

第 5 章 压电式传感器

压电式传感器是以某些晶体受力后在其表面产生电荷的压电效应为转换原理的传感器。压电传感元件是力敏感元件，所以它能测量最终能变换为力的各种物理量，例如力、压力、加速度等。

压电式传感器具有体积小、质量轻、频带宽、灵敏度高等优点。近年来，压电测试技术发展迅速，特别是电子技术的迅速发展，使压电式传感器的应用越来越广泛。

5.1 压电效应

5.1.1 压电效应及其可逆性

当某些物质沿某一方向受到外力作用时，会产生变形，同时其内部产生极化现象，此时在这种材料的两个表面产生符号相反的电荷，如图 5-1 所示；当外力去掉后，它又重新恢复到不带电的状态，这种现象被称为压电效应。当作用力方向改变时，电荷极性也随之改变。这种机械能转化为电能的现象称为“正压电效应”或“顺压电效应”。

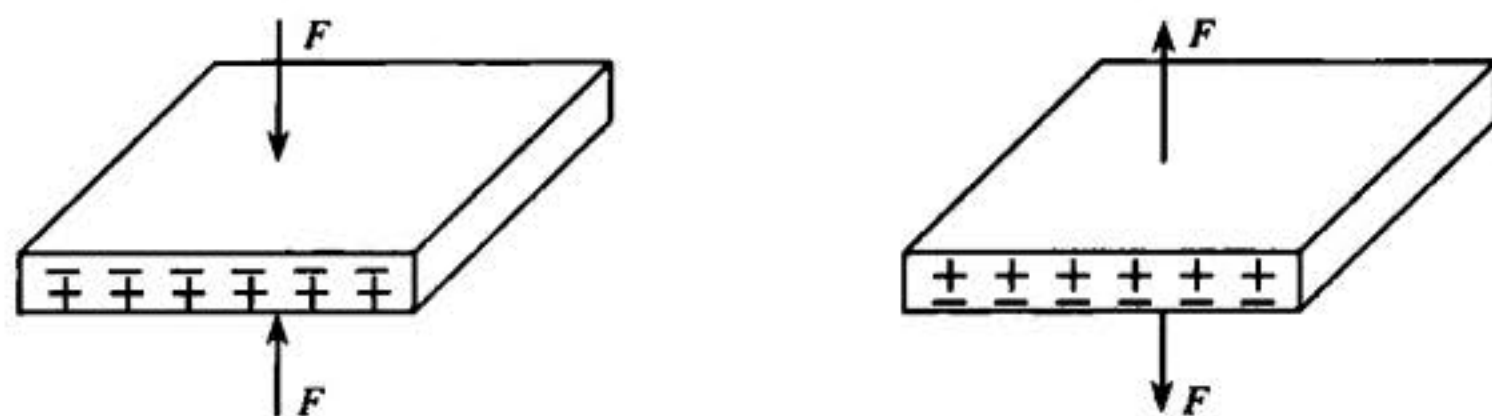


图 5-1 正（顺）压电效应示意图

反之，当在某些物质的极化方向上施加电场时，这些材料在某一方向上将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。这种电能转化为机械能的现象称为“逆压电效应”或“电致伸缩效应”。

压电效应的这种可逆性如图 5-2 所示。利用这一特性可以实现机械能和电能的相互转换。

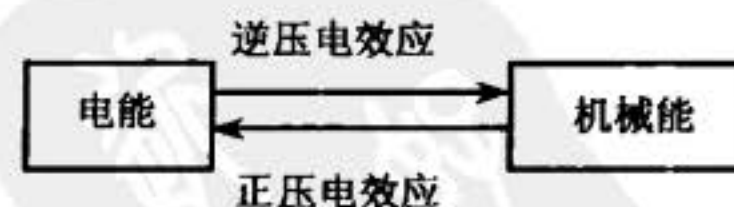


图 5-2 压电效应的可逆性

具有压电效应的物质称为压电材料。在自然界中大多数晶体都具有压电效应，但大多数

晶体的压电效应都很微弱。随着对压电材料的深入研究,人们发现石英晶体和人造压电陶瓷、压电半导体是性能较好的压电材料。

5.1.2 石英晶体的压电效应及产生原理

1. 石英晶体的压电效应

石英晶体是一种应用广泛的压电晶体。它是二氧化硅单晶,属于六角晶系。图 5-3 (a) 所示是理想石英晶体的外形图,为规则的六角棱柱体。在晶体学中它可用三根互相垂直的轴来表示,如图 5-3 (b) 所示,其中 z 轴称为光轴,它与晶体的纵轴线方向一致。 z 轴又叫中性轴,因为沿着 z 轴方向受力时不产生压电效应。 x 轴称为电轴,它通过六面体相对的两个棱线并垂直于光轴,在垂直于此轴的面上压电效应最强。 y 轴称为机械轴,它垂直于两个相对的晶柱棱面。

从晶体上切下的平行六面体的薄片称为晶体切片。当沿着 x 轴对压电晶片施加力时,将在垂直于 x 轴的表面上产生电荷,这种现象称为“纵向压电效应”;沿着 y 轴施加力的作用时,电荷仍出现在与 x 轴垂直的表面上,这种现象称为“横向压电效应”;当沿着 z 轴方向受力时不产生压电效应。

2. 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,是由其内部分子结构决定的。图 5-4 (a) 所示是一个单元组体中,构成石英晶体的硅离子 Si^{4+} 和氧离子 O^{2-} 在垂直于 z 轴的 xy 平面上的投影。为讨论方便,将这些硅、氧离子等效为图 5-4 (b) 中的正六边形排列,图中“ $\oplus$ ”代表 Si^{4+} ,“ $\ominus$ ”代表 2O^{2-} 。

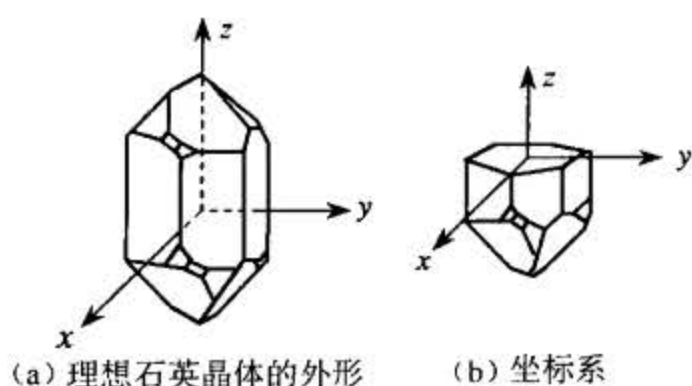


图 5-3 石英晶体

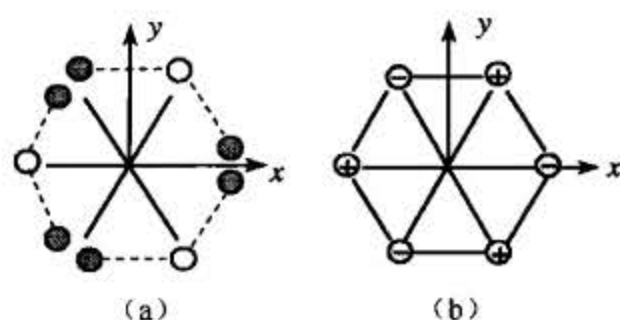


图 5-4 硅、氧离子的排列示意图

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 $\mathbf{P}_1$ 、 $\mathbf{P}_2$ 、 $\mathbf{P}_3$,如图 5-5 (a) 所示。因为 $P = qL$ (q 为电荷量, L 为正负电荷之间的距离),此时正负电荷中心重合,电偶极矩的矢量和等于零,即

$$\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_3 = 0$$

所以晶体表面不产生电荷,呈电中性。

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,正负离子的相对位置随之发生变化,如图 5-5 (b) 所示。此时正负电荷中心不再重合,电偶极矩 $\mathbf{P}_1$ 减小, $\mathbf{P}_2$ 、 $\mathbf{P}_3$ 增大,它们在 x 方向上的分量不再等于零。

$$P_{1x} + P_{2x} + P_{3x} > 0$$

在 y 、 z 方向上的分量为

$$P_{1y} + P_{2y} + P_{3y} = 0$$

$$P_{1z} + P_{2z} + P_{3z} = 0$$

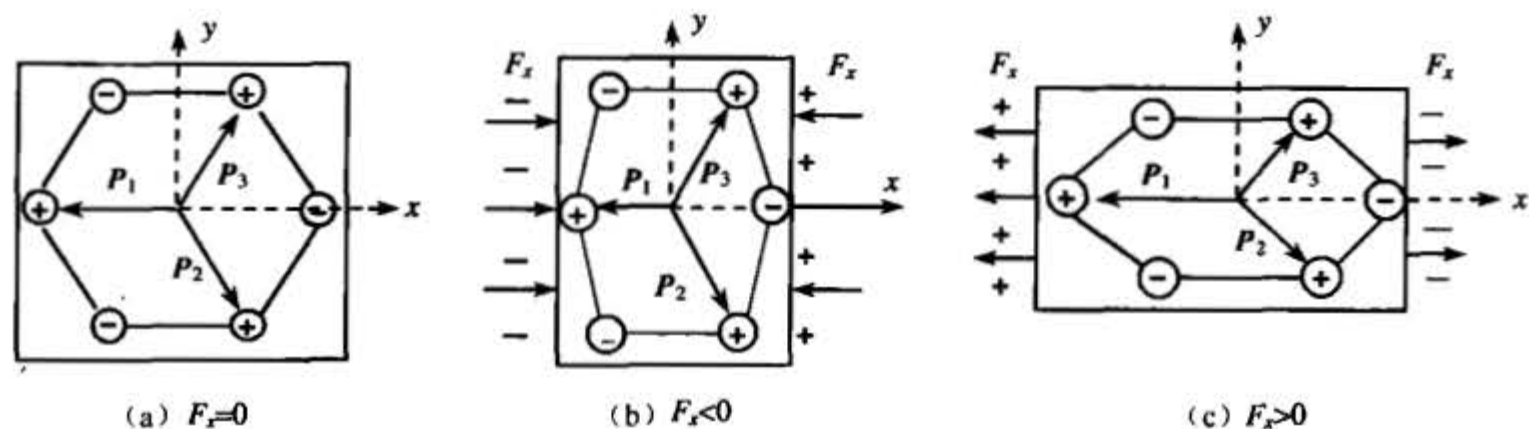


图 5-5 石英晶体压电效应示意图

由上面的三式可以看出，在 x 轴的正方向出现正电荷，在 y 轴和 z 轴方向则不出现电荷。

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 5-5 (c) 所示。电偶极矩 P_1 增大， P_2 、 P_3 减小，此时它们在 x 、 y 、 z 三个方向上的分量为

$$P_{1x} + P_{2x} + P_{3x} < 0$$

$$P_{1y} + P_{2y} + P_{3y} = 0$$

$$P_{1z} + P_{2z} + P_{3z} = 0$$

在 x 轴的正向出现负电荷，在 y 、 z 方向依然不出现电荷。

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 轴方向受力 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 5-5 (b) 相似；当 $F_y < 0$ 时，则与图 5-5 (c) 相似。由此可见，晶体在 y (即机械轴) 方向的力 F_y 作用下，在 x 方向产生正压电效应，在 y 、 z 方向同样不产生压电效应。

晶体在 z 轴方向受力 F_z 的作用时，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，在沿 z (即光轴) 方向的力 F_z 作用下，晶体不产生压电效应。

3. 作用力与电荷的关系

假设从石英晶体上沿 y 轴线切下一片晶片，如图 5-6 (a) 所示，使它的晶面分别平行于 x 、 y 、 z 轴，在垂直 x 轴方向两面用真空镀膜或沉银法得到电极面，如图 5-6 (b) 所示。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，并发生极化现象。在晶体线性弹性范围内，极化强度 P_{11} 与应力 σ_x 成正比，即

$$P_{11} = d_{11}\sigma_x = d_{11} \frac{F_x}{bc} \quad (5-1)$$

式中： F_x 为沿晶轴 x 方向施加的压力；

d_{11} 为压电系数, 当受力方向和变形不同时, 压电系数也不同, 下标的意义为产生电荷的面的轴向及施加作用力的轴向, d_{11} 为石英晶体在 x 轴受力时的压电系数, $d_{11} = 2.3 \times 10^{-12} \text{C/N}$;

b 、 c 分别为石英晶片的长度和宽度。

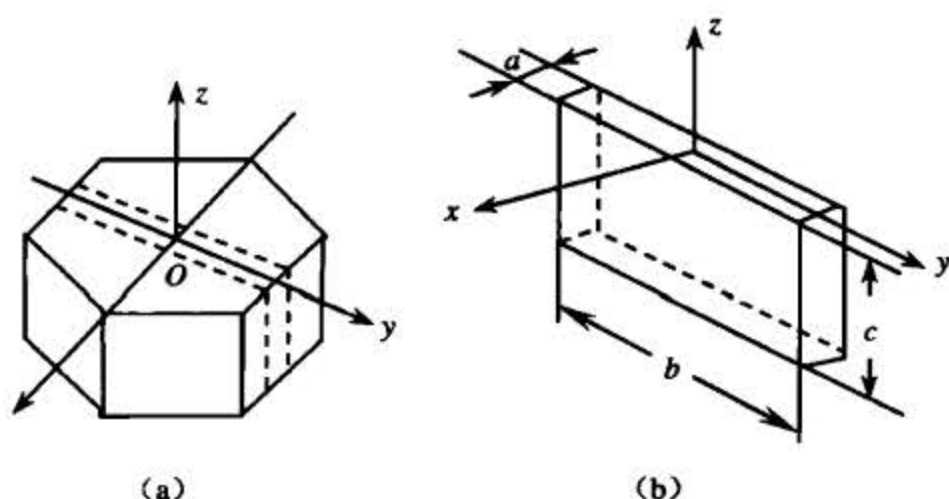


图 5-6 石英晶体剖面与切片

极化强度 P_{11} 在数值上等于晶面上的电荷密度, 即

$$P_{11} = \frac{q_x}{bc} \quad (5-2)$$

式中: q_x 为垂直于 x 轴平面上的电荷。

将 (5-1)、(5-2) 两式联立, 得

$$q_x = d_{11} F_x \quad (5-3)$$

反之, 若沿 x 方向对晶片施加电场, 电场强度大小为 E_x 。根据逆压电效应, 晶体在 x 轴方向将产生伸缩, 即

$$\Delta a = d_{11} U_x \quad (5-4)$$

式中: U_x 为其两电极面间的电压。由于压电晶体是绝缘体, 当它的两极表面聚集电荷时, 它相当于一个电容器。所以

$$U_x = \frac{q_x}{C_x} = d_{11} \frac{F_x}{C_x} \quad (5-5)$$

式中: $C_x = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r cb}{a}$ 为电极面间电容。也可用相对应变表示为

$$\frac{\Delta a}{a} = d_{11} \frac{U_x}{a} = d_{11} E_x \quad (5-6)$$

在 x 轴方向施加压力时, 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, 如图 5-7 (a)、(b) 所示。

如果在同一晶片上作用力是沿着机械轴 y 轴的方向, 其电荷仍在与 x 轴垂直平面上出现, 其极性如图 5-7 (c)、(d) 所示, 此时电荷的大小为

$$q_{12} = d_{12} \frac{bc}{ac} F_y = d_{12} \frac{b}{a} F_y \quad (5-7)$$

式中: d_{12} 为石英晶体在 y 轴方向受力时的压电系数;

a 为晶片厚度。

根据石英晶体轴对称条件

$$d_{11} = -d_{12}$$

则有

$$q_{12} = -d_{11} \frac{b}{a} F_y \quad (5-8)$$

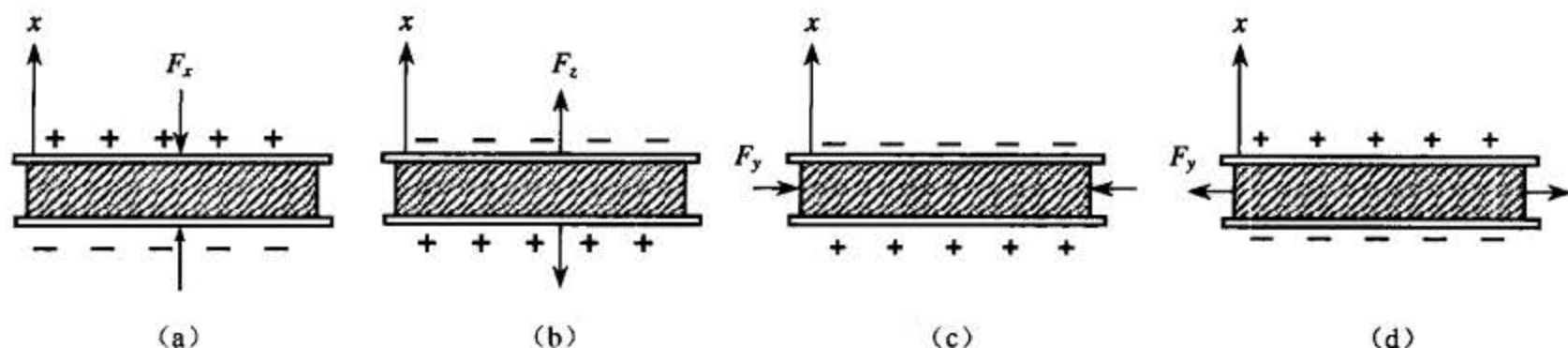


图 5-7 石英晶体受力方向与电荷极性关系

(5-8) 式中的负号表示沿 y 轴的压力产生的电荷与沿 x 轴施加压力所产生的电荷极性是相反的。

反之, 若沿 y 方向对晶片施加电场, 根据逆压电效应, 晶片在 y 轴方向将产生伸缩变形, 即

$$\Delta b = -d_{11} \frac{b}{a} U_x \quad (5-9)$$

式中: U_x 为其两电极面间的电压, 其计算式为

$$U_x = \frac{q_{12}}{C_x} = -d_{11} \frac{b}{a} \cdot \frac{F_y}{C_x} \quad (5-10)$$

或用相对应变表示

$$\frac{\Delta b}{b} = -d_{11} E_x \quad (5-11)$$

式中: E_x 为 x 轴方向上的电场强度。

由 (5-3) 式、(5-6) 式、(5-8) 式、(5-11) 式可知:

- ① 当晶片受到 x 方向的压力作用时, q_x 只与作用力 F_x 成正比, 而与晶片的几何尺寸无关;
- ② 沿机械轴 y 方向向晶片施加压力时, 产生的电荷是与几何尺寸有关的;
- ③ 石英晶体不是在任何方向都存在压电效应的;
- ④ 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;
- ⑤ 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) 之间皆为线性关系。

5.1.3 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, 各个电畴在方向上杂乱分布, 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, 如图 5-8 (a) 所示。

当在一定的温度条件下, 对压电陶瓷进行极化处理, 即以强电场使电畴规则排列, 如图 5-8 (b) 所示, 这时压电陶瓷就具有了压电性。在极化电场去除后, 电畴基本上保持不

变,留下了很强的剩余极化,如图 5-8 (c) 所示。

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,它屏蔽和抵消了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强度,如图 5-9 所示。

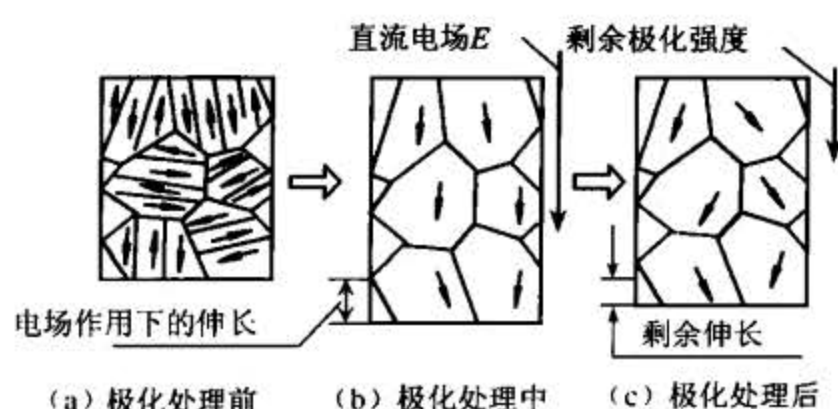


图 5-8 压电陶瓷中的电畴变化

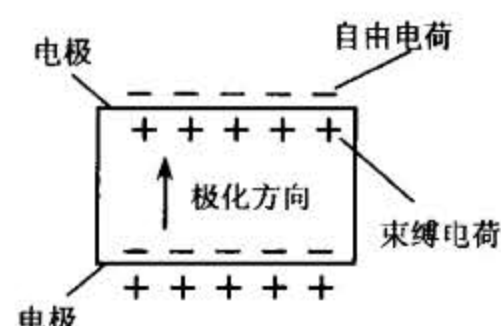


图 5-9 陶瓷片内束缚电荷与电极上吸附的自由电荷示意图

如果在陶瓷片上加一个与极化方向平行的压力 F ,如图 5-10 所示,陶瓷片将产生压缩形变(图中虚线代表形变后的情况,实线代表形变前的情况),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。当压力撤销后,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。

同样,若在片上加一个与极化方向相同的电场,如图 5-11 所示,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的距离也增大,即陶瓷片沿极化方向产生伸长形变(图中虚线代表形变后的情况,实线代表形变前的情况)。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。

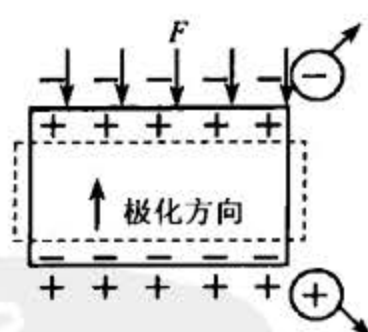


图 5-10 正压电效应示意图

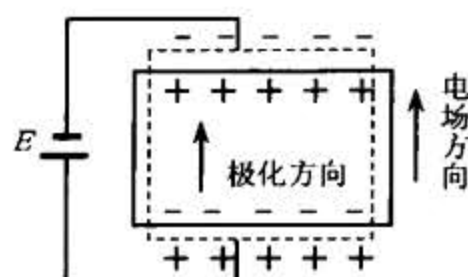


图 5-11 逆压电效应示意图

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。另外值得说明的是,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。

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，这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，如图 5-12 (a) 所示，其电荷量 q 与作用力 F_z 成正比，即

$$q = d_{33} F_z \quad (5-12)$$

式中： d_{33} 为压电陶瓷的纵向压电系数，下标表示产生电荷的面的轴向及施加作用力的轴向。

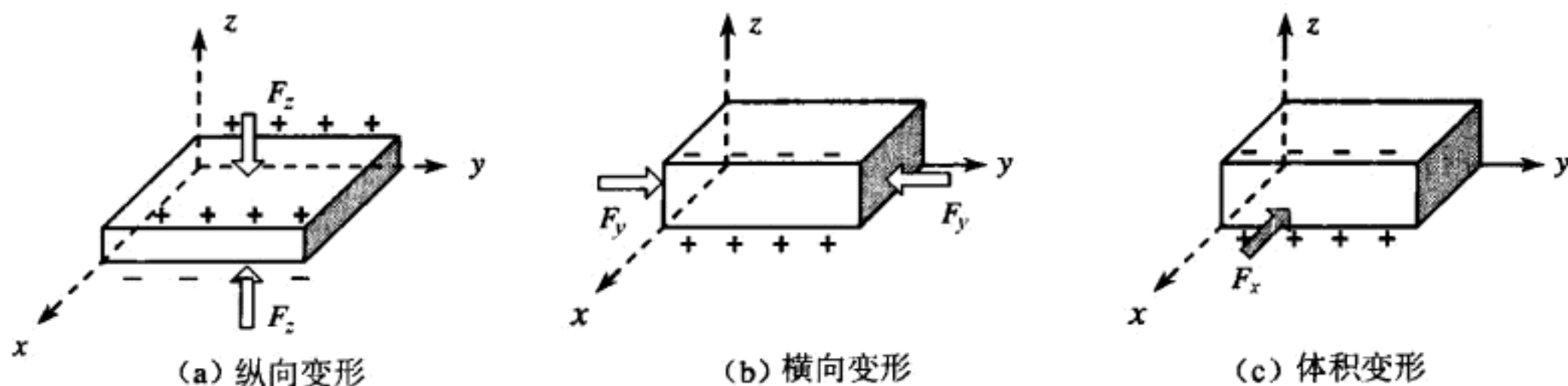


图 5-12 压电陶瓷的变形方式

压电陶瓷在受到如图 5-12 (b) 所示的作用力 F_y 或如图 5-12 (c) 所示的沿 x 方向的作用力 F_x 时，在垂直于 z 轴的上下平面上分别出现负、正电荷，其电荷量 q 与作用力 F_y 、 F_x 也成正比，即

$$q = -d_{32} F_y \frac{A_z}{A_y} = -d_{31} F_x \frac{A_z}{A_x} \quad (5-13)$$

式中： A_z 为极化面面积；

A_x 、 A_y 为受力面面积；

d_{32} 、 d_{31} 为压电陶瓷的横向压电系数。

当作用力 F_z 、 F_y 或 F_x 反向时，电荷的极性也反向。