

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.01.020

单模态驱动双向运动的斜动子 V 形直线超声电机

陈乾伟^{1,2} 时运来² 黄卫清²

(1. 金陵科技学院机电工程学院, 南京, 211169;

2. 南京航空航天大学机械结构力学与控制国家重点实验室, 南京, 210016)

摘要:针对双模态超声电机对模态频率一致性要求高以及单模态超声电机难以实现双向运动等问题,提出了一种单模态驱动双向运动的斜动子 V 形直线超声电机。电机由导轨和 V 形定子构成,导轨相对于 V 形定子倾斜安装,V 形定子的工作模态为面内对称模态或面内反对称模态,通过切换工作模态改变定子驱动足运动轨迹相对导轨的倾斜方向,实现导轨正反向运动。在分析电机工作原理及设计原则的基础上,推导了电机运行的导轨倾角范围,并对设计制作的原理样机进行了模态实验和机械特性测试。实验表明:在导轨倾角为 35°,激励峰值电压为 600 V,预压力为 65 N 条件下,当电机工作在面内对称模态,导轨正向运动,其最大空载速度为 180 mm/s,最大输出力为 14 N;当电机工作在面内反对称模态,导轨反向运动,其最大空载速度为 125 mm/s,最大输出力为 24 N。

关键词:单模态驱动;直线超声电机;V 形定子;导轨倾斜角

中图分类号:TM35

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2015)01-0139-06

Single-Mode-Drive-Type Bi-directional Linearly Moving Ultrasonic Motor with Inclined Slider and V-shaped Stator

Chen Qianwei^{1,2}, Shi Yunlai², Huang Weiqing²

(1. School of Mechatronic Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing, 211169, China;

2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: To solve the problems that double-mode-drive-type moving ultrasonic motors (USMs) need to equalize two natural frequencies for driving and that single-mode-drive-type USMs either only move unidirectionally or have many difficulties in realizing bidirectional movement, a single-mode-drive-type bi-directional linearly moving USM composed of an inclined slider and a V-shaped stator is presented. The slider is obliquely installed with the stator which works under the in-plane symmetric vibration mode or the in-plane unsymmetrical vibration mode. When the working mode of stator is changed, the inclined direction of the trajectory of driving-foot is changed, so the stator can move the slider bidirectionally. On the basis of analyzing the working theory and the design principles of the motor, the obliquity range of the inclined slider which can make the motor running normally is derived. Finally, a prototype is fabricated and its vibration mode and mechanical characteristics are tested. The experimental results show that under the conditions that the obliquity angle of slider is 35°, the peak-to-peak voltage is 600 V and the pre-pressure is 65 N, when the motor is working under the in-plane symmetric vibration mode, the motor offers a maximal driving force of 14 N, and the maximal velocity with no load is 180 mm/s; when

基金项目:国家自然科学基金(51375224,51275235)资助项目;金陵科技学院青年教师科研基金(Jit-b-201318)资助项目。

收稿日期:2014-12-12;**修订日期:**2015-01-03

通信作者:陈乾伟,男,博士,讲师,E-mail:chenqw@jit.edu.cn。

the motor is working under the in-plane unsymmetrical vibration mode, the motor offers a maximal driving force of 24 N, and the maximal velocity with no load is 125 mm/s.

Key words: single-mode-drive; linearly moving ultrasonic motor; V-shaped stator; obliquity of slider

直线超声电机利用压电陶瓷元件的逆压电效应激发定子超声振动,并通过定子和动子之间的摩擦作用,把定子的微幅振动转化成动子的直线运动,直接推动负载。它具有低速大力矩、断电自锁、无电磁干扰、直接产生直线运动和驱动力、定位和速度控制精度高等优点,在半导体制造、医疗器械、航空航天等领域有着广泛的应用前景^[1-2]。

按照电机工作时同时参与工作的共振模态的数目,超声电机可以分为双模态驱动和单模态驱动两类^[1-2]。双模态驱动超声电机的不足在于:对两个正交的工作模态的频率一致性要求很高,降低了电机设计的灵活性,增加了电机的制造成本,也使得电机可驱动的频域较窄^[3-8]。和双模态驱动超声电机相比,单模态驱动超声电机具有以下优点:可实现驱动电路的简化和小型化;对工作模态频率一致性要求宽松,增加了设计的灵活性,有利于机电结构的简单化^[9-10]。

1982年, Sashida等提出了一种单模态驱动的倾斜动子振动片形超声电机。该电机的工作模态为一阶纵振模态,振动片端面质点的运动轨迹相对于转子表面的斜直线运动推动动子运动,然而该电机只能单向运动,且磨损严重^[2]。1998年, He等提出了一种单模态驱动的矩形板式直线超声电机。当使用B3模态时,定子产生向右倾斜的斜直线往复运动;当使用B4模态时,定子产生向左倾斜的斜直线往复运动,对应的动子也就产生了正反向运动^[9]。这种结构与驱动增加了设计和装调的困难,同时能量利用效率低。2007年, Tamura等提出了一种单模态驱动的纵弯耦合振动板形超声电机。该电机具有低阶和高阶两个纵弯耦合工作模态,一个模态参与正向驱动工作,另一个模态参与反向驱动工作^[10],其特点与文献[9]的矩形板式超声电机类似。

上述单模态驱动的超声电机或者只能单向运动,或者设计和装调困难、效率低。针对这些问题,本文提出了一种单模态驱动双向运动的由倾斜动子和V形定子构成的直线超声电机^[11]。

1 斜动子V形超声电机结构

图1为斜动子V形直线超声电机结构图。其中图1(a)为电机整体结构图,该电机由V形定子和导轨构成,导轨具有 θ 的安装倾斜角,导轨在预压力的作用下压在定子上,并与V形定子相互作用,从而实现电机的单模态驱动和双向运动^[11]。

图1(b)为V形定子结构图,V形定子包括2个相同的左右对称且夹角为 90° 的兰杰文振子,每个兰杰文振子由前端盖、后端盖、夹持件、陶瓷片及电极片等构成;用内六角螺栓将陶瓷片、电极片、前端盖、夹持件以及后端盖等部件装配为一体,构成螺栓紧固型定子;2个兰杰文振子的前端盖上端部联为一体形成驱动足,夹持件上设有安装孔,用以装夹电机定子^[8]。图1(c)为V形定子压电陶瓷片的极化布置图,定子有4组共8片压电陶瓷,每组包含一对极化方向相反的压电陶瓷,压电陶瓷沿厚度方向极化,利用逆压电 d_{33} 效应激发定子的振动,每组压电陶瓷的中间安放电极片,用于外接激励信号,将位于同一兰杰文振子上的两电极片用导线相连,则构成定子的A、B两相。

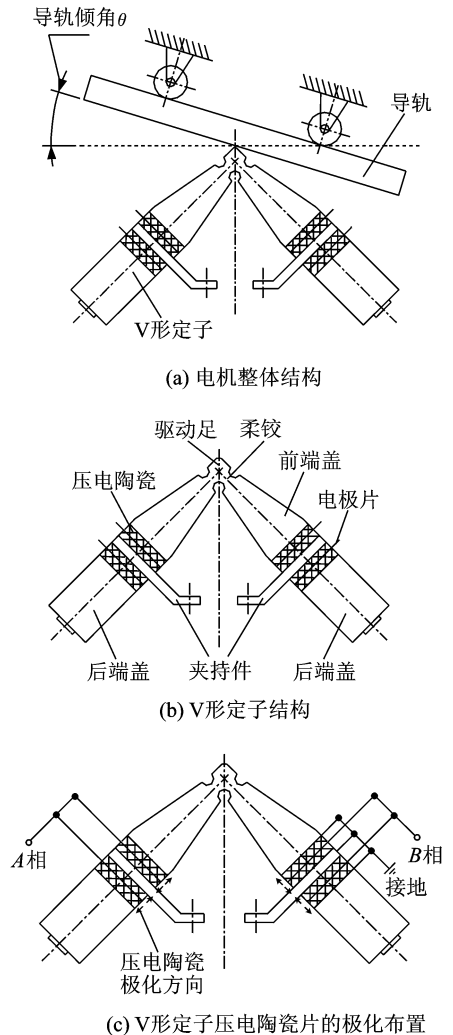


图1 斜动子V形直线超声电机结构

Fig. 1 Structure of linearly moving USM composed of an inclined slider and a V-shaped stator

2 工作原理与动子安装倾角

图 2 为有限元计算的 V 形定子工作模态图。定子设计有 2 个正交工作模态,分别为共面的对称和反对称振动模态;当定子的 A, B 两相同相激励,则激发定子产生对称振动模态,定子左右对称的 2 个兰杰文振子分别做同相的纵向伸缩运动,并在驱动足上合成为往复的垂直振动 U 。同理,当定子的 A, B 两相反相激励,则激发定子产生反对称振动模态,定子左右对称的 2 个兰杰文振子分别做反相的纵向伸缩运动,在驱动足上合成为往复的水平振动 W 。

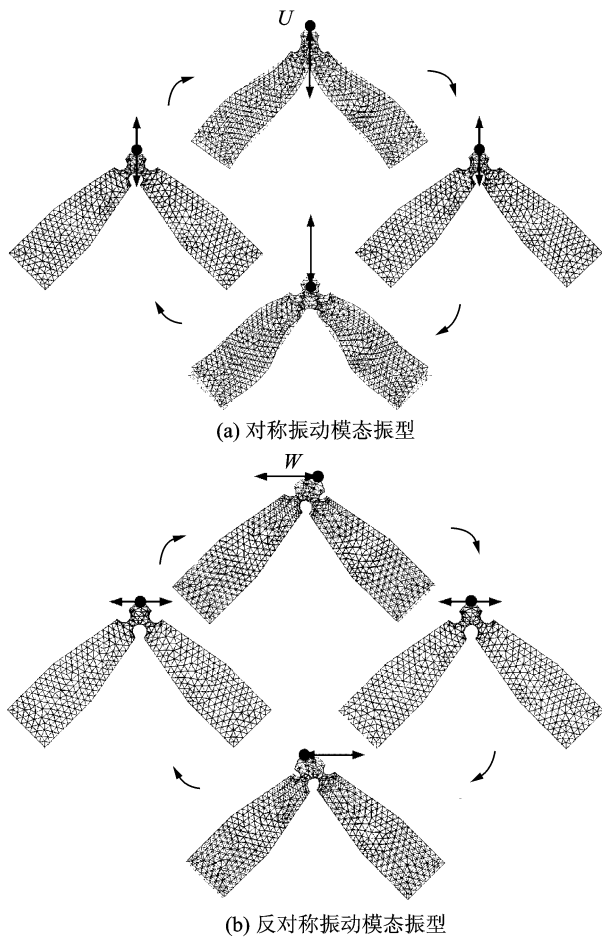


图 2 有限元计算的 V 形定子工作模态图

Fig. 2 Working mode of V-shaped stator computed by FEM

图 3 为斜刀子 V 形超声电机的工作原理。电机为单模态驱动方式:当定子工作于对称振动模态时,驱动足运动轨迹为竖直方向的往复直线运动,由于导轨倾斜 θ 角,使得驱动足运动轨迹与导轨的夹角为 $90^\circ - \theta$,从而推动导轨沿左上方向运动(设定为正向);当定子工作于反对称振动模态时,驱动足运动轨迹为水平方向的往复直线运动,由于导轨

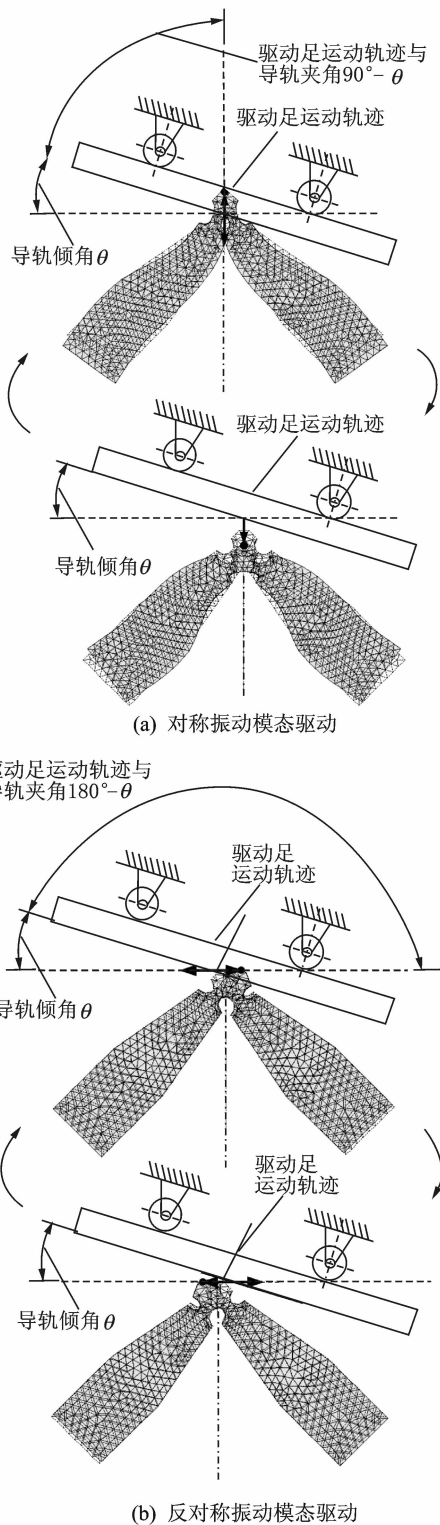


图 3 斜刀子 V 形电机的工作原理

Fig. 3 Working principle of V-shaped USM with inclined slider

倾斜 θ 角,使得驱动足运动轨迹与导轨的夹角为 $180^\circ - \theta$,从而推动导轨反向运动。V 形定子驱动足相对于导轨的斜直线运动轨迹,具有沿定子与导轨接触界面的法向分量和切向分量。法向分量起

到使 V 形定子周期性地接触或脱离导轨及提供 V 形定子与导轨间动态预压力的作用;切向分量起到驱动导轨的作用^[1]。因此,要使 V 形定子有效地驱动导轨,V 形定子驱动足斜直线运动轨迹法向分量的幅值必须足够大,以克服接触界面微观波幅的影响。

V 形定子与导轨接触界面的微观波幅来自于机械加工后零件的表面粗糙度。表面粗糙度用 Ra (中心线平均粗糙度)表示。由于实际的定子与导轨接触界面是粗糙的,两个表面的实际接触仅发生在离散的微凸体上(摩擦学中把表面结构中独立的单体称作微凸体),并不像两个齿条配合那样^[12]。因此,电机工作时定子需要克服的微观波幅 B_w 要小于表面粗糙度 Ra ,所以 B_w 可以表示为

$$B_w = j_w \cdot Ra \quad (1)$$

式中 j_w 为微观波幅减小系数,小于 1。

定定子接触时,定子的对称振动模态垂直于导轨的法向振动分量 U_f 为

$$U_f = U \cdot \cos\theta \quad (2)$$

而定子的反对称振动模态垂直于导轨的法向振动分量 W_f 为

$$W_f = W \cdot \sin\theta \quad (3)$$

因此,要使定子有效地驱动导轨正、反向运动,必须满足以下条件

$$U \cdot \cos\theta > j_w \cdot Ra, W \cdot \sin\theta > j_w \cdot Ra \quad (4)$$

可得

$$\arcsin\left(\frac{j_w \cdot Ra}{W}\right) < \theta < \arccos\left(\frac{j_w \cdot Ra}{U}\right) \quad (5)$$

在定子自由边界条件及峰峰值电压 80 V 定频激励下,采用 Polytec 激光多普勒测振仪对定子进行模态实验,测得对称振动模态下驱动足端面振幅为 $0.9 \mu\text{m}$,反对称振动模态下驱动足端面振幅为 $1.8 \mu\text{m}$ 。采用 Mahr 粗糙度仪测量接触面的粗糙度,测得定子驱动足表面粗糙度 $Ra = 0.49 \mu\text{m}$,滑轨表面粗糙度 $Ra = 0.55 \mu\text{m}$ 。

为了估算 θ 的取值范围,不妨令 $U = 0.9 \mu\text{m}$, $W = 1.8 \mu\text{m}$, $Ra = 0.55 \mu\text{m}$, $j_w = 1$,将以上参数代入式(5),可得 $17.8^\circ < \theta < 52.3^\circ$ 。实际取导轨安装倾斜角 $\theta = 35^\circ$ 。

3 实验分析

3.1 模态实验

图 4 为制作的样机,它由 V 形定子、安装倾角为 35° 的导轨和加预压力装置构成。为了检验电机设计方案的正确性,采用德国 Polytec 公司生产的 PSV300F-B 型高频扫描激光测振系统对定子进行了模态实验。自由边界条件下定子的模态实验结果见图 5 和表 1。

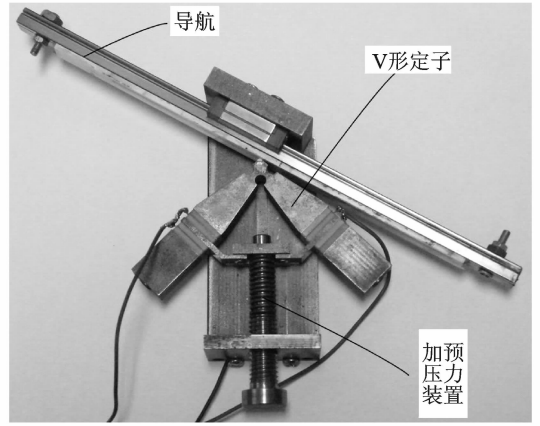
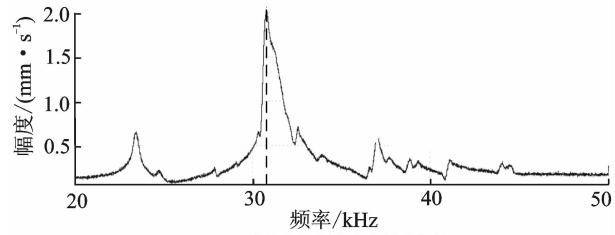
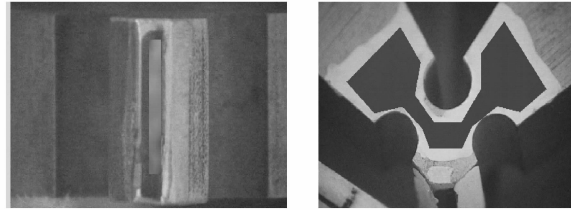


图 4 斜定子 V 形超声电机样机

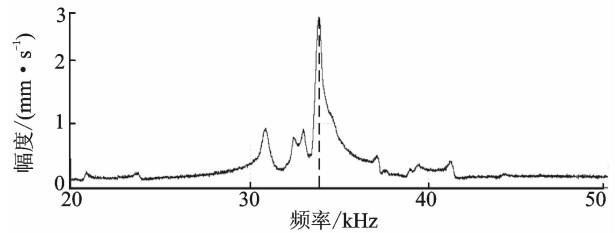
Fig. 4 Prototype of V-shaped USM with inclined slider



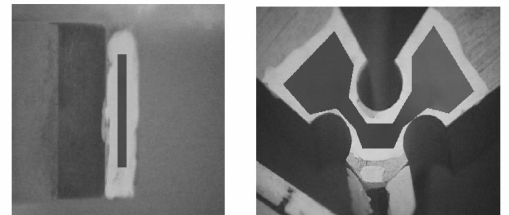
(a) 对称振动模态幅频曲线



(b) 对称振动模态振型



(c) 反对称振动模态幅频曲线



(d) 反对称振动模态振型

图 5 V 形定子的工作模态频率及振型

Fig. 5 Frequency and vibration types of working mode of V-shaped stator

表 1 V 形定子激光多普勒测振仪模态实验结果及其与 ANSYS 计算结果对比

Tab. 1 Testing results of V-shaped stator modal by laser Doppler vibrometer and comparison between calculation results by ANSYS and modal testing results

自由边界条件	对称振动模态	反对称振动模态
ANSYS 计算共振频率/kHz	41.74	41.35
实测共振频率/kHz	30.81	33.82
误差/%	26.2	18.2
峰峰值电压 80 V 下 实测 V 形定子驱动足 端面振幅/ μm	0.9	1.8

从实验结果可知:

(1)在设计的工作频率附近,存在两个正交模态:对称振动模态和反对称振动模态,其振型与设计所选择的两个工作模态的振型完全一致,并且在自由边界条件和峰峰值电压 80 V 定频激励下,测得对称振动模态下驱动足的振幅为 $0.9 \mu\text{m}$,反对称振动模态下驱动足的振幅为 $1.8 \mu\text{m}$ 。

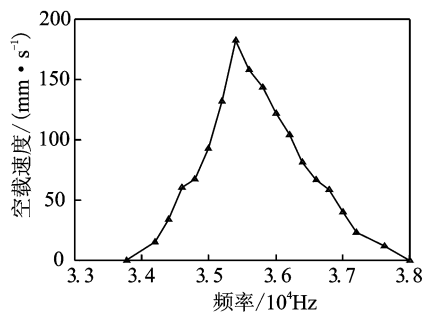
(2)对称振动模态(或反对称振动模态)的实验结果与理论计算值相差 26.2%(或 18.2%)。这主要是由于 ANSYS 软件计算时将 V 形定子的金属弹性体和 PZT 作为一个整体进行计算,而实际 V 形定子的金属弹性体和 PZT 靠紧固螺栓联结为一体,其实际刚度偏低,导致理论计算值较高。

(3)当定转子之间加预压力后,可以将激光打在定转子不接触的部分,对 V 形定子进行接触边界条件下的模态实验。例如,可以通过测量图 5 所示的柔铰周围局部对称振动和反对称振动来分别确定对称振动模态和反对称振动模态的存在,及接触边界条件下的共振频率。

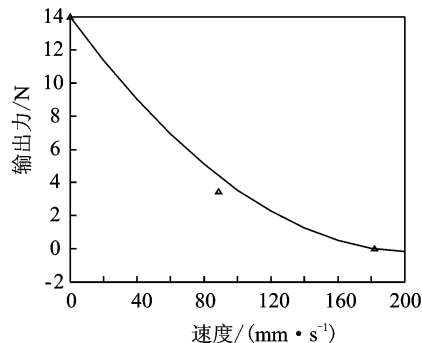
3.2 机械特性实验

V 形电机由电机驱动平台提供驱动信号。电机驱动平台由 1 台信号发生器和 2 台功率放大器构成,实验时,信号发生器发出具有同相或反相的两路同频信号,经功率放大器放大后,输出驱动电机。

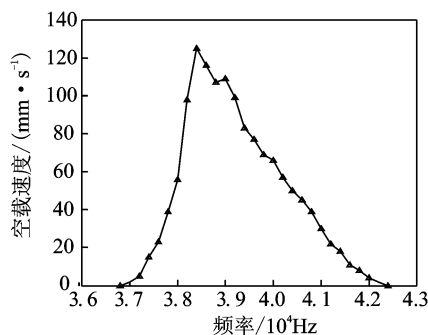
图 6 是 V 形电机的机械特性曲线。经测试,在导轨倾角为 35° ,驱动峰峰值电压 600 V,预压力 65 N 下,当对 V 形电机的 A, B 两相同相激励,激励频率 35 400 Hz,导轨正向(左上方向)运动,其空载速度为 180 mm/s ,最大输出力为 14 N;当对 V 形电机的 A, B 两相反相激励,激励频率 38 400 Hz,导轨反向运动,其空载速度为 125 mm/s ,最大输出力为 24 N。



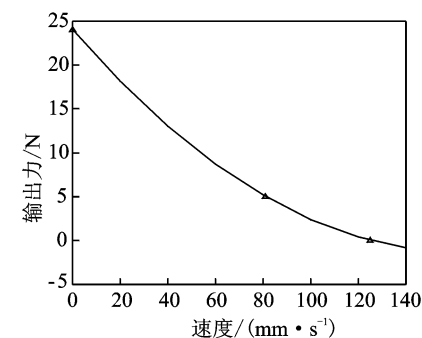
(a) A, B 两相同相激励下电机的速度-频率特性曲线



(b) A, B 两相同相激励下电机的输出力-速度特性曲线



(c) A, B 两相反相激励下电机的速度-频率特性曲线



(d) A, B 两相反相激励下电机的输出力-速度特性曲线

图 6 斜转子 V 形电机机械特性曲线

Fig. 6 Mechanical characteristics of V-shaped USM with inclined slider

利用上述激光多普勒测振仪,通过将激光束打在柔铰周围(V 形定子与导轨不接触的地方),对 V 形定子进行了接触边界条件下的模态实验。当对 V 形电机的 A, B 两相输入定频 35 400 Hz 的同相激励,实测 V 形定子的工作模态振型如图 5(b)所

示,证实电机正向运动的工作模态为对称振动模态;当对 V 形电机的 A, B 两相输入定频 38 400 Hz 的反相激励,实测 V 形定子的的工作模态振型如图 5(d)所示,证实电机反向运动的工作模态为反对称振动模态。

4 结束语

本文提出了一种单模态驱动的可正反向运动的斜定子 V 形直线超声电机。该电机由 V 形定子和导轨构成, V 形定子采用螺栓紧固结构,压在定子上的导轨倾角为 35° 。V 形定子含有两个正交工作模态,分别为共面的对称振动模态和反对称振动模态,通过模态切换实现了单模态驱动正反运动控制。实验表明,斜定子 V 形电机具有工作频带宽,运行稳定的特点。当电机工作在对称振动模态,导轨正向运动,其最大空载速度为 180 mm/s,最大输出力 14 N;当电机工作在反对称振动模态,导轨反向运动,其最大空载速度为 125 mm/s,最大输出力为 24 N。

参考文献:

- [1] Zhao Chunsheng. Ultrasonic motors technologies and applications [M]. Beijing: Science Press and Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 1-19.
- [2] Ueha S, Tomikawa Y. Ultrasonic motors theory and applications [M]. UK: Oxford University Press, 1993: 160-190.
- [3] 陈乾伟,黄卫清. 斜定子与塔形定子构成的单驱双动超声电机 [J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(1): 28-33. Chen Qianwei, Huang Weiqing. A single-phase-drive bi-directional moving ultrasonic motor composed of an inclined slider and a tower-type stator [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(1): 28-33.
- [4] Wang Yin, Huang Weiqing. Linear ultrasonic motor using longitudinal vibration [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 29(1): 40-45.
- [5] 于会民,王寅,陈乾伟,等. 三滚子结构夹持的直线型超声电机 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31(2): 250-254. Yu Huimin, Wang Yin, Chen Qianwei, et al. A linear ultrasonic motor clamped with three-roller clamping scheme [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(2): 250-254.
- [6] Shi Yunlai, Zhang Hanlei, Li Yubao, et al. Two DOF positioning stage using linear ultrasonic motors [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 25(3): 161-168.
- [7] Shi Yunlai, Zhao Chunsheng, Zhang Jianhui. Contact analysis and modeling of standing wave linear ultrasonic motor [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science, 2011, 26(6): 1235-1242.
- [8] 姚志远,杨东,赵淳生. 杆结构直线超声电机的结构设计和功率流分析 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(24): 56-60. Yao Zhiyuan, Yang Dong, Zhao Chunsheng. Structure design and power flow analysis of bar-structure linear ultrasonic motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(24): 56-60.
- [9] He S Y, Chen W S, Tao X, et al. Standing wave bi-directional linearly moving ultrasonic motor [J]. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(5): 1133-1139.
- [10] Takano T, Tomikawa Y, Kusakabe C. Same phase drive-type ultrasonic motors using two degenerate bending vibration modes of a disk [J]. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1992, 39(2): 180-186.
- [11] 黄卫清,陈乾伟. 双向单模态斜轨 V 形直线超声电机及电激励方式 [P]. 中国发明专利: ZL 2009 10184876. 5, 2012. Huang Weiqing, Chen Qianwei. A single-phase-drive bi-directional moving ultrasonic motor composed of an inclined Slider and a tower-type stator and its electric incentive methods [P]. Chinese Patent: ZL 2009 10184876. 5, 2012.
- [12] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理 [M]. 北京:清华大学出版社, 2002: 256-271. Wen Shizhu, Huang Ping. Principles of tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 256-271.

