

第6章

压电式传感器

压电式传感器

主要内容

6.1

压电效应及材料

6.2

压电方程及压电常数矩阵

6.3

等效电路及测量电路

6.4

压电式传感器及其影响因素

概述

- 压电式传感器的工作原理是基于某些介质材料的**压电效应**，是典型的双向**无源传感器**。
- 压电式传感器具有**体积小、重量轻、工作频带宽**等特点，因此在各种动态力、机械冲击与振动的测量，以及声学、医学、力学、宇航等方面都得到了非常广泛的应用。

领域

- 按传感器的输入量：

几何量：长度、角度、位移、厚度、几何位置、几何形状、表面波度和粗糙度

力学：力、力矩、振动、转速、加速度、质量、流量、硬度、真空等

温度：温度、热量、比容、热分布

湿度：湿度、水分

时间：频率、时间

电量：电流、电压、电阻、电容、电感、电磁波

磁性：磁通、磁场

光学：照度、光度、颜色、图像、透明度

声学：声压、噪声

射线：射线剂量、剂量率

化学：浓度、成分、pH值、浊度

生理：心音、血压、脉搏、血氧饱和量、心电、脑电

历史沿革

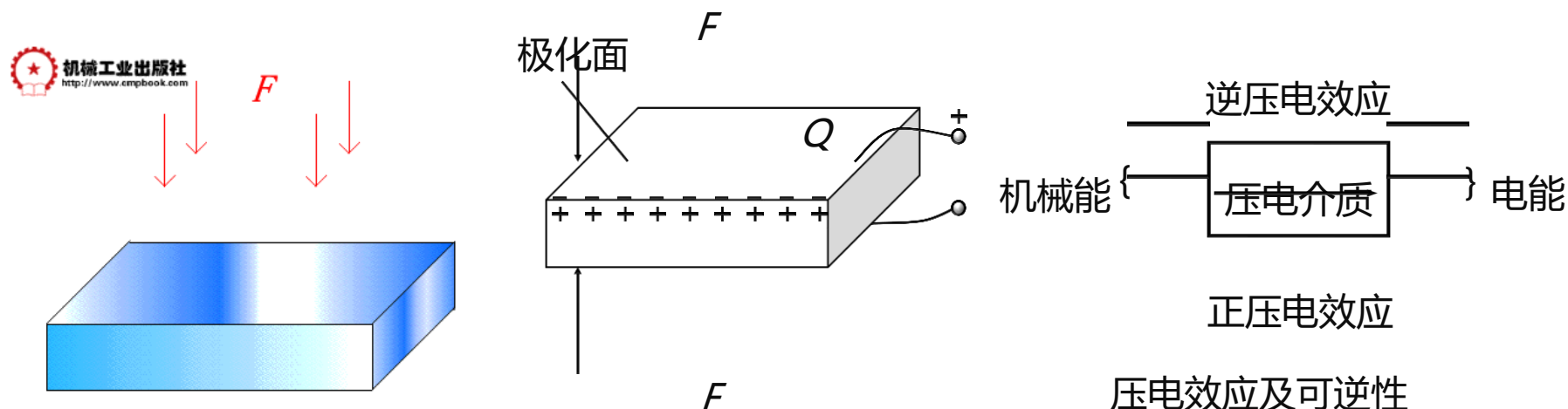
1880年是皮埃尔·居里与雅克·居里兄弟发现压电效应。



压电效应定义

某些电介质物质，在沿一定方向上受到外力的作用而变形时，内部会产生极化现象，同时在其表面上产生电荷；当外力去掉后，又重新回到不带电的状态，这种将机械能转变为电能的现象，称为“正压电效应”。

相反，在电介质的极化方向上施加电场，它会产生机械变形，当去掉外加电场时，电介质的变形随之消失。这种将电能转换为机械能的现象，称为“逆压电效应”。



压电材料的主要特性参数有：

① **压电常数**：压电常数是衡量材料压电效应强弱的参数，它直接关系到压电输出灵敏度。

② **弹性常数**：压电材料的弹性常数、刚度决定着压电器件的固有频率和动态特性。

③ **介电常数**：对于一定形状、尺寸的压电元件，其固有电容与介电常数有关；而固有电容又影响着压电传感器的频率下限。

④ **机械耦合系数**：它的意义是，在压电效应中，转换输出能量（如电能）与输入的能量（如机械能）之比的平方根，这是衡量压电材料机电—电能量转换效率的一个重要参数。

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

⑥ **居里点温度**：它是指压电材料开始丧失压电特性的温度。

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**。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。

压电材料分类

单晶体

- 石英晶体
 - 人造
 - 天然
- 多畴单晶（铌酸锂晶体）

多晶体 (压电陶瓷)

- 钛酸钡 BaTiO_3
- PZT(PZTPbTiO_3 与 PbZrO_3 混合)
- 铌镁酸铅(PMN)

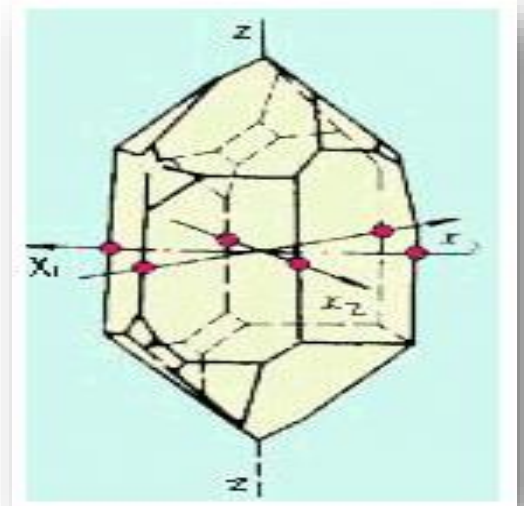
新型压电材料

- 压电半导体
 - ZnS 、 CdTe
- 有机高分子压电材料
 - 聚氟乙烯(PVF)、
高分子压电薄膜

1.1 石英晶体

石英晶体有天然和人造石英单晶两种。

石英晶体属六方晶系，是一个正六面体，有右旋和左旋石英晶体之分，在晶体学中用三根互相垂直的轴 Z 、 X 、 Y 表示它的坐标。

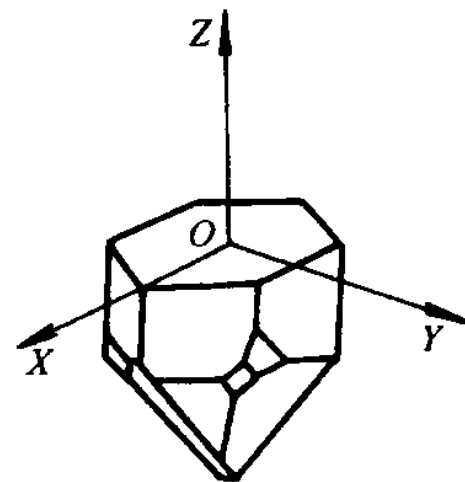
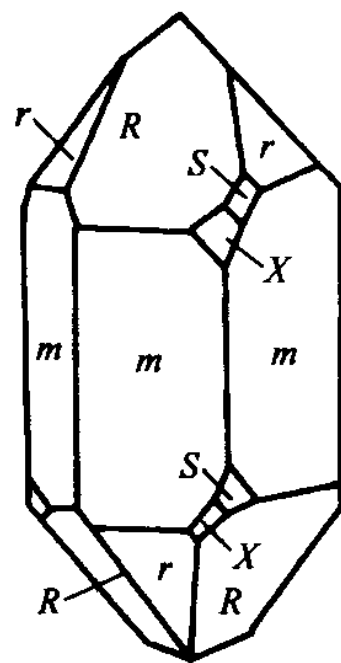


结构

X 轴为电轴（垂直于光轴），该轴压电效应最显著，它通过正六棱柱相对的两个棱线且垂直于光轴 Z ，显然 X 轴共有三个。

Y 轴为机械轴（力轴），显然也有三个，它垂直于两个相对的表面，在此轴上加力产生的变形最大。

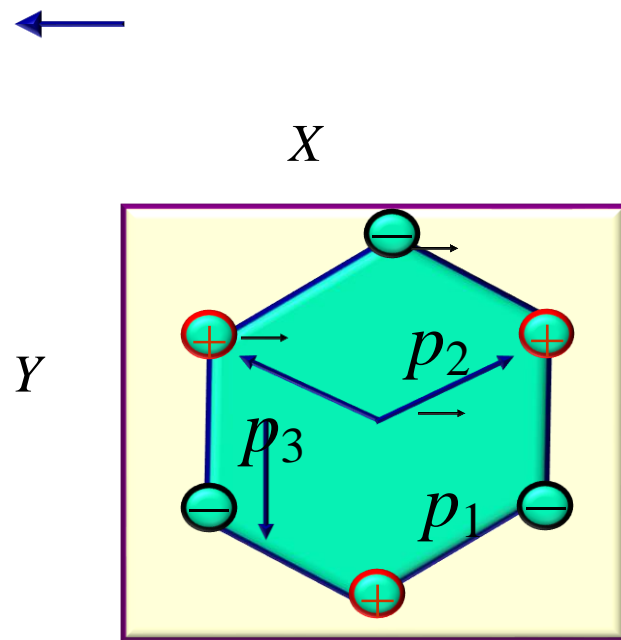
Z 轴为光轴（中性轴），它是晶体的对称轴，光线沿 Z 轴通过晶体不产生双折射现象，因而它的贡献是作为基准轴。



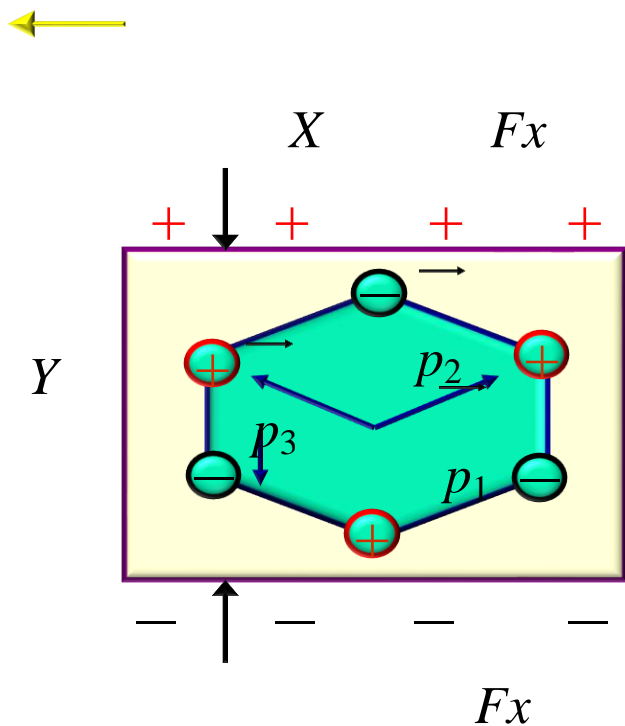
微观机理1

现将组成石英 (SiO_2) 晶体的硅离子和氧离子的排列在垂直于晶体Z轴的xy平面上进行投影，等效为正六边形排列。图中 “+” 代表 Si^{4+} ， “-” 代表 2O^{2-} 。

当石英晶体未受力作用时，正、负离子（即 Si^{4+} 和 2O^{2-} ）正好分布在正六边形的顶角上，形成三个大小相等，互成 120° 夹角的电偶极矩 p_1 、 p_2 和 p_3 ($p = q/l$, q 为电荷量, l 为正、负电荷之间的距离)。电偶极矩的矢量和等于零，即 $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 = 0$ 这时晶体表面不产生电荷，石英晶体从整体上呈电中性。



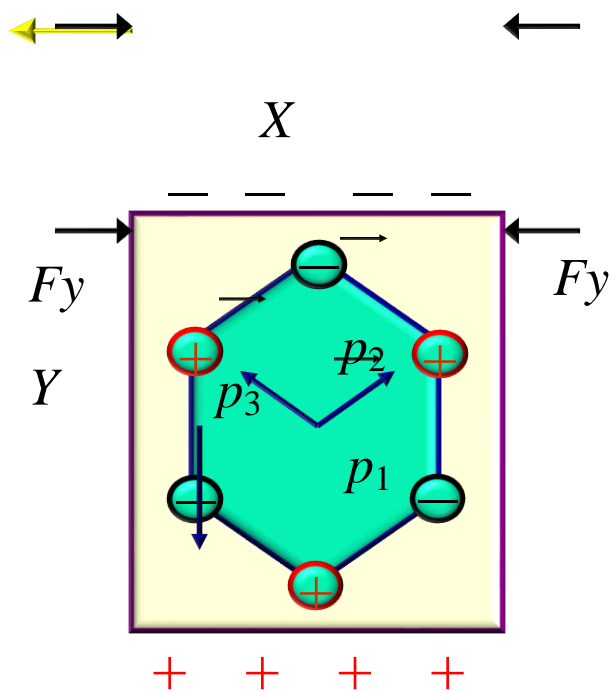
微观机理2



当石英晶体受到沿X方向的压缩力作用时，晶体沿X方向产生压缩变形，正、负离子的相对位置随之变动，正、负电荷中心不再重合，电偶极矩在X轴方向的分量 p_1 减小和 p_2 、 p_3 增大，即 $(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3)_x > 0$ ，在X轴的正方向的晶体表面上出现正电荷。而在Y轴和Z轴方向的分量均为零。在垂直于Y轴和Z轴的晶体表面上不出现电荷。

✓ 这种沿X轴作用力，而在垂直于此轴晶面上产生电荷的现象，称为“纵向压电效应”。

微观机理3



当石英晶体受到沿 Y 轴方向的压缩力作用时，电偶极矩在 X 轴方向的分量 p_1 增大和 p_2 、 p_3 减小，即 $(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3)_x < 0$

在 X 轴的正方向的晶体表面上出现负电荷。（这种情况等同于沿 X 轴方向的拉力作用），同样在垂直于 Y 轴和 Z 轴的晶面上不出现电荷。

✓ 这种沿 Y 轴作用力，而在垂直于 X 轴的晶面上产生电荷的现象，称为“横向压电效应”。

微观机理4

当晶体受到沿 Z 轴方向的力（无论是压缩力或拉伸力）作用时，因为石英晶体在 X 轴方向和 Y 方向的变形相同，正、负电荷中心始终保持重合，电偶极矩在 X 、 Y 方向的分量等于零。

✓ 所以沿光轴方向施加作用力，石英晶体不会产生压电效应。

当作用力 F_x 或 F_y 的方向相反时，电荷的极性随之改变。如果石英晶体的各个方向同时受到均等的作用力（如液体压力），石英晶体将保持电中性。

✓ 所以石英晶体没有体积变形的压电效应。

石英晶体 (SiO_2) 的性能特点:

- (1) 压电常数小, 其时间和温度稳定性好
- (2) 机械强度和品质因数高, 刚度大, 固有频率高, 动态特性好
- (3) 居里点 573°C , 无热释电性, 且绝缘性、重复性均好。

常用于精度和温度性要求较高的场合和制作标准传感器

1.2 其他压电单晶体

压电单晶中除天然和人工石英晶体外，锂盐类压电和铁电单晶如铌酸锂 (LiNbO_3)、钽酸锂 (LiTaO_3)、锆酸锂 (LiGeO_3) 等材料，也已在传感器技术中日益得到广泛应用，其中以铌酸锂为典型代表，在光电、微声和激光等器件方面都有重要应用。

优点是：时间稳定性好，抗高温强辐射能力强，光电、声光效应好

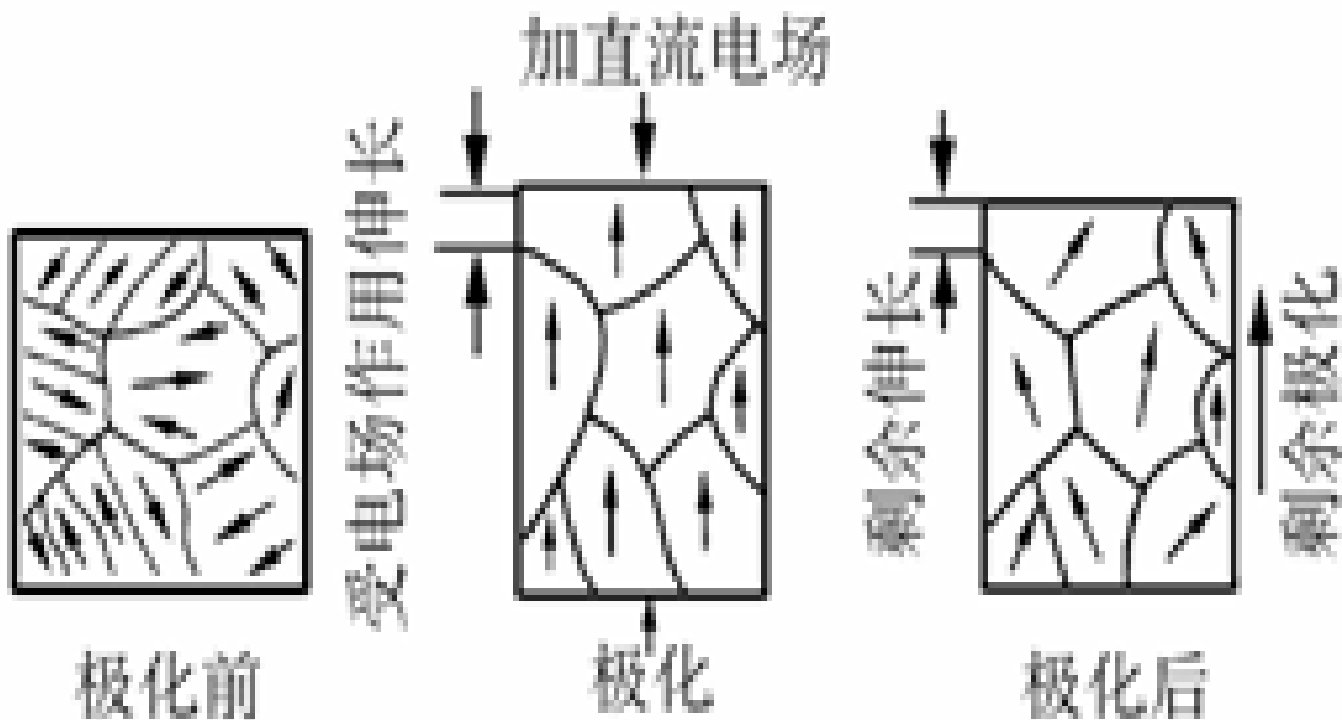
缺点是：质地脆，抗机械和热冲击性差

2.1 压电陶瓷（多晶体）

压电陶瓷是一种经极化处理后的**人工多晶铁电体**，原始的压电陶瓷呈现各向同性不具有压电性，因此，必须作**极化处理**，即在一定温度下对其施加强直流电场，迫使电畴趋向外电场方向作规则排列；极化电场去除后，趋向电畴基本保持不变，形成很强的剩余极化，从而呈现出压电性。

压电式传感器

压电陶瓷极化



BaTiO_3 压电陶瓷的极化

压电式传感器

压电陶瓷的特点

- 压电常数大
- 灵敏度高
- 制造工艺成熟
- 成形工艺性好
- 成本低廉，利于广泛应用
- 还具有热释电性

压电式传感器

常用的压电陶瓷

(1) 二元系压电陶瓷

(2) 三元系压电陶瓷

(3) 综合性能更为优越的四元系压电陶瓷也已经研制成

压电式传感器

二元系压电陶瓷

主要包括钛酸钡 BaTiO_3 ，钛酸铅 PbTiO_3 ，锆钛酸铅系列 $\text{PbTiO}_3\text{--PbZrO}_3$ (PZT) 和铌酸盐系列 $\text{KNbO}_3\text{--PbNb}_2\text{O}_3$ 。其中以钛酸钡，尤其以锆钛酸铅系列压电陶瓷应用最广。

压电式传感器

三元系压电陶瓷

目前应用的PMN，它由铌镁酸铅
 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 钛酸铅 PbTiO_3 - 锆钛酸铅
 PbZrO_3 三成分配比而成。另外还有专门制造耐
高温、高压和电击穿性能的铌锰酸铅系、镁碲
酸铅等。

压电材料 性能参数	石英	钛酸钡	锆钛酸铅 PZT—4	锆钛酸铅 PZT—5	锆钛酸铅 PZT—8
压电系数/(pC/N)	$d_{11}=2.31$ $d_{14}=0.73$	$d_{15}=260$ $d_{31}=-78$ $d_{33}=190$	$d_{15}\approx 410$ $d_{31}=-100$ $d_{33}=230$	$d_{15}\approx 670$ $d_{31}=185$ $d_{33}=600$	$d_{15}=330$ $d_{31}=-90$ $d_{33}=200$
相对介电常数(ϵ_r)	4.5	1200	1050	2100	1000
居里点温度/℃	573	115	310	260	300
密度/(10^3 kg/m^3)	2.65	5.5	7.45	7.5	7.45
弹性模量/(10^9 N/m^2)	80	110	83.3	117	123
机械品质因数	$10^5 \sim 10^6$		≥ 500	80	≥ 800
最大安全应力/(10^5 N/m^2)	95~100	81	76	76	83
体积电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	$>10^{12}$	10^{10} (25℃)	$>10^{10}$	10^{11} (25℃)	
最高允许温度/℃	550	80	250	250	
最高允许湿度/(%)	100	100	100	100	

压电式传感器

3. 新型压电材料

(1) 压电半导体

既有压电特性又有半导体特性——集成压电传感器系统。

(2) 有机高分子压电材料

一 某些合成高分子聚合物，经延展拉伸和电极化后具有压电性高分子压电薄膜，如聚氟乙烯(PVF)等。

二 高分子化合物中掺杂压电陶瓷PZT或BaTiO₃粉末制成的高分子压电薄膜。

压电式传感器

主要内容

6.1

压电效应及材料

6.2

压电方程及压电常数矩阵

6.3

等效电路及测量电路

6.4

压电式传感器及其影响因素

压电晶体的切割

通过前几节有关压电常数的讨论使我们了解到，不是压电晶体的任何方向都存在压电效应，而只有某些特定的方向才存在压电效应。

压电晶体的切割

例如， α —石英晶体，如果选择了与z轴垂直的方向切下一块晶片（即晶片的厚度方向与z轴平行），无论对此晶体作用什么力，都不能在z轴方向产生压电效应。如果选择了与x轴垂直的方向切下一块晶片，则当应力 T_1 、 T_2 或 T_4 作用时，在x方向能产生压电效应。

因此，用压电晶体做压电元件时，不是随便从晶体上切下一块晶片，就可以做成所需要的元件，而是要根据压电晶体的压电常数，以及对压电元件性能的设计要求，并经过反复实验后，才能找到较合适的方向进行切割。

切割符号的规定

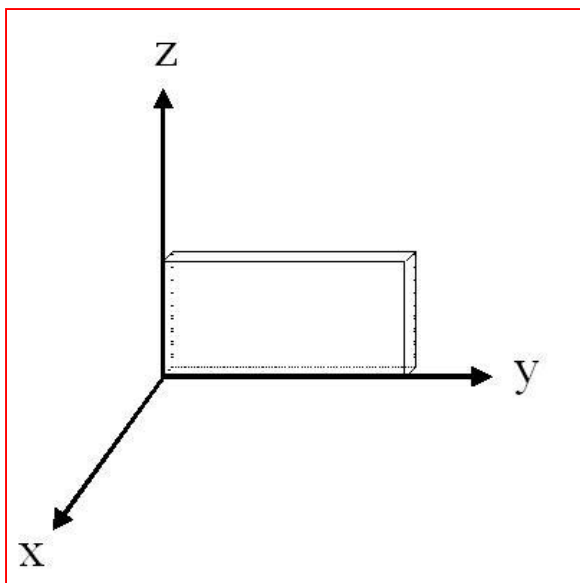
x、y、z代表晶体的三个坐标轴，l、w、t代表晶片的长度、宽度、厚度。

例如：xy切割表示晶片的厚度与x轴平行，长度与y轴平行（即第一个字母代表厚度方向，第二个字母代表长度方向）。

又如：xz切割表示晶片的厚度与x轴平行，长度与z轴平行。也有把xy切割和xz切割简称为x切割。

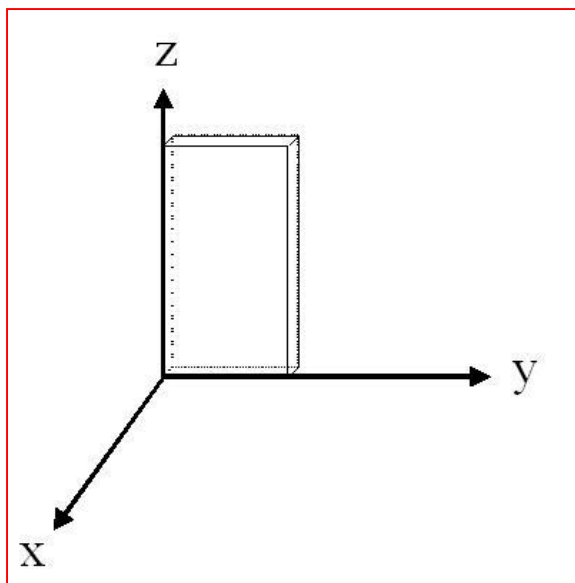
length, width, thickness

晶片切割示意图



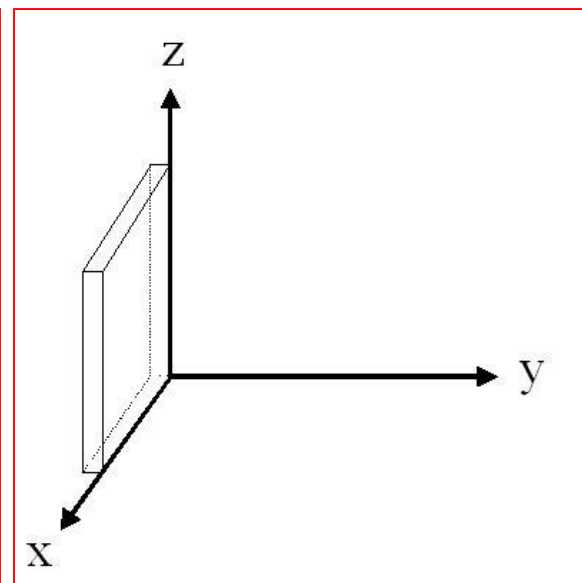
XY-切割

XY-cut



XZ-切割

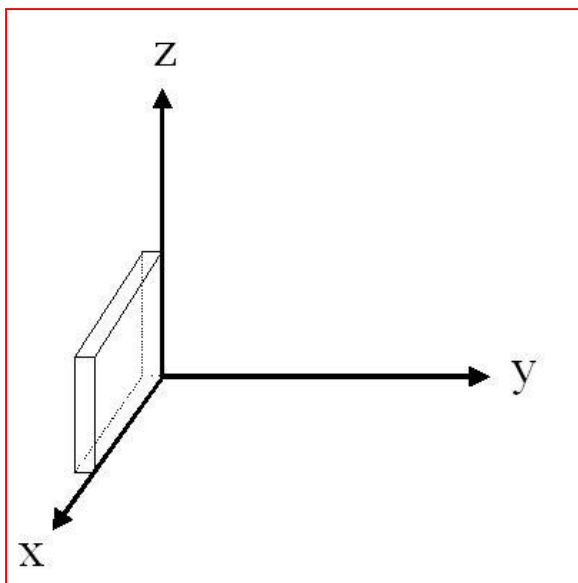
XZ-cut



YZ-切割

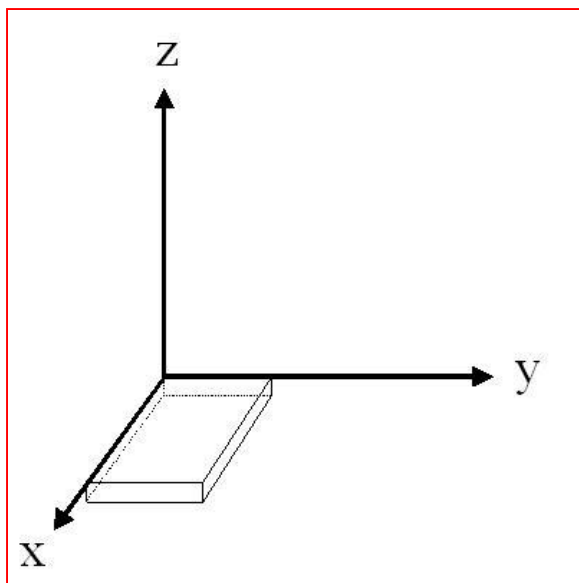
YZ-cut

图4-13 晶片切割示意图



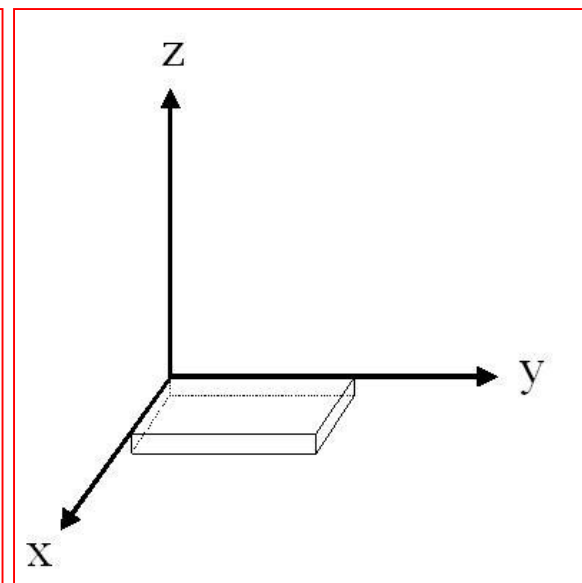
YX-切割

YX-cut



ZX-切割

ZX-cut



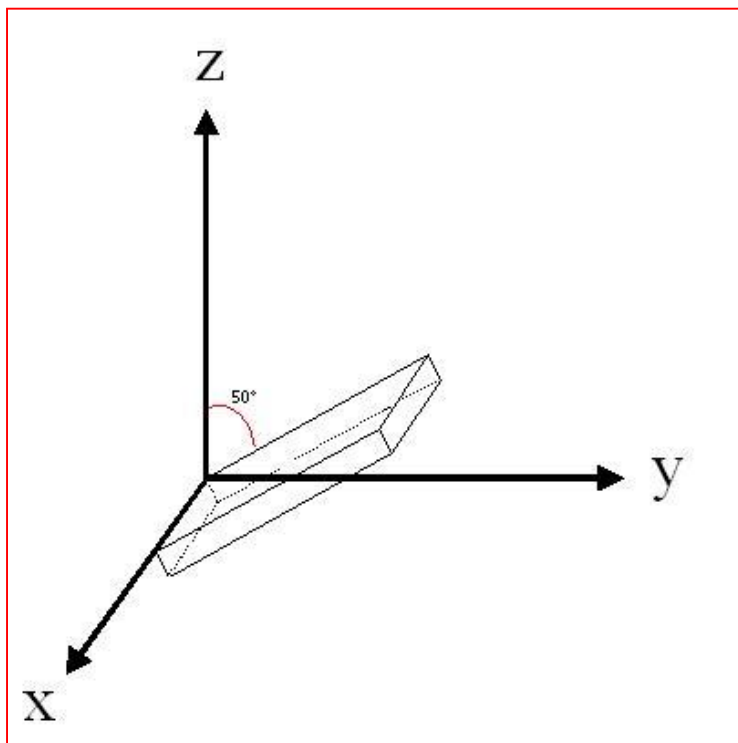
ZY-切割

ZY-cut

一次旋转切割

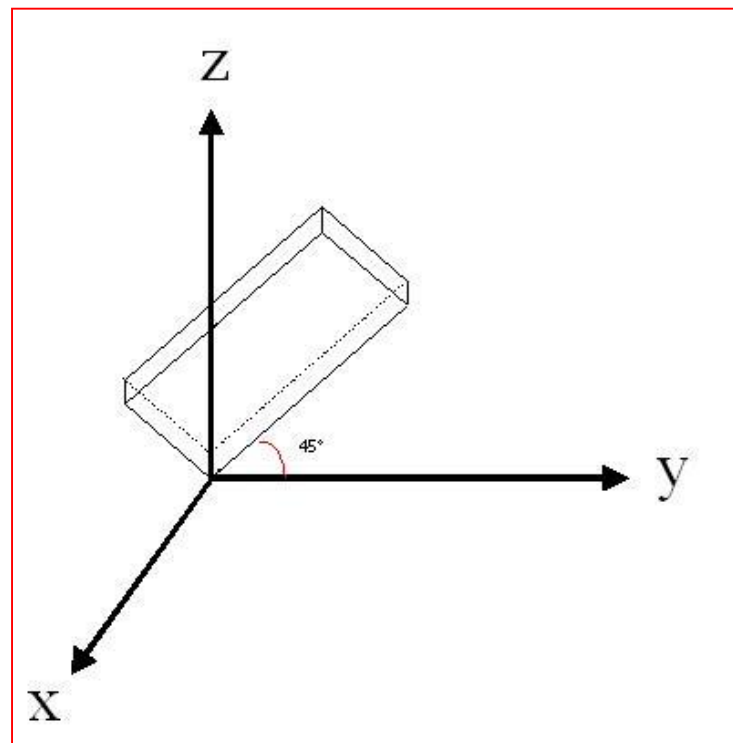
yzw-50°切割，表示厚度方向平行于y轴，长轴平行于z轴，并绕宽度沿顺时针方向旋转50°，即即第一个字母代表厚度方向，第二个字母代表长度方向，第三个字母代表转轴方向，-50°代表沿顺时针方向旋转50°。

xyt+45°切割，表示厚度方向平行于x轴，长轴平行于y轴，并绕厚度沿逆时针方向旋转45°，有时简称这种切割为45°x切割。



yzw-50°切割

yzw-50° cut

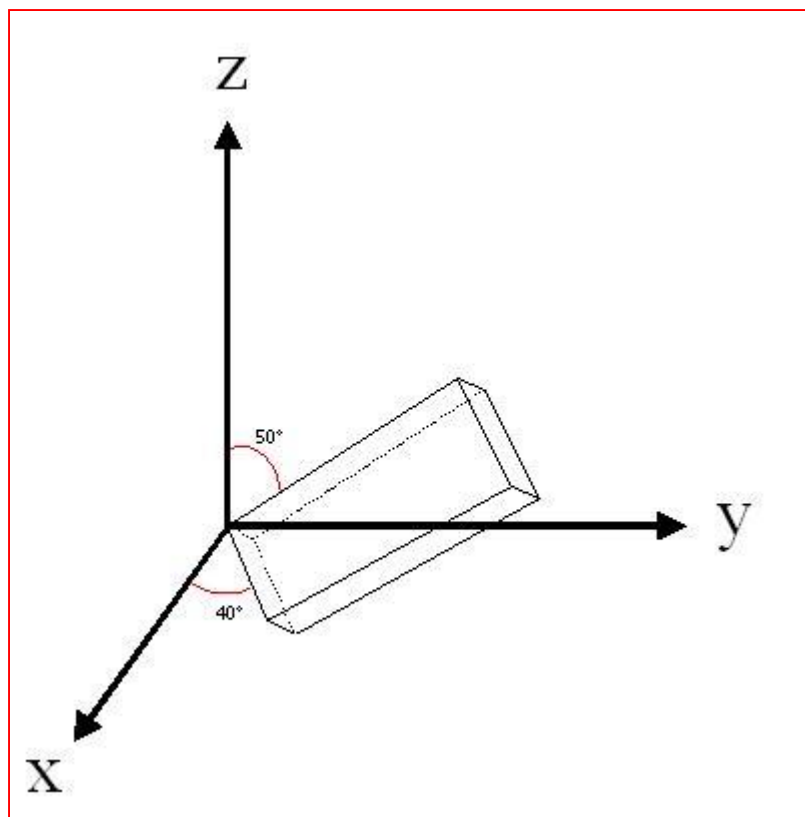


xyt+45°切割

xyt+45° cut

二次旋转切割

yzlt40°/50°切割，表示厚度方向平行于y轴，长轴平行于z轴，并绕长度沿逆时针方向旋转40°，再绕厚度沿逆时针方向旋转50°。



**xzlt+40°/50°c
ut**

压电方程

压电方程 $\mathbf{D} = \mathbf{d}\mathbf{T}$ $\mathbf{S} = \mathbf{d}_t\mathbf{E}$

反映压电体中电位移，电场强度，应力和应变张量之间关系。

\mathbf{d} 为压电系数矩阵， \mathbf{d}_t 为逆压电系数矩阵，

是描述压电效应的物理量。

压电特性表示法

$$q = d_{ij} \sigma_j$$

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

q_i : i 平面上产生的电荷密度 (C/m^2)

d_{ij} : j 方向的应力分量在 i 平面上产生电荷的压电常数 (C/N)

σ_j : j 方向的应力分量 (Pa)

压电式传感器

逆压电方程的压电常数矩阵是正压电方程压电常数矩阵的转置矩阵

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ -d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & -2d_{11} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

石英晶体的压电常数矩阵

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

$$(1) d_{11} \neq 0, d_{21} = d_{31} = 0$$

$$(2) -d_{11} = d_{12} \neq 0, d_{22} = d_{32} = 0$$

$$(3) d_{13} = d_{23} = d_{33} = 0$$

$$(4) d_{14} \neq 0, d_{24} = d_{34} = 0$$

$$(5) d_{15} = 0, d_{25} \neq 0, d_{35} = 0$$

$$(6) d_{16} = 0, d_{26} \neq 0, d_{36} = 0, \text{并且 } d_{25} = -d_{14}, d_{26} = -2d_{11}$$

石英晶体的压电常数矩阵

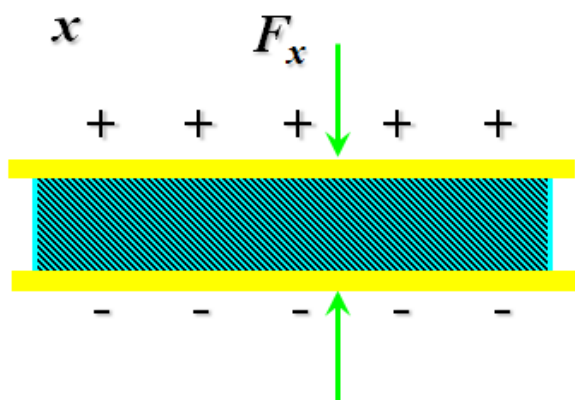
$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$d_{11} = \pm 2.31 \times 10^{-12} \text{ C/N}$$

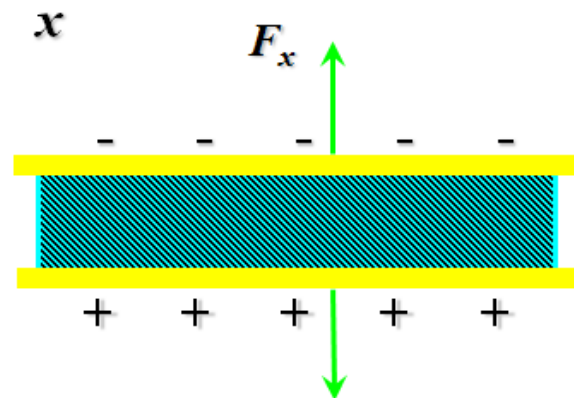
$$d_{14} = \pm 0.73 \times 10^{-12} \text{ C/N}$$

按IRE规定，左旋石英晶体的 d_{11} 和 d_{14} 在受拉时取“+”，受压时取“-”，右旋石英晶体的 d_{11} 和 d_{14} 在受拉时取“-”，受压时取“+”。

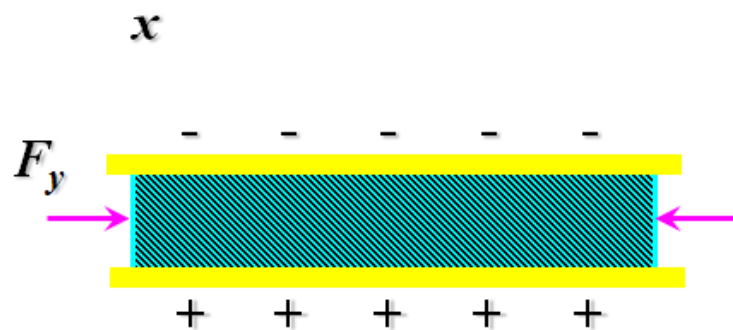
受力与电荷关系



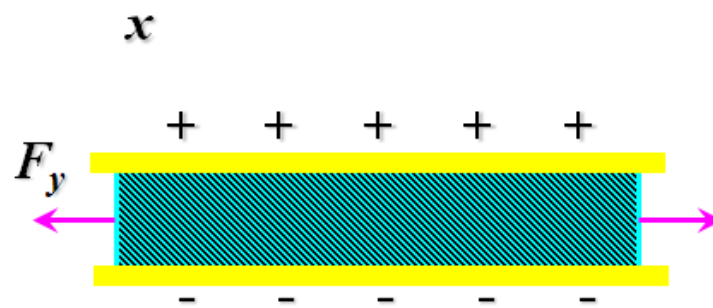
(a)



(b)



(c)



(d)

石英晶体受力方向与电荷极性关系

石英晶体的压电常数矩阵

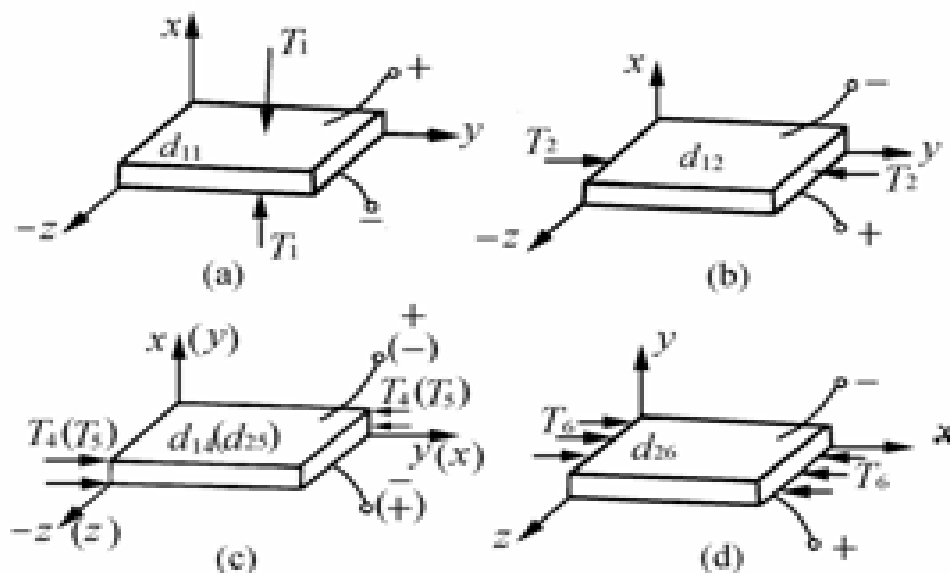
结论：

压电晶体的正压电效应和逆压电效应是对应存在的，哪个方向上有正压电效应，则在此方向上必定存在逆压电效应，而且力-电之间呈线性关系。

石英晶体不是在任何方向上都存在压电效应

石英晶体的压电常数矩阵

①x方向：只有 d_{11} 的纵向压电效应〔图(a)〕、 d_{12} 的横向压电效应〔图(b)〕和 d_{14} 的剪切压电效应〔图(c)〕。



②y方向：只有 d_{25} 和 d_{26} 的剪切压电效应〔图(c) (d)〕。

③z方向：无任何压电效应

压电陶瓷的压电特性

对于压电陶瓷，通常取它的极化方向为 z 轴，垂直于 z 轴的平面上任何直线都可作为 x 或 y 轴，在是和石英晶体的不同之处。当压电陶瓷在沿极化方向受力时，则在垂直于 z 轴的上、下两表面上将会出现电荷，其电荷量 q 与作用力 F 成正比，即

$$q = d_{33}F$$

式中： d_{33} ——压电陶瓷的压电系数；
 F ——作用力。

压电陶瓷的压电常数矩阵

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$d_{33} = 190 \times 10^{-12} \text{ C/N}$$

$$d_{31} = d_{32} = -78 \times 10^{-12} \text{ C/N}$$

$$d_{15} = d_{24} = 250 \times 10^{-12} \text{ C/N}$$

小结:

- 1) 在x和y方向上分别只有 d_{15} 和 d_{24} 的厚度剪切压电效应;
- 2) 在z方向存在有 d_{33} 的纵向压电效应, d_{31} 和 d_{32} 的横向压电效应;
- 3) 在z方向还可得到三向应力 T_1 、 T_2 、 T_3 同时作用下, 产生体积变形压电效应。

压电式传感器

主要内容

6.1

压电效应及材料

6.2

压电方程及压电常数矩阵

6.3

等效电路及测量电路

6.4

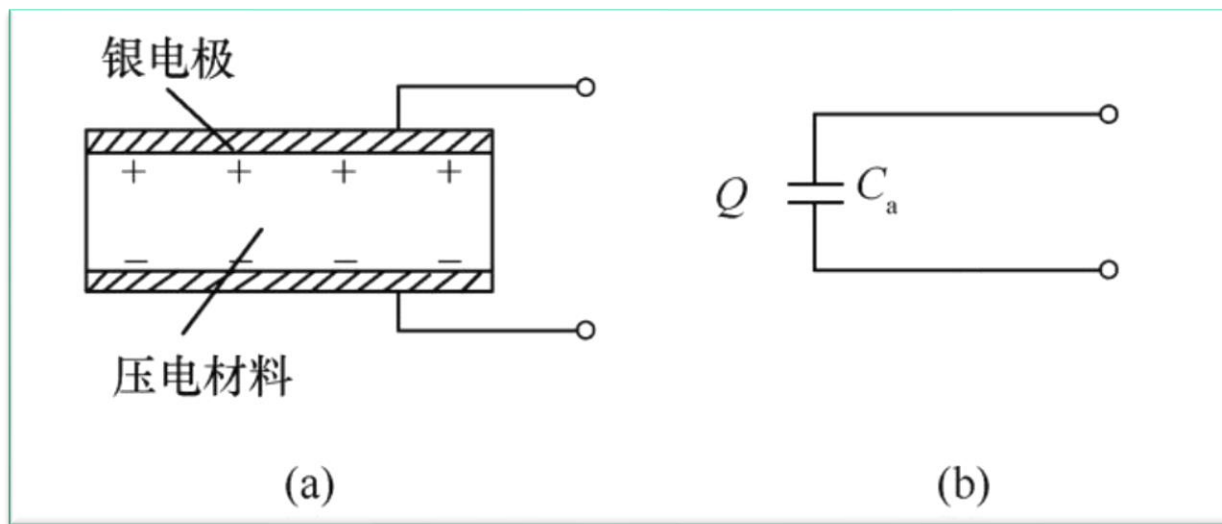
压电式传感器及其影响因素

6.3 等效电路及测量电路

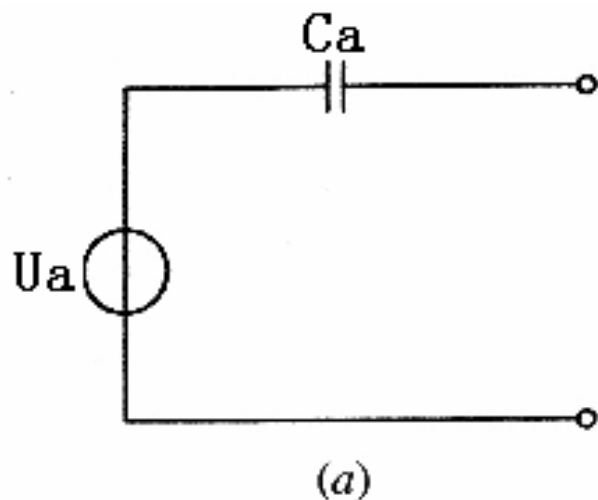
6.3.1. 等效电路

相对介电常数为 ε_r ，极化面积为 A ，厚度为 t 的压电片的两电极出现等量异号的电荷，中间为绝缘体，可视为一个自源电容器：

$$C_a = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{t}$$



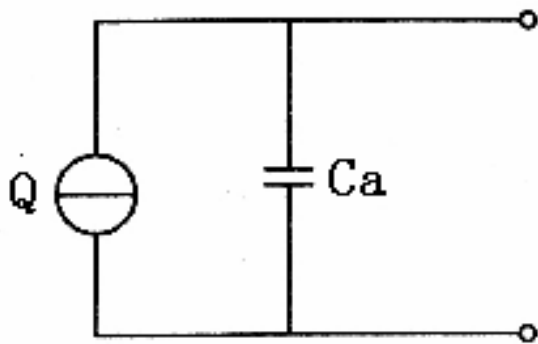
(a) 当需要压电器件输出电压时，可等效为与电容串联的电压源，开路状态输出电压及电压灵敏度为：



$$U_a = Q / C_a$$

$$K_u = U_a / F = Q / C_a F$$

(b)当需要压电器件输出电荷时，可等效为与电容并联的电荷源，开路状态输出电荷及电荷灵敏度为：



(b)

$$Q = C_a U_a$$

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

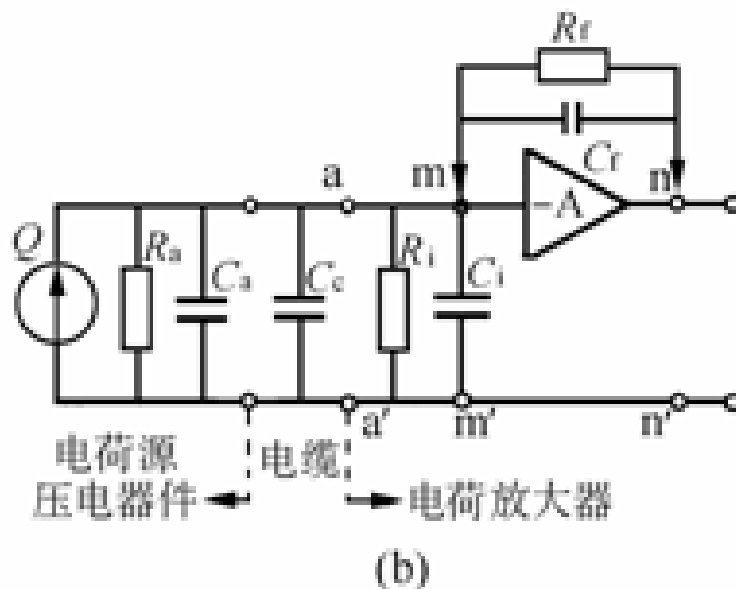
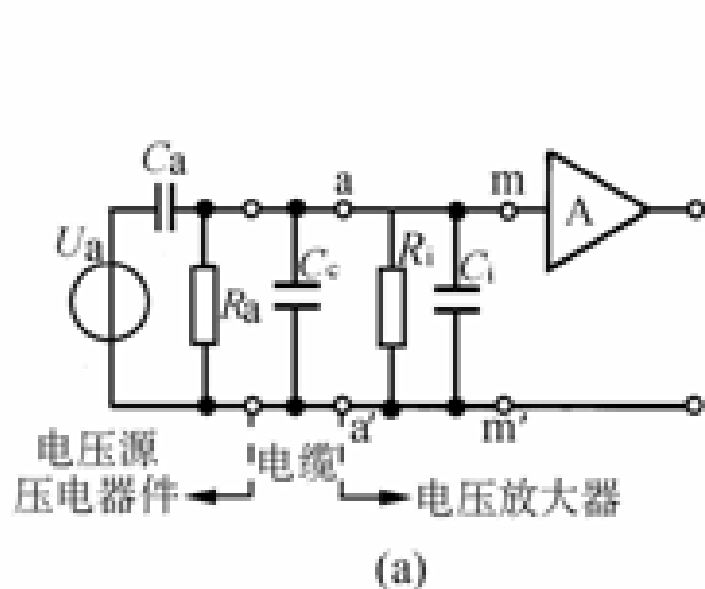
K_u与**K_q**之间存在如下关系：

$$K_u = \frac{K_q}{C_a}$$

以上为理想等效电路，只有在压电器件本身理想绝缘、无泄漏、输出端开路条件下成立。

实际等效电路

- 考虑连接电缆分布电容 C_c ，放大器输入电阻 R_i 和电容 C_i ，压电传感器泄露电阻 R_a 的影响。



压电传感器等效电路和测量电路
(a) 电压源； (b) 电荷源

6.3.2 测量电路

测量电路的主要作用：

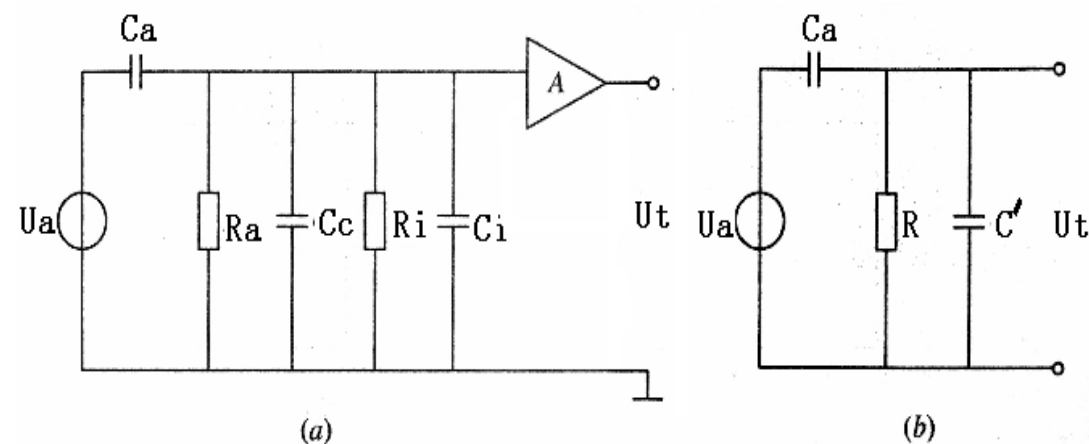
- 压电传感器内阻较高，输出能量较小，测量电路需要高输入阻抗前置放大器。
- 阻抗匹配：将高输出阻抗变换为低输出阻抗；
- 信号放大：放大传感器输出的微弱信号（电压、电荷）。

常用的测量电路形式：

- 前置放大器：电压放大器、电荷放大器

6.3.2.1 电压放大器（阻抗变换器）

1. 压电输出特性



电压放大器电路原理及其等效电路图

(a) 放大器电路；(b) 等效电路

$$R = R_a R_i / (R_a + R_i)$$

$$C' = C_c + C_i$$

$$Q = d_{33} F (\text{压电陶瓷})$$

$$\text{压力 } F = F_m \sin \omega t$$

压电器件的输出电压为：

$$U_a = Q / C_a = \frac{d_{33}}{C_a} F = \frac{d_{33}}{C_a} F \sin \omega t$$

回路输出电压: $\dot{U}_t = \dot{I} \cdot Z = \dot{I} \frac{R}{1 + j\omega RC'}$

$\therefore \dot{I} = \frac{\dot{U}_a}{Z + \frac{1}{j\omega C_a}}$

令: $C = C_c + C_i + C_a$, 故回路输出电压及灵敏度为:

$$\dot{U}_t = d_{33} \dot{F} \frac{j\omega R}{1 + j\omega RC}, \quad K_u = \frac{\dot{U}_t}{\dot{F}} = d_{33} \frac{j\omega R}{1 + j\omega RC}$$

灵敏度的幅值和相位为:

$$K_{um} = \left| \frac{U_t}{F} \right| = \frac{d_{33}\omega R}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}},$$

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

2. 动态特性

理想情况下： $R_a, R_i \rightarrow \infty$, $\omega R(C_a + C_c + C_i) \gg 1$ 时：

输出电压灵敏度：

$$K_{um}^* = \frac{d_{33}}{C_a + C_c + C_i} \Rightarrow K_{um}^* \text{与频率无关}$$

相对电压灵敏度：

$$k = \frac{K_{um}}{K_{um}^*} = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{\omega/\omega_1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_1)^2}} = \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

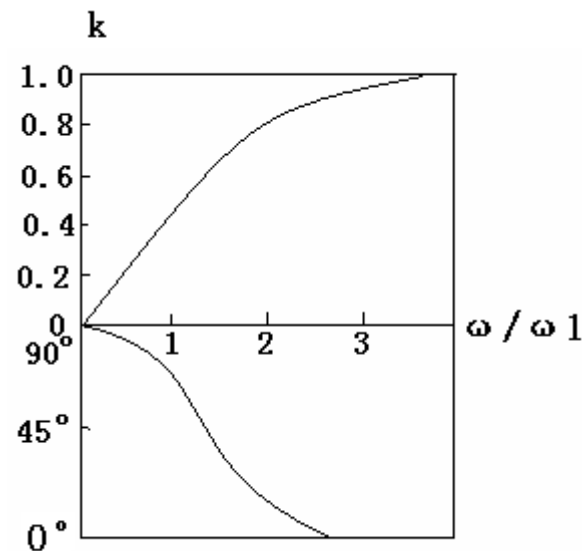
ω_1 —测量回路角频率

τ —测量电路时间常数 $\tau = RC$, $\omega_1 = 1/\tau$

通常, $\omega/\omega_1 \geq 3$ 时, 认为 K_{um}^* 与频率 ω 无关

从图中分析：

(1) 高频特性 当 $\omega \tau \gg 1$ 时，即当回路时间常数一定时，被测量频率越高，输出电压灵敏度越接近理想状态。表明器件高频响应特性好。



(2) 低频特性当 $\omega \tau \ll 1$ 时，即当回路时间常数一定时，被测量频率越低，输出电压灵敏度越偏离理想状态。动态误差 $\delta = (k-1) * 100\%$ 越大。相位角误差也大。为保证低频工作时满足一定的精度，必须增加时间常数 $\tau = RC$ 。**途径一：**增大 C ，但 K_{um} 将减小，不可取；**途径二：**增大 $R = R_a R_i / (R_a + R_i)$ ，即要求放大器的输入电阻 R_i 足够大。

设计和使用时应注意：

(1) 特性曲线显示了被测角频率 $\omega(=2\pi f)$ 、放大器输入电阻 R_i 和动态误差 δ 或相位角误差之间的关系。因此在设计和应用压电传感器时，可根据给定的精度 δ ，合理选择 R_i 和 f 。

(2) 由于采用电压放大器的压电传感器，其输出电压受电缆分布电容 C_c 的影响。压电传感器与前置放大器之间连接电缆不能随意更换，否则将偏离原标定的灵敏度，引入测量误差。

解决办法：将放大器放入传感器中。

电压放大器电路简单、成本低、工作可靠。但不能用于静态测量。

6.3.2.2 电荷放大器

1. 工作原理和输出特性

电荷放大器将压电器件高内阻的电荷源转换为传感器低内阻的电压源，以实现阻抗匹配，并使输出电压正比于输入电荷。且传感器的灵敏度不受电缆变化影响。

输入阻抗 $10^{10} \sim 10^{12}$ 欧，输出阻抗小于100欧。

优点：在一定条件下，传感器灵敏度与电缆长度无关。

电荷放大器实际是具有深度负反馈的高增益放大器，等效电路如下页图。

反馈电容 C_f 、高增益运算放大器A，开环增益足够大，运放输入端电流几乎为零，则推导得：

反馈电容 C_f 、高增益运算放大器A，开环增益足够大，运放输入端电流几乎为零，则推导得：

$$U_o = \frac{-AQ}{(1+A)C_f + C}$$

其中， $A = 10^4 \sim 10^8$ ，

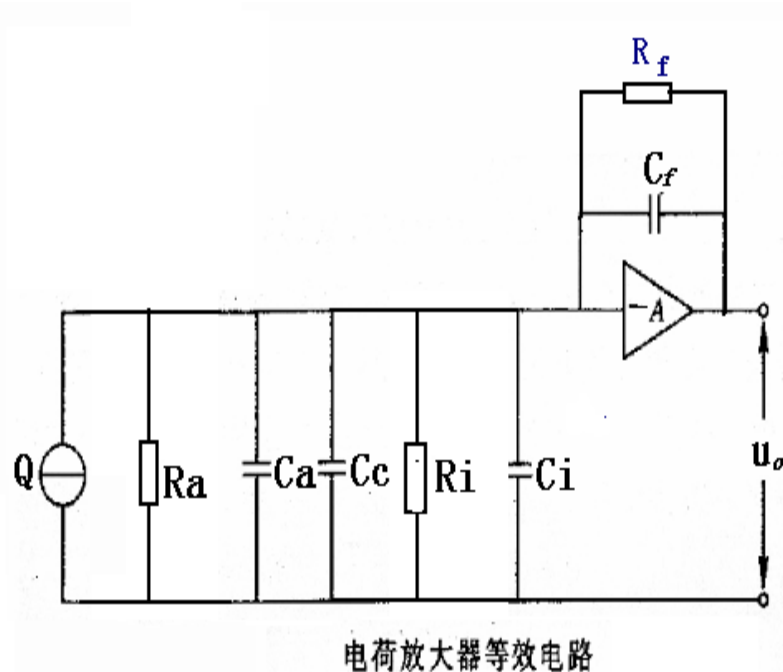
当 $(1+A)C_f \gg C (= C_a + C_c + C_i)$

则： $U_o \approx -\frac{Q}{C_f}$

一般取 $C_f = 100 \sim 10^4 \text{ pF}$

输出灵敏度： $K_u = -1/C_f$ 只与反馈电容有关

结论：电路线性好，电缆对性能无影响



2. 高低频限

高频上限:

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_c (C_a + C_c)}$$

由于 R_c 、 C_a 、 C_c 都很小，因此上限频率可高达 $180kHz$

低频下限:

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

运放的时间常数 $R_f C_f$ 可做得很大，

故低频下限可达 $10^{-1} \sim 10^{-4} Hz$ (准静态)

上图所示的四通道电荷放大器指标 (参考东

方振动和噪声技术研究所资料)

灵 敏 度: $0.1 \sim 1000 \text{mV/pC}$

频率范围: $0.3 \sim 100 \text{KHz}$

噪声(最大增益): 折合至输入端小于 $5 \mu\text{V}$

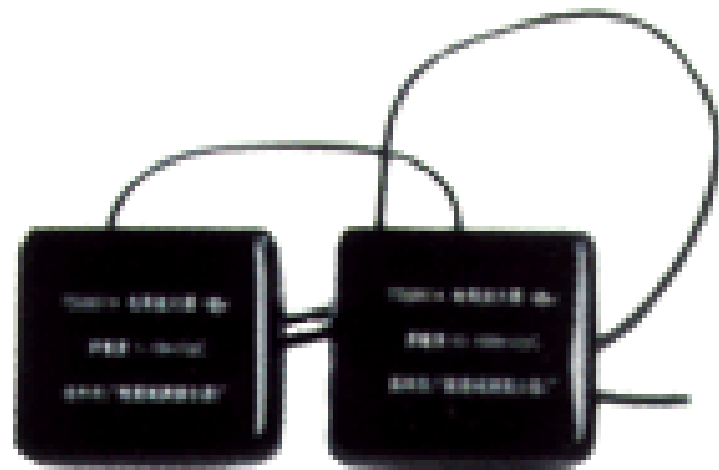
准 确 度: 1%

最大输出: $\pm 10 \text{V}/10 \text{mA}$

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

压电式传感器

主要内容

6.1

压电效应及材料

6.2

压电方程及压电常数矩阵

6.3

等效电路及测量电路

6.4

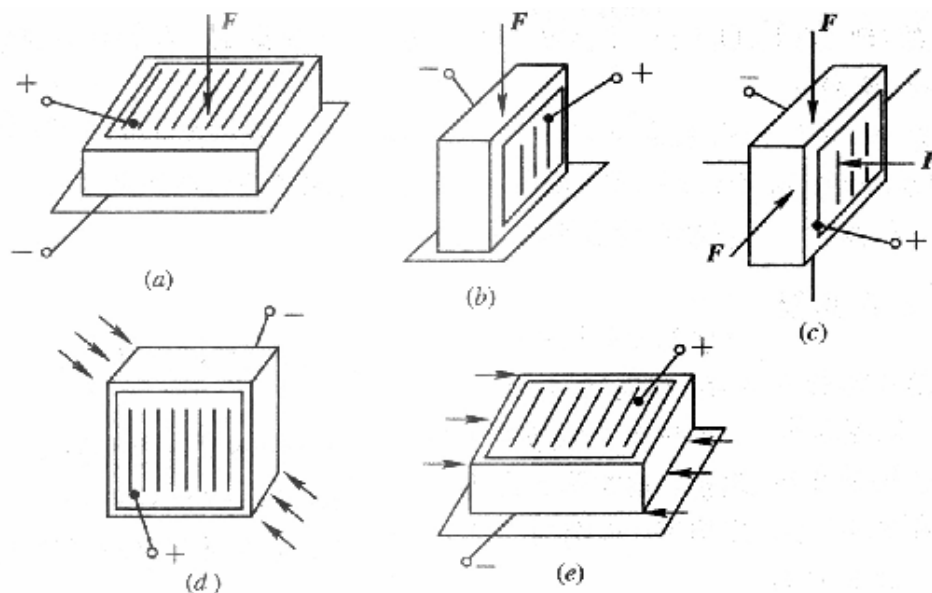
压电式传感器及其影响因素

6.4 压电式传感器及其应用

凡是利用压电材料的各种物理效应构成的传感器均称为压电传感器；

1. 力—电转换的变形方式(P148表6—5)

受力及变形
方式常用：
厚度变形的
压缩式、剪
切变形的剪
切式



压电元件变形方式

(a)厚度变形(TE); (b)长度变形(LE); (c)体积变形(VE); (d)面切变形(FS); (e)剪切变形(TS)

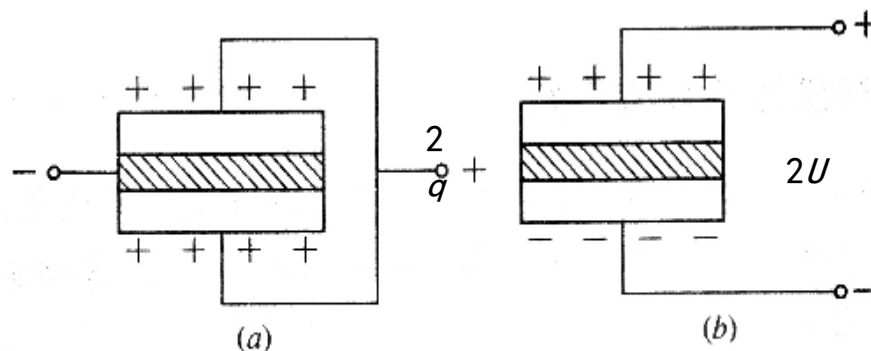
2. 压电元件的结构和组合形式

多片压电材料的连接

(a) 并联, U 不变, $2Q$

常用并联;

(b) 串联, Q 不变, $2U$



压电元件连接方式

(a) 相同极性端粘结; (b) 不同极性端粘结

压电传感器在压力较低时线性度不好, 因此加入预加力, 称**预载**, 消除非线性, 同时提高刚度。只有加预载才能测量拉力、交变力、剪力、扭矩。

表6—6 压电片串并联组合的特点

连接方式	特点	说明	备注
并联	电压相等 电容相加 电荷相加	传感器时间常数增大， 电荷灵敏度增大，适用于电荷输出、低频信号测量的场合	每两片晶层中间夹垫金属片作电极，引出导线
串联	电荷相等 电压相加 电容减小	传感器时间常数减小， 电压灵敏度增大，适用于电压输出、高频信号测量及回路高输入阻抗的场合	晶片之间用导电胶粘结，端面用金属垫片引出导线

压电式传感器应用特点

(1) 灵敏度和分辨率高，线性范围大，结构简单、牢固，可靠性好，寿命长；

(2) 体积小，重量轻，刚度、强度、承载能力和测量范围大，动态响应频带宽，动态误差小；

(3) 易于大量生产，便于选用，使用和校准方便，并适用于近测、遥测。

压电传感器的应用

一、高分子压电材料的应用

1. 玻璃打碎报警装置

将高分子压电测振薄膜粘贴在玻璃上，可以感受到玻璃破碎时会发出的振动，并将电压信号传送给集中报警系统。

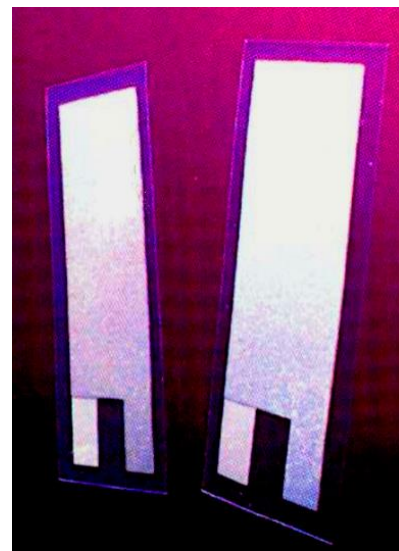


粘贴位置

高分子压电材料制作的玻璃打碎传感器

将厚约0.2mm左右的PVDF薄膜裁制成10×20mm大小。在它的正反两面各喷涂透明的二氧化锡导电电极，再用超声波焊接上两根柔软的电极引线。并用保护膜覆盖。

使用时，用瞬干胶将其粘贴在玻璃上。当玻璃遭暴力打碎的瞬间，压电薄膜感受到剧烈振动，表面产生电荷 Q ，在两个输出引脚之间产生窄脉冲报警信号。



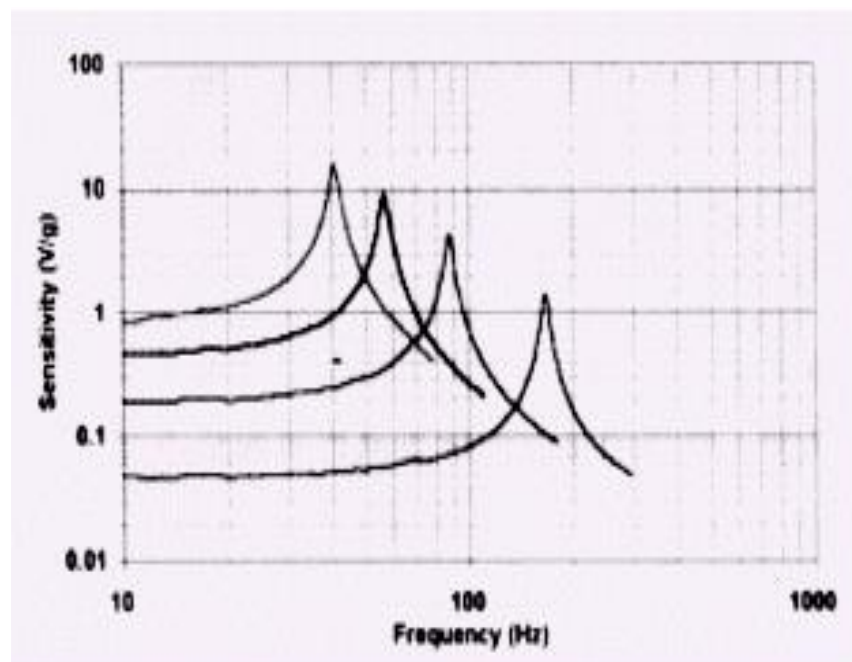
质量块



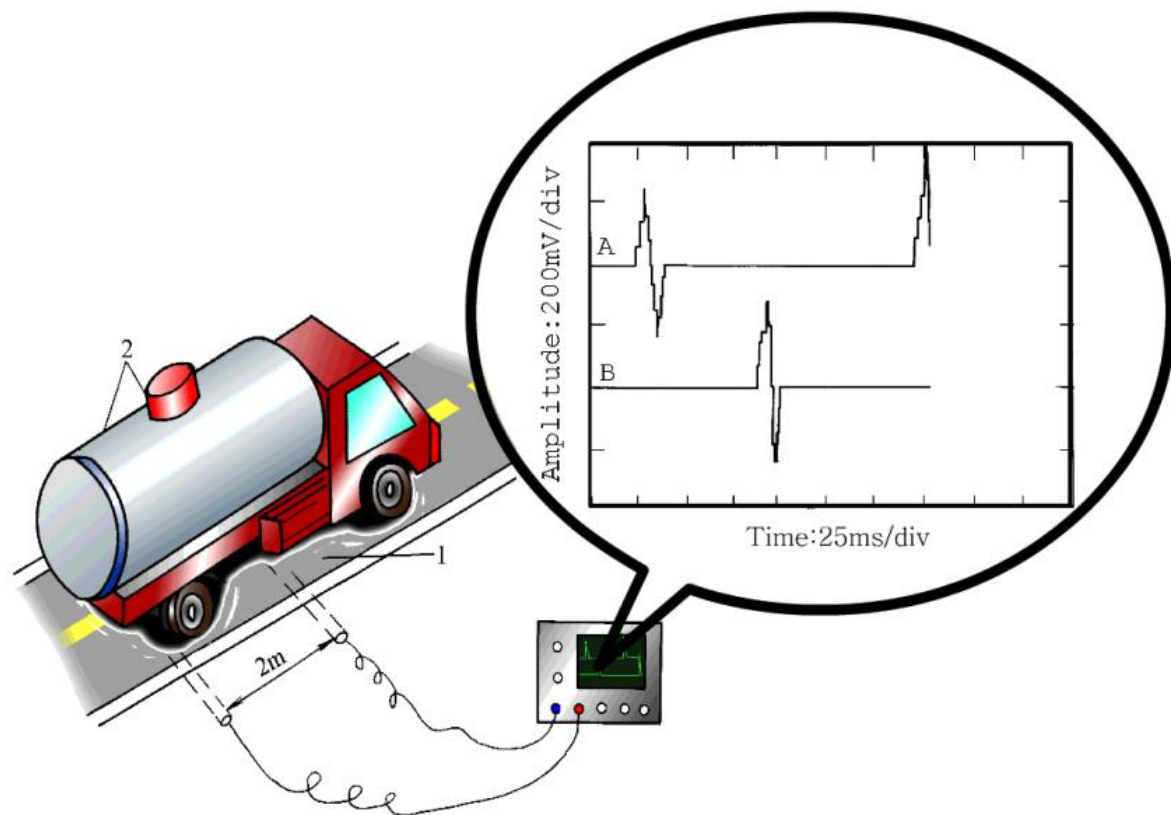
2. 压电式周界报警系统

（用于重要位置出入口、周界安全防护等）

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。

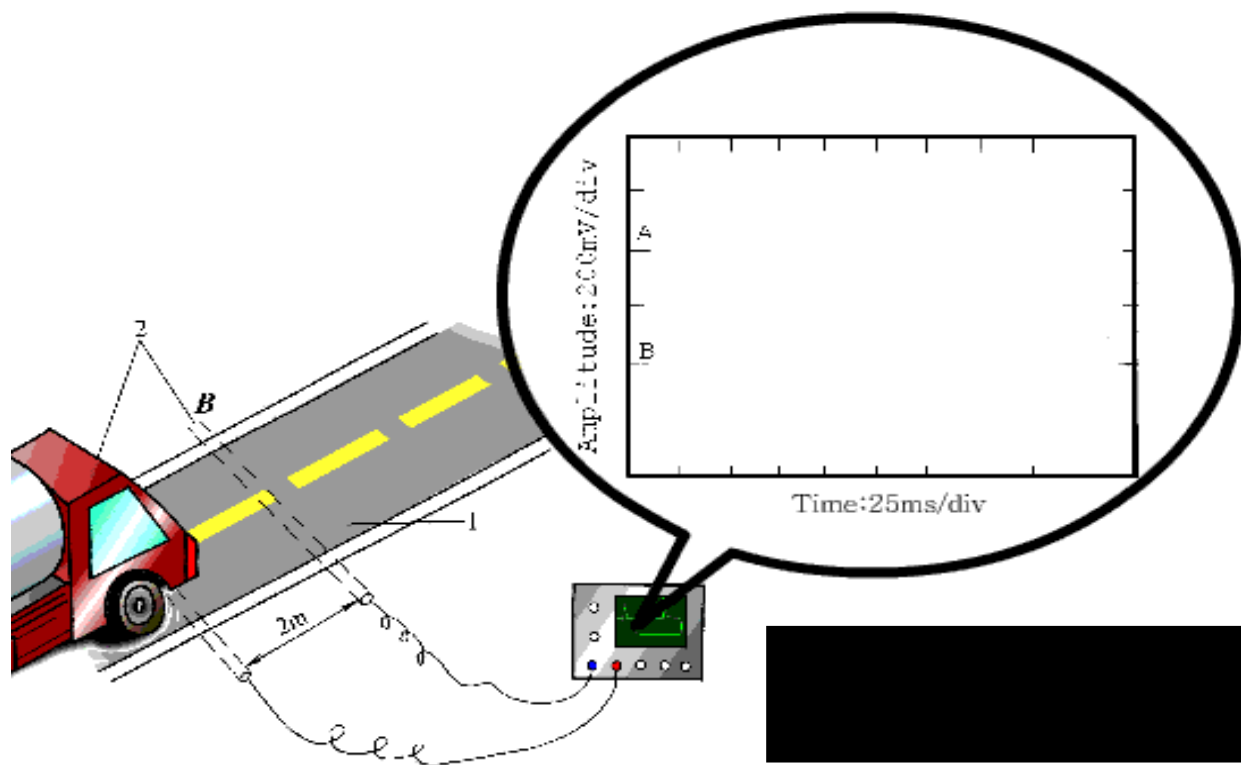


3. 交通监测



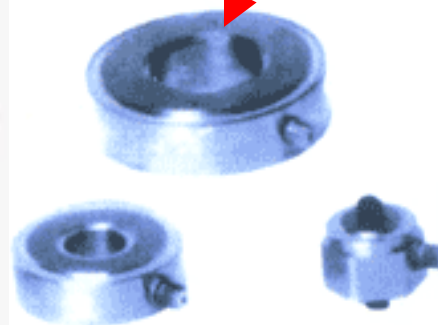
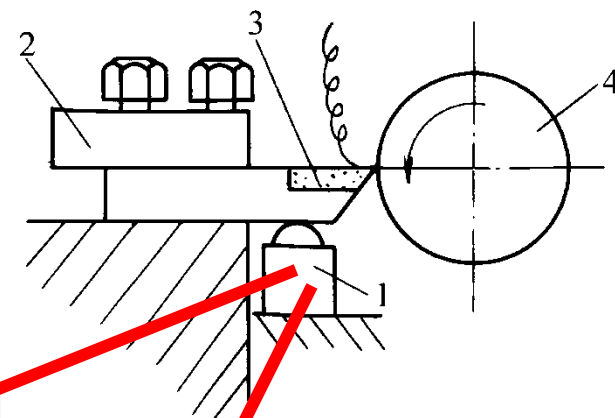
将高分子压电电缆埋在公路上，可以获取车型分类信息（包括轴数、轴距、轮距、单双轮胎）、车速监测、收费站地磅、闯红灯拍照、停车区域监控、交通数据信息采集（道路监控）及机场滑行道等。

高分子压电 电缆的应用 演示



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。

压电(陶瓷)式动态力传感器以及在 车床中用于动态切削力的测量



压电式动态力传感器在体育动态测量中的应用

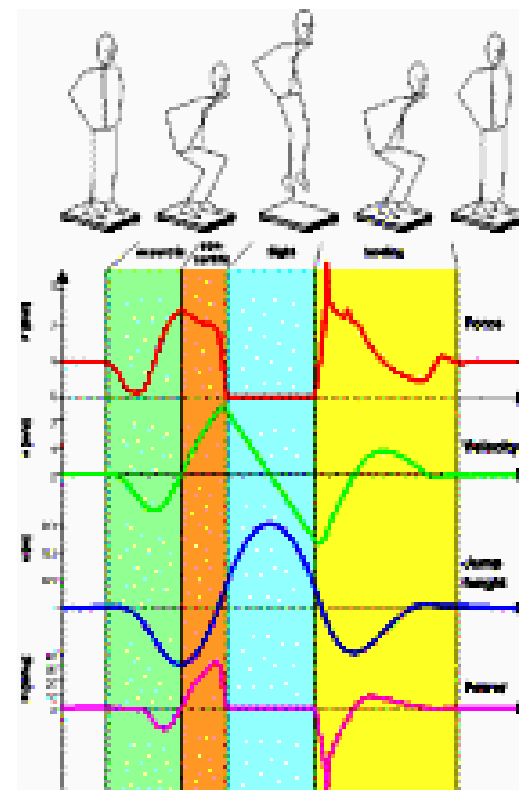


压电式步态
分析跑台

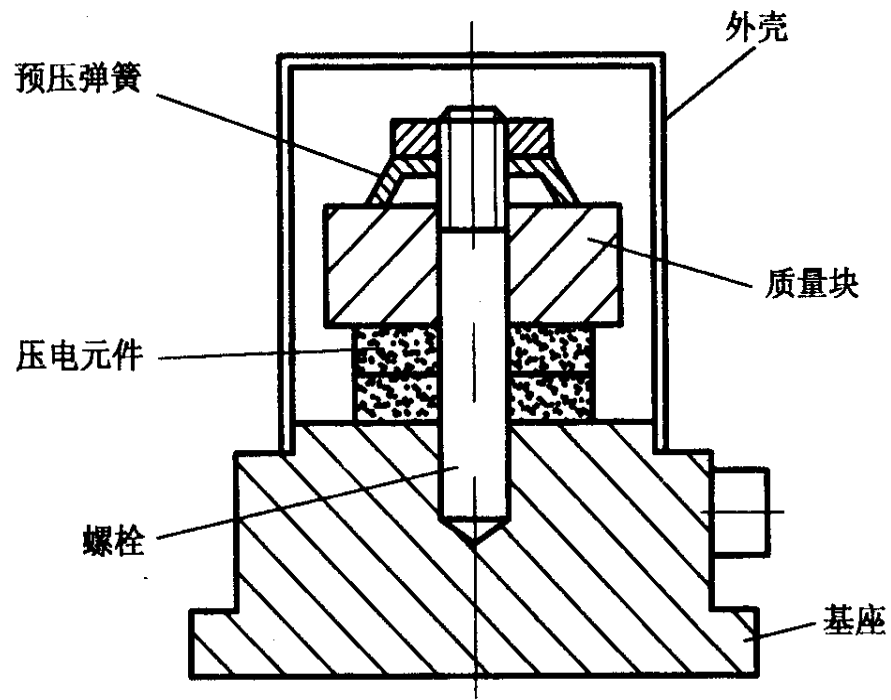


压电式纵跳
训练分析装置

压电传感器测量 双腿跳的动态力



压电式加速度传感器



- 当传感器感受振动时，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的作用。这样，质量块就有一正比于加速度的交变力作用在压电片上。由于压电片压电效应，两个表面上就产生交变电荷，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。
- 输出电量由传感器输出端引出，输入到前置放大器后就可以用普通的测量仪器测出试件的加速度，如在放大器中加进适当的积分电路，就可以测出试件的振动速度或位移。



频率范围：1-10000Hz
($\pm 10\%$),通用测振



频率范围：0.1-4000Hz
($\pm 10\%$),三向测振



频率范围：0.1-2000Hz
($\pm 10\%$),低频,小g测振



大振动、
冲击测量



频率范围：0.2-7000Hz ($\pm 10\%$)

频率范围：1-10000Hz ($\pm 10\%$) 高温、长期振动监测

测量压力



它具有结构简单、体积小、重量轻、使用寿命长等优异的特点。可以用来测量发动机内部燃烧压力的测量与真空度的测量。也可以用于军事工业，例如用它来测量枪炮子弹在膛中击发的一瞬间的膛压的变化和炮口的冲击波压力。它既可以用来测量大的压力，也可以用来测量微小的压力。

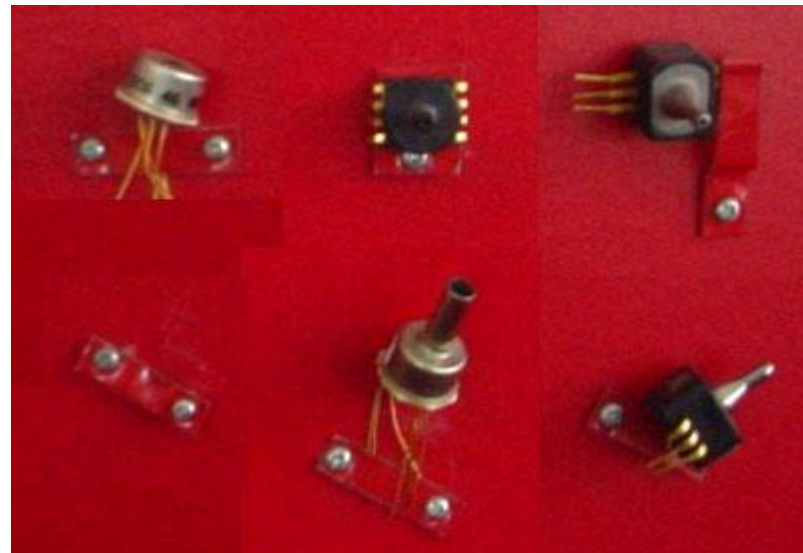
压力式力传感器和测力锤



它利用石英晶体的纵向压电效应，将“力”转换成“电荷”并通过二次仪表转换成电压，具有气密性好、硬度高、刚度大、动态响应快等优点。可以测量动态力、准静态力和冲击力。



这种压力变送器主要利用液体或气体在检测器件上形成的压力来检测液体或者气体的流量或压强。把这种压力信号转变成标准的0-10V或者4-20mA电信号。以便控制使用。



压力变送器部件

图中所示的元件就是各种压力传感器的核心部件，压力和电信号的转化主要由它们完成。这种元件主要由压力检测体和放大电路组成。

应用举例

压电薄膜传感器及其在心脏监测中的应用

PVDF压电薄膜是一种新型的高分子压电材料，在医用传感器中应用很普遍。它既具有压电性又有薄膜柔软的机械性能，用它制作压力传感器，具有设计精巧、使用方便、灵敏度高、频带宽、与人体接触安全舒适，能紧贴体壁，以及声阻抗与人体组织声阻抗十分接近等一系列特点，可用于脉搏心音等人体信号的检测。脉搏心音信号携带有人体重要的生理参数信息，通过对该信号的有效处理，可准确得到波形、心率次数等可为医生提供可靠的诊断依据。

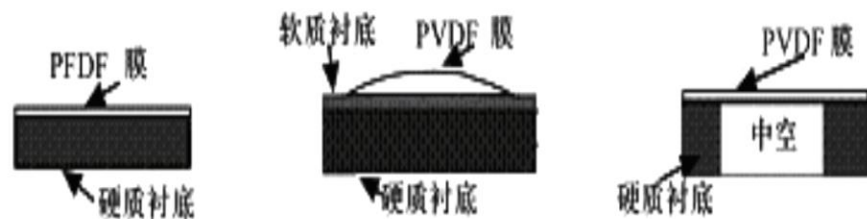


图1 压电薄膜传感器的不同结构

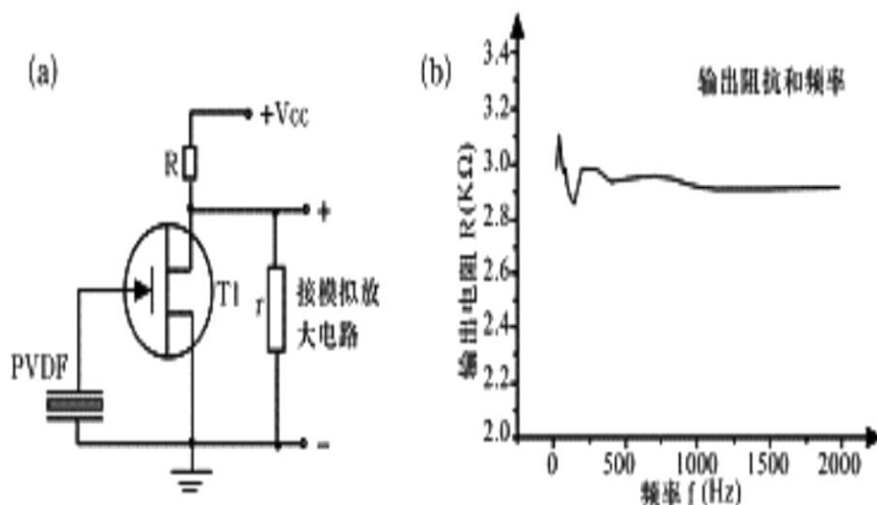


图2 传感器的阻抗变换器和阻抗曲线

压电薄膜传感器的设计主要考虑了传感器的灵敏度和信噪比，根据测量信号的频率和响应幅度，设计薄膜传感器的结构有如同图1所示的几种。在采集人体心音的信号时，由于心音的频响范围较宽，同时其输出的物理信号值也很微弱，采用硬质衬底和中空的设计。这样可以提高传感器中薄膜在收到心音信号时的形变量，从而提高信号强度。这样结构设计的缺点是结构不牢固，使用时间长了需要校正。

PVDF压电薄膜的压电常数一般为 $D_{33}=15 \times 10^{-12} \text{C/N}$ ， g 值比较

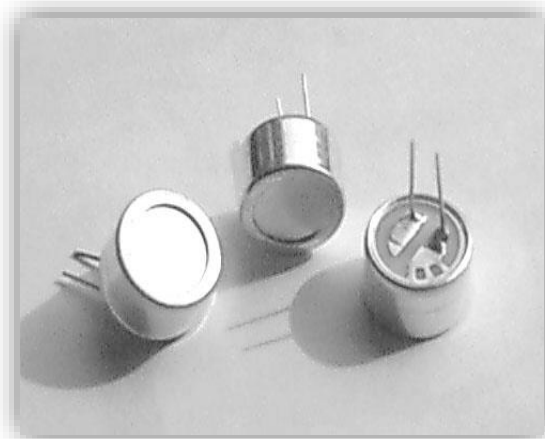
高，但是具有很高的内阻抗，一般高达 $10^{12} \Omega$ ，制作出的传感器的输出阻抗较大，不利于后面的信号采集和放大。为防止信号的衰减，我们采用高输出阻抗的场效应管作为阻抗变换器，即为测量系统的前置电路。我们利用结型场效应管的高输入阻抗的特点，根据其静态工作点设计阻抗变换器，如图2(a)所示，传感器获得的人体信号经过阻抗变换器后，得到可靠的低阻抗的输出信号。其输出阻抗如图2(b)图所示。可以看出，在信号频率变化的情况下，传感器的输出阻抗基本保持不变。

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：

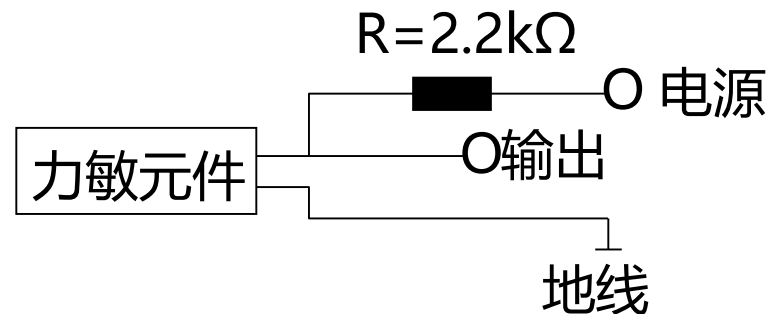
- 脉搏计数探测
- 按键键盘，触摸键盘
- 振动、冲击、碰撞报警
- 振动加速度测量
- 管道压力波动
- 其它机电转换、动态力检测等



脉搏计照片

力敏元件主要性能指标:

压力范围	$\leq 1\text{kPa}$
灵敏度	$\geq 0.2\text{mV/Pa}$
非线性度	$\leq 1\% \text{ F.S}$
频率响应	$1 \sim 1000\text{Hz}$
标准工作电压	4.5V (DC)
扩充工作电压	$3 \sim 15\text{V(DC)}$
标准负载电阻	$2.2\text{k}\Omega$
扩充电阻	$1\text{k}\Omega \sim 12\text{k}\Omega$
外形尺寸	$\phi 12.7 \times 7.6$
重 量	$< 1.5\text{g}$



集成压电传感器连线电路

6.5 影响压电传感器工作性能的主要因素

6.5.1 横向灵敏度

6.5.2 环境温度和湿度

6.5.3 安装差异及基座应变

6.5.4 噪声

本章结束

课后习题：6-1、6-3、6-6、
6-10、6-11