

文章编号 1004-924X(2014)05-1296-08

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

程光明^{1,2}, 李新辉^{1*}, 张海滨^{1,2}, 曾平¹, 温建明¹

(1. 浙江师范大学 精密机械研究所, 浙江 金华 321004

2. 兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:以惯性压电驱动器的关键部件——悬臂式压电双晶片振子为研究对象,探讨了悬臂式压电双晶片振子的夹持长度变化对其动态特性的影响规律。首先,建立了悬臂式压电双晶片振子静态参数方程和动力学模型。然后,应用 matlab 软件仿真分析了夹持长度变化对悬臂式压电双晶片振子的端部位移幅值和惯性加速度幅值的影响。最后,分别测试了悬臂式压电双晶片振子在不同夹持长度下的端部位移幅值以及惯性加速度幅值。结果显示:驱动电压为 10 V,频率为 11 Hz,悬臂式压电双晶片振子的夹持长度在 9~20 mm 内变化时,其端部位移幅值最大为 66.2 μm ,产生的惯性加速度幅值最大为 10.2 ms^{-2} 。仿真和试验结果表明:激励电场相同时,随着悬臂式压电双晶片振子的夹持长度增大,其端部位移幅值会变小,而其产生的惯性加速度会变大。

关键词:压电双晶片振子;悬臂式双晶片振子;夹持长度;动态特性

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142205.1296

Effect of different clamping lengths of cantilever bimorph on its dynamic characteristics

CHENG Guang-ming^{1,2}, LI Xin-hui^{1*}, ZHANG Hai-bin^{1,2}, ZENG Ping¹, WEN Jian-ming¹

(1. Institute of Precision Machinery, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

* Corresponding author, E-mail: huilai1212@126.com

Abstract: This work focuses on the effect of clamping length on the dynamic characteristics of a cantilever piezoelectric bimorph vibrator. First, the static parameter equation and the dynamic model of the cantilever bimorph vibrator was established. Then, the effects of the changed clamping lengths on the tip displacement amplitude and the inertia acceleration magnitude of the cantilever bimorph vibrator were analyzed with MATLAB software. Finally, the tip displacement amplitude and the inertia acceleration amplitude of the cantilever bimorph vibrator were measured separately. Results show that the maximal amplitude of tip displacement is 66.2 μm and the generated maximal inertial acceleration is 10.2 ms^{-2} at a driving voltage of 10 V, a frequency of 11 Hz, and the clamping length of cantilever bimorph vibrator between 9 and 20 mm. Simulation and experimental results indicate that with the same excitation field, the longer the clamping length, the smaller the amplitude of displacement and the larger the inertial acceleration produced by the piezoelectric bimorph vibrator.

收稿日期:2013-12-01;修订日期:2014-02-05.

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. Y1110529)

Key words: piezoelectric bimorph vibrator; cantilever bimorph vibrator; clamping length; dynamic characteristics

1 引言

惯性压电驱动器是利用压电元件产生的惯性冲击力来实现驱动控制或运动的一类新型压电驱动装置^[1]。由于压电元件具有机构刚度大、位移分辨率高、频率响应快、无电磁干扰以及结构紧凑等优点^[2],得到了国内外相关研究人员的相当重视而具有良好的应用前景。目前已广泛应用于航空航天、精密工程、医疗等领域^[5]。

国内外学者对惯性压电驱动器做了大量的理论和试验研究,但对于惯性压电驱动器的关键部件——悬臂式压电双晶片振子特性的研究较少。Matthias 研制了一种新型摩擦力可调节的压电惯性驱动器,步长达到 $20 \mu\text{m}$ ^[3];刘卫华等研制的一种惯性式压电步进电机,步长达到 $2 \mu\text{m}$ ^[4];温建明等研制了一种新型摩擦变化式压电惯性驱动器,步长达到 $7.5 \mu\text{m}$ ^[5];Wei Gao 等研制了一种新型直线-旋转精密定位工作台,旋转和直线运动最大速度分别为 10.5 r/min 和 16 mm/s ,最大行程分别为 $3\ 600$ 和 12 mm ^[6];Takuma 等人研制了一种新型直线惯性压电驱动器,速度最大为 0.28 m/s ^[7]。在惯性压电驱动器的关键部件——悬臂式压电振子的特性研究方面,王庆明等研究了悬臂式弯曲元件性能,主要分析了压电元件的几何尺寸与其动态特性的关系^[8]。鄂世举等研究了压电弯曲元件尺寸对其特性的影响,主要对压电元件的长度对其静、动态特性的关系进行了试验研究^[9]。但是目前尚无有关压电双晶片振子的夹持长度变化对其动态特性影响的研究报道。

对此,本文以惯性压电驱动器的关键部件——悬臂式压电双晶片振子为对象,通过建立悬臂式压电振子静态参数方程和动力学模型,对悬臂式压电双晶片振子的端部位移幅值和惯性冲击力幅值进行仿真分析,探讨了悬臂式压电双晶

片振子夹持长度变化对其端部位移幅值和其产生的惯性冲击力的影响规律,为提高压电惯性驱动性能研究提供了参考依据。

2 悬臂式压电双晶片振子的静态参数方程

压电双晶片振子由 2 个压电陶瓷晶片和 1 个金属基板构成。悬臂式压电双晶片振子是指压电双晶片振子的夹持方式为一端固定,另一端处于自由状态的情形。在静态电场的激励作用下,悬臂式压电双晶片振子会产生向上(或向下)的弯曲变形。本文主要以图 1 所示的悬臂式压电双晶片振子为研究对象,首先建立悬臂式压电双晶片振子的静态方程。

压电振子总长为 L ,压电陶瓷长度为 L_2 ,夹持长度为 L_0 ,电陶瓷厚度为 t_p ,基板厚度为 t_m 。在使用压电双晶片振子的过程中可以改变其夹持长度 L_0 ,但压电振子长度 L 和压电陶瓷的长度 L_2 为定值。为方便研究,令 $L_1 = L - L_0 - L_2$ 。

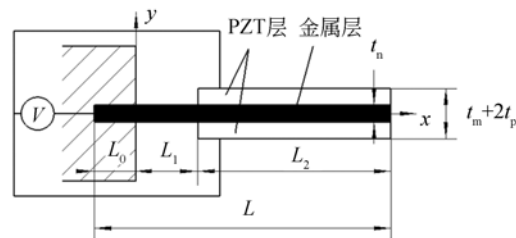


图 1 悬臂式压电双晶片振子结构图

Fig. 1 Structure diagram of cantilever bimorph

以压电振子基板中心层面作为 x 轴,压电振子夹持端面作为 y 轴(如图 1)。在 $0 \sim L_1$ 段只有金属层,在 $L_1 \sim L_2$ 段有压电层和金属层。在静态电场的作用下, $L_1 \sim L_2$ 段金属层和压电层的弯矩方程^[8]分别为:

$$M = \int_{-\frac{t_m}{2}}^{\frac{t_m}{2}} (E_m k y^2) \omega d y, \quad (1)$$

$$M = \int_{-\frac{t_p}{2}}^{\frac{t_m}{2}} (E_p k y - E_p d_{31} E_3) \omega y d y + \int_{\frac{t_m}{2}}^{\frac{t_m}{2} + t_p} (E_p k y - E_p d_{31} E_3) \omega y d y, \quad (2)$$

式中: k 为电场作用下压电双晶片振子的曲率, E_m 为金属基板弹性模量, E_p 为压电陶瓷弹性模

量, d_{31} 为压电常数, E_3 为静态电场电压值, ω 为压电双晶片振子宽度。

据式(1)得 $0 \sim L_1$ 段金属层弯矩方程为:

$$M_2 = \int_{-\frac{t_m}{2}}^{\frac{t_m}{2}} (E_m k y^2) \omega d y. \quad (3)$$

$$M = \int_{-(t_p + \frac{t_m}{2})}^{\frac{t_m}{2}} (E_p k y - E_p d_{31} E_3) \omega y d y + (1 + \frac{L_1}{L_2}) \int_{-\frac{t_m}{2}}^{\frac{t_m}{2}} E_m K y^2 \omega d y + \int_{\frac{t_m}{2}}^{\frac{t_m}{2} + t_p} (E_p k y - E_p d_{31} E_3) \omega y d y, \quad (4)$$

对式(4)积分得:

$$M = (1 + \frac{L_1}{L_2}) E_m k \omega \frac{t_m^3}{12} - \omega E_p d_{31} E_3 (t_m t_p + t_p^2) + E_p k \omega (\frac{t_m^2 t_p}{2} + t_m t_p^2 + \frac{2 t_p^3}{3}). \quad (5)$$

对于悬臂式压电双晶片振子, 无外部力矩作用, 即 $M=0$, 则曲率 k 为:

$$k = \frac{12 \omega E_p d_{31} E_3 (t_m t_p + t_p^2)}{2 E_p (3 t_m^2 t_p + 6 t_m t_p^2 + 4 t_p^3) + (1 + \frac{L_1}{L_2}) E_m t_m^3}. \quad (6)$$

令 $A = E_m / E_p$, $B = t_m / 2 t_p$, $t = t_m + 2 t_p$, 则式(6)表示为:

$$k = \frac{3}{t} \cdot \frac{(1 + B)(2B + 1)}{(1 + \frac{L_1}{L_2}) AB^3 + 3B^2 + 3B + 1} \cdot d_{31} E_3. \quad (7)$$

悬臂式压电双晶片的端部静态位移^[8]为:

$$Y_0 = \frac{k L^2}{2} = \frac{3}{2t} \cdot \frac{(1 + B)(2B + 1)(L_1 + L_2)^2 d_{31} E_3}{(1 + \frac{L_1}{L_2}) AB^3 + 3B^2 + 3B + 1}. \quad (8)$$

悬臂式压电双晶片端部执行力^[8] F_{bl} 为:

$$F_{bl} = \frac{3 E_p I_c Y}{(L_1 + L_2)^3}, \quad (9)$$

式中: I_c 为压电双晶片截面惯性矩。

将式(8)代入式(9)得:

$$F_{bl} = \frac{9 E_p I_c d_{31} E_3}{2 t (L_1 + L_2)^3} \cdot \frac{(1 + B)(2B + 1)}{(1 + \frac{L_1}{L_2}) AB^3 + 3B^2 + 3B + 1}. \quad (10)$$

3 悬臂式压电双晶片振子动态特性

悬臂式压电双晶片振子由于结构简单、成本低和变形量大等优点, 已成为了大多数的惯性压电驱动器的驱动源。悬臂式压电双晶片振子的动

态特性对惯性压电驱动器性能的影响很大。为研究提高惯性压电驱动器的性能提供理论依据, 本文建立了悬臂式压电双晶片振子动力学模型, 初步探讨了悬臂式压电双晶片夹持长度变化对其动态特性的影响。

3.1 悬臂式压电双晶片振子动力学模型

根据对悬臂式压电晶片振子的理论分析, 建立了如图 2 所示自由端带有集中质量的悬臂式压电双晶片振子的简化动力学模型。 m 为冲击质量块的质量; k 为作用在压电双晶片自由端的外力与其静挠度的比值; x 为冲击块质量的移动坐标; c 为压电双晶片的阻尼; y 为电压 V 作用下压电双晶片自由端的静态位移值。

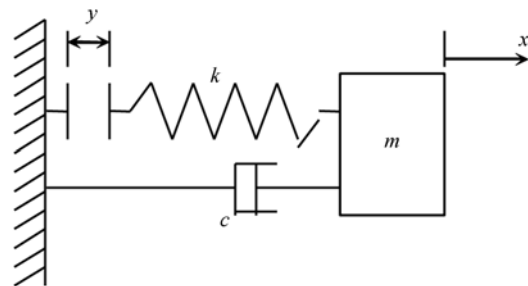


图 2 压电双晶片振子动力学模型

Fig. 2 Dynamical model of cantilever bimorph

根据动力学模型, 建立在动态电场下的自由端带有集中质量的悬臂式压电双晶片的动力学方程为:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = k(x - y) - c \frac{dx}{dt}. \quad (11)$$

3.2 悬臂式压电双晶片振子端部位移的幅值分析

根据悬臂式压电双晶片动力学方程, 得到在

周期性动态电场 VC 作用下悬臂式压电双晶片振子自由端位移幅值^[10]为:

$$X = \frac{Y}{\sqrt{\left[1 - \frac{m\omega^2}{k}\right]^2 + \frac{c^2}{k^2}\omega^2}}, \quad (12)$$

式中: Y 为悬臂式压电双晶片振子在动态电场 V_c 的最大电压值 V_0 下的端部静态位移。

$$Y = \frac{3}{2t} \cdot \frac{(1+B)(2B+1)(L_1+L_2)^2}{\left(1 + \frac{L_1}{L_2}\right)AB^3 + 3B^2 + 3B + 1} d_{31} V_0. \quad (13)$$

将 $L_1 = L - L_0 - L_2$ 代入式(13), 再将式(13)代入(12)得:

$$X = \frac{\frac{3}{2t} \cdot \frac{(1+B)(2B+1)(L-L_0)^2}{\left(\frac{L-L_0}{L_2}\right)AB^3 + 3B^2 + 3B + 1} d_{31} V_0}{\sqrt{\left[1 - \frac{m\omega^2}{k}\right]^2 + \frac{c^2}{k^2}\omega^2}}. \quad (14)$$

利用 Matlab 软件对式(14)进行仿真, 分析悬臂式压电双晶片振子端部位移幅值 X 与夹持长度 L_0 、刚度 k 的关系, 仿真结果如图 3 所示。

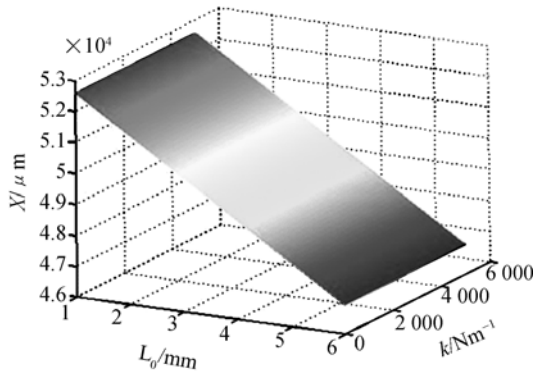


图 3 端部位移幅值 X 与夹持长度 L_0 、刚度 k 的关系
Fig. 3 Displacement amplitude vs. clamping length and stiffness

从仿真结果得到, 在驱动电场相同的条件下, 悬臂式压电双晶片振子的端部位移幅值 X 受刚度 k 的影响较小, 并随着夹持长度 L_0 的增大而减小。

3.3 悬臂式压电双晶片振子产生的惯性加速度的幅值分析

在动态电场的作用下, 悬臂式压电双晶片振子在弯曲运动的过程中, 主要受到以下 3 个力:

压电双晶片端部执行力 F_{bl} , 压电双晶片弹性恢复力 $F_t = kx$, 阻尼力 $F_z = c\dot{x}$ 。

悬臂式压电振子运动模型如图 4 所示, 悬臂式压电双晶片振子在弯曲运动的过程中, 位置 A 为平衡位置, 位置 B 和位置 C 为端部位移最大位置。在周期性电场作用下, 悬臂式压电双晶片振子弯曲运动也具有周期性, 以平衡位置 A 为分界点, 悬臂式压电双晶片振子在 A、B 位置之间和 A、C 位置之间的运动过程是等效的。这里以悬臂式压电双晶片振子在 A、B 位置之间的运动过程为例来分析悬臂式压电双晶片振子在周期性电场作用下的弯曲运动过程。

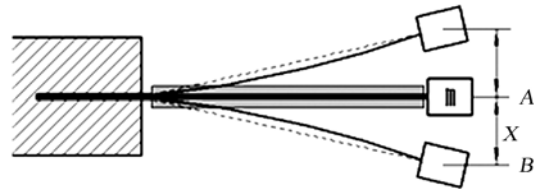


图 4 悬臂式压电振子运动模型图
Fig. 4 Motion model of cantilever bimorph

在 A、B 位置之间的运动过程可分为过程 A~B 和 B~A。过程 A~B 为由位置 A 向位置 B 运动, 压电双晶片弹性恢复力为阻碍力, 阻碍其运动; 过程 B~A 为位置 B 向位置 A 运动, 压电双晶片弹性恢复力为主动力, 促使其运动。因此过程 A~B 和 B~A 压电双晶片振子的受力分别可以表示为:

$$F_{A-B} = F_{bl} - F_t - F_z, \quad (15)$$

$$F_{B-A} = F_{bl} + F_t - F_z. \quad (16)$$

悬臂式压电双晶片振子在位置 B 时的端部位移最大, 则其受到的弹性恢复力 F_t 也最大, 根据式(9)可知悬臂式压电双晶片振子在位置 B 时的端部执行力最大。悬臂式压电双晶片振子在位置 B 速度为 0, 即其受到的阻尼力 F_z 大小也为 0, 因此悬臂式压电双晶片振子在 B~A 过程中至位置 B 时所受到合力值最大。悬臂式压电双晶片振子产生的惯性冲击力与其所受到的力大小相等, 方向相反。

另外, 悬臂式压电双晶片振子在 B~A 过程中至位置 B 产生的惯性冲击力最大, 悬臂压电双晶片振子在弯曲运动的过程中产生的惯性冲击力的幅值 F 表示为:

$$F = F_{bl} + F_t - F_z = F_{bl} + kX, \quad (17)$$

式中: F_{bl} 为悬臂式压电双晶片振子在端部位移最

大时的端部执行力。

$$k = F_{bl}/Y. \quad (18)$$

将式(12)和(18)代入式(17)得:

$$F = F_{bl} + \frac{F_{bl}}{\sqrt{\left(1 - \frac{m\omega^2}{k}\right)^2 + \frac{c^2}{k^2}\omega^2}}. \quad (19)$$

将式(13)代入(9)得:

$$F = \frac{9E_p I_c d_{31} V_c}{2t(L-L_0)} \cdot \frac{(1+B)(2B+1)}{\left(\frac{L-L_0}{L_2}\right)AB^3 + 3B^2 + 3B + 1} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{m\omega^2}{k}\right)^2 + \frac{c^2}{k^2}\omega^2}}\right). \quad (20)$$

则在周期性电场 V_c 的激励作用下, 悬臂式压电双晶片振子在弯曲运动过程中产生的惯性加

$$a = \frac{9E_p I_c d_{31} V_c}{2mt(L-L_0)} \cdot \frac{(1+B)(2B+1)}{\left(\frac{L-L_0}{L_2}\right)AB^3 + 3B^2 + 3B + 1} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{m\omega^2}{k}\right)^2 + \frac{c^2}{k^2}\omega^2}}\right). \quad (21)$$

利用 Matlab 软件对式(22)进行了仿真, 分析了悬臂式压电双晶片振子产生的惯性加速度幅值 a 与夹持长度 L_0 、刚度 k 的关系, 仿真结果如图 5 所示。

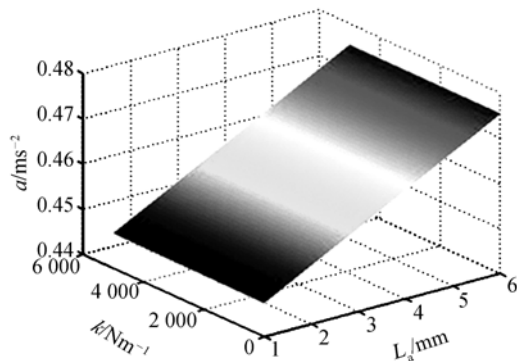


图 5 惯性冲击力幅值 F 与夹持长度 L_0 、刚度 k 的关系
Fig.5 Amplitude of inertial impact vs. clamping length and stiffness

仿真结果得到, 在驱动电场相同的条件下, 悬臂式压电双晶片产生的惯性加速度幅值 a 受刚度 k 的影响较小, 随夹持长度 L_0 的增大而增大。

4 试验测试研究

为验证悬臂式压电双晶片振子在不同夹持长度下的动态特性理论分析成果, 采取了非接触的测量方式分别对悬臂式压电双晶片振子在不同夹持长度下的端部位移幅值进行了测试。利用加速度传感器对悬臂式压电双晶片振子在不同夹持长

$$F_{bl} = \frac{9E_p I_c d_{31} V_c}{2t(L_1 + L_2)} \cdot$$

$$\frac{(1+B)(2B+1)}{\left(1 + \frac{L_1}{L_2}\right)AB^3 + 3B^2 + 3B + 1}. \quad (20)$$

将 $L_1 = L - L_0 - L_2$ 代入式(20), 再将式(20)代入(19)得:

速度的幅值为:

度下产生的惯性加速度幅值进行了测试。制作了如图 6 所示的压电双晶片, 基板厚度为 0.3 mm, 压电陶瓷晶片厚度为 0.2 mm。

试验采用的主要设备包括 33522A 型任意波形发生器, HVP-300 型功率放大器, LK-G5001V 型激光位移传感器以及 LK-H020 型激光侧量头 (测量头工作距离为 20 mm, 测量范围 ± 3 mm, 分辨率为 $0.01 \mu\text{m}$), SD-1441 型电荷放大器, YD-8 型加速度传感器和 L 固纬 GDS-1102 型示波器。

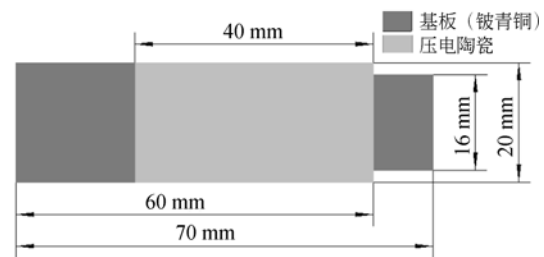


图 6 压电双晶片模型
Fig.6 Model of bimorph

4.1 悬臂式压电双晶片端部位移幅值测试试验

4.1.1 悬臂式压电双晶片端部位移幅值测试系统

为验证悬臂式压电双晶片振子夹持长度变化对其端部位移幅值的影响规律, 测试了悬臂式压电双晶片振子在不同夹持长度下的端部位移幅值。由于悬臂式压电双晶片振子在电信号激励下的变形量较小, 即其输出位移的量级为微米级, 如果外加接触性的位移测试传感装置将影响测试

结果, 所以采用非接触式的测量方式进行测试, 以提高测试的精度^[11]。

将信号发生器产生的电压信号经功率放大器放大后施加到悬臂式压电双晶片振子上, 利用激光测位移传感器的激光测量头采集悬臂式压电双晶片振子的端部位移, 并将采集到的信号传输至位移传感器的控制器, 将采集的数据传输至计算机中相应的软件中, 记录测试数据。试验测试系统如图 7 所示。



图 7 压电振子端部位移幅值 X 测试系统图

Fig. 7 Experimental set for amplitude of bimorph

4.1.2 悬臂式压电双晶片振子端部动位移幅值测试结果

试验中施加在悬臂式压电双晶片振子的激励信号为频率 11 Hz、峰值 10 V 的方波。分别测试了夹持长度为 9~20 mm 的悬臂式压电双晶片振子的端部位移幅值, 悬臂式压电双晶片振子的夹持差采样间隔为 1 mm, 测试结果如图 8 所示。

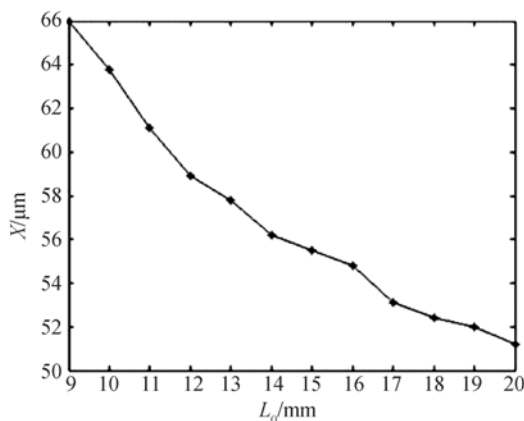


图 8 端部位移幅值 X 与夹持长度 L_0 关系

Fig. 8 Blocking force vs. clamping length

从测试结果可知, 在驱动电场相同的条件下, 悬臂式压电振子端部位移幅值 X 随其夹持长度

L_0 的增大而减小。

4.2 悬臂式压电双晶片产生的惯性加速度幅值测试试验

4.2.1 悬臂式压电双晶片产生的惯性加速度幅值测试系统

为验证悬臂式压电振子夹持长度变化对其产生惯性冲击加速度幅值的影响规律, 测试了悬臂式压电振子在不同夹持长度下的产生惯性加速度幅值。利用加速度传感器测试悬臂式压电双晶片振子在不同夹持长度下的惯性加速度。测试过程中, 将信号发生器产生的电压信号经功率放大器放大后施加到悬臂式压电双晶片振子上, 将加速度传感器粘贴在压电振子端部, 加速度传感器将采集到的信号通过电荷放大器放大, 再传递到示波器。试验测试系统如图 9 所示。

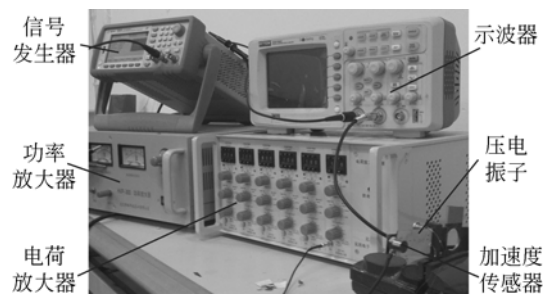


图 9 惯性加速度幅值测试系统

Fig. 9 Experimental set for inertial acceleration amplitude

4.2.2 悬臂式压电双晶片振子的惯性加速度幅值测试结果

试验中施加在悬臂式压电双晶片振子激励信号为频率 11 Hz、峰值 10 V 的方波。分别测试了

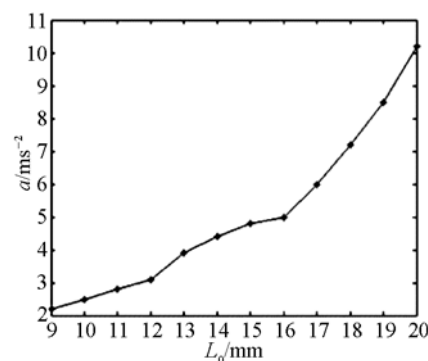


图 10 惯性加速度幅值与夹持长度 L_0 关系

Fig. 10 Inertial acceleration vs. clamping length

夹持长度 9~20 mm 的悬臂式压电振子产生的惯性冲击力幅值,悬臂式压电振子的夹持长度采样间隔为 1 mm。试验测得在悬臂式压电振子产生的惯性加速度的幅值与夹持长度 L_0 关系,结果如图 10 所示。

从测试结果得,在驱动电场相同的条件下,悬臂式压电双晶片振子产生的惯性加速度的幅值随夹持长度 L_0 的增大而增大。

5 结 论

本文以悬臂式压电双晶片振子为研究对象,探讨了悬臂式压电双晶片振子的夹持长度变化对其动态特性影响的规律,得到以下结论。

(1)建立了悬臂式压电双晶片振子动力学模

型,推导了悬臂式压电双晶片振子的静态参数方程,利用 Matlab 软件对悬臂式压电双晶片振子夹持长度变化对其端部位移幅值和产生的惯性加速度幅值的影响进行了仿真。

(2)当驱动电压为 10 V,频率为 11 Hz 时,夹持长度 L_0 在 9~20 mm 内变化的悬臂式压电双晶片振子(总长 $L=60$ mm)的端部位移幅值最大为 66.2 μm ,产生的惯性加速度幅值最大为 10.2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

(3)仿真和试验结果均表明:在驱动电场相同的条件下,随着悬臂式压电双晶片振子的夹持长度增大,其端部位移幅值会变小,其产生的惯性加速度幅值会变大。本文的研究为提高压电惯性驱动性能研究提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 曾平,温建明,程光明,等.新型惯性式压电驱动机构的研究[J].光学精密工程,2006,14(4):623-627.
ZENG P, WEN J M, CHENG G M, et al.. Research on novel inertial piezoelectric actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):623-627. (in Chinese)
- [2] 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, 18(1):156-161. (in Chinese)
- [3] HUNSTI M, HEMSEL T, SEXTRO W. Modelling the friction contact in an inertia motor[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, 24(11):1380-1391.
- [4] LIU W H, WANG Y, HUANG W Q, et al.. A linear stepping piezoelectric motor using inertial impact driving [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 226:693-696.
- [5] 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)
- [6] GAO W, SATO S, ARAI Y. A linear-rotary stage for precision positioning[J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(2):301-306.
- [7] 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.
- [8] WANG Q M, CROSS L E. Performance analysis of piezoelectric cantilever bending actuators[J]. *Ferroelectrics*, 1998, 215(1):187-213.
- [9] 鄂世举,刘建芳,朱喜林,等.压电弯曲元件的长度对其特性影响的实验研究[J].压电与声光,2009,31(3):364-365.
E SH J, LIU J F, ZHU X L, et al.. Experimental research on the effect of length of piezoelectric bender on its characteristics [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2009, 31(3):364-365. (in Chinese)
- [10] 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]:长春:吉林大学,2006.
ZHANG H ZH. *Theoretical and Experimental Study of 2-DOF Precise Actuator Utilizing Impact Force of Piezoelectric Bimorphs* [D]. Changchun: Graduate of the Jilin University, 2006. (in Chinese)

- [11] 程光明,冯丽娜,曾平,等.泵用压电振子与泵腔体积变化的测试研究[J].排灌机械工程学报,2012,30(4):412-416.
CHENG G M, FENG L N, ZENG P, *et al.*. Experimental study of piezoelectric vibrator deforma-

tion and cavity volume fluctuation of piezoelectric pump[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(4):412-416. (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



李新辉(1988—),男,江西高安人,硕士研究生,2011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:huilai1212@126.com

(本栏目编辑:马 健)

(版权所有 未经许可 不得转载)