

文章编号 1004-924X(2016)08-1973-07

## 三角位移转换式压电直线电机

王寅<sup>1\*</sup>, 潘松<sup>2</sup>, 黄卫清<sup>2</sup>, 余卿<sup>1</sup>

(1. 华侨大学机电及自动化学院, 福建厦门 361021;

2. 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:**为了在保持电机精度的同时获得较大作动行程,提出了一种以叠层压电陶瓷作为激励振动源的压电直线电机。分析了电机的工作原理,推导了电机驱动足在工作时的运动轨迹。设计安装了电机样机,并对其定子进行了测试。最后,在两种激发条件下实验研究了电机的整机性能。结果表明:单组叠层压电陶瓷激励时,该样机定子驱动头在接触面法向和切向同时具有振动分量,并能够在阶跃和连续两种不同激励方式下实现单向大行程直线运动。以锯齿波激励时可实现步进运动,激励频率为 20 Hz 时步距为 0.1  $\mu\text{m}$ ;以两路相位差  $\pi/2$  的正弦波激励时,可在 1.5 kHz 到 5.8 kHz 的激励频率区间输出稳定连续的直线运动,其运动速度随激励频率的升高而增大,在峰—峰值 110 V(50 V 偏置)的正弦电压激励下其推力可达 4.8 N。该电机具有高位置分辨率和宽频率响应,可以在两种工作模式下分别稳定地实现直线步进和大行程连续运行。

**关键词:**直线电机;压电电机;叠层压电陶瓷;三角位移转换;双模式

**中图分类号:** TM359.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162408.1973

## Linear piezoelectric motor with triangular displacement transformer

WANG Yin<sup>1\*</sup>, PAN Song<sup>2</sup>, HUANG Wei-qing<sup>2</sup>, YU Qing<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

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

\* Corresponding author, E-mail: yin.wangyin@hqu.edu.cn

**Abstract:** A linear piezoelectric motor was proposed by using the stacked piezoelectric ceramics as a excited vibration source to enlarge its stroke and to maintain a higher precision. The working principle of the linear motor was analyzed, and the moving trajectory equation of the driving tip in the linear motor was deduced at a working state. The construction of the linear motor was designed, and a prototype of the motor was fabricated, assembled and tested. Finally, the motion performance of the motor was measured under two different exciting conditions. Experimental results indicate that the driving tip of the stator in the motor vibrates both normally and tangentially and the motor is capable of two operation modes, including the stepping mode excited by single channel saw-tooth wave voltage signal and the continuous mode excited by dual channel sinusoidal voltage signals with a phase difference of  $\pi/2$ . In the former mode, the resolution of step reaches 0.1  $\mu\text{m}$  under driving frequency 20

收稿日期:2016-02-15;修订日期:2016-03-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51505161, No. 51575260, No. 51375224);华侨大学高层次人才科研启动资金资助项目(No. 15BS102)

Hz; while in the later mode, the motor moves stably during frequency band from 1.5 kHz to 5.8 kHz and its speed increases with the frequency. When the two sinusoidal exciting voltages are to be peak to peak of 100V, the offset of 50 V and a frequency of 5.8 kHz, the thrust of the prototype reaches 4.8 N. In conclusion, the proposed piezoelectric motor is capable of realizing both high resolution and long travel at dual operation modes.

**Key words:** linear motor; piezoelectric motor; stacked piezoelectric ceramics; triangular displacement transformer; dual modes

## 1 引言

20 世纪下半叶,随着对压电陶瓷材料研究的深入,具有高性能的钙钛矿压电陶瓷被研制出来。该材料的逆压电效应在作动器上的应用在世界范围内引起了学者的广泛兴趣。由此产生了形态多样、原理各异的压电电机,压电直线电机也由此产生<sup>[1,2]</sup>。压电陶瓷具有高刚度、宽频响的特性,可达到较高的位置分辨率,但是其微小的应变输出使其作动行程有限,成为其在作动器中应用中的瓶颈。

将压电陶瓷作为激振单元激发弹性体的高频振动模态,通过结构共振实现较大位移输出可突破这一瓶颈<sup>[3-5]</sup>。应用这一原理的压电直线电机使用定子体的单一或者多个振动模态进行工作,最终通过摩擦将定子体的机械振动能转换为负载的动能。该类电机可以通过控制压电陶瓷上施加的电场实现超高分辨率(纳米级)的定位,即直接利用压电陶瓷的变形,也可在高频振动下高速连续运行从而获得大行程运动<sup>[6]</sup>。然而,工作在共振状态的电机性能随共振频率变化显著,此外,高频驱动电路使得该类电机性能输出呈现出强烈的非线性,使得该类电机的控制问题变得复杂。

随着压电陶瓷材料制作工艺的改进,出现了另一种方法,即将多层片状压电陶瓷叠层放置并将电机以特定形式封装的集成元件,即叠层压电陶瓷<sup>[7]</sup>。叠层压电陶瓷具有激励电压低,输出应变大等特性,一些集成度高的叠层压电陶瓷也具有较宽的响应频率<sup>[8]</sup>。针对叠层压电陶瓷在作动器上的开发研究可根据工作方式分为尺蠖式压电直线电机<sup>[9-11]</sup>,惯性冲击式压电直线电机<sup>[12,13]</sup>,直接利用叠层压电陶瓷变形的微动台以及采用弹性放大机构放大叠层压电陶瓷输出变形的压电电机等<sup>[14,15]</sup>。其中,直接利用叠层压电陶瓷变形的微

动台的行程一般在微米级,采用弹性放大机构放大叠层压电陶瓷输出变形的压电作动器的行程增大的同时其弹性放大机构的刚度将迅速减小;惯性冲击式压电直线电机利用激励波形或者电机结构的不对称性获得往返振动加速度的不对称,从而获得单向运动,但不适合在具有冲击载荷的环境中使用;尺蠖式压电直线电机机构较复杂<sup>[11]</sup>,需要至少 3 组压电执行单元协同工作,这对 3 组压电执行单元的加工精度和装配要求较高,并且驱动电路至少要提供 3 路不同相位的激励信号,由于其结构的复杂性,该类电机工作频率较低,不易获得较快的运动速度<sup>[16]</sup>。

为避免因共振带来的非线性,提升稳定性并获得较大作动行程,本文提出了工作在非共振状态的压电直线电机,利用叠层压电陶瓷输出变形大、激励电压低和频率响应宽的特性,研制了具有高位置分辨率和宽频率响应的大行程压电直线电机,分析其工作原理和结构设计原则,并通过样机实验验证了设计的可行性。

## 2 压电直线电机的构成及其工作原理

### 2.1 压电直线电机的构成

电机结构如图 1 所示,主要由定子、动子及定子夹持装置等构成。其中,动子为一根由安装在导向滑块中的导轨,其表面黏附一根氧化铝陶瓷条,定子的驱动头与动子导轨表面的氧化铝陶瓷条直接接触;夹持装置由导向机构和预紧机构组成<sup>[17]</sup>,导向机构由 3 组滚动轴承及压紧弹簧构成,定子固定安装在由 3 个轴承导向的滑座上,用于约束定子在定、动子接触面切向的运动自由度,并允许其在接触面法向自由滑动,滑座下面有一弹簧预紧机构,用于施加定子驱动头与动子之间的接触力。

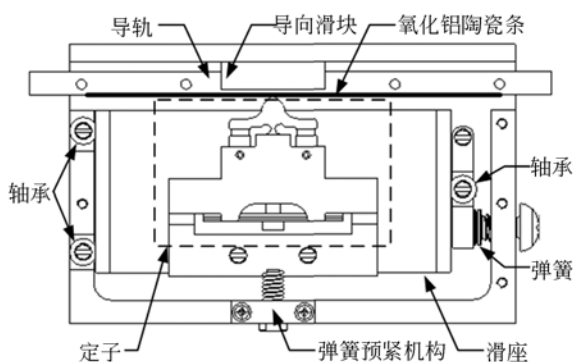


图 1 电机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of motor

2.2 压电直线电机的工作原理

压电直线电机在运行时,首先,叠层压电陶瓷输出的变形经定子中三角位移转换机构的变换在驱动头处产生沿接触面法向和切向的位移分量,两组叠层压电陶瓷同时以一定相位激励定子振动时,定子的驱动头以特定的椭圆轨迹运动。这时,由于定子驱动头以一定预压力接触动子,动子和定子接触面产生单向摩擦功从而使动子在驱动头的摩擦力推动下运动。根据定子驱动头的不同运动形式,压电直线电机的工作模式可以分为步进模式和连续模式。

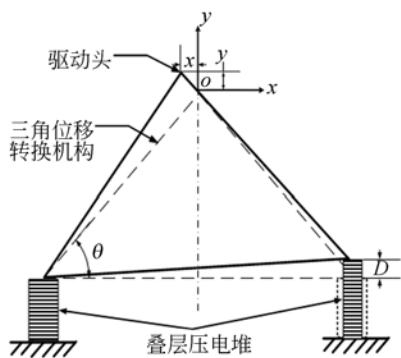


图 2 定子原理示意图

Fig. 2 Principle diagram of stator

为便于分析驱动头的运动轨迹,定子的原理如图 2 所示,在驱动头位置设置直角坐标系  $x-o-y$ ,三角位移转换机构简化为等腰三角形。当只给两个叠层压电陶瓷中的一个压电堆施加直流电压,叠层压电陶瓷的变形量用  $D$  表示,那么驱动头在直角坐标系  $x-o-y$  中的位移可表示为:

$$\begin{cases} x = -\frac{a}{l}D\sin\theta \\ y = \frac{a}{l}D\cos\theta \end{cases}, \quad (1)$$

其中: $a$  为等腰三角形腰长, $l$  为等腰三角形底边长, $\theta$  为底角。

如果给其中一个叠层压电陶瓷所施加的电压的波形为锯齿波,则在锯齿波的上升沿驱动头将由于摩擦力的作用带动动子以相对缓慢的速度运动,在锯齿波下降沿驱动头迅速往回运动,而这时的动子将由于惯性在整个运动过程中产生步进。

当两个叠层压电陶瓷分别施加等幅同频并且在相位上相差  $\pi/2$  的正弦电压激励信号时,由叠加原理,可以得到驱动头的运动轨迹参数为:

$$\begin{cases} x = \frac{a}{l}D(\cos\omega t - \sin\omega t)\sin\theta \\ y = \frac{a}{l}D(\cos\omega t + \sin\omega t)\cos\theta \end{cases}, \quad (2)$$

消去  $\omega t$ ,并由几何关系  $\frac{l/2}{a} = \cos\theta$ ,可得:

$$\frac{x^2}{(U\tan\theta)^2/2} + \frac{y^2}{U^2/2} = 1. \quad (3)$$

式(3)为椭圆方程。这说明在两个叠层压电陶瓷分别施加等幅同频并且在相位上相差  $\pi/2$  的正弦电压激励信号时,驱动头将以椭圆轨迹运动。

在上述两相正弦电压的频率较高时,驱动足在一个周期内仅有部分时段与动子接触,可以保证每次驱动头接触动子时的摩擦力都是同一个方向,由于惯性动子将在驱动头高频间歇推动下输出连续直线运动。

3 三角转换式压电直线电机设计制作

3.1 电机定子的结构设计

图 3 所示为三角转换式定子结构三维模型图,主要包括三角转换机构、调节垫块、销、两组叠层压电陶瓷、板弹簧、预紧螺钉和基体等。其驱动足呈三角形,叠层压电陶瓷的支撑面一面贴紧三角转换机构,另一面则紧贴安装在基体的调整垫块上。该调整垫块通过销与基体相连,该设计可预防叠层压电陶瓷发生应力集中。叠层压电陶瓷的预紧力由板弹簧的变形回复力提供,在三角转换结构中部下方有一柔性铰链连接的附属结构,

在该结构上设有螺纹孔,有一预紧螺钉穿过板弹簧和基体与三角转换机构相连,调节螺钉使板弹簧处于预变形状态;该附属结构用柔性铰链连接,这是因为在电机工作时三角形转换机构存在平面内转动,为防止预紧机构阻碍三角转换机构的转动采用柔性铰链连接。

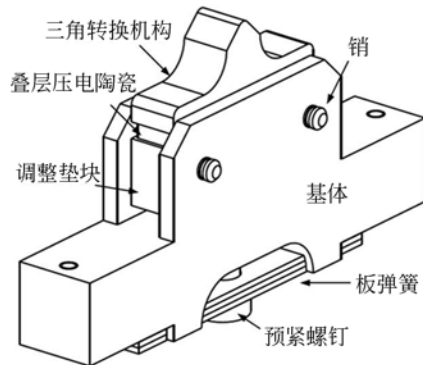


图 3 电机定子三维模型  
Fig. 3 3D model of stator

### 3.2 样机制作

三角转换式压电直线电机定子的所有零件中,所用弹性零件都经热处理、抛光和表面防锈处理。其中,板簧材质选用 65 Mn,其余零件皆使用 45 钢加工。图 4 所示为装配后的三角转换式压电直线电机定子,定子高为 35 mm。

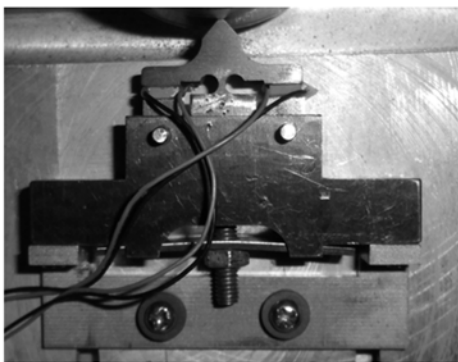


图 4 装配后的定子  
Fig. 4 Assembled stator

图 5 所示为采用直线滑道式夹持机构的三角转换式电机,其后的预压机构可通过调整弹簧导杆的位置来调节预压力。动子使用了带导向滑块的直线滑轨。

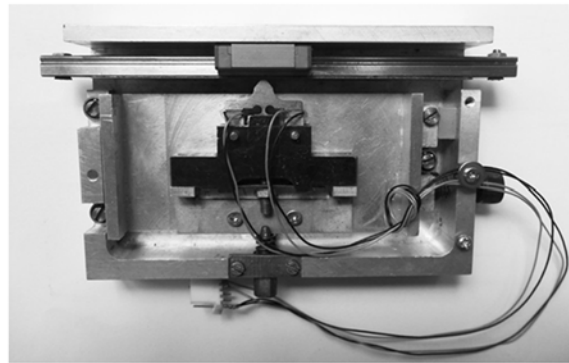


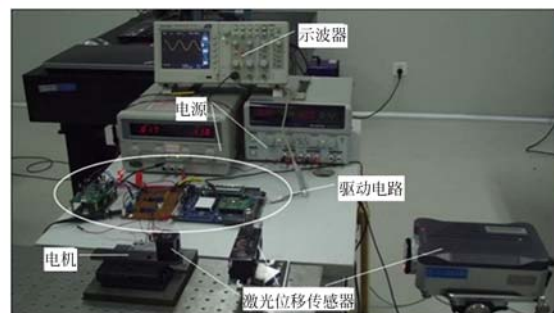
图 5 电机装配总成  
Fig. 5 Whole assembled motor

## 4 样机测试实验与结果

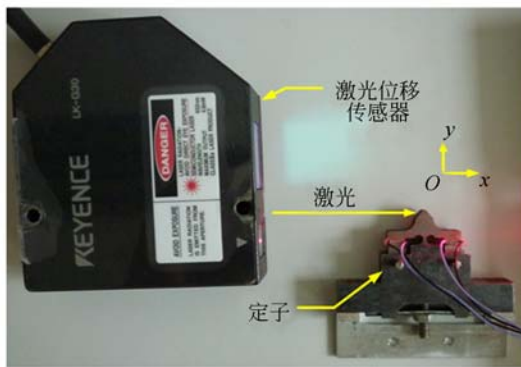
### 4.1 定子驱动足振动响应实验

样机的驱动头材料为 45 钢,叠层压电陶瓷选用德国 PI 公司的 PL055,其尺寸参数为长 5 mm、宽 5 mm、厚 2 mm,该叠层压电陶瓷在 100 V 的电压激励下输出位移标称值为  $2.2 \mu\text{m}$ ,并且其推荐预紧力为 15 MPa,通过与 3 片板簧相接触的螺母来预紧叠层压电陶瓷。完成定子的安装后首先进行驱动头运动轨迹测量,测试装置如图 6 所示,为避免外界振动噪声的干扰,测量对象至于气浮工作台上,所用位移传感器为基恩士公司产品 LK-030 系列激光位移传感器,通过激光三角法获得驱动头的运动信息。

当给其中一个压电叠堆施加幅值为 100 V 的方波电压时,驱动头在  $x$  和  $y$  方向上的位移输出的幅值约为  $1.7 \mu\text{m}$ ,该数值经换算后与叠层压电陶瓷的位移标称值相近,说明两组激励原件正常工作且定子安装合理。



(a) 测量装置实验照片  
(a) Photo of measurement set-up



(b) 测量位置示意

(b) Demonstration of measuring points

图 6 驱动头运动轨迹测量装置

Fig. 6 Measuring equipment of trajectory of drive tip

### 4.2 压电直线电机输出特性实验

动子的运动测试装置如图 7 所示,将激光位移传感器的监测光线方向与导轨运动方向调整至平行,并将光点打在导轨一端。

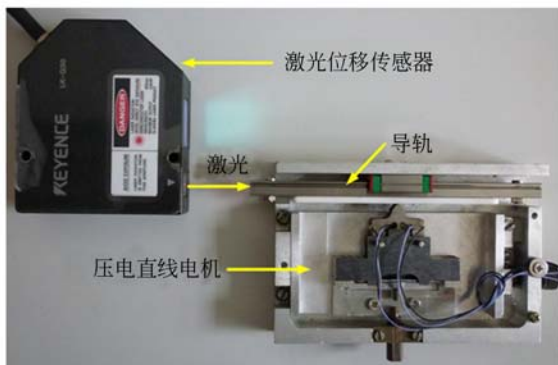
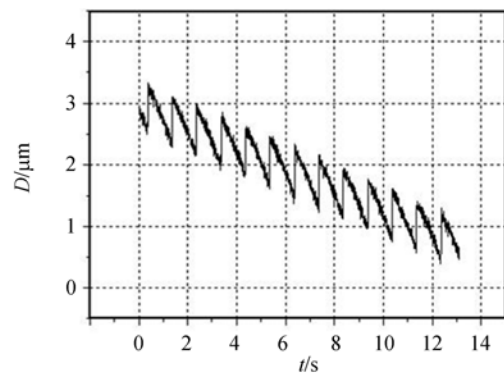


图 7 直线电机运动输出测量示意

Fig. 7 Measuring equipment arrangement of linear motor output

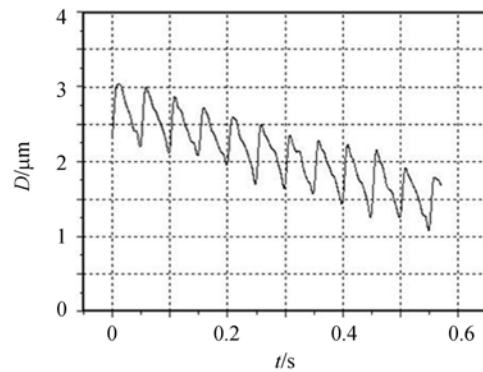
当仅给其中一个叠层压电陶瓷施加幅值为 110 V 的锯齿波电压时,动子在定子的带动下产生往返运动,由于往返运动的加速度存在较大差异,在加速度较小时动子随着驱动头一起运动,在驱动头以较大加速度复位时,动子由于自身惯性与驱动头产生相对滑动,从而动子每个周期都会产生单方向的步进运动。实验结果表明,在频率为 1 Hz 时,直线电机的步距为 0.17 μm;在 20 Hz 的频率下电机的步距为 0.1 μm。

当分别给两个叠层压电陶瓷施加峰值 110 V(正 50 V 偏置)的两相相位差  $\pi/2$  的正弦电压时<sup>[18]</sup>,改变激励电压的频率可以得到压电直线电



(a) 激励频率 2 Hz

(a) Exciting frequency is 2 Hz



(b) 激励频率 20 Hz

(b) Exciting frequency is 20 Hz

图 8 步进分辨率测量

Fig. 8 Measurement of resolution

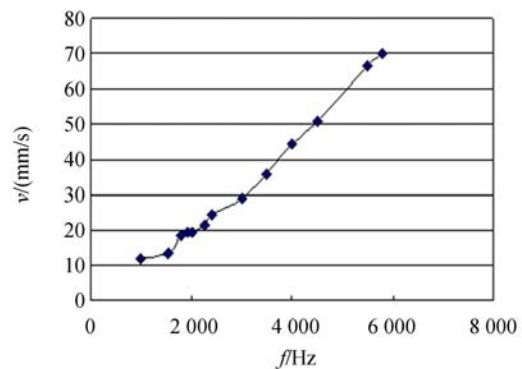


图 9 激励频率与输出速度的关系

Fig. 9 Relationship between the Incentive frequency and output speed

机输出速度与激励电压频率之间的关系,如图 9 所示。由图 9 可以看出,电机在 1.5 kHz 到 5.8 kHz 的较宽频段内稳定运行,压电直线电机的输出速度随激励电压频率的升高而逐渐增大并近似

线性关系。采用在导轨一端悬挂重物的办法测量电机的机械特性,在激励电压的频率为 5.8 kHz、驱动头与动子之间的预压力为 7 N 时,压电直线电机的机械特性曲线如图 10 所示,电机可输出最大 4.8 N 的推力。

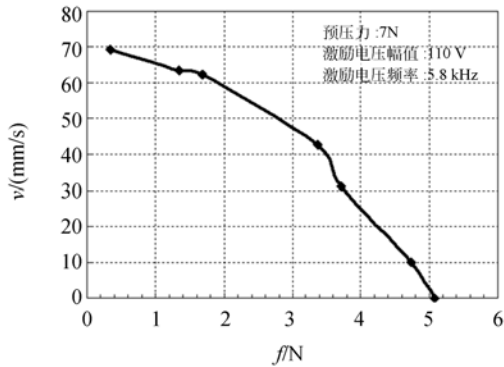


图 10 机械特性曲线

Fig. 10 Curve of mechanical characteristics

从上面的实验结果可以看出,压电直线电机由于避免使用共振,其输出速度与激励频率呈近似线性关系,与直线超声电机在共振区强烈的非线性特性相比,其频率稳定性显著改善,这对提高电机的稳定性和可控性具有积极意义;另外,压电

直线电机采用作动方向尺寸仅为 2 mm 的叠层压电陶瓷,可以在较低的激励电压下实现驱动,一般叠层压电陶瓷作动方向尺寸可以做到 10 mm 以上,如果采用作动方向尺寸 10 mm 的激励元件就可以在 20 V 的激励电压下获得相同的输出特性,这是利用共振原理的直线超声电机难以实现的。

## 5 结 论

本文利用叠层压电陶瓷激励电压低,频率响应宽的特点提出了一种具有两种作动模式的压电直线电机,在三角形位移转换结构转换下,叠层压电陶瓷的输出位移传递至驱动头并在接触面法向和切向同时具有振动分量;在两路正弦电压信号激励下,驱动头振动轨迹为椭圆。样机实验结果表明:电机在较低的激励电压下可实现两种工作模式的作动。在步进模式下,电机的位移分辨率可达  $0.1 \mu\text{m}$ ;连续作动模式下,其输出速度随激励频率的升高而增大;在 7 N 的预压力下,两路激励电压频率为 5.8 kHz,并且电压峰峰值为 110 V(50 V 正偏置)的电压激励下,电机的输出推力可达 4.8 N。

## 参考文献:

- [1] UCHINO K. Piezoelectric ultrasonic motors: overview [J]. 1998, 7(3): 273-285.
- [2] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
ZHAO CH SH. *Ultrasonic Motors: Technologies and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [3] 潘松, 张建辉, 黄卫清, 等. 蝶形直线电机的模糊 Takagi-Sugeno 鲁棒控制 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2667-2673.  
PAN S, ZHANG J H, HUANG W Q, *et al.*. Robust control of butterfly-shaped linear ultrasonic motor based on Takagi-Sugeno fuzzy systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2667-2673. (in Chinese)
- [4] 李晓牛, 周盛强. 光阑用螺纹式超声电机 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(08): 2081-2087.  
LI X N, ZHOU SH Q. Ultrasonic motor connected
- by screw for aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(08): 2081-2087. (in Chinese)
- [5] LIU Y, CHEN W, XU D, *et al.*. Improvement of a rectangle-shape linear piezoelectric motor with four driving feet [J]. *Ceramics International*, 2015, 41; S594-S601.
- [6] ASUMI K, FUKUNAGA R, FUJIMURA T, *et al.*. Miniaturization of a V-Shape Transducer Ultrasonic Motor [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, 48(7): 1-5.
- [7] TAKAHASHI S. Multilayer piezoelectric ceramic actuators and their applications [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1985, 24: 41-45.
- [8] 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).  
HUANG W Q, SHI X Q, WANG Y. Design of diamond piezoelectric micro displacement amplification mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(03). (in Chinese)
- [9] 马立, 肖金涛, 周莎莎, 等. 杠杆式尺蠖压电直线驱

- 动器[J]. 光学精密工程, 2015, 23(01): 184-190.
- MA L, XIAO J T, ZHOU SH SH, *et al.*. linear lever-type piezoelectric inchworm actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(01):184-190. (in Chinese)
- [10] KIM J, LEE J. Self-moving cell linear motor using piezoelectric stack actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2005(14): 934-940.
- [11] WANG S, ZHANG Z, REN L, *et al.*. Design and driving characteristic researches of a novel bionic stepping piezoelectric actuator with large load capacity based on clamping blocks[J]. *Microsystem Technologies*, 2014, 21(8): 1757-1765.
- [12] HUNSTIG M, HEMSEL T, SEXTRO W. Stick-slip and slip-slip operation of piezoelectric inertia drives—Part II: Frequency-limited excitation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 200: 79-89.
- [13] HUNSTIG M, HEMSEL T, SEXTRO W. Stick-slip and slip-slip operation of piezoelectric inertia drives. Part I: Ideal excitation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 200:90-100.
- [14] 赵磊, 巩岩, 赵阳. 光刻投影物镜中的透镜 X-Y 柔性微动调整机构[J]. 光学精密工程, 2013(06): 1425-1433.
- ZHAO L, GONG Y, ZHAO Y. Flexure-based X-Y micro-motion mechanism used in lithographic lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013(06): 1425-1433. (in Chinese)
- [15] 邓小雯, 但斌斌, 陈育荣, 等. 大行程纳米级两级驱动三维精密位移系统的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2014(07): 1-4.
- DENG X, DAN B, CHEN Y, *et al.*. Design of Big trip nanoscale two-stage drive 3D precision displacement system[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014(07): 1-4. (in Chinese)
- [16] PENG Y, PENG Y, GU X, *et al.*. A review of long range piezoelectric motors using frequency leveraged method [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 235: 240-255.
- [17] 于会民, 王寅, 陈乾伟, 等. 三滚子结构夹持的直线型超声电机[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(02): 250-254.
- YU H, WANG Y, CHEN Q, *et al.*. A Linear Ultrasonic Motor Clamped with Three-roller Clamping scheme [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(2): 250-254. (in Chinese)
- [18] 潘松, 黄卫清, 王寅, 等. 基于压电作动器的直线电机及其高效驱动[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2464-2471.
- PAN S, HUANG W Q, WANG Y, *et al.*. High efficiency driving of linear motor based on piezoelectric actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2464-2471. (in Chinese)

## 作者简介:



王 寅(1986—),男,江苏淮安人,博士,讲师,2003年于南京航空航天大学获得学士学位,2014年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事压电精密驱动研究。E-mail: yin.wangyin@hqu.edu.cn

## 导师简介:



黄卫清(1965—),男,江苏南通人,教授,博士生导师,新世纪百千万人才工程、国家教育部优秀人才培养计划、江苏省333工程第二层次获得者,1987年于南京航空航天大学获得学士学位,1990年于南京航空航天大学获得硕士学位,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: mehqwq@nuaa.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)