

文章编号 1004-924X(2013)06-1524-07

## 应用于干涉显微镜的直线压电作动器

朱 华\*, 曹如意, 菅 磊

(南京航空航天大学 机械结构力学与控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

**摘要:**提出了应用于干涉显微镜焦距调节的直线压电叠堆作动器和微动台。介绍了基于三角位移放大原理的压电作动器结构设计,利用 ANSYS 的 APDL 语言实现了对作动器钢架结构的建模,并采用 Optimus 中自带的差分进化算法(DE)对其结构尺寸进行了优化。制作了实验样机,激光干涉实验表明:当驱动电压信号幅值为 40~100 V 时,作动器位移放大倍数可以达到 7。最后,将设计的直线作动器作为驱动核心安装在自行设计的微动台上,然后将组成的系统用于光学干涉显微镜。实验显示,整个系统在电压为 24~40 V,阶梯增量电压为 0.8 V 时,步进分辨率可达 23 nm,满足干涉显微镜细分干涉条纹所需要的直线位移分辨率的要求。

**关键词:**干涉显微镜;三角放大原理;步进式压电作动器;结构优化;干涉条纹

**中图分类号:**TH742.9;TN384 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132106.1524

## Linear piezoelectric actuator applied to interference microscope

ZHU Hua\*, CAO Ru-yi, JIAN Lei

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

\* Corresponding author, E-mail: hzhu103@nuaa.edu.cn

**Abstract:** A linear piezoelectric stack actuator used for the focus adjustment system of an interference microscope was proposed and a micropositioner was also developed. The structure of the actuator was designed based on the principle of triangle displacement amplification. The modeling of the steel frame structure was realized by parameter design language APDL in the ANSYS, and the parameters of the structure were optimized by the optimization algorithm of Differential Evolution (DE) in Optimus. A experimental prototype for the actuator was produced, and laser interferometric experiment shows that the actuator's amplification factor reaches 7 when the drive voltage is between 40 V and 100 V. Finally, the piezoelectric stack actuator was mounted on the micropositioner to be a driver for an interferometer. Experiments show that the step resolution of the micropositioner with flexure hinges has reached 23 nm under the system voltage of 24~40 V and an increment voltage of 0.8 V. These data meet the requirement of interferometric fringe of interference microscope for linear displacement resolution.

**Key words:** interference microscope; triangle amplification principle; step piezoelectric actuator; structure optimization; interference fringe

收稿日期:2012-11-14;修订日期:2013-01-06.

基金项目:航空科学基金资助项目(No. 20100112005);国家自然科学基金资助项目(No. 50905085);南京航空航天大学基本科研业务费专项科研资金资助项目(No. NS2010034)

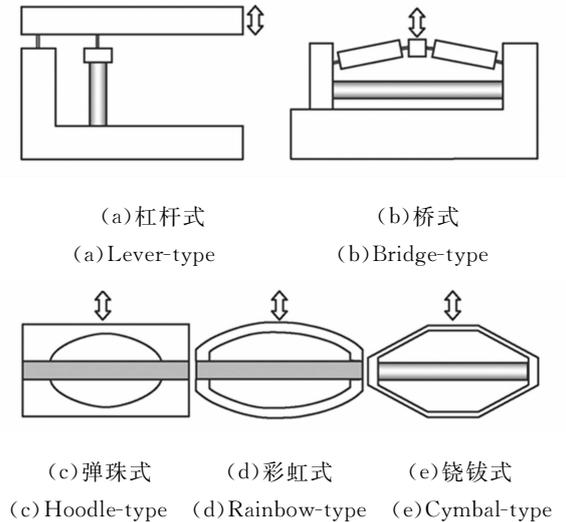
## 1 引言

随着高科技的不断发展,高精度的微进给技术已经成为 MEMS 领域的前沿科学,被广泛应用于微细加工、精密测试、精密定位及超精密加工等领域。从 90 年代起,为了满足超精密加工与测量的要求,许多机构需要在较大范围内实现高步距准确地连续微进给运动,如光栅刻划机进给系统、集成电路制造系统等。国际上发达国家的相关科学工作者已经对大行程、纳米级步距、速度可调的连续微进给系统展开了广泛研究。目前,微进给机构的主要驱动原理有热变形、弹性变形<sup>[1]</sup>、伺服电动机、直线电动机<sup>[2]</sup>、电磁力驱动、扭轮驱动<sup>[3]</sup>、摩擦驱动、压电驱动等。压电作动器,尤其是叠堆压电作动器,具有能量转换效率高、电源功耗低、响应速度快、分辨率高、输出力大等特点,特别是体积小且能实现低压驱动,故在包括微执行器在内的各种驱动场合具有良好的应用前景<sup>[4-7]</sup>。压电工作台属于典型的微定位器,在扫描探针显微镜等仪器设备中应用较广<sup>[8-9]</sup>。国外对将压电作动器用于微型机械及微执行器领域的研究起步较早,已经取得了很多成就,CEDRAT 公司所生产的压电作动器如 APA、SPA 系列已广泛应用于显微镜物镜的纳米定位和扫描系统等各种微驱动场合。PI 公司研制的压电作动器可广泛应用于纳米级物镜扫描平台及各种定位平台。国内哈工大的姜文锐采用摩擦驱动与尺蠖运动相结合的方法,用压电陶瓷作为驱动源成功实现了大行程、高稳定性、高精度的连续运动。但由于结构限制,存在应力集中,反复变形易引起疲劳破坏,且传递运动的效率较低等缺点<sup>[6]</sup>。广东工业学院的杨宜民研究了仿生型步进式直线执行器,步距为 0.1~16  $\mu\text{m}$ ,步距误差小于 0.1  $\mu\text{m}$ ,适用于低速自动控制中的超高精度的定位和驱动<sup>[10]</sup>。

本文针对干涉显微镜焦距调节的应用背景,参考国外的产品资料<sup>[11]</sup>,基于三角放大原理,将压电叠堆作为核心驱动单元制作了直线压电作动器。通过 ANSYS 有限元软件对作动器的结构参数进行了优化。微步距的驱动控制试验表明:该叠堆式压电作动器具有低压驱动、精密步进、定位精度高的优点,该项研究将为其在高精度微动平台上的应用打下基础。

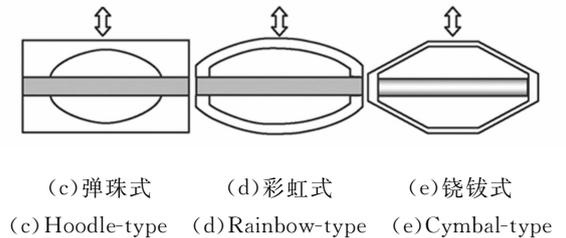
## 2 结构设计

传统的位移放大机构有杠杆式放大机构、桥式放大机构、弹珠式放大机构、彩虹式放大机构和铄铄式放大机构<sup>[12]</sup>,如图 1 所示。



(a) 杠杆式  
(a) Lever-type

(b) 桥式  
(b) Bridge-type



(c) 弹珠式 (d) 彩虹式 (e) 铄铄式

(c) Hoodle-type (d) Rainbow-type (e) Cymbal-type

图 1 几种位移放大机构的结构形式

Fig. 1 Some kinds of amplification structures

上面 5 种结构中杠杆式结构尺寸通常很大,这限制了它的应用范围,桥式结构可以产生较大的输入输出放大位移比,且便于制作,但也不易于小型化,弹珠式、彩虹式、铄铄式结构放大原理类似,但彩虹式和铄铄式结构可以采用较细的梁,且更易于小型化。

### 2.1 作动器结构设计

本文设计的压电作动器将压电叠堆加载电压后的变形通过一定的结构形式放大后输出。为了

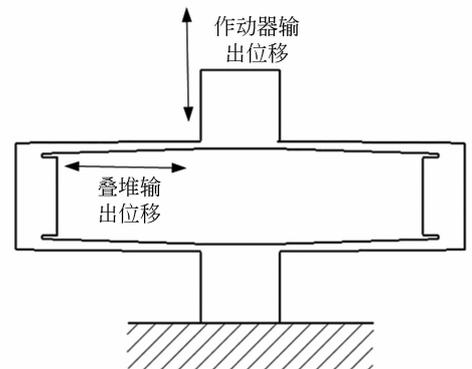


图 2 作动器的工作原理图

Fig. 2 Working principle of actuator

便于结构的小型化,这里采用了基于三角放大原理的结构<sup>[13]</sup>,它类似于铰铍结构和彩虹式结构,作动器的工作原理如图 2 所示,其输出位移与压电叠堆的位移相垂直。

下面讨论作动器的放大原理与放大倍数。

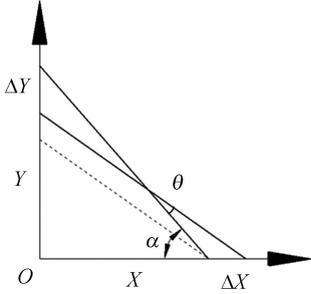


图 3 作动器放大原理示意图

Fig. 3 Amplification principle of actuator

考虑结构对称性,取作动器的 1/4 结构进行分析,将作动器钢架结构简化如图 3 所示。设作动器压电叠堆在 X 向产生一个  $\Delta X$  的位移,并且其结构尺寸保持不变,此时结构就在 Y 向产生一个  $\Delta Y$  的位移,由于  $\Delta X$  和  $\Delta Y$  方向相反,定义该结构的放大倍数为  $A = -\Delta Y / \Delta X$ 。

$$\frac{(Y + \Delta Y)}{X} = \tan \alpha, \quad (1)$$

$$\frac{Y}{X + \Delta X} = \tan(\alpha - \theta), \quad (2)$$

从式(1)、式(2)可得作动器的放大倍数

$$A = -\frac{\Delta Y}{\Delta X} = -\frac{(X \cdot \tan \alpha - Y) \cdot \tan(\alpha - \theta)}{Y - X \cdot \tan(\alpha - \theta)}. \quad (3)$$

由于作动器压电叠堆变形极小, $\theta$ 角约为 0,则

$$A \approx \tan \alpha, \quad (4)$$

由式(4)可知,作动器结构的放大倍数与作动

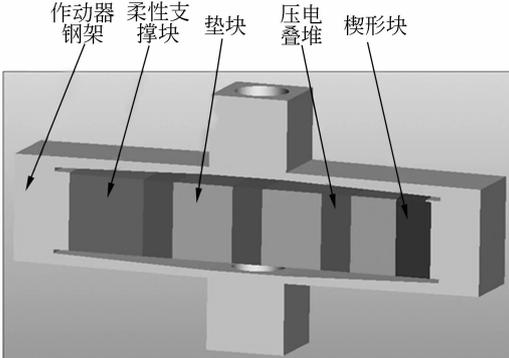


图 4 作动器结构图

Fig. 4 Structure scheme of actuator

器的尺寸无关,只与  $\alpha$  的大小有关,在设计作动器三角形放大结构时,应使  $\alpha$  尽量大<sup>[14]</sup>。

所设计的压电作动器的结构图如图 4 所示。

## 2.2 有限元建模及优化设计

采用通用有限元软件 ANSYS,利用 APDL 语言建立起作动器的钢架模型。考虑到作动器结构对称且厚度均匀,为了方便建模并提高运算分析速度,建立 1/4 结构的平面模型,如图 5 所示。

因为作动器内部所要安装的压电叠堆及支撑块等结构尺寸固定,所以  $OD$  为常数。为了保证作动器的刚度,限制作动器臂的最小值应不小于 0.5 mm,因此可将作动器的尺寸  $OA$ 、 $EF$ 、 $BG$ 、 $DE$  作为优化变量。作动器臂的右侧底部需留有 0.2 mm 的空间为线切割加工留余量以便加工。

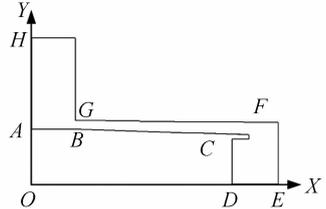


图 5 作动器 1/4 模型

Fig. 5 1/4 model of actuator

定义模型的材料参数后,进行结构建模和网格划分,并设置边界约束条件。因为模型沿轴对称,设  $DE$  面上的节点  $U_Y = 0$  mm,  $AH$  面上的节点  $U_X = 0$  mm。对作动器内侧  $CD$  面上模拟施加压电叠堆变形产生的位移  $\Delta$ 。通过有限元模拟后取  $AB$  面的 Y 向位移和  $EF$  面的 X 向位移的比值定义为作动器结构的放大倍数。

取初始参数: $OA = 4$  mm,  $EF = 3.0$  mm,  $BG = 1.2$  mm,  $DE = 3.0$  mm, 假设叠堆为 3 块,总变形为 0.004 mm,则作用在  $CD$  面上的 X 向应施加 0.002 mm 位移约束。经过有限元计算得到作动器的  $AB$  面在 Y 向位移为  $DUY_1 = -0.009\ 919\ 63$  mm,显然  $EF$  面在 X 向的位移为  $DUX_1 = 0.002$  mm,从而可得作动器的放大倍数  $N = (-1) \times DUY_1 / DUX_1 = 4.95$ ,负号表示方向相反。此时作动器的 Von-misses 应力为 55.139 MPa 远小于 45 钢和 65 Mn 的屈服应力,因此结构满足强度要求。这里采用优化软件 Optimus 集成 ANSYS 进行优化,采用差分进化算法 (DE) 对作动器的结构尺寸进行优化,取随机种子

为 82, 最小初始步进量为 0.5, 权重为 0.7, 逆交叉概率为 0.85, 平均截止增量 0.01, 其他参数默认, 以变量  $OA$ 、 $EF$ 、 $BG$ 、 $DE$  为优化变量, 以最大化作动器的放大倍数为目标函数, 通过不断的调整组合, 最终得到优化的结果:  $OA=3.169$  mm,  $EF=3.535$  mm,  $BG=0.50$  mm,  $DE=2.70$  mm, 此时放大倍数  $N=9.90$ , 优化的流程图如图 6 所示, 放大倍数  $N$  优化迭代过程如图 7。

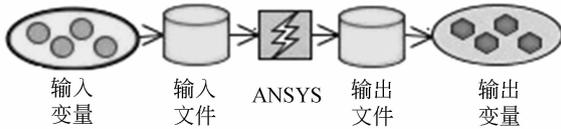
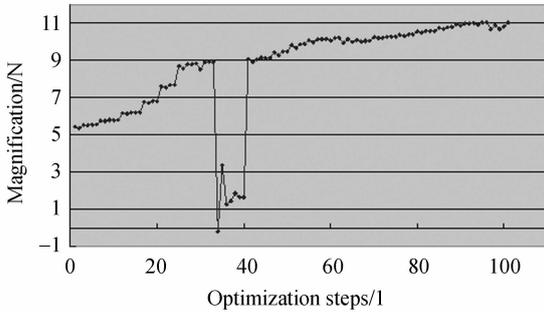


图 6 优化的流程图

Fig. 6 Optimized flow chart

图 7 放大倍数  $N$  的迭代过程Fig. 7 Iterative process of magnification factor  $N$ 

### 3 实验研究

#### 3.1 作动器运动特性研究

实验中采用了 PI 公司的 PL055.30 型压电叠堆, 其结构尺寸为  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。实验时将作动器钢架结构里面装载压电叠堆, 并将其用螺栓固定在实验台上, 利用导电膜加载电压, 由于逆压电效应, 压电叠堆发生形变, 通过作动器钢架的放大效应, 压电叠堆的微变形得到放大。此时作动器和实验台由固定螺栓紧密连接, 利用实验台的柔性铰链将叠堆放大后的位移转变为激光干涉仪的反射镜头输出。实验装置如图 8 所示。本所的激光干涉仪可以精密测量该实验台的位移, 精度可达  $1\text{ nm}$ 。通过测量光线的变化测量镜头的移动可得出实验台的位移即作动器放大后的位移。在测量作动器叠堆产生的位移时, 只需要

将干涉仪的镜头底部粘贴到一个导轨上, 将镜头的背部粘贴在作动器的在图 5 中的  $EF$  面上, 这样测出的位移即为作动器压电叠堆产生的位移。

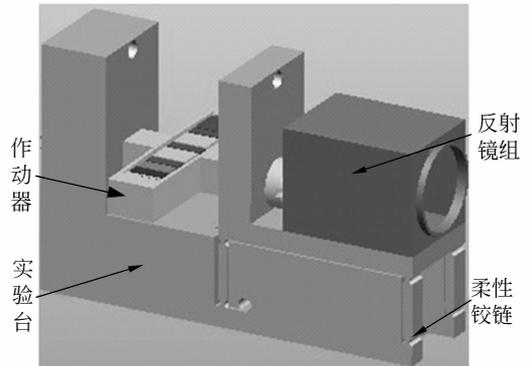
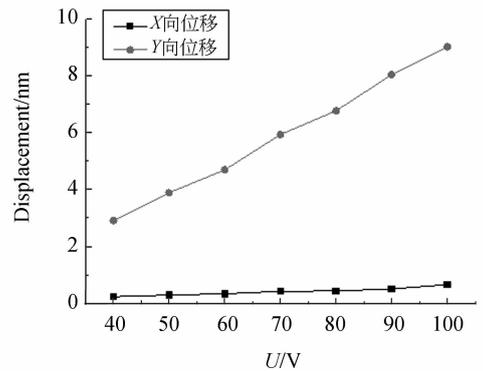


图 8 实验装置

Fig. 8 Experimental equipment

实验中给压电叠堆加载正弦电压 ( $40 \sim 100\text{ V}$ ) 测出作动器在不同电压下  $X$  向和  $Y$  向的位移振幅如图 9 所示, 通过运算可以得到作动器放大倍数的实测值如图 10 所示。

图 9 作动器在不同电压下  $X$ 、 $Y$  向位移Fig. 9  $X$  and  $Y$  displacements of actuator loaded in different voltages

从图 9, 图 10 看出, 作动器的  $X$ 、 $Y$  向位移都随着电压的升高而增大, 且成近似线性关系。作动器的放大倍数在  $6 \sim 8$  之间波动, 这与上一节中作动器在最优点的放大倍数理论值  $11.3$  是有差距的, 但是很接近  $7.0$ 。造成误差的原因是作动器在加工时整体结构有了一定的变形。另外, 对压电叠堆所施加的预压力也会对叠堆的输出位移产生影响。下一步可以通过提高作动器的加工精度并通过施加预压力来稳定作动器的放大倍数。

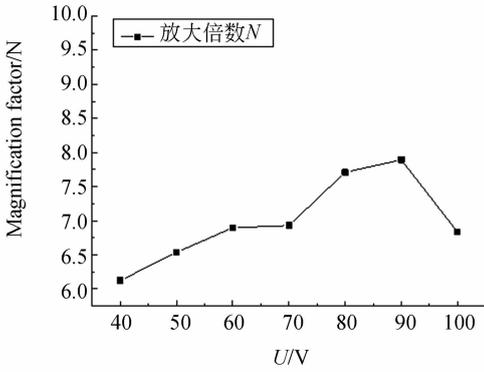


图 10 作动器的放大倍数

Fig. 10 Magnification factor of actuator

### 3.2 步进特性研究

作动器具有结构尺寸小、重量轻、成本低等优点,如果作动器的精度能保持纳米级,它的应用前景是非常好的<sup>[15]</sup>。为了检测作动器的步进特性,本文采用新的驱动方式。用阶梯电压激励作动器,观察其输出的位移特性。给压电叠堆加载 24~40 V 电压,阶梯增量电压为 0.8 V/step,采用英国雷尼绍的 XL-80 型激光干涉仪测量作动器的位移变化情况,图 11 为所测得的位移随时间变化图。

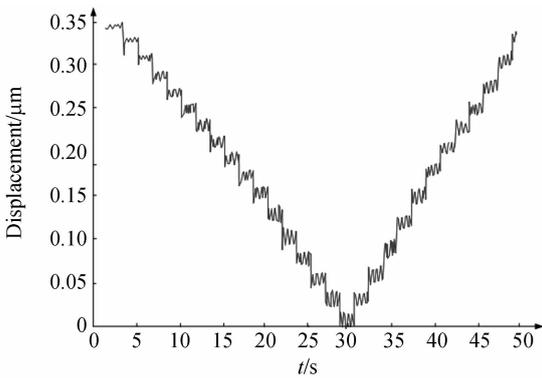


图 11 作动器位移-时间图

Fig. 11 Displacement-time chart of actuator

从图 11 可以看出,作动器的位移分辨率均值稳定在 23 nm。但由于电压波动及噪声等外在因素的干扰,出现输出位移振幅的微小振荡。

为了验证该作动器在实际应用中的效果,本文利用该直线压电叠堆作动器设计了微动台,实物如图 12 所示。将作动器作为驱动部件安装在微动台上,微动台系统如图 13 所示。给作动器加载阶梯电压后,观察显微镜干涉条纹的步进移动,

白光干涉条纹即为图 14 中线 *a*、*b* 之间黑色条纹部分,通过调整阶梯增量电压的值,可以在阶梯增量电压为 0.8 V 时将形成的白光干涉条纹 11 等分,可以满足干涉显微镜聚焦调节系统对驱动机构的精度要求。

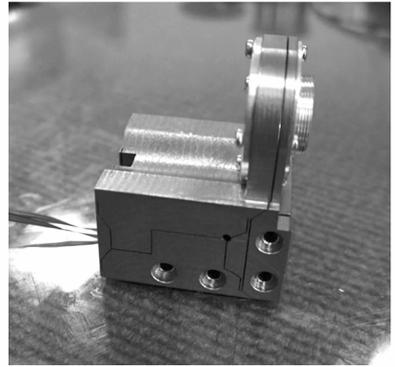


图 12 微动台

Fig. 12 Micro-stage

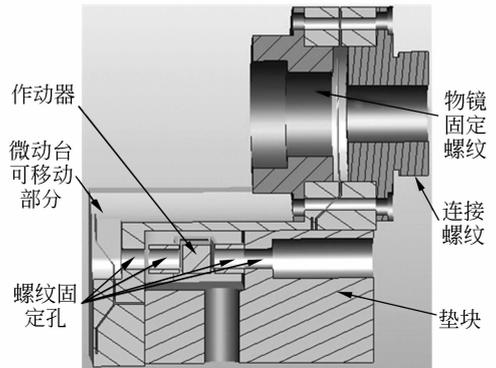


图 13 微动台结构

Fig. 13 Structure of micro-stage

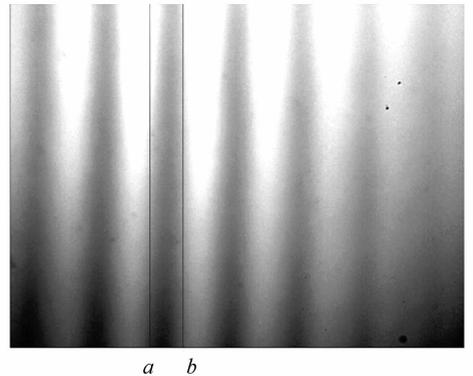


图 14 白光干涉条纹

Fig. 13 White light interference fringes

## 4 总 结

本文提出了一种基于压电叠堆的直线作动器,通过比较几种不同结构的放大形式,最终选取了类似于铰链式和彩虹式的结构形式。对结构的放大倍数进行了理论计算,然后通过有限元分析得到了结构初始的放大倍数,通过 ANSYS 的 APDL 语言建模,并通过 Optimus 进行集成优化,得到了优化后的结构尺寸。样机实验证明,作

动器的实际放大倍数可以达到 7,与理论放大倍数吻合。接着,又设计了可安装物镜的微动台,并将设计的压电直线作动器作为驱动核心安装在微动台上,将组成的系统用于光学干涉显微镜,通过给作动器加载阶梯电压,物镜也做阶梯步进运动,微动台系统的步进运动实验表明,该微动平台系统可以满足干涉显微镜聚焦调节系统对驱动机构的精度要求,本文的研究为该作动器和微动台系统在光学领域的应用打下了基础。

## 参考文献:

- [1] LIU Y, HIGUCHI T, FUNG R. A novel precision positioning table utilizing impact force of spring-mounted piezoelectric actuator [J]. *Precision Engineering*, 2003, 27(1): 22-31.
- [2] 杨开明,叶佩青,游华云,等. 直线电机精密工作台扰动观测器设计[J]. *机械科学与技术*, 2005, 24(12): 1430-1432.  
YANG K M, YE P Q, YOU H U, et al.. Design of disturbance observer based on linear motor precision stage [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2005, 24(12): 1430-1432. (in Chinese)
- [3] 戴一帆,李圣怡,罗兵,等. 扭轮摩擦驱动系统研究[J]. *国防科技大学学报*, 1999, 21(2): 85-88.  
DAI Y F, LI SH Y, LUO B, et al.. Research on twist-roller friction drive system [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1999, 21(2): 85-88. (in Chinese)
- [4] LOBONTIU N, GOLDFARB M, GARCIA E. A piezoelectric-driven inchworm locomotion device [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2001, 36(4): 425-443.
- [5] 迟冬祥,颜国正,丁国清. 基于惯性-摩擦原理的 PZT 驱动四自由度微驱动器的研究[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(2): 135-138.  
CHI D X, YAN G ZH, DING G Q. Inertia-friction based 4 D. O. F. micro-actuator driven by PZT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2): 135-138. (in Chinese)
- [6] 姜文锐,卢泽生. 一种大行程高精度微执行器的研究[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(5): 1555-1558.  
JIANG W R, LU Z SH. A Micro-actuator with high-resolution and large-stroke drive features [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(5): 1555-1558. (in Chinese)
- [7] 汪红兵,李志荣. 直线型超声波电动机压电作动器的位移特性研究[J]. *微特电机*, 2010, (4): 30-32.  
WANG H B, LI ZH R. Displacement characteristic analysis of the piezoelectric actuator for linear ultrasonic motors [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2010, (4): 30-32. (in Chinese)
- [8] GRIFFITH J E, MILLER G L, GREEN C A. A scanning tunneling microscope with a capacitance-based position monitor-based position monitor [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1990, 8(6): 2023-2027.
- [9] 张栋. 压电工作台微定位系统建模与控制技术[D]. 山东:山东大学, 2009.  
ZHANG D. *Modeling and Control Technology of Piezoelectric ally Driven Micro-positioning Stage* [D]. Shandong: Shandong University, 2009. (in Chinese)
- [10] 陈兵芽,刘莹,胡敏,等. 微执行器的研究与展望[J]. *微纳电子技术*, 2005, (12): 561-565.  
CHEN B Y, LIU Y, HU M, et al.. The research and prospect of microactuator [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2005, (12): 561-565. (in Chinese)
- [11] PETITNIOT J, DES ROCHETTES H, LECONTE P, et al.. Experimental assessment and further development of amplified piezo-actuators for active flap devices [C]. *8th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany*, 2002.
- [12] MA H, YAO S, WANG L, et al.. Analysis of the displacement amplification ratio of bridge-type flexure hinge [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 132(2): 730-736.
- [13] LELETTY R, CLAEYSSSEN F, LHERMET N,

*et al.*. New amplified piezoelectric actuator for precision positioning and active damping [C]. *SPIE*, 1997, 3041:496-504.

- [14] 杜习波, 陈西平, 张斌, 等. 基于三角原理的压电驱动微位移定位机构的设计与分析[J]. *现代机械*, 2009, (5):34-36.

DU X B, CHEN X P, ZHANG B, *et al.*. Design and analysis of micro-displacement mechanism for

motion position with piezo-actuator based on triangle principle [J]. *Modern Machinery*, 2009, (5): 34-36. (in Chinese)

- [15] CLAEYSSSEN F, DUCAMP A, BARILLOT F, *et al.*. Stepping Piezoelectric Actuators Based on APAs; 11th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, 2008[C].

#### 作者简介:



朱 华(1978—),男,江苏东台人,副研究员,南京航空航天大学精密驱动研究所副所长,2007年于南京航空航天大学获得机械电子工程专业博士学位,长期从事新型超声电机的样机开发、机理分析、动力学优化设计及驱动控制等相关理论和技术的研究。E-mail: hzhu103@nuaa.edu.cn



曹如意(1986—),男,河南漯河人,硕士研究生,2010年于中北大学获得学士学位,主要从事压电作动器、纳米微动台等方面的研究。E-mail: caoziyou163@163.com



管 磊(1986—),男,河南商丘人,硕士研究生,2010年于西安理工大学获得学士学位,主要从事超声电机控制方面的研究。E-mail: jiaxiang1998@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)