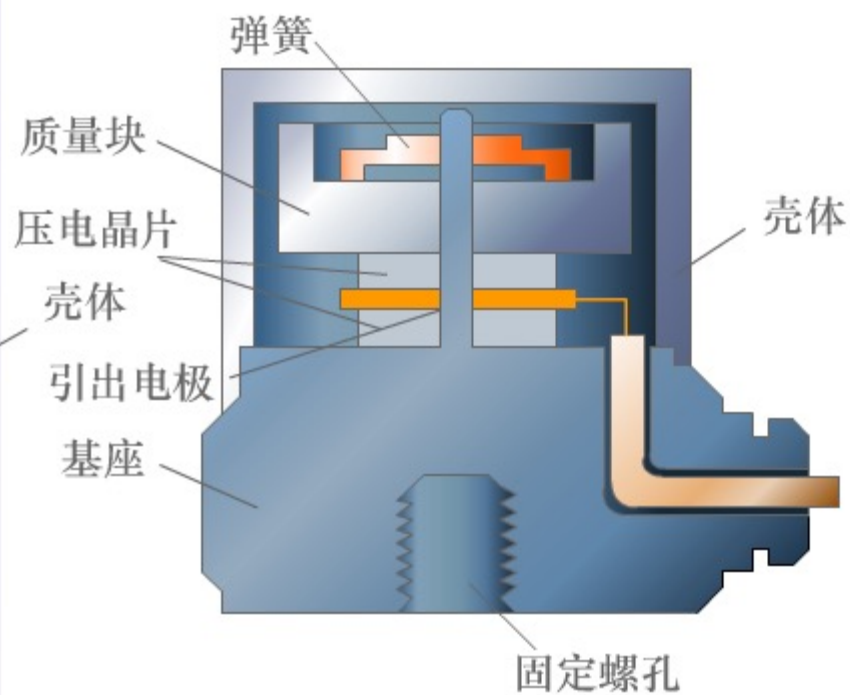


压电测力传感器

东方仿真COPYRIGHT



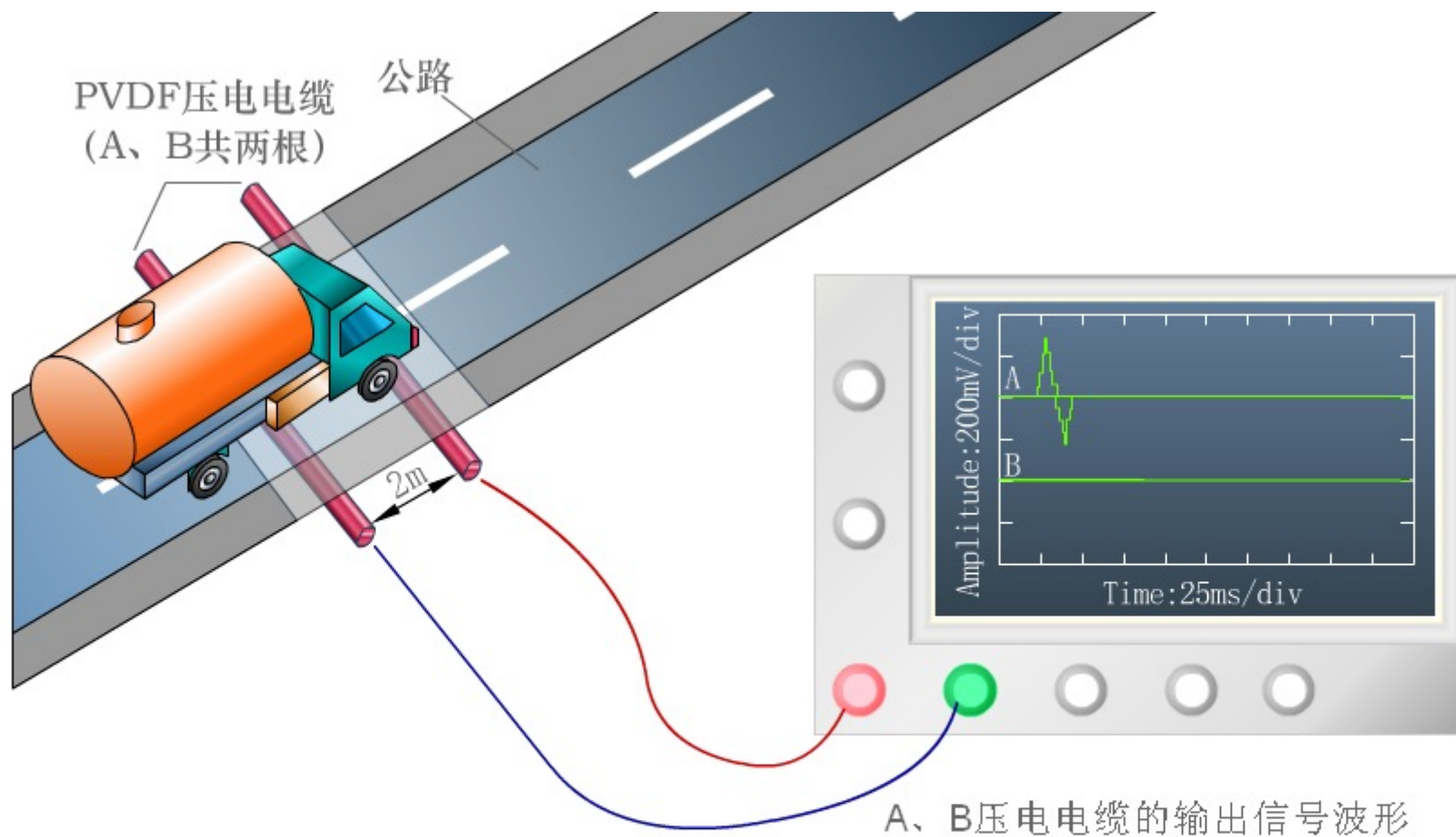
a)原理图



b)传感器结构

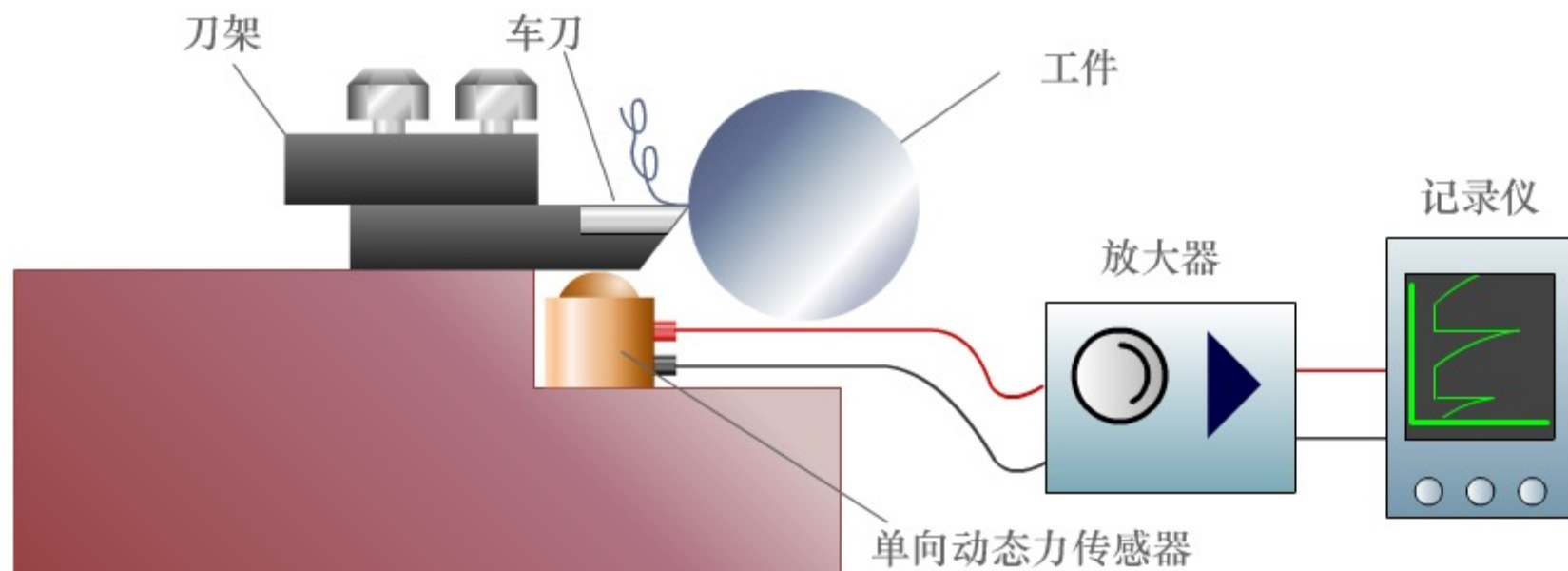
压电式加速度传感器

东方仿真COPYRIGHT



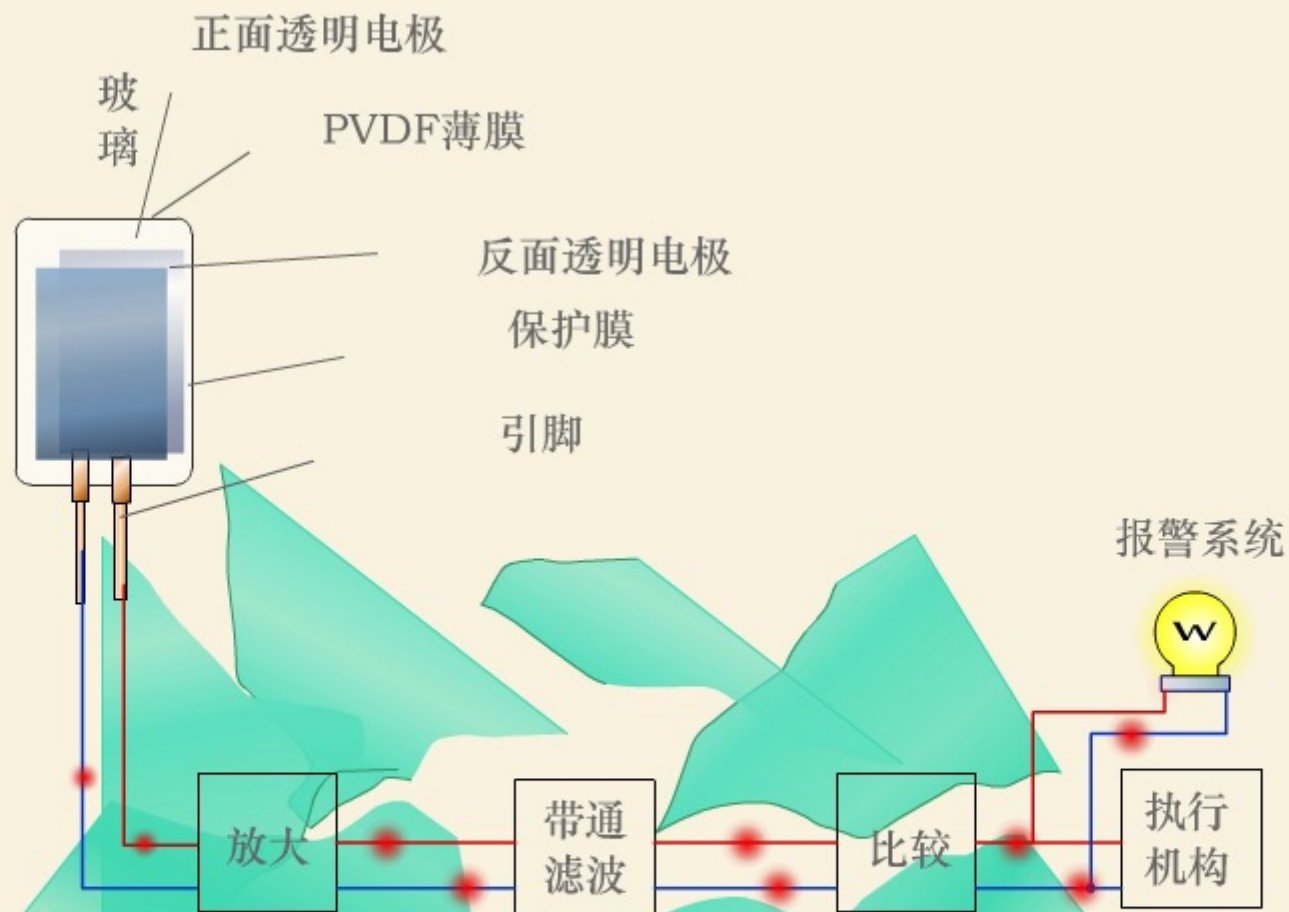
PVDF压电电缆测速原理

东方仿真COPYRIGHT



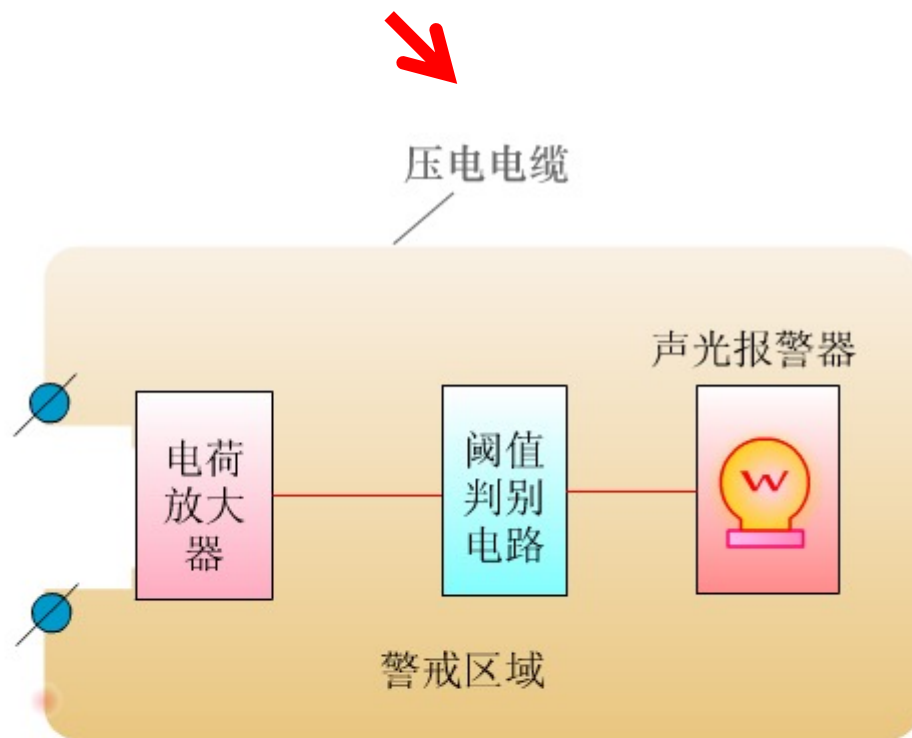
压电式刀具切削力测量

东方仿真COPYRIGHT

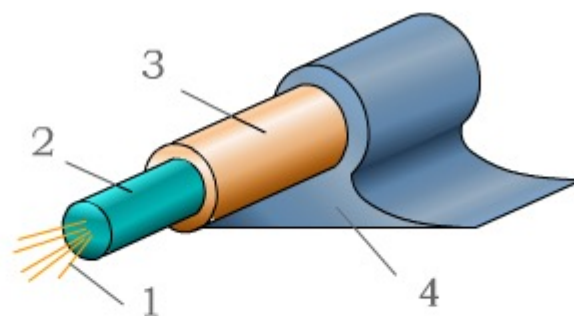


压电式玻璃破碎报警器

东方仿真COPYRIGHT



a)原理图



b)高分子压电电缆

- 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