

文章编号 1004-924X(2005)03-0291-07

新型压电步进型精密直线驱动器

刘国嵩,赵宏伟,曾平,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:以压电叠堆为驱动元件,设计了新型的步进型精密直线驱动器。驱动器由于设计了独特的双侧对称箝位结构,可以利用精调斜块准确调整箝位面与动子的配合间隙,同时采用整体加工的柔性结构,保证了工作的稳定性和准确性。应用有限元分析方法对步进型精密直线驱动器进行了力学分析,并进行了大量的试验研究。试验测试结果表明:驱动器的分辨率达到 40 nm、行程 18 mm、驱动速度达到 6 mm/min,可牵引 150 g 的载荷。

关键词:直线驱动器;压电叠堆;柔性铰链;精密驱动;有限元分析

中图分类号:TH703.6;TN384 **文献标识码:**A

Novel sophisticated stepping linear piezoelectric actuator

LIU Guo-song, ZHAO Hong-wei, ZENG Ping, CHENG Guang-ming, YANG Zhi-gang

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

Abstract: A novel sophisticated stepping linear piezoelectric actuator was designed based on piezoelectric stack as actuator element. Because of used unique double symmetric anchoring/loosing, tolerance clearance between anchoring/loosing and runner is modulated precisely by using oblique blocks, meanwhile, applying flexible structure of overall structure processing ensures stability and accuracy of actuator. Mechanical properties of the stepping linear sophisticated piezoelectric actuator are analysed with finite element method and a number of experiments were carried out. The results of test suggest actuator has a resolution of 40 nm, travel of 18 mm, velocity of 6 mm/min and loading capacity of 150 g.

Key words: linear actuator; piezoelectric stack; flexure hinge; sophisticated driving; finite element analysis

1 引言

随着生物工程、显微医学、微电子加

工、微机械加工装配、精密加工测量及航空和航天等诸多技术领域的发展^[1-2],微位移驱动器的研究受到广泛关注。目前许多微位移驱动器达到微米级,甚至纳米级,但是

其工作行程有限,限制了使用。因此,研制分辨率高、行程大的微位移驱动装置是目前微机械研究工作中的重要方向。

作为微位移驱动器的驱动元件有很多种类,如电磁式、热变形式、磁致变形式、记忆合金式及电致变形式^[3-4],其中压电陶瓷元件因具有体积小、输出力大、频响高及分辨率高的特点,是较理想的微位移驱动元件^[5-6]。

本文提出一种以压电陶瓷元件为驱动元件,具有分辨率高、行程大、速度快、承载力高的新结构步进型精密直线驱动器。设计了试验样机,并进行了试验研究。

2 压电叠堆性能分析

压电步进型精密直线驱动器采用日本 NEC 公司 AE0505D16 型压电叠堆作为驱动元件(参数见表 1)。为了更好地使用 AE0505D16 型压电叠堆,对其进行基本性能的分析。

表 1 日本 TOKIN 公司 AE0505D16 型压电叠堆主要参数^[1]
Tab. 1 Major parameters of AE0505D16 PZT stack made by Japanese TOKIN company

$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	5440	材料	PbZrO ₃ -PbTiO ₃
机电耦合系数	0.68	d_{33} (mV ⁻¹)	635×10^{-12}
Tc(°C)	145	d_{31} (mV ⁻¹)	-287×10^{-12}
单层厚度 μm	110	$S_{33}^E/\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$	18.1×10^{-12}
层数	130	$S_{11}^E/\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$	14.8×10^{-12}

对于单层的压电陶瓷片在室温 25℃ 下,其电致伸缩特性很微弱,相对于逆压电效应可忽略,故有

$$S \approx dE$$

$$d = \frac{S}{E} = \frac{\Delta l}{l} \times \frac{b}{U}$$

其中 S —应变;

Δl —压电陶瓷片在所用方向上施加电压后的变形量(m);

l —压电陶瓷片在所用方向上的长度(m);

b —压电陶瓷片的厚度(m);

U —外界施加的电压(V)

当 $l=b$ 时,有 $\Delta l = d \times U$

压电叠堆由压电陶瓷片多层叠加制成,在机械结构上串联,而电压并联。压电叠堆的变形量是单个压电陶瓷片的变形量的总和,即

$$\Delta L = n \times \Delta l = n \times d_{33} \times U$$

其中 ΔL —压电叠堆的变形量;

n —压电叠堆包含的压电陶瓷片的数量;

d_{33} —压电常数

根据上述公式和参考表 1 中参数值,可得到各种工作电压下的压电叠堆的理论上的相应伸长量(见表 2)。

表 2 压电叠堆电压与理论伸长量关系表

Tab. 2 Relationship between voltage and theoretic elongation of PZT stack

电压(V)	伸长量(10^{-6} m)	电压 V	伸长量(10^{-6} m)
100	8.26	50	4.13
90	7.43	40	3.30
80	6.60	30	2.48
70	5.78	20	1.65
60	4.95	10	0.83

对日本 NEC 公司 AE0505D16 型压电叠堆在各种工作电压下进行了实际的测量,具体数值见表 3。从表中会发现理论与实际测量值有一定偏差,这可能是压电材料的性能及封装工艺造成的,仅供参考。

表 3 压电叠堆电压与实际伸长量关系表

Tab. 3 Relationship between voltage and practical elongation of PZT stack

电压(V)	伸长量(10^{-6} m)	电压(V)	伸长量(10^{-6} m)
100	12	50	5.2
90	10.1	40	4.1
80	8.9	30	3.0
70	7.3	20	2.1
60	6.4	10	1.0

3 压电步进精密直线驱动器结构与工作原理

为了保证驱动器机械系统运动定位的高精度,尽量避免传动环节产生的误差,驱动器采用柔性结构。柔性结构主要依赖柔性铰链的弹性变形产生运动。由于用在机械传动环节的柔性铰链结构免装配、无间隙和无摩擦,因此可以实现微米甚至纳米级的运动定位精度^[7-8]。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。

图 1 所示为压电步进型精密直线驱动器的主体装配图,主要由主体、压电叠堆和精调斜块组装而成。主体是对称式整体结构,主体的前后活动部分通过柔性铰链(平板移动副)与主体的其他部分连接,在前后活动部分的相应结构位置分别装配斜块对和箝位压电叠堆,同时在 2 个活动体之间、动子(图中为透明效果,实际是实心刚体)的下方安装驱动的压电叠堆。由于采用了双侧对称箝位的结构,使得可以利用调整螺钉通过一对精调斜块来调整压电叠堆的预紧力以及箝位面与动子间的配合间隙。经过精细调整,使得前后活动部分分别箝位时动子的中心线重合,且与运动方向平行。同时,双侧对称箝位保证了箝位和松开箝位动作的可靠性和准确性^[9]。

由于箝位面与动子的配合间隙小于 0.003 mm,对主体和动子的加工提出很高要求。主体的工艺路线如下:锻制毛坯→铣、磨六面,加工穿丝孔→热处理→线切割→磨、研磨槽。动子的工艺路线如下:锻制毛坯→铣、磨六面→热处理→磨、研磨动子。之后,主体的槽和动子进行配研。

步进型驱动器的驱动过程如下,前进

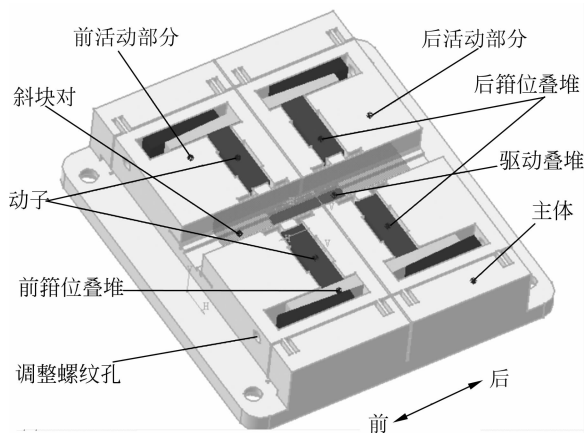


图 1 驱动器的主体装配图

Fig. 1 Assembly drawing of actuator's main structure

时,前后箝位→保持前箝位同时后松位→驱动叠堆伸长→保持前箝位同时后箝位→前松位同时保持后箝位→驱动叠堆缩短→前箝位同时保持后箝位。在驱动过程中,动子在驱动叠堆伸长环节和缩短环节分别前进了驱动叠堆伸长量的 1/2 的位移量。同理,向后运动时过程类似。

图 2 为平板移动副示意图。

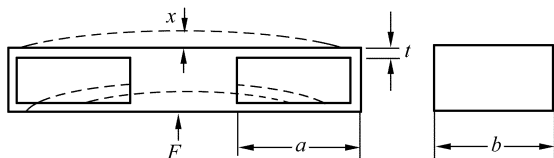


图 2 平板移动副示意图

Fig. 2 Scheme of parallel board P pair

由于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^[10]如下:

$$F = k_{p2}x$$

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 $E = 206$ GPa, 泊松比 $\mu = 0.3$, $b = 13$ mm, $t = 0.5$ mm, $a = 5$ mm, $k_{p2} \approx 9.7 \times 10^6$ N/m, $x \approx 3 \times 10^{-5}$ m, 因此 $F \approx 291$ N, 满足要求。

4 压电步进型精密直线驱动器有限元分析

为了了解压电步进型精密直线驱动器在驱动动子输出直线位移时主体的结构变形及影响,对驱动器的主体进行了力学有限元分析。因为主体是对称结构,只对一侧施加了 1/2 的激励位移。

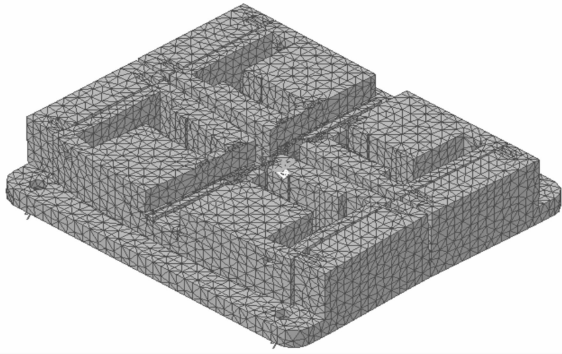


图 3 驱动器主体有限元模型

Fig. 3 Finite element mesh model of actuator's main structure

图 3 所示为驱动叠堆在驱动电压下,主体的受力变形情况。由于采用了双侧对称箝位的结构,所以因驱动叠堆伸长引起的箝位面在水平面中与运动方向垂直的方

表 4 激励位移、输出位移、实际位移关系表

Tab. 4 Relationship between actuation displacement, output displacement and practical displacement

电压 V	激励位移	输出位移	实际位移	误差率 %
100	6	5.6	5.58	0.4
90	5	4.7	4.6	2.1
80	3.9	3.6	3.5	2.7
70	3.3	3.15	3.05	3.2
60	3	2.85	2.7	5.3
50	2.75	2.59	2.4	7.3
40	2.2	2.07	1.84	11.1
30	1.65	1.55	1.2	22.6
20	1.1	1	0.69	31
10	0.65	0.63	0.24	62
5	0.44	0.41	0.02	95.1

注:表中位移的单位为 10^{-6} m

向上的变形量可忽略。将驱动叠堆伸长时箝位端面在动子运动方向的位移量作为动子输出的位移量。具体的激励位移、输出位移和实际位移数值见表 4。

从表中可以看到,激励位移大时,实际位移与经过仿真计算得出的输出位移的差距不明显,随着激励位移的减小,这种差距越来越大,说明摩擦的影响比重越来越大。

5 压电步进型精密直线驱动器的试验分析

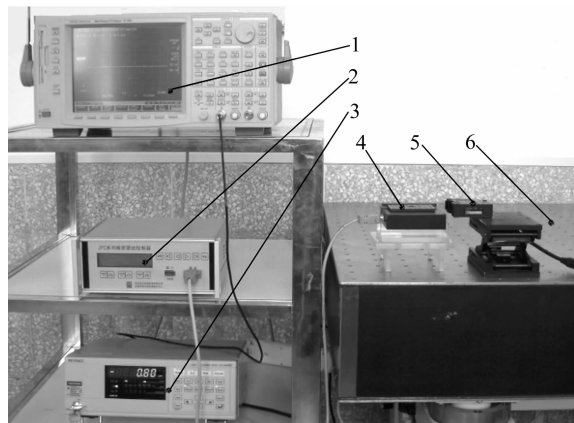
图 4 所示为试验设备照片,其中图 4(a)为驱动器处于测试状态,图 4(b)为驱动器样机。将驱动器固定在气浮隔震台上,由专用的步进驱动器电源提供驱动器所需的时序控制电压信号,从而使动子产生直线运动。此时,使用 KEYENCE LC-2400A 型激光测位仪对动子进行非接触式测量。KEYENCE LC-2400A 型激光测位仪的测量范围为 $\pm 500 \mu\text{m}$,分辨率为 20 nm。KEYENCE LC-2400A 型激光测位仪将测得的信号通过信号线传输给 CF5220 多功能傅里叶分析仪进行观察分析。CF5220 多功能傅里叶分析仪的数据和图片均可通过分析仪的磁盘存储器存储至 3 吋电脑软盘。

在 25℃ 室温下,对压电步进型精密直线驱动器试验样机进行了大量的实验研究,实验数据如下。

5.1 压电步进型精密直线驱动器分辨率试验

图 5 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。曲线显示的是驱动电压 100 V 以 10 个时序周期为一组的动子直线位移。从图中可以清晰的观察到 20 个阶梯状的动子前进波形,从而证明了前文的在每个时序周期内动子在驱动叠堆伸长环节和缩短环节分别前进了

驱动叠堆伸长量的 1/2 的位移量的表述是正确的。图 6 显示驱动电压 5 V、以 20 个时序周期为一组的动子直线位移,从中可以观察到箝位的周期性影响,影响是相对固定的。5 V 的驱动电压、20 个时序周期时,驱动器的输出位移稳定地小于 0.8 μm ,此时的分辨率达到 40 nm。



- 注:(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)压电步进型精密直线驱动器样机
 (5)KEYENCE LC-2430 型激光测量头
 (6)气浮隔震台

(a)测试中的试验设备

(a) Testing apparatus on work



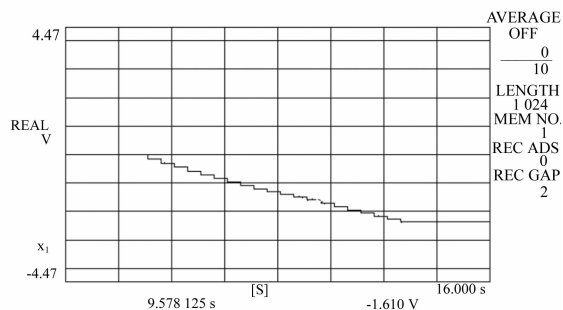
(b)压电步进型精密直线驱动器样机近照

(b) Photograph of stepping sophisticated linear PZT actuator

图 4 试验设备

Fig. 4 Test apparatus

ANO SOKKI CF-5200 MULTI-PURPOSE FFT ANALYZER
 25.0 Hz A:DC/3.16Vr B:DC/10.0Vr

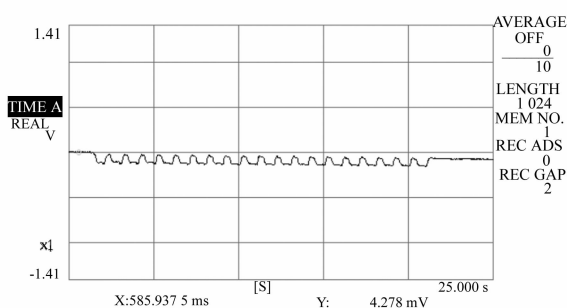


Memory&Disk->DISK UTILITY->STORE ASCII						Fri Dec 10 19:26:13 2004	
X-Y	Y	HPGL	BIT MAP	DIR COMM	DIR DATE	RETURN	

图 5 100 V 驱动电压下位移-时间曲线

Fig. 5 Displacement-time curve under 100 V voltage

ANO SOKKI CF-5200 MULTI-PURPOSE FFT ANALYZER
 16.0 Hz A:DC/1.00Vr B:DC/3.16Vr



Memory&Disk->DISK UTILITY->STORE ASCII						Sun Jan 23 12:25:14 2005	
X-Y	Y	HPGL	BIT MAP	DIR COMM	DIR DATE	RETURN	

图 6 5 V 驱动电压下位移波形-时间曲线

Fig. 6 Displacement-time curve under 5 V voltage

5.2 压电步进型精密直线驱动器的速度试验

驱动器的速度可调,要使动子快速移动时,可通过提高时序控制电压信号的频率达到目的。由于 AE0505D16 型号的压电叠堆建议使用电压为 100 V,故快速移动时驱动器的工作电压一般设定在 100 V。当电压 100 V,频率 1 Hz 时,10 个时序周期动子移动约 120 μm ,相应的 5 Hz 时约 110 μm ,10 Hz 时约 100 μm 。因此,在时

序控制电压的频率为 10 Hz 状态下,驱动器的速度达到 6 mm/min。

5.3 压电步进型精密直线驱动器的工作行程

驱动器动子的运动范围为 18 mm,因其是无绕线结构的实心体,故可在该范围内任意位置开始运动。在 18 mm 每隔 3 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 17.6 mm,折算到每一周期动子的位移为 $11.7 \mu\text{m}$,与使用激光测位仪测得的数值基本相同。因此驱动器具有较好的大行程稳定性。

5.4 压电步进型精密直线驱动器的载荷试验

用一根细铜丝绕过滑轮牵引 150 g 砝码,测量此时动子在各个电压下的运动情况。图 7 所示为驱动器分别处于空载与负载 150 g 砝码状态下,在各种电压下输出位移的趋势图。证明驱动器在空载和负载情况下,工作状态稳定、线性较好。

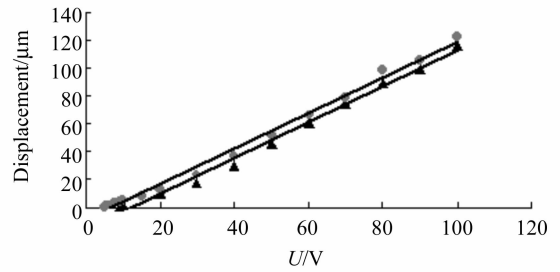


图 7 空载与负载 150 g 时驱动电压-位移对比曲线

Fig. 7 Comparison curve of voltage-displacement between no-load and 150 g-load

6 结 论

这种新型的步进型精密直线驱动器,由于采用双侧对称箝位、精调斜块,实现了对压电叠堆的预紧力及箝位面与动子的配合间隙、运动时的位置关系精确调整,并且采用整体加工的以柔性铰链(平板移动副)为基础的对称结构,保证了机构运动的稳定性和准确性。通过大量相应试验测试,驱动器分辨率达到 40 nm、行程为 18 mm、驱动速度达到 6 mm/min,牵引载荷可达 150 g。

参考文献:

- [1] NEC/TOKIN. *Multilayer piezoelectric actuators*[M]. NEC TOKIN Corporation, Japan, 2004.
- [2] 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 Acousto-optics*, 2000, 17(1): 57-61. (in Chinese).
- [3] SHAMOTO E, MORIWAKI T. Development of a walking drive ultraprecision positioner[J]. *Precision Engineer*, 1997, 20(2): 85-92.
- [4] 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.
- [5] ZHU Z, ZHANG B A. Linear piezomotor integrated by a monolithic flexural frame[J]. *Trans ASME J Mech Des.*, 1997; 119: 14-7.
- [6] 王建林,胡小唐. 纳米定位技术研究现状[J]. *机械设计与研究*, 2000, (1): 43-44.
WANG J L, HU X T. Development of the nano-position technology [J]. *Machine Design and*

Research, 2000,(1):43-44. (in Chinese).

- [7] 孙力宁,荣伟彬. 基于微操作的大行程高分辨率旋转微驱动器的研究[J]. *光学精密工程*, 2001,9(6):514-518.
SUN L N, RONG W B. Research on a large travel and high resolution rotary micro driver based on micro manipulation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001,9(6):514-518(in Chinese).
- [8] 刘品宽,孙立宁. 新型二维纳米级微动工作台的动力学分析[J]. *光学精密工程*, 2002,10(2):143-147.
LIU P K, SUN L N. Dynamic analysis on a novel nanopositioning stage driven by PZT[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(2):143-147(in Chinese).
- [9] TENZER P E, MRAD R B. On amplification in inchworm precision positioners[J]. *Mechatronics*, 2004,14:515-531
- [10] 王纪武,陈恳. 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 Tsinghua Univ(Sci&Tech)*, 2001,41(11):49-52(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和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