

文章编号 1004-924X(2015)06-1681-07

## 压电惯性驱动器惯性冲击力的分析与检测

程光明, 李晓旭\*, 温建明, 胡意立, 曾 平  
(浙江师范大学 精密机械研究所, 浙江 金华 321004)

**摘要:** 由于惯性冲击力是压电惯性驱动器产生运动的关键, 故本文探讨了方波激励下压电振子的惯性冲击力大小。推导了压电双晶片振子在方波激励下的冲击响应, 分析了惯性冲击力的时域特性和幅频特性, 分析得到方波激励下惯性冲击力信号频率主要集中在 0~500 Hz。采用加速度传感器初步测试了压电双晶片振子的加速度参数, 测试结果与理论模型相近。结合压电双晶片振子的端部惯性质量计算得到惯性冲击力的数值, 利用快速傅里叶算法获得了加速度参数的幅频特性。最后, 采用摩擦学的方法对惯性冲击力的数值进行了验证, 验证结果表明两种方法的最大相对误差为 8.98%, 表明加速度传感器测试惯性冲击力是可行的。

**关键词:** 压电惯性驱动器; 惯性冲击力; 方波; 冲击响应

**中图分类号:** TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152306.1681

## Analysis and testing on inertial impact of piezoelectric inertial actuator

CHENG Guang-ming, LI Xiao-xu\*, WEN Jian-ming, HU Yi-li, ZENG Ping

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

\* *Corresponding author, E-mail: lixiaoxu.fuyu@163.com*

**Abstract:** The movement of a piezoelectric inertial actuator is come from the inertia impact, so this paper explores the inertia impact of a piezoelectric vibrator excited by a square wave. The impact response of the piezoelectric vibrator excited by the square wave was deducted. The time-domain and amplitude-frequency characteristics of the piezoelectric vibrator were analyzed and the theory and experiment results show that the frequency of the inertial impact signal mainly is concentrate on the 0—500 Hz in square wave excitation. An acceleration sensor was used to test the acceleration parameters and the test results are closed to that of the model. The inertial impact force was calculated by the end inertial mass of the piezoelectric bimorph vibrator, and the amplitude-frequency characteristics of acceleration parameter were obtained by the fast Fourier transfer algorithm. Finally, the tribology method was used to verify the test results. Theory and experiment results show that the maximum relative error of two methods is 8.98%, which verifies that the tests of inertial impacts by acceleration sensors are feasible.

**Key words:** piezoelectric inertial actuator; inertial impact; square wave; impact response

收稿日期: 2014-12-15; 修订日期: 2015-02-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51175478, No. 51205369); 浙江自然科学基金资助项目(No. Y1110529)

## 1 引言

压电驱动器是一种新型驱动装置,它利用压电材料的逆压电效应,将微观变形通过机电耦合转换成机构宏观运动,具有功率密度高、位移分辨率高<sup>[1]</sup>、响应速度快、不受电磁干扰<sup>[2]</sup>等优点。作为压电驱动器的重要组成部分,压电惯性驱动器利用压电元件的快速变形产生的惯性冲击力作为驱动力,与驱动器和接触面间摩擦力配合实现驱动作用,其机械结构简单,工作行程大<sup>[3]</sup>,具有良好的应用前景<sup>[4]</sup>。立陶宛维尔纽斯大学设计的压电惯性机构,在锯齿波信号的激励下,利用压电双晶片振子产生正反方向上大小不同的惯性冲击力,使机构实现单向移动<sup>[5]</sup>。台湾交通大学提出一种基于圆形压电晶片的 2 自由度惯性驱动机构,在方波激励下,可以实现直线和旋转运动<sup>[6]</sup>。吉林大学先后提出了非对称夹持式压电惯性旋转机构<sup>[7]</sup>和直线机构<sup>[8]</sup>,在对称信号激励下,利用压电双晶片振子产生的惯性力差值,输出单向位移。

惯性冲击力是压电惯性驱动器的动力源,其定量分析研究对机构的设计和优化有着重要意义。在晶片材料、形状、厚度等晶片自身特性确定的情况下,晶片的弯曲振动特性取决于外加周期性激励电场特性<sup>[9]</sup>。新加坡南洋理工大学提出一种基于压电叠堆的惯性驱动机构,通过对垂直安装的 2 个压电叠堆施加相位不同的激励信号,使机构的执行端输出椭圆运动<sup>[10]</sup>。法国 Christian Belly 等为了增大惯性驱动器移动步长和移动速度,通过优化控制信号和加入放大机构,增大了机构的运动步长,降低了机构移动所需的工作电流<sup>[11]</sup>。德国帕德博恩大学分析了激励信号的频率和相对对驱动器运动的影响,提出了可增大机构速度的激励信号<sup>[12]</sup>。燕山大学邢继春等对锯齿波激励下旋转式压电惯性电机振子的冲击受迫响应进行了分析<sup>[13]</sup>。相同激励下,方波产生的惯性冲击力大于正弦波和三角波,但是在惯性冲击力的测试过程中,不同测试方法的测试结果存在一定差异,不同的滤波处理也会对测试结果产生较大影响,因此需要对方波激励下压电振子的冲击振动特性进行定量研究。

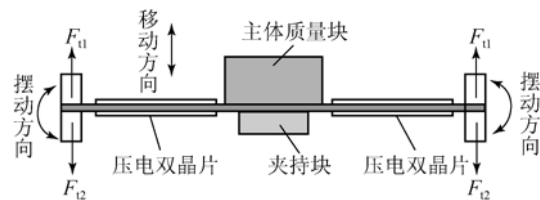
本文分析了方波激励下压电双晶片振子冲击响应的时域特性和频域特性,采用压电式加速度

传感器测试了压电双晶片振子的加速度,获得惯性冲击力的数值,采用摩擦学方法对惯性冲击力的数值进行了验证,为惯性冲击力的检测和驱动机构的性能研究提供了参考依据。

## 2 压电惯性驱动器的结构设计

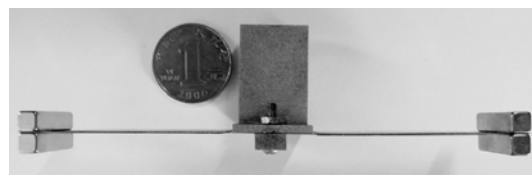
图 1 所示为非对称式压电惯性驱动器的示意图和实物图,机构主要由驱动器主体、夹持块和压电双晶片振子等组成,其中压电双晶片振子由压电双晶片和端部惯性质量块构成。利用主体与夹持块的长度差,机构两侧非对称夹持压电双晶片振子。机构主体和夹持块采用不锈钢材料,端部惯性质量块采用磁铁,驱动器的整体质量为 74.82 g。

压电晶片元件在交变电信号的作用下,产生随时间改变的惯性冲击力  $F_i(t)$ ,其值为端部质量与端部加速度的乘积。压电振子由短夹持侧向长夹持侧弯曲产生惯性冲击力  $F_{i1}$ ,长夹持侧向短夹持侧弯曲产生的惯性冲击力  $F_{i2}$ ,在对称方波的激励下, $F_{i1} > F_{i2}$ <sup>[14]</sup>。机构与支撑面之间的最大静摩擦力为  $F_f$ ,当  $2F_{i1} > F_f$  时,驱动器连续向上输出位移。



(a) 惯性驱动器示意图

(a) Configuration of actuator



(b) 实物图片

(b) Photo of actuator

图 1 惯性驱动器结构

Fig. 1 Structure of actuator

## 3 方波激励下的强迫振动

以非对称夹持结构的惯性冲击力  $F_{i1}(t)$  为研究对象,基频电信号激励下的悬臂式压电双晶片振子的简化动力学方程<sup>[15]</sup>为:

$$m\ddot{x} = k(x - y) + c\dot{x}, \quad (1)$$

其中:  $m$  为端部惯性质量块的质量,  $x$  为惯性质量块的移动坐标,  $k$  为作用在压电双晶片自由端外力与挠度的比值,  $y$  为电压激励下压电双晶片自由端的静挠度值,  $c$  为压电双晶片的阻尼系数。压电双晶片自由端的静挠度值  $y^{[16]}$  为:

$$y = \frac{6d_{31}E_pV_0(h+h_0)l^2}{8E_p h^3 + 12E_p h_0 h^2 + 6E_p h_0^2 h + E_0 h_0^3}, \quad (2)$$

其中:  $d_{31}$  为压电常数,  $E_p$ 、 $E_0$  为压电晶片、金属基板的弹性模量,  $l$  为双晶片的长度,  $h$ 、 $h_0$  为压电晶片和金属片的厚度, 在正弦信号  $V(t) = V_0 \sin \omega_0 t$  激励下, 对式(1)求解可得压电双晶片振子的自由端挠度响应为:

$$x = y \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sin(\omega_0 t - \theta)}{\sqrt{(1-s^2)^2 + (2\xi s)^2}}, \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \frac{2\xi s}{1-s^2}, \quad (4)$$

其中:  $\xi$  为阻尼比,  $s = \frac{\omega}{\omega_n}$ ,  $\omega_n$  为振子的无阻尼固有频率。周期为  $T$ , 幅值为  $V_0$  方波的傅里叶级数为:

$$f(t) = \frac{4V_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{n} \sin n\omega_0 t \right], \quad (5)$$

其中:  $n=1, 3, 5, \dots$ ,  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ , 在零初始条件下, 压电双晶片振子的自由端惯性冲击力响应为:

$$F = m \cdot y \cdot \frac{4}{\pi} \omega_0^2 \sum_{n=1}^{\infty} n \frac{\sin(n\omega_0 t - \theta_n)}{\sqrt{(1-n^2 s^2)^2 + (2\xi n s)^2}}, \quad (6)$$

$$\tan \theta_n = \frac{2n\xi s}{1-s^2 n^2}. \quad (7)$$

由式(6)可知, 当夹持条件一定时, 压电双晶片振子产生的惯性冲击力与自由端动态挠度、激励信号频率和振子的阻尼比有关。压电双晶片振子的参数如表 1 所示, 其中端部惯性质量块的质量  $m$  和压电双晶片的尺寸为实际测量值, 压电双晶片的刚度  $k$ 、阻尼系数  $c$  及压电常数  $d_{31}$  为压电双晶片厂家提供的参考值。

表 1 压电双晶片振子参数

Tab. 1 Main parameters of piezoelectric vibrator

$k/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	$m/10^{-3} \text{kg}$	$\xi$	$d_{31}/\text{C} \cdot \text{N}^{-1}$	$V/10^{-3} \text{m}$
1 211	2.76	0.19	$2.5 \times 10^{-8}$	$50 \times 20 \times 0.2$

根据表 1 中参数及式(5), 利用 Matlab 软件绘制在频率为 2 Hz、幅值为 24 V 的方波信号激

励下的 2 片压电双晶片振子的惯性冲击力的时域特性和频域特性曲线, 分别如图 2 和图 3 所示。惯性冲击力的时域特性显示, 惯性冲击力的响应频率与激励信号一致, 在方波的上升沿和下降沿产生峰值, 幅值为 1.73 N, 随着时间的推移, 由于阻尼的存在, 惯性冲击力衰减。

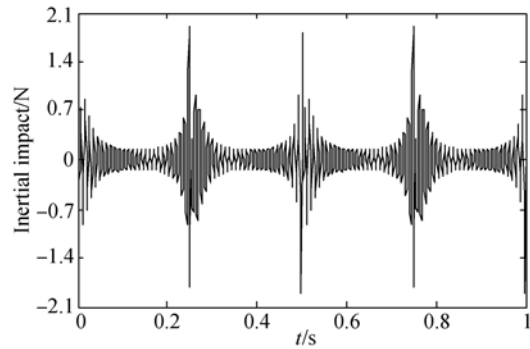


图 2 加速度幅频特性曲线

Fig. 2 Curve of amplitude-frequency for acceleration

如图 3 所示, 当激励频率为 2 Hz 时, 压电双晶片振子的频率响应主要集中在 0~500 Hz。在低频分量的作用下, 惯性冲击力随激励频率增加而增加; 当频率分量的频率接近压电双晶片振子的固有频率 103 Hz 时, 频率分量的幅值达到最大 0.17 N; 当频率超过固有频率时, 惯性冲击力的幅值逐渐下降。在惯性冲击力的检测中, 根据奈奎斯特抽样定理, 低通滤波电路的截止频率至少为 1 000 Hz, 否则将会造成信号失真。

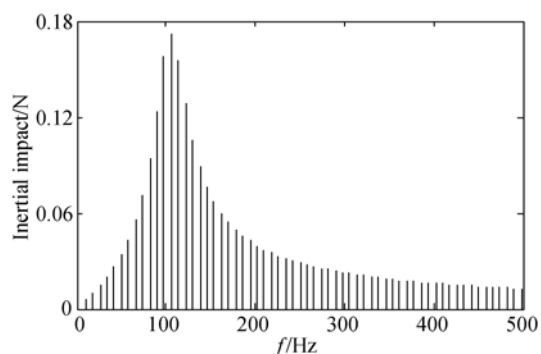


图 3 惯性冲击力幅频特性曲线

Fig. 3 Curve of amplitude-frequency for inertial impact

采用 Simulink 模块对该激励下的压电双晶片振子进行动态特性仿真, 建立如图 4 所示的仿真模型, 仿真结果如图 5 所示, 在方波的上升沿和下降沿产生峰值 1.92 N。

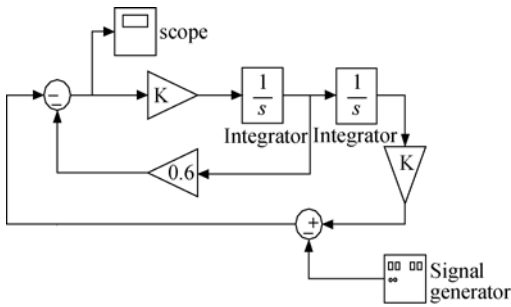


图 4 matlab 仿真模型  
Fig. 4 Simulation model

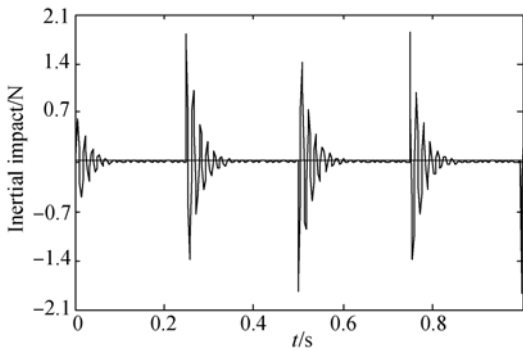


图 5 仿真惯性冲击力响应  
Fig. 5 Simulation curves of inertial impact

## 4 惯性冲击力的测试实验设计

### 4.1 惯性冲击力测试实验

由于压电双晶片振子质量较轻,故根据理论分析的惯性冲击力幅值及频率响应范围,选择压电式加速度传感器 YD-8 测试端部加速度,传感器的质量为 3.7 g,最大可测加速度为  $5\,000\text{ m/s}^{-2}$ ,灵敏度为  $0.309\text{ pC/m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,频率响应为  $1\sim 20\text{ kHz}$ 。为了减少加速度传感器的谐振频率衰减,采用钢螺栓将传感器与质量块固定在压电振子端部。

#### 4.1.1 测试实验系统

测试流程及系统如图 6 所示,信号发生器产生的电压信号经功率放大器放大后施加到压电双晶片振子上,加速度计与振子刚性固定。加速度信号经传感器拾振送入电荷放大器,电荷放大器将信号转换为电压信号并放大,传递到示波器显示。为了避免加速度信号失真,电荷放大器的前置低滤波器的截至频率选择  $1\,000\text{ Hz}$ 。

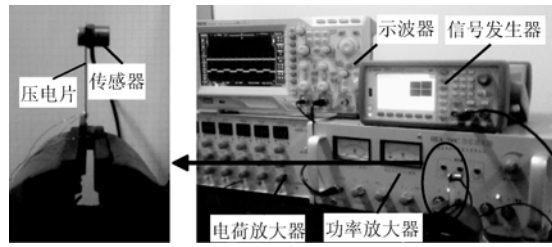


图 6 加速度测试流程及系统  
Fig. 6 Test process and equipment

#### 4.1.2 测试结果

驱动器样机能够输出稳定均匀位移的最低工作电压为  $6\text{ V}$ ,最高工作频率为  $10\text{ Hz}$ ,故加速度传感器的测试频率选择为  $2, 5$  和  $8\text{ Hz}$ ,电压值为  $6\sim 30\text{ V}$ 。幅值为  $24\text{ V}$ ,频率为  $2\text{ Hz}$  的方波激励下加速度传感器的测试值如图 7 所示。

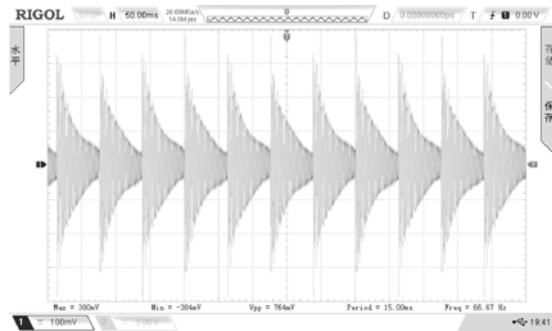


图 7  $24\text{ V}$ 、 $2\text{ Hz}$  的加速度时域响应  
Fig. 7 Acceleration response of  $24\text{ V}$  and  $2\text{ Hz}$

加速度传感器测试的惯性冲击力时域响应与仿真模型基本吻合。加速度传感器的质量作为系统的附加质量,会使压电振子的振动特性发生变化:

$$a = \frac{m + m_t}{m} a' = 2.34 a', \quad (8)$$

$$\omega_d = \sqrt{\frac{m + m_t}{m}} \omega'_d = 1.53 \omega'_d, \quad (9)$$

其中:  $a$  和  $\omega_d$  为装上传感器之前压电在振子的加速度和固有频率,  $a'$  和  $\omega'_d$  为装上传感器后压电振子的加速度和固有频率,  $m$  为压电振子的质量,  $m_t$  为传感器质量。

利用 Matlab 软件中的快速傅里叶算法获得采集到的惯性冲击力信号的频域特性,结果如图 8 所示,其中横轴为频率,纵坐标表征对应幅值大小。压电双晶片振子的频率响应主要集中在  $0\sim$

500 Hz,在较低的频率分量作用下,瞬态加速度响应随激励频率的增加显著;当  $f=210$  Hz 时,加速度分量的幅值达到最大的  $533.1 \text{ m/s}^2$ ;当频率分量高于固有频率时,加速度分量的幅值逐渐下降。

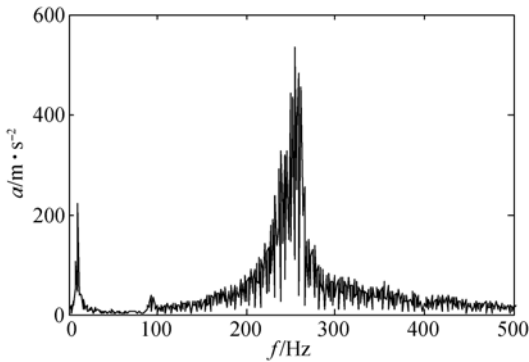


图 8 加速度幅频特性曲线

Fig. 8 Curve of amplitude-frequency

### 4.2 验证实验

由于方波激励下的惯性冲击信号频带较宽,且压电振子自身质量较轻,根据压电惯性驱动器的运动机理,采用摩擦学的方法对检测结果进行验证:最大静摩擦力的大小为  $F_f = \mu_s \cdot F_N$ ,  $\mu_s$  为机构与接触面的静摩擦系数,当惯性冲击力等于最大静摩擦力时,机构处于静止状态。验证系统和验证流程如图 9、10 所示。验证系统主要包括气浮台、信号发生器、功率放大器、激光测微仪(LK-H080)、精密电子天平和测试台等,激光测位移用以精确监测驱动器的运动情况<sup>[17]</sup>,测试台主要由导轨、滑轮和轻绳组成。导轨用以保证机构的定位及运动精度,滑轮的摩擦力小,高度与驱动器的重心高度相等<sup>[18]</sup>。

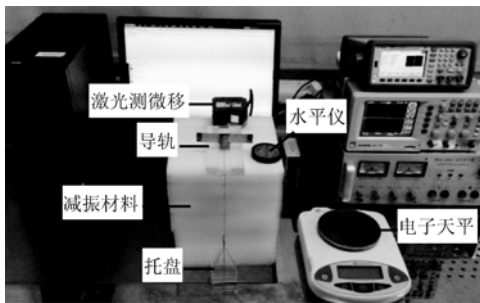


图 9 验证试验测试系统

Fig. 9 Verification testing system

验证流程如下:信号发生器产生的电压信号经功率放大器放大后施加到压电双晶片振子上,采用激光测位仪测试驱动器的位移情况。当驱动器实现单向移动时,暂停电信号激励,向驱动器上添加 1 g 砝码载荷;恢复电信号激励,若驱动器仍可以单向移动,则重复上述过程,继续向驱动器添加砝码,直至在电信号激励下驱动器刚好处于静止状态,惯性冲击力与静摩擦力幅值相等,方向相反。终止电信号激励,将托盘通过轻绳和滑轮与驱动器主体相连,在托盘上加载 1 g 砝码。当压电惯性驱动器处于静止状态时,向托盘中增加 1 g 砝码,若驱动器仍处于静止状态,则重复上述过程,直至驱动器刚好可以单向移动。此时驱动器和接触面中的静摩擦力与托盘中砝码的重力幅值相等。采用精密电子天平称量驱动器的总质量和托盘中砝码的质量。

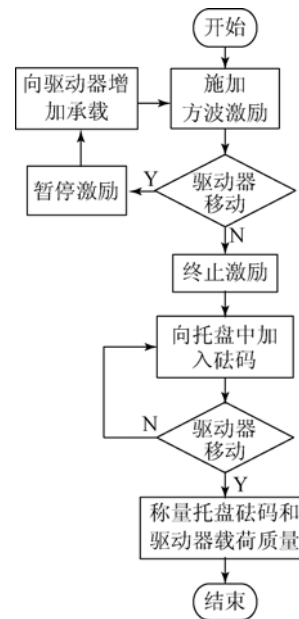


图 10 验证试验流程

Fig. 10 Verification test process

### 4.3 验证结果

当激励频率为 2 Hz 时,加速度传感器测试的压电惯性驱动器的惯性冲击力升回程值与验证实验结果如图 11 所示。实验结果与传感器升回程测试结果规律一致,最大相对误差为 5.39%,驱动器与接触面的平均静摩擦系数  $\bar{\mu}_s = 0.507$ 。5 Hz 和 8 Hz 下传感器测试结果与验证试验结果

如图 12、13 所示。验证方法和传感器检测结果的最大相对误差分别为 8.98% 和 8.35%，验证了加速度传感器测试加速度参数，经计算获得惯性冲击力数值的可行性。

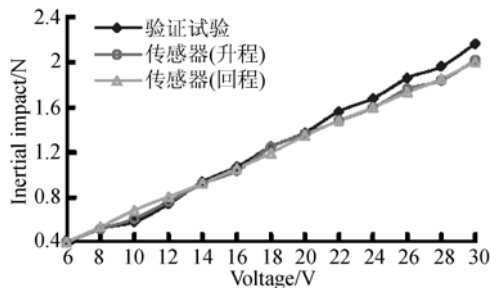


图 11 2 Hz 下两种测试方法结果比较

Fig. 11 Comparison of two methods in 2 Hz

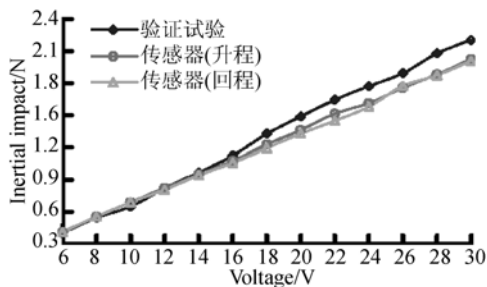


图 12 5 Hz 测试结果比较

Fig. 12 Comparison of two methods in 5 Hz

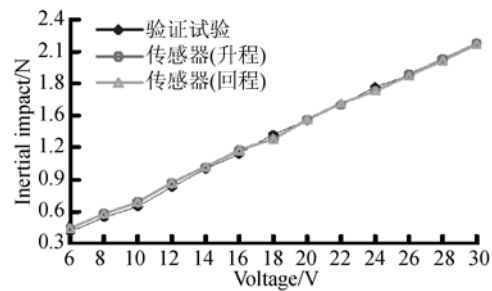


图 13 8 Hz 测试结果比较

Fig. 13 Comparison of two methods in 8 Hz

## 5 结 论

根据悬臂式压电双晶片振子的动力学模型,分析了压电振子在方波激励下的冲击受迫响应,绘制了惯性冲击力的时域和频域特性曲线,频域分析得到方波激励下惯性冲击力信号频率主要集中在 0~500 Hz,频带内的波峰出现在压电振子固有频率附近。采用压电式加速度传感器 YD-8 测试了压电振子的加速度特性,测试结果与理论模型相近,结合压电双晶片振子的惯性质量计算得到了驱动器的惯性冲击力。采用摩擦学的方法对测试结果进行了验证,最大相对误差为 8.98%。验证了通过加速度传感器的测试值计算得到惯性冲击力的可行性,为惯性冲击力测试提供了依据。

## 参考文献:

- [1] ZHANG Z M, AN Q, LI J W, *et al.*. Piezoelectric friction-inertia actuator—a critical review and future perspective [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 62(5-8): 669-685.
- [2] 沈燕虎, 苏江, 杨志刚, 等. 压电驱动式振动给料器的设计与试验[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1828-1833.  
SHEN Y H, SU J, YANG ZH G, *et al.*. Design and experiment of piezoelectric-drive vibratory feeder [J]. *Opt. Precision Eng*, 2014, 22(7): 1828-1833. (in Chinese)
- [3] ZHANG Q S, CHEN X B, YANG Q, *et al.*. Development and characterization of a novel piezoelectric-driven stick-slip actuator with anisotropic-friction surface[J]. *Adv Manuf Technol*, 2012, 61: 1029-1034.
- [4] 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 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)
- [5] MAZEIKA D, VASILJEV P. Linear inertial piezoelectric motor with bimorph disc [J]. *Mathematical Systems and Signal Processing*, 2013, 36(1): 110-117.
- [6] CHEN W M, LIU T S. Modeling and experimental validation of new two degree-of-freedom piezoelectric actuators [J]. *Mechatronics*, 2013, 23(8): 1163-1170.
- [7] 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*

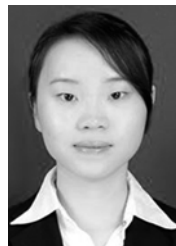
- 精密工程, 2010, 18(1): 156-161.
- LI X T, CHENG G M, YANG ZH G, *et al.*. Design of asymmetrical rotated piezoelectric actuators based on impact driving principle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 156-161. (in Chinese)
- [8] ZENG P, SUN S, LI L, *et al.*. Design and testing of a novel piezoelectric micro-motor actuated by asymmetrical inertial impact driving principle [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(3): 035002.
- [9] 岳冠南, 靳映霞, 张福学. 压电泵激励信号对压电射流陀螺灵敏度的影响[J]. 北京机械工业学院学报, 2007, 21(4): 43-46.
- YUE G N, JIN Y X, ZHANG F X. Effect of drive signals of pump on sensitivity of piezoelectric fluidic gyro [J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2007, 21(4): 43-46. (in Chinese)
- [10] HASSANI V, TIAHJOWIDODO T. Structural response investigation of a triangular-based piezoelectric drive mechanism to hysteresis effect of the piezoelectric actuator [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 36(1): 210-223.
- [11] CHRISTIAN B, WILLY C. Benefits of amplification in an inertial stepping motor [J]. *Mechatronics*, 2012, 22(2): 177-183.
- [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*, 2013, 200: 79-89.
- [13] 邢继春, 许立忠, 王春光. 新型旋转式压电惯性电机振子的冲击振动分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(17): 195-200.
- XING J CH, XU L ZH, WANG CH G. Impact vibration analysis for vibration of a new rotary piezoelectric inertia motor [J]. *Journal of vibration and shock*, 2012, 31(7): 195-200. (in Chinese)
- [14] 程光明, 李新辉, 张海滨, 等. 悬臂式压电双晶片振子夹持长度变化对其动态特性的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1296-1303.
- CHENG G M, LI X H, ZHANG H B, *et al.*. Research on the dynamic characteristics of difference clamping length of the cantilever bimorph [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1296-1303. (in Chinese)
- [15] PATEL R, WILLIAM S M, POPOV A A. A geometric parameter study of piezoelectric coverage on a rectangular cantilever energy harvester [J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(1): 210-223.
- [16] 张宏壮. 压电双晶片型二自由度惯性冲击式精密驱动器理论与实验研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2006.
- ZHANG H ZH. *Theoretical and experimental study of 2-DOF precise actuator utilizing impact force of piezoelectric bimorphs* [D]. Jilin University, 2006. (in Chinese)
- [17] 薛光怀, 贺永, 傅建中, 等. 压电式喷头的微滴喷射行为及其影响因素[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2166-2172.
- XUE G H, HE Y, FU J ZH, *et al.*. Droplet jetting of piezoelectric printhead and corresponding effect factors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2166-2172. (in Chinese)
- [18] 贾振元, 高翼飞, 任宗金, 等. 六维力压电天平研制与静态性能测试研究[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(1): 43-48.
- JIA ZH Y, GAO Y F, REN Z J, *et al.*. Development and static performance measurement research for six-component piezoelectric balance [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2014, 54(1): 43-48. (in Chinese)

#### 导师简介:



程光明(1957—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,1982、1985、1996年分别于吉林工业大学获学士、硕士和博士学位,主要从事精密机械及微小机电液系统的研究。E-mail: cgm123@163.com

#### 通讯作者:



李晓旭(1989—),女,吉林长春人,硕士研究生,2008年于东北电力大学获得学士学位,主要从事精密机械的研究。E-mail: lixiaoxu, fuyu@163.com