

文章编号 1004-924X(2015)12-3364-07

机械控制式惯性压电旋转驱动器

程光明,邢春美,温建明*,胡意立,曾平,李新辉
(浙江师范大学精密机械研究所,浙江金华 321004)

摘要:以惯性压电旋转驱动器为研究对象,对比研究了非对称式惯性压电旋转驱动器和变摩擦力式惯性压电旋转驱动器的运动特性。分析了两种驱动器的工作原理,设计、制作了试验样机,搭建了测试系统并对两种压电旋转驱动器进行了对比试验测试。结果显示:在 8 Hz 方波电信号的激励下,非对称式压电驱动器的旋转步距大于变摩擦力式旋转驱动器;当驱动电压为 100 V 时,非对称式与变摩擦力式压电驱动器的回退率分别为 73.19%、65.67%;在 40 V、8 Hz 的方波激励下,非对称式与变摩擦力式压电驱动器的线性度残差平方和与重复性标准差分别为 0.031、0.069 与 0.011、0.063。试验结果表明:与变摩擦力式驱动器相比,非对称式驱动器的输出步距及回退率更大,具有较高的线性度和重复性。

关键词:惯性压电旋转驱动器;非对称式压电驱动器;变摩擦力式压电驱动器;运动特性

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152312.3364

Mechanical controlled piezoelectric inertial rotary actuators

CHENG Guang-ming, XING Chun-mei, WEN Jian-ming*, HU Yi-li, ZENG Ping, LI Xin-hui

(*Institute of Precision Machinery, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China*)

* *Corresponding author, E-mail: wjming@zjnu.cn*

Abstract: This study focuses on piezoelectric inertial rotary actuators. The motion characteristics of two kinds of piezoelectric inertial rotary actuators based on asymmetrically clamping structures and changing frictional force were researched. The working principles of two types of actuators were introduced and expounded. To test the performance of the actuators, two prototypes were fabricated and an experimental system was set up. Tested experiments show that the average output stepping angle of the actuator with the asymmetrically clamping structures is bigger than that of the actuator based on the changing frictional force under a square wave signal of 8 Hz, and the rollback rate in each step of the two types reaches 73.19% and 65.67% under a drive voltage of 100 V, respectively. The linearity residual square sum and the repeatability standard deviation are 0.031, 0.069 for the actuator based on the asymmetrically clamping structures, while 0.011, 0.063 for the actuator based on the changing frictional force. Experimental results indicate that the average output stepping angle, rollback rate in each step, linearity and repeatability of the former are all greater than those of the latter.

Key words: piezoelectric inertial rotary actuator; asymmetric piezoelectric actuator; variable friction piezoelectric actuator; movement characteristics

收稿日期:2015-05-15;修订日期:2015-07-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175478, No. 51205369);浙江省自然科学基金资助项目(No. LY15E050010)

1 引言

惯性压电驱动器的研究起始于 20 世纪 80 年代中期,是在惯性和摩擦的作用下通过逆压电效应使电能转化为机械能的转换装置^[1-2],具有结构简单、工作频带宽、分辨率高、工作行程大等优点,在高精度定位装置、医疗机械和机器人系统等领域得到了广泛应用^[3-5]。

根据运动机理不同,惯性压电驱动器可以分为电控式和机械控制式两大类。电控式是采用非对称电信号激励压电元件产生往复不同的驱动力实现定向运动,机械控制式是采用对称电信号激励压电元件并通过机械结构产生往复不同的驱动力实现定向运动。根据电控方式的不同,电控式驱动器主要分为黏滑式惯性压电驱动器^[6-8]和冲击式惯性压电驱动器^[9-10]。国内外学者对电控式惯性压电驱动器进行了大量研究,其成果已应用于精密定位装置和扫描显微镜等领域。近年来,基于不同的驱动机理,相关学者提出了利用对称性电信号激励通过机械控制方式来实现压电驱动器定向运动。根据产生惯性力差的不同,可以将机械控制式惯性压电驱动器分为变摩擦力式惯性压电驱动器(Variable Friction Piezoelectric Inertial Actuator, FPIA)和非对称夹持式惯性压电驱动器(Asymmetric Piezoelectric Inertial Actuator, APIA)。变摩擦力式压电惯性驱动器通过改变正压力或者摩擦系数的方式来控制摩擦力实现驱动。2006 年,曾平等^[11]人提出了变正压力式压电双晶片惯性直线驱动器,在频率为 10 Hz 时可实现 1.2 mm/s 的最高速度,最小稳定步长为

0.75 μm ,最大承载力为 150 g^[11]。2014 年,李新辉^[12]等人在驱动器中采用楔形摩擦足结构,通过改变楔形足的摩擦角和导轨材料来改变驱动器往复移动的摩擦系数来实现驱动^[12]。2010 年,李晓韬^[13]等人设计了应用惯性冲击原理的非对称夹持式压电旋转驱动器,步长分辨率为 5 μrad ,可以实现最大承载力为 300 g^[13]。机械控制式惯性压电旋转驱动器在惯性压电驱动器中属于近年来的研究热点,对于特殊应用场合的应用具有一定的工程参考价值。

目前关于非对称式和变摩擦力式惯性压电旋转驱动器的研究取得一些进展,但关于两种驱动器运动特性的对比未见相关文献报道,本文以采用相同压电双晶片和惯性质量块的非对称式和变摩擦力式惯性压电旋转驱动器为研究对象,通过变正压力的方式来改变摩擦力大小,从回退率、线性度和重复性等方面进行对比分析,得到两种驱动器的运动性能对比结果。

2 工作原理

2.1 非对称式惯性压电旋转驱动器工作原理

在对称方波信号激励下,非对称夹持的压电旋转驱动器的工作原理如图 1 所示。由于压电双晶片两侧的夹持长度不同,即 $\Delta X \neq 0$ 时,存在夹持差。由于夹持差的存在,使压电双晶片振子在上下摆动时的悬臂长度不同,弯曲刚度不同,导致压电双晶片上下摆动的速度、加速度不同,产生的惯性驱动力也不相同,驱动器实现旋转运动^[14]。本文的非对称式惯性压电旋转驱动器夹持差为 4 mm。

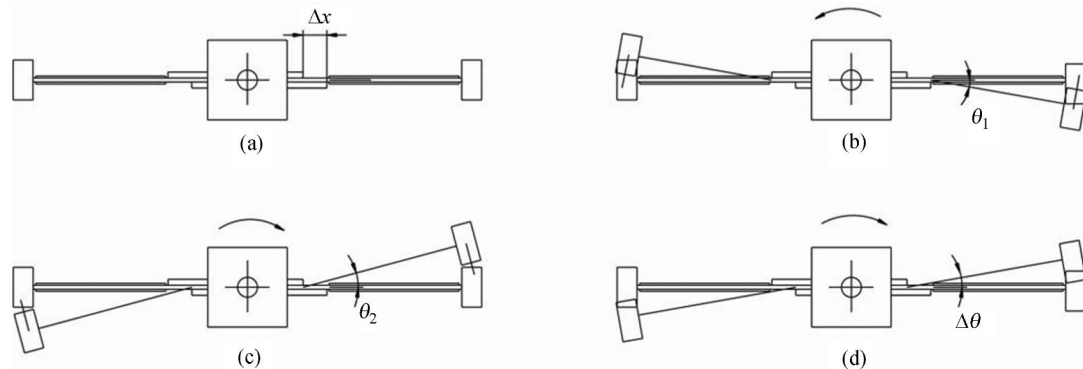


图 1 APIA 工作原理图

Fig.1 Working principle of APIA

2.2 变摩擦力式惯性压电旋转驱动器工作原理

变摩擦力式惯性压电旋转驱动器工作原理如图 2 所示。对压电双晶片施加对称方波信号。当电压信号为正时,压电元件伸长,对主体施加沿斜面垂直向下的作用力,此时主体对接触面的正压力增大,主体与接触面之间的摩擦力增大,摩擦力大于驱动力,主体静止。当电压信号为负时,压电元件缩短,对主体施加沿斜面垂直向上的作用力,此时主体对接触面的正压力减小,主体与接触面之间的摩擦力减小,摩擦力小于驱动力,主体运动^[15]。当压电双晶片振子沿中心轴反对称布置时,产生转矩,形成定向的旋转运动。本文所研究的变摩擦力式惯性压电旋转驱动器 α 为 70° 。

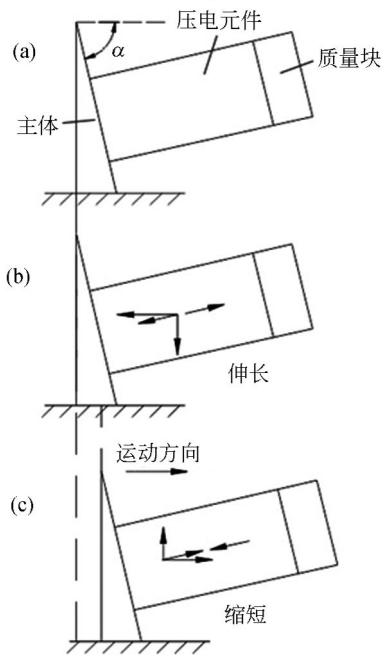


图 2 FPIA 工作原理图

Fig. 2 Working principle of FPIA

3 驱动器试验测试系统及样机

3.1 试验测试系统

惯性压电旋转驱动器的测试系统如图 3 所示。试验时采用安捷伦 33522A 型任意波形发生器(频率为 $1 \mu\text{Hz} \sim 30 \text{ MHz}$)、德国 PI 公司的 E-472.20 功率放大器(功率为 550 W 、频带为 3 kHz)、采用基恩士公司生产的 LK-H500 激光位移传感器和 LK-H080 型激光测量头(测量范围

18 mm ,分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$)。任意波形发生器产生电信号,功率放大器将电压信号放大施加到压电双晶片振子上使驱动器产生旋转运动,激光测位移传感器测量驱动器运动的旋转位移并传输到计算机。

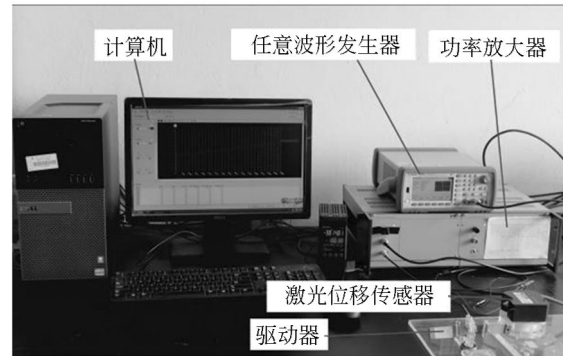
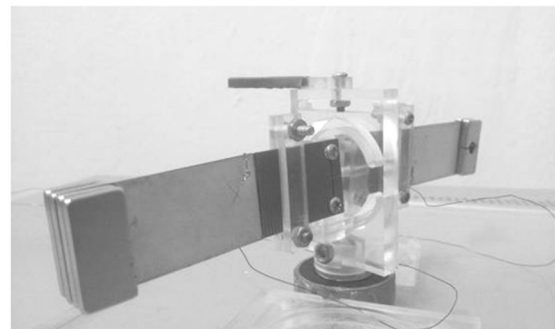


图 3 压电驱动器运动测试系统

Fig. 3 Motion measuring system of actuator

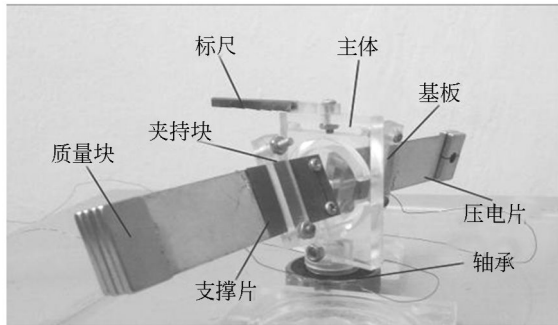
3.2 驱动器样机

驱动器由压电双晶片振子、支撑片、旋转轴等主要部件组成。选择相同的规格构件制作两种驱动器,实现夹持差 Δx 的可调和压电双晶片振子与水平方向的夹角 α 可变换,测得驱动器的总体质量为 78.48 g 。选择夹持差为 4 mm ,压电双晶片振子与水平方向的夹角 α 为 0° ,非对称式惯性压电旋转驱动器样机如图 4(a)所示,具体工作原理见参考文献[13]。选择夹持差 Δx 为 0 ,压电双晶片振子与水平方向的夹角 α 为 70° ,变摩擦力式惯性压电旋转驱动器样机如图 4(b)所示。压电驱动器试验样机的主要零件及其参数如表 1 所示,具体工作原理见参考文献 [16]。



(a) APIA 样机

(a) Prototype of APIA



(b) FPIA 样机
(b) Prototype of FPIA

图 4 驱动器样机

Fig. 4 Prototypes of actuators

表 1 驱动器样机主要零件的材料和尺寸

Tab.1 Major part materials and sizes of actuator prototypes

零件名称	数量/个	几何尺寸/mm	材料	质量/g
质量块	8	10×5×2	磁铁	3.55
压电片	4	32×20×0.2	PZT	—
基板	2	52×20×0.2	磷青铜	—
标尺	1	55×2×3	有机玻璃	—
主体	1	50×34×6	有机玻璃	—
支撑片	2	28×20×0.8	45 钢	—
旋转体	2	33×66×3	有机玻璃	—
轴承	1	C&U6001RS	—	—

4 试验测试及结果分析

4.1 旋转步距

驱动器工作在一阶弯曲模式下,采用方波激励,压电双晶片振子发生弯曲变形,绕旋转轴转

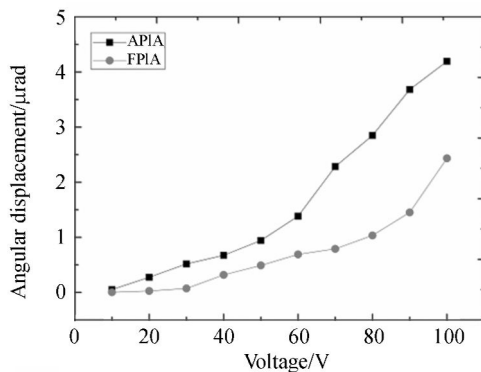


图 5 驱动器旋转步距与电压的关系曲线

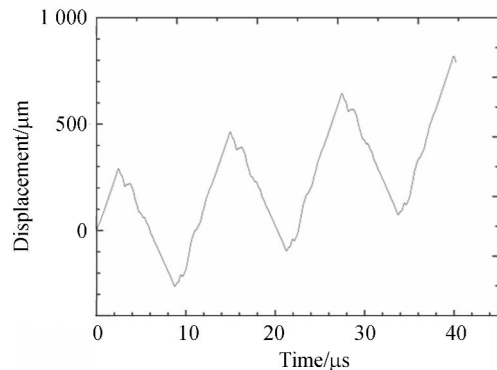
Fig. 5 Measuring angular displacement of different voltages

动。非对称惯性压电旋转驱动器由于压电双晶片左右两侧夹持差的存在,使驱动器正反向的旋转步距不同,形成定向运动。对非对称式惯性压电旋转驱动器和变摩擦力式惯性压电旋转驱动器进行试验,在频率为 8 Hz 时,驱动器的旋转步距随电压变化的关系如图 5 所示。

由图 5 可知,随着电压的增加两种驱动器的步距均增加。其中,当频率为 8 Hz、电压为 10~100 V 时,非对称式惯性压电旋转驱动器的旋转步距大于变摩擦力式惯性压电旋转驱动器。

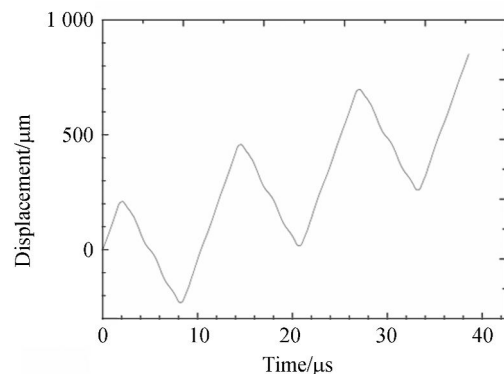
4.2 回退率

在方波信号的频率为 8 Hz,电压为 100 V 时,分别对两种驱动器进行试验测试,研究观察驱动器的旋转步距的回退率情况。通过对试验数据进行处理,得到频率不变时非对称式惯性压电旋转驱动器和变摩擦力式压电旋转的回退率随时间变化曲线,如图 6 所示。



(a) APIA 的旋转步距

(a) Angular displacement of APIA



(b) FPIA 的旋转步距

(b) Angular displacement of FPIA

图 6 驱动器的旋转步距

Fig. 6 Angular displacements of actuators

由图 6 可得,当电压增大到 100 V 时,非对称式惯性压电旋转驱动器的回退率为 73.19%,如图 6(a)所示,变摩擦力式惯性运动旋转驱动器的回退率为 65.67%,如图 6(b)所示。

4.3 线性度

选择频率为 8 Hz、电压为 40 V 的方波信号,分别对两种驱动器的旋转步距进行试验测试,绘制驱动器在运行 10 步时的旋转位移曲线,如图 7 所示,并对旋转步距的线性度进行了分析。

图 7 对数据进行线性拟合和回归分析。通过线性拟合,绘制拟合曲线得到 R_2 值,非对称式的 R_2 值为 0.998 79,变摩擦力式为 0.990 94,可见两者的线性拟合度较好。通过回归分析得到旋转步距的残差平方和,其中,非对称式残差平方和为 0.031,变摩擦力式的残差平方和为 0.069。综上所述,说明非对称式压电旋转驱动器的旋转步距的线性度较变摩擦力式的好。

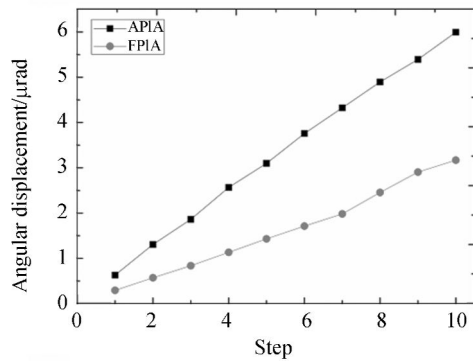


图 7 驱动器步距线性度曲线

Fig. 7 Linearity curves of angular displacement

4.4 重复性

由于在试验过程中,测量条件的变化使得驱动器的不确定度受到影响,故需根据测量的条件的变化进行不确定度的计算。根据驱动器的电压变化曲线,在 8 Hz、40 V 时,旋转步距较为稳定,确定为重复性测量的前提条件。

(1)调整压电双晶片振子,保证夹持差为 4 mm,进行重复性测量 10 次,得到测量重复性的标准偏差为:

$$s(X_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i - \bar{X}}{n-1}} \quad (1)$$

(2)调整压电双晶片振子的旋转角度,拧紧旋

转螺钉,保证压电双晶片振子与水平面成 70° 角,进行重复性测量 10 次,通过式(1)计算由于改变角度所引起的测量重复性,测量的重复性的标准偏差为 s_2 。

试验数据及结算结果如图 8 所示。根据图 8 可以看出,在 40 V、8 Hz 的方波激励时非对称式的重复性比变摩擦力式好。对试验数据计算可以得出,非对称式惯性压电旋转驱动器的标准偏差为 0.011,变摩擦力式惯性压电旋转驱动器的标准偏差为 0.063。由此得知,非对称式惯性压电旋转驱动器的重复性优于变摩擦力式。

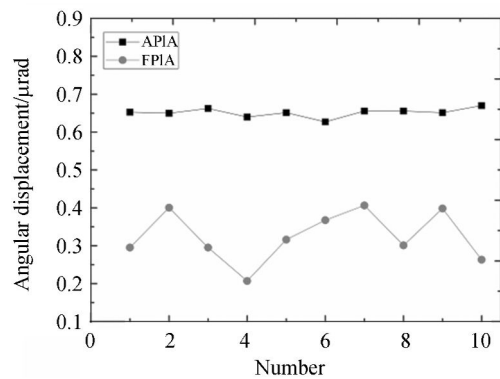


图 8 驱动器重复性测试

Fig. 8 Repeatability test of actuators

4.5 对比分析

在 8 Hz 的方波激励下,对非对称式惯性压电旋转驱动器和变摩擦力式压电旋转驱动器进行对比分析,如表 2 所示。

表 2 压电驱动器运动特性对比

Tab. 2 Comparison between motion characteristics of piezoelectric actuators

驱动器	回退率	线性度 (残差平方和)	重复性 (标准偏差)
APIA	73.19%	0.031	0.011
FPIA	65.67%	0.069	0.063

5 结 论

本文在分析非对称式惯性压电驱动器和变摩擦力式惯性压电驱动器的工作机理的基础上,对驱动器进行了试验研究。结果表明:当激励的方波信号频率为 8 Hz 时,非对称式驱动器的旋转步

距大于变摩擦力式;当电压为 100 V 时,非对称式驱动器的回退率为 73.19%,变摩擦力式为 65.67%;在 40 V、8 Hz 的方波激励时,非对称式驱动器旋转步距的残差平方和为 0.031,变摩擦力式为 0.069,非对称式驱动器重复性标准偏差为

0.011,变摩擦力式为 0.063。非对称式驱动器的回退率大于变摩擦力式,在线性度和重复性方面均优于变摩擦力式。通过对非对称式和变摩擦力式惯性压电旋转驱动器的运动特性对比分析,为惯性压电驱动机构的研究与应用提供参考依据。

参考文献:

- [1] MATTHIAS H, TOBIAS H, WALTER E. Stick - slip and slip - slip peration of piezoelectric inertia drives. Part I: Ideal excitation[J]. *Sensors and Actuators A*, 2013,200: 90-100.
- [2] PENG J Y. *Modeling and Control of Piezoelectric Actuators* [D]. Saskatoon : University of Saskatchewan. 2012.
- [3] GOLDFARB M, CELANOVIC N. Modeling piezoelectric stack actuators for control of micromanipulation [J]. *IEEE Control Syst Mag*, 1997, 17: 69-79.
- [4] UCHINO K. *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*[M]. Boston:Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [5] BANSEVICIUS R, BARAUSKAS R, KULVIETIS G, et al.. *Vibromotors for Precision Microrobots* [M]. USA:Hemisphere Publishing Corp,1988.
- [6] TAKESHI M, HIROAKI M, TAKAMI Y, et al.. A miniaturized resonant-type smooth impact drive mechanism actuator [J]. *Sensors and Actuators A*, 2012,178:188-192.
- [7] DALIUS M, PIOTR V. Linear inertial piezoelectric motor with bimorph disc[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013,36: 110-117.
- [8] KING F H, RYAN V, PINAR M. Design, operation, and motion characteristics of a precise piezoelectric linear motor [J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(2) :231-241.
- [9] 刘品宽,温志杰,李锦. 惯性冲击驱动管内移动机器人设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16 (12) :2320-2326.
- LIU P K, WEN ZH J, LI J. A piezoelectric in-pipe micro robot actuated by impact drive mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (12) :2320-2326. (in Chinese)
- [10] LIU Y T, HIGUCHI T. Precision positioning device utilizing impact force of combined piezo-pneumatic actuator [J]. *Asmetransactions on Mechatronics*, 2001,6(4) :467-473.
- [11] 曾平,吴博达,王涛,等. 变正压力式压电双晶片惯性直线驱动器[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2006, 36:83-86.
- ZENG P, W B D, WANG T, et al.. Inertial linear actuator driven by piezoelectric bimorph with changeable pressure [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2006,36:83-86. (in Chinese)
- [12] 李新辉. 移动式非对称惯性压电驱动机构的研究[D]. 金华:浙江师范大学. 2014.
- LI X H. *Research on Piezoelectric Actuator With Asymmetric Clamping Piezoelectric Bimorph*[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University. 2014. (in Chinese)
- [13] 李晓韬,程光明,杨志刚,等. 应用惯性冲击原理的非对称夹持式压电旋转驱动器的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):156-161.
- LI X T, CHENG G M, YANG ZH G, et al.. Design of asymmetrical rotated piezoelectric actuators based on impact driving principle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,8(1):156-161. (in Chinese)
- [14] ZENG P, SUN SH J, LI L A, et al.. Design and testing of a novel piezoelectric micro-motor actuated by asymmetrical inertial impact driving principle [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014,

3(85):035002 - 035002-8.

- [15] 温建明,马继杰,曾平,等. 新型摩擦变化式压电惯性驱动器[J]. 压电与声光,2012,34(2):214-217.

WEN J M, MA J J, ZENG P, *et al.*. Novel piezoelectric inertial actuator based on changing frictional force [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2012,34(2):214 -217. (in Chinese)

- [16] 马继杰,张海滨,程光明,等. 变正压力非对称夹持

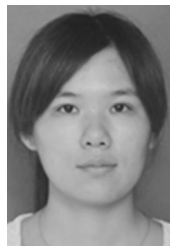
惯性压电旋转驱动器[J]. 光学 精密工程,2015,23(5):1365-1370.

MA J J, ZHANG H B, CHENG G M, *et al.*. Piezoelectric inertial rotary actuator with variable normal pressure and asymmetric gripper [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(5): 1365-1370. (in Chinese)

作者简介:



程光明(1957—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,1982、1985、1996年于吉林工业大学分别获学士、硕士、博士学位,主要从事压电驱动技术的研究。E-mail: cgm123@163.com



邢春美(1990—),女,河南商丘人,硕士研究生,2013年于浙江师范大学获得学士学位,主要从事压电驱动技术的研究。E-mail: chunmeixing03@hotmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)