

扇形直线超声电机的结构设计*

姚志远¹, 赵妹淳², 江超¹, 简月¹, 胡正旭¹

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

(2. 南京陆军指挥学院实验中心 南京, 210045)

摘要 为了探索板结构直线超声电机的设计方法, 提出一种新型板结构直线超声电机。该电机的定子为4个兰杰文振子构成的扇形结构, 有利于提高空间的利用效率和增加电机的能量密度。兰杰文振子有明确的纵振节点, 这有利于电机的夹持。提出了电机定子结构形式, 分析其运动机理, 并研制了样机。实验结果表明, 该电机运行平稳, 最大推力为15.3 N, 运行速度为1.2 m/s, 推重比为5.4。

关键词 超声电机; 直线超声电机; 结构设计; 兰杰文振子

中图分类号 TH117.1

引言

直线超声电机因结构简单、直接驱动、重量推力比大、定子惯性小、响应快、断电自锁、可控制好和定位精度高等优点, 在航空航天和精密驱动等领域有着广泛的应用前景, 研究受到广泛关注^[1-3]。国、内外直线超声电机的研究发展快速。文献[4]最早提出了两种行波型直线超声电机: 一种是直梁式, 另一种是环梁式。为了产生行波, 在梁的两端各连接一个兰杰文振子用于激振与吸振, 以防止行波的反射。当施加电压时, 直梁上会产生行波推动定子运动。实际上该种电机不可能形成纯的行波, 因此其性能受到限制。文献[5-6]直接使用两个相互垂直的兰杰文振子, 在驱动足处相互连接, 设计了驻波直线超声电机, 其结构简洁、运行效率高。该电机最大输出力为51 N, 最大速度为3.5 m/s, 最大能量密度为76 W/kg, 最大效率为28%, 此时输出力为39 N。李朝东等^[7]最早使用一个兰杰文振子设计直线超声电机。该电机作为仿生机器人, 最大速度为0.08 m/s, 可搭载的最大负载为15 N。杨东等^[8]提出一种改进的V形直线超声电机, 该电机利用两垂直兰杰文振子的纵、弯振动, 在其驱动足处形成椭圆运动, 推动定子运动; 采用超声变幅杆结构的兰杰文振子, 放大定子驱动足处的振幅; 当预压力为50 N时, 电机的最大空载速度为235 mm/s, 最大输出力为21.4 N, 定子质量为87.3 g, 推重比为

25。文献[9]提出了一种大功率夹心式纵弯复合直线超声电机。该电机定子主体结构由2个顶端相连的指数形变幅杆组成, 在连接处设有驱动足。该电机的最大速度为1 280 mm/s, 最大推力为45 N。以上直线超声电机的最大特点是直接利用1个或2个兰杰文振子构造直线超声电机的定子, 而兰杰文振子是结构最简单、效率最高的振动发生器。另外, 兰杰文振子有明确的振动节点, 以兰杰文振子的节点作为直线超声电机定子的夹持点, 解决了直线超声电机夹持难的关键技术。

笔者在直线超声电机结构设计的基础上, 探讨利用多个兰杰文振子构造直线超声电机的设计方法。提出由4个兰杰文振子构成的、扇形结构的直线超声电机, 分析了电机的运行机理, 并通过有限元方法优化其结构。研制了扇形直线超声电机的样机, 并通过实验研究其运行特性。

1 电机的结构设计

V形直线超声电机利用2个兰杰文振子, 结构简单, 但空间利用率低。本研究重在发展复杂的定子结构形式, 以提高定子所占空间的利用率。

1.1 定子结构

板形直线超声电机的结构扁平, 适合电机小型化。2004年, 许海研制了矩形板结构的直线超声电

* 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2D11CB707602); 国家自然科学基金资助项目(51275229, 50975136)

收稿日期: 2011-10-06; 修改稿收到日期: 2012-01-10

机,该电机利用了矩形板的纵振和弯振。由于板结构振动的复杂性,使得这类电机很难处理压电陶瓷的布置位置、驱动足的布置位置和夹持点的选择这3个关键技术。

笔者设计的板结构直线超声电机其设计思想是利用4个兰杰文振子围绕中点按照确定的角度展开成扇形结构,4个兰杰文振子在中点相连接并形成驱动足。由于兰杰文振子有明显的纵振节点,因此将压电陶瓷片布置在兰杰文振子的节点处,同时其夹持点也设计在节点。图1为扇形直线超声电机的定子结构图。直线超声电机的定子由65锰材料制作,通过线切割一次加工而成。在其最外边的2个兰杰文振子的节点处设计夹持元件,该夹持元件为柔性铰链结构,代替弹簧施加预压力。由于夹持元件定子是一次加工而成,通过夹持元件支持的电机不存在间隙,有利于电机结构的稳定和实现纳米级定位。

每个兰杰文振子在节点处和上、下两个面粘帖2片压电陶瓷片。每片压电陶瓷片的极化方向是由定子表面指向内部。对于4个兰杰文振子,左边的2个兰杰文振子为一组,形成电机的A项;右边的2个兰杰文振子为另一组,形成电机的B项。图2为电机的压电陶瓷片极化配置方案。

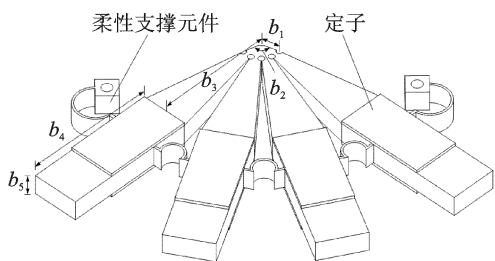


图1 扇形直线超声电机的定子结构图

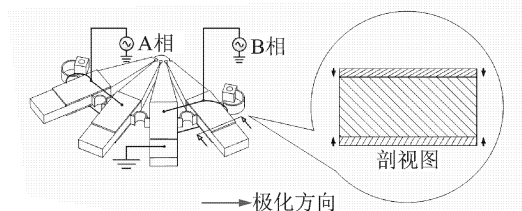


图2 电机的压电陶瓷片极化配置方案

1.2 电机工作原理

定子的A项2个兰杰文振子施加相同的交变电场,它们激发同步的纵向振动。当A和B两项作同步振动(同时伸长和收缩)时,定子(驱动足)呈现在y方向上的振动称为对称模态;当A和B两项作异步振动(A项伸长和B项收缩)时,定子(驱动足)呈现

在x方向上的振动称为反对称模态。由于定子的A、B两项在空间上有一定角度,因此它们在空间是相交的。为了使A、B两项在时间上相交,对A项施加正弦电场,对B项施加余弦电场。在电场作用下同时激发定子的对称模态和反对称模态。由于对称模态响应与反对称模态响应的幅值不相等,因此驱动足的运动轨迹为椭圆。在定子与动子间施加适当的预压力,使动子与定子的驱动足相接触,通过摩擦力作用,定子的驱动足驱动动子做直线运动。图3为电机的工作原理图。

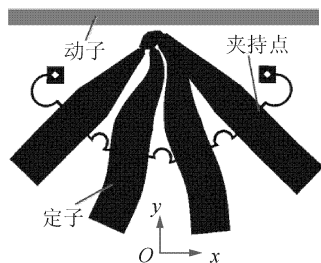


图3 扇形直线超声电机的结构原理图

1.3 定子结构优化设计

电机的拓扑结构具体设计方案为:a.定子采用扇形结构,其特征尺寸在60mm之内;b.定子为扁平结构,厚度在5~10mm内,采用贴片方式粘帖压电陶瓷片;c.采用柔性铰链作为夹持方式,夹持点在节点处;d.电机的工作频率为30~45kHz;e.对称模态与反对称模态之差在1kHz之内;f.在80V电场作用下,定子驱动足处的振幅大于 $2\mu\text{m}$ 。

图1为电机定子的几何结构参数图。在设计中由于压电陶瓷片已经确定,因此兰杰文振子的宽度为16mm,不能改变。能够设计的参数为定子的半径 b_1 、长度 b_3 、长度 b_4 、厚度 b_5 和兰杰文之间的夹角 b_2 等。表1为定子的设计参数和设计范围。

表1 定子的设计参数

设计参数	b_1/mm	$b_2/(\text{°})$	b_3/mm	b_4/mm	b_5/mm
参数范围	5~8	105~135	38~45	40~50	6~9

优化模型为

$$\min_x |f_1 - f_2| \quad x \in \Xi \quad (1)$$

其中: $x = \{b_1, b_2, \dots, b_5\}^T$; Ξ 为表2规定的约束; f_1, f_2 为对称模态和反对称模态频率。

笔者利用有限元计算定子结构的振动响应和模态参数。理论上将可以利用Ansys的参数化语言APDL进行编程和优化计算,但对于扇形定子结构

其振动模态复杂,机械识别其不同模态是困难的,且全部通过有限元计算工作量大。因此,笔者利用有限元计算结合响应面方法对结构进行优化设计。

在结构参数设计范围 E 内,随机地选择 20 组结构参数 x_i ,通过有限元计算出相应的 $(f_1 - f_2)_i$ 。通过试验 $\{x_i, (f_1 - f_2)_i\}_{i=1}^{20}$ 构造响应面函数为

$$(f_1 - f_2) = G\{x\} \quad (2)$$

式(2)为变量的二次函数,通过它计算出模型的最优解。计算结果为半径 $b_1 = 6 \text{ mm}$;角度 $b_2 = 120^\circ$;长度 $b_3 = 40 \text{ mm}$;长度 $b_4 = 45 \text{ mm}$;厚度 $b_5 = 7 \text{ mm}$ 。

2 实验研究

依据优化结果,加工出扇形直线超声电机的样机如图4所示。经测试,该电机的定子质量为 270 g,当驱动电压峰峰值为 300 V 时,电机的最大推力为 15.3 N,最大速度为 1.2 mm/s。

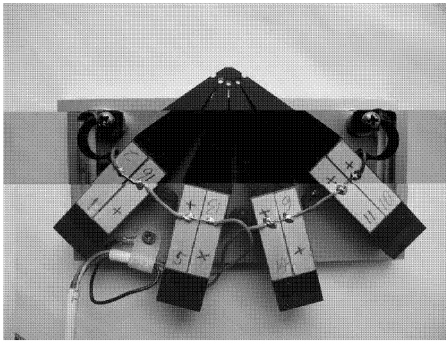


图4 扇型直线超声电机的结构原理图

2.1 定子的振动特性

采用德国 polytec 公司的 PSV300F-B 型高频扫描激光测振系统对定子进行扫频实验。定子的 A 项振动频率为 38.02 kHz, B 项振动频率为 38.05 kHz,驱动足处振幅为 6 μm , 振动速度为 1.6 m/s。图5

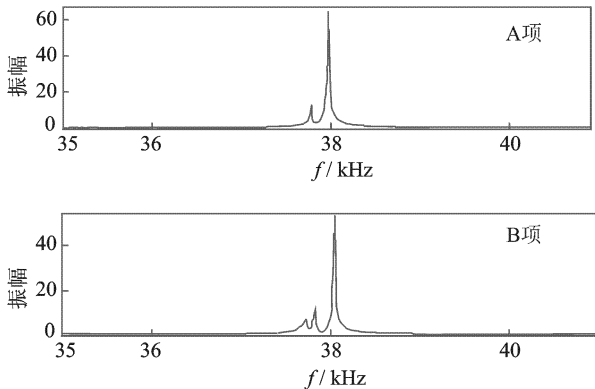
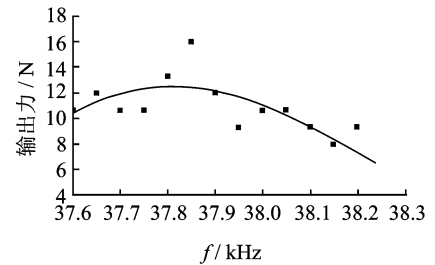


图5 定子A, B项振动的扫频图

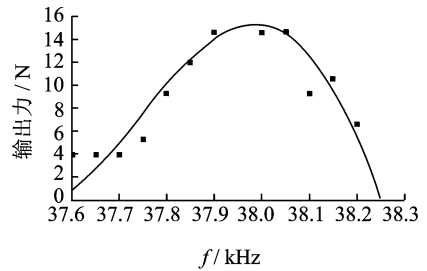
为定子的A, B项扫频图,图5表明,定子的两项频率一致,振动模态附近无干扰模态。

2.2 电机的运行特性

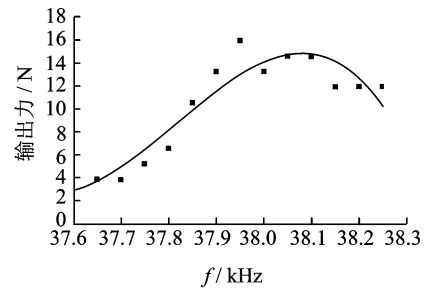
利用信号发生器和功率放大器驱动扇形直线超声电机,研究电机的输出力和运行速度随预压力 and 驱动频率的变化规律。图6为电机在预压力分别为 30, 40, 50 和 60 N 下的推力随频率的变化关系。图7为电机在预压力分别为 30, 40, 50 和 60 N 下的速度随频率的变化关系。



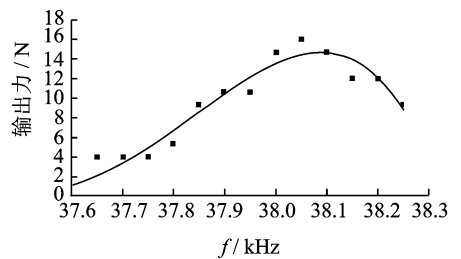
(a) 预压力为30 N



(b) 预压力为40 N



(c) 预压力为50 N



(d) 预压力为60 N

图6 预压力为 30~60 N 下推力随工作频率的变化关系

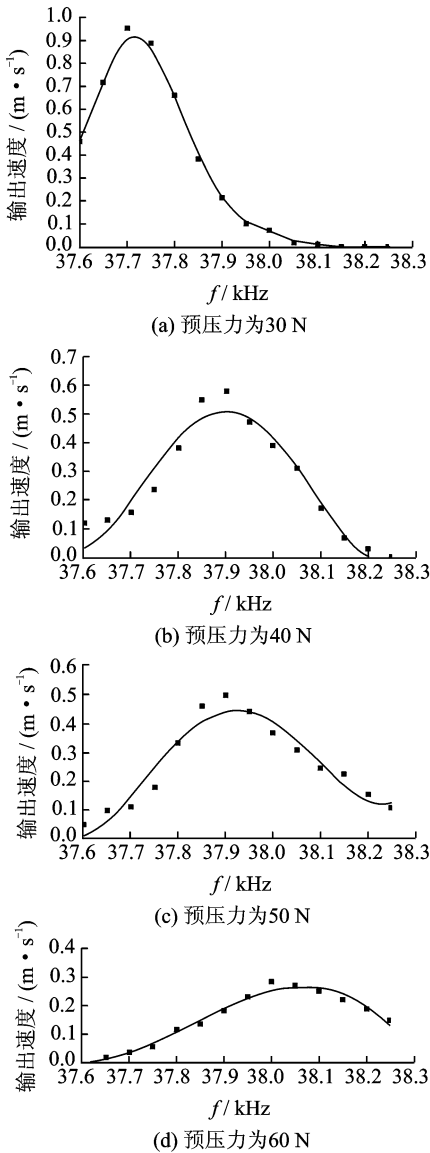


图7 预压力为30~60 N下速度随工作频率的变化关系

4 结束语

提出一种新型板结构直线超声电机。该电机的定子为4个兰杰文振子构成的扇形结构,它有利于提高空间的利用效率,增加电机的能量密度。提出的直线超声电机总体上为板结构电机,局部使用了兰杰文振子,具有杆结构直线超声电机的特点,它解决了传统板结构很难处理压电陶瓷、驱动足布置位置和夹持点的选择3个关键技术。实验结果表明,该电机运行平稳,最大推力为15.3 N,运行速度为1.2 m/s,推重比为5.4。

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] Yao Zhiyuan, Zhao Chunsheng, Zeng Jinsong, et al. Analytical solution on the non-linear vibration of a traveling wave ultrasonic motor [J]. Journal of Electroceram, 2008, 20: 251-258.
- [3] 姚志远, 吴辛, 赵淳生. 行波超声电机定、转子接触状态实验分析 [J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(4): 388-391.
- Yao Zhiyuan, Wu Xin, Zhao Chunsheng. Test of contact interface properties of stator and rotor in traveling wave ultrasonic motors [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(4): 388-391. (in Chinese)
- [4] Tokiya W, Minopu K K, Toshiro H. Transducer for an ultrasonic linear motor with flexible driving part [C] // IEEE Ultrasonic Symposium. Miyagi, Japan: [s. n.], 1998: 683-685.
- [5] Kurosawa M K, Kodaira O, Tsuchitoi Y, et al. Transducer for high speed and large thrust ultrasonic linear motor using two sandwich-type vibrators [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(5): 1188-1195.
- [6] Yun C H, Ishii T, Nakamura K, et al. A high power ultrasonic linear motor using a longitudinal and bending hybrid bolt-clamped langevin type transducer [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2001, 40(5B): 3773-3776.
- [7] 李朝东, 姚华, 裴仁清, 等. 仿生步行小型直线超声电机 [J]. 微特电机, 2001, 6: 10-11.
- Li Chaodong, Yao Hua, Pei Renqing, et al. Small-sized bionic foot ultrasonic linear motor [J]. Small & Special Electrical Machines, 2001, 6: 10-11. (in Chinese)
- [8] 杨东, 姚志远. 双变幅杆V形直线超声电机研究 [J]. 压电与声光, 2009, 31(5): 685-687.
- Yang Dong, Yao Zhiyuan. Research on V-shape linear ultrasonic motor based on amplitude amplifier pole [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(5): 685-687. (in Chinese)
- [9] 石胜君, 陈维山, 刘军考, 等. 大推力推挽纵振弯纵复合直线超声电机 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 55-61.
- Shi Shengjun, Chen Weishan, Liu Junkao, et al. A high power ultrasonic linear motor using push-pull longitudinal and bending multimode transducer [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(9): 55-61. (in Chinese)



第一作者简介: 姚志远, 男, 1961年6月生, 博士、教授。主要研究方向为结构动力学分析、超声电机技术。曾发表《杆结构直线超声电机的结构设计和功率流分析》(《中国电机工程学报》2009年第24期)等论文。
E-mail: zyyao@nuaa.edu.cn