

文章编号 1004-924X(2007)06-0873-05

# 尺蠖型压电直线驱动器的动态特性

赵宏伟, 吴博达, 华顺明, 杨志刚, 程光明, 曲兴田  
(吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

**摘要:**分析了尺蠖型压电直线驱动器的结构原理,建立了驱动器系统动力学模型。对驱动器定子进行了模态分析,并对分析结果进行了评价。对设计开发的驱动器样机输出特性进行了试验测试,实验测得驱动器单步输出位移稳定可靠,100 V驱动电压下,单步输出位移为 $9.8 \mu\text{m}$ 。对驱动器直线动子的速度、加速度特性进行了测试,依据速度、加速度信号进一步分析了驱动器的动态响应特性。实验结果表明,所开发的驱动器具有动态特性好、运动稳定等优点。

**关键词:**压电驱动器;尺蠖运动;精密定位;直线运动;动态特性

**中图分类号:** TM359.4; TN384 **文献标识码:** A

## Dynamic performance of inchworm-type piezoelectric linear actuator

ZHAO Hong-wei, WU Bo-da, HUA Shun-ming, YANG Zhi-gang, CHENG Guang-ming, QU Xing-tian

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

**Abstract:** The structure and working principle of a inchworm-type piezoelectric linear actuator are analyzed, and the mechanical system dynamic modal of the actuator is established. Based on the analysis of the actuator's stator, the output performance of proposed actuator is analyzed, experimental results show that the output displacement of the actuator is stable, and the displacement for single step is  $9.8 \mu\text{m}$  when the actuating voltage is 100 V. The velocity and acceleration properties of the linear actuator are tested. According to the testing results, the dynamic response performance of the actuator is analyzed deeply. The experimental results show that the proposed piezoelectric linear actuator has good dynamic performance and motion stability.

**Key words:** piezoelectric actuator; inchworm motion; precision position; linear motion; dynamic performance

## 1 引言

随着超精密加工、精密光学、生物医学工程等领域的迅速发展,对结构微小、定位精度高的新式驱动器的需求越来越迫切,以压电材料、静电材

料、形状记忆合金等为动力转换元件的新式驱动器应运而生<sup>[1-2]</sup>。

压电元件具有稳定性好、响应迅速、定位精确、机械能—电能转化率高、驱动力大等优点,非常适于作为精密驱动器的动力转换元件。尺蠖型压电驱动器具有大行程、高运动分辨率的特点,可

收稿日期:2006-11-22;修订日期:2007-01-07.

基金项目:国家“863”计划资助项目(No. 2002AA423150);国家自然科学基金资助项目(No. 50475010);高等学校博士点专项科研基金资助项目(No. 20050183020)

提供较大的驱动力<sup>[3-6]</sup>,因而在纳米级微细操作和超精密测试仪器上有广泛的应用前景<sup>[7-11]</sup>。但是,目前尚缺乏对尺蠖型压电直线驱动器动态特性的系统研究。

本文对设计开发的尺蠖型压电直线驱动器的结构原理进行了分析,建立了描述驱动器特性的系统动力学模型,结合理论分析和试验研究较为深入地分析了驱动器动态特性。

## 2 驱动器工作原理

本文开发的尺蠖型压电直线驱动器工作原理如图 1 所示。

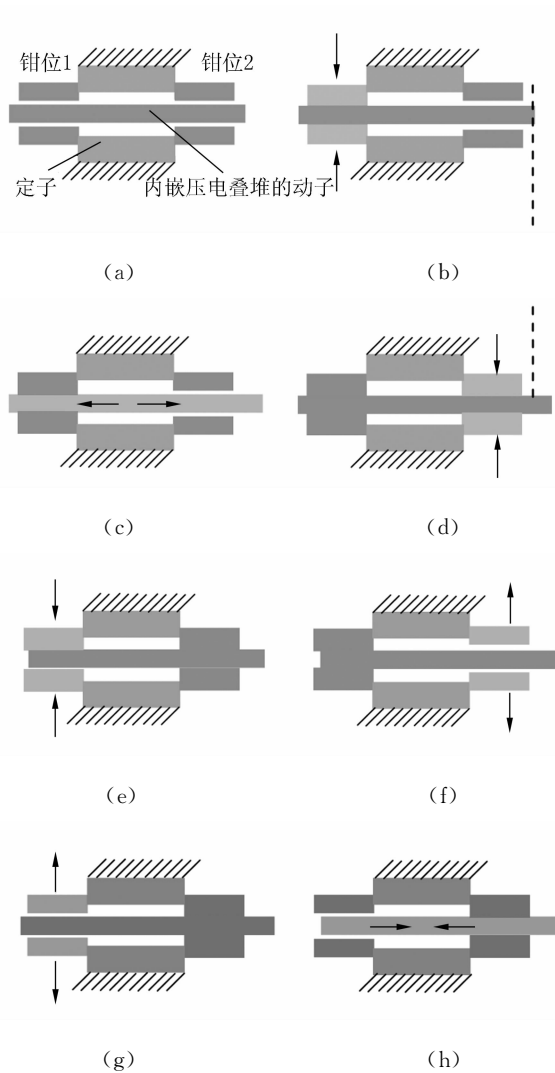


图 1 尺蠖型压电直线驱动器工作原理

Fig. 1 Principle of inchworm-type piezoelectric linear actuator

驱动器的驱动单元和钳位单元彼此分离,其中钳位单元设计在定子上,而驱动单元设计在直线动子上,因此,在定子和动子内部均有柔性铰链机构和电器元件。钳位单元和驱动单元彼此分离,可以有效避免两者交互作用时附加变形的影响,提高驱动器的稳定性。结合图 1,驱动器的工作过程可以描述如下:

(A)驱动器各组钳位机构及动子驱动机构均处于自由状态,即此时钳位压电叠堆和驱动压电叠堆均断电;(B)1组(左侧)钳位机构进行钳位;(C)随后动子上的驱动压电叠堆带电伸长,推动动子向右产生伸长运动;(D)随后2组(右侧)钳位机构钳紧直线动子;(E)2组(右侧)钳位机构对动子钳位牢靠后,1组钳位机构松开;(F)然后驱动压电叠堆断电回缩,直线动子在柔性机构回弹力作用下回缩;(G)1组(左侧)钳位机构进行钳位;(H)1组(右侧)钳位机构对动子钳位牢靠后,2组钳位机构松开,至此动子完成向右侧的单步精密运动。在连续时序信号作用下,驱动器将重复 B→H 过程,直线动子会输出连续位移。

## 3 驱动器系统动力学模型

为了进一步分析驱动器的力学特性,将驱动器系统简化为图 2 所示的力学模型。

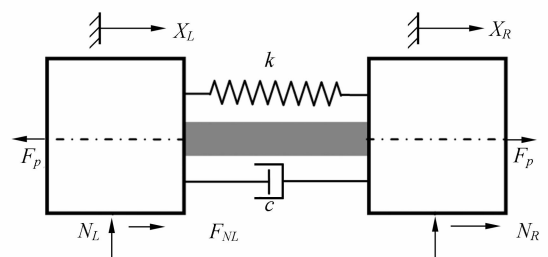


图 2 驱动器机械系统动力学模型

Fig. 2 Dynamic modal of mechanical system for actuator

驱动器动子简化为两个质量块,分别为两个被钳位部分的集中质量,由装配在定子上的钳位压电叠堆产生作用于钳位机构进而钳紧动子的正压力。中间部分由柔性铰链连接,柔性铰链等效刚度系数和等效阻尼系数分别为  $k$ 、 $c$ ,驱动压电叠堆通过适当的预紧力装配在两质量块之间,在钳位机构的作用下,通过其伸长运动使动子产生位移。根据库仑摩擦定律,钳位机构和动子间的

摩擦可以表示为

$$F_N = \begin{cases} \mu N & \dot{x} \neq 0 \\ \mu_0 N & \dot{x} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $F_N$  为钳位机构施加给直线动子的摩擦力; $N$  为钳位机构施加给直线动子的正压力; $\mu$  为钳位面与直线动子间滑动摩擦系数; $\mu_0$  为钳位面与直线动子间静摩擦系数。

设  $F_L$  和  $F_R$  分别为作用在两个集中质量块上的合外力,可表示为如下形式

$$F_L(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, U) = -F_P(U) + k(x_R - x_L) + c(\dot{x}_R - \dot{x}_L) + F_{NL}, \quad (2)$$

$$F_R(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, U) = -F_P(U) + k(x_L - x_R) + c(\dot{x}_L - \dot{x}_R) + F_{NR}, \quad (3)$$

这里  $\mathbf{X}$  代表位移矢量

$$\mathbf{X} = \{x_L \quad x_R\}^T$$

$F_P(U)$  为在驱动电压值为  $U$  的情况下,驱动压电叠堆产生的驱动力。

在压电叠堆同时受到电场和外力作用下,其内部等效应力可以表示为

$$\sigma = E(\epsilon - d_{33}E_U), \quad (4)$$

式中: $\sigma$  为压电元件内部应变; $E$  为压电元件弹性模量; $\epsilon$  为压电元件内部的应变; $d_{33}$  为压电常数; $E_U$  为施加在压电元件上的电场强度。

作用在压电叠堆上的力可以表示为

$$F_P(U) = EA \left( \frac{\Delta l}{L} + d_{33} \frac{U}{(L/n)} \right), \quad (5)$$

式中: $A$  为压电叠堆内部各层压电片有效截面积; $L$  为压电叠堆有效长度; $N$  为构成压电叠堆的压电片层数; $\Delta l$  为压电叠堆的伸长量; $U$  为施加在压电叠堆上的电压。

据此,压电叠堆输出力可以写成

$$F = Ud - k_p \Delta l, \quad (6)$$

式中: $F = -F_P(U)$ , 其中  $k_p = EA/L$ ,  $d = nk_p d_{33}$ 。

假设直线动子为理想的刚体,且钳位面与直线动子间无间隙,则钳位机构与动子间的摩擦力可以表示为

$$F_N = 2\mu Ud, \quad (7)$$

根据上述分析,图 2 所示的系统动力学方程可以写成

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F}_N + \mathbf{F}_P, \quad (8)$$

其中:等式右侧为摩擦力和驱动压电叠堆推力的合力;

$$\mathbf{M} = \begin{Bmatrix} m_L \\ m_R \end{Bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{Bmatrix} c_L \\ c_R \end{Bmatrix};$$

$$\mathbf{K} = \begin{Bmatrix} k_L & \\ & k_R \end{Bmatrix}; \mathbf{F}_N = \{F_{NL} \quad F_{NR}\}^T;$$

$$\mathbf{F}_P = \{-F_P \quad F_P\}^T =$$

$$\{-k(x_L - x_R) - Ud \quad k(x_L - x_R) + Ud\}^T.$$

等式(8)中的摩擦力取决于式(1)描述的摩擦模型。在驱动器动力学特性分析中包括了钳位过程和驱动过程。

### 4 驱动器定子的模态分析

根据模态分析的理论可知,对结构的模态分析可以评价结构的动态特性是否符合要求,并校验理论分析结果的正确性。就本文设计开发的尺蠖型压电直线驱动器,模态分析方法可以近似得到驱动器定子机械单元工作中可能发生的行为。图 3 为通过有限元仿真方法得到的驱动器定子主体结构前十阶振动模态和对应的自然频率。

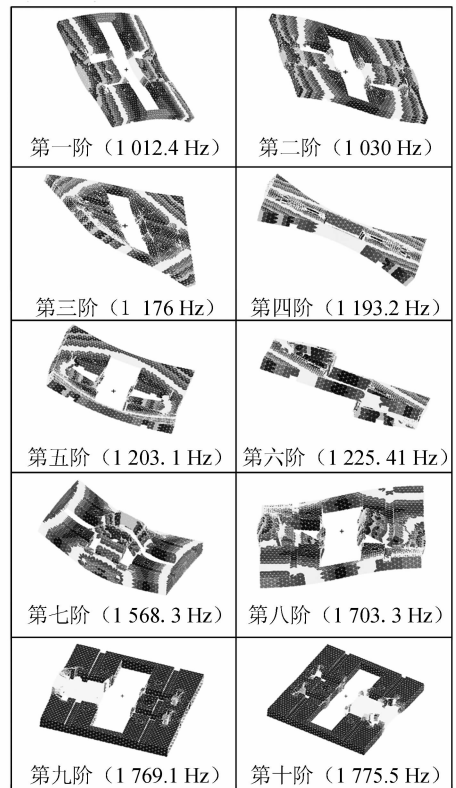


图 3 定子主体机械结构前十阶模态振型

Fig. 3 The first ten modes of stator

由于驱动器定子主体机构尺寸相对较薄,使其各阶振型自然频率分布较为密集。其中,前八阶模态振型均为定子主体结构的扭转、弯曲或倾

覆运动。而第九阶、第十阶振型为希望得到的钳位机构动作,当定子在钳位压电叠堆强迫激励作用下,将以这种运动形式为主导,但其它各阶振型的运动可能对驱动器性能造成影响,主要表现在当钳位压电叠堆作用时,可能发生相应模态振型方向的附加变形,这种影响可以通过增加定子主体机械单元的厚度加以改善。此外,经模态分析得到定子各阶模态振型的自然频率均高于 1 000 Hz,在较低频率区段,钳位机构在压电叠堆推力作用下进行强迫振动,相当于静力响应,驱动器应处于稳定工作状态。

## 5 驱动器的输出特性

驱动器单步输出位移(步距)是指动子在一个时序驱动信号周期内输出的位移量。稳定工作状态下,驱动器能够输出的最小步距,即为运动分辨率。在连续驱动信号作用下,直线动子会不断输出位移,单步位移不断积累,最终构成总的位移输出,因此驱动器单步输出特性的好坏将直接影响驱动器总的运动输出及运动稳定性。图 4 为 100 V 驱动电压下,实验测得的直线动子连续运动 10 步的输出位移曲线。(实验条件:钳位电压 100 V;驱动电压为 100 V 驱动器运动步数 10 步;环境温度 25 ℃;驱动信号频率 1 Hz;无负载)参照图 4 可见,直线动子各位移曲线步距明显,单步输出位移较为稳定,输出总位移与运动步数整体上表现出很好的线性关系。在驱动信号频率为 1 Hz、驱动电压值 100 V 情况下,直线动子连续运动 10 步,输出总位移为 98.0  $\mu\text{m}$ ,折算成单步输出位移为 9.8  $\mu\text{m}$ ,此时动子运动速度为 9.8  $\mu\text{m}/\text{s}$ 。

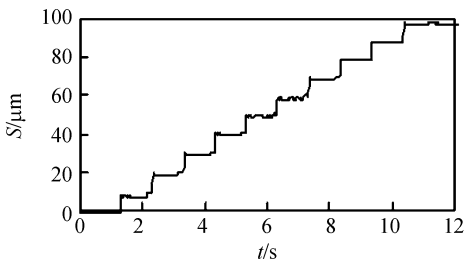


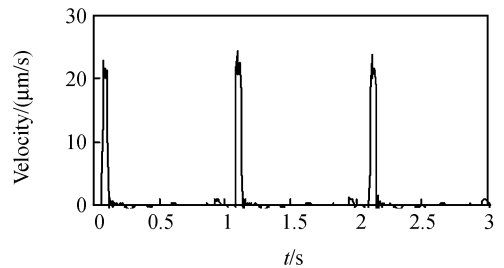
图 4 驱动器在 100 V 驱动电压下的输出位移

Fig. 4 Output displacement of actuator at voltage of 100 V

利用尺蠖型压电驱动器的速度、加速度响应曲线可以进一步分析驱动器的稳定性和响应特

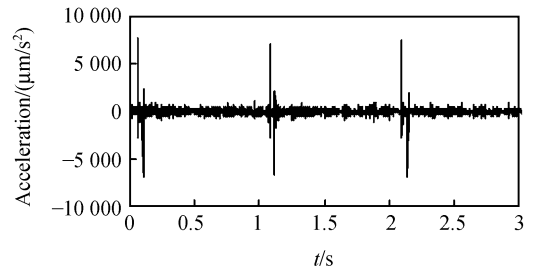
性。图 5 是在钳位电压和驱动电压均为 100 V、驱动信号频率为 1 Hz 下,实验测得的直线动子沿运动方向的速度、加速度曲线(曲线幅值为电压当量)(实验条件:钳位电压 100 V;驱动电压 100 V;环境温度 25 ℃;驱动信号频率 1 Hz;无负载),从速度和加速度曲线可以更进一步分析驱动器的动态特性。

分析图 5(a)直线动子的速度曲线可以发现,直线动子实际运动中,各步间速度幅值存在一定的差异,由于此时驱动信号频率确定,根据位移=速度 $\times$ 时间,可知这将直接导致直线动子输出步



(a)速度曲线

(a) Velocity curve



(b)加速度曲线

(b) Acceleration curve

图 5 驱动器速度、加速度变化趋势

Fig. 5 Trends of velocity and acceleration of actuator

距的波动,进而影响驱动运行的步距稳定性。此外,从动子第一步运动速度的放大图还可发现,当直线动子运动速度增大到最大值时,存在一个明显的振荡,这主要是由压电叠堆在驱动信号作用下振动冲击造成的。分析图 5(b)中驱动器直线动子的加速度特性发现:在每个运动周期内,相对于直线动子的运动方向而言,都存在一个加速过程和一个减速过程,且加速度曲线始终存在一定的波动,这种现象导致了速度曲线不同程度的振荡。综上所述,造成驱动器系统直线动子速度和加速差异的主要原因在于摩擦的随机性、接触问

题、外界振动干扰、驱动信号的电噪声以及压电叠堆自身的动态特性等。实际应用中,应合理设计驱动器的机械结构,提高其动态性能,优选动态特性好的压电叠堆作为驱动器的动力转换元件,并适当采用隔振手段,克服上述不足,尽可能的提高驱动器的运动稳定性。

## 6 结 论

分析了混合驱动式尺蠖型压电直线驱动器的

工作原理,建立了直线驱动器的系统力学模型,对驱动器定子进行了模态分析。测试了驱动器的输出特性,试验结果表明驱动器具有输出稳定的特点。驱动电压值 100 V 情况下,驱动器输出位移为  $9.8 \mu\text{m}$ ,此时动子运动速度为  $9.8 \mu\text{m/s}$ 。对驱动器动子的速度和加速度特性进行了分析研究,这对深入分析驱动器输出性能,保证驱动器的运动稳定性具有一定的意义。实验测试的结果表明,所开发的驱动器具有动态特性好、运动稳定等优点。

## 参考文献:

- [1] UCHINO K, GINIEWICZ J. *Micromechatronics*(1<sup>th</sup> Edition)[M]. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [2] GILBERTSON R G, BUSCH J D. A survey of micro-actuator technologies for future spacecraft missions[J]. *The Journal of The British Interplanetary Society*, 1996, 49: 129-138.
- [3] 杨宜民, 李传芳, 程良伦. 仿生型步进式直线驱动器的研究[J]. 机器人, 1994, 16(1): 37-39.  
YANG Y M, LI CH F, CHENG L L. Study on bionic-type stepping linear actuator[J]. *ROBOTICS*, 1994, 16(1): 37-39. (in Chinese)
- [4] 赵宏伟, 刘建芳, 华顺明, 等. 压电型步进精密旋转驱动器[J]. 光学精密工程, 2005, 13(3): 305-310.  
ZHAO H W, LIU J F, HUA SH M, *et al.*. Piezoelectric-type stepping precision rotary actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 305-310. (in Chinese)
- [5] 刘国嵩, 赵宏伟, 曾平, 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, ZENG P, *et al.*. Novel sophisticated stepping linear piezoelectric actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 291-297. (in Chinese)
- [6] 赵宏伟, 吴博达, 程光明, 等. 基于压电驱动的精密步进旋转电机[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 166-171.  
ZHAO H W, WU B D, CHENG G M, *et al.*. Precise stepping rotary motor based on piezoelectric actuation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(10): 166-171. (in Chinese)
- [7] CHOI Y H, LOVE C C, CHUNG Y G, *et al.*. Production of nuclear transfer horse embryos by piezo-driven injection of somatic cell nuclei and activation with stallion sperm cytosolic extract[J]. *Biology of Reproduction*, 2002, 67: 561-567.
- [8] GIESSIBL F J. Advances in atomic force microscopy[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2003, 75: 949-983.
- [9] OKAZAKI Y, MISHIMA N, ASHIDA K. Microfactory-concept, history, and developments[J]. *Transactions of the ASME: Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126: 837-844.
- [10] MOTOKI T, GAO W, KIYONO S, *et al.*. A nanoindentation instrument for mechanical property measurement of 3D micro/nano-structured surfaces[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17: 495-499.
- [11] 杨树臣, 刘建芳, 杨志刚, 等. 外驱动双向推力型压电步进精密驱动器研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 652-657.  
YANG SH CH, LIU J F, YANG ZH G, *et al.*. Study on outer driving precision PZT linear step actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 652-657. (in Chinese)

**作者简介:**赵宏伟(1976—),男,吉林大学机械科学与工程学院讲师,工学博士,主要从事压电驱动控制技术、纳米机械学、微纳米加工与检测、机械系统动力学及加工精度等研究,在国内外核心期刊、学术会议发表论文 40 多篇,其中已被 SCI、EI、ISTP 收录 17 篇。E-mail: zhaohongwei\_jlu@yahoo.com

**通讯作者:**曲兴田(1963—),男,吉林大学机构科学与工程学院副教授,工学硕士,主要从事机构系统动力学和压电驱动技术研究。E-mail: riqxt@sina.com