

文章编号 1004-924X(2016)增-0527-08

## 菱形压电微位移作动器的设计

黄卫清<sup>1</sup>, 刘雪瑞<sup>1</sup>, 王寅<sup>2</sup>, 孙梦馨<sup>1</sup>

- (1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016;
2. 华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为了在提高压电作动器行程的同时, 实现双向对称驱动, 提出了基于三角位移放大原理的菱形压电微位移作动器。分析了作动器的运动及放大机理, 并基于压电方程建立了作动器的理论静力模型。放大机构的关键参数被详细介绍。行程达  $105\ \mu\text{m}$ , 驱动器放大倍数与理论值只有 5.69% 的误差。样机实验刚度大于理论值。制作了实验样机, 开环条件下的输出特性实验表明: 静力条件下, 作动器作动方向的平均刚度约  $0.62\ \text{N}/\mu\text{m}$ 、单向自由伸长位移最大达  $42.2\ \mu\text{m}$  (160 V 电压下)、最大负载  $27.4\ \text{N}$  (160 V 电压下), 均小于理论解 (误差不超过 24.2%), 但其位移-力-电压关系符合理论模型的推论: 输出位移与控制电压、负载成正比; 非静态条件下, 输出位移的迟滞效应明显, 双向作动性能对称。最大位移达  $99.1\ \mu\text{m}$  (180 V 电压下), 且位移随频率增加有小幅下降。作动器的启动特性良好, 能够实现毫秒级快速响应 (5.4 ms 左右), 并迅速稳定。作动器控制信号为阶梯波信号时, 阶梯增量电压为 0.2 V 时, 最小步进量为  $0.1\ \mu\text{m}$ 。作动器具有对称的双向作动特性和良好的启动特性, 适用于精密定位或需要往复驱动特性对称的场合。

**关键词:** 叠层压电陶瓷; 静力模型; 双向驱动; 启动特性

**中图分类号:** TH112.5; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0527

## Design of piezoelectric micro displacement actuator

HUANG Wei-qing<sup>1</sup>, LIU Xue-rui<sup>1</sup>, WANG Yin<sup>2</sup>, SUN Meng-xin<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
  2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)
- \* Corresponding author, E-mail: mehwxq@nuaa.edu.cn

**Abstract:** To realize bi-directional symmetry drive when piezoelectric actuator journey is improved simultaneously, rhombus piezoelectric micrometric displacement actuator on the basis of triangular displacement amplification theory is put forward. Analyze movement and amplification theory of actuator, and establish theoretical static force model of actuator on the basis of piezoelectric equation. Key parameter of magnifying mechanism is introduced in detail. When journey is  $105\ \mu\text{m}$ , error between magnification times of actuator and theoretical value is 5.69%. Experiment rigidity of model machine is greater than theoretical value. Experiment model machine is manufactured. Output characteristic

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-06-17.

基金项目: 中航工业产学研项目 (No. CXY2013NH09); 国家自然科学基金项目 (No. 51375224); 华侨大学高层次人才科研启动费资助项目 (No. 15BS102); 国家自然科学基金青年项目 (No. 51405420); 江苏省自然科学基金青年项目 (BK20140474)

experiment under open loop condition shows that under static force condition, average rigidity of actuator in actuation direction is about  $0.62 \text{ N}/\mu\text{m}$  and the maximum unidirectional free elongation displacement can be  $42.2 \mu\text{m}$  (under  $160 \text{ V}$  voltage), and the maximum load is  $27.4 \text{ N}$  (under  $160 \text{ V}$  voltage), and all of them are smaller than theory resolution (error does not exceed  $24.2\%$ ). But its displacement-force-voltage relationship conforms to deduction of theoretical model; output displacement is in direct proportion to control voltage and load. Under non-static condition, hysteresis effect of output displacement is obvious and bi-directional actuation performance is symmetrical. The maximum displacement can be  $99.1 \mu\text{m}$  (under  $180 \text{ V}$  voltage), and displacement decreases slowly with increasing of frequency. Starting characteristic of actuator is good, being able to realize millisecond-level quick response (about  $5.4 \text{ ms}$ ), and it is quick and stable. When control signal of actuator is step wave signal and when step increment voltage is  $0.2 \text{ V}$ , the minimum step-by-step quantity is  $0.1 \mu\text{m}$ . Actuator has symmetrical bi-directional actuation characteristic and good starting characteristic, being applicable to precision positioning or condition where repeated drive characteristic symmetry is required.

**Key words:** overlaid piezoelectric ceramics; static force model; bi-directional drive; starting characteristic

## 1 引言

随着精密制造技术、测量技术以及微机电系统技术(MEMS)的飞速发展,精密控制系统已成为精密仪器仪表中的关键技术之一<sup>[1]</sup>。其中,高精度、高分辨率、快速响应的作动器是精密控制系统实现快速响应、准确定位的基础。压电微位移作动器,尤其是叠层压电陶瓷作动器,以其高分辨率、快速响应能力、耗能低、刚度大、可微小化等优点,近年来被广泛用于微机械装配、微型机械制造、精密光学系统、纳米加工以及光纤对接等领域的驱动元件<sup>[2-4]</sup>。然而压电陶瓷的输出位移较小,通常只有其自身长度的  $0.1\%$  (叠层压电陶瓷的最大输出位移可达数百微米)<sup>[5]</sup>,且叠层压电陶瓷的材料成本与其自身长度呈正比,为获得较大的输出位移,实际应用中常常需要设计位移放大机构<sup>[6]</sup>。

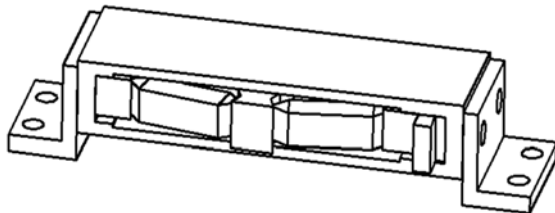
目前,对于基于压电材料的微位移放大机构的研究主要集中在杠杆放大、桥式放大、三角放大等放大机构上。其中,杠杆式微位移放大机构<sup>[7]</sup>为二级杠杆位移放大机构,能够实现的放大倍数达  $8.81$  倍,但由于其多级放大时结构尺寸较大,不利于作动器的小型化和动态性能的提升;桥式微位移放大机构<sup>[8]</sup>,利用线切割工艺加工的柔性铰链的变形输出叠层压电陶瓷的放大位移,其自

由位移放大可达  $8.06$  倍。但由于其输出位移由材料的变形输出,其结构的刚度偏小,使得结构在受外力的情况下,放大倍数下降的很快;根据三角位移放大原理设计的微位移放大机构具有输出大,结构刚度大的优点<sup>[9-10]</sup>,且其结构紧凑,有利于结构的小型化。但由于叠层压电陶瓷具有迟滞效应,且正向驱动为主动驱动,反向回程则完全依靠结构的弹性完成,难以实现往复运动机构的对称运动。为克服上述问题,2015年笔者所在团队提出了一种新型三角微位移放大机构<sup>[11]</sup>,以柔性铰链作为传动结构,实现了双向主动驱动,放大倍数达到  $2.4$  倍。

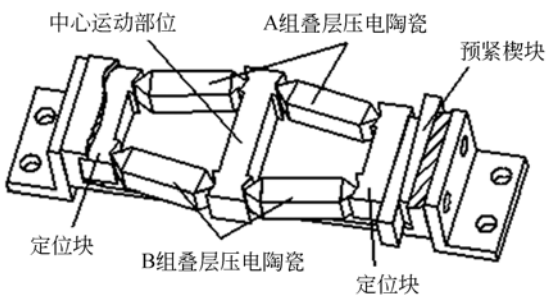
基于这种双向驱动的三角微位移放大原理,本文提出了一种改进型双向驱动压电作动器,在现有的加工、装配水平下,加工生产的驱动器在驱动过程中能够尽量避免产生传力部件的弹性变形,实现高精度、高分辨率、快速响应的一维双向对称作动。该位移放大机构以叠层压电陶瓷作为核心驱动单元,利用三角放大原理,将  $4$  个叠层压电陶瓷菱形对称布置,实现输出位移的放大的同时,获得双向对称的作动特性。基于压电方程建立机构输出力、输出位移的理论模型,分析其理论输出特性,并根据设计的放大机构制造样机进行了实验验证,并通过实验对其输出特性、迟滞效应、步进特性、最小步进位移进行研究。

## 2 作动器结构

为了满足放大位移和双向对称驱动,同时尽量避免机构的弹性变形,提出的作动器结构如图 1 所示。



(a)作动器的外部结构  
(a)External structure of actuator



(b)作动器的内部结构  
(b)Internal structure of actuator

图 1 作动器结构

Fig. 1 Structure of actuator

如图 1(b)所示,驱动器包含 4 个菱形分布的叠层压电陶瓷,2 个为一组,对称安装在机构两侧。为了保证将叠堆产生的位移直接传递到中心运动件上的同时,减小三角块和定位块之间的摩擦,叠层压电陶瓷两端固定了三角块,三角块与定位块之间线线接触;位于中央的中心运动部件通过和它线线接触的 4 个三角块与 4 个叠层压电陶瓷相连接。整体结构通过预紧楔块将结构压紧固定,同时提供叠层压电陶瓷工作状态下必要的预紧力。当结构预紧之后,根据最小势能原理,三角块能够在定位块和中心运动部件的 V 型槽中稳定,整体结构处于预紧、稳定状态。

## 3 作动器工作原理

### 3.1 三角放大原理<sup>[1]</sup>

取结构的 1/4 作为简化模型,叠层压电陶瓷

与三角块构成的整体为长边,当叠层压电陶瓷伸长 $\Delta c$ 时,根据勾股定理得:

$$b^2 = c^2 - a^2 = (c + \Delta c)^2 - (a + \Delta a)^2, \quad (1)$$

$$\Delta c^2 + 2c\Delta c = \Delta a^2 + 2a\Delta a. \quad (2)$$

忽略二阶小量,得放大机构的放大倍数:

$$\beta \approx \frac{\Delta a}{\Delta c} = \frac{c}{a} = \frac{1}{\sin \theta}. \quad (3)$$

同理当叠层压电陶瓷缩短时,也能得到式(3)。

如图 3 所示为三角位移放大倍数  $\beta$  与叠层压电陶瓷和横坐标的夹角  $\theta$  的关系曲线,可以看出当夹角  $\theta$  很小时,放大倍数可以无穷大,且放大倍数  $\beta \geq 1$ 。

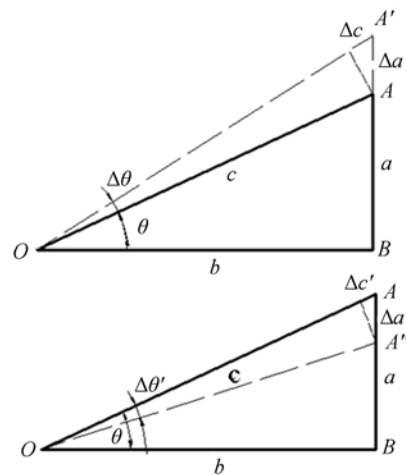


图 2 三角放大原理

Fig. 2 Triangle amplification principle

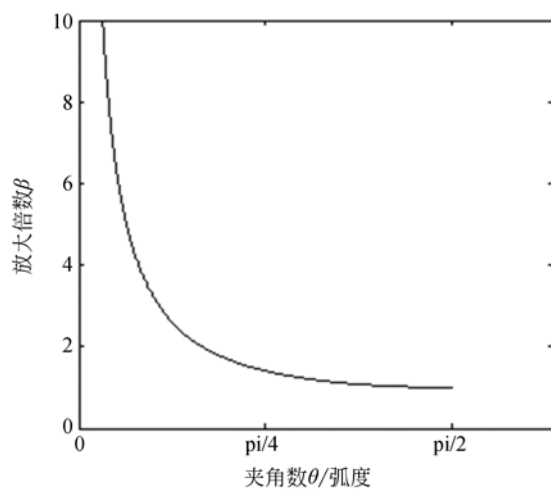


图 3 放大倍数  $\beta$  与夹角  $\theta$  的关系

Fig. 3 Relationship between amplifier factor  $\beta$  and angle  $\theta$

### 3.2 驱动器输出力分析

叠层压电陶瓷由多层  $d_{33}$  型的压电陶瓷与电极材料的串联, 可视为等效弹簧模型<sup>[12]</sup>。输出力-位移特性可以被概括为:

$$F = K^E (\delta_0 - \delta), \quad (4)$$

其中:  $\delta_0$  为施加电压时叠层压电陶瓷的自由伸长量;  $K^E$  为叠层压电陶瓷的刚度。

由单层  $d_{33}$  压电陶瓷的逆压电效应<sup>[13]</sup>, 叠层压电陶瓷为串联  $n$  层的压电陶瓷, 自由边界条件时, 若电场和变形均匀, 叠层压电陶瓷的位移-电压特性为:

$$\delta_0 = nd_{33} u. \quad (5)$$

则输出力-位移特性化为:

$$F = K^E (nd_{33} u - \delta). \quad (6)$$

当组叠层压电陶瓷施加分别电压  $U_A$ 、 $U_B$  时, 设在两组叠层压电陶瓷内部产生的力分别为  $F_A$ 、 $F_B$ , 在中心部件受外力  $P$  时, 作动器中心运动部件作动位移为  $\Delta a$ , 简化的受力如图 4 所示。

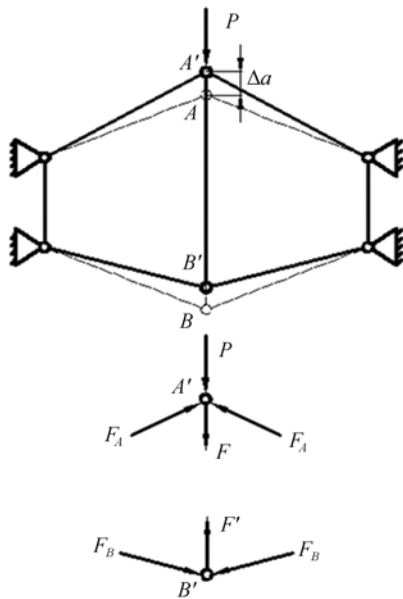


图 4 受力分析

Fig. 4 Force analysis

其中  $F$ 、 $F'$  为一对作用力和反作用力, 其大小相等, 其角度与结构参数同图 4。

化简得外力  $P$  与内力的关系为:

$$P = 2F_A \sin(\theta + \Delta\theta) - 2F_B \sin(\theta - \Delta\theta'). \quad (7)$$

将三角几何关系以及式(3)、(6), 代入(7), 得:

$$P = 2K^E \frac{a + \Delta a}{c + \frac{a}{c}\Delta a} \left[ nd_{33} U_A - \frac{a}{c}\Delta a \right] - \quad (8)$$

$$2K^E \frac{a - \Delta a}{c - \frac{a}{c}\Delta a} \left[ nd_{33} U_B + \frac{a}{c}\Delta a \right]$$

忽略分母和因式中的小量, 得:

$$P \approx 2nd_{33} K^E \frac{a}{c} (U_A - U_B) + \quad (9)$$

$$2K^E \left[ \frac{nd_{33}(U_A + U_B)}{c} - \frac{2a^2}{c^2} \right] \Delta a \approx,$$

$$K_1(U_A - U_B) - K_2\Delta a$$

其中:  $K_1 = 2nd_{33} K^E \sin\theta$ ,  $K_2 = 4K^E \sin^2\theta$

可知, 在叠层压电陶瓷的伸长范围内, 驱动器的输出力为  $(U_A - U_B)$ 、输出位移的线性函数。

输出最大输出位移为:

$$\delta_{0\text{free}} = \frac{nd_{33}}{2\sin\theta} (U_A - U_B). \quad (10)$$

当  $\Delta a = 0$  时输出力最大, 为:

$$P_{\text{max}} = 2nd_{33} K^E \sin\theta (U_A - U_B). \quad (11)$$

### 3.3 驱动器驱动信号

由于叠层压电陶瓷两端不能受负电压, 将驱动信号分解如下:

A 组、B 组叠层压电陶瓷两端电压分别为:

$$U_A = U_0 + U_C, \quad (12)$$

$$U_B = U_0 - U_C, \quad (13)$$

其中:  $U_0$  为基础电压, 用于避免叠层压电两端电压为负值使其退极化 ( $U_0$  大于  $U_C$  的峰值);

当机构受外力  $P$  时,

$$\Delta a = \frac{2K_1}{K_2} U_C - \frac{1}{K_2} P. \quad (14)$$

可以看出, 位移  $\Delta a$  与外载  $P$ 、控制电压  $U_C$  均成正比; 当外部载荷  $P$  恒定时, 通过改变控制电压  $U_C$  的大小控制着机构的输出位移大小和方向。

## 4 微位移放大机构的输出特性

根据上文分析并设计参数, 样机如图 5 所示。整机外形尺寸为  $54.4 \text{ mm} \times 27 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。叠层压电陶瓷为 NOLIAC:NAC2013-H14 型, 该陶瓷长  $14 \text{ mm}$ , 最大自由伸长位移为  $18 \mu\text{m}$  ( $180 \text{ V}$  电压下), 测量刚度为  $5.7143 \text{ N}/\mu\text{m}$ , 激光位移传感器为基恩士:LK-G5000(分辨率  $1 \text{ nm}$ )。

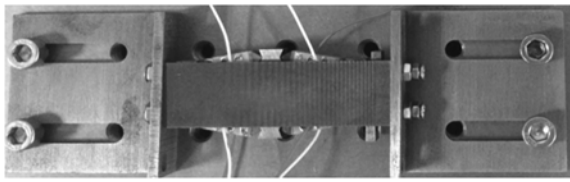


图 5 装配图

Fig. 5 Assembly diagram

装配前通过胶将三角块粘在叠层压电陶瓷两端,并对称安装于固定外壳中,构成菱形的放大机构。通过 2 个预紧楔块缓慢对 4 个叠层压电陶瓷同时施加预紧力,预紧力加载到 50 N,测试框图如图 6 所示。

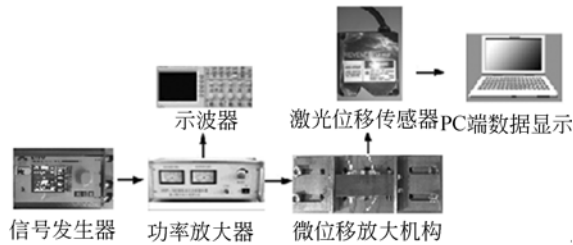


图 6 系统框图

Fig. 6 System chart

4.1 样机刚度实验

图 7 所示为样机加载测试系统,以砝码作为加载的工具,激光头的激光垂直于中心运动部件表面。

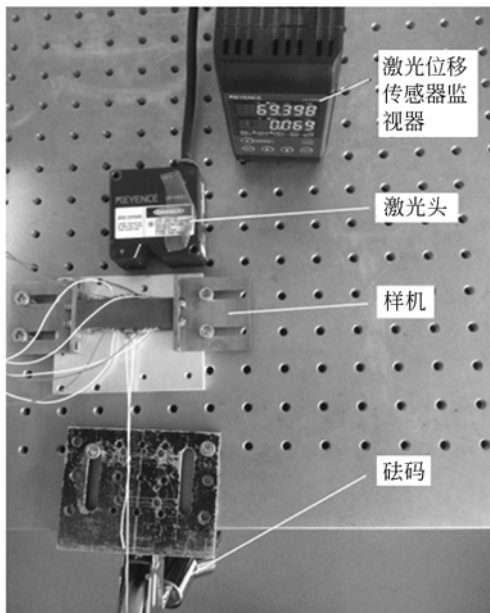


图 7 样机加载测试系统

Fig. 7 Experiment of the prototype when loaded

改变控制电压从 40 V 到 160 V,增减砝码测得作动器在受外力作用下的外力-位移数据如图 8 所示。不同电压下,作动器在作动方向的刚度近似为恒定,当控制电压  $U_c$  恒定时,作动器的输出位移与外力成正比;当外力恒定时,作动器输出位移与控制电压  $U_c$  成正比。

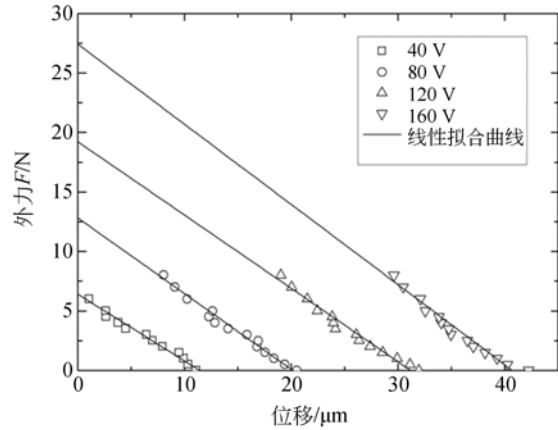


图 8 不同电压下的外力-位移测量值与拟合直线

Fig. 8 Measured and Linear fitting curve of force-displacement under different voltages

四组控制电压  $U_c$  下的外力-位移拟合曲线如式(15),其位移单位为微米:

$$\begin{aligned}
 40V: F &= -0.562\Delta a + 6.4 \\
 80V: F &= -0.637\Delta a + 12.8 \\
 120V: F &= -0.617\Delta a + 19.2 \\
 160V: F &= -0.674\Delta a + 27.4
 \end{aligned} \tag{15}$$

计算测量结果,并与理论值对比如表 1 所示。

表 1 测量值与理论值的比较

Tab. 1 Measurereults and comparison with theory

电压		刚度/ (N/ $\mu$ m)	单向最大输 出位移/ $\mu$ m	最大负载/ N
40 V	理论值	-0.69	11.5	7.9
	实验值	-0.56	11.1	6.4
	误差/%	22.6	3.8	24.0
80 V	理论值	-0.69	23.0	15.9
	实验值	-0.64	20.5	12.8
	误差/%	7.8	12.2	24.2
120 V	理论值	-0.69	34.5	23.8
	实验值	-0.62	31.9	19.2
	误差/%	10.1	8.1	23.9
160 V	理论值	-0.69	46.1	31.8
	实验值	-0.67	42.2	27.4
	误差/%	3.0	9.2	16.1

可以看出,实际测量结果的刚度、最大输出位移、最大负载相对理论值偏小,其中随电压增大,实际测量刚度逐渐增大;最大输出位移与理论相对误差较小,不超过 12.2%;最大负载与理论值的误差偏大。

### 4.2 迟滞效应

叠层压电陶瓷输出位移与驱动电压之间存在多值对应的迟滞现象<sup>[5]</sup>。

设置控制信号  $U_c$  为三角波,基础电压  $U_0$  为三角波的幅值,通过信号发生器产生两路完全偏置反向的三角波信号。通过激光位移传感器读出不同频率控制电压下的迟滞回线如图 9 所示。

图中可以看出,作动器的位移-电压输出曲线在非静态,存在明显的迟滞现象;作动器的最大位移随频率增加而缓慢减小,迟滞环的形状不变;迟滞环为中心对称图形,这证明了作动器有双向对称的作动特性。

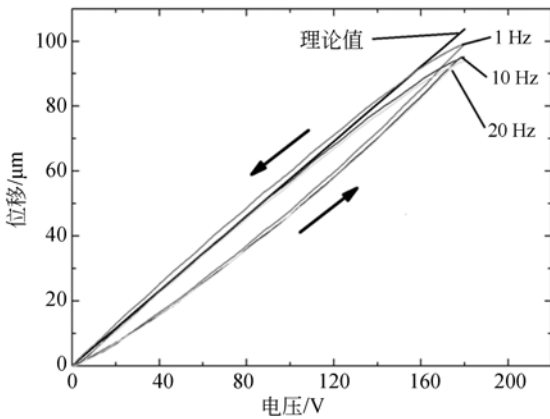


图 9 1 Hz、10 Hz、20 Hz 下作动器输出的迟滞回线  
Fig. 9 Hysteresis loop of actuator under 1 Hz, 10 Hz, 20 Hz

### 4.3 阶跃响应

作动器的阶跃响应反应了其动态特性,图 10 为开环控制下,不同幅值的阶跃电压激励下,中心运动件的位移阶跃响应(中心运动件约 6g)。

通过线性拟合上升阶段的曲线,可得 20 V - 100 V 的阶跃电压下,中心运动件的响应速度分别为:15 71  $\mu\text{m/s}$ ,3 602  $\mu\text{m/s}$ ,5 877  $\mu\text{m/s}$ ,8 227  $\mu\text{m/s}$ ,10 373  $\mu\text{m/s}$ 。响应时间分别为:5.4 ms, 5.4 ms, 5.29 ms, 5.27 ms, 5.23 ms。可以认为,作动器的响应速度随控制电压的增大而增大,响应时间基本不发生改变。同时,作动器在达到峰值后迅速稳定,启动特性良好。

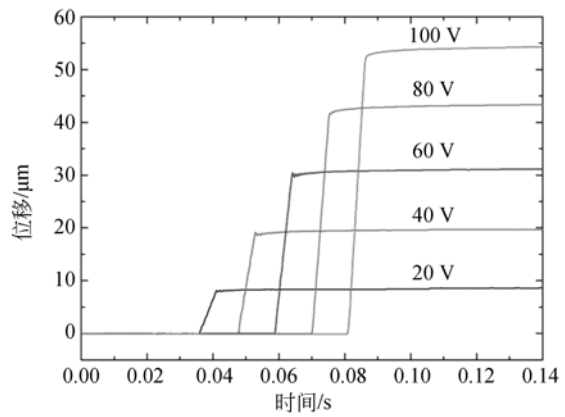
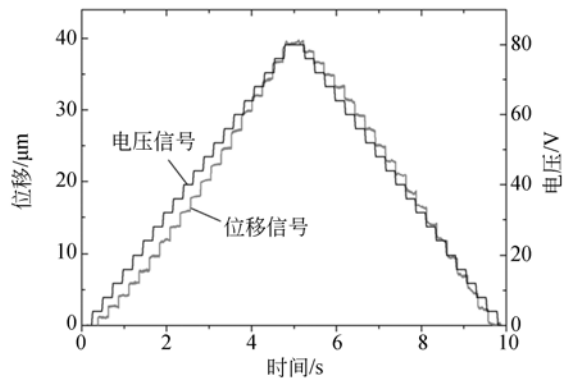


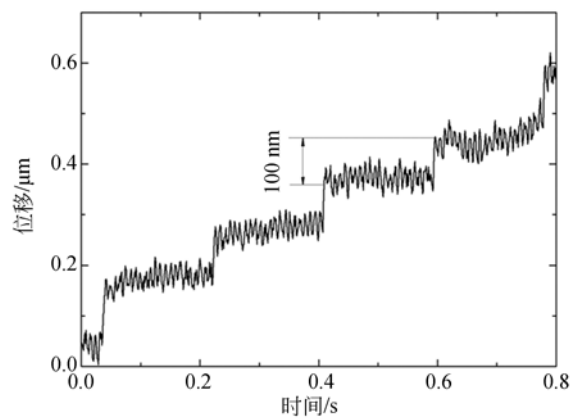
图 10 不同电压幅值时作动器的阶跃响应  
Fig. 10 Step response under different voltages

### 4.4 最小步进位移

作动器的最小步进位移决定了其驱动时的定位精度,采用与图 6 相同的测试系统,信号发生器产生阶梯波信号作为控制电压。



(a)开环控制下每级4V阶梯信号下位移输出  
(a)Output displacement under step voltage of 4V with open loop control



(b)开环控制下最小步进位移  
(b)The minimum displacement step with open loop control

图 11 开环控制阶梯信号下的位移输出  
Fig. 11 Output displacement under step voltage with open loop control

开环控制下,当每级阶梯电压为 4 V 时,作动器的位移输出如图 11(a),可以看出由于受作动器迟滞效应的影响,作动器的位移与控制电压的形状不能完全吻合(电压上升时位移偏小,电压下降时位移偏大)。

调节每级阶跃电压逐步减小,从 4 V 减小至 0.2 V,当步进电压为 0.2 V 时,其位移-时间曲线如图 11(b)所示,可以看出每级位移步进幅值约 0.3  $\mu\text{m}$ 。受噪声的影响(振幅约 0.05  $\mu\text{m}$ ),当每级阶跃电压幅值小于 0.2 V 时,作动器的输出的步进位移与噪声无法分辨,因此在此开环情况下,视作动器的最小步进位移为 0.1  $\mu\text{m}$ 。

## 5 结 论

本文提出了一种利用三角形位移放大原理的双向压电作动器,区别于现有通过弹性变形实现输出位移放大的位移放大机构,将位移直接放大

输出于作动件,建立了结构的理论模型并进行了实验验证,实验证明作动器在放大位移的同时,具有对称的双向作动特性和良好的启动特性。基于压电方程建立了结构的输出特性理论模型,并进行了样机实验验证。实验结果说明:静力条件下,实际测量的平均刚度约为 0.62 N/ $\mu\text{m}$ 、单向自由伸长位移最大 42.2  $\mu\text{m}$ (160 V 电压下)、最大负载 27.4 N(160 V 电压下),均小于理论值,最大误差不超过 24.2%。但是实验值拟合曲线规律同理论建立的模型相同,即输出位移与控制电压、负载成正比,理论模型具有设计参考价值;在非静态控制电压的激励下,输出位移的迟滞效应明显,双向作动性能对称。最大位移达 99.1  $\mu\text{m}$ (180 V 电压下),且位移随频率增加有小幅下降;作动器的启动特性良好,能够毫秒级快速响应,并迅速稳定;在开环控制下(噪声的影响下),测得作动器的最小步进位移约 0.1  $\mu\text{m}$ 。

## 参考文献:

- [1] TADIGADAPA S. Piezoelectric Microelectromechanical Systems-challenges and Opportunities [J]. *Procedia Engineering*, 2010,5:468-471.
- [2] 张世忠. 用于 SEM 微纳操作的粘滑驱动精密运动定位台的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
ZHANG SH ZH. Study on the precision motion positioning platform driven by stick slip for SEM micro nano manipulation [D]. *Harbin; Harbin Engineering University*, 2014;1-118. (in Chinese)
- [3] CHEN J, ZHANG C, XU M, *et al.*. Rhombic micro-displacement amplifier for piezoelectric actuator and its linear and hybrid model [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015(50-51): 580-593.
- [4] 朱华, 曹如意, 管磊. 应用于干涉显微镜的直线压电作动器 [J]. *光学精密工程*, 2013,21(6): 1524-1530.  
ZHU H, CAO R Y, JIAN L. Linear piezoelectric actuator applied to interference microscope [J]. *Opt. Precision Eng*, 2013, 21(6): 1524-1530. (in Chinese)
- [5] UCHINO K. *Ceramic Actuators: Principles and Applications*[M]. MRS BULLETIN, 1993: 42-48.
- [6] 顾守东, 杨志刚, 江海, 等. 压电驱动液压放大式喷射系统[J]. *光学精密工程*, 2015(06): 1627-1634.  
GU S D, YANG ZH G, JIANG H, *et al.* Piezoelectric driven hydraulic amplification jetting system [J]. *Opt. Precision Eng*, 2015,23(6):1627-1633. (in Chinese)
- [7] 李会文, 吴晖辉, 胡俊峰. 一种位移放大微动平台的设计和特性分析[J]. *机床与液压*, 2014(15): 101-103.  
LI H W, WU H H, HU J F. Properties analysis and design of a displacement amplification micro-stage [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2014, 42(15):101-103. (in Chinese)
- [8] LIU P, YAN P. A new model analysis approach for bridge-type amplifiers supporting nano-stage design [J]. *Mechanism and Machine Theory*. 2016, 99: 176-188.
- [9] MURAOKA M, SANADA S. Displacement amplifier for piezoelectric actuator based on honeycomb link mechanism [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 157(1): 84-90.
- [10] 马立, 谢炜, 刘波, 等. 柔性铰链微定位平台的设计 [J]. *光学精密工程*, 2014,22(2): 338-345.

- MA L, XIE W, LIU B, *et al.*. Design of micro-positioning stage with flexure hinge[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 238-245. (in Chinese)
- [11] 黄卫清, 史小庆, 王寅. 菱形压电微位移放大机构的设计[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 803-809.
- HUANG W Q, SHI X Q, WANG Y. Design of Diamond Piezoelectric Micro Displacement Amplification Mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 803-809. (in Chinese)
- [12] PREUMONT A. *Piezoelectric systems* [M]. Springer Netherlands, 2006, 95-130.
- [13] 陶宝琪. 智能材料结构[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- TAO B Q. *Intelligent Material Structure*[M], Beijing: National Defence Industry Press, 1996. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘雪瑞(1992—),女,江苏宿迁人,硕士研究生,2014年于南京航空航天大学获得学士学位,主要从事压电精密驱动技术的研究。E-mail: liuxr@nuaa.edu.cn

#### 导师简介:



黄卫清(1965—),男,江苏南通人,教授,博士生导师,1987年、1990年于南京航空航天大学分别获得学士、硕士学位,1999年于香港理工大学获得博士学位,主要从事压电精密驱动技术的研究。E-mail: mehqw@nuaa.edu.cn