

# 双足步进作动压电直线电机的工作机理及试验\*

王 寅<sup>1,2</sup>, 孙梦馨<sup>1</sup>, 黄卫清<sup>1\*</sup>, 刘伟华<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 南京, 210016)

(2. 华侨大学精密测量技术及仪器研究中心 厦门, 361021)

**摘要** 大行程和高精度是半导体加工、光波导封装等现代精密制造领域对作动器提出的新要求, 在传统作动器中这两个特性往往相互矛盾从而难以同时具备。为获得满足这一要求的作动器, 基于叠层压电堆器件的特点提出了一种新型步进压电直线电机的原理, 详细分析了它的作动机理, 该原理方案具有较大的作动行程和较高的步进分辨率, 同时其输出推力与预压力成正比, 有望获得较大的推力和自锁力。在原理分析的基础上, 设计了电机的结构方案并加工了样机, 讨论了该电机对装配的特殊要求并对样机的装配进行了验证试验, 样机作动试验结果验证了该原理方案的可行性, 并且在直流偏置 50 V、峰峰值为 100 V、频率 10 Hz 的正弦电压激励下, 样机的平均速度达 63.3  $\mu\text{m/s}$ , 这与理论计算的相对偏差为 6.9%。

**关键词** 压电电机; 步进; 叠层压电堆; 交替作动

**中图分类号** TM356

## 引 言

压电陶瓷的逆压电效应被应用在作动器上时具有高精度、快响应等特点, 近年来得到广大研究者的青睐<sup>[1-2]</sup>。为了使压电材料产生足够的变形输出, 往往需要在压电片上施加较高的电压, 同时结构的共振也被利用来放大压电材料的微变形。这不仅增加了驱动电路的复杂程度, 而且结构的共振随激励频率存在较强的非线性, 这为作动器的控制带来了许多技术难题。叠层压电堆是从大电容技术中衍生出来的新型压电集成元件, 它采用多片压电陶瓷叠层组合, 其机械串联、电路并联式结构可使压电元件在较低的驱动电压下产生较大的应变, 同时还能获得较大的推力<sup>[3-4]</sup>。法国 Cedrat 公司、德国 Elliptech 公司以及德国 PI 公司采用叠层压电堆已经使多种类型的压电电机产品化, 并在精密加工、空间探测等高端领域得到应用。国内相关研究机构也利用叠层压电堆研制了多种压电作动器<sup>[5-7]</sup>。

总体来说, 采用叠层压电堆的压电作动器的工作模式主要分为 3 种: 直动模式、步进作动模式和连续作动模式<sup>[8-12]</sup>。其中: 直动模式利用叠层压电堆

自身变形或将自身变形经特定放大机构放大后直接推动运动物体移动, 主要应用在微行程、高精度的场合, 该类作动器局限在其有限的作动行程; 步进模式就是为提高作动器的作动行程, 采用多组叠层压电堆协同作用运动物体或利用运动物体的惯性使之产生步进运动的大行程作动模式, 该类作动器的技术难点在于机构复杂, 作动器各部件对机械加工的精度要求以及对作动表面处理的要求都很苛刻; 连续模式就是采用叠层压电堆作为激励单元, 使作动器以较高频率作动运动物体使之产生连续运动, 由于叠层压电堆具有较高的电容, 该类作动器的高频驱动电源是技术难点<sup>[13-16]</sup>。

本研究提出了一种新型步进模式作动的压电直线电机原理, 它采用四组叠层压电堆两两分别推动一个驱动足产生圆形轨迹运动, 并使两个驱动足交替作用动子从而使之产生步进运动。该直线压电电机具有响应快、精度高、行程大的特点, 在半导体加工、光纤对接领域有着广阔的应用前景。

## 1 电机结构

步进压电电机结构原理示意图如图 1, 电机由

\* 国家自然科学基金资助项目(51375224); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B12021); 华侨大学高层次人才科研启动费资助项目(15BS102)

收稿日期: 2014-10-29; 修回日期: 2014-12-04

运动输出组件、压电作动组件、定子导向组件和预压装配组件组成,这些组件共同装配在同一基座上。运动输出组件由动子和导向部件构成,动子在导向部件上可单自由度直线运动。压电作动组件是电机的动力源,它由 4 组叠层压电堆分别两两正交布置推动一个驱动足,这一对驱动足共同固定在定子基体上。定子导向组件约束下只能在垂直于动子的运动方向上运动,定子上的一对驱动足由预压装配组件的作用同时与动子表面紧密接触。

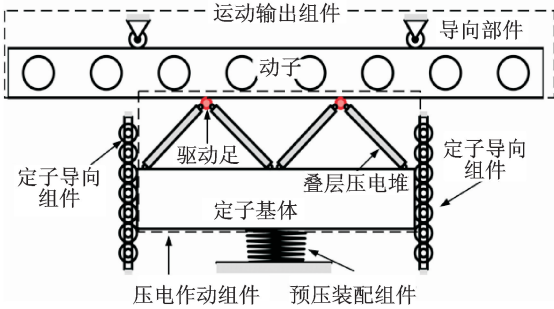


图 1 步进压电电机结构原理示意图

Fig. 1 Sketch view of stepping piezoelectric motor

## 2 工作原理

### 2.1 驱动足运动轨迹

如图 2 所示,定子上 4 组叠层压电堆的激励信号为带直流偏置的正弦电压信号,且两两相位差  $\pi/2$ 。叠层压电堆的变形与所加电压近似呈正比关系,因此,将直角坐标系  $x_1O_1y_1$  原点平移至驱动足位置时,左右两个驱动足的运动轨迹可分别表示为

$$\begin{cases} x_l = D\cos\omega t \\ y_l = D\sin\omega t \\ x_r = -D\cos\omega t \\ y_r = -D\sin\omega t \end{cases} \quad (1)$$

其中: $D$  为叠层压电堆在电压为  $U$  时的伸长量的一半; $\omega$  为正弦电压信号的角频率; $x_1, y_1$  分别为左驱动足在  $x_1$  轴、 $y_1$  轴方向上的运动方程; $x_r, y_r$  分别为右驱动足在  $x_1$  轴、 $y_1$  轴方向上的运动方程。

消去时间参数  $\omega t$ , 可得

$$\begin{cases} \frac{x_l^2}{D^2} + \frac{y_l^2}{D^2} = 1 \\ \frac{x_r^2}{D^2} + \frac{y_r^2}{D^2} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

可见,两个驱动足的运动轨迹都是大小相同的圆,如果将其中一个驱动足的圆轨迹平移到另一个圆轨迹上,两个驱动足的位置在同一时刻始终都分

别在圆的一条直径的两个端点上。

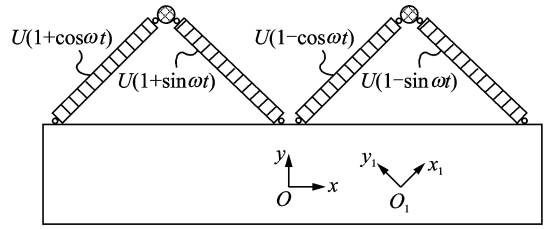


图 2 定子激励信号

Fig. 2 Exciting signal of stator

### 2.2 电机作动分析

下面就电机的一个作动周期  $T$  内的几个典型状态对电机的作动原理进行分析,如图 3 所示。

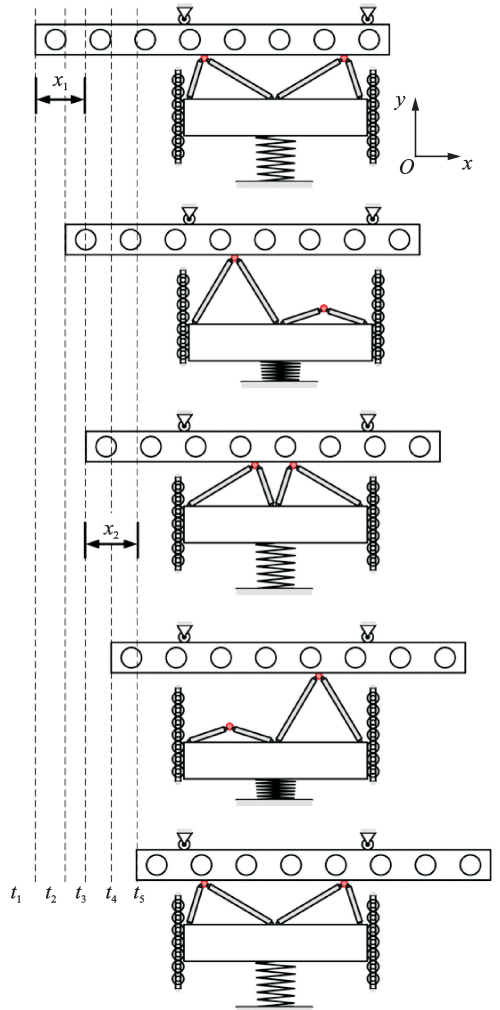


图 3 电机工作原理

Fig. 3 Operation principle of motor

$t_1=0$  时刻,右驱动足开始接触动子,动子在摩擦力作用下与右驱动足一起沿  $x$  轴方向运动,左驱动足脱离动子并沿  $x$  轴负方向运动,定子基体沿  $y$

轴负方向运动同时使预压弹簧被压缩。

$t_2 = T/4$  时刻,右驱动足达到  $y$  方向顶点位置,左驱动足运动到离动子最远位置,此时动子随右驱动足的速度达到最大,同时预压弹簧的压缩量达到最大。

$t_3 = T/2$  时刻,左驱动足开始接触动子,动子在摩擦力作用下与左驱动足一起沿  $x$  轴方向运动,右驱动足脱离动子并沿  $x$  轴负方向运动,此时动子随左驱动足沿  $x$  轴方向前进的位移为  $x_1 = 2D$ 。

$t_4 = 3T/4$  时刻,左驱动足达到  $y$  方向顶点位置,右驱动足运动到离动子最远位置,此时动子随左驱动足的速度再次达到最大,同时预压弹簧的压缩量达到最大。

$t_5 = T$  时刻电机恢复到  $t_1$  时刻的状态,此时动子随右驱动足沿  $x$  轴方向前进的位移为  $x_2 = 2D$ 。

如此,电机周期性运行,并在一个周期内两个驱动足交替作用动子使动子实现单向运动,运动距离为  $4D$ 。

在以上分析中,有一个准静态假设,即假设驱动足的驱动频率足够低,在驱动足与动子接触时二者无相对滑动,这样驱动足与动子之间的摩擦力完全为静摩擦力。动子沿  $x$  轴的运动位移可表示如下

$$X_m = D[2t/T] + |D\sin\omega t| \quad (3)$$

其中:运算符  $[X]$  表示对变量  $X$  取整。

从式(3)可看出,电机在半个周期内步进量是  $D$ ,每个周期内动子步进两次,其步进量与激励电压的幅值成正比,因此该电机可调节激励电压幅值改变步进量。由于驱动足与定子基体固定连接,定子基体也因为驱动足与动子之间的相互作用发生沿  $y$  轴方向的往复运动,将直角坐标系  $xOy$  原点平移至  $t_1$  时刻定子基体的质心处,则定子基体质心在直角坐标系  $xOy$  内的运动方程可表示为

$$Y_s = -|D\sin\omega t| \quad (4)$$

由于预压装配组件中的弹簧预变形远大于定子基体在工作过程中沿  $y$  轴方向上往复运动的幅值,因此可忽略工作过程中驱动足与动子之间接触力的变化。

在工作过程中,驱动足总是一个推动动子运动,另一个脱离动子并沿动子运动相反方向运动,因此,两个驱动足在作动过程中的根据所在的接触状态的不同,运动轨迹也不同,将直角坐标系  $xOy$  原点平移至驱动足未发生运动时的位置,接触动子的驱动足的运动方程表示为

$$\begin{cases} x_c = D\sin\omega t \\ y_c = 0 \end{cases} \quad (5)$$

则脱离动子的驱动足的运动方程可表示为

$$\begin{cases} x_{nc} = -D\sin\omega t \\ y_{nc} = -2D\cos\omega t \end{cases} \quad (6)$$

可见,由于两个驱动足共同固定在定子基体上,与动子接触的驱动足沿  $y$  轴方向的运动分量都叠加在返程的驱动足的  $y$  轴分量上,这对驱动足返程时有效脱离动子十分有利。

以上分析探讨了动子的运动、定子基体及其驱动足的运动,对动子的位移公式(3)关于时间求一阶导数可得到动子运动的瞬时速度方程

$$v_m = D\omega |\cos\omega t| \quad (7)$$

该电机的推力完全取决于驱动足与动子之间的静摩擦力,在预压力为  $F_p$  的装配条件下,电机的输出推力为

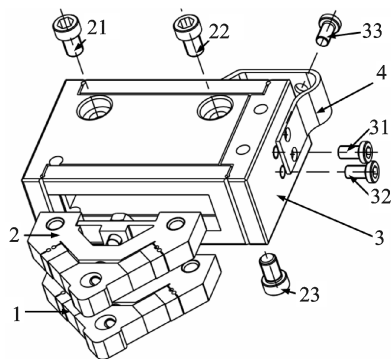
$$F_t = \mu_s F_p \quad (8)$$

其中: $\mu_s$  为驱动足与动子间的静摩擦系数。

## 3 样机试验

### 3.1 结构设计

依照上述原理,设计了电机的结构,如图 4 所示。整个定子分为 4 个部分:两个作动单元 1 和 2,导向盒 3 以及预压板簧 4。其中作动单元 1 和 2 通过螺钉与导向盒 3 固定连接,两个作动单元叠层放置,这样可缩小两个驱动足之间的距离使交替作用更易实现。通过调节螺钉 33 可以调节作动单元与动子之间的预压力。



(1,2 为作动单元;3 为导向盒;4 为预压板簧;21, 22,23,31,32 为装配螺钉;33 为调节螺钉)

图 4 定子结构图

Fig. 4 Structure of stator

作动单元的实物结构及大小如图 5 所示,为了使两组叠层压电堆受到相等的预紧力,采用螺杆拉拔驱动足的方式对两组叠层压电堆预紧,该力由横

在定子基体底部的横梁预变形产生的回复力提供。图示叠层压电堆为德国 PI 公司的产品 PL055。

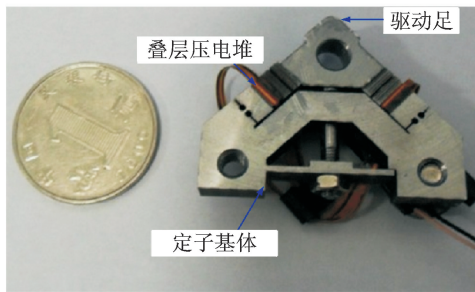


图 5 作动单元实物

Fig. 5 Photo of actuation unit

为验证该原理电机结构的合理性,该样机被用于一维运动平台的驱动,如图 6 所示。为在试验中获得较大的调整范围,该电机用螺旋弹簧代替板簧施加定子和动子之间的预压力。

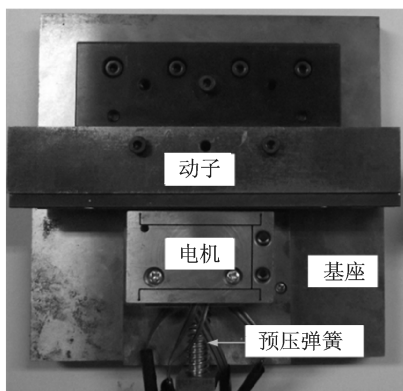


图 6 电机驱动一维滑台实物图

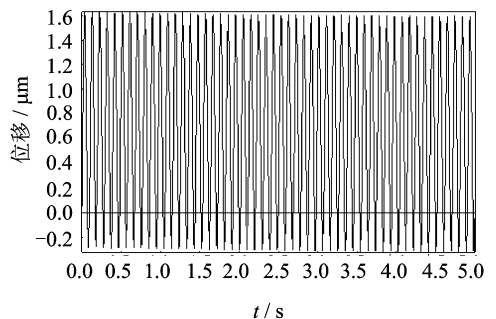
Fig. 6 One DOF stage driven by designed motor

### 3.2 装配检验

由作动原理可知,该电机实现交替步进的关键在于每个作动周期内两个驱动足对动子的作用相同,这要求两个驱动足在装配后同时接触动子表面。为满足这一要求,对电机的定子装配时就需要特别处理,实际操作时需要将安装好的两个驱动足进行研磨并仔细调整定子相对动子的位置。为了验证两个驱动足已经同时接触动子表面,采取了以下验证试验检验电机的装配情况,即将 4 组叠层压电堆按所作用驱动足的不同分为两对,分别按图 2 中激励信号激励每对叠层压电堆,在激励其中一对的同时另外一个不施加激励,这时测量导向盒内作动单元在垂直于动子接触面方向的振动。如果分别激励每对叠层压电堆时导向盒内作动单元都发生相同振

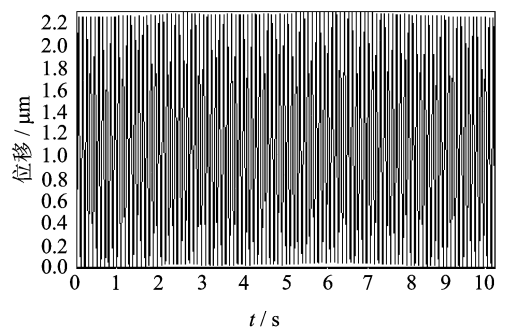
幅的振动,就说明定子的安装满足要求。

按上述方式分别激励两对叠层压电堆,并采用激光位移传感器对两个作动单元垂直于接触面方向的振动进行了测量,结果如图 7 所示。由图可见,两个驱动足在受电压激励时都能接触动子,二者振幅分别是 1.8 和 2.2  $\mu\text{m}$ ,两者相差 0.5  $\mu\text{m}$ 。这一差别可能是因为接触面的平面度的加工精度在微米级,表面的起伏造成。这一差别也将导致两个驱动足在一个周期内对动子的作用有所差别。



(a) 上作动单元的振动

(a) Vibration of upper actuation unit



(b) 下作动单元的振动

(b) Vibration of lower actuation unit

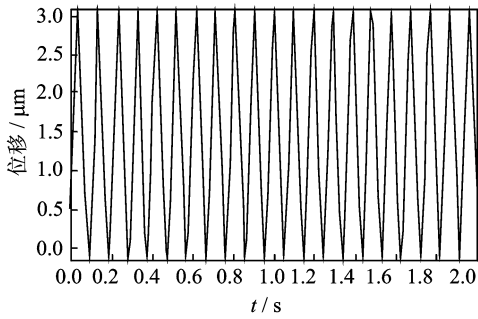
图 7 作动单元垂直于接触面方向的振动

Fig. 7 Vibrations of actuation units along orthogonal direction

### 3.3 作动试验

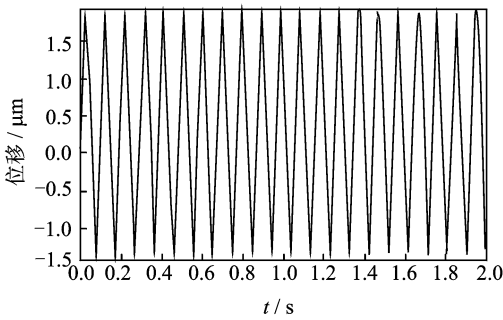
为验证作动机理,采用同样的激光位移传感器测量了在驱动足作用时动子的运动。验证试验分两步进行,首先分别测量了单个驱动足在图 2 所示激励下动子的运动,如图 8 所示。在直流偏置为 50 V、峰峰值为 100 V、频率为 10 Hz 的正弦电压激励下,动子跟随驱动足一起进行简谐振动,振幅都是 3.4  $\mu\text{m}$ 。这也说明,在单驱动足作用下动子不能实现单向运动。

在完成单驱动足作用试验后,四组叠层压电堆同时施加电压激励,激励方式按图 2 所示,即用四相两两相位差  $\pi/2$ 、直流偏置为 50 V、电压峰峰值为



(a) 上作动单元作用时动子的运动

(a) Motion of mover driven by upper actuation unit



(b) 下作动单元作用时动子的运动

(b) Motion of mover driven by lower actuation unit

图 8 单一驱动足作用动子时动子的运动

Fig. 8 Motion of mover driven by single actuation unit

100 V、频率为 10 Hz 的正弦电压激励四组叠层压电堆,这时动子的运动如图 9 所示。可见在双驱动足交替作用下,动子产生了单向运动,其直线运动在 30 s 内的位移为  $1\,900\ \mu\text{m}$ ,平均速度为  $63.3\ \mu\text{m/s}$ 。根据式(3)和单驱动足的试验测量结果,取  $D = 3.4\ \mu\text{m}$ ,可计算出 30 s 内的位移应为  $2\,040\ \mu\text{m}$ ,平均速度应为  $68\ \mu\text{m/s}$ 。产生这一差别的原因是,两个驱动足并不是如作动原理所述的那样在每个周期内对动子的作用完全相同,这一点从装配验证试验的结果也得到了验证。不过,试验值与理论值的相对偏差为 6.9%,二者已经比较接近。

## 4 结束语

在概述压电陶瓷材料特点的基础上,总结了各类作动器利用压电陶瓷逆压电效应的多种方式,得出叠层压电堆在低电压驱动和高精度压电作动场合应用的优势;总结了现有压电作动器的 3 种作动模式,并概述各种作动模式下的技术难点。提出了一种新型步进式直线压电电机的原理方案并详细分析了它的工作原理,该电机同时具有大行程、高精度和

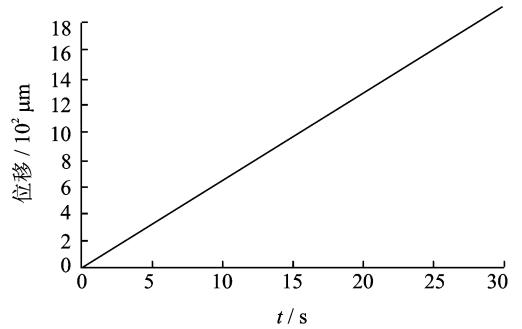


图 9 双驱动足交替作用动子时动子的运动

Fig. 9 Motion of mover driven by alternatively actuation of double units

大推力的特性。设计了电机的机构并制作了样机讨论了样机在装配过程中需满足的特定要求,用试验方法证实了装配的有效性,并通过试验值和理论值的相对偏差比较验证了样机作动机理分析的合理性。

## 参 考 文 献

- [1] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007:53-57.
- [2] 陶宝祺. 智能材料结构[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997:81-85.
- [3] Uchino K, Takahashi S. Multilayer ceramic actuators [J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 1996,1(5):698-705.
- [4] Kim J, Lee J. Self-moving cell linear motor using piezoelectric stack actuators [J]. Smart Materials and Structures, 2005,1(14):934-940.
- [5] 刘建芳,杨志刚,范尊强,等. 压电直线精密驱动器研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(1):65-72.  
Liu Jianfang, Yang Zhigang, Fan Zunqiang et al. Precise PZT linear step actuator[J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(1): 65-72. (in Chinese)
- [6] 刘建芳,杨志刚,程光明,等. 压电驱动精密直线步进电机研究[J]. 中国电机工程学报, 2004,24(4):102-107.  
Liu Jianfang, Yang Zhigang, Cheng Guangming, et al. A study of precision pzt line step motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(4):102-107. (in Chinese)
- [7] 吴鹰飞,李勇,周兆英,等. 蠕动式 X-Y-θ 微动工作台的设计实现[J]. 中国机械工程, 2001, 12(3):263-265.  
Wu Yingfei, Li Yong, Zhou Zhaoying, et al. Design and development of an inchworm type of X-Y-θ micro

- stage[J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, 12(3):263-265. (in Chinese)
- [8] Takano T, Tomikawa Y, Aoyagi M, et al. Piezoelectric actuators driven by the saw-tooth-like motion of a stator [J]. *Ultrasonics*, 1996, 34(2):279-282.
- [9] Chang S, Wang H. A high speed impact actuator using multilayer piezoelectric ceramics[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1990, 24(3):239-244.
- [10] Fleischer M, Stein D, Meixner H. Novel ultrasonic motors with mono-and bimodal drives[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1990, 21(1):357-361.
- [11] Fleischer M, Stein D, Meixner H. New type of piezoelectric ultrasonic motor[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1989, 36(6):614-619.
- [12] Wallaschek J. Piezoelectric ultrasonic motors [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1995, 6(1):71-83.
- [13] 潘松, 陈培洪, 黄卫清. 一种新型压电直线电机的建模分析与实验[J]. *机械与电子*, 2013(2):33-36.  
Pan Song, Chen Peihong, Huang Weiqing. Modeling and experiment of a new type piezoelectric linear motor [J]. *Machinery & Electronics*, 2013(2):33-36. (in Chinese)
- [14] 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 Song, Huang Weiqing, Wang Yin, et al. High efficiency driving of linear motor based on piezoelectric actuator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10):2464-2471. (in Chinese)
- [15] 潘松, 黄卫清. 基于 DC-DC 升压和 LC 振荡的叠层压电陶瓷驱动电源研究[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(20):4925-4929.  
Pan Song, Huang Weiqing, Driving power for multi-layer piezoelectric ceramic based on DC-DC and LC resonant[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(20):4925-4929. (in Chinese)
- [16] 潘松, 黄卫清. 新型压电作动器驱动的直线电机驱动电源研究[J]. *机械与电子*, 2010(8):24-27.  
Pan Song, Huang Weiqing. Research on driving power for new type piezo linear motor driven by piezoelectric actuator[J]. *Machinery & Electronics*, 2010(8):24-27. (in Chinese)



**第一作者简介:**王寅,男,1986年8月生,博士、讲师。主要研究方向为压电精密致动技术。曾发表《A novel rotary ultrasonic motor using an in-plane traveling wave》(《Journal of the Korean Physical Society》2010, Vol. 57, No. 4)等论文。

E-mail: yin. wangyin@hqu. edu. cn

**通信作者简介:**黄卫清,男,1965年4月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为压电精密运动系统。

E-mail: mehwwq@nuaa. edu. cn

