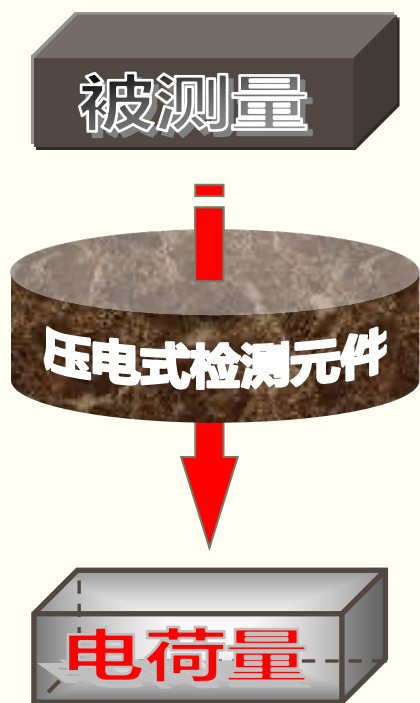


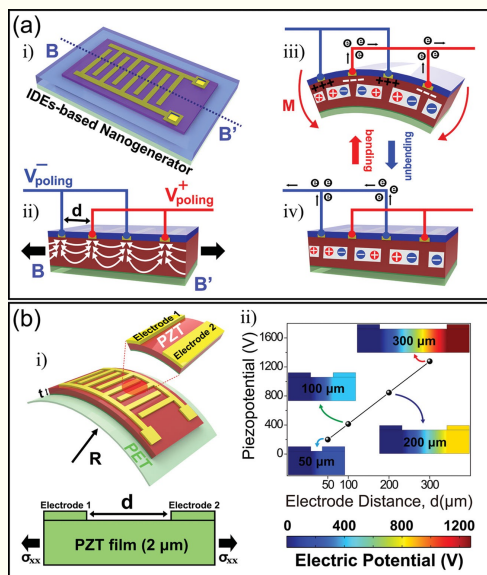


2.6 压电式检测元件

定义

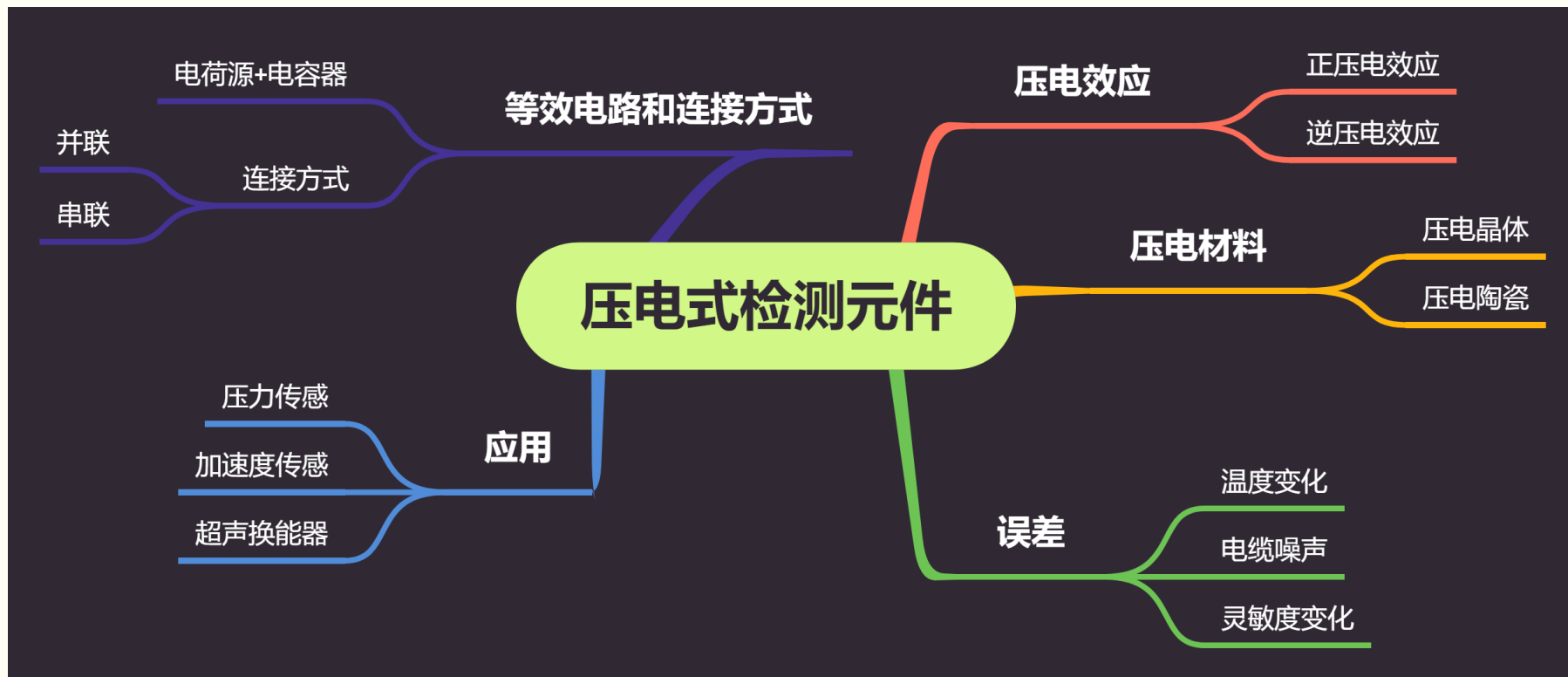


利用压电材料作为敏感元件，以其受外力的作用时在材料表面产生电荷的压电效应为基础实现参数测量



- 力、压力
- 扭矩
- 加速度

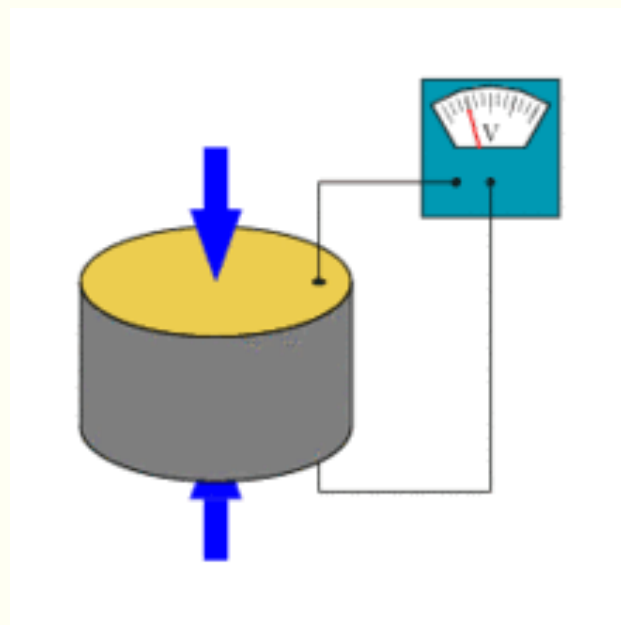
知识要点



1、压电效应

某些电介质在沿一定方向受外力（压力或拉力）作用时，其内部会产生极化现象，同时在它的两个相对表面上出现正负相反的电荷。

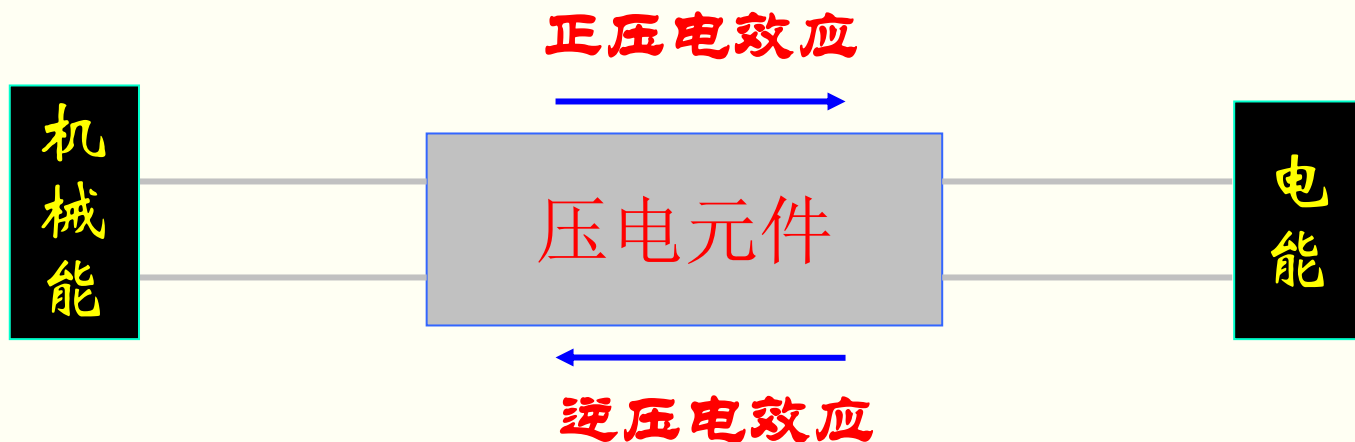
- 作用力去掉后，恢复到不带电的状态；动态力变为静态力时，电荷将由于表面漏电而很快泄漏、消失
- 作用力的方向改变时，电荷的极性也随之改变；输出电压的频率与动态力的频率相同
- 作用力越大，则机械变形越大，所产生的电荷量越多



正压电效应

逆压电效应

压电效应是可逆的，当在电介质的极化方向上施加电场，这些电介质也会发生变形，电场去掉后，电介质的变形随之消失，这种现象称为**逆压电效应**，或称为**电致伸缩现象**。



2、压电材料

压电晶体 ➡ 石英晶体

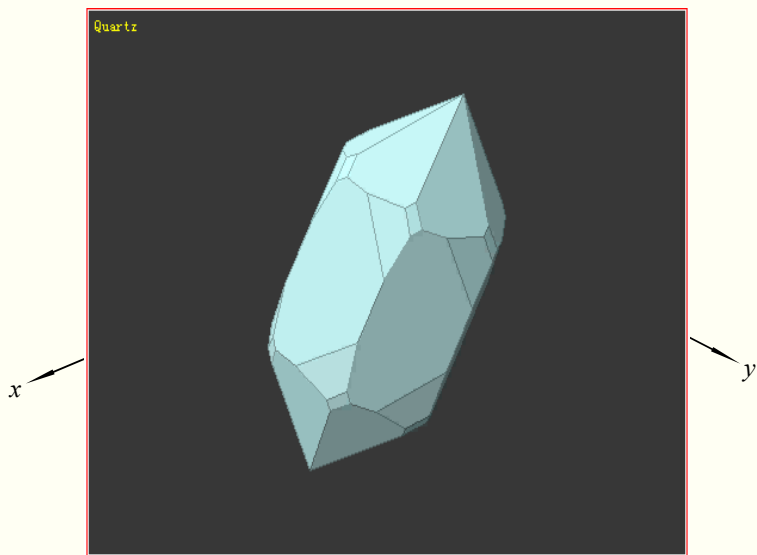
压电陶瓷 { 钛酸钡
 { 锆钛酸铅系 **PZT**

高分子材料 ➡ 聚偏氟乙烯

其他压电材料

1) 石英晶体 (SiO_2)

- **石英晶体** 俗称 **水晶**，有天然和人工之分。目前传感器中使用的均是以居里点为 573°C ，晶体的结构为六角晶系的 α -石英，呈六角棱柱体。

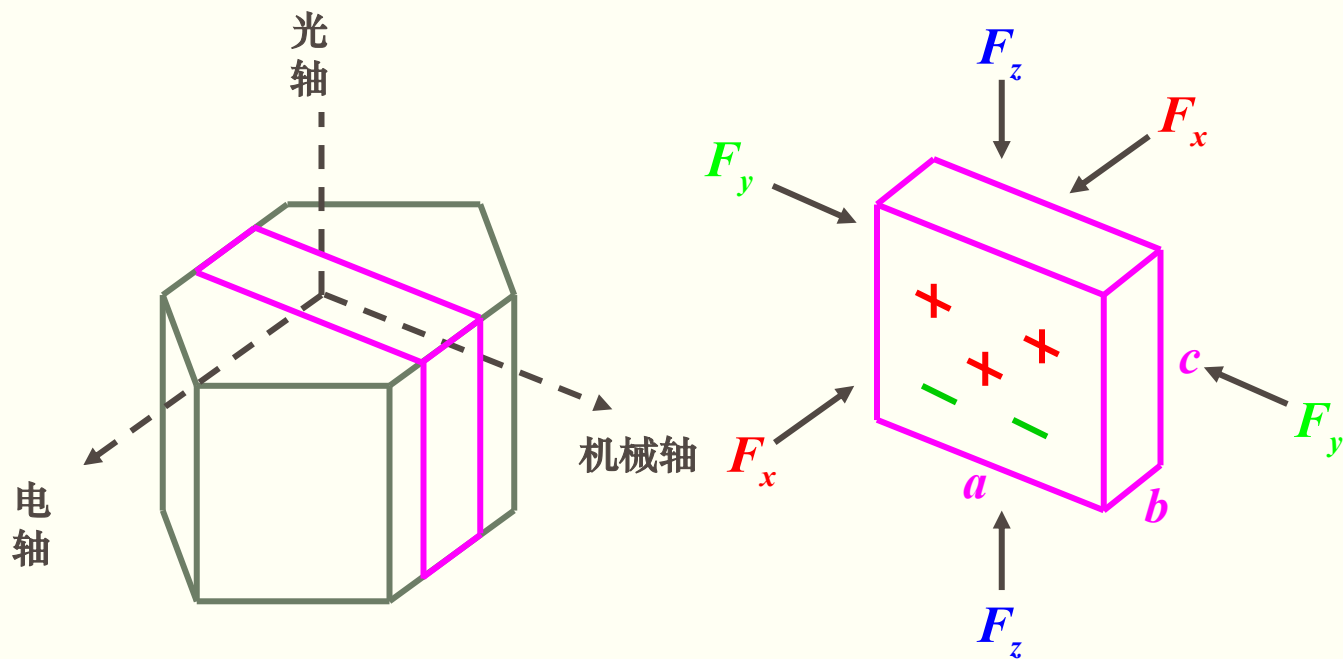


z 轴：通过上下晶锥顶点，称为**光轴**

x 轴：通过六面体相对的两个棱线并垂直于光轴，称为**电轴**

y 轴：与 x 和 z 轴都垂直，称为**机械轴**

受力方向与电荷



$$Q_x = d_{11} F_x$$

纵向压电效应

$$Q_y = -d_{11} F_x$$

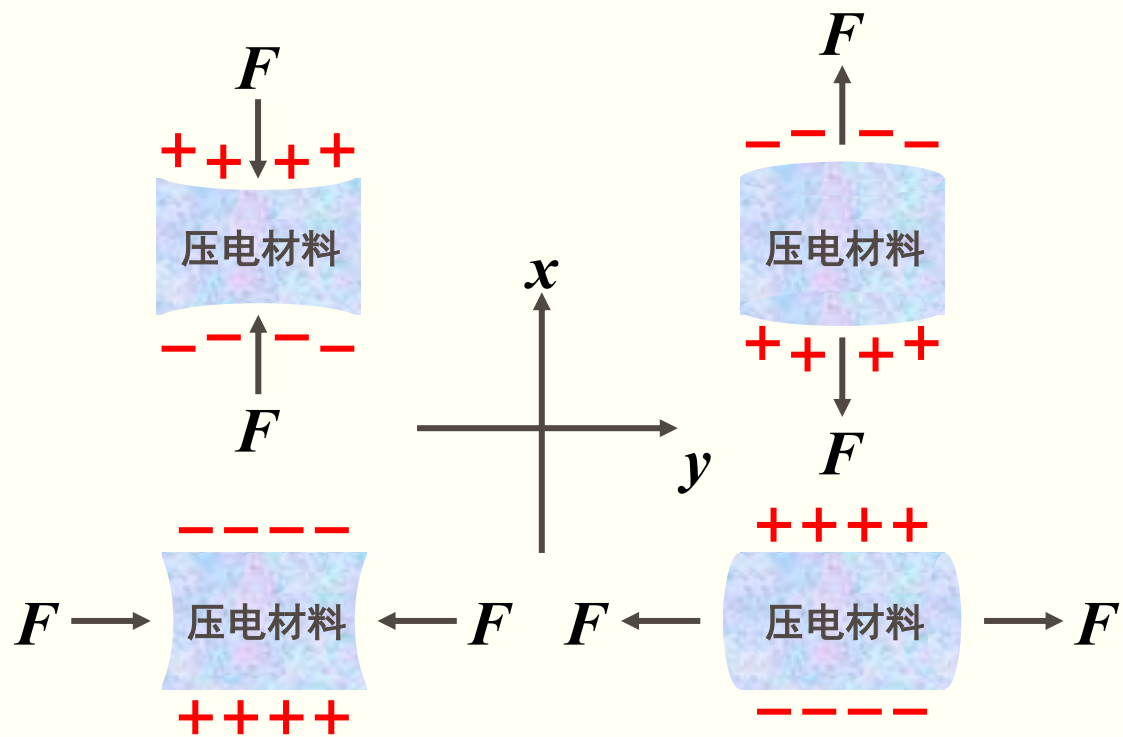
横向压电效应

压电系数

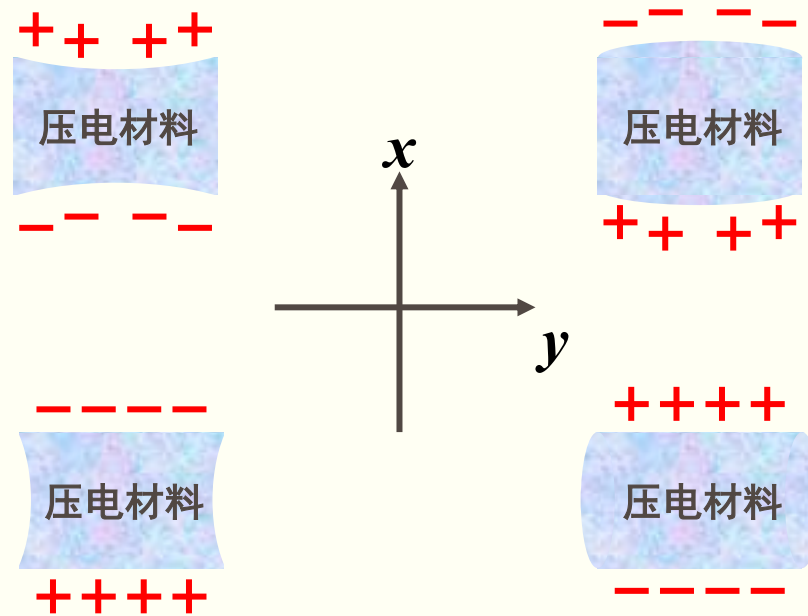
$$Q_z = 0$$

无压电效应

压电效应

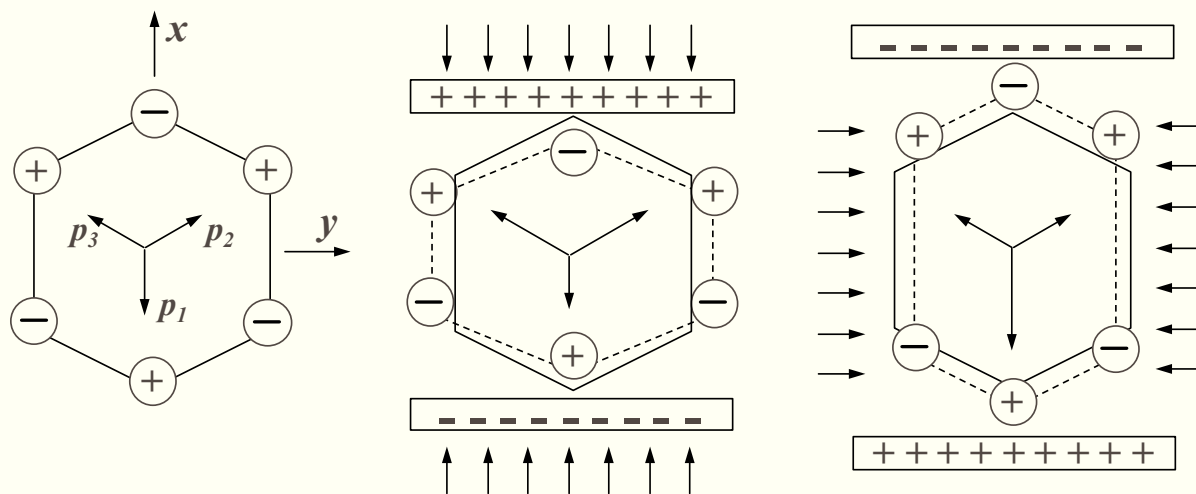


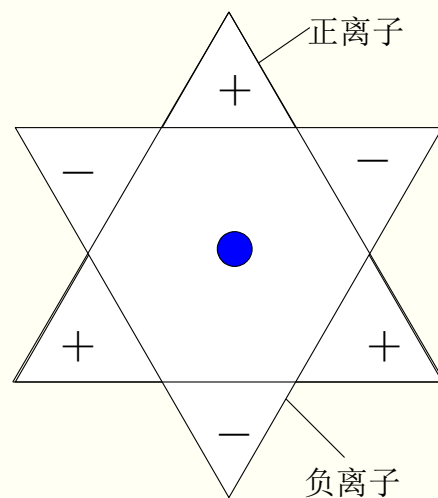
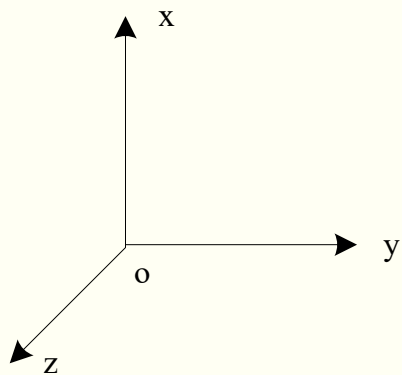
逆压电效应



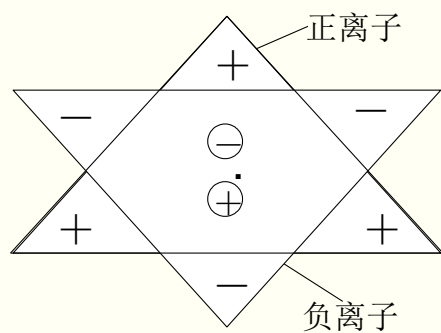
压电效应机理

- 在每个晶格单元中，硅离子 Si^{4+} 和氧离子 O^{2-} 在 x - y 平面上的投影，等效为一个正六边形排列。
- 当石英晶体未受外力作用时，正、负离子正好分布在正六边形的顶角上，每两个相对顶点上的电荷形成一个电偶极矩 P_1 、 P_2 、 P_3 ，夹角为 120° ，它们的矢量和为零。

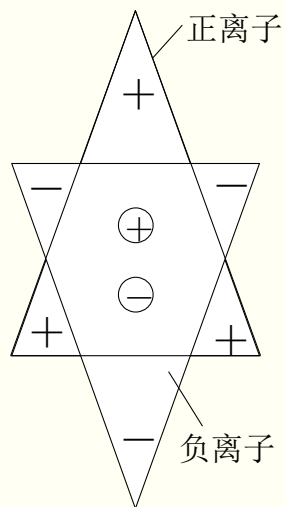




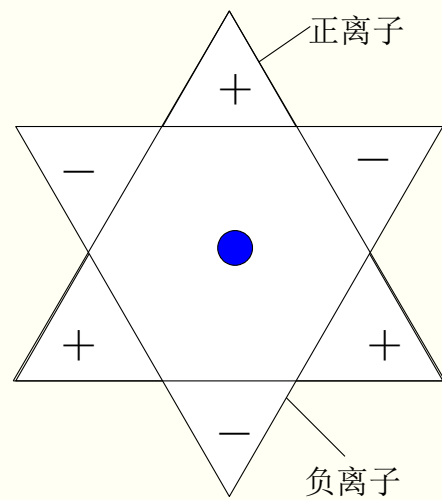
(a)未受力作用



(b)x方向受压力或y方向受拉力作用



(c)y方向受压力或x方向受拉力作用



(d)z方向受压力或拉力作用

压电石英特性

- **压电常数小。**其时间和温度稳定性极好，常温下几乎不变，在 $20 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 范围内其温度变化率仅为 $-0.016\%/^{\circ}\text{C}$ ；
- **机械强度和品质因素高。**许用应力高达 $(6.8 \sim 9.8) \times 10^7 \text{Pa}$ ，且刚度大，固有频率高，动态特性好；
- **居里点 573°C ，无热释电性**，且绝缘性、重复性均好。

天然石英的上述性能尤佳。因此，它们常用于**精度和稳定性要求高**的场合和制作标准传感器。

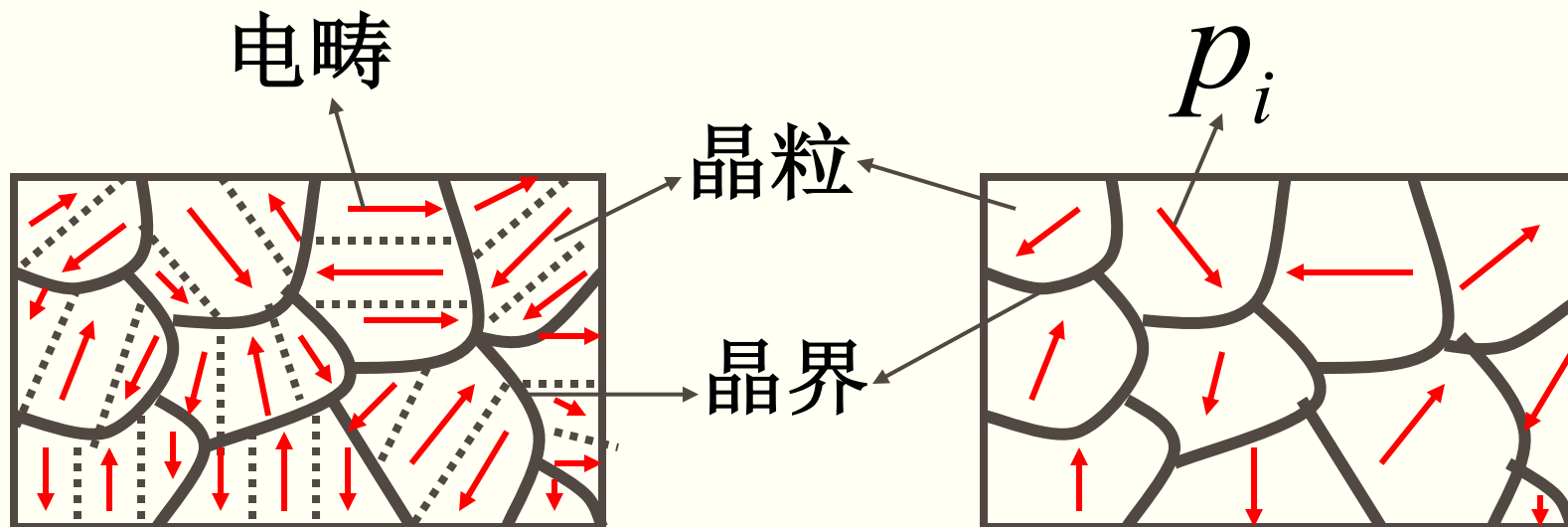
2) 压电陶瓷

钛酸钡 (BaTiO_3)

锆钛酸铅系 PZT (PbZrO_3 PbTiO_3)

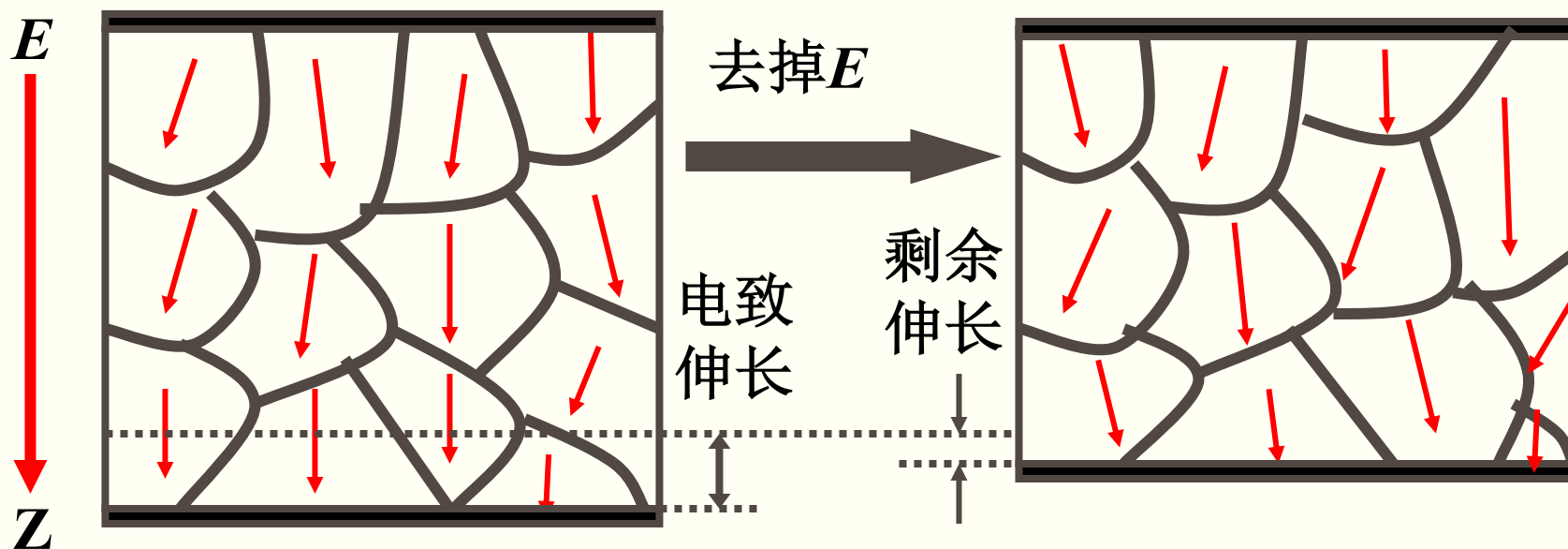
人工制造的多晶体压电材料。

具有与铁磁材料磁畴结构类似的电畴结构



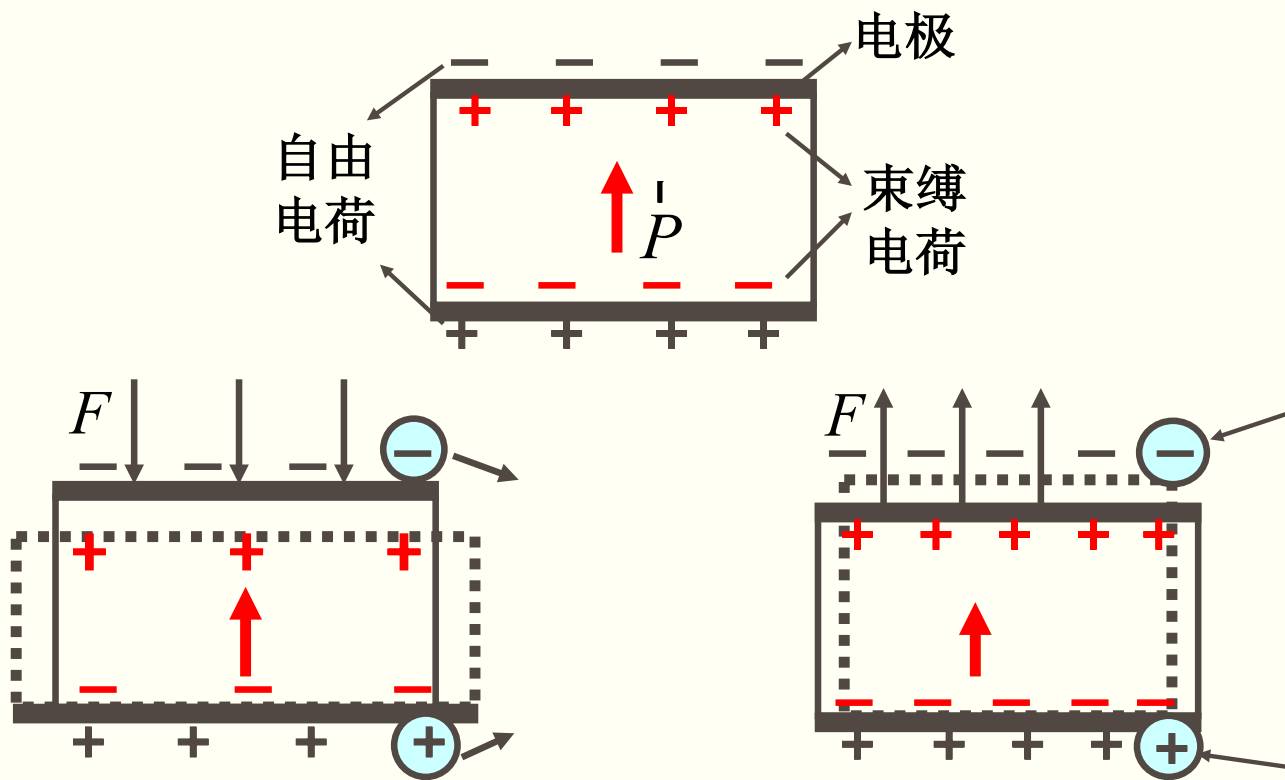
$$\sum \dot{p}_i = 0$$

压电陶瓷的极化



$$\sum p_{iz} \neq 0$$

压电陶瓷受到力的作用



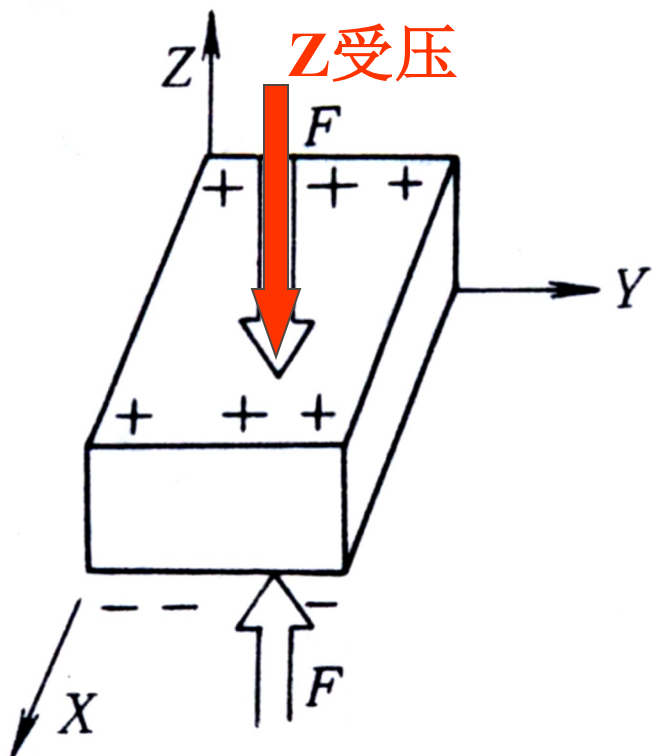
极化强度变小，释放自由电荷

放电现象

极化强度变大，吸附自由电荷

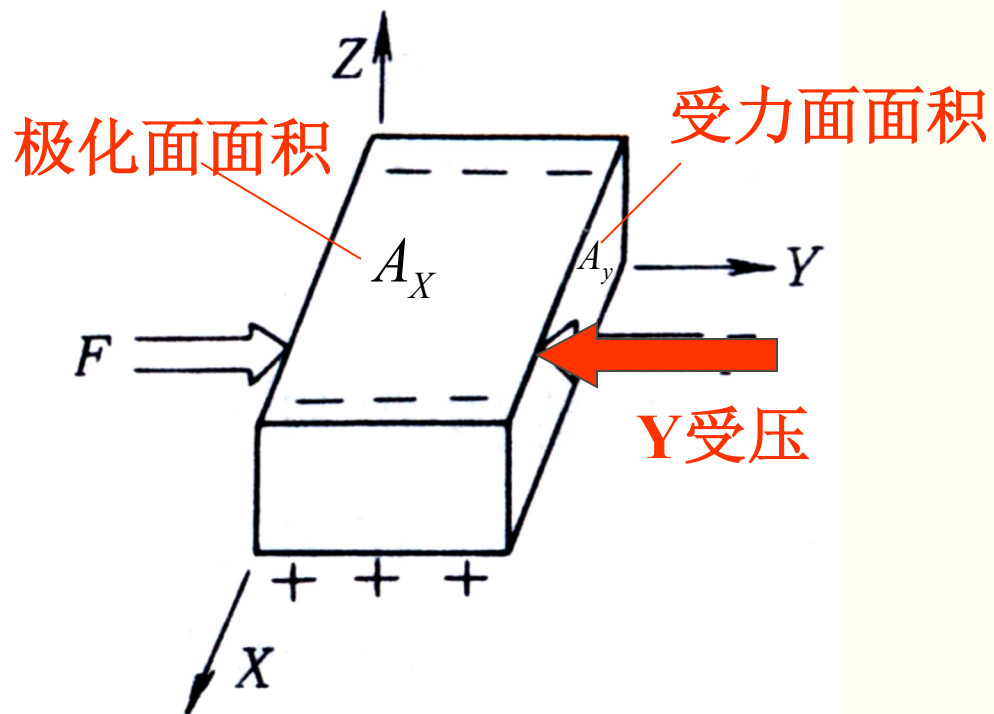
充电现象

取压电材料的极化方向为Z轴



电荷计算: $q = d_{zz} F$

d_{zz} 为纵向压电系数。



电荷计算: $q = -d_{zy} F \frac{A_X}{A_Y}$

且: $(d_{zy} = d_{zx})$

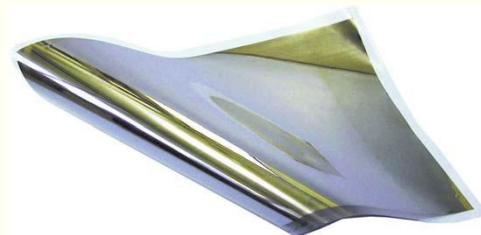
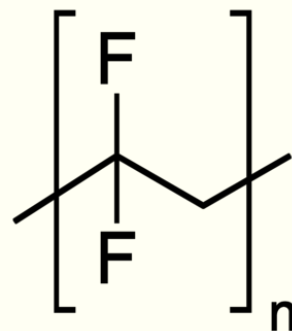
几种常见压电材料的性能参数

性能 \ 压电材料	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)	$d_{11} = 2.31$ $d_{14} = 0.73$	$d_{15} = 260$ $d_{31} = -78$ $d_{33} = 190$	$d_{15} \approx 410$ $d_{31} = -100$ $d_{33} = 230$	$d_{15} \approx 670$ $d_{31} = -185$ $d_{33} = 600$	$d_{15} \approx 330$ $d_{31} = -90$ $d_{33} = 200$
相对介电常数/ ϵ_r	4.5	1200	1050	2100	1000
居里点温度/ $^{\circ}\text{C}$	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/(10^3 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/ $\Omega \cdot \text{m}$	$> 10^{12}$	$10^{10} (25^{\circ}\text{C})$	$> 10^{10}$	$10^{11} (25^{\circ}\text{C})$	
最高允许温度/ $^{\circ}\text{C}$	550	80	250	250	
最高允许湿度/%	100	100	100	100	

3) 其他压电材料

➤ 压电高分子材料

- 某些合成高分子聚合物薄膜经延展拉伸和电场极化后，有一定的压电性能，属于有机分子半结晶或结晶聚合物
- 目前已发现的压电系数最高、且已进行应用开发的压电高分子材料是**聚偏氟乙烯（PVDF）**
- 质轻柔软、抗拉强度高、不易破碎、蠕变小、耐冲击、声阻抗近于水和生物体含水组织，热释电性和热稳定性好，且便于批量生产和大面积使用，可制成**大面积阵列传感器乃至人工皮肤**。



3) 其他压电材料

➤ 压电半导体

- 既具有半导体特性又具有压电性能，如**ZnS**、**CaS**、**GaAs**等。既可利用它的压电特性研制传感器，又可利用半导体特性以微电子技术制成电子器件。

➤ 复合压电材料

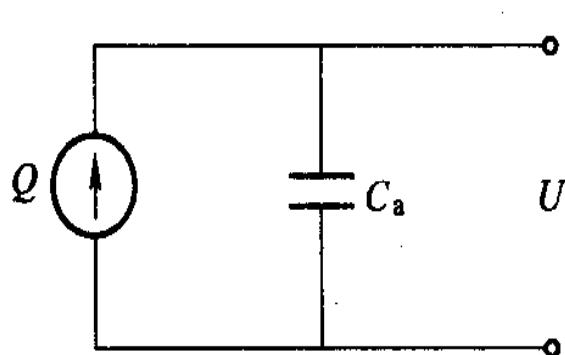
- 在分子化合物中掺杂压电陶瓷锆钛酸铅或钛酸钡粉末制成的高分子压电薄膜。既保持了高分子压电薄膜的柔软性等特点，又具有较高的压电性和机电耦合系数。

➤ 压电涂层

- 把锆钛酸铅粉末作为填料，与环氧树脂胶液一起形成压电/环氧树脂溶合涂料，涂刷在结构表面上。根据实际需要在涂层表面印刷极化电极和传输信号导线，经极化处理就可实现振动传感器。

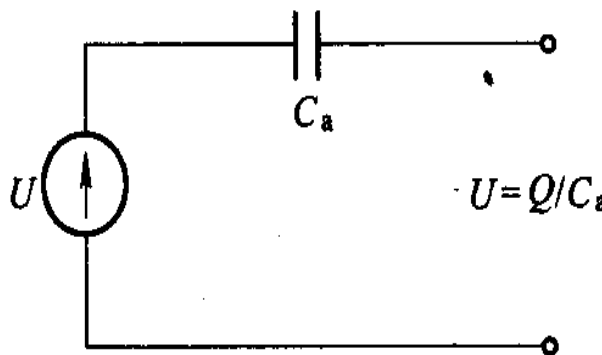
3、等效电路

- 当压电元件受外力作用时，会在一个极板上聚集正电荷，另一个极板上聚集等量的负电荷，因此它相当于一个**电荷源**（静电发生器）。
- 当压电元件电极表面聚集电荷时，它又相当于一个以压电材料为电介质的**电容器**。



(a)

电荷源和电容并联



(b)

电压源和电容串联

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

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

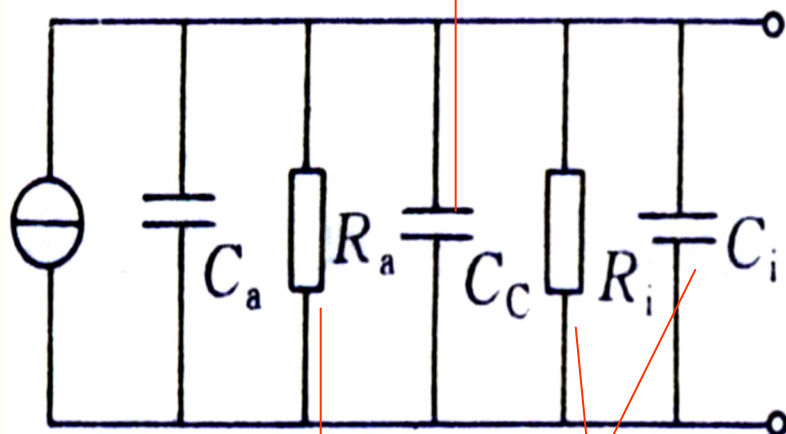
等效电路

- 由等效电路可知，只有在外电路负载为无穷大（开路），且内部无漏电时，受力产生的电荷或电压源才能保持长期不变。
- 如果负载不是无穷大，则电路就会按指数规律放电，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。这对于静态标定以及低频准静态测量极为不利。所以压电传感器不适宜静态测量。

实际等效电路

压电器件是一个有源电容器，存在与电容传感器相同的应用弱点——**高内阻、小功率**问题，必须进行前置放大，前置阻抗变换。压电传感器的测量电路有两种形式：**电压放大器**和**电荷放大器**。

电缆电容

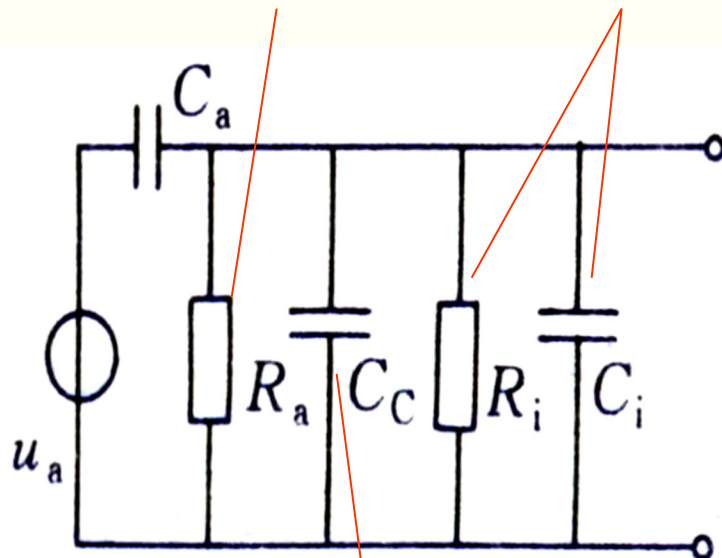


传感器的泄露电阻

放大器输入电阻、电容

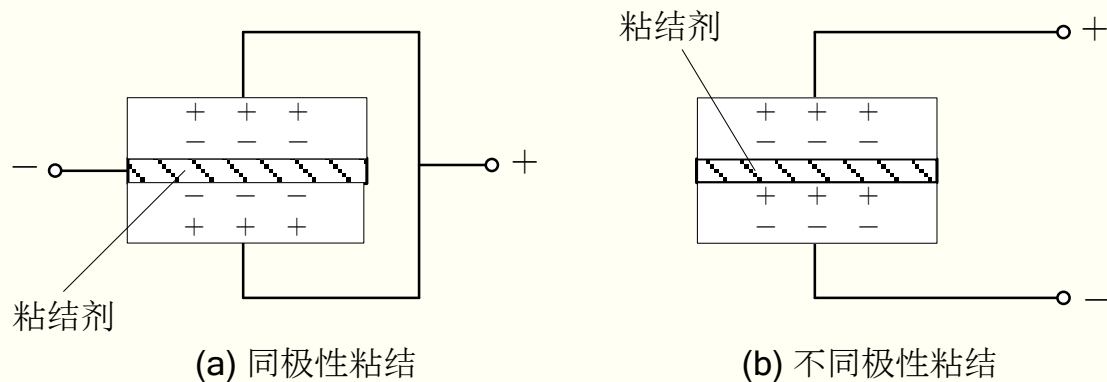
传感器的泄露电阻

放大器输入电阻、电容



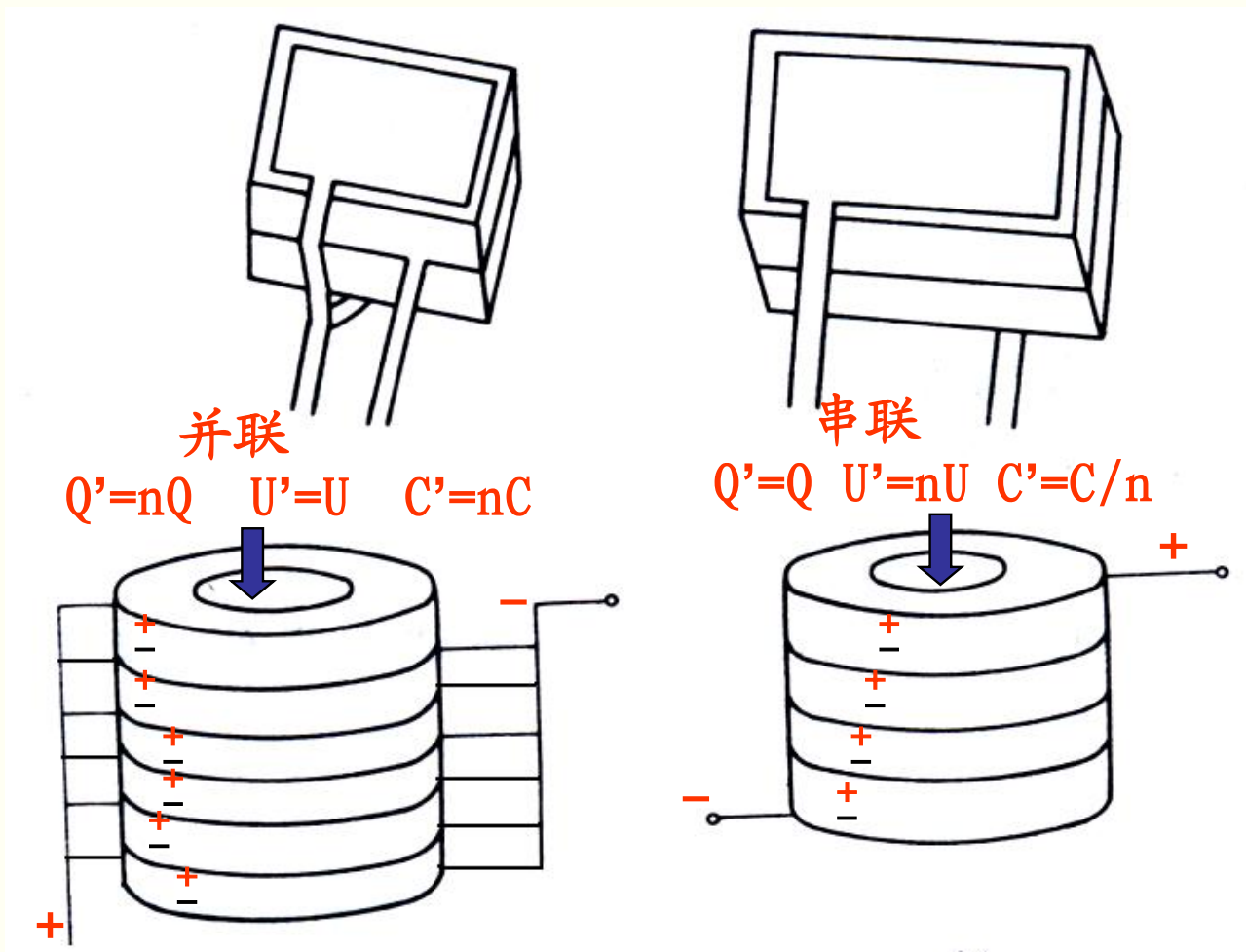
电缆电容

4、结构形式



- 从作用力看，元件是串接的，因而每片受到的作用力相同，产生的变形和电荷数量大小都与单片时相同。
- 并联接法类似两个电容的并联，外力作用下正负电极上的电荷量增加了1倍，电容量也增加了1倍，输出电压与单片时相同。
- 串联接法两压电片中间粘接处正负电荷中和，上、下极板的电荷量与单片时相同，总电容量为单片的一半，输出电压增大了1倍。

结构形式



6、压电式检测元件的误差

■ 温度引起的误差

- 压电系数、介电常数、体电阻和弹性模量等参数发生变化
- 瞬态环境温度变化对检测元件也会产生较大影响
 - 选用灵敏度随温度变化较小的检测元件。
 - 受瞬变温度影响较小的检测元件
 - 采用隔热片，以减少温度的影响；
 - 采用温度补偿片，通过它的的热膨胀变形来起抵消壳体等部件变形的作用
 - 压电材料的温度上限为 $1/2$ 居里温度。超过有效温度会引起较大测量误差。

6、压电式检测元件的误差

■ 噪声影响

- 元件受振动引起的噪声
- 电缆受到振动或弯曲会由于摩擦引入感应电荷

- 隔离基座、独立外壳

- 低噪声电缆、紧固电缆

- 阻抗变换器

■ 灵敏度变化

- 随时间延续而变化
- 每半年进行一次校正（石英晶体稳定性好）

■ 安装差异

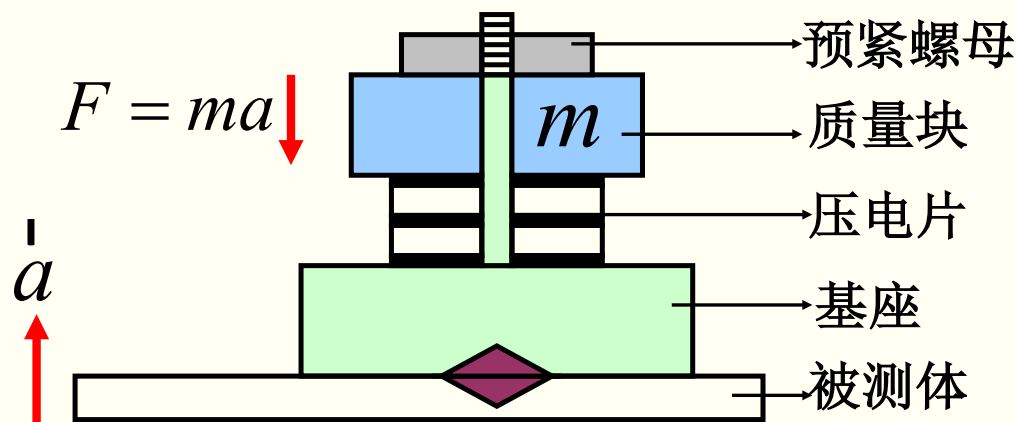
- 安装面具有较高的平行度、平直度和较低的粗糙度
- 事先给压电片有一定的预应力

6、应用

传感器类型	生物功能	转换
力敏	触觉	力→电
热敏	触觉	热→电
光敏	视觉	光→电
声敏	听觉	声→电

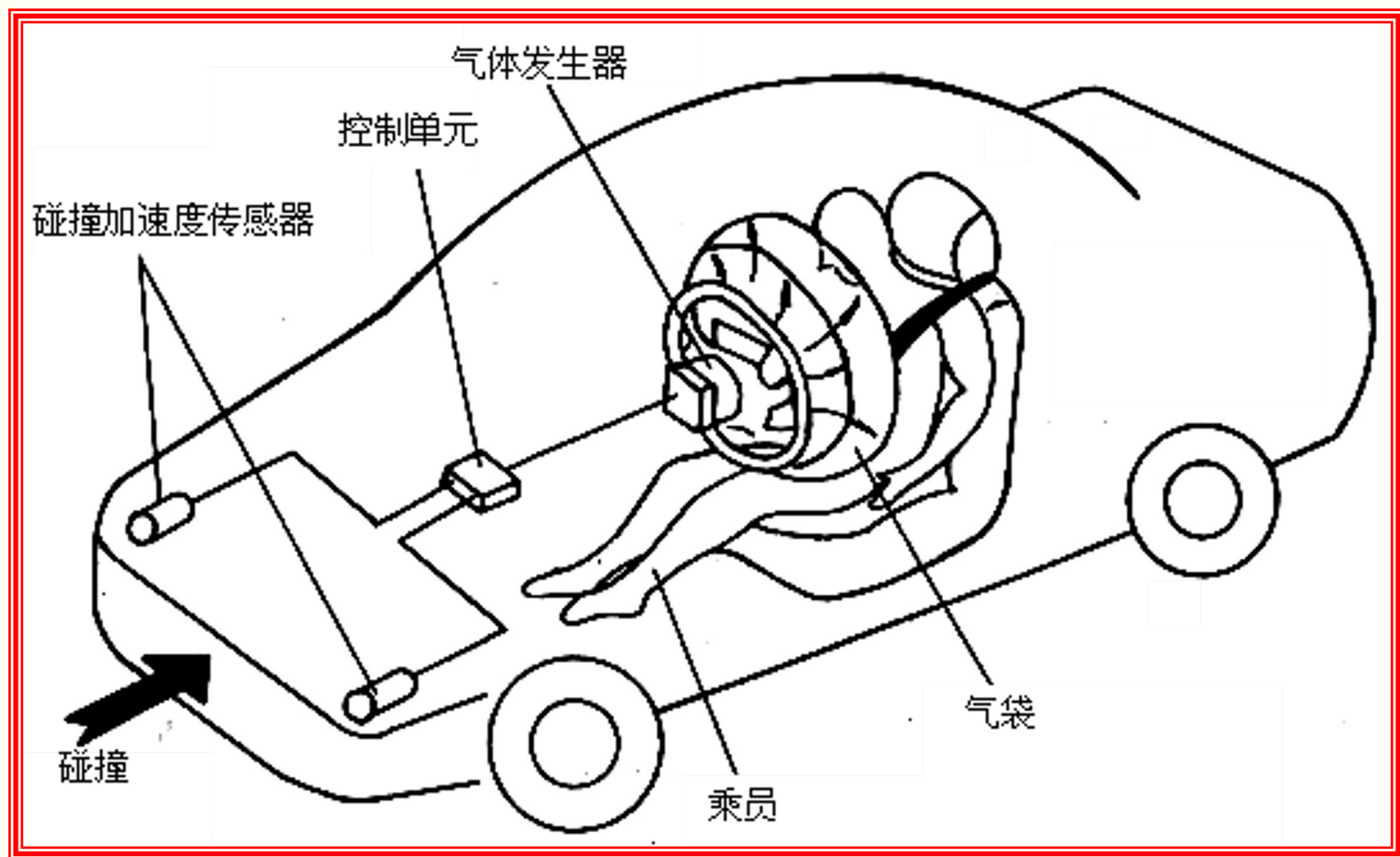
广泛用于通讯（卫星接收、对讲机、电话机等）、家电（TV、VCD、DVD等）、电脑、汽车电子、电子游戏机等领域

1) 加速度传感器



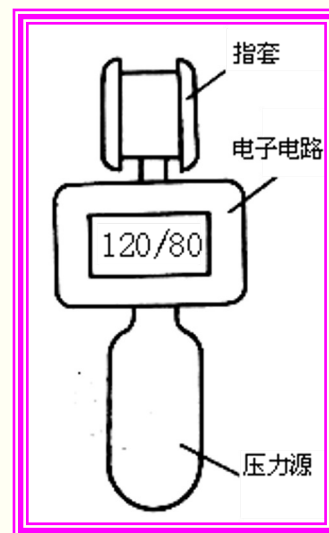
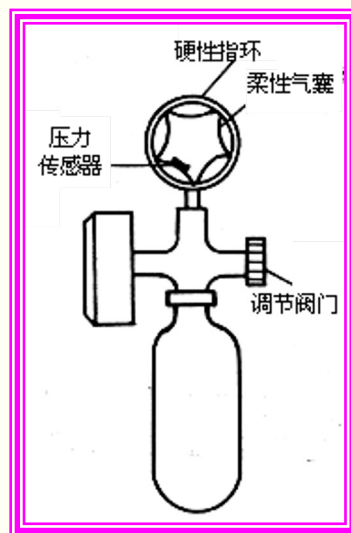
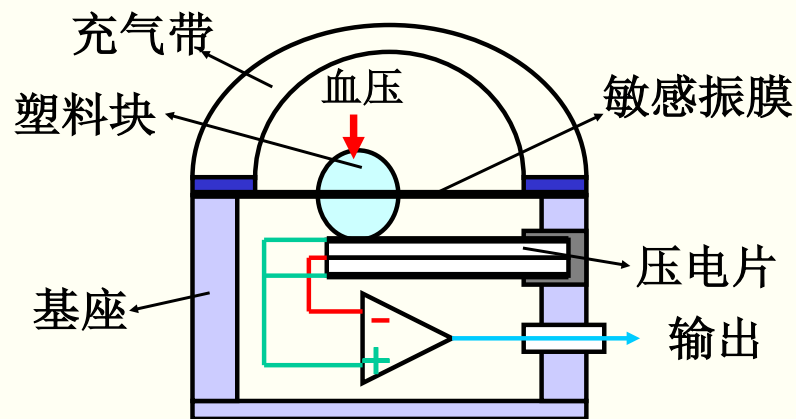
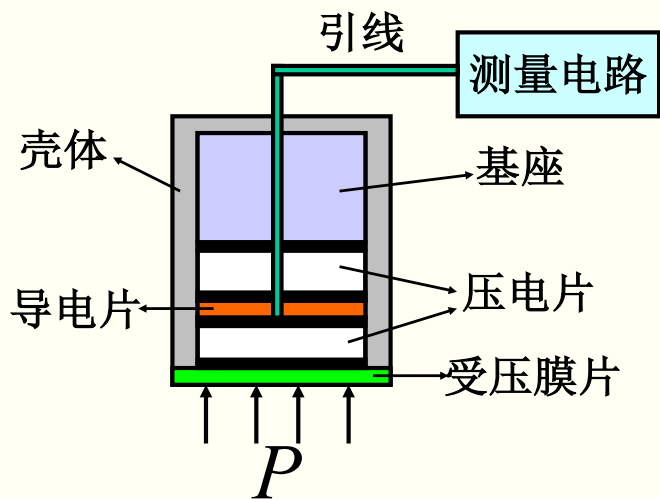
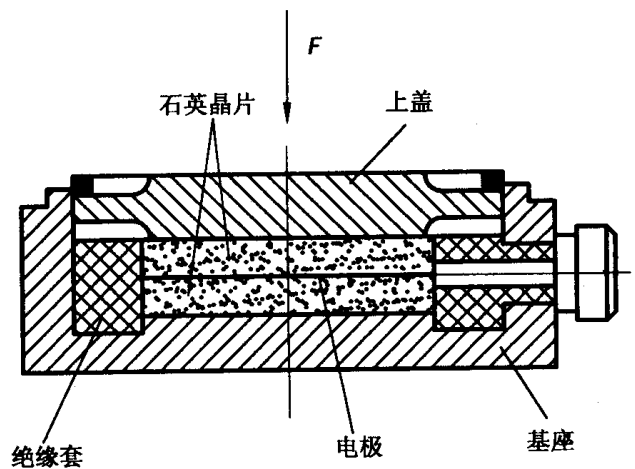
- 世界各国作为量值传递标准的高频和中频振动基准的标准加速度传感器，都是压电式的。
- 量程大、频带宽、安装简单、适用于各种恶劣环境、体积小、重量轻。
- 广泛应用于振动冲击测试、信号分析、故障诊断、振动校准等方面。

汽车安全气囊



2) 力和压力传感器

血压传感器 指套式电子血压计



动态力传感器

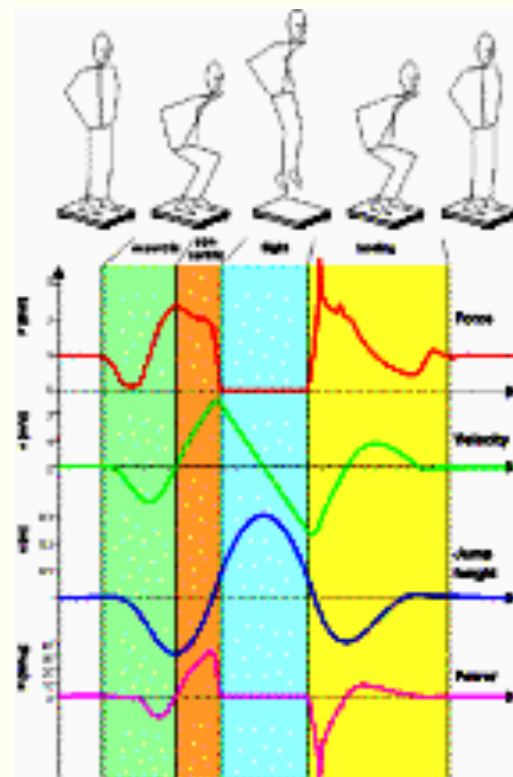


压电式步态分析跑台



压电式纵跳训练分析装置

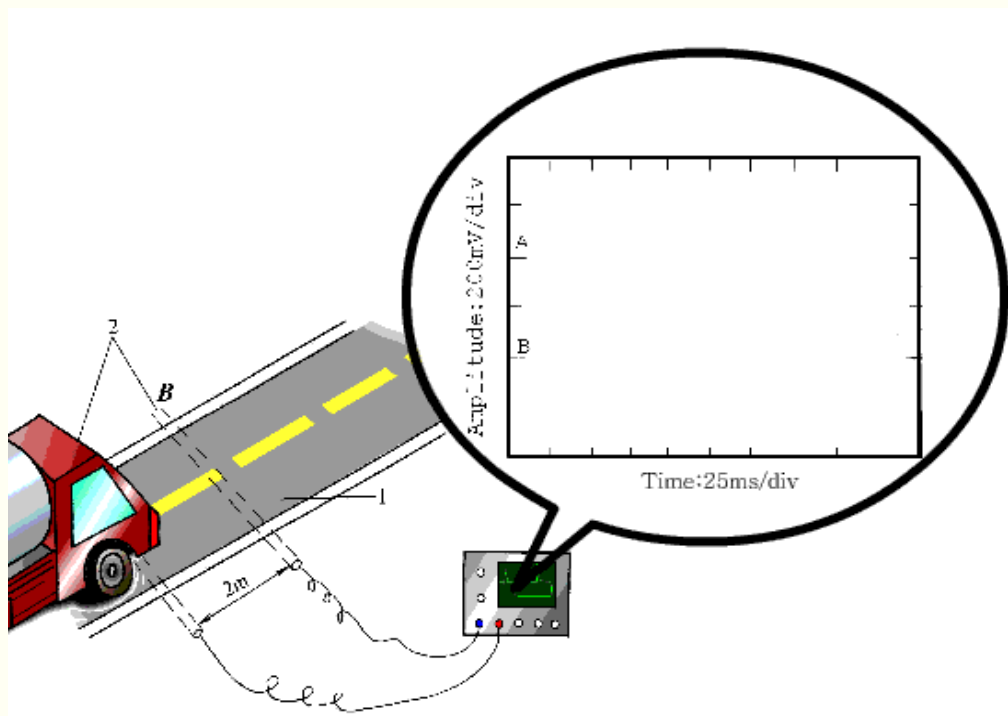
压电传感器测量双腿跳的动态力



交通检测

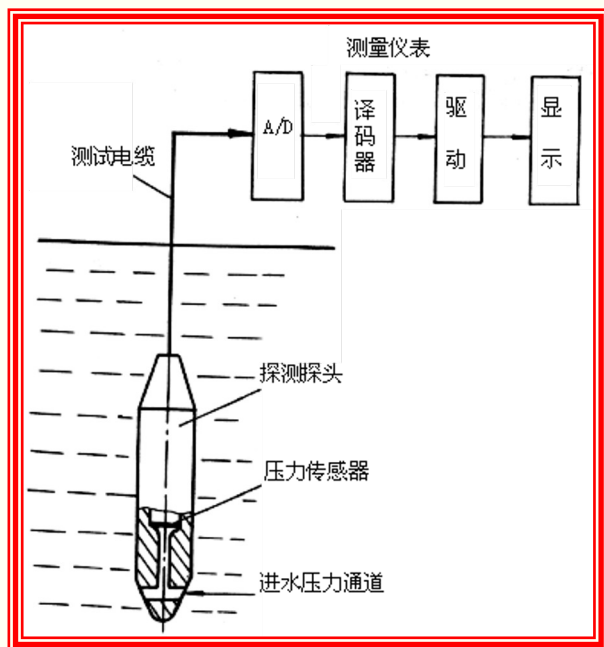
将高分子压电电缆埋在公路上，可以获取

- 车型分类信息（包括轴数、轴距、轮数、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。



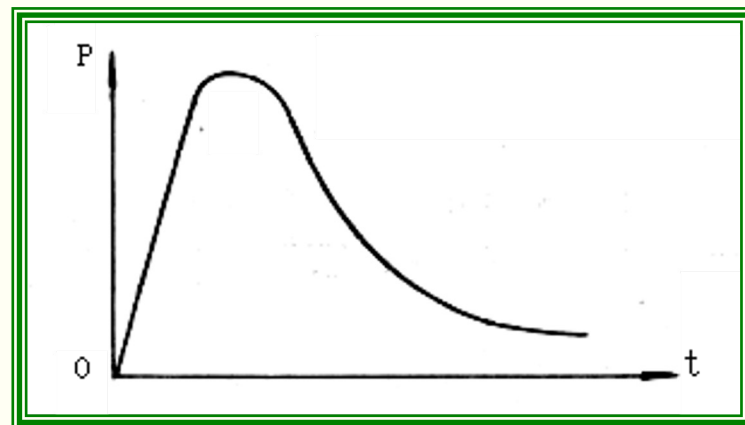
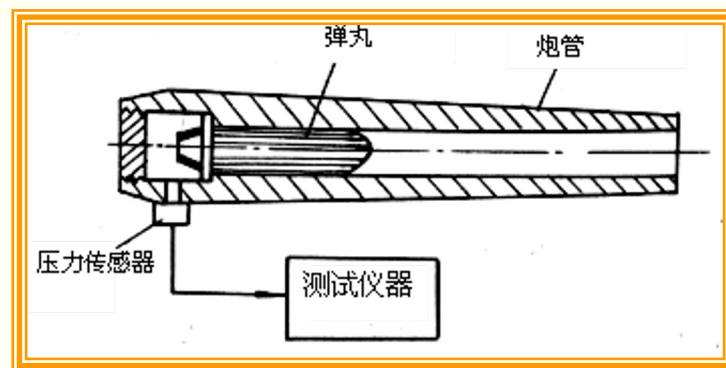
深度测量、压力测量

水深测量仪

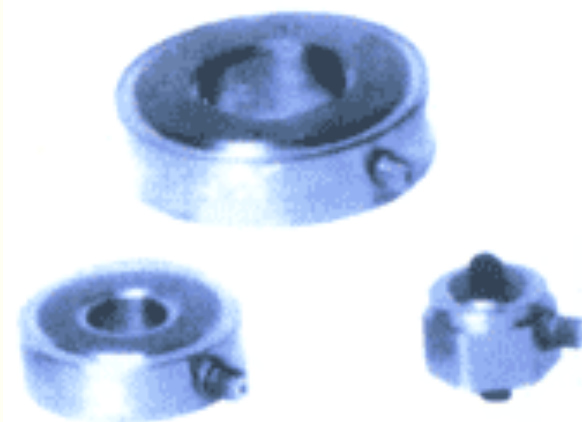
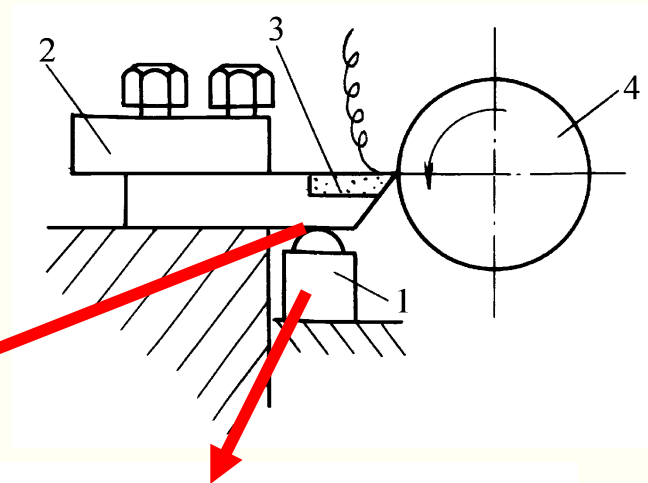


$0.01\text{MPa} / m$

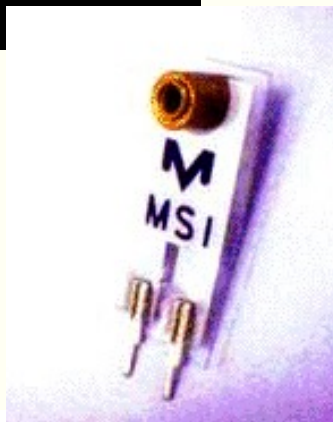
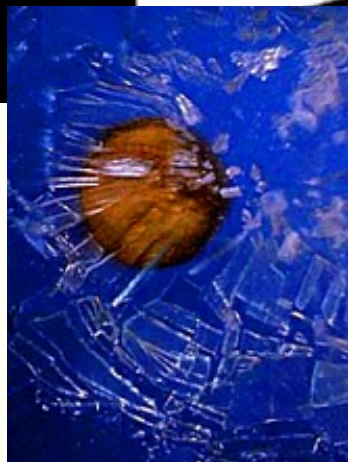
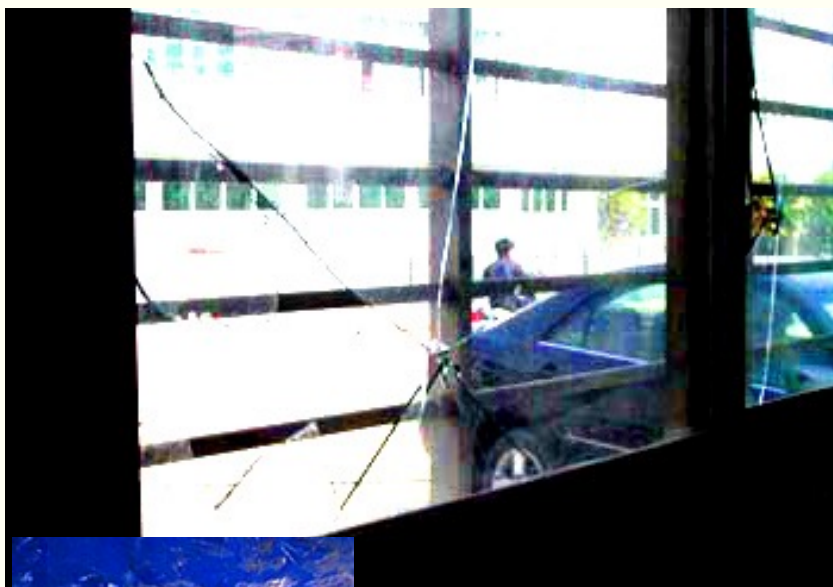
火炮堂内压力测试



刀具切削力传感器



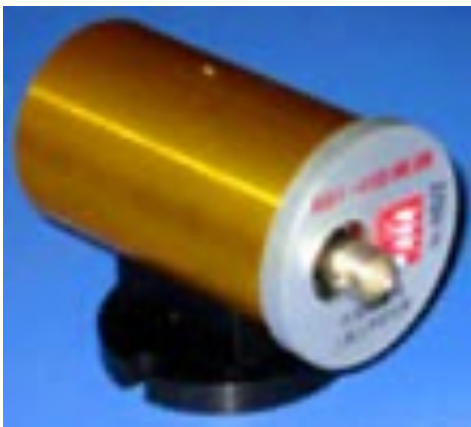
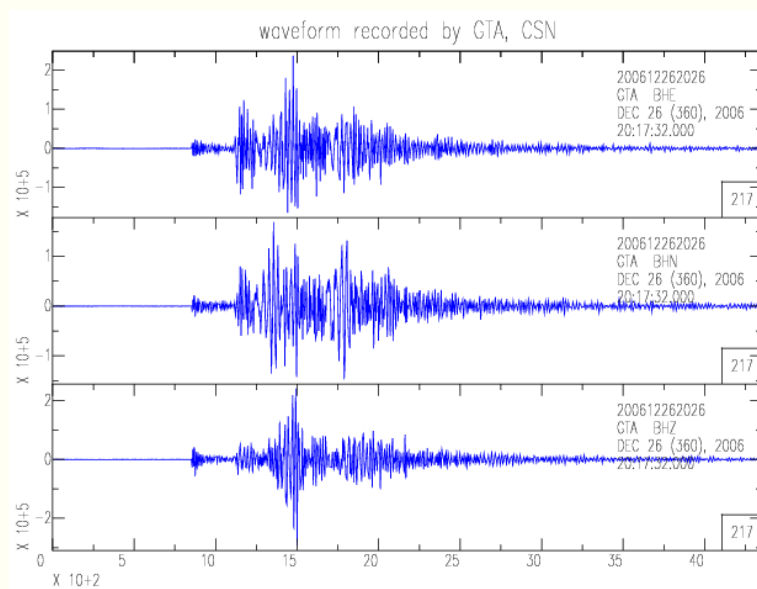
3) 振动传感器



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。

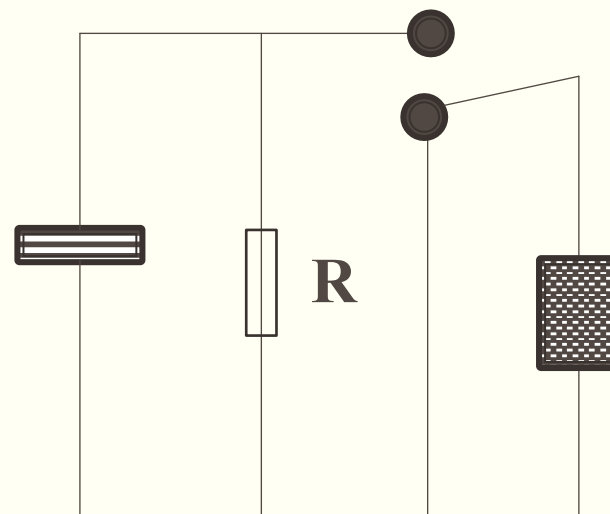
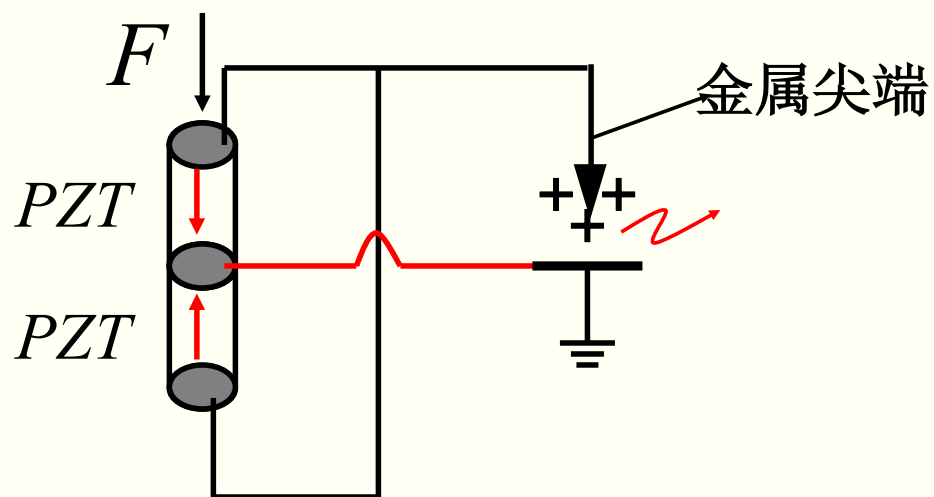
地震



横向振动测振器

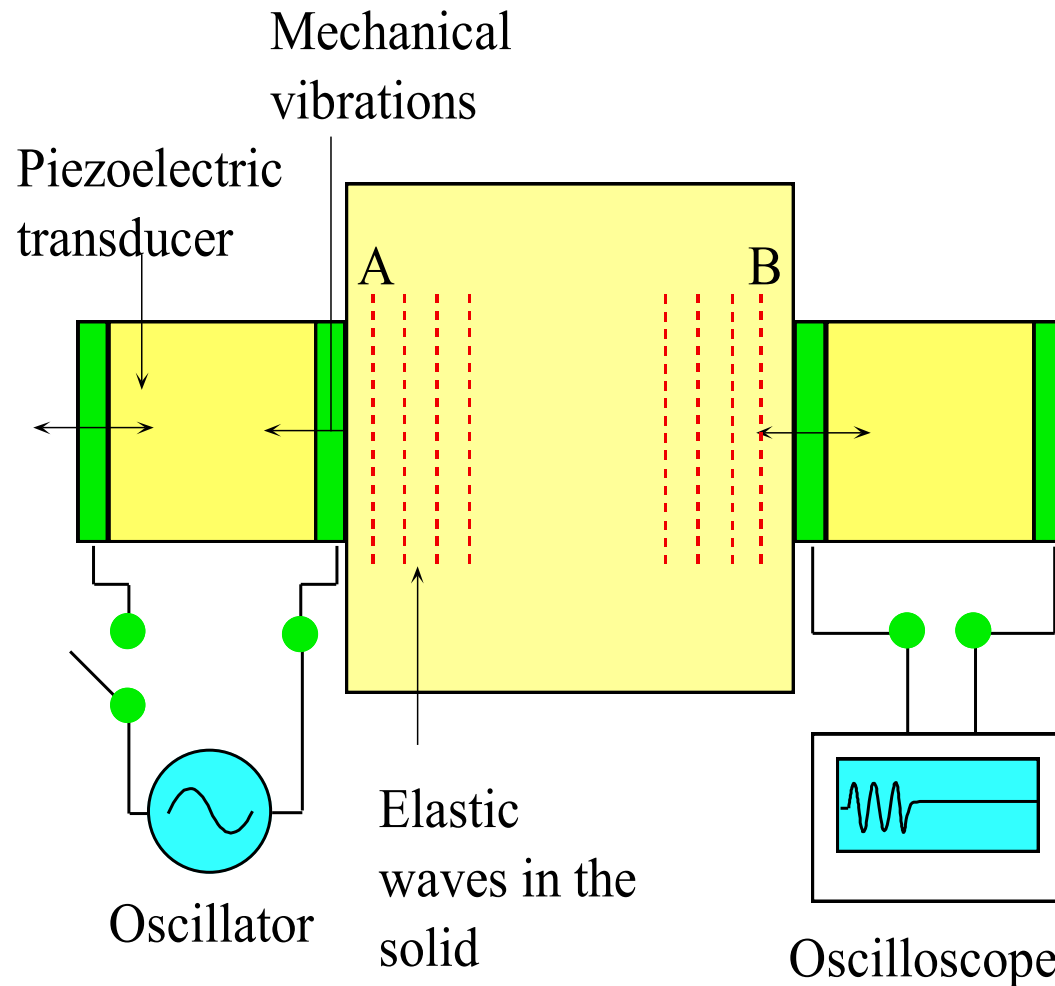
纵向振动测振器

4) 点火器



炮弹引信

5) 超声波产生与接收





超声波探伤传感器





各种超声波测厚传感器



超声波频谱分析



超声波测流量

思考题

- 为什么说压电式传感器只适用于动态测量而不能用于静态测量？
- 压电式传感器测量电路的作用是什么？其核心是解决什么问题？
- 压电元件在汽车中的应用有哪些？
- 常用的压电材料有哪些？请从压电材料的稳定性、响应速度、灵敏度和机械强度对这些压电材料的性能作分析比较。

作业

- 1、常用的压电材料有哪些？请从压电材料的稳定性、响应速度、灵敏度和机械强度对这些压电材料的性能作分析比较。