

压电陶瓷微位移器的实验研究

芮小健

(南京理工大学机械学院,南京,210014)

张幼桢

(南京航空航天大学五系,南京,210016)

EXPERIMENT RESEARCH ON THE PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC CERAMIC MICROACTUATORS

Rui Xiaojian

(School of Mechanical, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210014)

Zhong Youzhen

(Department of No5, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

摘要 介绍了压电陶瓷微位移器的动、静态特性及其测量方法和实际测量系统。实验研究了逆压电效应型和电致伸缩型两种压电材料所构成的微位移器的性能。逆压电效应型微位移器位移线性度为 0.11%,重复精度 $\pm 0.01\mu\text{m}$,电压 - 位移灵敏度约为 $1\mu\text{m}/100\text{V}$ 。在 200Hz 频段内,幅频特性平直,相频曲线呈线性,相位滞后量小于 25° ;电致伸缩型微位移器的电压 - 位移呈非线性,所以位移量较大,对应电压 500V 时,位移约为 $12\mu\text{m}$ 。微位移功能逆压电效应型适用于线性度要求较高的精密控制场合;而电致伸缩型则更适用于行程较大的控制情况。

关键词 压电陶瓷,位移测量,特性

中图分类号 V233.731, TP212

Abstract The dynamic and static properties of piezoelectric ceramic microactuators are introduced, and the measuring method and systems are also described. The properties of microactuators made from two different kinds of piezoelectric ceramic materials — antipiezoelectric and electrostrictive effects are experimentally researched. The Linearity of antipiezoelectric kind is 0.11%, the repeatability is $\pm 0.01\mu\text{m}$, and the voltage - displacement sensitivity is about $1\mu\text{m}/100\text{V}$. In low frequency band below 200Hz, the amplitude - frequency curve is straight, the phase - frequency curve is linear and the phase lag is less than 25 degrees. The voltage - displacement property of electrostrictive kind is nonlinear and the displacement is relatively large; When input voltage is 500V, the output displacement is about $12\mu\text{m}$.

The experiment results show that the first kind of microactuator can be used in precision linear controls, and the electrostrictive kind is more suitable for a larger displacement situation.

Key words piezoelectric ceramics, displacement measurement, characteristics

利用压电陶瓷材料构成的精密可控微位移器是近年发展起来的一项新技术。工作原理是利用压电材料的逆压电效应或电致伸缩效应,用输入电压精密控制器件在一定方向上输出位移量。压电微位移器的位移分辨率高达 $0.006\mu\text{m}$,可根据不同的应用场合和要求,选择

1992年12月3日收到,1994年4月28日收到修改稿

不同机理的压电材料,以获得优良的位移线性度或较大的位移行程。是一种易于控制的、较理想的精密电驱动微位移器。

1 压电微位移器的工作原理

1.1 逆压电效应型

压电陶瓷晶体当处于居里温度(200~300)以下时,会呈现逆压电效应。在一定电场 E 的作用下,压电晶体将产生相应应变^[1]

$$S_i = s_{ij}T_j + d_{ni}E_n \quad (1)$$

$$(i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6; \quad n = 1, 2, 3)$$

式中 S_i 为各方向的应变值; s_{ij} 为弹性顺度常数; T_j 为各方向作用的外应力; d_{ni} 为压电常数; E_n 为作用电场强度。

研究厚度方向的位移时, $i = 3$,

$$S_3 = s_{33}T_3 + d_{33}E_3 + s_{13}(T_1 + T_2) \quad (2)$$

假设只有单方向应力作用,则厚度方向电压与位移之间的关系可写为

$$s_3 = s_{33}F_3 + d_{33}U_3 \quad (3)$$

式中 s_3 为厚度方向的微位移; F_3 为外作用力; U_3 为控制电压。

压电微位移器多利用厚度方向振动,在少数需要径向位移的场合(如梁的行波控制),可由式(1)写出相应的位移方程。

由于一般压电陶瓷材料的压电常数 d_{33} 很小,约 $(70 \sim 700) \times 10^{-12} \text{C/N}$,即作用 100V 电压,位移量仅有 $0.007 \sim 0.07 \mu\text{m}$ 。因此实用中可采用多片级联,构成压电陶瓷叠堆,使器件的位移量大大增加。

1.2 电致伸缩型

某些压电陶瓷材料的居里温度很低(在室温以下),这种材料在常温下会呈现出电致伸缩效应,在电场作用下,晶体将产生较大的应变量

$$S = ME^2 \quad (4)$$

式中 M 为电致伸缩系数。式(4)显示,由电致伸缩型材料构成的微位移器,其位移量与作用电压的平方成正比,相应位移-电压特性呈非线性。由于这种器件的静态电容较大,构成的微位移器的动态响应速度将受影响。因此它较适用作较大行程的静态精密控制、或换能器振子。

2 微位移器的静态特性

2.1 静态特性测试

压电微位移器的静态特性主要是指其电压-位移关系。压电方程中,压电材料的弹性顺度常数 s_{ij} 一般很小,约为 $10 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$,因此,外作用力 F_i 对微位移器的位移量影响极

小。但由于微位移为叠堆结构，静压力的大小会改变压电晶片粘贴层的特性，从而对微位移器的线性度等产生影响。实验和使用中应该正确测量和选择静压力的大小。图 1 为自行设计的静态特性测试系统，静压力的大小利用位移测量精确标定。该测试系统中，静压力 F_0 与膜片初始位移 δ_0 成比例关系为

$$F_0 = k \delta_0 \tag{5}$$

式中 k 为膜片刚度。这种测力方法，比过去用测力扳手测力或用库仑表测电荷的方法的精度更高，测量也更方便。

2.2 实验结果

用逆压电效应型和电致伸缩型微位移器测得静态特性如图 2 和图 3 所示。逆压电效应型微位移器在 $\delta_0 = 20 \mu\text{m}$ ， $F_0 = 4030.5\text{N}$ 时测得其电压 - 位移曲线。根据所测参数，进一步求出曲线的回归方程为

$$\delta = 0.00875 U - 0.05619 \tag{6}$$

进而求得位移量值线性度 e_1 为

$$e_1 = \left| \frac{\text{最大偏差值}}{\text{满量程位移值}} \right| \times 100\% = 0.11\% \tag{7}$$

多次加电压 - 回零实验，测得微位移器的重复精度 优于 $\pm 0.01 \mu\text{m}$ 。

电致伸缩型微位移器的静态特性在 $\delta_0 = 40 \mu\text{m}$ ， $F_0 = 8060.9\text{N}$ 时测得。其电压 - 位移曲线比较复杂，图 3 中由 A 到 B 的加载曲线为二次抛物线，经拟合得曲线方程

$$\delta = 1.717 \times 10^{-5} U^2 + 1.002 \times 10^{-2} U - 0.0289 \tag{8}$$

从图 3 中看出，电致伸缩型微位移器存在较严重的磁滞现象。

3 微位移器的动态特性

微位移器的动态特性一般指其相频特性和幅频特性。相频特性是不同频率点上输出信

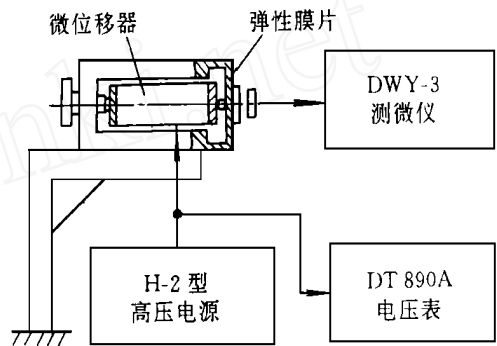


图 1 静态特性测试系统

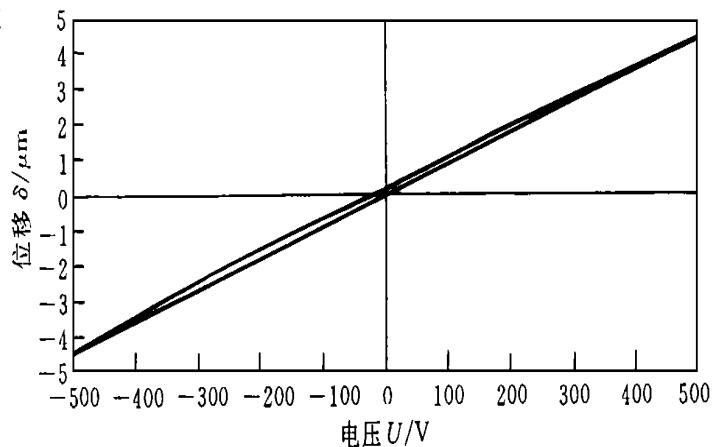


图 2 逆压电效应型微位移器的电压 - 位移曲线

号与输入信号的相位关系,反映器件的动态响应速度。幅频特性的概念在不同应用场合有所区别,作微位移控制时,器件的幅频特性指位移幅值随输入信号频率变化时的稳定度;而作位移振动换能器使用时(压电振子),其幅频特性则考虑的是一定电压下各频率点的输出力值或输出电流大小。不同的幅频特性概念对应的测试方法和系统亦不一样,为区别起见,可将后一种情况称为谐振特性^[2]。

3.1 动态特性测试

动态特性测试系统如图4所示。利用该测试系统,可测出逆压电效应型微位移器的相频和幅频特性分别如图5(a)和图5(b)所示。影响器件动态特性的主要因素:

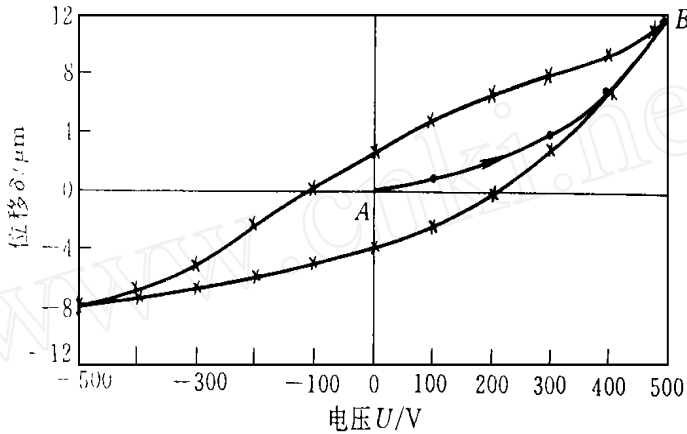


图3 电致伸缩型微位移器的电压 - 位移特性曲线

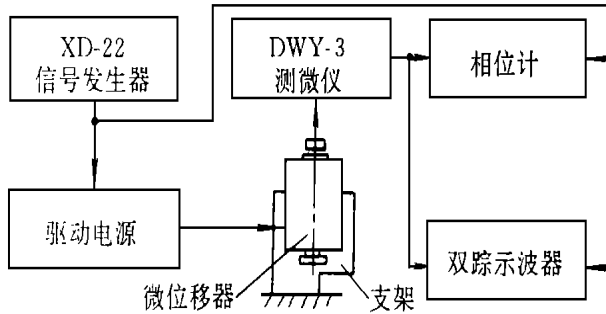


图4 动态特性测试系统

- (1) 压电微位移器是容性元件,器件的位移输出之相位与激励电压之间有 90° 的相位差;
- (2) 压电叠堆结构内部的蠕变等滞后因素主要受粘贴层材料和工艺影响。实际应用中,控制系统的动态特性还包含驱动控制电源和机械夹持结构的影响,因此还需对整个系统的特性进行测试。在动态性能要求较高的场合,需要外加校正环节以修正其相频和幅频特性。

3.2 谐振特性测试

压电微位移器用作振动换能器时,需要研究其谐振特性。测试系统如图6所示。由于压电微位移振动器的静态电容 C_0 较大,容抗很小,所以测试中应加匹配电感 L_0 , 使与之形

成并联谐振回路。测量时信号发生器的输出电压值 U_0 调成恒定, 通过测量 V_R 的大小, 得到要测的输出电流值 I_0 。图 7 所示为实测谐振特性曲线。

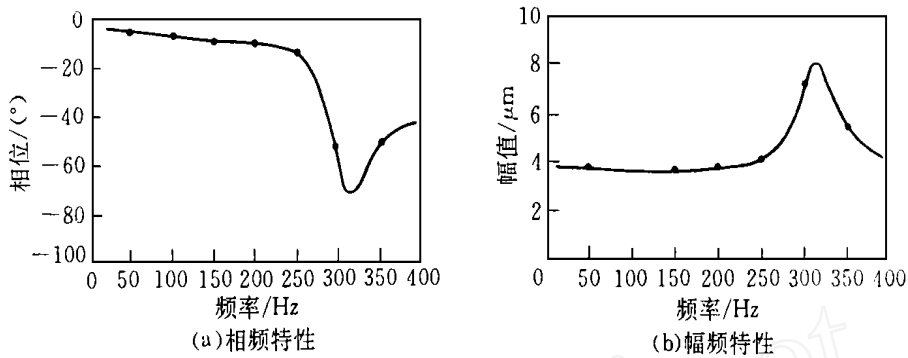


图 5 微位移器的相频、幅频特性
(a)相频特性 (b)幅频特性

4 结论

利用逆压电效应型压电陶瓷材料, 可以研究制成线性度优良、重复性好、动态响应速度快的精密可控微位移器。电致伸缩型微位移器的电压 - 位移呈非线性, 且有迟滞现象, 但位移行程较大。压电微位移器与传统机械式或机电、液压式相比, 其结构简单、尺寸小、成本低, 特别是可通过输入电压来精密控制。

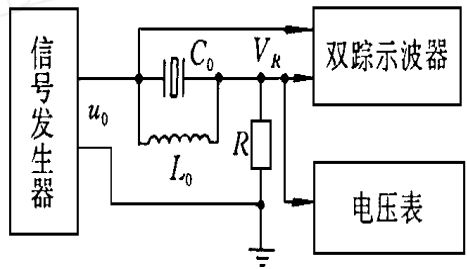


图 6 谐振特性测试系统

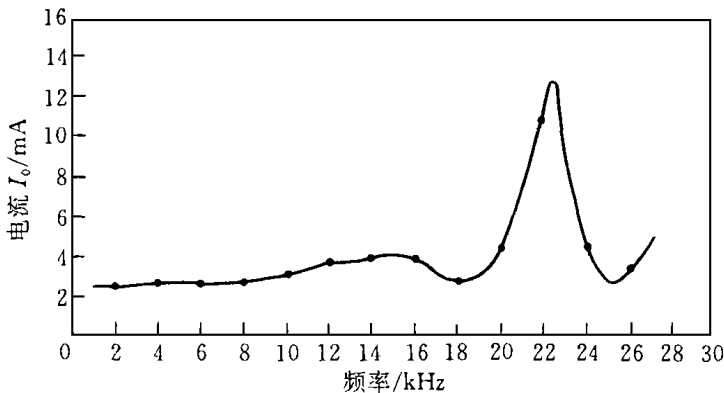


图 7 压电振子的谐振特性

参 考 文 献

- 1 奕桂冬. 压电换能与换能器阵. 北京: 北京大学出版社, 1986: 1 ~ 100
- 2 芮小健. 压电陶瓷微位移器工程应用问题研究. 压电与声光, 1992;14(6): 28 ~ 32