

基于有限元法的驻波型直线超声波电机 振动特性分析*

蒋春容, 谭宇渲, 周良志, 陆旦宏

(南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 采用有限元法研究一种驻波型直线超声波电机的振动特性。建立了电机的三维有限元模型, 在有限元模型的基础上对电机进行模态分析, 得到了电机横向一阶弯曲振动的共振频率, 并分析了驱动足的位置对共振频率的影响。在模态分析的基础上, 给电机通以高频交流电进行谐波响应分析, 研究电机在外加电源作用下的横向弯曲振动的振幅以及驱动足尖的运动轨迹。制作了驻波型直线超声波电机样机, 对样机进行阻抗-频率特性测试, 测试结果验证了理论分析结果。

关键词: 直线超声波电机; 驻波型; 有限元法; 弯曲振动; 驱动足

中图分类号: TM 302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)02-0062-04

Dynamic Analysis of Standing Wave Type Linear Ultrasonic Motor Based on Finite Element Method*

JIANG Chunrong, TAN Yuxuan, ZHOU Liangzhi, LU Danhong

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The dynamics of a standing wave type linear ultrasonic motor was studied based on finite element method. The three-dimensional finite element model of the motor was established, based on which the modal analysis was conducted. The resonance frequency of the first order transverse bending vibration was obtained, and the impact of the driving feet position on the resonance frequency was analyzed. On the basis of modal analysis, high frequency alternative current was then applied to the motor, and harmonic analysis was conducted. The amplitudes of transverse bending vibration stimulated by the applied source as well as the trajectories of the driving tips were investigated. A prototype of the standing wave type linear ultrasonic motor was fabricated and its impedance-frequency characteristic was measured. The measurement results verified the analytical results.

Key words: linear ultrasonic motor; standing wave type; finite element method; bending vibration; driving feet

0 引言

超声波电机利用压电陶瓷的逆压电效应, 将高频交流电转换为弹性体的超声振动, 进而通过摩擦传动输出驱动力矩, 具有动态响应快、低速大转矩、断电自锁、电磁兼容性好等优点^[1-2], 在精密仪器、航空航天、医疗器械等领域具有广阔的应

用前景。超声波电机结构设计灵活多变, 利用压电陶瓷不同的极化方式和弹性体不同的振动模态, 可以构造出多种不同结构的超声波电机, 直线超声波电机就是其中的一种。单就直线超声波电机而言, 其本身也有多种不同的结构类型。迄今为止, 国内外学者都对直线超声波电机进行了研究^[3-6], 在电机的结构设计、输出特性的试验验证

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51507076); 江苏省自然科学基金项目(BK20140766); 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金项目(XTCX201610)

作者简介: 蒋春容(1983—), 女, 博士, 研究方向为超声波电机建模及驱动控制技术。

等方面取得了一定成果。

在超声波电机的设计和分析中,电机的振动特性对电机的性能具有重要影响^[7]。文献[8-10]采用解析法建立了行波型超声波电机定子振动模型,分析了定子的振动特性。文献[11-12]基于有限元法分析了行波型超声波电机定子的结构动力学特性。文献[13]对一种纵弯复合型直线超声波电机振动模态进行了有限元分析,归纳了电机结构参数对驱动振子谐振频率的影响以及实现纵向和弯曲两种振动模态合并的一般规律。文献[14]对双向驻波型直线超声波电机进行了研究,理论分析了驱动振子表面质点的运动和驱动力的产生,对驱动振子的结构及其在各种约束下的振动情况进行了分析。

目前,对于行波型超声波电机的基础理论研究和应用开发工作相对较为成熟,但对驻波型直线超声波电机的理论研究则相对较欠缺。本文研究了一种驻波型直线超声波电机,基于有限元法分析了电机的振动特性,包括电机的工作模态及谐振频率,以及电机在特定外加电源作用下的振幅,分析了电机驱动足的运动轨迹及驱动机理,并制作样机进行测试,用测试结果验证理论分析结果。

1 电机结构

驻波型直线超声波电机的结构如图1所示。电机主要由压电陶瓷和振动体构成,压电陶瓷粘接在振动体的上表面,在振动体的下表面设置有两个驱动足1和2。电机的工作模态为横向一阶弯曲振动模态,振动体上有两个振动节点A和B,驱动足1和2分别设置在振动节点A和B的左侧,给电机通以单相高频交流电,电机向左直线运动。若反之,驱动足1和2分别设置在振动节点A和B的右侧,则电机通电后向右直线运动。

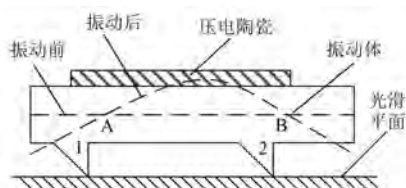


图1 驻波型直线超声波电机结构

2 有限元模型

在有限元计算软件 ANSYS 14.0 中建立驻波

型直线超声波电机的有限元模型,以分析电机的振动特性。振动体材料为不锈钢,其弹性模量为 180 GPa、泊松比为 0.288、密度为 7 850 kg/m³。压电陶瓷的材料为 PZT-502,其密度为 7 700 kg/m³,柔度系数矩阵 S^E 、压电常数矩阵 d 和介电系数矩阵 ϵ^T 分别为

$$S^E = \begin{bmatrix} 15.40 & -4.72 & -8.47 & 0 & 0 & 0 \\ -4.72 & 15.40 & -8.47 & 0 & 0 & 0 \\ -8.47 & -8.47 & 18.40 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 50.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 50.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 40.24 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$$

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 5.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5.8 & 0 & 0 \\ -1.75 & -1.75 & 4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-10} \text{ m/V}$$

$$\epsilon^T = \begin{bmatrix} 1049 & 0 & 0 \\ 0 & 1049 & 0 \\ 0 & 0 & 811 \end{bmatrix} \times \epsilon_0$$

其中, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

振动体扣除两个驱动足后为等直梁,其长、宽、高分别为 30、10、5 mm。驱动足高 3 mm,并与振动体等宽。图1中,驱动足1设置在离振动体左端 2 mm处,驱动足2设置在离振动体右端 7.5 mm处。压电陶瓷的长、宽、高分别为 17、10、0.5 mm。

根据以上材料参数和结构参数,建立电机的三维有限元模型,如图2所示。沿长度、宽度和高度方向分别为 X 轴、 Y 轴和 Z 轴方向。采用了 SOLID5 单元划分网格,划分单元数 13 640,节点数 15 960。

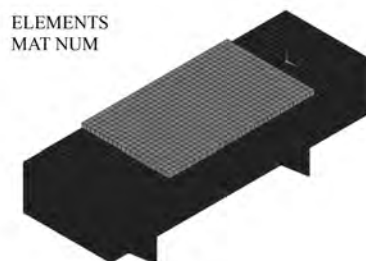


图2 有限元模型

3 理论分析结果与试验验证

3.1 模态分析结果

首先,进行模态分析以获得电机横向一阶弯曲振动的共振频率。在压电陶瓷的上下表面施加电压为零的边界条件,选择 Block Lanczos 法求解,计算得到电机横向一阶弯曲振动的振型,如图 3 所示。横向一阶弯曲振动的共振频率为 25.45 kHz。为了分析驱动足的位置对横向一阶弯曲振动频率的影响,建立了驱动足在不同位置时的有限元模型,分别计算横向一阶弯曲振动频率。计算结果表明,驱动足越靠近振动节点,横向一阶弯曲振动的共振频率越大;反之,驱动足越远离振动节点,横向一阶弯曲振动的共振频率越小。



图 3 电机横向一阶弯曲振动的振型

3.2 谐响应分析结果

对电机进行谐响应分析以获得电机在外加激励电源作用下振动的幅值。谐响应分析时在压电陶瓷的上下表面施加幅值为 50 V、频率为 25.45 kHz 的正弦交流电,设置阻尼比常量 0.01,并选择 Full 法进行求解,计算得到电机横向一阶弯曲振动的幅值。选取振动体底面中部沿长度方向不同位置 X 处的点为代表,其横向一阶弯曲振幅 U_{zm} ,如图 4 所示。在电机中部位置,振幅达到 $1.1 \mu\text{m}$;电机两端位置,振幅达到 $2.0 \mu\text{m}$ 。

驱动足是电机输出驱动力的关键环节,因此驱动足的运动轨迹对电机的性能至关重要。在上述外加激励电源作用下,驱动足尖在 XOZ 平面的运动轨迹如图 5 所示。图 5 中驱动足尖 1 和 2 分别对应于图 1 中的驱动足 1 和 2 与光滑平面接触的部位, U_x 和 U_z 分别是沿 X 轴和 Z 轴方向的位移。两个驱动足尖的运动轨迹为直线。由于驱动足 1 比驱动足 2 离振动节点更远,因此驱动足尖

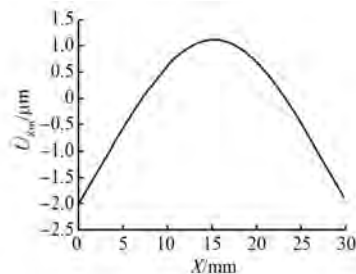


图 4 横向一阶弯曲振动的振幅

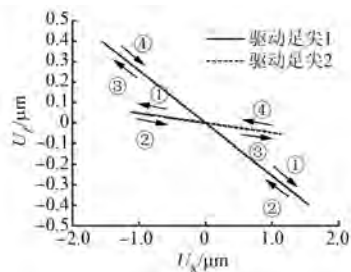


图 5 驱动足尖的运动轨迹

1 的振幅比驱动足尖 2 的振幅大。电机通电后,振动体发生横向弯曲变形,驱动足尖 1 先向右下方移动,驱动足尖 2 向左上方移动(对应于图 5 中过程①),两个驱动足尖同时到达各自的最大位移处,然后分别向反方向运动(对应于图 5 中过程②),直到回到原始点,此时振动体横向弯曲变形量回到零。接着振动体往反方向发生横向弯曲变形,驱动足尖 1 向左上方移动,驱动足尖 2 向右下方移动(对应于图 5 中过程③),到达最大位移后,两个驱动足尖又分别反向移动(对应于图 5 中过程④),直至回到原始点。可见,在电机行进过程中,两个驱动足轮流驱动电机往前运动,并且为了获得更大的行进速度,两个驱动足应适当远离振动节点的位置以使驱动足尖有更大的振幅。

3.3 试验验证

为验证理论分析结果,制作了驻波型直线超声波电机样机,如图 6 所示。为便于加工,也为了方便验证驱动足对共振频率的影响,驱动足单独加工



图 6 驻波型直线超声波电机样机

制作,而后通过胶水粘接在振动体底部。由于胶粘层很薄,其对电机振动模态的影响可以忽略^[15]。

对样机进行阻抗-频率特性测试,采用美国安捷伦公司的阻抗特性分析仪(型号 4294A)进行扫频,扫频范围 20~50 kHz,两个驱动足设置在如图 1 所示的位置处。扫频得到的阻抗模值和阻抗角随频率变化的关系如图 7 所示。由图 7 可知,电机横向一阶弯曲振动的共振频率为 25.15 kHz,而理论计算结果为 25.45 kHz,二者基本吻合。调整驱动足的位置进行扫频,结果显示驱动足越靠近振动节点,一阶弯曲振动的共振频率就越大,驱动足越远离振动节点,一阶弯曲振动的共振频率就越小,与理论计算结果相一致。

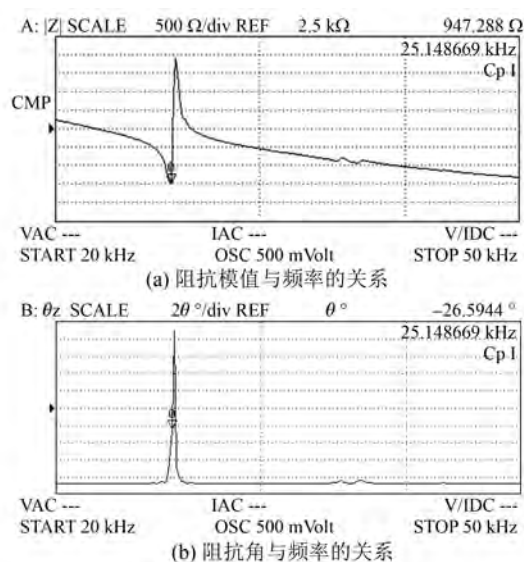


图 7 样机的阻抗-频率特性

4 结 语

本文建立了驻波型直线超声波电机的三维有限元模型,基于有限元模型对电机进行了模态分析,得到了电机横向一阶弯曲振动的共振频率,并分析了驱动足的位置对共振频率的影响,结果表明,驱动足越靠近振动节点,横向一阶弯曲振动的共振频率就越大。在得到了电机的横向一阶弯曲振动的共振频率后,给电机通以共振频率的正弦交流电进行谐振响应分析,得到了电机横向弯曲振动的振幅以及驱动足尖的运动轨迹。驱动足尖的运动轨迹为直线,离振动节点越远,驱动足尖的振幅越大,两个驱动足轮流驱动电机向前运动。为了验证理论分析结果,制作了驻波型直线超声波

电机样机,测量了样机的阻抗-频率特性,测量结果与理论计算结果相吻合,验证了理论分析结果。

【参 考 文 献】

- [1] 蒋春容,张津杨,董晓霄,等.中空环形行波超声波电机试验研究与改进设计[J].电机与控制应用,2016,43(7): 40-44.
- [2] 陈强,徐志科,蒋春容,等.双足驱动双压电晶片直线超声波电机运行机理研究[J].振动与冲击,2014,33(22): 21-25.
- [3] LE A Y, MILLS J K, BENHABIB B. Improved linear ultrasonic motor performance with square-wave based driving-tip trajectory [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(3): 1-7.
- [4] WAI R J, SU K H. Supervisory control for linear piezoelectric ceramic motor drive using genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 657-673.
- [5] LI X, YAO Z Y, WU R C. Modeling and analysis of stick-slip motion in a linear piezoelectric ultrasonic motor considering ultrasonic oscillation effect [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016 (107): 215-224.
- [6] 岳玉秋.一种新型直线超声波电机的结构设计及模型研究[D].杭州:浙江工商大学,2015.
- [7] 莫岳平,胡敏强,金龙,等.振动模态与超声波电机性能关系的研究[J].电工技术学报,2002,17(3): 7-11.
- [8] NAKAGAWA Y, SAITO A, MAENO T. Nonlinear dynamic analysis of traveling wave-type ultrasonic motors [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, 55(3): 717-725.
- [9] YAO Z Y, ZHAO C S, ZENG J S, et al. Analytical solution on the non-linear vibration of a traveling wave ultrasonic motor [J]. Journal of Electroceramics, 2008, 20(3/4): 251-258.
- [10] 王光庆,陆国丽,郭吉丰.基于能量等效的行波型超声波电动机解析模型[J].机械工程学报,2008,44(2): 74-81.
- [11] LIU Y X, LIU J K, CHEN W S. A cylindrical traveling wave ultrasonic motor using a circumferential composite transducer [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(11): 2397-2404.

(下转第 101 页)

电机转子永磁体外表面采用多层无纬带绑扎,无纬带一般分为聚酯树脂浸渍型和环氧树脂浸渍型两种。无纬带是指使用上述材料加工制成的半干状预浸胶带,不导电、不导磁,不会对电机的电磁性能产生影响,并可增强电机转子结构的强度和刚度。定子绕组采用树脂灌封,提高电机定子结构的刚度,避免电机在运行过程中由于机械振动和电磁振动而引起电机定子绕组的松动,同时可以提高绕组绝缘可靠性,延长电机的使用寿命。

5 结 语

本文基于 Ansys、MATLAB/Simulink 仿真软件,对永磁同步力矩电机进行多领域分析。分析如何通过优化转子永磁体和定子开槽抑制电机转矩脉动,通过 Ansys Maxwell 3D 仿真电磁转矩脉动。基于 Ansys Workbench 对定子铁心进行模态仿真,预测结构的固有频率;仿真电机不同转速下转子结构的离心应力和形变量,校核电机空载最高转速运行时的可靠性;基于 Ansys Simplorer 平台对电机与控制系统的电磁性能进行联合仿真,考虑控制系统电子元器件非线性对电机牵引系统转矩脉动的影响。最后,分析介绍了样机采用的加工工艺,进一步提高电机的可靠性。

【参考文献】

- [1] 梁爽.低速永磁力矩电机转矩波动测试方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [2] BOJOI R, LAZZARI M, PROFUMO F, et al. Digital field oriented control for dual three-phase induction motor drives [C] // Industry Applications Conference, 2002 Ias Meeting Conference Record of the IEEE, 2003: 818-825.
- [3] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社,2016.

- [4] 张宝振,彭宝营.永磁同步力矩电机转矩波动分析建模研究[J].制造业自动化,2017,39(2): 123-128.
- [5] ZHANG Y J, JING L B, LI C J, et al. Semi-analytical method for air-gap main magnetic field computation of direct drive permanent magnet torque motors [C] // Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on, 2011: 1-4.
- [6] LI Y X, WANG T, ZHANG W. Dynamic performance analyze of swing angle torque permanent magnet motor under different structure and winding parameters [C] // IEEE International Conference on Information and Automation, IEEE, 2015: 1804-1807.
- [7] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等.高速永磁电机转子不同保护措施强度分析[J].中国电机工程学报, 2013,33(增刊1): 195-202.
- [8] ISLAM M, ISLAM R, SEBASTIAN T. Noise and vibration characteristics of permanent magnet synchronous motors using electromagnetic and structural analyses [C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE, 2011: 3399-3405.
- [9] YIM K H, JANG J W, JANG G H, et al. Forced vibration analysis of an IPM motor for electrical vehicles due to magnetic force[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 2981-2984.
- [10] PAN Q, HUANG F, CHEN J, et al. High-speed, low-friction piezoelectric motors based on centrifugal force [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 2158-2167.
- [11] 陈伯时.矢量控制与直接转矩控制的理论基础和应用特色[J].电力电子, 2004(1): 5-9.
- [12] ZHANG Y, XIA B, YANG H. Performance evaluation of an improved model predictive control with field oriented control as a benchmark [J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(5): 677-687.

收稿日期: 2017-05-18

(上接第 65 页)

- [12] 夏长亮,郑尧,史婷娜,等.行波接触型超声波电机定子振动有限元分析[J].中国电机工程学报, 2001, 21(2): 25-28, 32.
- [13] 张铁民,刘落实,梁丽英.纵弯复合型直线超声电机振动模态有限元分析[J].中国机械工程, 2006, 17(3): 251-254.

- [14] 钱孝华.双向驻波型直线超声波电机[D].杭州:浙江大学, 2006.
- [15] 石斌,胡敏强,朱壮瑞.粘结层对超声马达定子振动特性的影响[J].中国电机工程学报, 2001, 21(7): 72-77.

收稿日期: 2017-05-09