

# 弯振模态板状直线超声电机的研究

付前卫,姚志远

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室,江苏 南京 210016)

**摘要:**通过改进直线超声电机的驱动足、夹持等结构形式,提高了电机的输出特性。设计了一款新型直线电机,电机由对称分布的板状振子和具有柔性的驱动足组成。通过 ANSYS 软件建立了电机有限元模型并分析电机工作模态,根据模态一致性原则设计电机尺寸;利用板状结构的弯振模态,降低了驱动频率,提高了输出效率;电机驱动足具有一定的柔性,在夹持组件作用下实现预压力的施加。最后对样机开展实验研究,结果表明,电机定子模态测试数据与仿真分析结论吻合,工作频率为 27.5 kHz,附近无干扰模态,相位差为 90°,工作时发热较少;最大输出力为 44 N;双向驱动速度一致性良好,其中最大输出速度为 267 mm/s。

**关键词:**直线超声电机;板状电机;弯振模态;有限元分析;输出稳定性

**中图分类号:**TM33;TH122 **文献标识码:**A

## Research on Slab-type Linear Ultrasonic Motor Based on Bending Mode

FU Qianwei, YAO Zhiyuan

(State Key Lab. of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University  
of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The output characteristic of the linear ultrasonic motor was improved through the improvement of the driving foot structure and clamping method. A novel slab-type linear motor was designed, which consisted of the symmetric slab-type vibrators and flexible driven feet. The motor's finite element model was established by ANSYS software and the operating mode was analyzed. The size of the motor was designed according to the modal consistency regulation. The driving frequency of the motor was reduced and the output efficiency was improved by making use of the bending mode of the slab-type structure. Since the driving foot of the motor has a certain flexibility, the pre-pressure application can be realized under the effect of the clamping component. Finally, the experiment on the prototype was carried out. The results showed that the modal test data of motor stator was identical with the simulation analysis. The operating frequency was 27.5 kHz, the phase difference of the applied two signals was 90° and there was no interference mode around it. The maximum output force was up to 44 N and the maximum speed was 267 mm/s with good consistency of two-way driving speed.

**Key words:** linear ultrasonic motor; slab-type motor; bending mode; finite element analysis; output stability

## 0 引言

直线超声电机是 20 世纪末发展起来的新型电机。电机通过压电陶瓷的逆压电效应,激发定子弹性体在超声频率范围内的振动,再由定子、动子间的摩擦作用产生输出力,驱动负载<sup>[1-3]</sup>。其具有结构简单,能直接输出直线运动,体积小,定位精度高,速度响应快及外观设计灵活等优点,在航空航天、武器装备、精密仪器等领域均具有重要应用<sup>[4-5]</sup>。

近年来,研究人员设计研制了多款新型直线超声电机。张健滔等设计了一款卧板式直线超声电机,分析了摩擦接触特性以及不同外部条件对电机输出特性的影响,但该电机最大输出力仅为 1.2 N,实用性能欠佳<sup>[6]</sup>。华顺明等提出的螺纹式直线电机采用双弹性体振子激励,利用面外弯振模态产生弯曲行波,驱动螺杆进行直线输出,该电机有助于精简结构,但预压力的施加仅靠定子圆筒与螺杆间的作用力,难以调节大小,不利于电机控制<sup>[7]</sup>。简月等提

收稿日期:2016-08-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275229);国家重大仪器设备开发专项基金资助项目(2012YQ100225)

作者简介:付前卫(1992-),男,安徽阜阳人,硕士生,主要从事振动控制与利用、直线超声电机的研究。通信作者:姚志远(1961-),男,江苏镇江人,教授,博士生导师,主要从事直线超声电机的结构设计、整机建模与优化等方面的研究。

出具有梁式夹持方式的V型直线超声电机,通过提高切向弹簧刚度,将最大输出力提高到了37 N,最大速度为1.4 m/s,电机整体运行稳定性良好,但整套电机系统构件复杂,由一个外框控制定子位置,预压力大小不明确<sup>[8]</sup>。

本文提出了一种基于弯振模式的板状直线超声电机。利用有限元分析软件仿真了电机工作模式,优化电机尺寸参数,调整工作模式频率一致性;通过改进电机夹持方式,简化了预压力施加方式,同时使其可控、可调;板状对称的电机结构形式,使得电机输出速度更稳定;制作实体样机,通过实验对模式频率、输出特性等进行测试。

## 1 电机结构及工作原理

### 1.1 总体结构设计

电机的总体结构影响其输出特性,本文通过简化定子结构及装配方式来实现稳定输出,如图1所示。

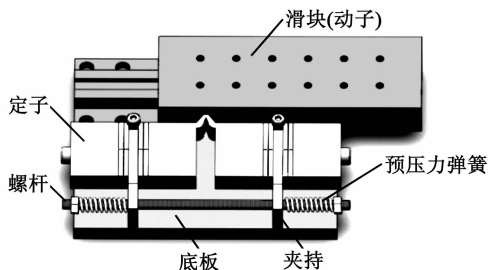


图1 电机整体结构

该电机系统由定子、滑块、夹持组件、底板组成,其中夹持组件包括夹持、预压力弹簧、螺杆、螺母。定子由2个螺栓通过夹持固定在底板上。

如图2所示,定子由2个板状振子组成,单个振子由配重块、压电陶瓷、夹持、端盖通过预紧螺栓连接而成,最后通过驱动足将2个振子连在一起。

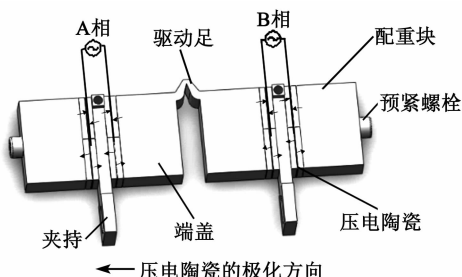


图2 定子结构图

### 1.2 电机工作原理

直线超声电机工作的关键:驱动足处的椭圆运动及电机与滑块间的预压力<sup>[9]</sup>。电机在预压力作用下与滑块接触并压紧,将微幅振动转化为滑块的直线输出。

定子压电陶瓷极化方式与电激励方式如图2所示,A、B相分别施加正、余弦信号来激发定子的两个工作模式。若驱动足处振幅为 $U$ ,图3(a)为对称模式,两个振子弯曲振动方式一致,驱动足处产生竖直方向运动位移为 $y(t) = U\cos\omega t$ ;图3(b)为反对称模式,驱动足处产生水平方向位移为 $x(t) = U\sin\omega t$ ,两正交的振动能够合成驱动足处质点的椭圆运动。

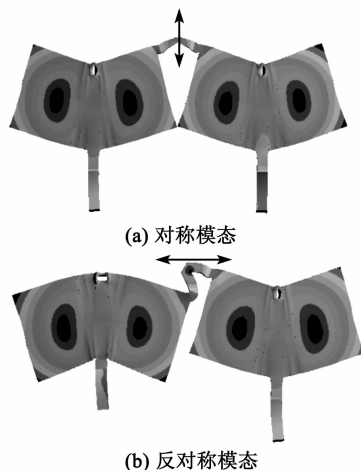


图3 定子工作模式

通过调节螺母,使预压力弹簧发生形变,产生弹力。夹持在该力的作用下,绕端部的螺栓做单轴转动。由于驱动足具有一定柔性,两侧振子的微幅转动使其发生形变,并与滑块挤压在一起,实现预压力的施加。根据弹簧形变量和弹性刚度可计算弹力,由力矩平衡易知驱动足处的预压力大小。

### 1.3 工作模式频率一致性调节

为了避免有干扰模式影响电机的正常工作,需要通过调整电机的尺寸参数使定子的对称/反对称模式频率保持一致。由于陶瓷片尺寸限制,本文主要调节4个尺寸,如图4所示。根据以往经验<sup>[10]</sup>,驱动足顶端界面宽( $h$ )的大小影响定子与滑块间的接触面积,数值过大会导致摩擦阻力增加,过小则会导致界面接触应力增大,加剧磨损。其余3个参数影响驱动足柔性,驱动足柔性过小会导致驱动足形变幅度小,预压力无法施加;而柔性过大会导致形变幅度偏大,易断裂。综合考虑以上因素,暂取驱动足与振子连接处倒角半径( $r$ )为2.5 mm, $h=3$  mm,驱动足夹角( $\alpha$ )为 $40^\circ$ ,驱动足高度( $l$ )为5 mm。在ANSYS workbench中建立定子有限元模型,采用自由划分形式生成网格,定子弹性基体材料为不锈钢,压电陶瓷材料为PZT-8。

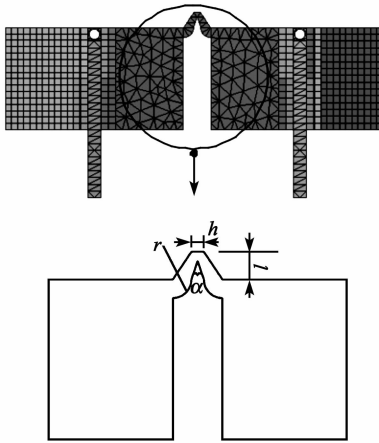


图 4 定子有限元模型

以 2 个振动模态频率一致性作为设计目标,令 4 个参数为设计变量,有

$$x = [r, h, \alpha, l] \quad (1)$$

优化原则为

$$\begin{cases} f_{\text{sym}} = f_{v\text{-sym}}(x) \\ f_{\text{anti}} = f_{v\text{-anti}}(x) \end{cases} \quad (2)$$

优化设计目标函数则为两个模态的最小差值,即

$$f(x) = \min_x |f_{\text{sym}} - f_{\text{anti}}| \quad (3)$$

式中  $f_{\text{sym}}$  和  $f_{\text{anti}}$  分别为对称/反对称模态频率。利用 ANSYS 参数化语言 APDL 进行运算,综合考虑电机结构和目标函数最优解,确定了调节后的参数:  $r=3 \text{ mm}$ ,  $h=2 \text{ mm}$ ,  $\alpha=36.87^\circ$ ,  $l=4.5 \text{ mm}$ 。

表 1 为调节前、后两工作模态频率对比。尺寸调节后,两工作模态频率仅相差 15 Hz,一致性良好,理论上能够通过同频电信号激励电机驱动足产生椭圆运动,满足电机的设计要求。

表 1 调节前、后定子模态频率

	对称模态频率/Hz	反对称模态频率/Hz	误差/%
调节前	26 932	29 350	8.97
调节后	27 537	27 552	0.05

## 2 实验分析

根据仿真分析结果,制作样机,如图 5 所示。

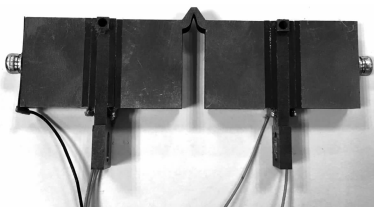


图 5 定子样机图

### 2.1 工作频率选取

利用 PSV300F-B 型多普勒激光测振仪对定子进行扫频实验测量其工作模态频率(见图 6),其中共振频率为 27.86 kHz。

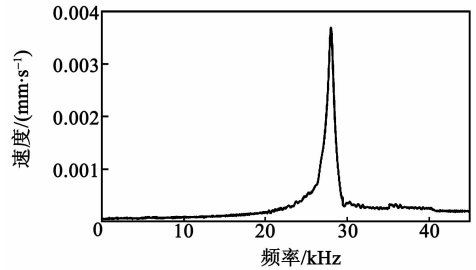


图 6 扫频实验

仿真计算与实验数据存在误差,其原因是:理论分析选取的不锈钢参数与实际不尽相同;装配时存在偏差;仿真分析时未考虑零件之间的缝隙等。误差在可接受范围内,对实验研究不会产生影响。

### 2.2 电机输出特性

在激励电压为 200 V,驱动频率范围为 26~30 kHz,采样频率为 2 kHz,预压力为 40 N 时,使用 KEYENCE LK-H150 高速激光位移速度传感器测量滑块的左、右向运动速度。结果表明,两向速度一致性良好,且在 27.62 kHz 的电信号激励下,最大速度为 267 mm/s,如图 7 所示。

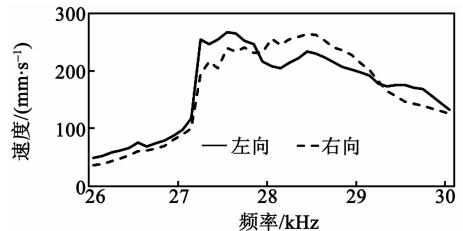


图 7 两向速度与频率关系

在相同实验条件下,采用 LC1015 测力仪对样机进行出力测试,研究出力与激励频率的关系,其中最大出力为 44 N,如图 8 所示。

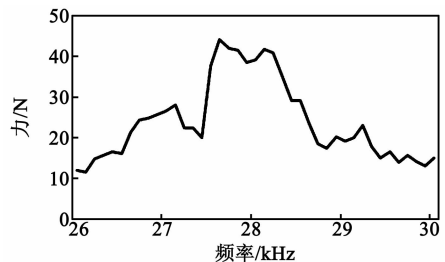


图 8 力与频率关系

## 3 结束语

提出了一种基于弯振模态的板状直线超声电

机。其定子采用板状对称结构,有利于电机稳定输出;驱动足具有柔性,实现了现有夹持方式下的预压力施加;利用 ANSYS 软件设计电机尺寸参数,仿真分析表明工作模态周围无干扰模态。样机实验表明,扫频实验数据与仿真分析结果吻合,最大输出速度为 267 mm/s,最大输出力为 44 N,滑块左、右双向输出速度一致性良好。

#### 参考文献:

- [1] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [2] WAN Z, HU H. Modeling and experimental analysis of the linear ultrasonic motor with in-plane bending and longitudinal mode[J]. Ultrasonics,2013,54(3):921-928.
- [3] 万志坚,胡泓. 面内弯纵型直线超声电机的驱动与摩擦分析[J]. 振动、测试与诊断,2014,34(2):229-236. WAN Zhijian, HU Hong. Analysis on friction driving of linear ultrasonic motor with in-plane bending and longitudinal mode[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2014, 34(2):229-236.
- [4] 苏松飞,姚志远,王长茹,等. 一种弯曲模态直线超声电机的研究[J]. 压电与声光,2012,34(3):400-403. SU Songfei, YAO Zhiyuan, WANG Changru, et al. Research on linear ultrasonic motor based on bending modal[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(3):400-403.
- [5] 李晓牛,周盛强. 光阑用螺纹式超声电机[J]. 光学精密工程,2014,22(8):2081-2087. LI Xiaoni, ZHOU Shengqiang. Ultrasonic motor connected by screw for aperture[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8):2081-2087.
- [6] 张健滔,李朝东,何晓菁. 卧板式直线超声电机的特性分析模型[J]. 中国电机工程学报,2012(18):137-144. ZHANG Jiantao, LI Chaodong, HE Xiaojing. Modeling for characteristic analysis of a plate-type linear ultrasonic motor [J]. Proceeding of the CSEE, 2012 (18):137-144.
- [7] 华顺明,李志强,孟玉明,等. 基于压电驱动的螺纹式直线电机[J]. 微电机,2015,48(7):13-17. HUA Shunming, LI Zhiqiang, MENG Yuming, et al. Screw type motor based on piezoelectric actuation[J]. Micromotors, 2015, 48(7): 13-17.
- [8] 简月,姚志远,杨模尖,等. V型直线超声电机梁式夹持的结构设计[J]. 光学精密工程,2015(5):1358-1364. JIAN Yue, YAO Zhiyuan, YANG Mojian, et al. Structure design of beam type clamp for V-shape ultrasonic motor [J]. Optics and Precision Engineering, 2015(5):1358-1364.
- [9] YOKOYAMA K, TAMURA H, MASUDA K, et al. Single-phase drive ultrasonic linear motor using a linked twin square plate vibrator[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2013, 52(7):07HE03-07HE03-7.
- [10] 李存岑. 矩形板超声电机的振子振型激励技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2010.
- (上接第 360 页)
- CAI Lihua. Design of high precision optoelectronic stabilized platform control system[J]. Digital Technology and Application, 2015(11):181-182.
- [3] 张智永,周晓尧,范大鹏,等. 导引头伺服机构的控制系统分析与设计[J]. 红外与激光工程,2012(2):494-496. ZHANG Zhiyong, ZHOU Xiaoyao, FAN Dapeng, et al. Design and analysis of control system for seeker servo mechanism[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012 (2): 494-496.
- [4] 张宇鹏,王伟兴. 机载通用高精度稳定平台视轴稳定分
- 析[J]. 国外电子测量技术,2015(11):40-43. ZHANG Yupeng, WANG Weixing. Analysis on the stability of visual axis of airborne high precision stabilized platform [J]. Foreign Electronic Measurement Technology,2015(11):40-43.
- [5] 彭志永,曹飞,王鹏辉,等. 直流力矩电机控制的动力陀螺稳定平台[J]. 测控技术,2012(4):140-143. PENG Zhiyong, CAO Fei, WANG Penghui, et al. Controlled with DC Motor of dynamical gyro stable platform[J]. Measurement & Control Technology, 2012 (4):140-143.