

文章编号 1004-924X(2005)03-0298-07

压电双晶片型惯性冲击式旋转精密驱动器研究

张宏壮, 曾平, 华顺明, 程光明, 杨志刚
(吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:研制了一种以自由端带有集中质量的悬臂式压电双晶片为驱动单元的新型惯性冲击式旋转精密驱动器。对自由端带有集中质量的悬臂式压电双晶片的动态特性进行了有限元法和实验分析,提出了压电双晶片型惯性冲击式精密驱动器特定的定频调压驱动方法。对压电双晶片型惯性冲击式旋转精密驱动器进行了性能测试,驱动器旋转行程为 180° 、旋转步长分辨力为 $1\ \mu\text{rad}$ 、最大转速为 $0.2\ \text{rad}/\text{min}$ 、最大扭矩为 $0.02\ \text{Nm}$ 。该驱动器结构简单,特别是成本为传统惯性冲击式驱动器的 $1/100$ 左右。

关键词:惯性冲击;压电双晶片;悬臂;有限元分析

中图分类号:TH703.6;TN384 **文献标识码:**A

Impact drive rotary precision actuator by piezoelectric bimorphs

ZHANG Hong-zhuang, ZENG Ping, HUA Shun-ming, CHENG Guang-ming, YANG Zhi-gang

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: An impact drive rotary precision actuator with end-loaded piezoelectric cantilever bimorphs is proposed. According to finite element analysis and experiments of the dynamic characteristics of end-loaded piezoelectric cantilever bimorph, a certain method of fixed-frequency and adjustable-amplitude are confirmed to control the actuator. The results show that the actuator excited by fixed-frequency and adjustable-amplitude ramp voltage waveform work with large travel range(180°), high resolution($1\ \mu\text{rad}$) and speed($0.2\ \text{rad}/\text{min}$) and heavy-load ability($0.02\ \text{Nm}$). Having the advantages of high-precision positioning ability, simple structure and only one percent cost of traditional impact drive mechanism, it is expected that the proposed actuator will be widely applied to precision industry.

Key words: impact driving; piezoelectric bimorph; cantilever; finite element analysis

收稿日期:2005-03-02;修订日期:2005-04-12.

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(No. 2002AA423150);国家自然科学基金资助项目(No. 50475010)

1 引言

近些年来,在光电产品装配、精密器件微制造和表面原子级测量等领域,以压电元件为核心的高精度定位驱动器得到广泛应用。其中,利用压电元件动态特性的惯性冲击式驱动器(IDM)在精密驱动领域已经发展为一项独特的驱动型式。例如:超真空用精密位移装置,微型机器人手臂,扫描隧道显微镜和铅笔大小的放电装置。基于惯性冲击原理的产品化装置如:微机械的自动装配装置,医用细胞操作装置^[1-6]。但目前国内外研制的惯性冲击式驱动器普遍采用压电叠堆为驱动元件。压电叠堆变形量较小,抗拉力弱,结构限制不能连接质量较大的惯性块,驱动能力受到限制,且压电叠堆成本较高。本文研制了以压电双晶片为驱动单元,以特定方式驱动的新型惯性冲击式旋转精密驱动器。由于压电双晶片变形量较大且能双向变形,连接较大冲击质量块,成本低于压电叠堆,因此新型驱动器与传统惯性冲击式驱动器相比,成本降低了近100倍,驱动能力提高了2倍,并具有结构简单、行程大、高分辨率等优点,为克服惯性冲击式驱动器的原有缺点提供了新的方法,可以应用于精密装配、微操作、光学工程、精密定位等领域。

2 驱动器结构和工作原理

压电双晶片型惯性冲击式旋转精密驱动器的结构简图如图1所示。该结构由压电双晶片、冲击质量块、柔性铰链、弹簧、轴和基座等组成。

压电双晶片和冲击质量块构成驱动单元。压电双晶片的一端与轴固连,另一端自由,形成了悬臂梁式的结构,在其自由端固连一质量块。

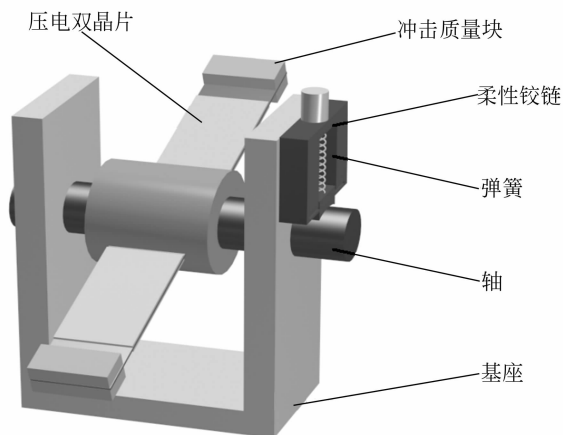


图1 驱动器结构简图

Fig. 1 Structure of precision actuator.

利用压电晶体的逆压电效应,在电信号作用下压电双晶片会产生弯曲变形。悬臂梁式结构压电双晶片的自由端变形量 δ 为:

$$\delta = \epsilon \times V + eF, \quad (1)$$

式中, V 为电信号电压, F 为作用在压电双晶片自由端的集中力, ϵ 、 e 为与压电双晶片压电常数 d_{31} 、压电双晶片长度 L 、厚度 h 等结构参数有关的系数,对于特定压电双晶片为常数。

压电双晶片自由端变形带动其自由端的质量为 m 的冲击块一同运动,产生惯性力 F :

$$F = -ma_t = -m \frac{d^2\delta}{dt^2}, \quad (2)$$

惯性力 F 方向与轴5的轴线交错垂直,形成沿轴线方向的惯性力矩 T_t ,力臂为冲击质量块至轴5轴线的距离,

$$T_t = F \times L = -ma_t L = -mL \frac{d^2\delta}{dt^2}, \quad (3)$$

将式(2)代入式(1)并整理得:

$$em \frac{d^2\delta}{dt^2} + [\delta - \epsilon \times V(t)] = 0, \quad (4)$$

对应不同的电信号,求解方程(4),即可解得 δ 与 $V(t)$ 的关系式,再代入式(3)可得惯性力矩与电信号关系式。

如果对压电双晶片施加合适的驱动电

信号,便可以利用质量块产生的惯性力矩推动轴旋转,输出转角。

当压电双晶片带动端部的质量块往复运动时,也产生相对于固定端的离心力 F_r :

$$F_r = ma_r = m \frac{v_n^2}{R} = \frac{m}{R} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2, \quad (5)$$

为抵消离心力的影响,并且使轴上质量分布均衡,采用了 2 个质量块参数、基板参数和压电晶片参数相同但极化方向相反的压电双晶片振子,通过对称布置的方式构造驱动单元。

柔性铰链 3、弹簧 4、轴 5 和基座 6 等构成了支撑单元。轴通过滑动轴承支撑在基座上。调整弹簧的压紧可以调节轴与轴承之间的摩擦力矩值。

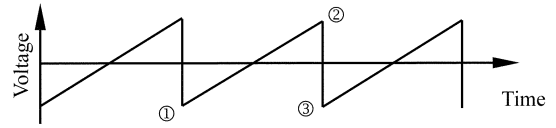
3 驱动器运动过程及特点

3.1 驱动器的运动过程分析

压电双晶片型惯性冲击式旋转精密驱动器通过电信号激励压电双晶片,带动质量块运动完成惯性冲击式运动,其驱动电信号电压波形为锯齿波(RAMP)。

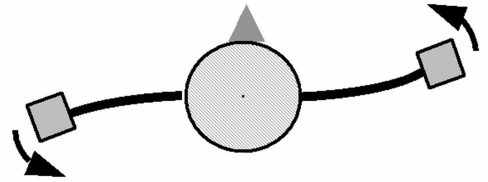
图 2(a)为驱动电信号电压波形,图 2(b)、(c)为驱动器逆时针转动一步的动作过程。驱动电压波形沿斜坡(1)到(2)时,压电双晶片的自由端带动质量块在驱动电信号作用下慢速逆时针摆动,惯性力矩小于摩擦力矩,轴静止不动,如图 2(b)所示。驱动电信号电压到达波形斜坡顶端位置(2)后,电压波形突变至位置(3),压电双晶片的自由端带动质量块急停、快速顺时针摆动,形成逆时针的惯性力矩,惯性力矩大于摩擦力矩,推动轴逆时针转动,如图 2(c)所示。驱动电压波形开始下一个斜坡,进入下一个工作循环。

变换驱动电信号电压波形方向,即可变换输出轴的旋转方向。



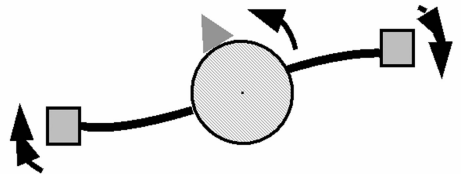
(a) 激励电信号电压波形

(a) Applied electrical signal wave



(b) 驱动器转动步骤一

(b) The first step of precision actuator driving process



(c) 驱动器转动步骤二

(c) The second step of precision actuator driving process

图 2 激励电信号电压波形和驱动器转动步骤
Fig. 2 Applied electrical signal wave and driving process of precision actuator

3.2 驱动器的特点

(1) 采用压电双晶片为驱动单元,压电双晶片成本低于压电叠堆成本,因此研制的新型压电双晶片型惯性冲击式驱动器成本不足传统惯性冲击式驱动器的 1%。

(2) 悬臂梁结构压电双晶片自由端部变形量是压电叠堆的十几倍,并能够方便地固连较大冲击质量,可以形成较大惯性冲击力。承载能力和旋转速度比传统惯性冲击式驱动器有成倍提高。

(3) 结构简单。旋转行程只受导线的限制,可以获得 180° 甚至整周以上的行程。

4 驱动方式的研究

为了研究压电双晶片型惯性冲击式旋转精密的驱动方式和性能,对自由端带集中质量的悬臂型压电双晶片振子进行了有限元法模态分析和动态响应实验分析。

4.1 压电双晶片振子有限元法模态分析

由于驱动单元由 2 个参数相同的压电双晶片振子通过对称布置的方式构成,因此取一侧压电双晶片振子,利用有限元分析软件 ANSYS,对自由端带集中质量的悬臂型压电双晶片振子进行了振动模态分析。

从分析结果图 3 可以看出,自由端带集中质量的悬臂型压电双晶片振子在一阶模态时,振子自由端变形较大,适合惯性冲击式驱动对压电双晶片振子的振动要求,因此惯性冲击式驱动器的激励信号频率应低于压电双晶片振子的一阶固有频率。

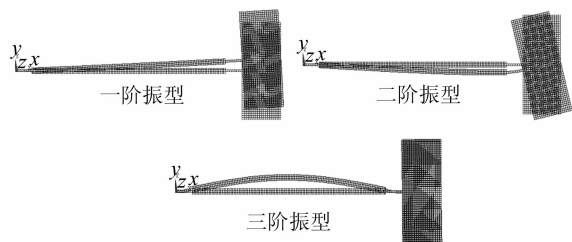


图 3 压电双晶片振子模态分析

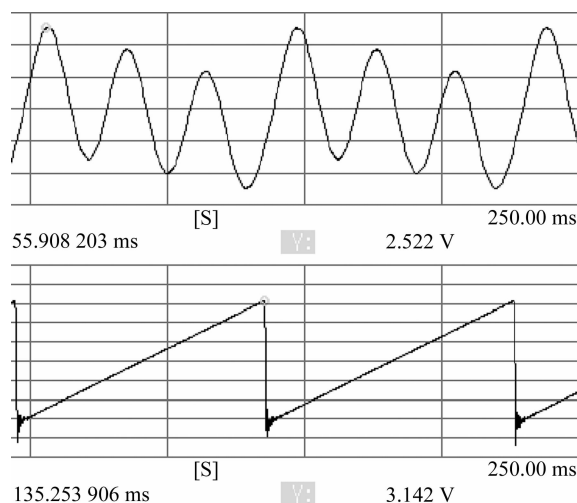
Fig. 3 Piezoelectric bimorph mode of vibration

4.2 压电双晶片振子动态响应实验分析

由 AG1200 型四通道可编程信号发生器、LC2400A 型非接触精密激光测位仪、CF5220 多功能快速傅里叶分析仪、可调式功率放大器和精密气浮隔振台等构成测试系统,对 RAMP 电信号激励下压电振子自由端的动态响应进行测试。测试压电振子的基频为 38.9 Hz。

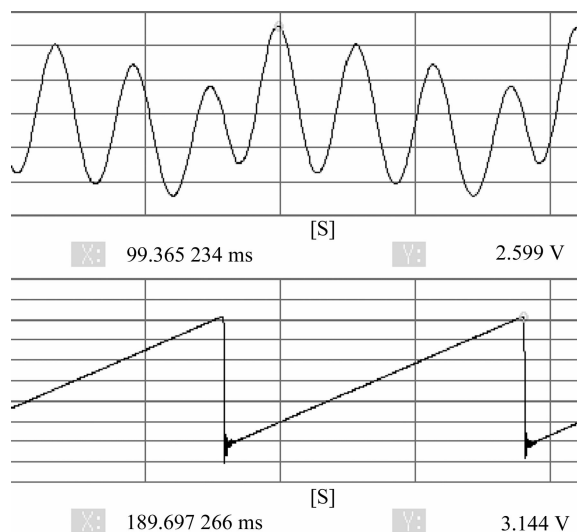
图 4 所示为 RAMP 电信号激励下压电振子自由端的位移响应。在 RAMP 电信号作用下,压电振子自由端的位移响应

波形主要由两个振动波形复合形成,其频率分别为 RAMP 激励信号频率和压电振子一阶固有频率。这两个波形的频率比值,对其复合而成的压电振子自由端响应有较大影响。对于特定的压电振子,其一阶固有频率为固定值,因此施加不同频率



(a)RAMP 电信号频率 11 Hz

(a)RAMP signal 11 Hz



(b)RAMP 电信号频率 10 Hz

(b)RAMP signal 10 Hz

图 4 RAMP 电信号激励下压电振子的响应
Fig. 4 Response of piezoelectric bimorph driven by RAMP signal

激励电信号时,压电振子自由端响应有较大差异。

图 4(a)为 RAMP 激励电信号频率为 11 Hz 时,压电振子的自由端振动响应。当激励电信号电压波形突变沿引起的响应与压电双晶片振子的基频振动位移同相时,双晶片自由端及固连的质量块速度变化较小,产生的惯性冲击力较小,冲击能力弱。图 4(b)为频率等于 10 Hz RAMP 电信号激励下压电双晶片振子的响应。激励电信号电压波形突变沿的响应与压电双晶片振子的基频振动位移反相,双晶片自由端固连的质量块速度变化较大,产生的惯性冲击力较大,冲击能力强。

由于压电双晶片振子响应随激励电信号频率变化较大,因此对于驱动器必须选择特定的驱动能力较强的激励电信号频率,进行定频驱动。

4.3 定频率驱动频率的选定

首先,RAMP 激励电信号频率应低于压电双晶片振子的一阶固有频率。其次,RAMP 激励电信号的突变沿与压电双晶片振子基频振动的后半周期重合时,激励电信号电压波形 RAMP 突变沿的响应与压电双晶片振子的基频振动位移反相,产生的惯性冲击力较大,此时,驱动电信号频率 f_R 与压电双晶片振子的基频 f_B 比值的小数部分应在 $(0.5, 1)$ 区间内。因此,选择定频率驱动的激励电信号 RAMP 频率应满足下列关系式:

$$\begin{cases} f_R < f_B \\ [f_B/f_R - \text{int}(f_B/f_R)] \in (0.5, 1) \end{cases}, (6)$$

其中, f_R 为驱动电信号频率;

f_B 为压电双晶片振子的基频。

5 驱动器性能实验

制作了压电双晶片型惯性冲击式旋转精密驱动器样机,对不同驱动条件下驱动

器的性能进行了试验测试。测试系统与压电双晶片振子动态响应测试系统相同。

5.1 驱动器样机结构尺寸

图 5 为驱动器样机。

驱动单元:基板尺寸 $55 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$,材料为铍青铜;压电晶片尺寸 $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm}$;惯性块尺寸 $18 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,质量为 $9 \text{ g} \times 4$ 。

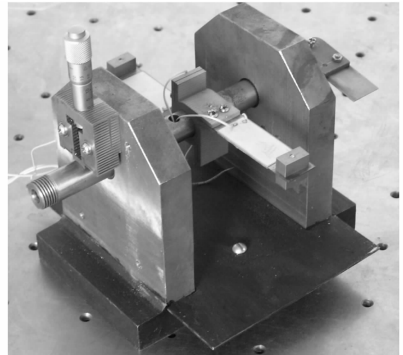


图 5 压电双晶片型惯性冲击式旋转精密驱动器样机

Fig. 5 Photograph of precision actuator

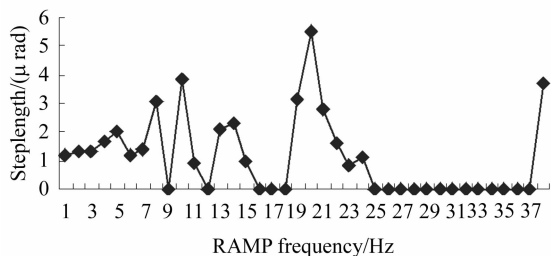
支撑单元:轴的材料为 45 # 钢,直径为 $\Phi 16 \text{ mm}$,质量为 180 g。机械机构底座材料为 45 # 钢,滑动轴承为 SF-10 型自润滑轴承。

5.2 驱动器步长与驱动电信号电压及频率关系

分别测试了驱动器样机在固定驱动电信号电压下,旋转步长与驱动电信号频率的关系,以及在固定驱动电信号频率下,旋转步长与驱动电信号电压的关系。

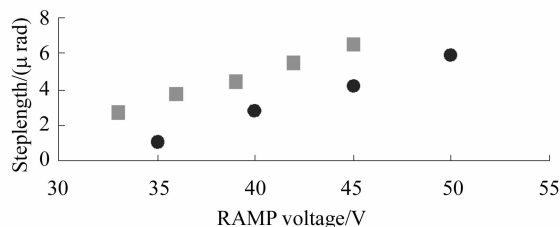
图 6(a)所示为驱动器样机在固定驱动电信号电压下,旋转步长与驱动电信号频率的关系。由实验结果得出驱动器的驱动能力随驱动电信号频率呈现较大的变化,与双晶片振子振动测试、分析结果相吻合。

图 6(b)所示为特定驱动电信号频率下,旋转步长随驱动电信号电压的变化关系。测试结果表明,在固定的驱动电信号频率下,旋转步长与驱动电压具有较好的



(a)驱动器步长与驱动电信号频率关系

(a) Relationship between movement step and applied voltage frequency



(b)驱动器步长与驱动电信号电压关系

(b) Relationship between movement step and applied voltage amplitude

图 6 驱动器步长与驱动电信号电压、频率关系
Fig. 6 Movement step affected by applied voltage

线性关系,可以在定频驱动时,通过调节驱动电压控制驱动器的步长和旋转速度,即以定频调压的方式控制驱动器。

5.3 驱动器性能测试结果

采用定频调压的驱动方式,对驱动器

进行了基本性能实验,选择激励电信号 RAMP 频率为 13 Hz,分别测试了驱动器的行程、旋转单步最小步长、旋转速度及承载能力等。表 1 为驱动器采用定频调压方式时的旋转输出情况。

表 1 驱动器样机的性能测试结果

Tab. 1 Experimental results of precision actuator

激励频率	旋转行程	步长分辨率 (电压)	最大速度 (电压)	最大扭矩 (电压)
13 Hz	180°	1 μrad (30 V)	0.2 rad/min (90 V)	0.02 Nm (90 V)

6 结 论

(1)研制了以压电双晶片为驱动单元的惯性冲击式旋转精密驱动器,结构简单,成本低,驱动能力强;

(2)不同激励电信号频率下,压电双晶片型惯性冲击式旋转精密驱动器的驱动能力不同。应采用特定激励电信号频率调节激励电信号电压幅值,即定频调压的驱动方式实现驱动器转动步长和速度的控制;

(3)压电双晶片型惯性冲击式旋转精密驱动器的旋转行程可以达到 180°,旋转步长分辨力为 1 μrad,最大转动速度为 0.2 rad/min,最大扭矩为 0.02 Nm。

参考文献:

[1] LIU Y T, WANG C W. A self-moving precision positioning stage utilizing impact force of spring-mounted piezoelectric actuator[J]. *Sensors and Actuators A*, 2002, 102:83-92.

[2] 华顺明,程光明,阚君武,等. 压电精密位移驱动器的研究进展[J]. *压电与声光*, 2004, 26(3): 192-195.
HUA SH M, CHENG G M, KAN J W, et al. The current research on the piezoelectric actuators for precision displacement [J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2004, 26(3): 192-195. (in Chinese)

[3] 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]. *Op-*

tics and Precision Engineering, 2003, 11(4):326-332. (in Chinese)

- [4] WU T, PAUL I R. Dynamic peak amplitude analysis and bonding layer effects of piezoelectric bimorph cantilevers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(1):203-210.
- [5] MORITA T, YOSHIDA R, OKAMOTO Y, *et al.* Three DOF parallel link mechanism utilizing smooth impact drive mechanism [J]. *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2002, 26(3):289-295.
- [6] 迟冬祥, 颜国正, 丁国清. 基于惯性-摩擦原理的 PZT 驱动四自由度微驱动器的研究[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(2):135-138.
- CHI D X, YAN G ZH, DING G Q. Inertia-friction based 4 D. O. F. microactuator driven by PZT [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(2):135-138. (in Chinese)

作者简介:张宏壮(1969—),男,吉林长春人,副教授,博士研究生,研究方向为压电驱动与控制技术。
Email:qazsailman@163.com