

文章编号: 1000-5013( 2007) 03 0232- 03

# 行波超声波电机定子固有频率分析及实验

孙学亮, 洪尚任, 李强松, 陈建毅, 李君余

( 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021 )

**摘要:** 应用有限元方法, 建立行波型超声波电机的定子结构的有限元模型, 分析定子齿高、齿宽与槽宽比等不同结构参数对定子固有频率和定子振动的影响. 结果表明, 定子环从“无齿”到“有齿”变化, 固有频率下降较快; 随着齿高的增加, 固有频率变化趋缓, 却有助于增大振幅、提高电机转速; 齿宽和槽宽比在设计时, 宜取大于 1. 在自行研制的实验平台上, 对所设计制作的行波型超声波电机样机的定子频率进行实验测定, 发现有限元分析与实验测试结果相符合.

**关键词:** 超声波电机; 定子; 振动分析; 有限元法

**中图分类号:** TM 359. 903. 3      **文献标识码:** A

与电磁式电机相比, 超声波电机具有结构简单、体积小、驱动响应速度快、低转速大扭矩, 以及抗电磁干扰和具有自保持力矩等优点, 在精密机械和控制领域具有广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>. 超声波电机定子结构中, 定子环外圈均匀开有齿槽, 可以将压电陶瓷机械振动的振幅放大, 提高电机的转速, 因此, 齿的设计是影响电机性能的重要因素之一. 为优化定子结构设计, 文[3-4]利用有限元方法, 分析了行波型超声波电动机定子的固有频率以及强迫振动响应; 文[5]利用有限元方法, 分析了定子转子接触对超声波电动机定子振动模式的影响; 文[6-7]分析了行波电机不同尺寸的定子支撑对其性能的影响. 本文是在建立定子有限元模型的基础上, 分析定子不同结构参数对定子固有频率和定子振动的影响, 并对所制作的样机进行对比实验.

## 1 定子固有频率的有限元分析及实验测定

本文应用 ANSYS 8. 0 有限元软件, 采用 8 节点六面体单元, 其边界条件: 定子内圈节点固定, 外圈自由, 建立的行波型超声波电机定子有限元分析模型, 如图 1 所示. 定子材料的主要参数如表 1 所示. 表中,  $E$  为弹性模量,  $\rho$  为密度,  $\sigma$  为泊松比. 本文分别在  $B_{05}$  和  $B_{09}$  振动模式(图 2) 下, 对所设计制作的不同结构参数的行波型超声波电机样机定子进行分析, 求得定子固有频率值. 另外, 我们还搭建了实验平台, 对各种样机的共振频率进行了实验测定. 该实验平台是将虚拟仪器和计算机控制技术结合起来, 研制的一种超声波电机的测控系统, 主要通过 RS-232 串行口总线与计算机组成虚拟仪器系统. 图 3 为实验平台的结构框图. 整个测控系统, 主要由计算机、直接数字频率合成( Digital Direct Frequency Synthesis, DDS) 信号源、数据采集卡( DAQ2501)、电机驱动电路( 功率放大电路) 和直流电源等装置组成. 其中, DDS 信号发生器提供超声波电机运行需要的两路信号, 计算机和超声波电机的驱动电源的通信, 是

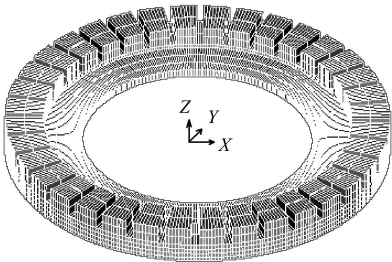


图 1 定子有限元分析模型  
Fig. 1 Finite element analysis mode of stator

表 1 定子材料参数

Tab. 1 Material parameter of stator				
名称	材料	$E/ \text{GPa}$	$\rho/ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\sigma$
弹性体	黄铜	107	8 500	0. 373
压电陶瓷	TY- 8	82	7 600	0. 330

收稿日期: 2006-10-19

作者简介: 孙学亮( 1980- ), 男, 硕士研究生, 主要从事机电系统设计的研究; 通信作者: 洪尚任( 1944- ), 男, 教授, E-mail: srhong@ hqu. edu. cn.

基金项目: 国务院侨办科研基金资助项目( 04QZR10)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

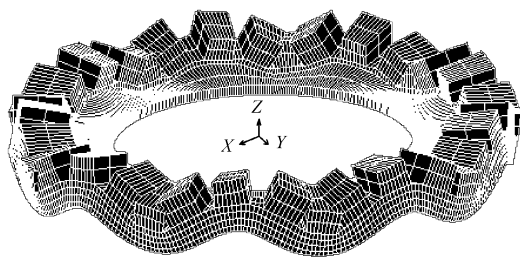


图 2 定子的 B<sub>09</sub> 振动模式

Fig. 2 B<sub>09</sub> vibration mode of stator

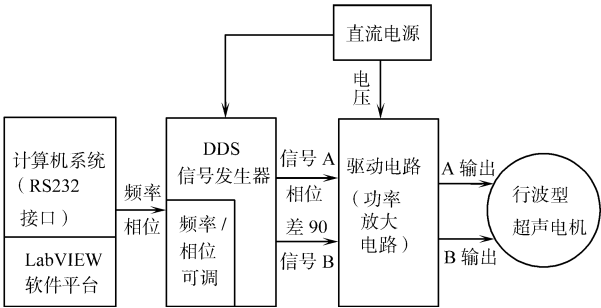


图 3 实验系统框图

Fig. 3 Block diagram of experimental system

通过 RS-232 串行口总线来实现将上下位机的串行通信的. 有限元分析求得的固有频率, 以及通过实验测得的共振频率(含定子不同结构参数值), 如表 2 所示. 表中,  $D$  为定子外径,  $d$  为定子内径,  $B$  为弹性

表 2 样机定子的结构参数及其振动频率

Tab. 2 Structure parameter and vibration frequency of prototype stator

模态	$D/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$B/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$f_0/\text{kHz}$	$f/\text{kHz}$	$\varepsilon/(\%)$
$B_{09}$	50	40	5.0	1.0	2.0	51.321	52.01	1.3
	50	40	3.5	0.5	1.2	55.365	56.45	2.0
$B_{05}$	30	20	3.5	0.5	1.2	50.867	50.30	1.1
	30	20	5.0	0.5	2.0	54.431	55.40	1.8
	30	20	5.0	1.0	1.2	74.037	72.65	1.9

$f$  为实测频率,  $\varepsilon$  为误差. 体厚度,  $t$  为压电陶瓷厚度,  $h$  为齿高,  $f_0$  为固有频率, 对比结果表明, 用有限元分析方法求得的固有频率与经实验所测得的共振频率基本一致, 误差均很小, 说明有限元方法是超声波电机定子振动分析的一种比较精确和可靠的分析方法.

2 齿高对定子固有频率的影响

定子齿设计的主要参数如图 4 所示. 图中,  $W$  为齿宽,  $g$  为槽宽,  $h$  为齿高,  $h_b$  为基厚,  $H$  为定子厚度,  $t$  为压电陶瓷厚度. 为了分析齿高对固有频率的影响, 按以上所设计的模式, 分析了定子振动固有频率随  $h/h_b$  的变化规律. 取表 2 中第 1 种方案, 即当  $H = 6\text{ mm}$ ,  $t = 1\text{ mm}$ ,  $W:g = 2:1$  时, 结果如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 在  $H$  不变的情况下, 随着齿高  $h$  和基厚  $h_b$  的比值增加, 振动频率呈下降趋势, 定子环从“无齿”到“有齿”之间, 固有频率下降较快. 随着齿高增加, 固有频率变化趋缓. 根据文[3]的研究结论, 齿高的增加, 可以在对定子环(复合梁)弯曲刚度和固有频率影响较小的情况下, 增大定子环的厚度, 从而使振幅增大, 使转子转速提高.

3 齿宽与槽宽比对定子固有频率的影响

为了讨论齿宽和槽宽比对固有频率的影响, 仍采用表 2 中第 1 种方案. 即当  $H = 6\text{ mm}$ ,  $t = 1\text{ mm}$ , 且固定  $h/h_b = 0.5$  时, 取齿宽和槽宽比( $W:g$ )分别为 4:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:4, 建立有限元模型, 分析求得固有频率  $f_0$  分别为 51.377, 51.487, 52.431, 53.495, 53.670 kHz. 齿宽和槽宽比( $W:g$ )与定子固有频率的关系, 如图 6 所示. 由图 6 可以看出, 随着

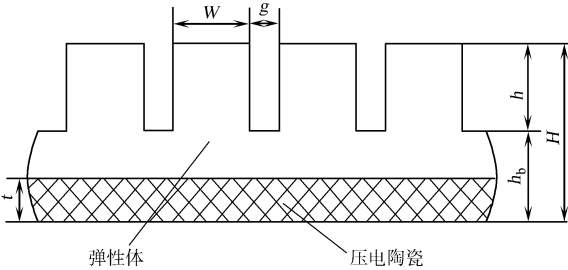


图 4 定子尺寸

Fig. 4 Size of the stator

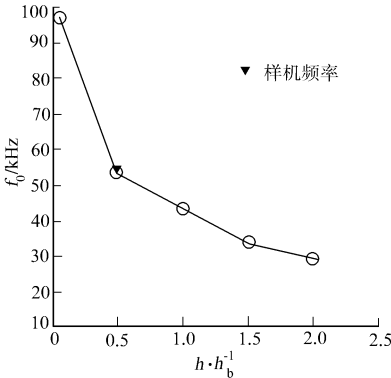


图 5 归一化齿高与固有频率关系曲线

Fig. 5 Normalized tooth height versus natural frequency

齿宽和槽宽比的增加, 定子固有频率整体上呈下降趋势, 且随着齿宽和槽宽比值的增加, 波动幅度逐渐减小. 从分析其模态的过程中可以看出, 齿宽与槽宽比大于 1 的模态要好. 因此, 在设计定子的时候, 宜取齿宽和槽宽比大于 1.

4 结 束 语

本文应用有限元方法, 对本实验室所设计制作的不同结构参数若干台样机定子固有频率进行了有限元分析. 计算结果与实验测试结果基本一致, 误差很小, 表明有限元方法用于超声波电机定子分析与设计的可靠性和准确性. 文中分析了定子齿的齿高变化, 以及齿宽与槽宽比变化对定子环固有频率的影响, 结果表明, 定子环从“无齿”到“有齿”变化, 固有频率下降较快, 随着齿高的增加, 固有频率变化趋缓, 却有助于增大振幅、提高电机转速; 齿宽和槽宽比设计时宜取大于 1. 这些结论对定子齿的结构设计有实际指导意义.

参考文献:

[ 1 ] 见城尚志, 指田年生. 超音波モーター入门[ M ]. 东京: 日本综合电子出版社, 1993: 194-200.

[ 2 ] 洪尚任. 超声波马达[ J ]. 自动化仪表, 1996, 17( 10 ): 1-4.

[ 3 ] 夏长亮, 郑 尧, 史婷娜, 等. 行波接触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.

[ 4 ] JEONG S H, LEE H K, KIM Y J, et al. Vibration analysis of the stator in ultrasonic motor by FEM[ M ]. Proceedings of the 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials [ Seoul ]: [ s. n. ], 1997: 1091-1094.

[ 5 ] TAKASHI M, TAKAYUKI T, AKIRA M. Finite element analysis of the rotor/ stator contact in a ring-type ultrasonic motor[ J ]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1992, 39( 6 ): 668-674.

[ 6 ] 徐志科, 胡敏强, 金 龙, 等. 超声波电动机定子支撑对其性能影响的有限元分析[ J ]. 电工技术学报, 2004, 19( 2 ): 10-14.

[ 7 ] 李君余. 行波型旋转超声波电机的建模与仿真[ D ]. 泉州: 华侨大学, 2005: 34-38.

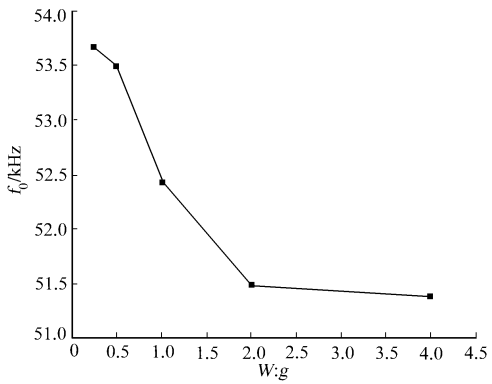


图 6 W : g 比值与定子振动频率关系图

Fig. 6 Values of W : g versus natural frequency

The Analysis and Experiment Comparison on Stator Natural Frequency of Traveling Wave Ultrasonic Motor

SUN Xue-liang, HONG Shang-ren, LI Qiang-song,  
CHEN Jian-yi, LI Jun-yu

( College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China )

**Abstract:** In this paper, the stator natural frequency of traveling wave ultrasonic motor is studied theoretically and experimentally. The stator structure of traveling wave ultrasonic motor is introduced. Finite Element Analysis method is used to build the stator prototype. From the stator perspective, the effect of different structural parameters on stator natural frequency and vibration is analyzed. Finally some comparative experiments on prototype motor are conducted on the experimental platform. Experimental results show good agreement with the finite element analysis.

**Keywords:** ultrasonic motor; stator; vibration analysis; finite element method

( 责任编辑: 黄仲一 )