

文章编号 1004-924X(2003)03-0270-06

压电陶瓷执行器迟滞与非线性成因分析

崔玉国¹, 孙宝元¹, 董维杰², 杨志欣¹

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023;
2. 大连理工大学 电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要:从微观上系统分析了电致伸缩效应、逆压电效应和铁电效应的位移机理,表明:三种效应的位移机理是根本不同的;压电陶瓷执行器的位移主要是由逆压电效应、铁电效应所引起的,电致伸缩效应对位移的贡献极其微弱,可以忽略不计;单纯的逆压电效应是线性的,而铁电效应则是迟滞非线性的。指出了非 180°电畴转向与转向的不完全可逆,分别是造成压电陶瓷执行器非线性和迟滞的根本原因。通过实验研究了驱动电压幅值、驱动电压频率、驱动循环次数及晶片厚度对压电陶瓷执行器迟滞和非线性的影响。

关键词:执行器;压电陶瓷;迟滞;非线性
中图分类号: TP21 **文献标识码:** A

Causes for hysteresis and nonlinearity of piezoelectric ceramic actuators

CUI Yu-guo¹, SUN Bao-yuan¹, DONG Wei-jie², YANG Zhi-xin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;
2. School of Electronic and Information Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The displacement mechanisms of electrostrictive effect, inverse piezoelectric effect and ferroelectric effect are systematically analysed in a microcosmic way, and the results of analyses indicate that the displacement mechanisms of these three effects are totally different; the displacement of piezoelectric ceramic actuators is mainly due to inverse piezoelectric effect and ferroelectric effect; the contribution of electrostrictive effect to the displacement is so little that it can be neglected; pure inverse piezoelectric effect is linear, while ferroelectric effect is hysteretic and nonlinear. It is pointed out that the non-180° turn of ferroelectric domain and its incomplete reversibility are the essential causes for nonlinearity and hysteresis of piezoelectric ceramic actuators respectively. The influences of driving voltage amplitude, driving voltage frequency, number of driving voltage cycles, and wafer thickness on the hysteresis and nonlinearity of piezoelectric ceramic actuators are studied through experiments.

Key words: actuators; piezoelectric ceramics; hysteresis; nonlinearity

1 引言

压电陶瓷执行器具有许多其它执行器无可比拟的优点,如位移分辨率高、机电耦合效率高、响应快、功耗小、无噪声等,所以被广泛应用于微机

械、微电子、计算机、精密加工、精密光学、生物医学、机器人、航空航天等领域^[1-2]。但是,它同时也存在着明显的不足——在较高电场的作用下产生严重的迟滞和非线性,从而极大地限制了它在微纳定位技术中的应用。

收稿日期:2002-06-10;修订日期:2003-04-05.

基金项目:国家自然科学基金重点基金资助项目(No. 50135040);国家自然科学基金资助项目(No. 69774020)

为减小压电陶瓷执行器的迟滞和非线性,更好地发挥其性能,国内外很多学者对其迟滞和非线性的成因进行了深入的研究。在文献[3]中,基于亥姆霍兹自由能的三次展开项,并在二次近似的情况下,对压电陶瓷执行器进行了研究,认为压电陶瓷执行器在较高电场作用下的迟滞和非线性,是电致伸缩效应和铁电效应共同作用的结果。在文献[4]中,基于力电等效的原则与剩余极化的观点,分析了压电陶瓷执行器的位移特性,认为压电陶瓷执行器在较高电场作用下的迟滞和非线性,是电致伸缩效应所引起的。文献[3]和[4]的研究是基于宏观的。在文献[5-7]中,基于内摩擦与极化过程非连续的观点,认为是内摩擦所引起的粘滞造成了压电陶瓷执行器的迟滞和非线性。

本文从微观上,基于电畴转向以及转向不完全可逆的观点,深入分析了压电陶瓷执行器迟滞和非线性的成因,深刻地揭示了压电陶瓷执行器迟滞和非线性形成的物理本质。

2 压电陶瓷执行器位移的微观机理

由于压电陶瓷是铁电类压电电介质材料,所以在电场的作用下,它同时具有电致伸缩效应、逆压电效应和铁电效应。三种效应的位移机理以及对位移的贡献不同。

2.1 电致伸缩效应的微观机理及其对位移的贡献

任何电介质材料在电场的作用下都具有电致伸缩效应,但除弛豫铁电陶瓷(如 PMN, PLZT, SBN)外,其它电介质材料(包括压电陶瓷)的电致伸缩效应都极其微弱,可以忽略不计^[8]。

电致伸缩效应是由电介质的极化所引起的。在电介质的极化类型中,电子位移极化、离子位移极化和固有偶极子转向极化均可对位移做出贡献。但是,由于原子核同电子之间存在着极强的相互吸引力,正负离子之间存在着相互作用极强的离子键,分子热运动的无序化作用以及极性分子间的长程作用,所以在场强不足以破坏电介质的情况下,原子核同电子之间的相对位移、正负离子之间的相对位移、固有偶极子的转向都是极其微弱的,从而电介质在电场作用下在宏观上所表现出来的电致伸缩效应亦是极其微弱的,可以忽略不计。

弛豫铁电陶瓷之所以具有较强的电致伸缩效应,是因为其中存在着极性微区,微弱的电场就可使极性微区重新取向,也就是使极性微区转到最靠近电场的可能方向,从而使电介质表现出较大的电致伸缩应变^[8]。

2.2 逆压电效应的微观机理及其对位移的贡献

压电陶瓷是不具有对称中心的晶体电介质材料,而不具有对称中心的晶体电介质材料除因对称性极高而使逆压电效应极小的 432 点群晶体外,在电场的作用下都具有逆压电效应^[9]。

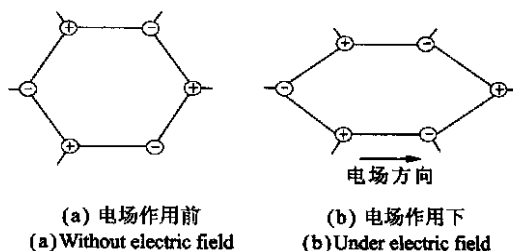


图1 逆压电效应的位移机理

Fig. 1 Displacement mechanism of inverse piezoelectric effect

不具有对称中心的晶体电介质由逆压电效应所引起的形变,如图1所示。在图示方向电场的作用下,电介质发生极化,由于最左侧的负离子和最右侧的正离子之间不存在离子键(当然也不存在其它化学键)的作用,所以在极化的过程中,它们之间可发生较大的相对位移,从而在宏观上表现出较大的逆压电效应。

逆压电效应^[10]可表示为

$$S_j = d_{ij} E_i, \quad (1)$$

式中: S_j 为在电场作用下的应变, d_{ij} 为压电常数, E_i 为所施加的场强。

可见,逆压电效应是线性的。

2.3 铁电效应的微观机理及其对位移的贡献

压电陶瓷是铁电材料,在电场的作用下具有铁电效应。铁电效应是具有铁电相的晶体的性质。所谓铁电相,是只存在于具有唯一极轴的无对称中心晶体电介质即具有自发极化的晶体电介质中,且自发极化可随外电场重新取向的一种状态。自发极化是指在晶体中,如果晶胞本身的正、负电荷中心不相重合,即晶胞具有极性,那么由于晶体构造的周期性和重复性,晶胞的固有偶极矩便会沿着同一方向整齐排列,从而使晶体即使在

外电场为零时也能处于高度的极化状态。

当晶体处于铁电相时,为了使其总自由能最小,从而使其处于稳定状态,往往形成自发极化方向不同的一个一个的小区域——电畴^[10]。例如,锆钛酸铅(PZT)系压电陶瓷可处于四方铁电相或三方铁电相,当处于四方铁电相时,其中可同时存在 180°畴(相邻畴中自发极化方向之间的夹角为 180°,下同)和 90°畴^[11];当处于三方铁电相时,除存在 180°畴外,还有 71°畴和 109°畴^[11]。图 2 示出了 PZT 系压电陶瓷中的 90°畴和 180°畴。

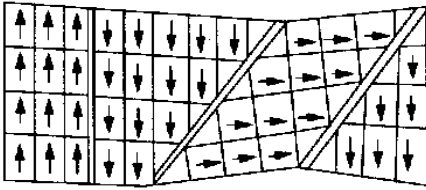


图 2 90°和 180°畴
Fig. 2 90°and 180°domains

在电场作用下,每一畴中的自发极化强度均要转向电场方向。对于晶体应变而言,只有非 180°畴在电场下的转向才呈体积效应,而 180°畴的转向对体积应变无任何影响^[11]。换言之,只有非 180°畴的转向对压电陶瓷执行器的位移作出贡献,而 180°畴的转向对压电陶瓷执行器的位移无任何贡献。在这里,需要说明的是,电畴在电场的作用下发生转向时,并不是整个电畴象偶极子那样旋转定向,而是分四步发生的:新畴的成核,畴的纵向长大,畴的横向扩张,畴的合并^[8]。

综上所述,由于压电陶瓷的电致伸缩效应对位移的贡献极其微弱,可以忽略不计,而其逆压电效应又是线性的,所以压电陶瓷执行器的迟滞与非线性只能是由铁电效应所引起的。

3 迟滞与非线性成因分析

3.1 非线性成因分析

图 3 所示为经过预极化处理的压电陶瓷晶片(未经预极化处理的压电陶瓷材料,是一种多晶体多电畴材料,对于其中的每个电畴来说,具有方向相同的自发极化,但就由多晶体多电畴组成的整体而言,因电畴的无规则排列而并不具有压电效应。为使其具有压电效应,就必须进行预极化处

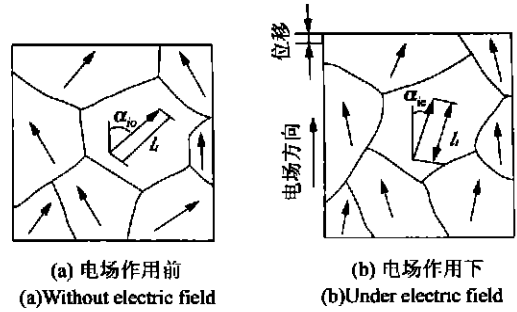


图 3 压电陶瓷晶片在电场作用下的位移

Fig. 3 Displacement of a piezoelectric ceramics wafer under electric field

理),设第 i 个电畴的自发极化轴长为 l_i ,预极化后自发极化方向与电场方向之间的夹角为 α_{i0} (如图 3(a)所示),在某一场强作用下自发极化方向与电场方向之间的夹角为 α_{ie} (如图 3(b)所示)。这样,电畴在电场的作用下转向时对位移(即形变)所作的贡献为

$$D = l_i (\cos \alpha_{ie} - \cos \alpha_{i0}), \quad (2)$$

在式(2)中, l_i, α_{i0} 是常量,而 α_{ie} 则随场强变化。在 α_{i0} 处对 $\cos \alpha_{ie}$ 进行泰勒展开并取前三项,式(2)经整理后为

$$D = l_i \left[-\sin \alpha_{i0} (\alpha_{ie} - \alpha_{i0}) - 0.5 \cos \alpha_{i0} (\alpha_{ie} - \alpha_{i0})^2 \right], \quad (3)$$

式(3)是非线性的,从而压电陶瓷执行器的位移也是非线性的。而且,场强越大,自发极化方向越接近场强方向,即 $(\alpha_{ie} - \alpha_{i0})$ 越大,从而执行器的非线性也越大。

3.2 迟滞成因分析

当场强超过临界场强(即开始使电畴转向的场强)时,PZT 系压电陶瓷的应变除了来自于逆压电效应的贡献外,非 180°畴转向对应变的贡献逐渐占据主导地位。而非 180°畴的转向是不完全可逆的(当场强降低时,有一部分非 180°畴不能恢复到场强增加时同一电平下的状态),即 $E_{n+} > E_{n-}$ (n 进行 180°畴转向的晶胞数),所以

$$n(E_{n+}) < n(E_{n-}), \quad (4)$$

这样,这部分不可逆的非 180°畴便造成了压电陶瓷执行器位移的迟滞。并且,场强越大,作非 180°畴转向的晶胞数 n 越多,而场强降低时,不能恢复到场强增加时同一电平下状态的非 180°畴

的晶胞数 n 越多,从而由式(4)可知,执行器的迟滞也越大。

由上述分析可知,非 180° 畴在电场作用下的转向造成了压电陶瓷执行器的非线性,而非 180° 畴转向的不完全可逆又造成了压电陶瓷执行器的迟滞。

4 实验研究—迟滞与非线性的影响因素

4.1 驱动电压幅值

图 4 为驱动电压幅值不同时压电陶瓷执行器的迟滞回线。电压的驱动过程如图 4 中左上部所示。压电陶瓷执行器的基本参数如表 1 所示。

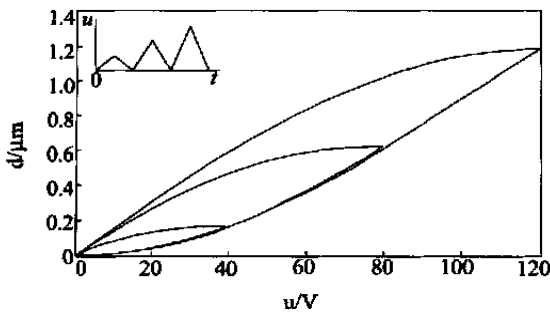


图 4 晶片厚度为 0.25 mm 时驱动电压幅值不同的迟滞回线

Fig. 4 Hysteresis loops under different amplitude of voltage

表 1 压电陶瓷叠堆执行器基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the piezoelectric ceramic stack actuators

材料类型	纵向压电应变常数 (10^{-12}C/N)	晶片厚度 (mm)	晶片层数
PZT-5	360	0.25	32

由图 4 可知,随着驱动电压幅值的增大,压电陶瓷执行器的迟滞和非线性(如表 2 所示)增大。这是因为,驱动电压的幅值增大时,场强随之增大,从而如上所述,压电陶瓷执行器的迟滞和非线性也随之增大。

表 2 压电陶瓷叠堆执行器在不同驱动电压幅值下的迟滞和线性度

Tab. 2 Hysteresis and linearity of the piezoelectric ceramic stack actuators under different amplitude of excitation voltage

驱动电压幅值 (V)	迟滞 (%)	线性度 (%)
40	4.0	1.5
80	9.8	3.9
120	16.2	6.5

4.2 驱动电压频率

图 5 所示为驱动电压频率不同时压电陶瓷执行器的迟滞回线(所采用的压电陶瓷执行器同上)。

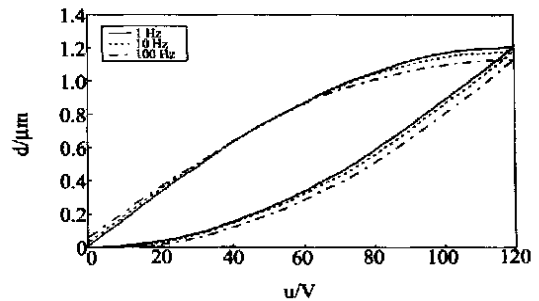


图 5 驱动电压频率不同时的迟滞回线

Fig. 5 Hysteresis loops under different frequency of excitation voltage

由 5 可知,随着驱动电压频率的增大,压电陶瓷执行器的迟滞回线略微变宽,即迟滞和非线性(如表 3 所示)略微增大。这是因为,压电陶瓷的介电常数与频率依赖关系弱^[12],从而压电陶瓷执行器的迟滞与频率依赖关系弱。

另外,由图 5 可知,随着驱动电压频率的增大,压电陶瓷执行器的位移减小。这是因为,当驱动电压频率连续变化时,随着驱动频率的增大,压电陶瓷执行器要发热,使其温度升高,剩余极化减小,从而使其位移减小。

表 3 压电陶瓷叠堆执行器在不同驱动电压频率下的迟滞和线性度

Tab. 3 Hysteresis and linearity of the piezoelectric ceramic stack actuators under different frequencies of excitation voltage

驱动电压频率 (Hz)	迟滞 (%)	线性度 (%)
1	1.61	6.6
10	17.4	7.0
100	19.4	7.8

4.3 驱动循环次数

图 6 为驱动循环次数不同时压电陶瓷执行器的迟滞回线(所采用的压电陶瓷执行器同上)。压电陶瓷执行器的迟滞和线性度如表 4 所示。

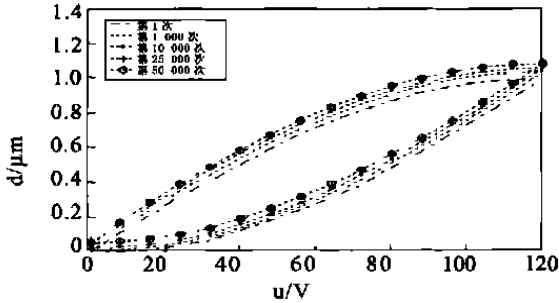


图 6 驱动循环次数不同时的迟滞回线

Fig. 6 Hysteresis loops under different excitation cycles

表 4 压电陶瓷叠堆执行器在不同驱动循环次数下的迟滞和线性度

Tab. 4 Hysteresis and linearity of the piezoelectric ceramic stack actuators under different excitation cycles

驱动循环次数	迟滞 (%)	线性度 (%)
1	16.4	6.7
1 000	15.8	6.2
10 000	14.7	5.9
25 000	13.3	5.4
50 000	12.7	5.1

由表 4 可知,随着驱动循环次数的增加,压电陶瓷执行器的迟滞和非线性减小。这是因为,压电陶瓷执行器在驱动电压的作用下,随着驱动次数的增加,会逐渐发热,使其温度升高,使电畴的运动更容易进行^[11],从而使压电陶瓷执行器的迟滞和非线性减小。

另外,由图 6 可知,当驱动循环在 25 000 次以内时,随着驱动循环次数的增多,整个迟滞回线向上漂移;当驱动循环超过 25 000 次时,迟滞回线不再向上漂移。这是因为,压电陶瓷执行器在驱动电压的作用下,随着驱动次数的增加,会逐渐发热,从而使其热伸长。这样,在一定的驱动次数内,压电陶瓷执行器的位移将增大,使整个迟滞回

线向上漂移。但另一方面,如上所述,压电陶瓷执行器发热时将其温度升高,剩余极化减小,从而使压电陶瓷执行器的位移减小。这样,当达到一定的驱动次数后,迟滞回线便不再向上漂移。

4.4 晶片厚度

图 7 为晶片厚度为 0.17 mm 时压电陶瓷执行器的迟滞回线。执行器的基本参数如表 5 所示。压电陶瓷执行器的迟滞和线性度如表 6 所示。

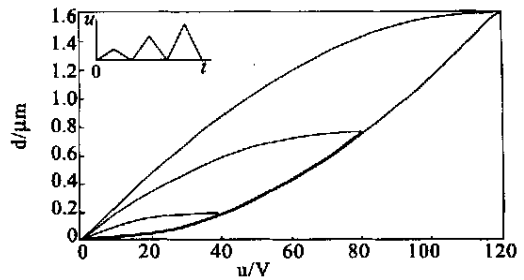


图 7 驱动电压幅值不同晶片厚度 0.17 时的迟滞回线

Fig. 7 Hysteresis loops under different thickness of wafer

表 5 压电陶瓷叠堆执行器基本参数

Tab. 5 The basic parameters of the piezoelectric ceramic stack actuators

材料类型	纵向压电应变常数 (10^{-12}C/N)	晶片厚度 (mm)	晶片层数
PZT-5	305	0.17	46

表 6 压电陶瓷叠堆执行器在不同晶片厚度下的迟滞和线性度

Tab. 6 Hysteresis and linearity of the piezoelectric ceramic stack actuators under different thickness of wafer

驱动电压幅值 (V)	迟滞 (%)	线性度 (%)
40	4.9	1.9
80	11.4	4.5
120	18.2	7.4

由表 6 可知,在相同的驱动电压幅值下,当晶片厚度减小时,压电陶瓷执行器的迟滞和非线性增大。这是因为,晶片厚度减小时,作用在压电陶瓷执行器上的场强增大,从而使其迟滞和非线性增大。

5 结束语

系统分析了电致伸缩效应、逆压电效应、铁电效应对压电陶瓷执行器位移的不同贡献,进而深

入分析了压电陶瓷执行器迟滞和非线性的微观成因,从而深刻地揭示了压电陶瓷执行器迟滞和非线性的物理本质。在此基础上,通过实验研究了驱动电压幅值、驱动电压频率、驱动循环次数及晶片厚度对压电陶瓷执行器迟滞和非线性的影响。

参考文献:

- [1] HOCKEN R J. Nanotechnology and its impact on manufacturing [A]. *Tokyo:Japan/USA Symposium on Flexible Automation* [C]. Japan, 1993. 7-15.
- [2] 蔡鹤皋,孙立宁,安辉. 压电/电致伸缩微位移器件与应用[J]. *高技术通讯*, 1994, (6): 37-40.
CAI H G, SUN L N, AN H. Piezoelectric/electrostrictive micro-displacement units and their applications [J]. *High Technology Letters*, 1994, (6): 37-40. (in Chinese)
- [3] 唐凤,黄尚廉. PZT非线性特性的研究[J]. *压电与声光*, 1997, 19(3): 180-183.
TANG F, HUANG SH L. Study on non-linearity of PZT [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 1997, 19(3): 180-183. (in Chinese)
- [4] 张涛,孙立宁,蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(5): 26-32.
ZHANG T, SUN L N, CAI H G. Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(5): 26-32. (in Chinese)
- [5] HWAN H S C, MCMEEKING R M. A finite element model of ferroelastic polycrystals [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1999, 36(10): 1541-1556.
- [6] CHANG H T, TIMOTHY N. Control of nonlinear piezoelectric stack using adaptive dither [A]. *Proceedings of the American Control Conference I Jun 21-23* [C]. 1995. 76-80.
- [7] GU YOMAR D. Piezoelectric ceramics nonlinear behavior: application to langevin transducer [J]. *Journal de Physique*, 1997, 7(6): 1197-1208.
- [8] 钟维烈. 铁电体物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1996. 391-394, 294-297.
ZHONG W L. *Physics of ferroelectrics* [M]. Beijing: Science Press, 1996. 391-394, 294-297. (in Chinese)
- [9] 张良莹,姚熹. 电介质物理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991: 355-356.
ZHANG L Y, YAO X. *Physics of dielectric* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1991. 355-356. (in Chinese)
- [10] 张福学,孙慷. 压电学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984. 119-120, 440-445.
ZHANG F X, SUN K. *Piezoelectricity* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1984. 119-120, 440-445. (in Chinese)
- [11] 许煜寰. 铁电与压电材料 [M]. 北京: 科学出版社, 1978. 124-135, 95-103, 181-185.
XU Y H. *Ferroelectrical and piezoelectric material* [M]. Beijing: Science Press, 1978. 124-135, 95-103, 181-185. (in Chinese)
- [12] 张福学,王丽坤. 现代压电学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 93-97.
ZHANG F X, WANG L K. *Modern piezoelectricity* [M]. Beijing: Science Press, 2002. 93-97. (in Chinese)

作者简介: 崔玉国(1971-),男,吉林农安人,博士研究生,研究方向:压电传感器与压电执行器,智能仪表;
孙宝元(1937-),男,吉林榆树人,教授,博士生导师,研究方向:压电传感器与压电执行器,智能仪表,压电微机器人,柴油机智能控制;
董维杰(1968-),女,吉林白山人,讲师,博士研究生,研究方向:压电传感器与压电执行器,智能仪表;
杨志欣(1973-),女,新疆石河子人,博士研究生,研究方向:压电传感器与压电执行器,压电微机器人。