

文章编号 1004-924X(2015)01-0184-07

## 杠杆式尺蠖压电直线驱动器

马立<sup>1,2</sup>, 肖金涛<sup>1\*</sup>, 周莎莎<sup>1</sup>, 孙立宁<sup>2</sup>

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;

2. 苏州大学 机器人与微系统研究中心, 江苏 苏州 215021)

**摘要:**设计了一种基于尺蠖运动原理的压电直线驱动器,用于解决光学领域中的精密定位问题。该驱动器采用了对称杠杆式位移放大机构,在保证钳紧力的同时,可以获得较大的驱动位移。阐述了尺蠖式压电驱动器的工作原理,对杠杆式柔性放大机构的位移损失、压电陶瓷与柔性机构的耦合特性及钳位机构与中间驱动机构的刚度进行了分析。利用有限元软件 Ansys 对钳位机构和驱动机构的变形、应力、输出位移和固有频率等参数进行了仿真分析。最后,搭建了实验平台,测试了驱动器的各项性能。测试结果显示,该驱动器的行程为 $\pm 25$  mm,钳紧力为 17 N,承载力为 11 N,最大和最小步距分别为 55  $\mu$ m 和 60 nm。当驱动电压为 150 V 时,驱动器的最高驱动速度为 1.259 mm/s。得到的性能指标满足光学领域精密定位需要。

**关键词:**尺蠖驱动器;柔性铰链;压电陶瓷;有限元分析

中图分类号:TN384 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152301.0184

## Linear lever-type piezoelectric inchworm actuator

MA Li<sup>1,2</sup>, XIAO Jin-tao<sup>1</sup>, ZHOU Sha-sha<sup>1\*</sup>, SUN Li-ning<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation,  
Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Robotics and Microsystem Center, Soochow University, Suzhou 215021, China)

\* Corresponding author, E-mail: xjt19890115@163.com

**Abstract:** A linear lever-type piezoelectric inchworm actuator is designed to implement the high precision positioning of optical field. The actuator adopts the displacement amplification mechanism of symmetric lever, which offers enough clamping force while obtains a larger driving displacement. The working principle of piezoelectric inchworm actuator is presented. And the displacement loss of the flexible amplification mechanism, the coupling characteristics between piezoelectric ceramics and flexible mechanism, and the stiffness and driving mechanism of the clamping mechanism are analyzed. The finite element method is used to simulate the clamping mechanism and the driving mechanism, then the deformation, stress, output displacement and natural frequency are all analyzed. An experimental platform is set up to test the performance of the actuator. The results on the actuator are

收稿日期:2014-03-25;修订日期:2014-05-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50905105);上海市自然科学基金资助项目(No. 13ZR1415800);上海市教育委员会科研创新项目(No. 14YZ008);江苏省先进机器人技术重点实验室科研基金资助项目(No. JAR201304)

shown that the travel range, clamping force and the bearing capacity for the actuator are 25 mm, 17 N, and 11 N, respectively. Moreover, the maximum step is 55  $\mu\text{m}$ , and the minimum step is 60 nm, respectively. By applying a driving voltage of 150 V, it offers the highest driving speed of 1.259 mm/s. these data meet the demands of the precision positioning in the optical field.

**Key words:** inchworm actuator; flexible hinge; piezoelectric ceramic; finite element analysis

## 1 引言

随着微机械加工、超精密加工与测量、精密光学工程、生物工程、现代医学、航空航天等领域的迅速发展,传统的直线电机受工作原理和机械结构的限制,已无法满足超精密和高精度定位的要求,迫切需要纳米级、亚纳米级精度的超精密直线驱动器<sup>[1-3]</sup>来担当其中的定位系统。目前,各种采用新型功能材料、物性效应的直线驱动器得到迅速发展,包括磁致伸缩驱动器、电致伸缩驱动器、静电驱动器、电流变驱动器、形状记忆合金驱动器、压电驱动器<sup>[4-8]</sup>等。其中压电驱动器采用压电材料的逆压电效应实现驱动与定位,具有结构简单、响应速度快、定位精度高、输出力大、不发热、不产生磁场及不受磁场影响等特性,应用更为广泛。

尺蠖式压电驱动器通过模仿尺蠖的运动,可将压电元件的单步位移进行双向累积,具有大行程、高分辨率、高刚度、响应速度快、驱动器体积小、驱动力大、功耗低、不受电磁干扰的影响等特点,尤为引人注目<sup>[9]</sup>。Li Jian 和 Ramin Sedaghati<sup>[10]</sup>设计了用于工业机器人的尺蠖式压电驱动器,采用圆柱套筒样式结构,驱动器最大输出力为 55 N,最小位移为 8  $\mu\text{m}$ 。张志军和许明龙<sup>[11]</sup>研制的行走式尺蠖驱动器,两侧的箝位机构采用箝位块代替紧定螺钉进行预紧,该驱动器行程为 8 mm,速度为 0.8 mm/s,输出力为 4 N。张兆成等<sup>[12]</sup>研制了一种行走式尺蠖驱动器,采用两根平行的导向轴代替传统的导轨结构,可以使驱动器免受轴向力的影响。驱动器行程为 20 mm,最大驱动速度为 1.180 2 mm/s。

本文针对光学领域中的精密定位需要,提出了一种基于杠杆式柔性铰链放大的新型行走式尺蠖压电直线驱动器,对其进行了理论分析和有限元分析,搭建了驱动器的测试平台,并对驱动器的性能进行了测试。

## 2 尺蠖驱动器的组成和工作原理

### 2.1 尺蠖式压电驱动器的组成

图1所示为尺蠖式压电驱动器结构,主要由基座、基准挡板、调节挡板、导向机构、柔性机构、压电陶瓷和垫片等组成。其中,柔性机构是驱动器的动子,包括两端的箝位机构和中间的驱动机构。

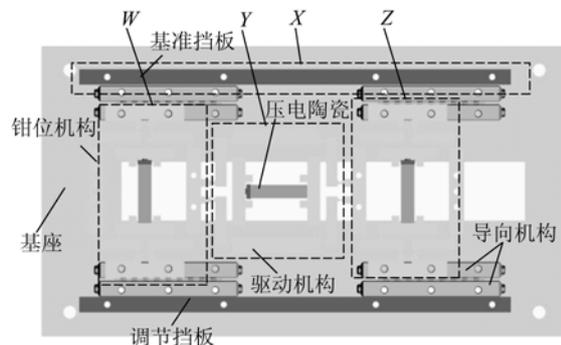


图1 尺蠖式压电驱动器的结构图

Fig. 1 Structure of piezoelectric inchworm actuator

3个压电陶瓷通过预紧机构固定在柔性机构的安装槽内,导向机构采用两对交叉滚子导轨。基准挡板与调节挡板分别固定于基座的上、下两侧,基准挡板用于保证与之接触的两对交叉滚子导轨上半部分的外侧导轨的直线度,调节挡板用于调节每副交叉滚子导轨的上、下部分的间距、平行度及交叉滚子导轨的内部间隙,直至驱动器动子正常运动。两副交叉滚子导轨的外侧导轨与基座相连,而驱动器动子的箝位部分即与两副交叉滚子导轨的内侧导轨连接。

柔性机构采用 65Mn 由线切割加工而成,采用单轴双边直圆式柔性铰链。两端的箝位机构和中间的驱动机构结构相同,均采用对称式一级杠杆放大结构。

### 2.2 尺蠖式压电驱动器的工作原理

该驱动器通过调整压电陶瓷的通电顺序,使柔性机构沿着导向机构运动,原理如图2所示。

(1)给左侧钳位机构 W 中陶瓷通电,陶瓷驱动钳位机构 W 伸长,使钳位机构带动导轨与定导轨 X 压紧,此时,结构左侧在沿导轨方向被固定;(2)保持左侧钳位机构 W 中陶瓷通电,并给中间驱动机构 Y 中陶瓷通电,压电陶瓷会使中间机构沿导轨方向伸长,由于结构左侧已固定,因此会推动结构右侧向右移动;(3)保持 W、Y 中陶瓷通电,并给右侧钳位机构 Z 中陶瓷通电,使结构右侧钳紧;(4)保持 Y、Z 中陶瓷通电,将 W 中陶瓷断电,左侧钳位机构 W 缩短回原长;(5)保持 W 中陶瓷断电、Z 中陶瓷通电,并将 Y 中陶瓷断电,这时中间驱动机构 Y 缩短并带动左侧钳位机构 W 向右移动一步;(6)Y、Z 保持原状,W 中陶瓷通电,W、Z 钳紧导轨,整个机构向右移动一步,完成一个循环。重复该循环,机构就能连续向右运动。改变机构中陶瓷的通电顺序,机构也可连续向左运动。

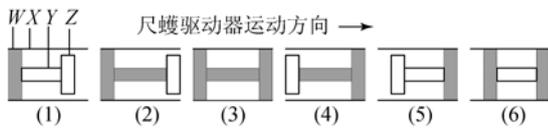


图 2 工作原理

Fig. 2 Work principle

### 3 机构的理论计算

#### 3.1 柔性机构的相关参数计算

柔性机构中,柔性铰链均采用单轴双边直圆式柔性铰链<sup>[13-14]</sup>,结构如图 3 所示。其中,R 为柔性铰链的切割半径,b 为柔性铰链的宽度,t 为柔性铰链的厚度,其设计尺寸分别为  $R=1.5\text{ mm}$ ,  $b=10\text{ mm}$ ,  $t=0.7\text{ mm}$ 。

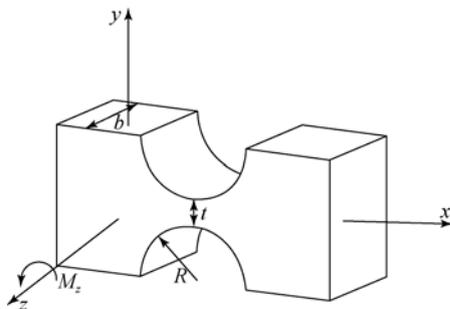


图 3 单轴双边直圆式柔性铰链的结构

Fig. 3 Structure of uniaxial bilateral right circular flexure hinge

由于柔性机构为平面式结构,柔性铰链主要受到绕 z 轴的弯曲力矩和沿 x 轴的轴向拉、压两种类型作用。因此主要计算柔性铰链的弯曲刚度和轴向刚度。

在力矩  $M_z$  的作用下,直圆式柔性铰链的弯曲刚度计算公式为:

$$k_m = \frac{M_z}{\alpha} = \frac{EbR^2}{12f}, \quad (1)$$

其中:E 为材料的弹性模量(MPa);b 为柔性铰链的宽度(mm);R 为柔性铰链的切割半径(mm); $\alpha$  为柔性铰链的偏转角; $f = \frac{2\beta^3(6\beta^2+4\beta+1)}{(2\beta+1)(4\beta+1)^2} + \frac{12\beta^4(2\beta+1)}{(4\beta+1)^2} \cdot \arctan \sqrt{4\beta+1}$  ( $\beta = R/t$ , t 为柔性铰链的厚度(mm))。

柔性铰链轴向刚度为:

$$k_x = \frac{Eb}{\frac{2(2b+1)}{\sqrt{4b+1}} \cdot \arctan \sqrt{4b+1} - \frac{\pi}{2}}. \quad (2)$$

柔性机构中,钳位机构和驱动机构的结构和工作原理相同,只有尺寸不同。图 4 所示为柔性机构中钳位和驱动机构原理。

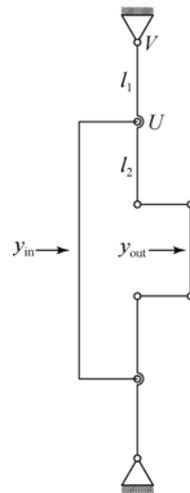


图 4 柔性机构的简化原理图

Fig. 4 Simplified schematic diagram of flexible mechanism

该机构采用对称式一级杠杆放大结构,其理论输入、输出位移关系为:

$$y_{out} = A \cdot y_{in}, \quad (3)$$

其中:  $y_{out}$  为机构的输出位移,  $y_{in}$  为机构的输入位移,  $A=(l_1+l_2)/l_1$  为机构的几何放大倍数。

考虑到柔性机构的受力特性,假设柔性机构的变形均是由铰链的变形引起的(铰链之外的其他位置没有变形)。由于铰链不光有弯曲变形,还有轴向的拉伸或压缩变形,因此,整个机构的位移放大有所损失。实际的输入、输出关系为:

$$y_{out} = A \cdot y_{in} - \left[ \frac{A(A-1)}{2k_{x_A}} + \frac{A^2}{2k_{x_B}} \right] \cdot [k_p + 2k_f] \cdot y_{in}, \quad (4)$$

其中:  $k_{x_A}$ 、 $k_{x_B}$  分别为图 4 中柔性铰链 U 点、V 点的轴向刚度,  $k_p$  为压电陶瓷驱动器的刚度,  $k_f$  为整个柔性机构的刚度。  $y_{in}$  是指柔性机构的输入位移,但由于压电陶瓷的刚度并不是远大于柔性机构的刚度(其相对刚度并不近似等于 1),所以并不等于压电陶瓷的伸长量,其间的关系为:

$$y_{in} = \frac{k_p}{k_p + 2k_f} \cdot \Delta x, \quad (5)$$

其中:  $\Delta x$  为压电陶瓷的伸长量。

柔性机构的刚度  $k_f$  可以通过能量原理得出,具体为压电陶瓷的变形势能(输入能量)等于柔性机构的弹性势能(输出能量):

$$\frac{1}{2} k_f (y_{in})^2 = \frac{1}{2} \sum k_{m_i} \theta_i (y_{in})^2 + \frac{1}{2} \sum k_{x_i} \delta_i (y_{in})^2, \quad (6)$$

其中:等式右端第一项为所有柔性铰链的弯曲变形能总和,第二项为所有柔性铰链的轴向变形能总和,  $\theta_i$  为柔性铰链的偏转角,  $\delta_i$  为柔性铰链的轴向变形。

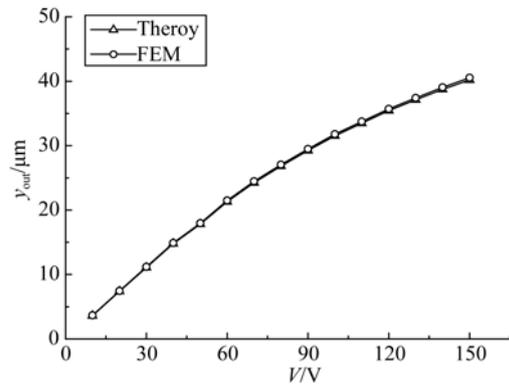
最终柔性机构的刚度公式为:

$$k_f = \sum k_{m_i} \theta_i + \sum k_{x_i} \delta_i. \quad (7)$$

### 3.2 钳位机构和驱动机构位移输出

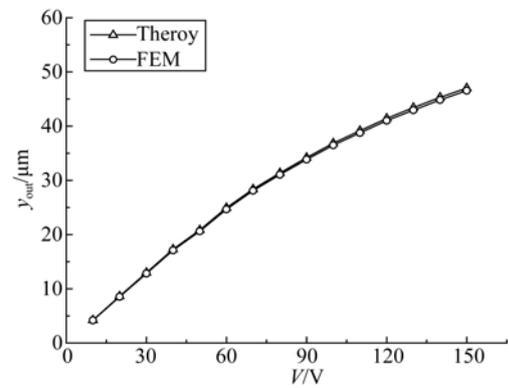
分别计算钳位机构和驱动机构在不同输入电压下的输出位移。

图 5 分别为钳位机构和驱动机构的理论计算结果和有限元结果,两者之间误差很小,分别为 2.4% 和 1.13%,验证了理论计算结果的正确性。



(a) 钳位机构位移输出

(a) Output of clamping mechanism



(b) 驱动机构位移输出

(b) Output of driving mechanism

图 5 理论分析和有限元结果对比

Fig. 5 Comparison results between theoretical analysis and finite element

## 4 机构的有限元分析

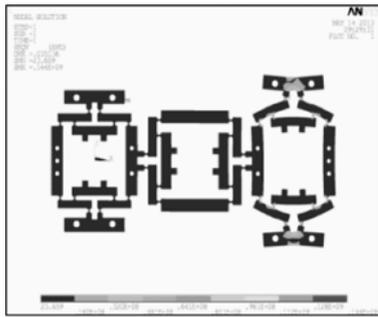
采用有限元分析软件 Ansys14.5,10 节点四面体单元 solid92,网格采用自动划分方式,并针对柔性铰链处进行局部细化,以保证结果精度。

### 4.1 钳位机构和驱动机构位移输出

首先对钳位机构和驱动机构的位移输出进行了分析,如图 5 所示。

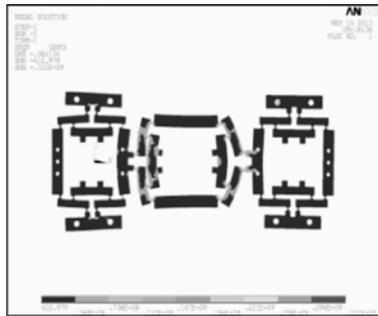
### 4.2 钳位机构和驱动机构应力分布

图 6 所示为在陶瓷达到最大伸长量(35 μm, 一侧为 17.5 μm)时的钳位机构和驱动机构最大输出位移下的应力分布。其中,钳位机构最大输出位移为 35 μm,驱动机构最大输出位移为 62 μm。由图可见,最大应力均发生在柔性铰链处,其最大应力分别为 144 和 331 MPa,小于材料的许用应力 785 MPa。



(a) 钳位机构

(a) Clamping mechanism



(b) 驱动机构

(b) Driving mechanism

图 6 机构的应力分布

Fig. 6 Stress distribution of the structure

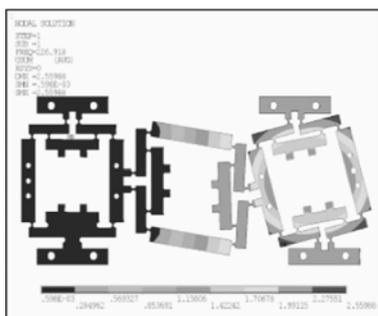
### 4.3 柔性机构的模态分析

为避免机构发生共振,对柔性机构进行了模态分析,并提取前 6 阶模态,结果如表 1 所示,前 2 阶模态分析结果如图 7 所示。

表 1 机构的模态分析

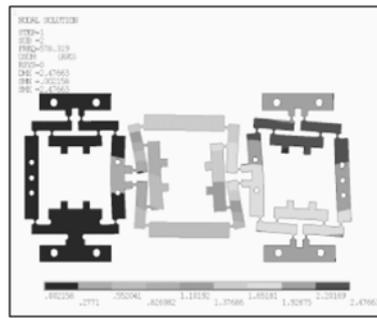
Tab. 1 Modal analysis results of the mechanism (Hz)

模态	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>	6 <sup>th</sup>
频率	226.9	578.3	579.2	689.8	1 684.11	850.2



(a) 第 1 阶振型

(a) The 1<sup>st</sup> order modal



(b) 第 2 阶振型

(b) The 2<sup>nd</sup> order modal

图 7 机构的 1 阶及 2 阶振型

Fig. 7 The 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> modals of mechanism

由模态分析结果可知该机构的一阶频率为 227 Hz,远高于实际的工作频率,因此,该机构可以正常工作。

## 5 实验测试

建立了尺蠖式压电驱动器实验测试系统,如图 8 所示。驱动器压电陶瓷型号为 PTBS150/7 × 7/30,采用 XE500D 三通道电源驱动。利用 Lab VIEW 软件编制了控制驱动器运动的程序,并通过 MCV-5005S 激光多普勒干涉仪对驱动器的性能进行了测试。

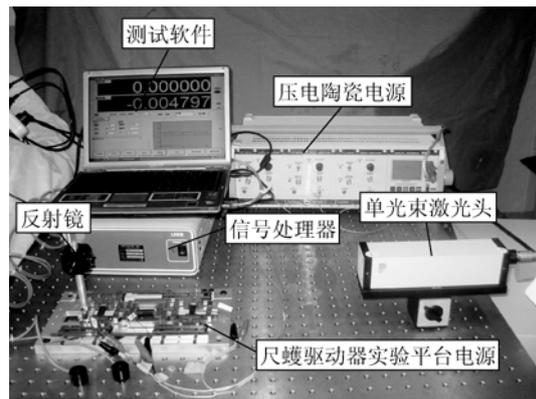


图 8 尺蠖驱动器实验平台

Fig. 8 Experimental platform of inchworm actuator

为确保驱动器稳定运动,当中间驱动机构伸长时,一侧的钳位压电陶瓷必须始终保持钳位状态。方波信号便于实现信号的叠加,能确保钳位可靠。方波驱动信号如图 9 所示,钳位信号与驱动信号的占空比分别为 60%、50%,驱动信号与

钳位信号 1 的相位差为  $T/3$ , 钳位信号 2 与钳位信号 1 的相位差为  $T/2$ 。

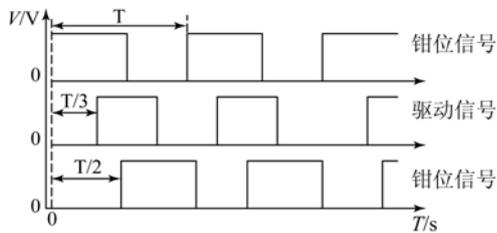


图 9 驱动电压的输出时序

Fig. 9 Output sequence of driving voltage

### (1) 工作行程测试

该驱动器的工作行程即为交叉滚子导轨的最大有效滑移长度, 经激光干涉仪测量得到最大行程为  $\pm 25$  mm。

### (2) 步距测试

尺蠖式压电驱动器的步距是衡量其性能的重要指标, 步距是指驱动器在一个运动周期内稳定产生的位移。图 10 给出了驱动器工作频率为 1 Hz 时中间驱动机构陶瓷施加的电压与驱动器步距的关系。驱动电压为 6 V 时, 最小步距为 60 nm; 驱动电压为 150 V 时, 最大步距为 55  $\mu$ m。

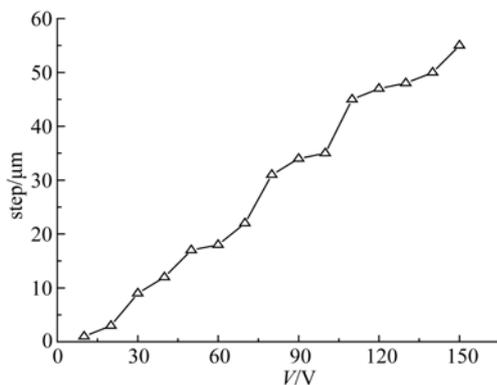


图 10 步距与电压的关系

Fig. 10 Relationship between step and voltage

### (3) 速度测试

尺蠖驱动器的运动速度由驱动器的步距和工作频率决定, 步距越大, 频率越高, 速度越快。而驱动器步距由驱动电压决定, 故在一定频率下, 驱动电压越大, 驱动速度越高。该驱动器的最大工作频率为 70 Hz。图 11 所示为工作频率 70 Hz 时, 不同驱动电压下的速度情况, 最大的驱动速度

为 1.259 mm/s。

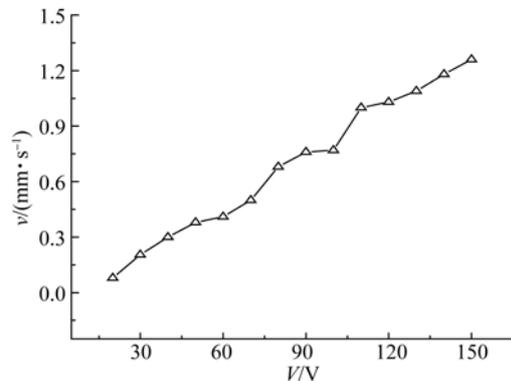


图 11 驱动器速度测试

Fig. 11 Speed testing result of actuator

### (4) 钳紧力测试

测试时, 左钳位机构陶瓷施加 150 V 电压, 右钳位机构和中间驱动机构陶瓷均断电, 测力器以一定拉力拉着驱动器动子, 通过干涉仪测量驱动器动子的位移变化。不断增加拉力, 如果干涉仪的测量结果发生变化, 此时测力器的数值即为最大钳位力, 测得该驱动器钳位力最大值为 17 N。

### (5) 承载能力测试

承载能力是指在保证驱动器稳定运动的情况下尺蠖式压电驱动器所能够承受的荷载。通过在驱动器表面放置砝码, 测试驱动器的步距变化情况。在电压为 150 V, 承载力为 11 N 时, 驱动器步距比较稳定, 超过 11 N 后步距逐渐减小。

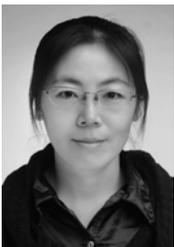
## 6 结 论

本文设计了一种基于尺蠖运动原理的新型压电直线驱动器。采用对称杠杆式位移放大机构, 在保证钳紧力的同时, 具有较大的驱动速度。对钳位机构和驱动机构进行了理论分析和有限元分析, 并搭建了尺蠖式压电驱动器实验测试系统。实验结果表明, 该驱动器钳位机构的钳紧力为 17 N; 机构整体的承载力为 11 N; 当驱动电压为 150 V 时, 驱动器可达到的最高驱动速度为 1.259 mm/s; 行程为  $\pm 25$  mm; 最大步距为 55  $\mu$ m, 最小步距为 60 nm。该驱动器满足光学领域精密定位的需求, 为尺蠖式压电驱动器的研究提供了参考。

## 参考文献:

- [1] LIU Y X, CHEN W S. A linear piezoelectric actuator using the first-order bending modes [J]. *Ceramics International*, 2013, 39 (5): 681-684.
- [2] HATSUZAWA T, MICHISHITA K. A reciprocating linear actuator driven by anti-photo axis of plankton [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 201 (10): 316-320.
- [3] JAEWOOK L, ERCAN M. Magnetic force enhancement in a linear actuator by air-gap magnetic field distribution optimization and design [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2013, 58 (10): 44-52.
- [4] 张桂林, 张承进, 赵学良. 压电驱动器记忆特性迟滞非线性建模 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 996-1001.  
ZHANG G L, ZHANG CH J, ZHAO X L. Modeling of nonlocal memory hysteresis in piezoelectric actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 996-1001. (in Chinese)
- [5] 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): 338-345. (in Chinese)
- [6] 张东华, 陈维山, 等. 微机电系统用压电驱动器的发展及应用 [J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27 (6): 1023-1025.  
ZHANG D H, CHEN W SH, et al.. Development and applications of piezoelectric actuator in MEMS [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27 (6): 1023-1025. (in Chinese)
- [7] 王俐, 饶长辉, 饶学军. 压电陶瓷微动台的复合控制 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1265-1271.  
WANG L, RAO CH H, RAO X J. Feed-forward control of piezoelectric ceramic position stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1256-1271. (in Chinese)
- [8] 刘泊, 郭建英, 孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制 [J]. *光学精密工程*, 2013, 6 (6): 1503-1509.  
LIU B, GUO J Y, SUN Y Q. Modeling and control for PZT micro-displacement Actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 6 (6): 1503-1509. (in Chinese)
- [9] 张兆成, 胡泓. 提高蠕动式压电直线驱动器输出力的研究进展 [J]. *微特电机*, 2009, 4 (12): 61-64.  
ZHANG ZH CH, HU H. Research advances of improving thrust power of inchworm-type piezoelectric linear actuators [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2009, 4 (12): 61-64. (in Chinese)
- [10] JIAN L, RAMIN S. Design and development of a new piezoelectric linear Inchworm actuator [J]. *Mechatronics*, 2005, 15 (2): 651-681.
- [11] ZHANG Z J, XU M L. Research for a New Actuator With Variable Step and Large Displacement [J]. *International journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2010, 33(10): 597-604.
- [12] ZHANG ZH CH, HU H. Design of A Novel Piezoelectric Inchworm Actuator [C]. *Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2008(10): 3707-3711.
- [13] PAROSJ M, WEISBOROL. How to design flexure hinges [J]. *Materials and Design*, 1965.
- [14] 张兆成, 胡泓. 尺蠖驱动器箝位机构的优化设计 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2010, 3(8): 251-256.  
ZHANG ZH CH, HU H. Optimum design of clamp device for inchworm actuator [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2010, 3 (8): 251-256. (in Chinese)

## 作者简介:



马立(1977—),女,黑龙江佳木斯人,博士,副教授,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事微操作机器人技术方面的研究。E-mail: malian@shu.edu.cn



肖金涛(1989—),男,山东淄博人,硕士研究生,2011年于聊城大学获得学士学位,主要从事微操作机器人技术方面的研究。E-mail: xjt19890115@163.com