

# 压电陶瓷基本特性研究<sup>\*</sup>

张 涛 孙立宁 蔡鹤皋

(哈尔滨工业大学机器人研究所 哈尔滨 150001)

**摘要** 随着压电陶瓷应用领域的不断扩大,压电陶瓷作为一种精密驱动器件,其自身的性能日益受到使用者的关注。本文对压电陶瓷器件位移特性、出力特性、温度特性及蠕变特性进行了详尽的论述和分析,推导了压电陶瓷和电致伸缩陶瓷的归一化模型,并对国内外典型的压电陶瓷器件的位移特性进行了分析。

**关键词** 压电陶瓷 基础特性 归一化模型

## 1 引 言

压电陶瓷微位移器是近年来发展起来的新型微位移器件,它具有体积小、重量轻、精度和分辨率高、频响高、出力大等优点,在光学、电子、航天航空、机械制造、生物工程、机器人等技术领域得到了广泛应用,而且日益受到重视。压电陶瓷的特性和性能指标直接影响机械结构和控制系统的设计,因而急需对其性能有明确的阐述。本文针对这一问题,在多年的研究基础上结合使用中的体会,对压电陶瓷的基本特性进行了分析,给出了几种国内外常见的压电陶瓷的特性曲线。

## 2 压电陶瓷基本原理

压电陶瓷和电致伸缩陶瓷都是电介质,电介质在电场的作用下有两种效应,即逆压电效应和电致伸缩效应。其中逆压电效应是指电介质在外电场的作用下产生应变,应变大小与电场大小成正比,应变的方向与电场方向有关。而电致伸缩效应是指电介质在电场的作用下由于感应极化作用引起应变,且应变与电场方向无关,应变的大小与电场的平方成正比。上述效应可用公式表达如下:

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金、国家八六三计划资助

收稿日期: 1998- 07- 10

修稿日期: 1998- 08- 20

$$s = dE + M E^2 \quad (1)$$

式中:  $dE$ : 逆压电效应;  $M E^2$ : 电致伸缩效应

$d$ : 压电系数 ( $\text{m/V}$ );  $M$ : 电致伸缩系数 ( $\text{m}^2/\text{V}^2$ );

$E$ : 电场强度 ( $\text{V/m}$ );  $s$ : 应变。

其中逆压电效应仅在无对称中心晶体中才有, 而电致伸缩效应则在所有的电介质晶体中都有, 不过一般来说都很微弱。压电陶瓷的逆压电效应和电致伸缩效应本质上就是电介质在电场的作用下产生极化, 在电场力的作用下产生形变, 在宏观上表现为机电耦合效应。

### 3 压电陶瓷基本特性

#### 3.1 位移特性

电介质在电场作用下电极化的强弱可用电极化强度来表示, 电极化强度  $p$  是单位体积内电偶极矩的矢量和, 即  $p = \frac{q^1}{\Delta V}$ 。它直接反映了电介质在电场中电学与力学的联系。

我们以经过预极化的压电陶瓷为例分析外加电场和压电陶瓷内部极化电荷之间的关系。如图 1 所示, 当在压电陶瓷片两极板上施加电场(电场强度为  $E$ )时, 极板上电荷面密度为  $\pm \sigma_0$ , 电介质表面的极化电荷面密度为  $\pm \sigma'$ , 电介质的介电常数为  $\epsilon$ 。根据物理学和图 1 所示模型, 我们得到电介质表上的极化电荷面密度  $\sigma'$  和电容器极板上的电荷面密度  $\sigma_0$  之间的数量关系如下:

$$\sigma = \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon} \sigma_0 \quad (2)$$

此式表明了电介质表面的极化电荷总是比电容器表面的电荷少。

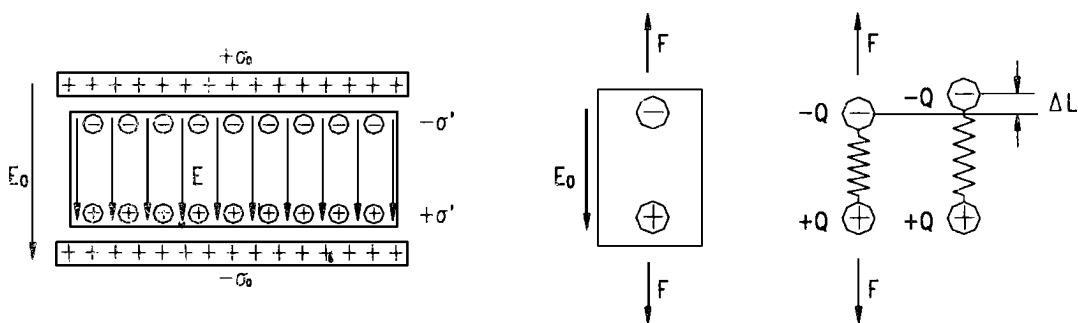


Fig 1 Equivalent model of piezoelectric and electrostrictive element

经过极化处理的压电陶瓷, 当外电场撤出后, 往往有剩余极化存在, 设剩余极化强度为  $P_r$ , 则电介质表面的剩余电荷面密度为  $\sigma_r = P_r$ 。

电介质在电容器极板电荷  $\sigma_0$  产生的电场中可以等效为一个大电偶极子, 它在外电场中的受力为:

$$F = Q E_0 \quad (3)$$

其中  $Q$  为电介质表面的极化电荷  $Q$  和电介质表面剩余极化电荷  $Q_r$  的和, 设极板面积为  $S$ , 则有:

$$Q = Q_r + Q = (\sigma_r + \sigma) \cdot S \quad (4)$$

其中:

$$Q = \sigma \cdot S = \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon} \cdot \sigma_0 \cdot S = \frac{(\epsilon - \epsilon_0)}{\epsilon} \cdot E_0 \cdot \epsilon_0 \cdot S \quad (5)$$

同时压电陶瓷叠片可以等效为一弹性体, 它满足虎克定律:

$$F = K \cdot \Delta L \quad (6)$$

其中  $K$  为压电陶瓷叠片的弹性模量,  $\Delta L$  为电介质在外电场的作用下的伸长量, 则由式(2)、(3)、式(4)、式(5)及式(6)可得:

$$K \cdot \Delta L = (Q_r + Q) \cdot E_0 = (Q_r + Q) \frac{Q \cdot \epsilon}{(\epsilon - \epsilon_0) \epsilon_0 S} \quad (7)$$

由于压电/电致伸缩陶瓷的介电常数  $\epsilon_3 \gg \epsilon_0$ , 则上式可简化为:

$$K \cdot \Delta L = (Q_r + Q) \cdot E = (Q_r + Q) \cdot \frac{Q}{\epsilon_0 S} = \frac{1}{\epsilon_0 S} (Q_r \cdot Q + Q^2) \quad (8)$$

因而有

$$\Delta L = \frac{1}{\epsilon_0 S K} (Q_r \cdot Q + Q^2) \quad (9)$$

由上式可见, 压电陶瓷的位移不仅与电介质极化电荷有关, 还与剩余极化电荷有关。由式(9)可以得到压电陶瓷位移与电场强度及电极化强度之间的关系:

$$\Delta L = \frac{Q \cdot Q_r + Q^2}{\epsilon_0 S K} = \frac{Q_r \cdot \epsilon E + \epsilon^2 E^2 S}{\epsilon_0 K} = dE + M E^2 \quad (10)$$

$$\Delta L = \frac{Q \cdot Q_r + Q^2}{\epsilon_0 S K} = \frac{Q_r P + P^2 S}{\epsilon_0 K} = gP + QP^2 \quad (11)$$

其中:  $\Delta L$  为压电陶瓷的伸长量;

$E$  为压电陶瓷的内部电场强度;

$P$  为压电陶瓷的内部电极化强度;

$\epsilon$  为压电介质的介电常数;

$\epsilon_0$  为真空中的介电常数;

$Q_r$  为极化后的剩余电荷;

$S$  为压电陶瓷的横截面积;

$K$  为压电陶瓷叠片的弹性模量;

由式(10)和式(11), 可以得到以下结论:

a (10) 式表明了压电陶瓷位移量与电场强度之间的关系, 即压电陶瓷位移量与所加电压之间的关系 ( $E = U/d$ ); (11) 式表明了压电陶瓷位移量与电极化强度之间的关系。式中的  $\epsilon$  不是常量, 而是和所加电压及加压史有关, 由关系式可见压电陶瓷的位移量与电场强度的关系式中有  $\epsilon$  项, 因而压电陶瓷位移和电场强度(电压)的特性曲线存在迟滞, 而在式(11)中不含  $\epsilon$  项, 因而采用电极化强度的控制方法可以有效的减小迟滞。

b 当  $Q_r = 0$  时表现为电致伸缩效应

此时式(10)和式(11)可以表示为:

$$\Delta L = \frac{Q^2}{\epsilon_0 S K} = \frac{\epsilon^2 E^2 S}{\epsilon_0 K} = \frac{P^2 S}{\epsilon_0 K} \quad (12)$$

c 当  $Q_r = 0$  时

(i) 若  $Q_r \gg Q = \epsilon E$ , 表现为逆压电效应

此时式(10)和式(11)可简化为:

$$\Delta L = \frac{Q \cdot Q_r}{\epsilon_0 S K} = \frac{Q_r \cdot \epsilon E}{\epsilon_0 K} = \frac{Q_r P}{\epsilon_0 K} \quad (13)$$

(ii) 当  $Q_r \gg Q = \epsilon E S$  不成立时, 逆压电效应及电致伸缩效应均存在, 通常位移—电压曲线为蝶型曲线。

图 2(a) 为四川压电与声光技术研究所生产的 W TDS-特型压电陶瓷的位移—电压曲线, 这类陶瓷一般不经过预极化, 即  $Q_r = 0$ , 表现为电致伸缩效应, 特性曲线呈二次方型。图 2(b) 为该陶瓷采用电极化控制方法的位移与控制电压(电极化强度)特性曲线。

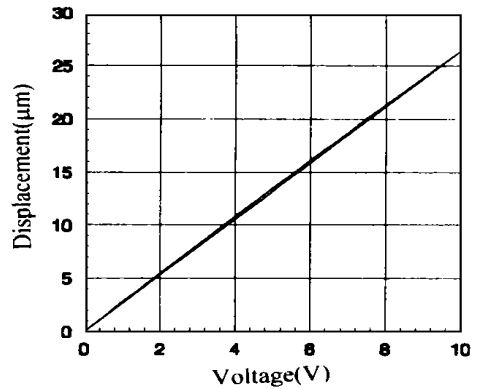
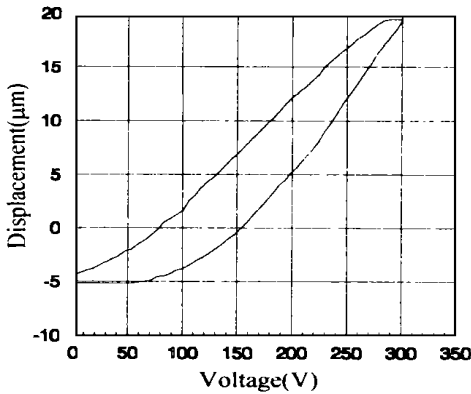


Fig 2 (a) Voltage-displacement curve of WTDS electrostrictive element      Fig 2 (b) Control voltage-displacement curve of WTDS electrostrictive element

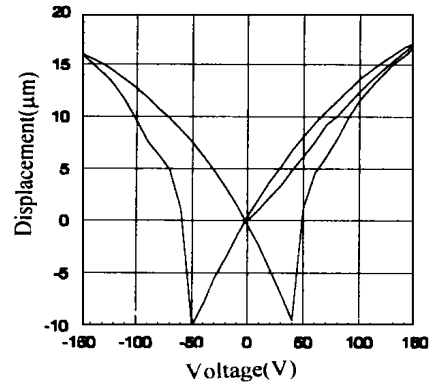
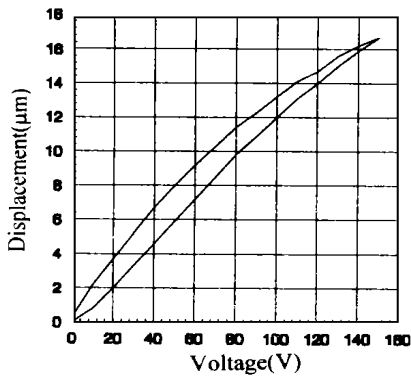


Fig 3 (a) Voltage-displacement curve of A E0505D 16 piezoelectric element      Fig 3 (b) Butterfly shape voltage-displacement curve of A E0505D 16 piezoelectric element

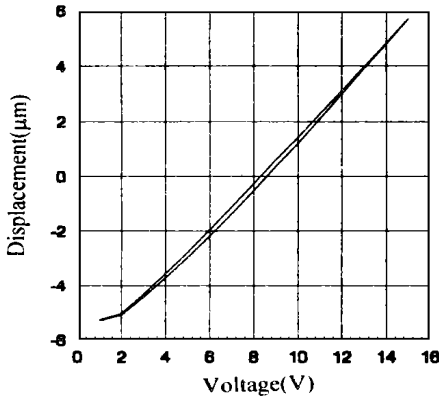


Fig 3 (c) Control voltage-displacement curve of AE0505D 16 by polarization control method

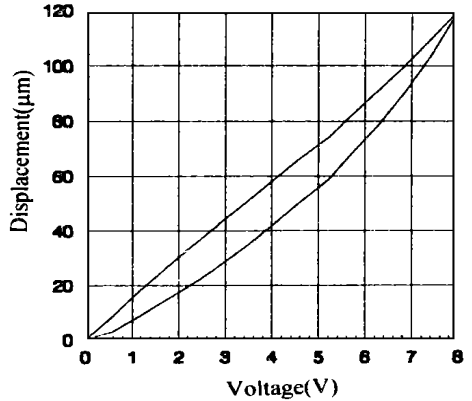


Fig 3 (d) Control voltage-real voltage curve of AE0505D 16 by polarization control method

图 3(a) 为日本 NEC 公司的 AE0505D 16 陶瓷的电压—位移特性曲线, 该陶瓷经过预极化, 由曲线可见基本为线性; 图 3(b) 为这一陶瓷在正负电压下的位移—电压特性曲线; 图 3(c) 为这一陶瓷在采用电极化强度控制方法的控制电压与位移的特性曲线, 图 3(d) 为在采用电极化控制方法的陶瓷两端实际电压与位移的曲线。由分析和实验曲线可见这一陶瓷的  $Q_r$  存在, 但  $Q_r \gg \epsilon ES$  不成立, 所以它在加正负电压后呈现蝶型曲线。

图 4 为北京声学所生产的压电陶瓷管器件在正负电压作用下的位移—电压特性曲线, 它的  $Q_r$  较大, 基本满足  $Q_r \gg \epsilon ES$ , 因而在加  $\pm 160V$  电压时仍然为完整的迟滞回线, 且线性较好。

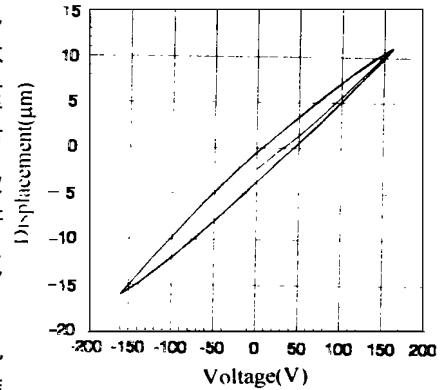


Fig 4 Voltage-displacement curve of piezoelectric tube

### 3.2 出力—位移特性

由于压电陶瓷是具有有限刚度的弹性体, 因而在受到外力后要被压缩, 压电陶瓷被压缩后的位移可以表示为:

$$\Delta L = \Delta L_0 + F/K_b \quad (14)$$

其中  $F$  为压电陶瓷所受到力, 拉力为正, 压力为负。受到拉力的场合压陶瓷必须有预紧力, 否则压电陶瓷将因不能承受拉力而损坏。

如图 5 所示为压陶瓷的输出力和位移间的关系曲线, 在空载的情况下压电陶瓷的输出位移为最大输出位移, 在最大输出力的作用下, 压电陶瓷的输出位移将为零。

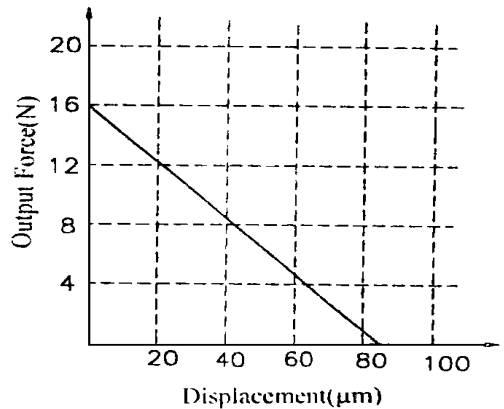


Fig 5 Output force-displacement curve of piezoelectric elements

受到力作用后压电陶瓷的电压—位移曲线也

将发生变化, 压电陶瓷的受力有两种情况, a 压电陶瓷受到恒力作用; b 压电陶瓷所受力随着压电陶瓷伸长量的变化而变化。若  $\Delta L_d$  来表示压电陶瓷在力  $F$  的作用下的压缩量, 则受到恒力作用的电压—位移曲线如图 6(a) 所示, 受到变力作用的电压—位移曲线如图 6(b) 所示。

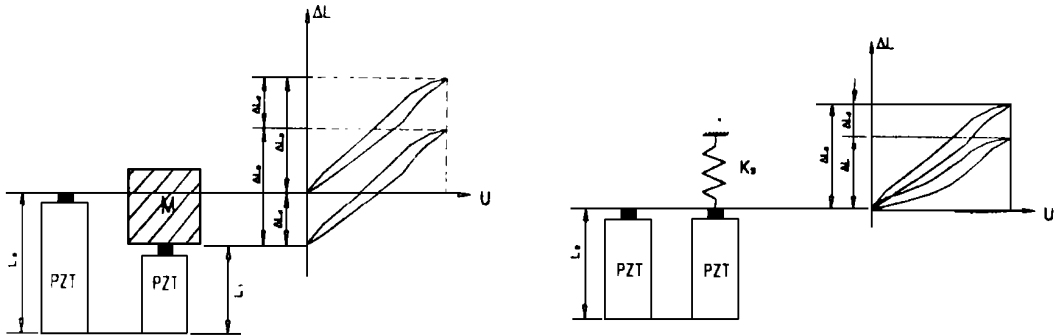


Fig. 6(a) Voltage-displacement curve of PZT under constant force

Fig. 6(b) Voltage-displacement curve of PZT with a spring

其中

$$\Delta L_d = F/K_b \quad (15)$$

$$\Delta L = \Delta L_0 \cdot \frac{K_b}{K_b + K_s} \quad (16)$$

### 3.3 温度特性

在高精度定位及某些特殊应用场合, 压电陶瓷的温度特性也是不容忽视的。压电陶瓷的温度特性主要表现在两个方面:

#### 1、线膨胀

这是指压电陶瓷随着温度的变化而伸长的特性, 由于叠堆型压电陶瓷是由多片压电陶瓷片粘接而成, 因而其线膨胀系数既受压电陶瓷片的影响, 也受陶瓷片之间连接材料的影响。

#### 2、温度对压电/电致伸缩效应的影响

压电/电致伸缩陶瓷的输出位移随着温度的增加而减小, 压电陶瓷的减小幅度较小, 在  $0 \sim 50$  范围内仅减少  $5\% \sim 8\%$ , 电致伸缩陶瓷减小幅度较大, 在  $0 \sim 50$  范围内减小量在  $65\%$ 。

压电/电致伸缩陶瓷的迟滞也随温度而变化, 压电陶瓷的变化较小, 电致伸缩陶瓷的变化较大。电致伸缩陶瓷的温度特性限制了其在高精度定位领域的应用。

### 3.4 迟滞特性

压电/电致伸缩陶瓷在光学、精密加工等领域得到广泛应用, 但是由于其存在迟滞、蠕变及非线性等缺点, 给其控制带来了困难, 而且在很多场合压电元件都被当作线性元件使用。压电陶瓷的迟滞一般在  $14\%$  左右, 且随温度变化, 压电陶瓷的迟滞变化不大; 而电致伸缩陶瓷的迟滞在不同温度范围内变化较大, 在温度大于  $30$  时, 迟滞小于  $5\%$ , 而在温度小于  $10$  时, 迟滞大于  $17\%$ , 并成指数规律增加。

目前提出的减小迟滞的方法主要有: 1) 采用电荷控制方法; 2) 采用在压电陶瓷两端串联小

电容的方法; 3) Preisach 数学模型; 4) 通用化的 Maxwell 模型; 5) 多项式近似模型; 6) 采用电阻和电容组成桥路; 7) 压电陶瓷元件位移闭环。

其中方法 1) 和 6) 用于开环场合, 方法 7) 用于全闭环控制, 而方法 2) 至方法 6) 为半闭环控制。作者在归一化的模型的基础上提出了电极化控制方法, 可以有效的减小压电/电致伸缩陶瓷的迟滞, 如图 2(b) 和图 2(c) 所示。

## 4 总 结

本文在分析压电/电致伸缩陶瓷极化机理的基础上, 推导了压电/电致伸缩陶瓷归一化模型, 得出了采用电极化强度的控制方法可以减小压电/电致伸缩陶瓷存在的迟滞的结论; 同时本文也对压电陶瓷器件的出力特性、温度特性及蠕变特性进行了分析和阐述, 为压电/电致伸缩陶瓷器件的应用提供了参考依据。

### 参 考 文 献

- 1 PRODUCTS FOR MICRO POSITIONING Physik Instrumente Company (P I), Germany, 1997
- 2 程守洙, 江之久 普通物理学 北京: 高等教育出版社, 1989
- 3 薛实福, 李庆祥 精密仪器设计 北京: 清华大学出版社, 1991
- 4 孙 慷, 张福学 压电学 北京: 国防工业出版社, 1984
- 5 FURUTANI Katsushi, URSHIBATA M itsunori, MOHRIN aotake Improvement of control method for piezoelectric actuator by combining induced charge feedback with inverse transfer function compensation. Proceeding of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium, May, 1998

## Study on the Fundamental Characteristics of Piezoelectric Element

ZHANG Tao, SUN Lining, CAI He-Gao

(Robot Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

### Abstract

With the enlargement of the application of piezoelectric element, more and more scholars pay close attentions to the fundamental characteristics of piezoelectric element. In this paper, the fundamental characteristics such as displacement vs voltage characteristics is described and analyzed in detail. The normalization model of piezoelectric element is given and the displacement characteristics of typical piezoelectric elements home and abroad is analyzed.

**Key words:** Piezoelectric element, Fundamental characteristics, Normalization model

张 涛 女, 1971 年生, 1993 年毕业于上海交通大学精密仪器系。现为哈尔滨工业大学机电控制及自动化专业读博士生, 主要从事微驱动技术及微操作系统的研究工作。