

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

新型压电步进式二维精密驱动器

刘国嵩, 杨志刚, 曾 平, 程光明

(吉林大学 机械工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要: 设计了新型压电步进式精密二维驱动器。以压电叠堆为驱动元件, 在单体柔性结构上实现直线和旋转驱动二维精密驱动。同时利用独特的双侧对称箝位结构, 保证工作的稳定性和准确性。进行了二维驱动器的有限元分析。通过大量试验研究, 证明二维驱动器达到基本设计功能。试验结果表明: 二维驱动器的旋转驱动分辨率达到 $0.45 \mu\text{rad}$, 行程 360° , 速度达到 $0.04 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 扭矩可达 $0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$; 直线驱动分辨率 40 nm , 行程 20 mm , 速度 $19.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 驱动力可达近 10 N , 可实现 2 自由度精密驱动。

关键词: 二维驱动器; 压电叠堆; 柔性铰链; 精密驱动; 有限元分析

中图分类号: TH703.6 文献标识码: A

Novel sophisticate stepping 2-DOF piezoelectric actuator

LIU Guo-song, YANG Zhi-gang, ZHENG Ping, CHENG Guang-ming,

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

Abstract: By taking a piezoelectric stack as actuator element to realize 2-DOF precision driving in linear and rotary actuators arranged on flexible processing structure, a new piezoelectric stepping style precision 2-DOF actuator was designed. The stability and precision of the system was ensured by using unique double symmetry structure of anchoring/loosing. The finite element analysis of 2-DOF actuator combining with lots of experiments research proved 2-DOF actuator functioned basically. The test results show rotary driving of 2-DOF actuator reaches $0.45 \mu\text{rad}$ in resolution, 18mm in travel, $0.04 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ in velocity and $0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ in torque; linear driving reaches 40 nm in resolution, 20 mm in travel, $19.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ in velocity and 10 N in driving power approximately.

Key words: 2-DOF actuator; PZT stack; flexible hinge; sophisticate drive; finite element analysis

1 引言

精密驱动器的研究随着一些对位移控制有微米, 甚至纳米级要求的行业的发展, 如生物工程、显微医学、微电子机械加工装配及航空和航天

等诸多技术领域, 受到了广泛的关注并取得长足的进展。其中, 由于压电陶瓷元件具有体积小、输出力大、频响高及分辨率高的优良特性, 使得基于压电元件的精密驱动器的研究十分活跃^[1-2]。

目前国内外以压电陶瓷材料作为驱动元件研制开发的二维驱动器多为二维微动台, 其分辨率

达到微米级,甚至纳米级,但是其工作行程及承载能力有限^[3]。另有一些大行程的二维驱动器,采用粗精平台相结合的方式,即将高精度伺服电机和微动台通过滚珠丝杠副连接在一起,精密位移的范围也很小,同时结构复杂,控制繁琐^[3]。

为了满足高分辨率、大行程和多维驱动的需求,本文提出一种以压电叠堆为驱动元件,采用整体柔性结构的步进式直线旋转驱动器。这种新型压电步进式二维驱动器克服了大行程和高分辨率之间的矛盾,同时结构紧凑,控制相对简单,并设计了试验样机,进行了大量试验研究。

2 步进式二维驱动器的结构和工作原理

由于步进式驱动器的工作要求其箝位和驱动的压电元件具有大输出力和输出位移,所以本文选择压电叠堆作为驱动器的驱动元件。压电型步进式精密二维驱动器采用日本 NEC 公司的 AE0505D16 型压电叠堆^[4]。

为了避免机械传动环节产生的误差,驱动器采用整体加工的柔性结构。柔性结构主要依赖柔性铰链的弹性变形产生运动。由于免装配、无间隙和无摩擦的特性,因此柔性铰链结构可以实现微米甚至纳米级的运动定位精度。为使柔性铰链有大的变形量同时有好的回弹性,以保证驱动器机械系统的可靠性及精度,要求材料的许用应力 σ 和弹性模量 E 尽量大。因此,材料选用弹簧钢 65 Mn^[4-6]。

图 1 所示为压电型步进式精密二维驱动器的主体装配图,主要由主体、动子、压电叠堆和精调斜块组装而成。主体采用对称式整体结构,有利于消减材料应力和结构受力变形对驱动器精密驱动的影响。主体由旋转运动层,固定层和直线运动层组成,各层之间由适应各自运动形式的柔性铰链连接,每层的箝位结构完全相同。由于采用双侧对称箝位结构,便于利用螺钉通过精调斜块对来调整压电叠堆的预紧力以及箝位面与动子的配合间隙。经过精细调整,使得各层分别箝位时动子的中心线重合,且使得驱动器动子旋转运动时的轴线方向与直线运动时的运动方向平行。同时,双侧对称箝位结构保证了驱动器箝位和松开

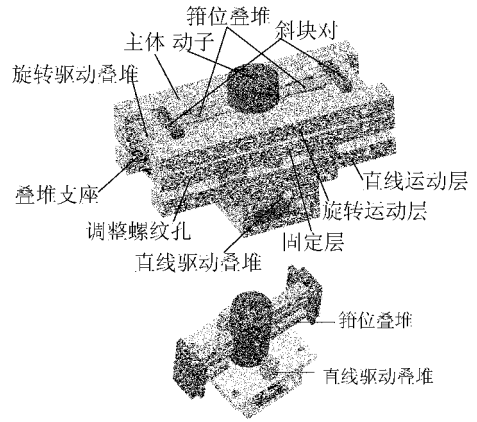


图 1 驱动器的主体结构及其压电叠堆空间位置示意图

Fig. 1 Assembly drawing of actuator's main structure

箝位动作的可靠性和准确性。

压电型步进式精密二维驱动器的驱动过程是单自由度的步进直线驱动和单自由度的步进旋转驱动的复合驱动过程。其箝位动作是指箝位用压电叠堆加压伸长,推动柔性铰链,抱住动子的过程。做旋转驱动时,主体的直线驱动层处于松箝位状态,过程如下:固定层旋转运动层均箝位→固定层松箝位、旋转运动层保持箝位→旋转驱动用叠堆伸长,推动旋转运动层逆时针旋转一个角度→固定层箝位、旋转运动层保持箝位→固定层保持箝位、旋转运动层松箝位→旋转驱动用叠堆缩短,由柔性铰链弹性力带动旋转运动层回到原来的位置→固定层保持箝位、旋转运动层箝位。做直线驱动时,主体的旋转运动层处于松箝位状态,过程如下:固定层直线驱动层均箝位→固定层保持箝位、直线驱动层松箝位→直线驱动叠堆伸长,推动直线运动层产生一步直线运动→固定层保持箝位、直线运动层箝位→固定层松箝位、旋转运动层保持箝位→旋转驱动叠堆缩短,由柔性铰链弹性力带动直线运动层回到原来的位置→固定层箝位、旋转运动层保持箝位。由于驱动器的旋转和直线驱动共用一个动子,所以不能同时驱动。在两者进行切换时,固定层保持箝位,因此驱动器的动子状态不受影响。

在进行向上的直线驱动时,驱动器实际依靠平板移动副(结构示意图见图 2)的回弹力驱动,要求平板移动副具有足够的回弹力,其公式^[7]如下:

$$F = k_{p2} x, \quad (1)$$

式中 $k_{p2} = 4Eb(1 - \mu^2)e^3$ 为平板移动副的刚度, $e = t/a$, 弹簧钢的弹性模量 $E = 206 \text{ GPa}$, 泊松比

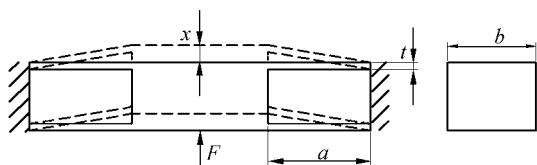


图 2 平板移动副示意图

Fig. 2 Scheme of parallel board P pair

$\mu=0.3, b=13 \text{ mm}, t=0.5 \text{ mm}, a=5 \text{ mm}, k_{p2} \approx 9.7 \times 10^6 \text{ N/m}, x \approx 3 \times 10^{-5} \text{ m}$, 因此 $F \approx 291 \text{ N}$, 满足要求。

3 驱动器主体结构的有限元分析

有限元法是目前计算工程科学领域最有效的计算方法之一,而 ANSYS 是最为通用有效的有限元分析软件之一。为了分析压电型步进式精密二维驱动器在旋转驱动叠堆和直线驱动叠堆在不同电压工作时主体的结构变形及影响,利用 ANSYS 进行实体建模,对驱动器的主体结构做有限元分析(图 3)。

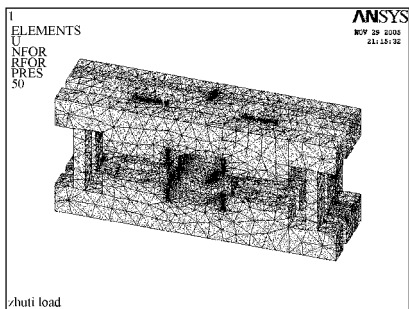


图 3 步进式二维驱动器主体的 ANSYS 实体建模图

Fig. 3 ANSYS. molde of stepping 2-FOD actuator

图 4 所示为旋转驱动叠堆工作时驱动器主体的机械结构有限元变形图。由于驱动器是通过双侧对称的箝位面箝住动子,从而在驱动叠堆伸长时带动动子运动,因此可以将驱动器做旋转或直线驱动时,相应驱动层的箝位面在运动方向的位移量作为动子输出的位移量。使用 KEYENCE LC-2400A 型激光测位仪测出安装在驱动器中的驱动叠堆在不同电压下的伸长量,将其作为 ANSYS 有限元分析时的激励位移,从而得到相应的主体结构变形。具体的驱动电压、输出位移和实际位移的数值对照关系见表 1。

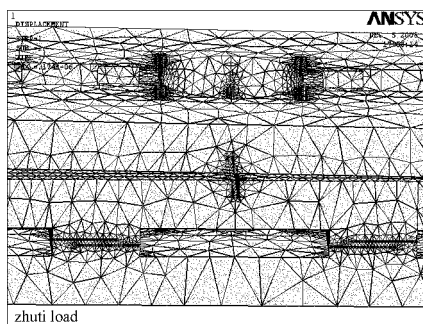


图 4 旋转驱动时驱动器主体的机械结构有限元变形

Fig. 4 Finite element rotary distortion of actuator mechanical structure

表 1 驱动器驱动电压、输出量和实际量关系表

Tab. 1 Relation among actuation driving voltage, output value and practical value

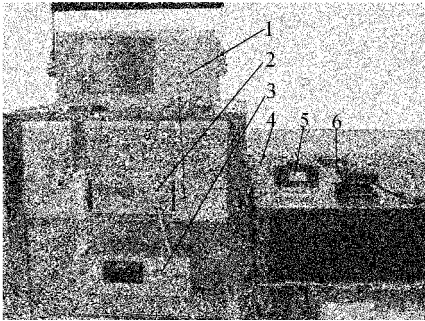
二维驱动器旋转驱动				
电压 V	激励位移 (10^{-6} m)	输出转角 (10^{-6} rad)	实际转角 (10^{-6} rad)	误差率 %
100	12.1	282	278	1.4
80	9.6	225	218	3.1
60	7.2	169	159	5.9
40	4.3	104	92	11.5
20	2.3	52	38	26.9
10	1	30	12	60
5	0.88	20	0.45	97.7
二维驱动器直线驱动				
电压 V	激励位移 (10^{-6} m)	输出位移 (10^{-6} rad)	实际位移 (10^{-6} rad)	误差率 %
100	12.1	11.8	11.6	1.7
80	9.6	9.3	9.0	3.2
60	7.2	6.8	6.2	5.9
40	4.3	4.0	3.6	
20	2.3	1.9	1.3	31.6
10	1	0.8	0.31	61.3
4.9	0.86	0.83	0.04	95.1

从表中可以看到,驱动电压大时,实际位移与经过仿真计算得出的输出位移的差不明显,随着驱动电压的减小,这种差距越来越大,说明摩擦等外界因素的影响在逐渐增大。

4 步进式精密二维驱动器的试验研究

图 5(a)所示为试验设备和驱动器处于测试

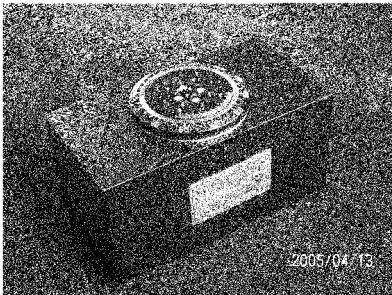
状态时的照片,图 5(b)为驱动器实物照片。将驱动器固定在气浮隔震台上,由专用的步进驱动器电源提供驱动器所需的时序控制电压信号,从而驱动动子。使用 KEYENCE LC-2400A 型激光测位仪对动子进行非接触测量,此激光测位仪的测量范围为 $\pm 500 \mu\text{m}$,分辨率为 20 nm 。同时,激光测位仪将测得的信号通过信号线传输给 CF5220 多功能傅里叶分析仪进行观察分析。



1. CF5220 多功能傅里叶分析仪 2. 专用电源 3. KEYENCE LC-2400A 型激光测位仪 4. 气浮隔震台 5. KEYENCE LC-2430 型激光测量头 6. 压电步进型二维驱动器样机

(a) 测试中的试验设备

(a) Testing apparatus on work



(b) 压电步进型二维驱动器实物照片

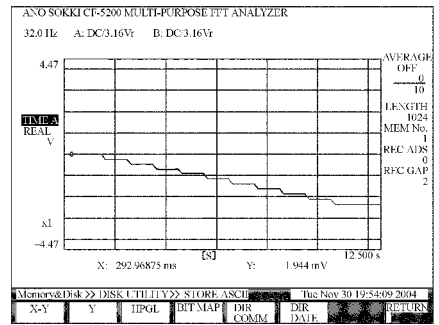
(b) Photograph of stepping sophisticate PZT actuator

图 5 试验设备

Fig. 5 Test apparatus

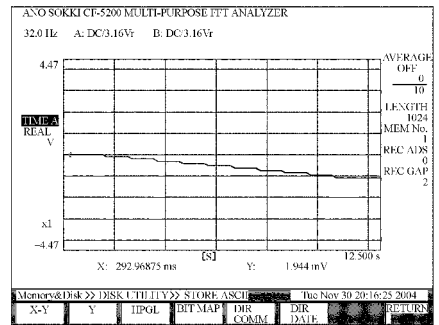
在 25°C 室温下,对压电步进型二维驱动器试验样机进行了大量的实验研究,实验数据如下。

图 6 是在 CF5220 多功能傅里叶分析仪上获得时间与位移的试验曲线,其中图 6(a)显示的是在驱动电压 100 V 以 10 个时序周期为一组的驱动器旋转驱动曲线,图 6(b)显示的是同样条件下的驱动器直线驱动曲线。从图中可以清晰地观察到 10 个阶梯状的动子前进波形。通过大量实验



(a) 100 V 驱动电压二维驱动器做旋转驱动时的位移-时间曲线

(a) Displacement-time curve when 2-DOF actuator is in rotary driving under 100 V voltage



(b) 100 V 驱动电压二维驱动器做直线驱动时位移-时间曲线

(b) Displacement-time curve when 2-DOF actuator is in linear driving under 100 V voltage

图 6 从傅里叶分析仪获得的压电驱动器位移-时间曲线

Fig. 6 Displacement-time curve of PZT actuator from FFT analyzer

证实,二维驱动器做旋转驱动时,在 5 V 的驱动电压下,分辨率达到 $0.45 \mu\text{rad}$,做直线驱动时,在 4.9 V 的驱动电压下,分辨率达到 40 nm 。

可以通过改变驱动电压和频率调整驱动器的驱动速度。在 100 V 的额定工作电压, 40 Hz 的频率下,驱动器的旋转驱动速度为 $0.04 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,直线驱动速度为 $19.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。若再增大驱动频率,驱动速度反而下降。这是由于驱动电源的控制时序在大于 40 Hz 的频率下不能有效工作造成的,有待于进一步改进。

利用砝码施加载荷测得驱动器的驱动扭矩可达到 $0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$,直线驱动力接近 10 N 。

驱动器动子的直线驱动行程为 20 mm ,旋转

驱动行程为 360° 。直线驱动时,在 20 mm 每隔 5 mm 取一测试点,测得的各种电压下的运动步长基本相同。且从一端开始在驱动电压 100 V、1500 个时序周期下向另一端运动,实测约 17.1 mm,折算到每一周期动子的位移为 11.4 μm 。同时,动子可在任意位置开始旋转,在旋转驱动电压 100 V、5000 个时序周期下从相差 120° 的 3 个起始点进行驱动,旋转角度约为 77° ,折算到每一周期转角约为 270 μrad ,与使用激光测位仪测得的数值基本相同。因此二维驱动器的旋转驱动和直线驱动都具有较好的大行程稳定性。

5 结 论

这种新型的压电步进式二维驱动器,由于采

用对称式整体结构,减小了结构应力的影响。采用双侧对称箝位、利用精调斜块对,实现了对压电叠堆的预紧力及箝位面与动子的配合间隙的精确调整,保证了机构运动的稳定性和准确性。并且采用整体加工的三层单体柔性结构,实现了使用同一动子进行直线和旋转的二维精密驱动。

经实验测试,驱动器进行旋转驱动时,分辨率可达到 0.45 μrad 、行程为 360° 、驱动扭矩可达到 0.2 $\text{N}\cdot\text{m}$ 、驱动速度可达到 0.04 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$;进行直线驱动时,分辨率可达 40 nm、行程为 20 mm、驱动力可达近 10 N、驱动速度达到 19.2 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 杨志刚,李军. 具有柔性铰链的差式微位移放大机构的受力分析[J]. 压电与声光, 2000,17(1):57-61.
YANG ZH G, LI J. Analytic solution of A differential action microscopic magnifying mechanism with flexure hinges [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2000,17(1):57-61. (in Chinese)
- [2] 王纪武,陈恩. 典型柔性铰链精度性能的研究[J]. 清华大学学报, 2001,41(11):49-52.
WANG J W, CHEN K. Precision of typical flexible hinges[J]. *J. of Tsinghua University (Sci&Tech)*, 2001, 41(11):49-52. (in Chinese)
- [3] 华顺明,曾平. 新型二维压电移动机构[J]. 吉林大学学报(工学版), 2004,34(4):587-591.
HUA SH M, ZHENG P. New planar locomotive device using bimorph[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2004,34(4):587-591. (in Chinese)
- [4] WUT, PAUL I R. Dynamic peak amplitude analysis and bonding layer effects of piezoelectric bimorph cantilevers [J]. *Smart Materials and Structure*, 2004,13(1):203-210.
- [5] LI Y, GUO M, ZHOU ZH Y, et al. Micro electro discharge machine with an inchworm type of micro feed mechanism[J]. *Precision Engineering*, 2002,26(1):7-14.
- [6] 于靖军,宗光华,毕树生. 全柔性结构与 MEMS[J]. 光学 精密工程, 2001,9(1):1-5.
YU J J, ZONG G H, BI SH SH. Fully compliant mechanisms and MEMS[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001,9(1):1-5. (in Chinese)
- [7] 刘国嵩,赵宏伟等. 新型压电步进型精密直线驱动器[J]. 光学 精密工程, 2005,13(3):291-297.
LIU G S, ZHAO H W. Novel sophisticate stepping linear piezoelectric actuator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005,13(3):291-297. (in Chinese)

作者简介:刘国嵩(1974—),男,吉林长春人,吉林大学博士研究生,主要研究方向为精密机械,压电驱动与控制技术,承担国家 863 计划子项目“步进式压电精密驱动器的研究”。E-mail: Mrliuguosong@163.com