

一种矩形振子新型压电直线电机

刘仁鑫¹, 张铁民², 秦勇²

(1. 江西农业大学工学院, 江西省 南昌市 330045; 2. 华南农业大学工程学院, 广东省 广州市 510642)

A New Type of Linear Piezoelectric Motor Based on Rectangular Actuator

LIU Ren-xin¹, ZHANG Tie-min², QIN Yong²

(1. College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi Province, China;
2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: A self-moving linear piezoelectric motor based on two different in-plane bending modes of rectangular actuator has been developed. Firstly, the excitation of working vibration modes and motion mechanism of this kind of motor have been analyzed and discussed. Then, in-plane vibration frequencies of actuator are calculated, new motor and its actuator has been designed, and a motor sample for the new type of linear ultrasonic motor is fabricated, and its performance is evaluated experimentally. The experimental results show that new motor offers identical performance in both directions, the maximum velocity is 458.3 mm/s and the maximum drive force is 2.2 N while excitation frequency is 65.2 kHz and voltage is 380 V.

KEY WORDS: rectangular actuator; piezoelectric; linear motor

摘要: 分析了振子面内弯曲模态的激发原理及电机的驱动机理。通过Ansys分析计算, 得到了压电振子面内两种弯曲模态的频率, 并对压电振子及电机结构进行了设计。研制了一种基于矩形复合层板面内弯曲模态压电直线电机, 并进行了相应的实验研究。研究表明: 当激励信号电压为380V, 频率为65.2kHz时, 电机最大运行速度约为458.3mm/s, 驱动力为2.2N, 且正反向运行良好。

关键词: 矩形振子; 压电; 直线电机

0 引言

压电直线电机是超声电机发展过程中的一个重要分支, 也是近几年来发展较快的一类超声电机。它在直线运动方面, 有着许多优于旋转电机的特点, 特别在微小型、精密定位、小功率驱动等方

面的应用具有明显的优越性。它已成功应用于高精度仪器设备、数据处理装置(如X-Y记录仪)、汽车、国防等领域。近年来, 压电直线电机的研究较多^[1-11], 其中板的面内模态压电直线电机, 由于结构简单、设计灵活、应用方便而倍受关注^[12-16]。

Takano T.研究了1种圆盘面内模态的压电直线电机^[12], 通过激励出圆形盘定子径向和非轴对称的纵横两个方向的振动, 叠加后使与移动体相接触的部位产生椭圆运动, 利用该椭圆运动的切向分力推动移动体移动。其最大效率和无负荷速度约为48%和0.37m/s, 输入功率为3W。20世纪70年代, 苏联科学家发明了1种压电矩形板面内模态压电直线电机^[13]; 日本的Masao Hashimoto研究了1种矩形板面内模态的小型(10mm×20mm)压电直线电机^[14]; 2001年刘剑、赵淳生研究了1种类似的压电直线电机^[15], 其直线运行速度 $V \geq 50$ mm/s, 输出推力约为5N。它们都是利用面内1阶伸缩和面内2阶弯曲模态的复合产生驱动力。

上述压电直线电机中, 都利用了面内伸缩和弯曲振动模式的合成。本文则利用矩形复合层板面内两种弯曲模态, 研究了1种压电直线电机。主要对压电振子的结构进行了设计, 分析了电机的驱动机理, 设计制作了原理样机, 并对其进行了实验研究。

1 电机驱动机理

新型压电直线电机基本结构如图1所示。矩形压电复合振子在弹簧预紧力的作用下, 夹紧于两导轨之间。其基本原理: 利用矩形压电复合层板作驱动振子, 压电陶瓷沿厚度方向极化, 且划分为2个同样的分区, 其背面与弹性体粘结在一起构成全电极的负极。在压电振子的两个分区分别接相位差为

基金项目: 国家自然科学基金项目(60273065)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60273065).

90°的高频激励信号，由于压电陶瓷的逆压电效应，在矩形压电复合层板面内产生 2 种不同的弯曲振动模态(如图 2(a), 2(b))，2 种模态的简并，使其在与导轨的接触质点形成椭圆运动(如图 2(c))，在预紧力作用下，产生摩擦力驱动振子做直线运动，完成能量转换，将电能转换成机械能驱动压电振子作直线运动。

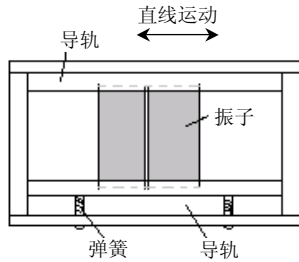


图 1 面内弯曲模态直线超声电机
Fig. 1 Scheme of linear piezoelectric motor

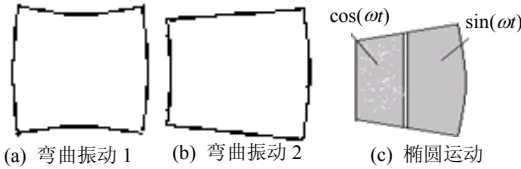


图 2 两弯曲模态及其合成
Fig. 2 Two bending modes and its synthesis

振子的动作原理如图 3 所示。振子在激励电场作用下，产生面内的弯曲和弯曲复合的振动，一个周期的振动过程为：(a)→(b)→(c)→(d)。其中单个弯曲模态在一个周期 T 内的变化过程如图 4 和图 5 所示。

在合成模态中，由于压电振子与导轨相接触的两边是互相对称的，则其振动规律也是对称的。根据图 4、图 5，当两激励相位差为 $\pi/2$ 时，两模态的合成及振子的运动分析如下：

(1) 当 $t=0\sim T/4$ 时，电压信号 $\sin(\omega t)$ 和 $\cos(\omega t)$ 同为正，2 个分区在垂直导轨的方向上做收缩运动，振子表现为图 2(a)所示的模式。

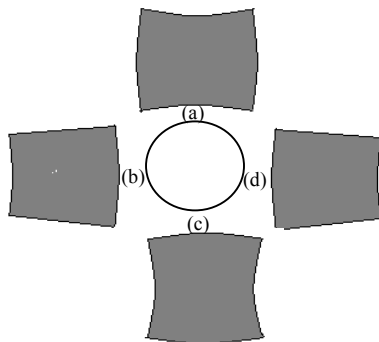


图 3 振子运动规律
Fig. 3 Regular motion of vibrator

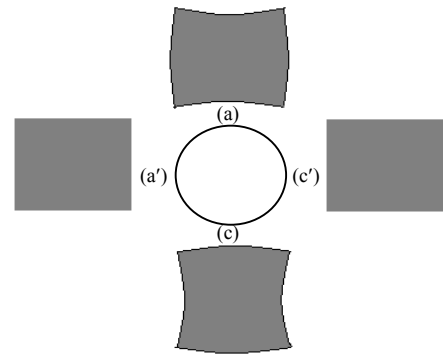


图 4 模态 1 的周期变化过程
Fig. 4 Periodic variation of mode 1

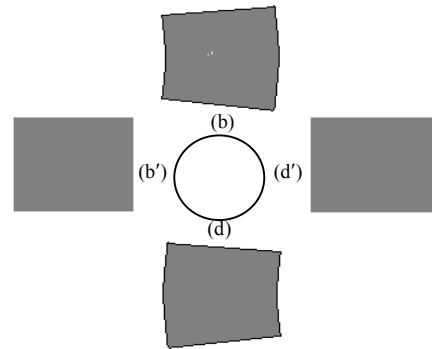


图 5 模态 2 的周期变化过程
Fig. 5 Periodic variation of mode 2

(2) 当 $t=T/4\sim T/2$ 时，电压信号 $\sin(\omega t)$ 和 $\cos(\omega t)$ 异号，左分区继续在垂直导轨方向上收缩运动，右分区在垂直导轨方向上作扩张运动，定子表现为图 2(b)所示的振动模式。

(3) 当 $t=T/2\sim 3T/4$ 时，电压信号 $\sin(\omega t)$ 和 $\cos(\omega t)$ 同为负，2 分区在垂直导轨的方向上作扩张运动，振子表现为图 2(a)所示的模式。

(4) 当 $t=3T/4\sim T$ 时，电压信号 $\sin(\omega t)$ 和 $\cos(\omega t)$ 异号，左分区在平面内作扩张运动，右分区在平面内作收缩运动，定子表现为图 2(b)所示的振动模式。

综上所述，两个振动模态在时间上和空间上各差 $\pi/2$ ，从而形成振子与导轨接触质点的椭圆运动轨迹。

设压电振子与导轨接触质点的振动为简谐振动，且 2 分区分别在交变电场 $E_A=E_0e^{j\omega t}$, $E_B=E_0e^{j(\omega t+\phi)}$ 的作用下，则压电振子与导轨接触质点在两交变电场作用下的位移分别为

$$\begin{cases} u_{xA} = u_0 \cos(kx) \cos(\omega t) \\ u_{yA} = v_0 \sin(ky) \sin(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{xB} = u_0 \cos(kx) \cos(\omega t + \phi) \\ u_{yB} = v_0 \sin(ky) \sin(\omega t + \phi) \end{cases} \quad (2)$$

则压电振子质点沿 x, y 方向的合成位移分别为

$$u_x = u_0 \cos(kx) \cos(\omega t) + u_0 \cos(kx) \cos(\omega t + \phi) = 2u_0 \cos(kx) \cos \frac{\phi}{2} \cos(\omega t + \frac{\phi}{2}) \quad (3)$$

$$u_y = v_0 \sin(ky) \sin(\omega t) + v_0 \sin(ky) \sin(\omega t + \phi) = 2v_0 \sin(ky) \cos \frac{\phi}{2} \sin(\omega t + \frac{\phi}{2}) \quad (4)$$

则由式(3)、(4)消去时间 t 得:

$$\left[\frac{u_x}{2u_0 \cos(kx) \cos(\phi/2)} \right]^2 + \left[\frac{u_y}{2v_0 \sin(ky) \cos(\phi/2)} \right]^2 = 1 \quad (5)$$

显然,其运动轨迹为一椭圆。当两激励信号的相位差从 $90^\circ \sim 90^\circ$ 时,椭圆轨迹反向回转。

由式(3)可得质点沿 x 方向的运动速度为

$$V_x = -2\omega u_0 \cos(kx) \cos(\phi/2) \sin[\omega t + (\phi/2)] \quad (6)$$

则最大运动速度为

$$V_{x\max} = -2\pi f_0 u_0 \quad (7)$$

由式(3)、(6)可知,当 $\phi = \pm\pi$ 时, $u_x = 0, V_x = 0$, 振子不能产生直线运动;当 $\phi \neq \pm\pi$ 时,振子将沿 x 方向形成直线运动,且改变激励频率或激励电压幅值时,可控制其运动速度或驱动力。当互换两相激励信号时,即可实现反向直线运动。

2 电机设计

通过Ansys动力学分析计算,得到压电振子面内两弯曲模态频率分别为 59.006 kHz, 60.295 kHz,并对电机结构进行了设计^[17-20]。其中压电振子结构参数如表 1 所示,电机结构图如图 6 所示。

表 1 压电振子的结构性能参数
Tab. 1 Parameters of construction and performance of actuator

材料	结构尺寸/mm				性能参数		
	a	b	h_1	h_2	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	E/GPa	ν
弹性体(黄铜)	27	24	2	—	8270	92	0.33
压电陶瓷	27	24	—	1	7500	78	0.33

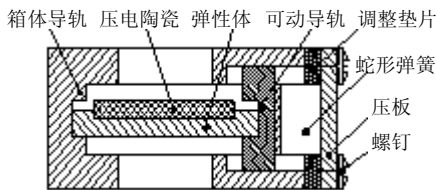


图 6 电机结构图
Fig. 6 Scheme of motor

3 实验研究

根据理论分析设计,加工制作了该面内模态的电机样机(如图 7)。然后利用 Aligent 4294A 精密阻抗分析仪对压电振子进行了扫频实验,结果如表 2 所示,并对电机进行了调试及性能测试。

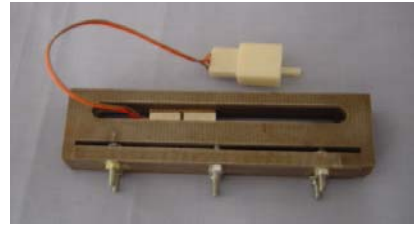


图 7 电机样机实物图
Fig. 7 Sample motor

表 2 压电振子扫频实验结果与理论计算结果的比较
Tab. 2 Compare between theoretic and testing results on frequencies of actuator

模态	理论分析/kHz	实验结果/kHz			实际激励频率/kHz
		A 区	B 区	平均值	
弯曲 1	59.006	59	59.6	59.3	65.2
弯曲 2	60.295	66.26	66.18	66.23	65.2

由表 2 可知,对振子A区进行扫频测得的谐振频率分别为 59、66.26 kHz,对B区扫频测得的谐振频率分别为 59.6、66.18 kHz取其平均值为两弯曲模态的谐振频率,与Ansys分析计算结果比较,其中弯曲模态 2 的频率相差 8.96%,而弯曲模态 1 的频率较为一致,仅相差 0.49%。产生误差的原因,主要是压电振子的材料性能与加工工艺,包括压电陶瓷的加工工艺、粘贴工艺及粘接剂等。

通过高速摄影试验测得,当激励信号电压为 380 V,频率为 65.2 kHz 时,电机最大运行速度约为 458.3 mm/s,驱动力为 2.2 N。

4 结论

根据理论分析,本文设计并制作了该型原理样机,并对其进行了实验研究,结果表明:理论分析与实验结果基本相符。通过对样机的调试,电机样机正反向运行良好,通过手动控制电源开关,能够实现电机快速起停、换向等功能;当改变激励频率或电压值时,可以控制电机运行速度及驱动力。但由于加工精度、安装工艺条件、摩擦材料等因素的影响,电机样机驱动力、驱动速度以及工作稳定性方面有待进一步提高或改进。

参考文献

[1] 赵淳生. 世界超声电机技术的新进展[J]. 振动、测试与诊断, 2004, 24(1): 1-5.
Zhao Chunsheng. Recent progress in ultrasonic motor techniques [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2004, 24(1): 1-5(in Chinese).

[2] 鹿存跃, 谢天, 周铁英, 等. 一种双足驱动直线超声波电动机的设计[J]. 微特电机, 2006, (5): 15-16, 21.
Lu Cunyue, Xie Tian, Zhou Tieying, et al. Design of a new type linear ultrasonic motor with double-driving feet[J]. Small & Special

- Electrical Machines, 2006, (5): 15-16, 21(in Chinese).
- [3] 王宏祥. 环形行波直线超声电机的研究[D]. 辽宁: 辽宁工学院, 2005.
Wang Hongxiang. Study on a ring type traveling wave linear ultrasonic motor[D]. Liaoning: Liaoning Institute of Technology, 2005(in Chinese).
- [4] 许海, 赵淳生. 直线型驻波超声电机的定、动子间接触及摩擦分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(2): 144-149.
Xu Hai, Zhao Chunsheng. Contact process and friction analysis of linear ultrasonic motor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(2): 144-149 (in Chinese).
- [5] Fernandez J M, Perriard Y. Sensitivity analysis and optimization of a standing wave ultrasonic linear motor[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2006, 53(7): 1352-1361.
- [6] Ko H P, Lee K J, Yoo K H, et al. Analysis of tiny piezoelectric ultrasonic linear motor[J]. Japanese Journal of Applied Physics, Part 1, Regular Papers, Brief Communications & Review Papers, 2006, 45(5B): 4782-4786.
- [7] Park J S, Kim S T, Kim J W, et al. Ultrasonic linear motor using 11-b4 mode and its analysis[J]. Japanese Journal of Applied Physics, Part 1, Regular Papers, Brief Communications & Review Papers, 2005, 44(1A): 412-416.
- [8] Ko HP, Kim S, Borodinas S N, et al. A novel tiny ultrasonic linear motor using the radial mode of a bimorph[J]. Sensors and Actuators A, Physical, 2006, 125(2): 477-481.
- [9] Mracek M, Hemsel T, Vasiljev P, et al. Self configuration of a novel miniature ultrasonic linear motor[J]. Diffusion and Defect Data, Part B, Solid State Data, Solid State Phenomena, 2006, (113): 167-172.
- [10] Roh Y, Kwon J. Development of a new standing wave type ultrasonic linear motor[J]. Sensors and Actuators A, Physical, 2004, 112(2-3): 196-202.
- [11] Zeng Zhoumo, Wang Xinhui, Zhao Bolei. Ultrasonic linear motor with anisotropic composite[J]. Transactions of Tianjin University, 2004, 10(2): 98-101.
- [12] Takano T, Yomikawa Y. Characteristics of the ultrasonic linear motor using radiat and nonaxisymmetric vibration modes of an annular plate [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1995, (34): 5288-5291.
- [13] Hemsel T. Survey of the present state of the art of piezoelectric linear motors[J]. Ultrasonics, 2000, (38): 37-40.
- [14] Hashimoto M, Maeno T. Design of a high-performanced vibration for linear ultrasonic motors using a genetic algorithm and a finite element method[C]. Proc. Fifth International Conference on Motion and Vibration Control, Australia, 2002.
- [15] 刘剑, 赵淳生. 基于矩形薄板面内振动的直线型超声电机的研究 [J]. 声学学报, 2003, 28(1): 86-90.
Liu Jian, Zhao Chunsheng. Study on the linear ultrasonic motor based on the vibration in plane of the rectangular plate[J]. Acta Acustica, 2003, 28(1): 86-90(in Chinese).
- [16] 彭宗峰. 基于薄板面内振动超声电机的研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
Peng Zongfeng. Research on the ultrasonic motor of vibration on the sheet metal[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005(in Chinese).
- [17] 刘仁鑫. 矩形复合层板面内弯曲模态直线超声电机研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2005.
Liu Renxin. Study on the linear ultrasonic motor based on in-plane bending modes of piezoelectric rectangular composite laminated plates[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2005(in Chinese).
- [18] 梁莉, 张铁民, 秦勇, 等. 用于计算机磁头驱动的新型直线超声电机[J]. 压电与声光, 2006, 28(3): 285-287.
Liang li, Zhang Tiemin, Qin Yong, et al. A new type of linear ultrasonic motor used in hard disk magnetic heads' driving [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2006, 28(3): 285-287(in Chinese).
- [19] 刘仁鑫, 张铁民. 用于磁头驱动的直线超声电机研究[J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(2): 317-320.
Liu Renxin, Zhang Tiemin. A study on the ultrasonic linear motor for magnetic head driving[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2005, 27(2): 317-320(in Chinese).
- [20] 张铁民, 刘仁鑫. 矩形压电复合层板振子面内自由振动理论模型 [J]. 机械科学与技术, 2004, 23(s1): 92-93, 96.
Zhang Tiemin, Liu Renxin. Dynamical model of free in-plane vibration for piezoelectric rectangular composite laminated plates [J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(s1): 92-93, 96 (in Chinese).

收稿日期: 2007-01-29。

作者简介:

刘仁鑫(1969—), 男, 江西赣县人, 副教授, 博士, 主要从事压电微机电系统研究, Liurenxin1@163.com;

张铁民(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事微机电系统及应用、计算机控制和机器人技术的研究;

秦勇(1980—), 男, 硕士, 主要从事压电微机电系统研究。

(责任编辑 丁玉瑜)