

# 微小型驻波超声电机定子振动特性的仿真分析

陈建毅, 郑祝堂, 林星陵

(厦门城市职业学院 机械与自动化工程系, 福建 厦门 361008)

**摘要:**针对直径 $\varnothing 10$  mm的两种驻波型超声电机定子的振动特性进行有限元仿真分析。利用 ANSYS 有限元软件建立定子的有限元模型,进行了振动模态及谐响应的仿真分析,获得定子的主要振动模态、模态频率及振幅。探讨了2种压电陶瓷及定子长度对其谐振频率和振幅的影响。研究表明,驻波型超声电机定子上斜槽或斜齿结构可实现模态转换,是实现电机驱动的关键。在分析的两种驻波型超声电机的8个定子中,采用PZT4压电陶瓷材料、长度16 mm的斜槽式超声电机定子的振幅值最大。

**关键词:**超声电机;驻波型;振动模态;振幅;有限元

**中图分类号:**TM356

**文献标识码:**A

**DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2018.06.033

## Simulation Analysis of Stator Vibration Characteristics of Miniature Standing Wave Ultrasonic Motor

CHEN Jianyi, ZHENG Zhutang, LIN Xingling

(Dept. of Mechanical and Automatic Engineering, Xiamen City University, Xiamen 361008, China)

**Abstract:** In this paper, the vibration characteristics of two kinds of standing-wave ultrasonic motor stator with the diameter of  $\varnothing 10$  mm were simulated and analyzed by the finite element method. The models of the ultrasonic motor stator were established with ANSYS software. The finite element model of the stator was established by ANSYS finite element software. The vibration modal and harmonic responses were simulated and analyzed. The main vibration mode, modal frequency and amplitude of the stator were obtained. The effects of two kinds of piezoelectric ceramics (PZTs) and the stator lengths on the resonance frequency and amplitude were discussed. The results show that the slanting groove or helical tooth structure of the standing wave type ultrasonic motor can realize modal conversion, which is the key to realize motor drive. Among the eight stators of the two standing wave ultrasonic motors analyzed, the amplitude of the stator of the slanting groove ultrasonic motor with PZT4 piezoelectric material and length of 16 mm is the largest.

**Key words:** ultrasonic motor; standing wave; vibration modal; amplitude; finite element analysis

### 0 引言

超声电机(USM)是一种利用压电元件逆压电效应的新型微特电机。它通过压电陶瓷的逆压电效应将电能转换成定子的机械振动能(超声振动),经过定/转子的摩擦耦合转换成转子(或动子)的旋转运动(或直线运动)<sup>[1]</sup>。与传统电磁电机相比,超声电机具有结构简单,响应快,定位精度高,易于微小型化等优点。数毫米直径的微小型超声电机已开发试制,其体积可进一步减小,这为机构微型化提供了一条新思路,在各类精密仪器、光学系统及微机电系

统中有广泛的应用前景。如微小型超声电机已成功应用在照相机的调焦系统。

由于振动模式和驱动原理的不同,超声电机的结构形式种类较多<sup>[2-10]</sup>。驻波型超声电机利用压电振子的一阶纵振,通过压电振子的圆周上开有斜槽结构<sup>[2-4]</sup>或端面上设有斜齿结构<sup>[5]</sup>,实现模态转换,从而驱动转子旋转输出。其转换效率较高,适用于大力矩输出。由于驻波型超声电机定子上有斜槽或斜齿等复杂结构,在理论分析时,常需要进行一些简化,从而降低分析精度。本文采用 ANSYS15.0 有限元软件建立了两种微小型驻波超声电机定子的有

收稿日期:2018-01-11

基金项目:2014年福建省高校杰出青年科研人才培育计划基金资助项目(JA14424);厦门城市职业学院课题基金资助项目(KYKJ2017-2)

作者简介:陈建毅(1979-),男,福建厦门人,副教授,博士,主要从事超声电机开发的研究。

限元分析模型,模拟定子实际的振动模态,分析其振动频率和谐响应情况,探讨了 2 种不同压电陶瓷材料及 2 组定子长度对谐振频率和振幅的影响,为设计和制造同类型超声电机提供了依据。

1 定子的有限元模型

驻波型超声电机定子常采用夹心式压电换能器的结构形式,主要由前盖板、压电陶瓷片和后盖板组成,并通过预应力螺栓将三者连接起来。本文建立了直径 $\varnothing 10\text{ mm}$ 的 2 种驻波型超声电机定子的有限元模型如图 1、2 所示。图 1 中, $l_1$  为后盖板长、 $l_0$  为压电陶瓷长, $l_2$  为前盖板长, $l$  为定子总长,斜槽的轴向长 5.0 mm,宽 1.0 mm,深 1.25 mm,倾斜角为  $45^\circ$ ,环形阵列 6 个。图 2 中,前盖板端面上设有斜齿结构,斜齿的长 3.2 mm,宽 1.0 mm,厚 1.25 mm,倾斜角为  $80^\circ$ ,环形阵列 6 个。在图 1、2 中,后盖板、前盖板均选取 SOLID185 有限元单元,采用自由网格划分;中间 2 片压电陶瓷选取 SOLID5 有限元单元,采用 VSWEET 方式划分网格。前盖板的材料选用硬铝,后盖板的材料选用 45# 钢,定子材料的主要性能参数如表 1 所示。

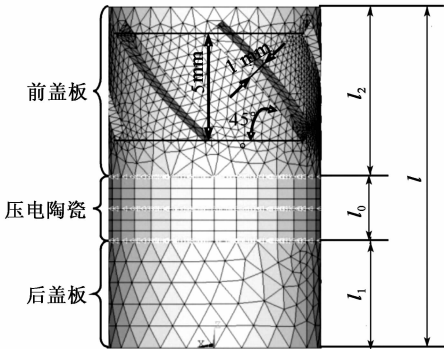


图 1 斜槽式超声电机定子的有限元模型

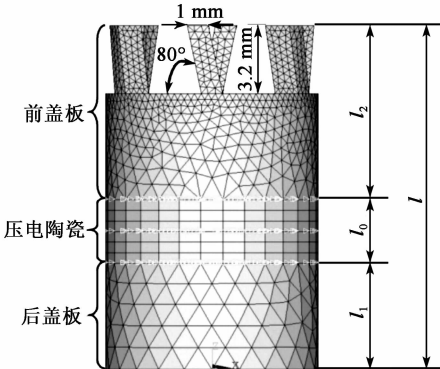


图 2 斜齿式超声电机定子的有限元模型

表 1 定子的材料参数

| 名称   | 材料    | 密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 弹性模量 $E/\text{GPa}$ | 泊松比 $\mu$ |
|------|-------|-------------------------------------------|---------------------|-----------|
| 前盖板  | 硬铝    | $2.7 \times 10^3$                         | 70.0                | 0.30      |
| 后盖板  | 45# 钢 | $7.8 \times 10^3$                         | 209.0               | 0.28      |
| 压电陶瓷 | PZT   | $7.6 \times 10^3$                         | 76.5                | 0.32      |

为了分析 2 种不同 PZT 材料及 2 组定子长度对 2 种微小型驻波型超声电机定子的模态频率和振幅的影响,本文选取 PZT4 和 PZT8 两种压电陶瓷材料,其刚度矩阵、压电矩阵、介电矩阵等属性见文献[6-7]。选取了 2 组不同定子长度,其尺寸参数如表 2 所示。

表 2 定子结构的主要尺寸

| 类型  | 名称   | $l_1/\text{mm}$ | $l_0/\text{mm}$ | $l_2/\text{mm}$ | $l/\text{mm}$ |
|-----|------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 斜槽式 | 定子 1 | 5               | 3               | 8.0             | 16.0          |
|     | 定子 2 | 11              | 3               | 16.0            | 30.0          |
| 斜齿式 | 定子 3 | 5               | 3               | 8.2             | 16.2          |
|     | 定子 4 | 11              | 3               | 19.2            | 33.2          |

2 振动特性分析

2.1 振动模态仿真分析

在分析求解过程中,选用了 ANSYS 模态特征值求解器的分块矩阵 Block Lanczos 法求解,得到 2 种微小型驻波型超声电机定子(选用 PZT4)前几阶的主要振型及模态频率情况如图 3、4 所示。由图可看出,2 种微小型驻波型超声电机定子有弯曲振动、扭转振动及纵向振动 3 种主要振动模态。行波型超声电机定子主要振动模态为弯曲振动<sup>[8-12]</sup>,显然这方面两者是有差别的。本文将重点分析 2 种微小型驻波型超声电机定子的一阶纵向振动模态的谐振频率和振幅。2 种电机定子一阶纵向振动模态(见图 3(f)、4(d))的谐振频率分别为 106.256 kHz 和 112.933 kHz。由图 3(f)、4(d)可以发现,定子的斜槽或斜齿结构可实现模态转换。由图 3(f)可以看出,通过该定子的斜槽结构形式,定子产生纵向振动和扭转振动的复合振动模态。由图 4(d)可看出,通过该定子的斜齿结构形式,定子产生了纵向振动及斜齿的弯曲振动的复合振动模态。这是 2 种驻波型超声电机实现驱动的关键机理,即通过定子的斜槽或斜齿结构实现模态转换来形成驱动转子运动。

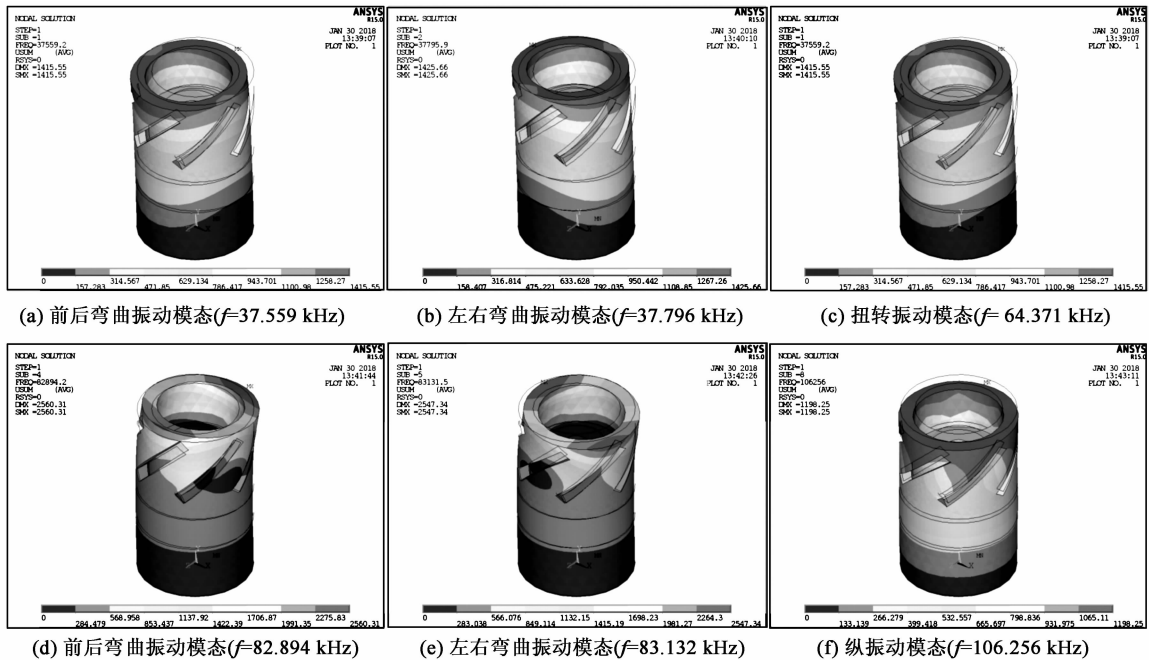


图 3 斜槽式微小型超声电机定子的主要振动模式及模式频率(定子 1)

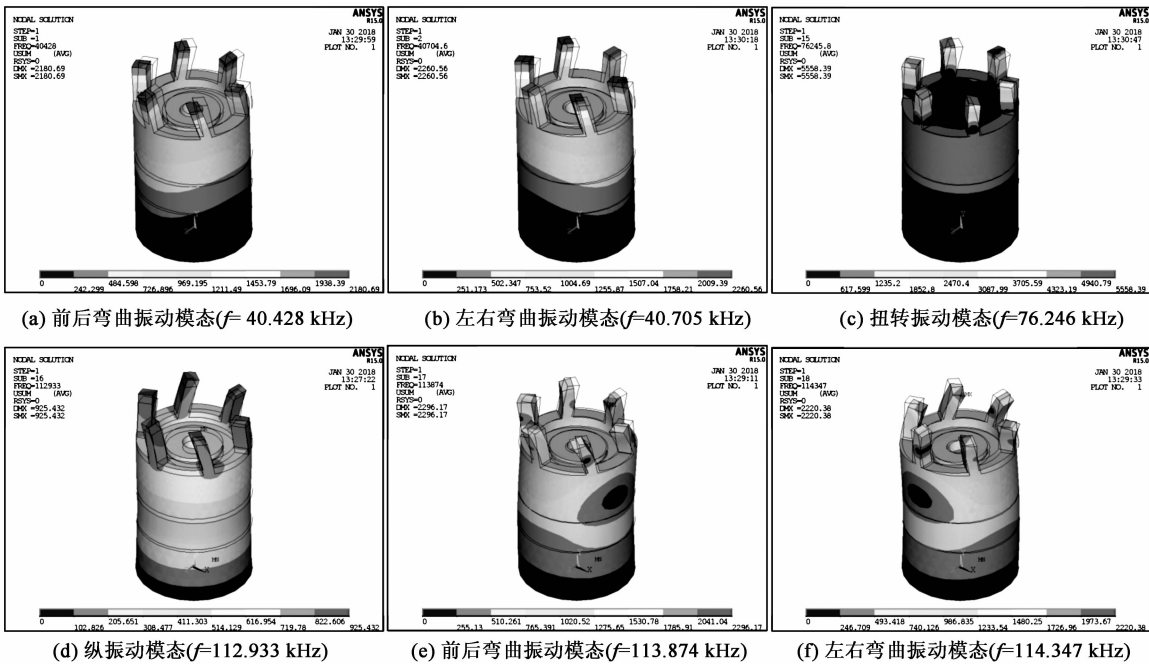


图 4 斜齿式微小型超声电机定子的主要振动模式及模式频率(定子 3)

本文分析和比较了 2 种不同 PZT 材料及 2 组定子长度(见表 2)对斜齿、斜槽两种驻波型超声电机定子的纵向振动频率的影响,其结果如表 3 所示。由表可看出,定子长度对 2 种电机定子的谐振频率影响较大,是一个重要的设计参数。2 种 PZT 材料对电机定子谐振频率的影响较小,与用 PZT4 压电陶瓷材料的电机定子相比,用 PZT8 压电陶瓷材料的电机定子的谐振频率较高。

表 3 不同定子纵向振动的谐振频率

| 类型  | 名称   | $l/\text{mm}$ | 纵振振动模式频率/ $\text{kHz}$ |         |
|-----|------|---------------|------------------------|---------|
|     |      |               | PZT4                   | PZT8    |
| 斜槽式 | 定子 1 | 16.0          | 106.256                | 107.364 |
|     | 定子 2 | 30.0          | 57.494                 | 57.931  |
| 斜齿式 | 定子 3 | 16.2          | 112.933                | 114.266 |
|     | 定子 4 | 33.2          | 57.952                 | 58.522  |

2.2 谐振特性分析

为了进一步分析、比较 2 种不同 PZT 材料及 2

组定子长度(见表2)对2种驻波型超声电机定子的纵向振动振幅的影响,对电机定子进行了谐响特性分析。由于2种电机定子均采用夹心式压电换能器的结构形式,中间部分有2片厚1.5 mm的压电陶瓷片。实际安装时,2片压电陶瓷的正极通过电极片连在一起,与驱动电源的正极连接;负极分别与后盖板和前盖板连在一起,与驱动电源的负极连接。因此,仿真时对中间正极位置的压电陶瓷施加幅值200 V的激励电压,负极与后盖板、前盖板连接位置不施加电压,进行谐响应分析。图5为经仿真分析得到的2种驻波型超声电机定子表面(齿顶)最外圈节点 $z$ 方向上纵向振动的幅频特性曲线。由图可看出,在200 V电压载荷激励下,斜槽式、斜齿式超声电机定子的振幅分别为 $1.36\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.07\text{ }\mu\text{m}$ 。同时,采集了和图5相同节点在 $x$ 向的振动位移幅值,得到了斜槽式超声电机定子 $x$ 向的振动位移幅值为 $0.36\text{ }\mu\text{m}$ ,斜齿式超声电机定子 $x$ 向的振动位移幅值为 $0.35\text{ }\mu\text{m}$ 。这说明了这两种驻波超声电机定子的斜槽或斜齿结构可实现模态转换来驱动转子运动。

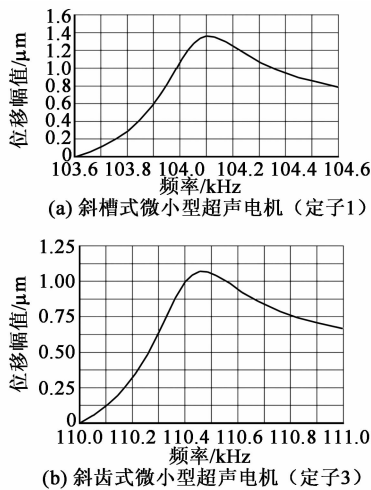


图5 定子表面(齿顶)最外圈节点的振动位移幅值响应

表4为2种驻波型超声电机8个定子的纵向振动振幅情况。由表可看出,与用PZT8压电陶瓷材料的电机定子相比,用PZT4压电陶瓷材料的电机定子的振幅高,且长度短的电机定子,其振幅值更大。

表4 不同定子纵向振动的振幅

| 类型  | 名称  | $l/\text{mm}$ | 纵振振动的振幅/ $\mu\text{m}$ |      |
|-----|-----|---------------|------------------------|------|
|     |     |               | PZT4                   | PZT8 |
| 斜槽式 | 定子1 | 16.0          | 1.36                   | 1.06 |
|     | 定子2 | 30.0          | 0.43                   | 0.31 |
| 斜齿式 | 定子3 | 16.2          | 1.07                   | 0.66 |
|     | 定子4 | 33.2          | 0.78                   | 0.50 |

3 结论

本文针对定子直径 $\varnothing 10\text{ mm}$ 的两种驻波型超声电机定子的实际模型进行了振动特性的有限元分析,得到如下结论:

1) 与行波超声电机定子的振动模态不同,2种微小型驻波型超声电机定子的主要振动模态有弯曲振动、扭转振动及纵向振动。

2) 驻波型超声电机通过定子的斜槽或斜齿结构实现模态转换,形成复合振动模态,从而驱动转子输出。

3) 选用PZT4压电陶瓷材料和长度短的电机定子有利于增大定子的振幅。

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] TSUJINO J, SUZUKI A. Load characteristics of ultrasonic motor with a longitudinal-torsional converter and various nonlinear springs for inducing static pressure[C]//S. I.; IEEE Ultrasonics Symposium, 2001: 545-550.

[3] 陈建毅, 林星陵. 双斜槽式纵扭模态转换型超声波电机的实验研究[J]. 压电与声光, 2016, 38(3): 497-500.

CHEN Jianyi, LIN Xingling. Experimental study on the ultrasonic motor using a longitudinal-torsional vibration converter with multiple diagonal slits[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(3): 497-500.

[4] 杨淋, 赵淳生, 张建辉, 等. 斜槽式模态转换型超声电机振动分析及性能[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(7): 870-875.

YANG Lin, ZHAO Chunsheng, ZHANG Jianhui, et al. Vibration analysis and characteristics of ultrasonic motor using a longitudinal-torsional convertor with oblique slots[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(7): 870-875.

[5] 沈润杰, 王波, 郭吉丰. 微型斜齿超声波电机的研究[J]. 振动工程学报, 2007, 20(5): 543-548.

SHEN Runjie, WANG Bo, GUO Jifeng. Study on skew teeth micro ultrasonic motor [J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(5): 543-548.

[6] 伍旺贤, 纪跃波, 王涛. 行波型旋转超声电机定子振动特性仿真[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2015, 20(4): 292-296.