

直线超声电机柔性夹持元件的设计

胡 宁 姚志远 赵文涛

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

摘要:设计了一种带有柔性铰链的直线超声电机夹持元件,夹持元件的两边和中间带有圆弧柔性铰链。两边的柔性铰链起弹簧作用,以便施加合适的预压力;中间的柔性铰链能够消除定子装配中的附加应力,减小定子装配对定子振动模态的影响。利用有限元方法分析了柔性铰链的变形量与预压力的关系。实验结果表明,直线超声电机夹框的位移与预压力成线性关系,并与有限元计算结果一致。柔性夹持元件装配的定子没有干扰模态,两相模态一致性好,并具有线性的边界条件。

关键词:直线超声电机;夹持元件;柔性铰链;结构稳定性

中图分类号:TM356

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.09.018

Design of Clamping Components for a Linear Ultrasonic Motor

Hu Ning Yao Zhiyuan Zhao Wentao

State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: A new clamping component was put forward for a linear ultrasonic motor, which had circular flexible hinges on both sides and in the middle. The flexible hinges on both sides acted as the mechanical spring to exert proper pre-pressure; the flexible hinge in the middle was designed to eliminate the subsidiary stress in the stator and to reduce the impact on vibration modal of the stator. The research results show the relationship between the distortion of flexible hinges and the pre-pressure is linear by using finite element method. Experimental results are found that the displacement of the clamping components is of linear relation with the pre-pressure, which coincides with the calculated results. In conclusion, the two phase modal of the stator assembled by the clamping components coincides well. The stator has no interference modal, and has linear boundary conditions.

Key words: linear ultrasonic motor; clamping component; flexible hinge; structural stability

0 引言

因具有结构简单、可直接驱动、重量推力比大、定子惯性小、响应快、断电自锁、可控制性好和定位精度高等优点,直线超声电机在航空航天和精密驱动等领域有着广阔的应用前景,它的研究受到广泛关注^[1-3]。1983年,日本学者最早提出了两种行波型直线超声电机^[4]。1998年,日本Wakai等^[5]研制了一种高速、大推力直线超声电机。该电机最大输出力为51N,最大速度为3.5m/s。2004年,Hemsel等^[6]研制出一款新型的基于面内振动的直线电机,该电机也有良好的输出特性。

随着直线超声电机运行机理研究的不断深入和定子结构设计方法的完善,直线超声电机的输出力和速度有了进一步提高。其后的研究重点是提高电机结构的稳定性、运行的平稳性和效率,以便

提高电机的控制精度。利用柔顺机构改善电机结构的稳定性是一种发展方向。近几年来,一些国内外超声电机专家把柔顺机构引入超声电机领域中进行了相关研究^[7-8]。Wakai等^[5]采用柔顺铰链设计直线超声电机定子的驱动足,提高了直线超声电机的输出效率。Lee等^[9]设计的直线超声电机也采用横向柔性支撑来固定超声电机定子。

本文以V形直线超声电机^[10-11]的夹持元件为研究对象,采用柔性铰链替代预压力弹簧,将柔性圆弧段(柔性铰链)和弹性支持臂背结合为一体,设计了带有柔性铰链的直线超声电机夹持元件;研究了夹框位移与预压力之间的相互关系,以及柔性铰链对定子振动的影响规律。

1 柔性夹持元件的设计

传统直线超声电机将弹簧和弹性元件作为夹持元件,在弹簧与弹性元件的连接中会存在间隙,这种间隙构成了定子振动系统的非线性边界,增加了振动系统的非线性,从而导致系统运行状态的不稳定。

收稿日期:2011-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975136);国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB707602);NSFC—广东联合基金重点资助项目(U0934004)

为了解决传统直线超声电机夹持元件存在的上述问题,简化电机结构,提出运用柔性铰链代替弹簧来设计夹持元件。以 V 形直线超声电机夹持元件的设计为研究对象,设计了结构为 U 形的夹持元件。该夹持元件主要由臂尾、柔性圆弧段和支持臂组成,臂尾通过螺栓与夹框连接,支持臂通过连接螺栓与定子相连。支持臂与臂尾的厚度为 2mm,中间与两端柔性圆弧的厚度为 0.7mm,其材料为 65Mn,如图 1 所示。

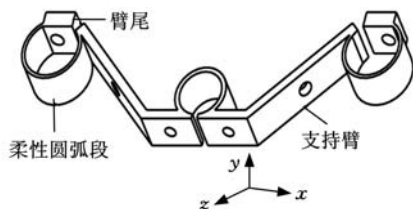


图 1 柔性夹持元件

夹持元件两端的圆弧形柔性铰链的作用是代替弹簧,以便实现合适预压力的加载,并保持定子振动的线性弹性边界。中间的柔性圆弧铰链是为了消除定子装配中的装配应力,消除干扰模态。

图 2 是利用该夹持元件组装的 V 形直线超声电机结构图。其中的夹框能够在动子移动的方向上移动,通过控制夹框与动子的相对位置实现对预压力的加载和控制。

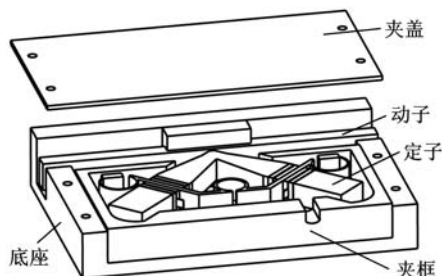


图 2 具有柔性夹持的直线超声电机

2 柔性夹持元件结构参数的理论计算

在柔性夹持元件的设计中,柔性铰链圆弧的厚度 t 是关键结构参数。采用有限元方法分析了整个电机的定子及外框在不同柔性铰链圆弧厚度下,外框的位移随预压力的变化规律。选取了三种柔性铰链圆弧的厚度,分别为 0.6mm、0.7mm、0.8mm。

在 ANSYS 计算中,采用 Solid45 单元进行网格划分,划分后的网格如图 3 所示。图 3 所示的结构左右夹框取固支边界,在施加载荷时,固定外框左右两端,限制其位移。根据实际需要,对电机定子驱动足施加 0~100N 的预压力 F ,通过 ANSYS 计算出柔性铰链最大变形量。

柔性铰链的施压变形过程应该属于“大位移、

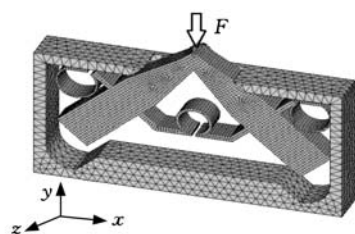


图 3 有限元网格划分

大转动、小应变”的大变形问题,定子的位移与预压力呈现非线性关系。本文利用“large displacement static”计算,其计算结果如图 4 所示。

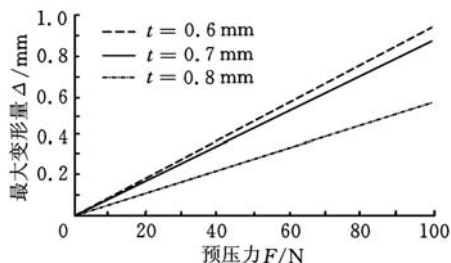


图 4 有限元分析的柔性铰链的变形曲线

由图 4 可知,柔性铰链的弹性系数随着圆弧厚度增大而增大;预压力在 0~100N 的小范围内,定子的位移与预压力具有(近似的)线性关系。 $t = 0.6\text{mm}$ 时,弹性系数为 $k_1 = 105 \text{ N/mm}$; $t = 0.7\text{mm}$ 时,弹性系数为 $k_2 = 117 \text{ N/mm}$; $t = 0.8\text{mm}$ 时,弹性系数为 $k_3 = 169 \text{ N/mm}$ 。 $t = 0.6\text{mm}$ 和 $t = 0.7\text{mm}$ 时,柔性铰链的弹性系数满足变形要求。考虑到柔性圆弧的结构强度,最后选用柔性铰链圆弧片厚度为 0.7mm 作为最佳方案。

3 夹持元件力学特性实验研究

通过理论设计,采用 65Mn 材料加工出柔性铰链夹持元件,并装配出 4 台直线超声电机定子进行实验,以研究柔性铰链对定子振动特性的影响。

3.1 夹持元件的弹性系数

定子通过夹持元件固定在夹框上,夹框能够沿 y 方向移动。在预压力的作用下,夹框沿 y 方向向动子移动,当驱动足和动子接触后,夹持元件臂尾处的柔性圆弧段发生变形。当固定夹持元件后,由于柔性圆弧段的变形,使得定动子之间在接触点处产生预压力。通过测量整个夹框随预压力增大所产生的位移,绘出图 5。图 5 表明,柔性夹持元件在预压力作用下,其变形量呈线性变化,并且两台电机的夹持元件有相同的弹性系数。预压力与夹持元件变形量的线性变化关系表明,柔性铰链能够代替弹簧施加预压力。柔性铰链的使用消除了传统夹持元件与夹框间存在的间隙。

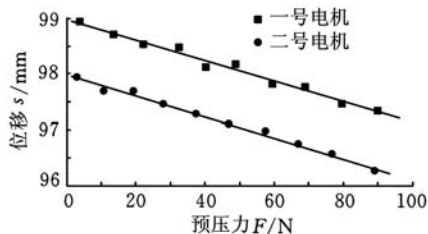


图 5 预压力—位移图

3.2 夹持元件支持下的振动特性

夹持元件的结构形式会对定子的振动特性产生影响。图 6 所示为中间没有柔性圆弧的夹持元件,该夹持元件在定子的装配过程中,产生附加内应力,导致定子的振动模态发生变化。

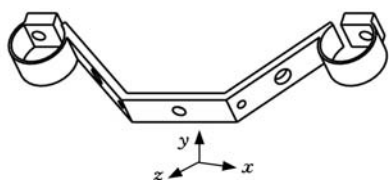
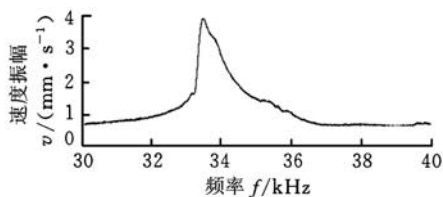
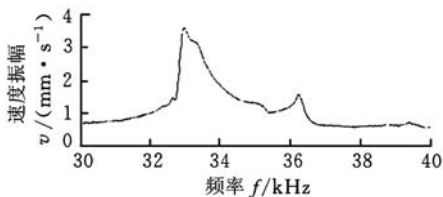


图 6 中间没有柔性圆弧的夹持元件

定子 3 和定子 4 是由图 1 所示的夹持元件构成的定子,而定子 5 和定子 6 是由图 6 所示的夹持元件构成的定子。采用德国 Polytec 公司生产的 PSV-300F-B 型高频扫描激光测振系统测试其振动模态,图 7~图 10 依次为定子 3~6 的两相振型扫描图。



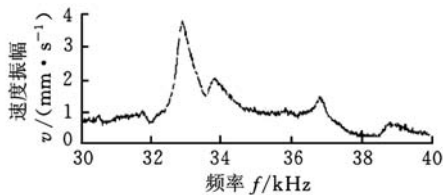
(a) 定子 3 的 A 相振型



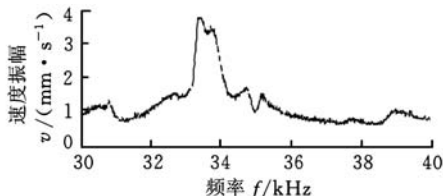
(b) 定子 3 的 B 相振型

图 7 定子 3 的两相振型图

从图 7~图 10 中可以看出,定子 5 和定子 6 容易产生干扰波峰,并且两相模态频率相差很大,定子之间的振动频率的差距也大。定子 5 两相波形不一致,定子 6 两相频率差距为 4kHz。上述问题的出现是由于该夹持元件中间的刚性大,在施加预紧力时,产生了装配应力,改变了定子的模态。而定子 3 和定子 4 的两相模态是一致的,没有出现大的干扰模态。这说明在施加预紧力时,夹持元件中间的柔性圆弧消除了装配应力。

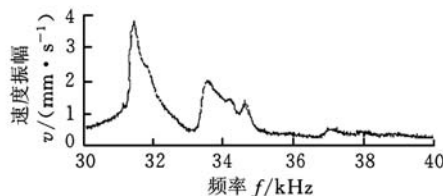


(a) 定子 4 的 A 相振型

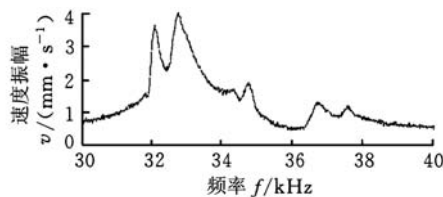


(b) 定子 4 的 B 相振型

图 8 定子 4 的两相振型图

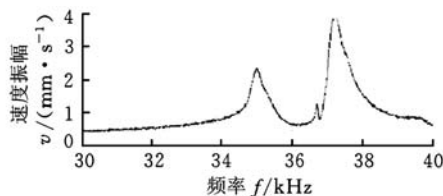


(a) 定子 5 的 A 相振型

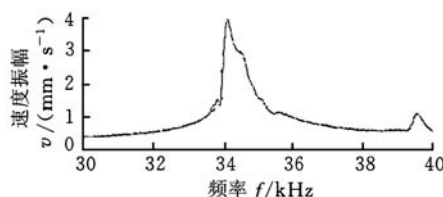


(b) 定子 5 的 B 相振型

图 9 定子 5 的两相振型图



(a) 定子 6 的 A 相振型



(b) 定子 6 的 B 相振型

图 10 定子 6 的两相振型图

4 结论

(1) 利用柔性铰链代替弹簧设计直线超声电机的夹持元件,能够简化电机的结构。运用有限元软件分析了夹框位移与预压力之间的关系。计算结果表明,柔性圆弧的最佳厚度为 0.7mm。

(下转第 1098 页)

参考文献:

- [1] Boada M, Calvo J A, Boada B L, et al. Modeling of a Magnetorheological Damper by Recursive Lazy Learning[J]. Int. J. Non-Linear Mech., 2011, 46(3): 479-485.
- [2] Sevki C, Tahsin E. Modeling and Testing of a Field-controllable Magnetorheological Fluid Damper[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010, 5(3): 1036-1046.
- [3] Peter J N, Neild S A, Wagg D J. Quasi-active Suspension Design Using Magnetorheological Dampers [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(10): 2201-2219.
- [4] Cho S W, Jo J S, Jang J E, et al. A Smart Passive Damping System for Stay Cables[C]//Smart Structures and Materials 2006; Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems. San Diego, USA; SPIE, 2006: 1-6.
- [5] Ahmadian M, Pare C. A Quarter-car Experimental Analysis of Alternative Semiactive Control Methods [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2000, 11(3): 604-612.
- [6] Gordaninejad F, Kelso S P. Fail-safe Magneto-rheological Fluid Dampers for Off-highway, High-payload Vehicles [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2000, 11(5): 395-406.
- [7] Potter J N, Neild S A, Wagg D J. Quasi-active Suspension Design Using Magnetorheological Dampers [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(4): 2201-2219.
- [8] 李锐, 陈伟民, 余妙, 等. 汽车磁流变悬架垂直振动控制与试验研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(17): 2132-2138.
- [9] 邹得和. 德尔福的新一代 MagneRide 磁流变阻尼可调减振器[J]. 汽车与配件, 2008, 20(9): 34-35.
- [10] 陆正刚, 郭慧明. 柔性车辆振动和运行平稳性控制研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(10): 1026-1031.
- [11] Bois H D. The Magnetic Circuit in Theory and Practice[M]. London: Longmans, 1896.
- [12] 周云, 谭平. 磁流变阻尼控制理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

(编辑 陈 勇)

作者简介: 蒋学争, 男, 1984 年生。南京理工大学机械工程学院博士研究生。主要研究方向为磁流变结构振动半主动控制和振动能量捕获技术。发表论文 6 篇。胡红生, 男, 1976 年生。南京理工大学机械工程学院博士后研究人员, 嘉兴学院机电工程学院副教授。宋宏伟, 男, 1986 年生。南京理工大学机械工程学院硕士研究生。王 灵, 男, 1964 年生。南京理工大学机械工程学院教授、博士研究生导师。

(上接第 1091 页)

(2) 预压力在 0~100N 的小范围内, 定子的位移与预压力呈现线性关系, 它表明柔性铰链能够作为线性弹簧用于夹持元件中。柔性铰链的使用消除了因弹簧支撑而存在的夹持元件和夹框间的间隙, 也消除了定子振动的非线性边界。另外, 夹持元件与夹框为固支连接, 提高了电机结构的稳定性。

(3) 夹持元件中间的柔性圆弧能够消除装配应力, 减小因定子装配对定子振动模态的影响。基于柔性铰链的夹持元件的使用能够改善定子的振动特性, 提高电机运行的稳定性。

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] 曾劲松, 姚志远, 赵淳生. 超声电机中的非线性现象研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(10): 1047-1050.
- [3] 李玉宝, 时运来, 赵淳生. 新型大推力直线超声电机运动机理及实验研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(24): 2912-2916.
- [4] 见诚尚志, 指田年生. 超音波モータ入门[M]. 东京: 总和电子出版社, 1991.
- [5] Wakai T, Kurosawa M K, Higuchi T. Transducer for an Ultrasonic Linear Motor with Flexible Driving Part[C]//IEEE Ultrasonic Symposium. Miyagi, Japan, 1998: 683-685.
- [6] Hemsell T, Mracek M, Wallaschek J, et al. A Novel Approach for High Power Ultrasonic Linear Motors[J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 2004, 2: 1161-1164.
- [7] Paros J M, Weisboro I. How to Design Flexure Hinges[J]. Machine Design, 1965, 37(27): 151-157.
- [8] 吴鹰飞, 周兆英. 柔性铰链的设计计算[J]. 工程力学, 2002, 19(6): 136-140.
- [9] Lee Y M, Kim W S. A High Power and Precision Ultrasonic Linear Motor with Lateral Flexible[J]. Towards Synthesis of Micro Nano Systems, 2007, 2(A4): 101-106.
- [10] 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): 685-688.
- [11] 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.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 胡 宁, 男, 1984 年生。南京航空航天大学航空宇航学院硕士研究生。主要研究方向为直线超声电机。姚志远, 男, 1961 年生。南京航空航天大学航空宇航学院教授、博士研究生导师。赵文涛, 男, 1984 年生。南京航空航天大学航空宇航学院硕士研究生。