

纵振复合双足直线超声电机

刘英想, 姚郁, 陈维山, 刘军考

(哈尔滨工业大学机器人与系统国家重点实验室, 150001, 哈尔滨)

摘要: 为了有效提高超声电机的机械输出性能, 研制了一种纵振复合双足直线超声电机. 该电机由两个竖直纵振换能器和一个水平纵振换能器组成, 水平纵振换能器上变幅杆末端小端面与竖直纵振换能器变幅杆大端侧面结合, 且变幅杆为采用一整块硬铝合金加工而成的一体件. 对电机的工作原理进行了分析, 利用有限元方法对电机进行了设计与仿真, 实现了电机两个基本振动模态特征频率的简并. 采用多普勒激光测振仪对样机振动特性进行了测试, 测试结果与有限元分析结果吻合良好. 机械输出特性测试结果表明, 样机最大速度为 602 mm/s, 最大推力达 32 N.

关键词: 超声电机; 纵振换能器; 振动特性

中图分类号: TM 359.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)08-0111-05

Double-Foot Linear Ultrasonic Motor with Longitudinal Transducers

LIU Yingxiang, YAO Yu, CHEN Weishan, LIU Junkao

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To improve the mechanical output ability of the ultrasonic motor, a double-foot linear ultrasonic motor with longitudinal vibration transducer is designed and fabricated. The proposed motor contains two vertical transducers and one horizontal transducer, and the horn on the horizontal transducer intersects with the side surface of the horn on the vertical transducer by its tip end, which are processed as a monoblock of duralumin alloy. The working principle of the motor is introduced, FEM is adopted to accomplish the design and simulation, and the resonance frequencies of the two vibration modes of the motor are tuned to get close to each other. The vibration characteristics of the prototype are tested by a scanning laser Doppler vibrometer and well coincide with the FEM analysis, and the maximum no-load speed attains to 602 mm/s and maximum thrust force to 32 N.

Keywords: ultrasonic motor; longitudinal transducer; vibration characteristics

超声电机是近三十年发展起来的一种新型驱动器, 是一种利用压电陶瓷元件的逆压电效应激发定子弹性体固有振动并进一步借助摩擦耦合推动转子运动的共振式驱动器. 超声电机具有结构简单、设计灵活、功率密度高、低速大转矩/推力、响应快、断电自锁、无电磁干扰和不受电磁干扰等优点^[1-2], 受到国内外的广泛关注.

在各种超声电机中, 行波型超声电机被研究得

最多, 且应用最广^[3-5]. 至今已研制出多种结构的行波超声电机, 最具代表性的是贴片式环形行波超声电机. 该类电机采用环形金属弹性体粘贴压电陶瓷薄片的方式进行激励, 受压电陶瓷的 d_{31} 模式机电耦合效率低、陶瓷材料抗拉强度低、胶层的强度和疲劳寿命不理想等的限制, 该类超声电机的机械输出能力受到严重制约, 难以满足空间机构和机器人关节等领域直接驱动的需求.

收稿日期: 2012-01-10. 作者简介: 刘英想(1982—), 男, 讲师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875057, 51105097); 机器人技术与系统国家重点实验室自主课题资助项目(SKLR200901A04); 教育部博士学科点专项科研基金资助项目(20102302110007).

网络出版时间: 2012-06-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120619.2223.007.html>

为了提高超声电机的输出特性,近年来国内外学者都将研究重点转移到了夹心式超声电机领域^[6-10].夹心式超声电机采用压电陶瓷高机电耦合系数的 d_{33} 模式工作,可有效改善电机的转换效率.通过螺栓给压电陶瓷元件施加一定的预压力,保证陶瓷一直工作在压应力的状态,从而使其可以采用高幅电压激励,可显著提高电机的输出能力.此外,采用螺栓预紧的结构形式有效地避免了贴片式电机中胶层的存在所带来的诸多不利影响.鉴于夹心式超声电机的独特优势,本文提出一种纵振复合双足直线超声电机,通过 3 个换能器纵向振动的合理组合实现双足直线致动.在分析了电机工作原理的基础上,对电机进行了设计与仿真,最后制作了样机,测试了其输出特性.

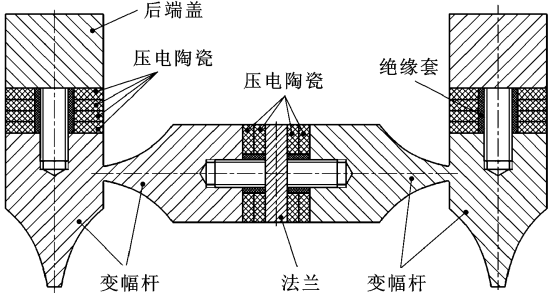
1 电机的结构及工作原理

图 1 为本文提出的纵振复合双足直线超声电机结构图.该电机包含两个竖直纵振换能器和一个水平纵振换能器,每个竖直换能器包含一个变幅杆,水平换能器的两个变幅杆设置在两端,水平换能器变幅杆小端面与竖直换能器变幅杆大端侧面结合,竖直换能器变幅杆末端为驱动足.变幅杆为采用一整块硬铝合金加工而成的一体件,不仅简化了结构和加工工艺,也可消除采用其他方式联接两个变幅杆对电机振动所带来的不利影响.对于竖直换能器,采用带螺柱的后端盖实现压电陶瓷和变幅杆之间的紧固,水平换能器则采用两侧带螺柱的法兰实现紧固.法兰和变幅杆一体件初始装配时均为圆形截面预制件,装配完成后切削至设计的形状和尺寸,后端盖同样为圆形截面预制件,第二次装配后切削至设计的形状和尺寸.水平换能器法兰侧面中心位置加工有锥形定位孔,用于实现电机的夹持.

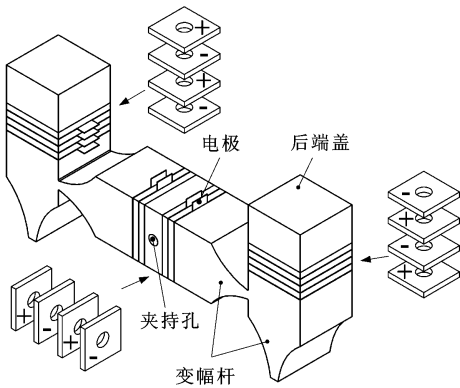
图 2 为纵振复合双足直线超声电机一个振动周期内的振型变化顺序.该电机采用两相交流电压进行激励,两个竖直换能器采用一相交流电压进行激励,水平换能器则施加另外一相交流电压,对应在换能器中均激励出纵向的伸缩振动.竖直换能器纵向振动对应引起驱动足处质点竖直方向的位移,且所采用图 1b 所示的压电陶瓷极化布置,保证两个驱动足竖直方向位移在时间上具有 180° 相位差.水平换能器的纵向振动会在两个竖直换能器中耦合出弯曲振动,最终在驱动足处获得水平方向的位移,且两个驱动足水平方向位移在时间上的相位差同样为 180° .当两个纵振模态的特征频率一致时,每个驱动

足处均可以通过两个同频正交振动的复合实现椭圆轨迹振动的激励.

图 2 中,电机振型按 1-2-3-4 的顺序变化,对应在两个驱动足处均合成出顺时针的椭圆振动轨迹,当施加一定的预压力使得动子与两个驱动足接触后,接触面间所产生的摩擦力会推动动子实现向右运动.通过调整两相激励电压的相位差,可以实现电机振动状态为 1-4-3-2,从而在两个驱动足处合成出顺时针的椭圆振动轨迹,最终可实现反向致动输出.



(a) 电机剖面图



(b) 电机立体图和压电陶瓷极化示意图

图 1 超声电机结构图

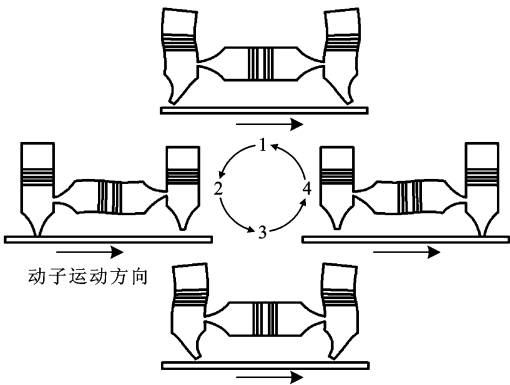


图 2 一个周期内的电机振型变化

48 h,图 6 为样机照片. 采用多普勒激光测振仪 (PSV-400-M2,Polytec,Germany)对样机振动模态进行测定,获得两个基本振动模态的振型和频率响应曲线,测定结果见图 7. 模态 A 测试过程中,选取竖直换能器外侧面为测试面;模态 B 测试过程中,选取两个竖直换能器后端盖末端面为测试面.

图 7a 表明,竖直换能器中激励出的弯曲振动为具有 3 个波节的弯振,图 7c 表明,两个后端盖在竖

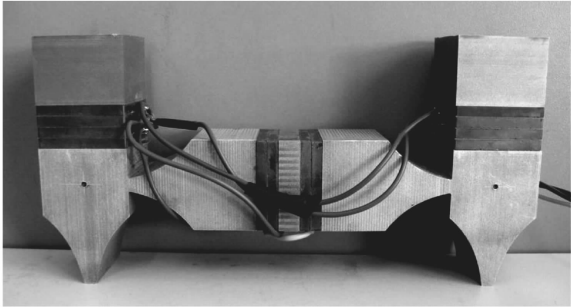
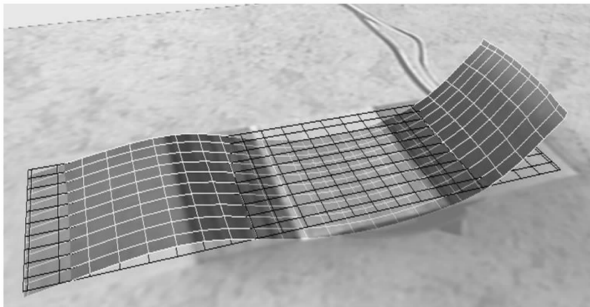
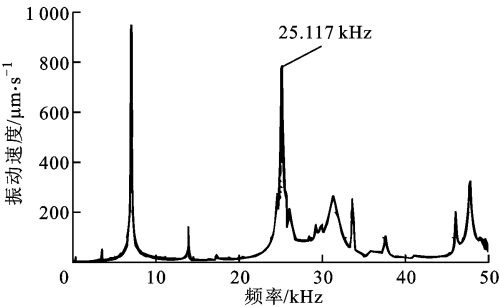


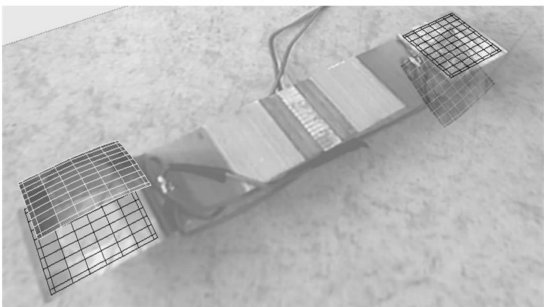
图 6 电机样机照片



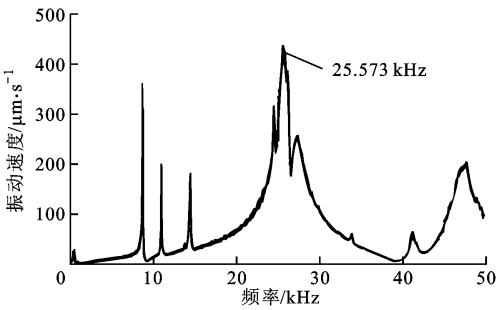
(a)模态 A 振型



(b)模态 A 振动速度响应曲线



(c)模态 B 振型



(d)模态 B 振动速度响应曲线

图 7 电机振动测试结果

直方向的振动具有 π 的相位差,振动测试结果得到的振型和模态分析结果得到的振型相吻合. 图 7c 中振型同时表明,竖直换能器的后端面在振动时相对初始位置出现了一定角度的偏转,这说明竖直换能器的振动不是单一的纵振,而是叠加有一定程度的弯振. 由于竖直换能器二阶弯振和一阶纵振谐振频率十分接近,且电机加工装配误差使得竖直换能器上压电陶瓷所施加的预压力并不均匀,因此压电陶瓷的伸缩振动在激励换能器纵振的同时也会耦合出较为微弱的弯振. 图 7b 和图 7d 表明,模态 A 和模态 B 的特征频率分别为 25.117 kHz 和 25.573 kHz,测定结果与有限元结果之间的偏差分别为 0.089 kHz 和 0.403 kHz,样机两个基本振动模态特征频率之间的偏差为 456 Hz. 电机有限元模型中选用的材料参数与实际参数之间的偏差、加工误差以及装配误差都会导致这种特征频率偏差的产生.

最后,对电机机械输出特性进行了测试,图 8 为所设计的实验平台. 通过一个滑轮机构的细线吊装不同质量的砝码来施加外载荷,细线另一端固定于动子末端,光电码盘通过支架固定于基座上,固定于码盘输出轴上的转轮与动子侧面接触,电机工作时动子带动转轮转动,通过码盘实现转速的测量,并

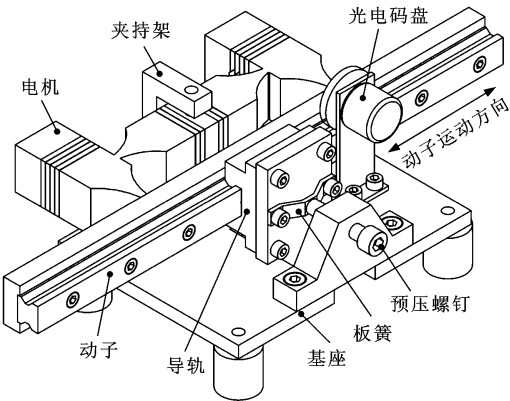


图 8 实验平台结构示意图

进一步通过换算得到电机的直线速度。

图9为不同预压力条件下电机样机速度与推力的实验曲线。实验测定过程中,两相激励电压频率为25.30 kHz,幅值为200 V,相位差为 90° ,测试时,将1 mm厚摩擦片通过粘贴方式固定于两个驱动足驱动表面。测试结果表明:电机的最高速度为602 mm/s,最大输出推力为32 N。

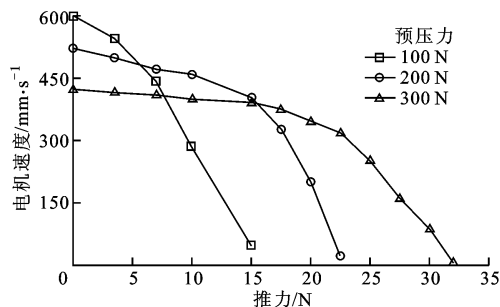


图9 电机速度与推力实验曲线

4 结 论

本文研制了一种纵振复合双足直线超声电机,分析了该电机的工作原理。运用有限元方法对电机进行了设计,实现了两个基本振动模态特征频率的简并,并获得了对应的输入阻抗特性。电机的模态振型和振动测试结果均表明,换能器的振动状态是一种纵弯复合振动,其中纵振是由压电陶瓷的 d_{33} 模式激励产生的,是一种主动的振动,弯振则是由竖直换能器和水平换能器之间的耦合引发的,属于一种被动的振动。制作的样机经测试得到最大速度为602 mm/s,最大推力达32 N。值得注意的是,样机两个基本振动模态谐振频率存在456 Hz的偏差,这一偏差的存在使得实际工作时驱动足的水平和竖直振动不能同时达到最佳,在一定程度上影响了电机机械输出能力的提高。如何进一步提高样机两个谐振频率的一致性将是后续研究的一个重点。

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, 2007:1-10.
- [2] 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.

- [3] LI Xia, CHEN Weishan, XIE Tao, et al. Novel high torque bearingless two-sided rotary ultrasonic motor [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2007, 8(5):786-792.
- [4] 王光庆,郭吉丰. 行波型超声波电机的温度特性[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(9):98-104.
WANG Guangqing, GUO Jifeng. Temperature performance study of traveling-wave type ultrasonic motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(9):98-104.
- [5] 李有光,陈在礼,陈维山,等. 柱面驱动新型行波超声电机的研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(11):1391-1393.
LI Youguan, CHEN Zaili, CHEN Weishan, et al. Novel traveling wave ultrasonic motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(11):1391-1393.
- [6] 赵学涛,陈维山,郝铭. 纵弯复合多自由度超声电机的研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(8):107-111.
ZHAO Xuetao, CHEN Weishan, HAO Ming. Ultrasonic motor with longitudinal-bending hybrid vibration modal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(8):107-111.
- [7] 石胜君,姚郁,陈维山,等. 具有模态解耦构型的纵弯直线超声电机[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(8):101-105.
SHI Shengjun, YAO Yu, CHEN Weishan, et al. Longitudinal and bending hybrid linear ultrasonic motor with modal decoupling structure [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(8):101-105.
- [8] 刘英想,刘军考,陈维山,等. 纵振换能器式圆筒型行波超声电机[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18):83-88.
LIU Yingxiang, LIU Junkao, CHEN Weishan, et al. Cylindrical traveling wave ultrasonic motor using longitudinal sandwich transducers [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(18):83-88.
- [9] LIU Yingxiang, CHEN Weishan, LIU Junkao, et al. A rotary ultrasonic motor using bending vibration transducers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(10):2360-2364.
- [10] LIU Yingxiang, CHEN Weishan, LIU Junkao, et al. A cylindrical traveling wave ultrasonic motor using longitudinal and bending composite transducer[J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2010, 161(1/2):158-163.

(编辑 杜秀杰)