

文章编号 1004-924X(2010)01-0156-06

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

李晓韬,程光明,杨志刚,马希里,曾 平

(吉林大学 机械科学与工程学院,吉林 长春 130022)

摘要:针对目前压电驱动器主要使用非对称锯齿波电信号驱动压电晶体实现驱动的现状,采用对称电压信号驱动压电振子,设计了非对称夹持式压电旋转驱动器。用对称波电信号作用在压电双晶片振子上,产生正反两个方向大小不同的周期性惯性冲击力,驱动机构实现旋转位移。建立了压电旋转驱动器的动力学模型,分析了非对称夹持式压电旋转驱动器实现大小不同惯性冲击力的原理以及压电旋转驱动器的运动过程。组成了压电旋转驱动器的测试系统,在不同电压幅值、频率的方波激励下,对压电旋转驱动器的平均步长进行了测试。结果表明:非对称夹持式压电旋转驱动器能实现较稳定的单向转动,最大行程为 360° ,最大承载能力超过 300 g,步长分辨率为 $5 \mu\text{rad}$,最大转动速度为 $4\,000 \mu\text{rad/s}$;驱动器样机在 20 V、2 Hz 的方波激励下,平均运动步长为 $12 \mu\text{rad}$,转动速度为 $24 \mu\text{rad/s}$ 。

关键词:非对称波;惯性冲击;压电双晶片;旋转驱动器

中图分类号:TM384;TH703.8 **文献标识码:**A

Design of asymmetrical rotated piezoelectric actuators based on impact driving principle

LI Xiao-tao, CHENG Guang-ming, YANG Zhi-gang, MA Xi-li, ZENG Ping

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The asymmetrical rotated piezoelectric actuator is mainly driven by a sawtooth wave, namely, a kind of asymmetrical wave. On the basis of the ability of symmetrical wave drive and the principle of the converse piezoelectric effect, a design scheme using symmetrical wave to drive the piezoelectric cantilever bimorphs is proposed. The symmetrical wave is acted on the piezoelectric cantilever bimorphs to get inertial impact forces in different directions to drive the rotated actuator to realize the movement. The dynamic model of the rotated actuator is constructed, whose movement principle is also analyzed. An experimental system is built and the rotated actuator's velocity characteristics under different frequencies and voltages are tested. The results show that the asymmetrical rotated piezoelectric actuator realizes a stable and forward direction movement. When the voltage is 20 V and the frequency is 2 Hz square wave, its average step is up to $12 \mu\text{rad}$ and the rotation velocity is up to $24 \mu\text{rad/s}$. The rotated actuator can provide the maximum stroke in 360° , carrying capacity to 300 g, re-

收稿日期:2009-01-21;修订日期:2009-04-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50735002 50605027);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA04Z336)

solving capability in $5 \mu\text{rad}$, and rotation velocity in $4\,000 \mu\text{rad/s}$.

Key words: asymmetric wave; inertial impact; piezoelectric cantilever bimorph; rotated actuator

1 引言

近年来,随着微纳米技术的迅猛发展,在超精密加工、精密器件微制造、精密测量、航天等相关技术领域都迫切需要精密驱动机构^[1-5]。压电陶瓷是一种广泛应用于精密微驱动领域的功能材料,能够实现微纳米级的精密位移控制,因而以压电材料为驱动元件的驱动器成为近年来精密驱动装置的一个重要分支。

惯性式压电驱动器在工作行程、分辨率、工作频率、运动速度、频率响应、制造成本、受压电元件滞环蠕变影响程度等方面具有独特的优势,因而惯性式压电驱动器已经发展成为压电精密驱动的一个重要部分^[6-9]。日本长冈科学技术大学设计的机器人手臂,可在锯齿波驱动下,由压电晶体产生惯性冲击力驱动实现沿 X 、 Y 方向的移动以及绕 θ 旋转运动^[10];Katsushi Furutani 等人研制出用于电火花加工机床的移动工作台可以在工件表面沿 X 、 Y 和 θ 方向运动^[11];瑞士 ETHZ 机器人研究所开发的微小型惯性冲击式旋转驱动器^[12],最大速能量转换单元为 30 mm/s ,扫描模式运动分辨率为 20 nm ;瑞士 ETHZ 机器人研究所开发的 Abalone II 型惯性冲击式 3-DOF 精密驱动器,其工作性能为速度 1 mm/s ,最大步距 $2 \mu\text{m}$,定位精度 10 nm ^[13]。

现有的压电惯性驱动器的控制精度较高,但大多是应用锯齿波信号这种非对称电信号驱动压电振子。本文所提出的采用对称电压信号驱动压电振子的新型惯性驱动机理,与传统惯性驱动机理相比,具有结构简单且容易控制,驱动信号易于产生等优点。在此基础上提出研制新型惯性压电双晶片式旋转驱动器,具有较高的研究价值和广泛的应用前景。

2 压电旋转驱动器的动力学模型

根据应用惯性冲击原理的非对称夹持式压电旋转驱动器(简称压电旋转驱动器)的结构组成及工作原理,建立了如图 1 所示的动力学模型。

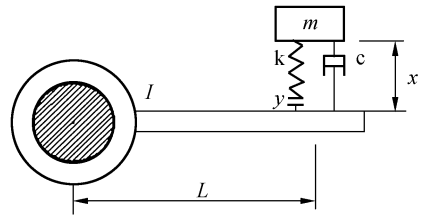


图 1 压电旋转驱动器的动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of rotated piezoelectric actuator

压电旋转驱动器的动力学方程为:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = k(y-x) - c \frac{dx}{dt} \\ I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = kL(x-y) + cL \frac{dx}{dt} + T \end{cases}, \quad (1)$$

式中: m 为质量块质量; x 为主质量块的位置坐标; y 为电压 V 作用下压电双晶片振子(简称压电振子)自由端的挠度; k 为压电双晶片自由端的外力与挠度的比值; c 为压电双晶片的阻尼; I 为主质量块即输出轴的转动惯量; θ 为输出轴的转角; L 为冲击块至轴线的距离; T 为主质量块与支撑面之间的摩擦力矩。

在电场作用下悬臂梁结构压电双晶片自由端的挠度值 y 为

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

式中: d_{31} 为压电常数; E_p 为压电晶片的弹性模量; E_0 为金属片的弹性模量; V 为施加在双晶片上的电压; L 为双晶片的长度; h 、 h_0 为压电晶片和金属片的厚度。

作用于悬臂梁结构压电双晶片自由端外力 p 与其引起的自由端挠度变化值 δ 的比值 k 为

$$k = p/\delta = 3 \left(2 \left(\frac{\omega}{12} \left(\frac{h}{2} \right)^3 + \omega h \frac{(h+h_0)^2}{4} \right) E_p + E_0 \frac{\omega h_0^3}{12} \right) / l^3, \quad (3)$$

其中: ω 为压电双晶片的宽度。

3 压电旋转驱动器设计及运动原理

3.1 压电旋转驱动器的结构设计

非对称夹持器的结构设计如图 2 所示,共能

夹持 4 个压电双晶片振子-压电双晶片与惯性冲击质量块的装配体,是实现非对称夹持压电振子的关键部件。非对称夹持器与一个压电双晶片振子连接部分局部放大后的结构示意图如图 3 所示。压电振子在对称波作用下,产生正反两方向大小相同的惯性冲击力作用,但由于非对称夹持器有夹持差,夹持压电振子两侧长度不同,使两方向上压电振子刚度不同,因此产生正反两方向大小不同的惯性冲击力,从而使压电旋转驱动器正方向运动。非对称夹持器实现了压电旋转驱动器在对称波作用下的单向运动。

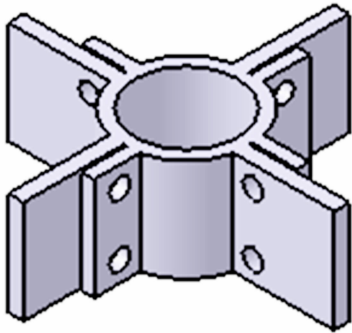


图 2 非对称夹持器的设计

Fig. 2 Design of asymmetrical gripper mechanism

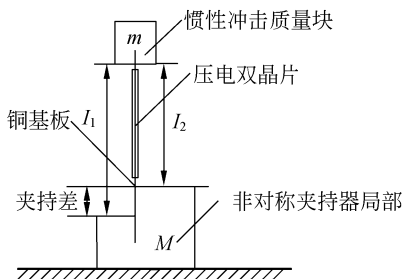
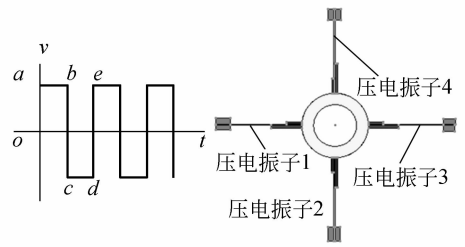


图 3 非对称夹持结构示意图

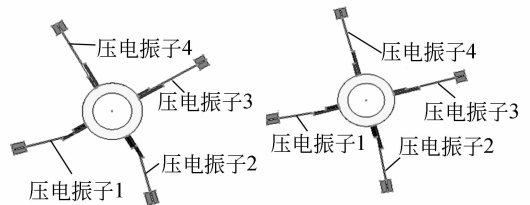
Fig. 3 Principle sketch of asymmetrical gripper

3.2 压电旋转驱动器的运动原理

压电旋转驱动器运动原理的模型如图 4 所示,非对称夹持器与 4 个压电振子连接。为使压电振子在相同相位的对称波驱动下,压电振子 1、2 对压电旋转驱动器产生的驱动力与压电振子 3、4 对压电旋转驱动器产生的驱动力方向相反,从而实现压电旋转驱动器的逆时针以及顺时针转动,压电振子 1、2 与压电振子 3、4 夹持方向相反。压电旋转驱动器采用方波信号驱动,对压电振子 1 和压电振子 2 施加相位相同的激励信号,运动



(a) 作用于压电振子的方波 (b) 初始状态
(a) Piezoelectric vibrator (b) Original state



(c) $o \rightarrow a$ 阶段 (d) $b \rightarrow c$ 阶段
(c) $o \rightarrow a$ stage (d) $b \rightarrow c$ stage

图 4 压电旋转驱动器运动原理

Fig. 4 Moving principle sketch of rotated actuator

原理如下:

(1)初始状态时,激励电压为 0,驱动器静止不动;

(2) $0 \rightarrow a$ 阶段,电压突变,使得压电双晶片振子 1、2 快速顺时针弯曲变形,产生逆时针的惯性冲击力矩,当惯性力矩大于摩擦力矩时,推动机构逆时针转动一大步。电压波形由 $a \rightarrow b$ 阶段,由于电压不变,机构不产生动作;

(3) $b \rightarrow c$ 阶段,压电双晶片振子 1、2 快速逆时针弯曲变形,产生顺时针的惯性力矩,压电振子在对称波的作用下, $b \rightarrow c$ 阶段产生与 $o \rightarrow a$ 阶段大小相同的变形,但由于非对称夹持器存在夹持差, $b \rightarrow c$ 阶段压电振子发生逆时针弯曲变形时,与较长一侧夹持部分作用,压电振子刚度较 $o \rightarrow a$ 阶段小,从而产生的惯性力矩小于 $o \rightarrow a$ 阶段产生的惯性力矩,推动机构顺时针转动一小步。电压波形由 $c \rightarrow d$ 阶段,电压不变,机构不产生动作。

重复 2、3 的过程,可使机构连续逆时针转动。机构逆时针转动的步长及转动的速度,可以通过改变驱动电压的幅值和频率来控制。驱动电压在 2~50 V 之间变化,频率可达几十赫兹,其最小步长达到几十微弧,也可以通过改变驱动电压的方向,或对压电振子 3、4 加电驱动,实现压电旋转驱

动器的顺时针的转动。因此,非对称压电惯性旋转驱动器可以实现大运动行程、微米级的分辨率。

4 旋转驱动器的实验研究

4.1 实验系统组成

压电旋转驱动器的运动特性测试系统组成如图 5 所示。在测试过程中,把任意波形发生器的输出端接到功率放大器上以提高压电振子的输入电压。通过任意波发生器输出的激励信号经过功率放大器放大后,施加到旋转驱动器的压电振子上,带动驱动器运动。运动位移由激光测微仪测取,测得的位移按可调的比例转换成电压信号通过 RS-232 接口实时传入多功能傅里叶分析仪,同时实时拾取用于驱动压电元件的供电电压,在多功能傅里叶分析仪上与位移信号进行对比分析。

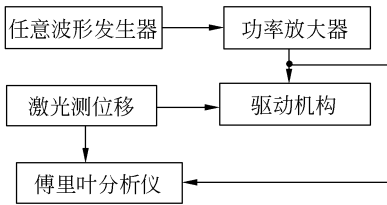


图 5 压电旋转驱动器测试系统组成

Fig. 5 Experimental system of rotated actuator

压电驱动器试验样机如图 6 所示,样机主要由非对称夹持器、压电振子、摩擦力调节装置、标

尺、轴承和轴承座组成。摩擦力调节装置用于调整驱动器的摩擦阻力大小,从而控制压电旋转驱动器的运动;标尺用于读取驱动器旋转位移的大小;由于推力轴承轴承间隙小,对心性很好,因此选择推力轴承作为机构的导向部分。样机各部分的参数如表 1 所示。

表 1 旋转驱动器样机各主要零件的材料与规格

Tab. 1 Materials and sizes of main parts for rotated actuator

零件名称	数量	几何尺寸/mm	材料
非对称夹持器	1	$\Phi 25 \times 35 \sim \Phi 20 \times 25$	铝
基板	4	$70 \times 20 \times 0.4$	镀锌铜
压电晶片	8	$40 \times 20 \times 0.35$	PZT
质量块	8	$20 \times 8 \times 5$	铜
标尺	1	—	45 钢
轴承座	1	—	有机玻璃
轴承	1	—	—
摩擦调节装置	1	—	铜

4.2 实验结果

对压电旋转驱动器样机的运动过程进行了测试,该压电旋转驱动器样机可实现 360° 的整周转动,且整个运动过程的线性度较好,步长均匀。如图 7(a)所示,在 2 Hz 方波作用下,测得压电旋转驱动器样机旋转步长与电压的关系曲线,电压较低时(小于 50 V),驱动器的步长随驱动电压的升高而线性增大,电压较高时(大于 50 V),驱动器的步长随电压的升高近似保持不变。在 2 Hz、20 V 的方波激励下,驱动器平均运动步长为 $12 \mu\text{rad}$,转动速度为 $24 \mu\text{rad/s}$,在 2 Hz、10 V 方波作用下,步长分辨率可达 $5 \mu\text{rad}$,最大转动速度可达 $4\,000 \mu\text{rad/s}$ (20 Hz、50 V)以上。在 2 Hz、50 V 方波作用下,测得压电旋转驱动器样机旋转步长与负载的关系曲线,如图 7(b)所示,最大负载超过 300 g,可见此压电旋转驱动器可以实现小步长,大转速,大行程,大负载的要求。

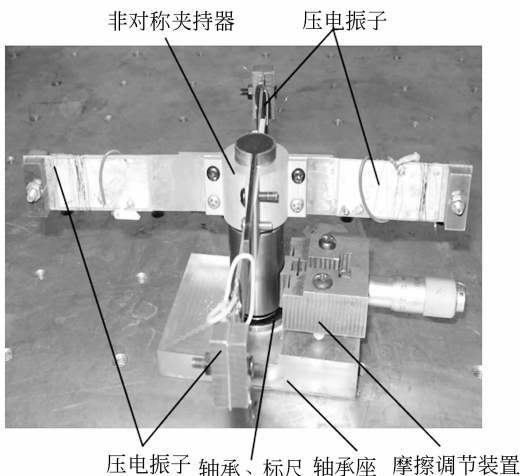
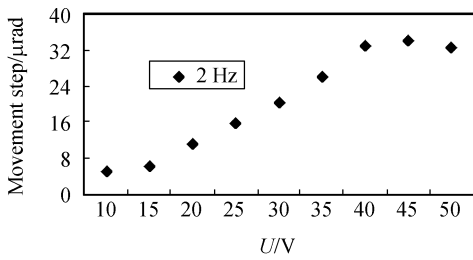


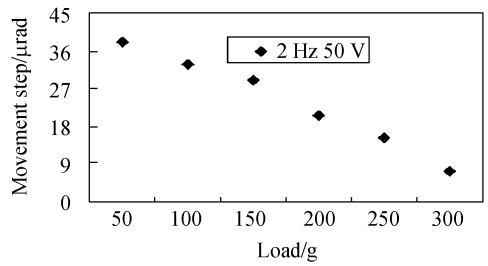
图 6 压电旋转驱动器样机

Fig. 6 Prototype of rotated actuator



(a) 2 Hz 方波作用下, 旋转步长与电压的关系

(a) Relation curve of movement step and voltage under 2 Hz square wave



(b) 2 Hz, 50 V 方波作用下, 旋转步长与载荷的关系

(b) Relation curve of movement step and load under 2 Hz, 50 V square wave

图 7 压电旋转驱动器在方波作用下的步长

Fig. 7 Displacement steps rotated actuator under square waves

5 结 论

本文设计并制作了应用惯性冲击原理的非对称夹持式压电旋转驱动器样机,建立了驱动器的动力学分析模型,并分析了驱动器的运动机理。针对驱动器的特点建立了试验测试系统,确定了测试方法,并对压电旋转驱动器的运动性能进行

了测试。试验表明,本文所提出的非对称夹持压电振子,在对称波的作用下驱动压电旋转驱动器实现定向运动的机理正确可行。驱动器在正反两方向大小不同的惯性冲击力驱动下,能够实现稳定的正方向旋转运动,其旋转分辨率可达到 $5 \mu\text{rad}$,最大负载超过 300 g。驱动器可满足小步长,大转速,大行程,大负载的定位要求。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 高亮,阚珊珊,李敏,等. 压电陶瓷精密转动平台的转角精度测量[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(2): 206-211.
GAO L, KAN SH SH, LI M, *et al.*. Rotation-angle-accuracy measurement of piezo tilt platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 206-211. (in Chinese)
- [3] 李晓韬,杨志刚,程光明,等. 基于惯性冲击原理的变摩擦式微位移机构的运动特性[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(4): 676-681.
LI X T, YANG Z G, CHENG G M, *et al.*. Movement characteristics of micro-displacement mechanism with variable friction based on inertial impact principle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 676-681. (in Chinese)
- [4] 陈海初. 压电陶瓷驱动球基微驱动器的动力学研究[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(2): 248-253.
CHEN H C. Dynamical research on spherical micro actuator with PZT drivers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 248-253. (in Chinese)
- [5] MAEKAWA H. Development of a micro transfer arm for a microfactory [C]. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea*, 2001: 1444-1451.
- [6] MORITA H. Electrical discharge device with direct drive method for thin wire electrode [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995: 73-78.
- [7] LI X T, XU G, TOSHISUGU U, *et al.*. Research on a novel sensor for measuring force in arbitrary direction [C]. *2008 International Conference on Computer and Electrical Engineering*, 2008: 241-244.

- [8] 程光明, 李晓韬, 曾平, 等. 压电叠堆式惯性移动机构的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007(1):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(1):85-88. (in Chinese)
- [9] 曾平, 李晓韬, 程光明, 等. 新型压电单振子移动机构的试验研究[J]. 压电与声光, 2007(5):622-624.
ZENG P, LI X T, CHENG G M, *et al.*. New single-oscillator piezoelectric linear[J]. *Actuator Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2007(5):622-624. (in Chinese)
- [10] SHINICHIRO K, TOSHIKI I, NOBUYUKI O. Multi-layered piezoelectric bimorph actuator[C]. *IEEE1997 International Symposium on Micromachine and Human Science*, 1997:73-77.
- [11] FURUTANI K, MOHRI N, HIGUCHI T. Self-running type electrical discharge machine using impact drive mechanism[C]. *Proceedings of Advanced Intelligent Mechatronics AIM'97, Tokyo, Japan*, 1997.
- [12] BERGANDER A, DRIESEN W, VARIDEL T, *et al.*. Monolithic piezoelectric push-pull actuators for inertial drives[C]. *IEEE Micromechanics and Human Science*, 2003:309-316.
- [13] 范伟, 余晓芬, 奚琳. 压电陶瓷驱动系统及控制方法研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3):368-371.
FAN W, YU X F, XI L. Research on driving system and controlling means of PZT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3):368-371. (in Chinese)

作者简介:



李晓韬(1980—),女,吉林长春人,博士研究生,讲师,2003年,2006年于吉林大学获得学士和硕士学位,主要研究方向为压电驱动技术在微小型机电液系统的理论及应用。E-mail: lixiaotao@jlu.edu.cn



马希里(1977—),男,硕士,工程师,2008年于吉林大学获硕士学位,研究方向为压电驱动理论及应用。E-mail: ma_xili@126.com

通讯作者:



程光明(1957—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,1982年,1985年,1996年分别于吉林工业大学获学士、硕士、博士学位,研究方向为微小型机电液系统的理论及应用。E-mail: cgm@jlu.edu.cn



曾平(1957—),女,吉林长春人,博士,教授,博士生导师。1982年,1995年于吉林工业大学获学士、硕士学位,2006年于吉林大学获博士学位,研究方向为微小型机电液系统的理论及应用。E-mail: zengping321@163.com



杨志刚(1956—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,1981年,1984年分别于吉林工业大学获学士、硕士学位,后于吉林工业大学机械工程专业获博士学位,现为吉林大学链传动研究所所长,研究方向为微小机械与精密机械、压电驱动与控制技术及链传动。E-mail: yzg@jlu.edu.cn