

DOI: 10.7652/xjtuxb201312016

双向旋转非对称惯性压电驱动器理论与试验研究

曾平¹, 孙淑杰¹, 李立安¹, 程光明², 阚君武², 温建明²

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 130022, 长春; 2. 浙江师范大学精密机械研究所, 321004, 浙江金华)

摘要: 以非对称压电惯性驱动器为研究对象, 提出一种可形成双向驱动能力的新型非对称惯性压电驱动器。该驱动器通过压电振子的非对称夹持结构, 使其向两侧振动时具有不同的系统刚度, 当以对称信号驱动时, 驱动器在一个振动周期内向两侧的转角不同, 连续的往复振动使驱动器可以实现定向转动。根据其运动特征, 运用能量守恒定律对压电振子的运动过程进行理论分析, 推导出双向旋转驱动器步距角与频率之间的关系式, 提出通过采用对称波形、不同频率的电源激励信号, 使驱动器实现双向运动的方案。设计制作了旋转驱动器试验样机, 搭建了驱动器的测试系统, 在不同电压幅值、频率的正弦波激励下对驱动器步距角、转速等进行了测试。试验结果表明, 可以通过频率控制实现非对称惯性压电驱动器的双向驱动, 在 100 V 正弦电压信号激励下, 当频率分别为 65 Hz 和 83 Hz 时, 驱动器在两个方向上的最大转速分别为 5.23 rad/s 和 0.56 rad/s。

关键词: 双向旋转; 非对称; 压电; 惯性驱动器

中图分类号: TM384; TH703.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)12-0090-05

Theoretical and Experimental Analysis on Bi-Directional Rotary Asymmetric Piezoelectric Actuator

ZENG Ping¹, SUN Shujie¹, LI Li'an¹, CHENG Guangming², KAN Junwu², WEN Jianming²

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Institute of Precision Machinery, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract: A novel bi-directional rotary asymmetric piezoelectric driving mechanism with asymmetric piezoelectric actuator is proposed. The actuator system stiffness varies as it is vibrating from one side to another due to the asymmetric clamping structure, and then the actuator is allowed to directionally rotate as long as asymmetric continuous driving signal is provided. Energy conservation law is considered to theoretically analyze the movement of piezoelectric vibrator, accordingly the relationship between step-angle and frequency of the bi-directional rotating actuator is deduced, and a novel bi-directional movement actuator excited by symmetric signals with different frequencies is presented. An experimental rotating actuator prototype is designed and the corresponding test system is set up. The step-angle and the speed of the actuator is tested under sine wave excitation with different voltages and frequencies. It demonstrates that the bi-directional drive of the asymmetric inertial piezoelectric actuator can be realized via frequency control. The maximum velocities of bi-directional rotation reach 5.23 rad/s in the case of 100 V and 65 Hz and 0.56 rad/s in the case of 100 V and 83 Hz, respectively.

Keywords: bi-directional rotation; asymmetric; piezoelectric; inertial actuator

收稿日期: 2013-04-13。 作者简介: 曾平(1957—), 女, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175478); 教育部高等学校科技创新工程重大项目培育资金资助项目(708028)。

网络出版时间: 2013-10-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131028.0834.004.html>

压电驱动器因体积小、能耗低、不受电磁干扰、响应速度快等优点,有着良好的应用前景^[1-2],其中惯性压电驱动器作为压电驱动器的主要分支之一,已逐渐应用于微定位、振动控制等领域。文献[3]研制了一种精密定位装置,该装置在压电超声波马达的基础上结合了压电惯性驱动器,压电超声波马达可以实现较大行程的运动,其定位精度为 30 μm,附加的压电惯性驱动器可以实现最大步距为 10 μm、最大精度为 10 nm 的精密定位,两者的结合实现了大范围、高精度的定位。文献[4]研制了一种压电惯性驱动器,该驱动器可以用于减小由于螺旋桨转动而使舰艇艇体振动产生的声音,并通过试验验证了该驱动器能够提供足够的控制力来降低舰体振动所产生的声音。文献[5]研制了一种利用带有硬型压电陶瓷并采用螺栓夹紧的朗之万换能器制作的共振式压电惯性驱动器,该驱动器克服了传统惯性压电驱动器无法实现高速和强力驱动的优点,且结构简单,在电压为 80 V、频率为 44.9 kHz 的电源信号下,空载速度可以达到 0.28 m/s。

国内外现在研究的惯性压电驱动器主要以非对称信号(锯齿波或叠加信号等)驱动,或利用摩擦力变化等实现定向运动^[6-8]。非对称惯性压电驱动器不仅具备惯性压电驱动器的结构简单、驱动力大、分辨率高等优点,还可由对称信号激励,不用设计复杂的信号生成和控制电路。通过对驱动器结构的非对称设计,利用其非对称结构产生两个运动方向的位移差,可以实现稳定的单向驱动^[9-11]。但是,该类驱动器不能简单地实现双向驱动,使其应用具有一定的局限性,无法满足特定的应用场合。

本文结合惯性压电旋转驱动器的特点,以理论分析为依据,对双向旋转非对称惯性压电驱动器进行了初步研究,提出根据驱动器的设计参数,通过理论计算与试验验证选择合适的非对称惯性压电驱动器电源激励频率,利用切换两个不同的电源激励频率实现非对称惯性压电旋转驱动器的双向转动。

1 理论分析

1.1 驱动器运动过程分析

非对称惯性压电驱动器结构如图 1 所示,主要由压电单晶片、质量块、非对称夹持板、旋转座及底座构成。

驱动器运动过程如图 2 所示,设压电振子的驱动力矩为 M_q 、弹性回复力矩为 M_t 、摩擦阻力矩为 M_f ,当驱动臂向短夹持侧振动时,驱动器运动过程

- 可以分解为:
- (1)初始状态,如图 2a 所示,压电驱动器未加外部激励信号,处于静止状态;
 - (2)加速运动状态,如图 2b 所示,当 $M_q - M_t > M_f$,驱动器向短夹持一侧加速运动,驱动器转过角度 θ_1 ;
 - (3)减速运动状态,如图 2c 所示,当 $M_q - M_t < M_f$,驱动器向短夹持一侧减速运动,驱动器转过角度 θ_2 ;
 - (4)静止状态,就是当达到振动极限位置时,压电振子静止,电源激励的能量全部转化为压电振子的弹性势能及驱动器克服摩擦力所做的功,以及压电振子自身损耗的能量,驱动器静止不动。

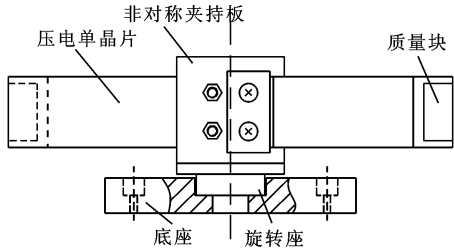


图 1 驱动器结构图

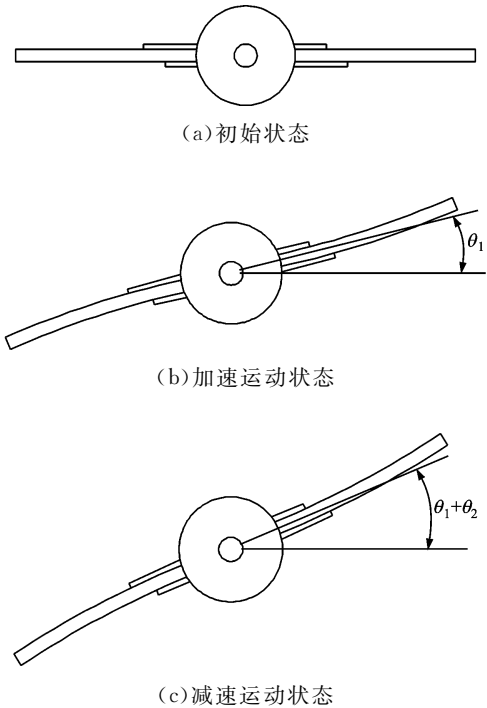


图 2 驱动器运动分解图

当驱动臂向长夹持一侧振动时,运动过程与短夹持一侧相同,因为驱动器的非对称夹持结构,长夹持侧系统刚度与短夹持侧系统刚度不同,运动过程中各部分能量转化的比例就不同。当驱动臂振动一

个周期,驱动器向一侧转过的角度大、向另一侧转过的角度小,驱动器实际转过一个较小的旋转位移差。驱动臂往复振动,该角度位移的差值不断累积,驱动器表现为向一侧的定向移动。

1.2 双向运动机理分析

假设振动过程中压电振子在两极限位置间往复运动过程自身损耗的能量相同,且电源输出能量稳定,压电驱动器的运动表面的摩擦系数一致。

将压电振子振动两个方向到达的极限位置分别称作极限位置1和极限位置2,根据能量守恒原理,有下式成立

$$E_{T/2} + E_{p1} - E_s = E_{p2} + W_{f2} \quad (1)$$

$$E_{T/2} + E_{p2} - E_s = E_{p1} + W_{f1} \quad (2)$$

式中: $E_{T/2}$ 为电源半周期输出能量; E_{p1} 、 E_{p2} 为压电振子振动到极限位置1和2的弹性势能; E_s 为压电振子在极限位置1和2间振动一次的能量损耗; W_{f1} 、 W_{f2} 为从极限位置1到2和从极限位置2到1运动过程中驱动器克服摩擦所做的功。联立式(1)、式(2),可以得到旋转式驱动器两极限位置能量关系表达式

$$2E_{p1} + W_{f1} = 2E_{p2} + W_{f2}$$

即

$$2 \times \frac{1}{2} k_1 x(t_1)^2 + M_f \theta_1 = 2 \times \frac{1}{2} k_2 x(t_2)^2 + M_f \theta_2 \quad (3)$$

式中: k_1 、 k_2 为驱动器向两侧弯曲时系统的刚度; M_f 为阻碍驱动器运动的摩擦力矩; θ_1 、 θ_2 为驱动器往极限位置1、2方向上的转角; t_1 、 t_2 为到达极限位置1、2的时间; $x(t)$ 为压电振子在 t 时刻的振幅。

由结构振动分析知识可知,压电振子在单自由度简谐信号激励下 t 时刻产生的振幅可以表示为

$$x(t) = \frac{F_{bl}}{((K - m\omega^2)^2 + (C\omega)^2)^{1/2}} \sin(\omega t - \varphi) \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),得到

$$F_{bl}^2 \sin^2(\omega t_1 - \varphi) \left[\frac{k_1}{(k_1 - m\omega^2)^2 + (C\omega)^2} - \frac{k_2}{(k_2 - m\omega^2)^2 + (C\omega)^2} \right] = M_f (\theta_2 - \theta_1) \quad (5)$$

式中: ω 为外加电源激励频率; m 为振动臂质量; C 为系统的阻尼系数; φ 为相位角; F_{bl} 为压电振子最大发生力,由压电学知识可知^[12]

$$F_{bl} = \frac{3\omega t^2 E_p}{8L} \frac{2B+1}{(B+1)^2} d_{31} E_3 \quad (6)$$

式中: $t = t_m + t_p$, t_m 、 t_p 分别为金属基板与压电片的

厚度; $B = t_m/t_p$; L 、 ω 分别为压电片的长和宽; E_p 为金属基板的杨氏模量; d_{31} 为压电常数; E_3 为外加电场强度。

设步进角为 θ_0 ,将式(6)代入式(5),可以得到步进角的表达式

$$\theta_0 = \theta_2 - \theta_1 = \frac{\alpha E_3^2 \sin^2(\omega t_1 - \varphi)}{M_f} \cdot \frac{(k_1 - k_2)((m\omega^2)^2 + (C\omega)^2 - k_1 k_2)}{[(k_1 - m\omega^2)^2 + (C\omega)^2][(k_2 - m\omega^2)^2 + (C\omega)^2]} \quad (7)$$

式中: $\alpha = \frac{3\omega t^2 E_p}{8L} \frac{2B+1}{(B+1)^2} d_{31}$,其大小取决于压电振子的尺寸参数。由式(7)可知,非对称夹持惯性压电驱动器在压电振子参数一定的情况下,其步进角受电源电压 E_3 、夹持刚度、驱动器运动摩擦力矩 M_f 以及振动臂质量 m 的影响。

式(7)的正负代表驱动器的不同转向,取决于 $(k_1 - k_2)((m\omega^2)^2 + (C\omega)^2 - k_1 k_2)$ 的符号。若驱动器两侧弯曲刚度关系为 $k_1 - k_2 < 0$,当 $(m\omega^2)^2 + (C\omega)^2 - k_1 k_2 < 0$ 时, $\theta_1 > \theta_2$,驱动器朝向极限位置1方向旋转;当 $(m\omega^2)^2 + (C\omega)^2 - k_1 k_2 > 0$ 时, $\theta_1 < \theta_2$,驱动器朝向极限位置2方向旋转,且两不同方向分界点频率为

$$\omega_0 = \left(\frac{(c^4/m^4 + 4\omega_{n_1}^2 \omega_{n_2}^2)^{1/2} - c^2/m^2}{2} \right)^{1/2} \quad (8)$$

因此,可以通过式(8)计算获得驱动器转向改变的临界频率,并以此频率为参考选定两个不同方向转动的频率点,控制驱动器实现双向旋转。

2 样机制作与搭建试验平台

根据非对称惯性压电驱动器的工作原理,设计并制作了双向旋转非对称惯性压电驱动器的试验样机,如图3所示。驱动器样机各组成部分零件的具体参数如表1所示。压电单晶片振子通过螺栓连接夹紧于非对称夹持板与旋转座之间,质量块与压电单晶片振子胶接在一起,旋转座与底座之间采用间隙配合以实现运动的定位和驱动器的正常转动,整个装置通过螺栓固定于精密气浮隔振台。

测试系统如图4所示,是由任意信号发生器、数字模拟量转换采集卡、通用型功率放大器、精密气浮隔振台、激光测微仪、计时器等构成。通过Lab-View软件编写所需的电源信号控制程序,在计算机中产生所需要的数字信号,然后通过数字模拟量转换采集卡,将数字信号转换为电信号,再通过放大器

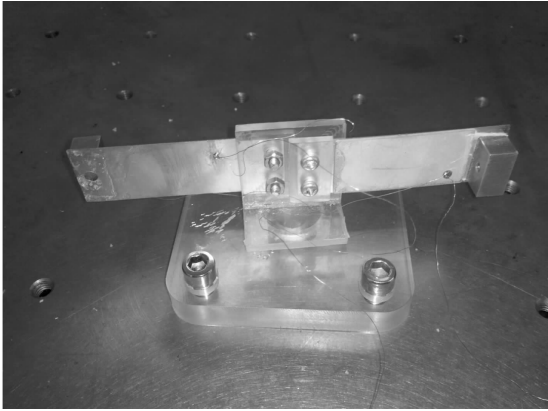


图 3 双向旋转驱动器样机

放大,为压电驱动器提供驱动信号。驱动器的运动参数通过激光测微仪进行记录,通过计时器记录驱动器转过相同角度所用的时间。

表 1 驱动器样机主要零件参数

零件名称	数量	几何尺寸/mm	材料
金属板	2	60×20.5×0.2	铍青铜
压电片	2	39.2×20×0.2	PZT
质量块	2	16×8×8	铜
非对称夹持板	2		有机玻璃
旋转座	1		有机玻璃
底座	1		有机玻璃



图 4 试验测试系统

3 驱动器试验测试

固定驱动器的电源激励信号频率为 35 Hz,信号波形为正弦波,得到驱动器的输出步进角与驱动信号电压之间的关系曲线,如图 5 所示。从图中可以看出,驱动器的步进角与驱动电压之间近似呈线性关系,且驱动器的最小驱动电压为 30 V。因此,可以通过调整电源电压的大小来调节输出的步进角,在电源信号频率不变的情况下,对驱动器的转速

进行控制。试验结果中 60 ~70 V 之间存在步进角下降的情况,可能是驱动器样机加工误差、转动时旋转座与底座间隙之间碰撞造成能量损耗等原因造成的,深层次的原因需要进一步探究。

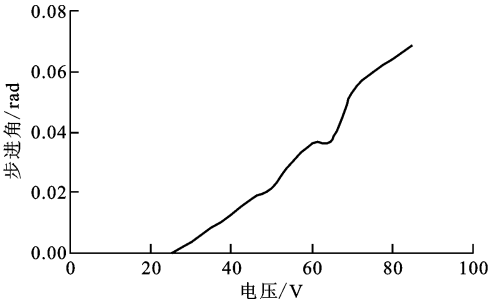


图 5 驱动器步进角与电压特性曲线

考虑到任意信号发生器可以提供的电压范围为 0~110 V,选取电源激励信号的电压为 100 V,信号波形为正弦波,得到驱动器的角速度与驱动信号频率之间的关系曲线,如图 6 所示。

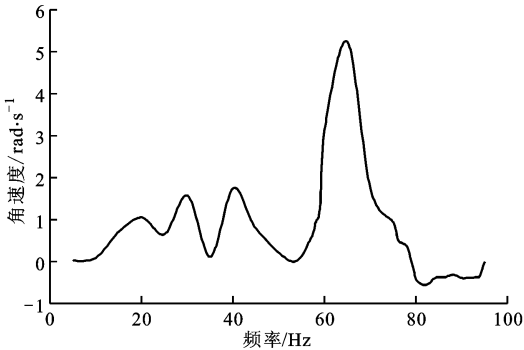


图 6 驱动器角速度与频率特性曲线

由图 6 可以看出,驱动器在驱动电源信号频率小于 81 Hz 时转动方向一致,且转速随着频率的改变波动范围比较大,出现多个峰值,波峰值随频率增加而增大,在 65 Hz 处达到最大转速,最大转速为 5.23 rad/s。当频率在 79 Hz 时,驱动器转速为 0,该频率为驱动器的换向频率;当驱动电源信号频率大于 79 Hz 时,驱动器的运动方向改变,转速相对于驱动电源信号小于 79 Hz 时小,但仍能实现较快的转动,在 83 Hz 处达到最大转速,最大转速为 0.56 rad/s。该驱动器双向旋转转速存在差别,主要是因为在该驱动器样机的结构参数影响下,换向频率点偏高,当驱动器工作于较高频率的时候,由于驱动器惯性力比较大,电源提供的能量主要用来克服惯性力,所以振幅就非常小,驱动器转速下降。试验结果证明,理论推导得到的双向驱动方案与试验结果基本吻合,可以通过选取适当的频率实现压电非对称惯性驱动

器的双向转动。

4 结 论

(1)提出一种可以实现双向旋转运动的新型惯性压电驱动机构,并对其工作机理进行了初步分析研究。

(2)研制了试验样机,通过理论分析,结合非对称夹持式压电惯性驱动器的运动特征,利用能量法,推导出驱动器旋转步距角与频率之间的关系式。

(3)搭建了新型惯性压电驱动器样机的测试试验系统,并进行了初步的试验研究。试验结果表明,研制的新型非对称惯性压电驱动器样机在对称波形电源信号的驱动下,通过改变输入激励电信号的频率,可以实现非对称惯性压电驱动器的双向旋转,驱动器的转向具有可控性,试验结果与理论分析基本吻合。

(4)驱动器在电压为 100 V、频率分别为 65 Hz 和 83 Hz 的正弦波激励下达到两个方向转动的最大转速,分别为 5.23 rad/s 和 0.56 rad/s。研究结果为非对称惯性压电驱动器的进一步研究工作提供了参考借鉴依据。

参考文献:

- [1] 杨凯,张德林,辜承林. 压电驱动器研究与应用中的若干新进展 [J]. 微电机, 2007, 40(6): 83-87.
YANG Kai, ZHANG Delin, GU Chenglin. New progress in research and application of piezoelectric actuators [J]. Micromotors, 2007, 40(6): 83-87.
- [2] SRINIVAS T. Piezoelectric microelectro-mechanical systems: challenges and opportunities [J]. Procedia Engineering, 2010, 5: 468-471.
- [3] LIU Y T, LI B J. Precision positioning device using the combined piezo-VCM actuator with frictional constraint [J]. Precision Engineering, 2010, 34(3): 534-545.
- [4] CARESTA M, KESSISSOGLOU N. Active control of sound radiated by a submarine hull in axisymmetric vibration using inertial actuators [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2012, 134(1): 011002.1-011002.8.
- [5] NISHIMURA T, HOSAKA H, MORITA T. Resonant-type smooth impact drive mechanism (SIDM) actuator using a bolt-clamped Langevin transducer [J]. Ultrasonics, 2012, 52(1): 75-80.
- [6] MORITA T, MURAKAMI H, YOKOSE T, et al. A miniaturized resonant-type smooth impact drive mechanism actuator [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2012, 178: 188-192.

- [7] HAN W X, ZHANG Q, MA Y T, et al. An impact rotary motor based on a fiber torsional piezoelectric actuator [J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(1): 014701.
- [8] ZHANG Z M, AN Q, LI J W, et al. Piezoelectric friction-inertia actuator: a critical review and future perspective [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(5/6/7/8): 669-685.
- [9] WEN Jianming, MA Jijie, ZENG Ping, et al. A new inertial piezoelectric rotary actuator based on changing the normal pressure [J]. Microsyst Technol, 2013, 19, 277-283.
- [10] 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 Xiaotao, CHENG Guangming, YANG Zhigang, et al. Design of asymmetrical rotated piezoelectric actuators based on impact driving principle [J]. Opt Precision Eng, 2010, 18(1): 156-161.
- [11] 温建明,马继杰,曾平,等. 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 Jianming, MA Jijie, ZENG Ping, et al. Machining and functional testing of piezoelectric rotary actuator [J]. Opt Precision Eng, 2013, 21(1): 131-136.
- [12] SMITS J G, DALKE S I, COONEY T K. The constituent equations of piezoelectric bimorphs [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 1991, 28: 41-61.

[本刊相关文献链接]

- 王宏金,孟庆丰. 压电振动能量收集器的等效电路建模分析与实验验证 [J]. 2013, 47(10): 75-80. [doi: 10.7652/xjtuxb201310013]
- 吴越,杨志刚,刘勇,等. 压电振子对压电泵极限输出压力的影响 [J]. 2013, 47(4): 64-72. [doi: 10.7652/xjtuxb201304013]
- 温建明,曾平,胡雄海,等. 三腔蠕动式主动阀压电泵设计与实验研究 [J]. 2010, 44(9): 78-81. [doi: 10.7652/xjtuxb201009016]
- 姜德龙,程光明,孙晓峰,等. 输送流体双腔并联压电泵性能分析与试验研究 [J]. 2010, 44(3): 82-85. [doi: 10.7652/xjtuxb201003017]
- 景敏卿,刘恒,沈园,等. 新型挤压膜气体轴承的研究 [J]. 2008, 42(7): 799-802. [doi: 10.7652/xjtuxb200807003]
- 赵宏伟,吴博达,杨志刚,等. 尺蠖型压电旋转驱动器钳位特性分析 [J]. 2007, 41(9): 1022-1025. [doi: 10.7652/xjtuxb200709004]

(编辑 杜秀杰)