

文章编号 1004-924X(2015)05-1365-07

变正压力非对称夹持惯性压电旋转驱动器

马继杰, 张海滨, 程光明*, 曾平, 温建明, 李新辉
(浙江师范大学工学院, 浙江金华 321004)

摘要: 设计了以非对称机械夹持压电双晶片振子为驱动元件, 支撑面之间正压力可以改变的非对称夹持惯性压电旋转驱动器。分析了该驱动器的运动机理, 建立了非对称夹持压电双晶片振子的仿真分析模型, 研制了实验装置, 并采用 ANSYS 仿真分析和试验测试对比的方式, 探讨了非对称夹持压电双晶片振子在对称方波激励电信号作用下的瞬态加速度响应情况。仿真分析和试验测试结果表明, 在对称方波激励电信号作用下, 非对称夹持压电双晶片振子具有较好的惯性冲击特性。试验研究了变正压力非对称夹持惯性压电旋转驱动器在不同旋转角度和激励电信号频率条件下的工作性能, 结果表明: 在夹持差为 4 mm, 激励电信号电压为 30 V, 激励电信号频率为 5 Hz, 压电振子与接触平面之间夹角为 50° 时, 研制的压电旋转驱动器能够明显减少惯性压电旋转驱动器回退的现象, 可实现稳定单向旋转。

关键词: 压电驱动器; 旋转驱动器; 非对称夹持; 变正压力; 瞬态响应

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152305.1365

Piezoelectric inertial rotary actuator with variable normal pressure and asymmetric gripper

MA Ji-jie, ZHANG Hai-bin, CHENG Guang-ming*, ZENG Ping, WEN Jian-ming, LI Xin-hui

(College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

* Corresponding author, E-mail: cgml23@163.com

Abstract: A piezoelectric inertial rotary actuator with variable normal pressures and asymmetric grippers was designed, which driven by a asymmetric clamping piezoelectric bimorph vibrator. The motion mechanism of the piezoelectric inertial rotary actuator was analyzed, then a simulation model of the asymmetric clamping piezoelectric bimorph vibrator was established and an experimental platform was built. By both the ANSYS simulation analysis and comparison experiment, the transient response of symmetric square wave of this asymmetric clamping piezoelectric bimorph vibrator was demonstrated. The results show the asymmetric clamping piezoelectric bimorph vibrator has good inertial impact performance under a symmetric square wave. The further variable normal pressure tests on different angles and stimulation frequencies for the piezoelectric inertial rotary actuator illustrate that the return length in each step is apparently reduced when the clamping difference is 4 mm, the stimulating voltage is 30 V, the stimulation frequency is 5 Hz and the angle between the piezoelectric vibrator and the surface is 50°, by which the piezoelectric inertial rotary actuator implements a stable unidirectional rotation.

Key words: piezoelectric actuator; rotary actuator; asymmetry gripper; variable normal pressure; transient response

收稿日期: 2014-10-28; 修订日期: 2014-12-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51205369, No. 51175478); 浙江省教育厅资助项目 (No. Y201225987)

1 引言

压电驱动器具有位移分辨率高、频率响应快、不发热、无电磁干扰等特点,在微机械的自动装配装置、微机器人操作、微型机械制造、精密光学调整、纳米加工和光纤对接、航天领域以及生物医学等领域得到了广泛应用^[1-4]。其中,利用压电元件动态特性的压电惯性驱动器(IDM)在精密驱动领域已发展为一种独特的驱动形式,如超真空用精密位移装置,微型机器人手臂和扫描隧道显微镜等。基于惯性冲击原理的产品化装置有微机械自动装配装置和医用细胞操作装置^[5-8]。因惯性冲击式压电驱动器在工作行程、分辨率、频率响应、制造成本、受压电元件滞环蠕变影响程度等方面的独特优势,惯性冲击式压电驱动器逐渐成为压电精密驱动的重要部分^[9-11]。

本文以惯性压电旋转驱动器为研究对象,设计并研制了以对称方波作为激励电信号,采用非对称机械夹持机构,通过改变惯性压电旋转驱动器与支撑面之间的接触正压力,实现稳定单向旋转运动的变正压力非对称夹持惯性压电旋转驱动器。与传统的惯性压电旋转驱动器相比,该驱动器在小电压驱动下可减小机构的回退现象,增大旋转步长,提高机构工作的稳定性,可为改善惯性压电驱动器的工作性能提供新的思路。

2 惯性压电驱动器结构和工作原理

2.1 惯性压电驱动器结构组成

图 1 所示为变正压力式非对称夹持惯性压电旋转驱动器虚拟样机,2 片压电单晶片与铍青铜基板以及惯性冲击质量块共同形成压电双晶片振子,压电双晶片振子在夹持体以及连接件的共同作用下构成非对称夹持压电双晶片振子结构。非对称夹持惯性压电旋转驱动器有 2 个完全相同的非对称夹持压电双晶片振子。为了改变惯性压电旋转驱动器旋转运动时与接触面之间的正压力,将压电双晶片振子顺时针旋转使其与水平接触面之间的夹角为 α 。

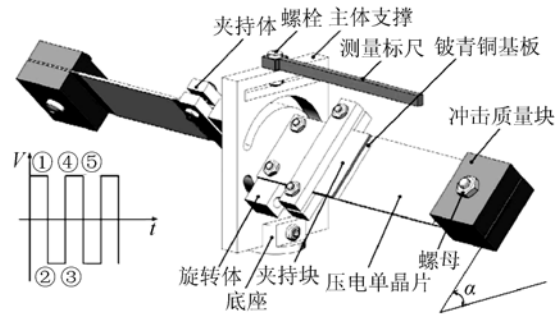


图 1 惯性驱动器结构简图及驱动电信号波形

Fig. 1 Sketch and driving signal of inertial rotary actuator

2.2 惯性压电驱动器运动机理

惯性压电驱动样机可在对称方波电信号激励作用下产生旋转运动。在方波电信号下降沿时,压电双晶片振子的自由端带动质量块在激励电信号作用下快速向上摆动,产生较小的向下惯性冲击力 F_1 ;在方波电信号上升沿时,压电双晶片振子的自由端带动质量块在激励电信号作用下快速向下摆动,产生较大的向上惯性冲击力 F_2 。惯性冲击力在水平方向和垂直方向上的分解示意如图 2 所示。

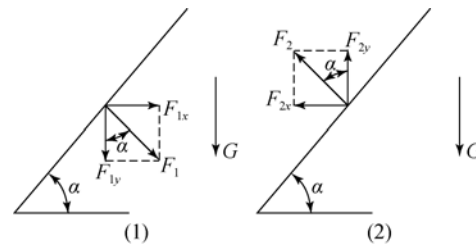


图 2 惯性冲击力分解示意图

Fig. 2 Components of inertial impact force

非对称夹持压电双晶片振子向上摆动时,产生的水平和竖直方向上的惯性冲击分力分别为:

$$F_{1x} = F_1 \sin \alpha, \quad (1)$$

$$F_{1y} = F_1 \cos \alpha. \quad (2)$$

同理,非对称夹持压电双晶片振子向下摆动时水平和竖直方向上的惯性冲击分力分别为:

$$F_{2x} = F_2 \sin \alpha, \quad (3)$$

$$F_{2y} = F_2 \cos \alpha. \quad (4)$$

则压电振子上下快速摆动时惯性压电旋转驱动器的驱动力偶距和摩擦阻力距分别为:

$$T_1 = 2 F_{1x} L = 2 L F_1 \sin \alpha, \quad (5)$$

$$T_2 = 2 F_{2x} L = 2 L F_2 \sin \alpha, \quad (6)$$

$$M_1 = \frac{2\mu(G + F_{1y})r}{3} = \frac{2\mu(G + F_1 \cos \alpha)r}{3}, \quad (7)$$

$$M_2 = \frac{2\mu(G - F_{2y})r}{3} = \frac{2\mu(G - F_2 \cos \alpha)r}{3}, \quad (8)$$

式中: L 为压电双晶片振子自由端质量块中心到主体支持中心线的距离, μ 为惯性压电旋转驱动器与接触面之间的摩擦系数, G 为惯性压电旋转驱动器重力, r 为底座半径。

由于非对称机械夹持差的存在, 非对称夹持压电双晶片振子快速向上摆动时产生垂直压电振子表面向下的惯性冲击力 F_1 小于压电双晶片振子快速向下摆动时产生垂直压电振子表面向上的惯性冲击力 F_2 , 即惯性压电旋转驱动器在压电振子向下摆动时的驱动力偶距 T_2 大于压电振子向上摆动时的驱动力偶距 T_1 。

根据不同的 T_1 、 T_2 、 M_1 、 M_2 值, 惯性压电旋转驱动器可以形成 3 种不同的运动状态:

- (1) 当 $T_2 > T_1 > M_1$ 时, 惯性压电旋转驱动器双向旋转运动;
- (2) 当 $T_2 > M_2$ 且 $T_1 \leq M_1$ 时, 惯性压电旋转驱动器单向顺时针(从图 1 驱动器顶端看)运动;
- (3) 当 $T_2 \leq M_2$ 时, 惯性压电旋转驱动器静止不动。

通过对惯性压电旋转驱动器结构参数的合理设计以及驱动条件的选择, 可以实现惯性压电旋转驱动器稳定单向旋转。

3 驱动元件动态特性分析

为分析变正压力非对称夹持惯性压电旋转驱动器的动态运动性能, 利用 ANSYS 软件对非对称夹持压电双晶片振子的模态振型和固有频率进行分析, 通过仿真分析和试验对比分析非对称夹持压电双晶片振子在对称方波电信号激励下的加速度响应特性。

3.1 非对称夹持压电双晶片振子模态分析

利用 Block Lanczos 法对非对称夹持压电双晶片振子进行模态分析时, 压电晶片采用 Solid5 耦合场单元, 铍青铜基板和冲击质量块采用 Solid45 固体结构单元。

非对称夹持压电双晶片振子结构如图 3 所示, 压电双晶片振子被夹持在夹持块 1 和夹持块 2 中间, 形成悬臂支撑形式。在夹持部位设计了

夹持差 L_3 。如果 $L_3 = 0$, 该结构为对称夹持结构, 在对称电信号的激励作用下, 压电双晶片将产生双向对称的摆动运动; 当 $L_3 \neq 0$ 时, 在对称电信号的激励作用下, 压电双晶片双向摆动时会产生明显的区别, 向上摆动时, 悬臂长度为 $L - L_1$, 向下摆动时, 由于夹持块 2 的影响, 悬臂长度为 $L - L_2$ 。这种夹持长度的非对称, 将使压电双晶片双向摆动时的悬臂长度改变, 相应刚度也不同, 压电振子双向摆动时产生的惯性冲击力以及端部位移也会产生明显的差异。

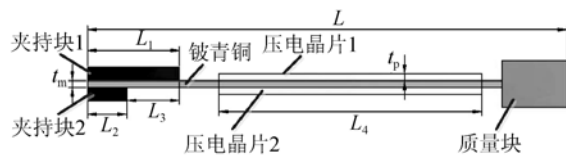


图 3 非对称夹持压电双晶片振子

Fig. 3 Asymmetric clamping piezoelectric bimorph vibrator

在建立非对称夹持压电双晶片振子的仿真分析模型时, 为了便于分析, 在满足功能需求的前提下对模型结构进行简化并进行相应假设: (1) 为了加速收敛速度, 提高计算精度, 在建模时将夹持块 2 忽略, 而对铍青铜基板和夹持块 1 左端进行长度为 L_2 的完全约束(长度等于 L_2 的完全约束, 等同于夹持块 2 在非对称夹持压电悬臂梁结构中起到的作用); (2) 压电双晶片在向上摆动时铍青铜基板与夹持块 1 接触, 铍青铜基板发生弯曲, 但基板与夹持块 1 两者之间无穿透, 为体现这一结构特性, 在夹持块 1 与铍青铜基板之间长 L_3 接触处建立接触, 两者之间采用面面接触, ANSYS 分析时的数学分析模型及网格划分后的效果如图 4 所示, 分析时选取的夹持块材料为 45 号钢, 尺寸为 $19.5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。

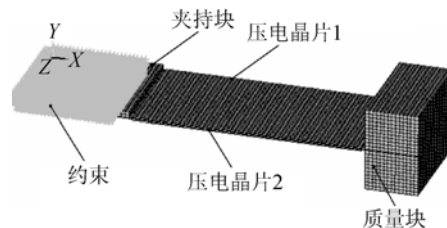
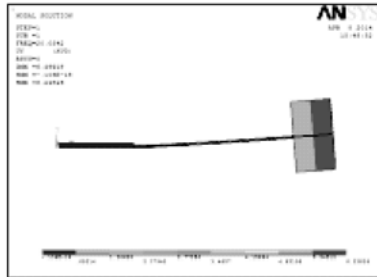


图 4 非对称夹持压电双晶片振子仿真模型及网格划分

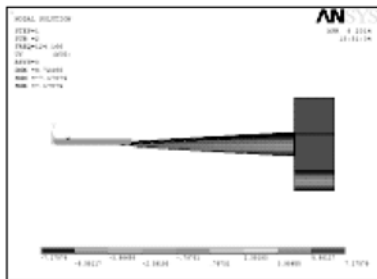
Fig. 4 Simulation model and meshing of asymmetric clamping piezoelectric bimorph vibrator

模态分析时对铍青铜基板和夹持块 1 进行长度为 $L_2 = 15.5 \text{ mm}$ 的完全约束, 夹持差 $L_3 = 4 \text{ mm}$, 得到非对称夹持压电双晶片振子的前 3 阶振型曲线及固有频率如图 5 所示。



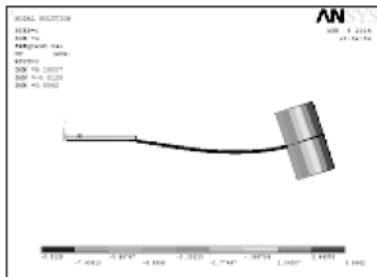
(a) 一阶 20.03 Hz

(a) The first order with 20.03 Hz



(b) 二阶 124.16 Hz

(b) The second order with 124.16 Hz



(c) 三阶 248.04 Hz

(c) The third order with 248.04 Hz

图 5 非对称夹持压电双晶片振子各阶振型及固有频率
Fig. 5 Vibration modes and natural frequencies of asymmetric clamping piezoelectric bimorph vibrator

从图 5 可以看出, 非对称夹持条件下压电双晶片振子在一阶模态时的振型能获得较大的自由端变形量, 满足惯性冲击式压电驱动器驱动特性的要求, 因此在对惯性冲击式压电驱动器进行激励时, 激励信号频率应低于压电双晶片振子的一阶固有频率。

3.2 非对称夹持压电双晶片振子加速度响应分析

非对称夹持压电双晶片振子产生的惯性冲击

力作为惯性压电旋转驱动器的主要驱动力, 其大小直接影响惯性压电驱动器的运动性能, 而非对称夹持压电双晶片振子在对称电信号作用下产生的瞬态加速度直接决定惯性冲击力的大小。在实际试验测试中所用到的对称波形电信号主要有对称方波、三角波形、正弦波形等电信号, 对称方波电信号相对于三角波和正弦波有较大的电压值突变, 工作过程中可产生较大的惯性冲击, 满足惯性压电驱动器对惯性冲击性能的要求。在方波激励电信号作用下非对称夹持压电双晶片振子自由端瞬态加速度仿真和试验结果分别如图 6、图 7 所示。

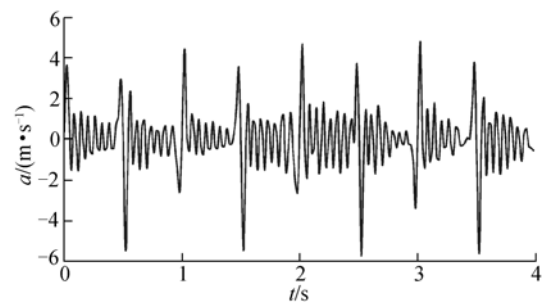


图 6 压电双晶片振子自由端瞬态加速度仿真结果

Fig. 6 Simulated transient acceleration of piezoelectric bimorph free end

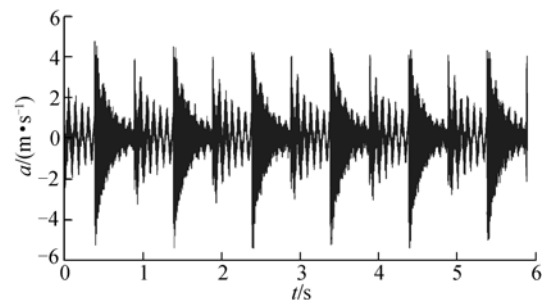


图 7 压电双晶片振子自由端瞬态加速度试验结果

Fig. 7 Tested transient acceleration of piezoelectric bimorph free end

对比图 6 和图 7 可以看出, 由于存在夹持差, 非对称夹持压电双晶片振子在对称方波信号的激励下, 其自由端在方波正负半周呈现出不同的瞬态加速度, 最大值分别为 5.5 m/s^2 和 4 m/s^2 , 仿真和试验测试结果具有较好的一致性。这表明, 在对称方波电信号激励作用下, 非对称夹持压电双晶片振子元件有较好的惯性冲击性能。

4 惯性压电旋转驱动器性能试验分析

制作了变正压力非对称夹持惯性压电旋转驱动器样机,在不同压电双晶片振子旋转角度 α 以及激励电信号频率条件下测试了惯性压电驱动器的旋转步长,对变正压力非对称夹持惯性压电旋转驱动器的旋转位移进行了测试。

4.1 驱动器样机及试验测试系统

变正压力非对称夹持惯性压电旋转驱动器样机如图 8 所示。压电晶片采用汕头市先宁电子有限公司生产的压电陶瓷材料,型号为 PZT4,尺寸为 $40\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 0.2\text{ mm}$;压电双晶片基板为铍青铜,尺寸为 $70\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 0.2\text{ mm}$;冲击质量块采用灰铸铁材料单个质量块,尺寸为 $20\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 3\text{ mm}$,质量为 8.8 g 。主体支撑、旋转体、夹持体、底座材料均为亚克力板,尺寸分别为 $47\text{ mm}\times 34\text{ mm}\times 5.7\text{ mm}$ 、 $27\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 和 $33\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 3\text{ mm}$,底座直径为 16 mm ,夹持块材料采用 45 钢,尺寸为 $28\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 0.8\text{ mm}$,质量为 2.15 g 。

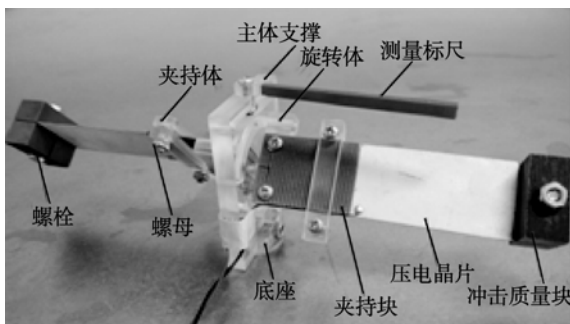


图 8 变正压力非对称夹持惯性压电旋转驱动器样机
Fig. 8 Prototype of piezoelectric inertial rotary actuator with variable normal pressure and asymmetric gripper

试验测试系统主要由 LK-G5000 精密激光测位仪、Agilent33522A 系列函数和任意波形发生器、HEA-200C 功率放大器、GDS-800 信号示波器和 DVID 精密气浮隔振台等组成。

4.2 不同驱动频率下驱动器旋转步长试验测试

在夹持差为 4 mm ,激励电信号电压为 30 V 条件下分别在旋转角度 α 为 40° 、 45° 、 50° 、 55° 和 60° 时对变正压力非对称夹持惯性压电旋转驱动器旋

转步长 (R) 进行试验测试,试验结果如图 9 所示。

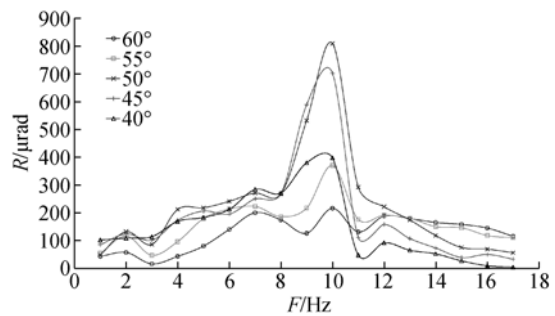


图 9 不同激励频率时各个旋转角度驱动器旋转步长

Fig. 9 Step of actuator at different frequencies and angles

由图 9 可知,在激励电信号频率为 10 Hz 时,针对不同的压电双晶片振子旋转角度 α ,变正压力非对称夹持惯性压电旋转驱动器旋转步长达到最大值。

4.3 不同旋转角度下驱动器旋转步长试验测试

在夹持差为 4 mm ,激励方波电信号电压为 30 V ,频率为 10 Hz 条件下对变正压力非对称夹持惯性压电旋转驱动器在旋转角度 α 为 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 55° 、 60° 、 65° 和 70° 时的旋转步长试验测试结果如图 10 所示。

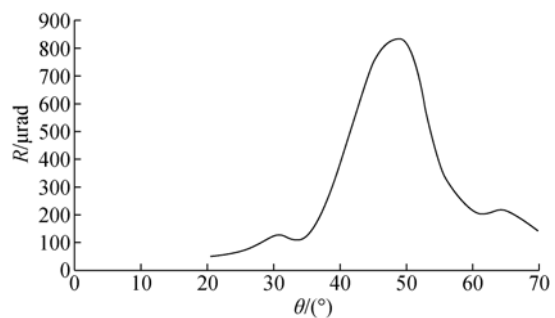


图 10 不同旋转角度驱动器旋转步长

Fig. 10 Step of actuator at different angles

图 9 和图 10 可知,在 10 Hz 、旋转角度 α 为 50° 时变正压力非对称夹持惯性压电旋转驱动器旋转步长值达到最大。

4.4 惯性压电旋转驱动器旋转位移试验分析

通过改变压电双晶片振子与接触面之间的夹角 α 改变惯性压电驱动器在旋转过程中与接触面之间的正压力,从而得到惯性压电旋转驱动器旋

转运动过程中摩擦力的变化。在驱动方波电信号电压为 30 V、电信号频率为 5 Hz、夹持差为 4 mm 条件下旋转角度 α 分别为 90° (惯性压电旋转驱动器旋转运动时与接触面之间正压力不变) 和 50° 时惯性压电旋转驱动器旋转位移 (S) 试验测试结果分别如图 11、12 所示。

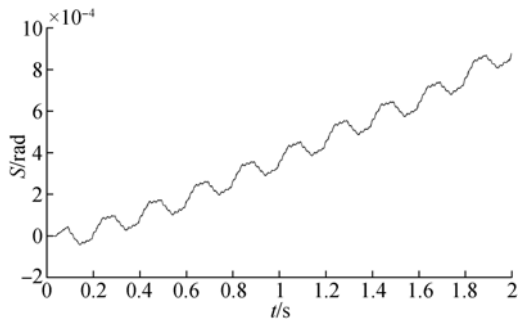


图 11 无接触正压力变化时驱动器旋转位移测试结果

Fig. 11 Tested displacement of rotary actuator without normal pressure

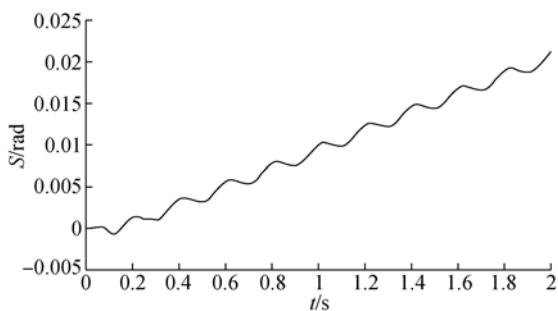


图 12 有接触正压力变化时驱动器旋转位移测试结果

Fig. 12 Tested displacement of rotary actuator with normal pressure

通过对比图 11 和图 12 可知, 旋转夹角 α 为 50° 时变正压力非对称夹持惯性压电旋转驱动器能明显减弱定摩擦式非对称夹持惯性压电旋转驱动器回退的现象, 运动稳定, 能够实现单向旋转运动。

由图 12 可知, 在激励电信号频率为 5 Hz 时变正压力式非对称夹持惯性压电旋转驱动器虽能

够减弱定摩擦式非对称夹持惯性压电旋转驱动器回退的现象, 实现单向旋转运动, 但其线性度较差, 而在激励电信号频率为 19 Hz 时有较好的位移线性控制特性, 激励电信号频率为 19 Hz 时变正压力惯性压电旋转驱动器旋转位移试验测试结果如图 13 所示。

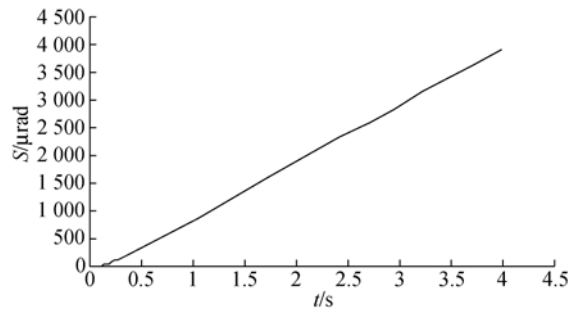


图 13 19 Hz 时驱动器旋转位移试验测试结果

Fig. 13 Tested displacement of actuator at 19 Hz

5 结 论

本文研制了以非对称机械夹持压电双晶片振子为驱动元件的变正压力非对称夹持惯性压电旋转驱动器, 分析了惯性压电旋转驱动器旋转运动时接触正压力变化的机理。建立了非对称夹持压电双晶片振子的仿真分析模型, 仿真分析和试验测试了对称方波电信号激励作用下非对称夹持压电双晶片振子的瞬态加速度特性, 一致性较好。分析结果表明: 对称方波激励作用下, 非对称夹持压电双晶片振子元件有较好的惯性冲击性能, 可以作为激励电信号实现对惯性压电旋转驱动器的驱动。在夹持差为 4 mm, 激励方波电信号电压为 30 V, 激励电信号频率为 5 Hz 条件下, 当非对称夹持压电双晶片振子与接触平面之间的夹角为 50° 时, 惯性压电旋转驱动器能明显减弱没有正压力变化时驱动器产生的回退现象, 在 19 Hz 激励频率下驱动器有较好的线性度。本文结果可为改善惯性压电驱动器的工作性能提供有益参考。

参考文献:

- [1] 温建明, 马继杰, 曾平. 压电旋转驱动器制作及性能测试[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 131-136.

- WEN J M, MA J J, ZENG P, *et al.*. Machining and functional testing of piezoelectric rotary actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 131-136. (in Chinese)

- [2] TADIGADAPA S. Piezoelectric microelectromechanical systems-challenges and opportunities [J]. *Procedia Engineering*, 2010,5: 468-471.
- [3] HSIAOKANG M, SHIHAN H, JYUNSHENG W, *et al.*. Experimental study of a novel piezoelectric proton exchange membrane fuel cell with nozzle and diffuser [J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(5): 1393-1400.
- [4] 杨凯, 张德林, 辜承林. 压电驱动器研究与应用中的若干进展[J]. *微电机*, 2007,40(6):83-87.
YANG K, ZHANG D L, GU CH L. New progress in research and application of piezoelectric actuators [J]. *Micromotors Servo Technique*, 2007, 40(6): 83-87. (in Chinese)
- [5] LIU Y T, WANG CH W. A self moving precision positioning stage utilizing impact force of spring mounted piezoelectric actuator [J]. *Sensors and Actuators. A, Physical*, 2002, 102:83-92.
- [6] WU T, RO P I. Dynamic peak amplitude analysis and bonding layer effects of piezoelectric bimorph cantilevers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2004,13(1): 203-210.
- [7] 张宏壮, 程光明, 曾平, 等. 压电双晶片型2自由度精密驱动器的动态特性[J] *机械工程学报*, 2007, 43(2):87-91.
ZHANG H ZH, CHENG G M, ZENG P, *et al.*. Dynamic characteristics of 2-DOF precision positioning device utilizing impact force of end-loaded piezoelectric cantilever bimorphs [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007,43(2):87-91. (in Chinese)
- [8] 孙立宁, 刘品宽, 吴善强, 等. 管内移动微型机器人研究与发展现状[J]. *光学精密工程*, 2003,11(4): 326-332.
SUN L N, LIU P K, WU SH Q, *et al.*. Status and development of in-pipe micro robots[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(4):326-332. (in Chinese)
- [9] 李晓韬, 程光明, 杨志刚, 等. 应用惯性冲击原理的非对称夹持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, 18(1): 156-161. (in Chinese)
- [10] 程光明, 李晓韬, 曾平, 等. 压电叠堆式惯性移动机构的设计与实验[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2007,31(7): 85-88.
CHENG G M, LI X T, ZENG P, *et al.*. Inertial impact driving movement mechanism actuated by multilayer piezoelectric actuator [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2007,31(7): 85-88. (in Chinese)
- [11] 曾平, 李晓韬, 程光明, 等. 新型压电单振子移动机构的实验研究[J]. *压电与声光*, 2007,29(5): 622-624.
ZENG P, LI X T, CHENG G M, *et al.*. Experimental research on new single-oscillator piezoelectric linear actuator [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2007, 29(5): 622-624. (in Chinese)

作者简介:



马继杰(1980—),男,天津蓟县人,博士,讲师,2006年、2010年于吉林大学分别获得硕士、博士学位,主要从事检测方法与设备、压电驱动技术等方面的研究。E-mail: mjj@zjnu. cn

通讯简介:



程光明(1957—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师。1982,1985,1996年于吉林工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事压电驱动与控制技术及微小型机电液系统方面的研究。E-mail: cgm123@163. com