

正、逆压电效应

正向电效应 某些电介质材料在外力作用下发生机械变形时,内部发生极化,导致材料
(力 $\rightarrow$ 电) 表面产生电荷,或两端出现电势差的现象

逆向电效应 某些电介质材料在外加电场作用下,内部发生极化并产生机械变形的
(电 $\rightarrow$ 力) 现象

二者互为逆过程,广泛应用于压电传感器、超声换能器。

压电陶瓷的主要参数和相互的关联

主要参数

压电常数 (d):

表征机械量与电学量之间的耦合响应能力, 包括正压电效应下单位应力产生的电位移, 以及逆压电效应下单位电场产生的应变。

介电常数 (ϵ):

表征材料在外加电场下的极化能力和储存电能的能力。介电常数越大, 在相同的几何尺寸和电压下, 电容量通常越大。

机电耦合系数 (k):

表征材料将机械能转换为电能, 或将电能转换为机械能的能力, 反映机电能量转换的有效程度。

机械品质因数 (Q_m):

表征材料在机械振动过程中储存能量与每周期损耗能量的关系。 Q_m 越高, 机械损耗通常越小, 谐振时的能量损耗越低。

频率常数 (N):

反映压电陶瓷的谐振频率与其特征尺寸之间的关系。对于给定振动模式, 频率常数近似为谐振频率与相应尺寸的乘积。

介电损耗角正切 ($\tan \delta$):

表征交变电场下介电能量损耗的程度。其值越小, 介电损耗通常越低。

相互间的关联

参数关系	关系
压电常数 d 与介电常数 ϵ	在其他条件相近时, 较强的极化响应可能同时提高压电响应和介电常数, 但二者并非简单正比。
压电常数 d 与机电耦合系数 k	压电常数大通常有利于提高机电转换能力, 但 k 还取决于介电常数和弹性常数。
机电耦合系数 k 与机械品质因数 Q_m	二者分别反映能量转换能力和机械损耗, 不能简单认为 k 增大必然导致 Q_m 减小。
机械品质因数 Q_m 与损耗	Q_m 越高, 机械损耗通常越小; 介电损耗角正切越小, 电学损耗通常越低。
频率常数 N 与尺寸	对于相同的振动模式, 特征尺寸越小, 谐振频率通常越高。

机电耦合系数与其他参数之间存在明确的定量关系。例如, 在中心的一维振动模式下可用近似关系表示为:

$$k^2 \propto \frac{d^2}{\epsilon s}$$

其中, d 为相应压电常数, ϵ 为相应介电常数, s 为相应弹性柔顺系数。

该关系说明, 机电耦合系数不仅取决于压电响应大小, 还受到介电和机械性质的共同影响。具体模式由具体的振动形式和参数定义而变化。

参数之间的综合优化。

压电陶瓷的参数通常需由运用场景进行优化：

压电传感器：希望具有较高的压电响应和良的的信号稳定性

超声换能器：通常希望具有较高的机电耦合系数、适宜的机械品质因素和低损耗

压电驱动器：通常关注较大的压电常数、较高的驱动效率及良好的稳定性。

高压电陶瓷件：通常还需重点考虑机械品质因素、发热、损耗和长期可靠性。

压电效应的矩阵表达式与意义

正、逆压电效应的矩阵表达式

1. 正压电效应

当压电陶瓷受到外力作用时,产生电位移(或极化强度),其矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix}$$

即:

$$D_i = d_{ij} T_j$$

其中, D_i 为电位移分量, T_j 为应力分量, d_{ij} 为压电系数

2. 逆压电效应

当压电陶瓷受外加电场作用时,产生机械应变,其矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

即:

$$S_j = d_{ij} E_i$$

其中, S_j 为应变分量, E_i 为电场分量。

独立压电系数及其意义

压电系数矩阵共有 $3 \times 6 = 18$ 个分量,但由于晶体的对称性,不同压电材料的独立压电系数数量不同。

以最简单的单晶压电陶瓷(Gmm, 2阵对称性)极化方向为例

其独立的压电系数有3个:

$$d_{31}, d_{33}, d_{15}$$

其物理意义:

d_{31} : 沿极化方向施加电场产生的纵向应变,或沿极化方向施加应力的电位移

d_{33} : 沿极化方向施加电场产生的纵向应变,或沿极化方向施加应力的电位移

d_{15} : 电场与剪切应力应变之间的耦合系数,表征剪切压电效应。

对于Gmm对称性,压电系数矩阵写为:

$$[d_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

常见的压电陶瓷材料体系

钛酸钡 (BaTiO_3) 体系:

属于传统的无铅压电陶瓷, 具有良好的压电性和铁电性, 用于压电传感器、超声换能器及压电元件元器件等。

锆钛酸铅 (PZT) 体系:

是运用最广泛的压电陶瓷材料之一, 具有较高的压电常数、机电耦合系数和较好的综合性能, 应用于超声换能器、压电蜂鸣器、压电驱动器及精密定位器等。

铌酸锂体系:

以铌酸锂 (LiNbO_3) 为代表, 属于重要的无铅压电陶瓷体系, 应用于无铅压电驱动器、传感器及换能器等。

钙钛矿层状结构压电陶瓷体系:

以钙钛矿层状铁电材料为代表, 具有较高居里温度和较好的高温稳定性, 应用于高温领域。

铋钠钛酸钡 (BNT) 体系:

以 $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ 为代表, 是重要的无铅陶瓷体系, 应用于无铅压电驱动器。