

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.050

微小型驻波超声电机输出性能的对比试验研究

陈建毅^a, 林星陵^a, 吴庆勇^a, 郑祝堂^a, 蒋丽省^b

(厦门城市职业学院 a. 智能制造学院; b. 财务与资产管理处, 福建 厦门 361008)

摘要:为研制直径 10 mm 的斜齿式和斜槽式两种微小型驻波超声电机样机, 利用 ANSYS 建立定子模型, 模拟分析两种样机的工作振动模式, 获得谐振频率值, 设计并制作两台电机样机, 搭建电机样机的试验平台, 开展不同驱动频率、驱动电压、预压力等条件下的输出性能实验研究, 分析两种不同定子结构对样机输出转速特性的影响。实验结果表明: 在输出转速方面, 斜齿式样机要明显高于斜槽式样机。在谐振频率状态、驱动电压 170 V 和预压力 0.065 N 试验条件下, 斜齿式样机的最大输出转速可达 278 r/min, 斜槽式样机的最大输出转速为 118.5 r/min。

关键词:超声电机; 驻波; 斜齿式; 斜槽式; 仿真分析; 输出性能

中图分类号: TM32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)04-0279-05

Comparative Experimental Study on Output Performance of Miniature Standing-wave Ultrasonic Motor

CHEN Jianyi^a, LIN Xingling^a, WU Qingyong^a, ZHENG Zhutang^a, JIANG Lisheng^b

(a. School of Intelligent Manufacturing; b. Division of Finance and Asset Management, Xiamen City University, Xiamen 361008, China)

Abstract: This paper develops two types of miniature standing-wave ultrasonic motor prototypes in diameter of 10 mm, which include an oblique tooth structure stator and a diagonal slits structure stator. Using the ANSYS software, the models of the two stators are established to simulate the operating vibration modes of the two prototypes, and the resonant frequency values are obtained. Two types of the prototype motors are designed and fabricated, the performance test platform for the two prototypes is built, the corresponding experimental tests are carried out under the conditions of different driving frequencies, different driving voltages and different pre-pressure, and the effects on the output speed characteristics of the two prototype motors with different stator structures are analyzed. The experimental results show that the motor prototype with the helical tooth structure stator is significantly better than the prototype motor with the diagonal slits structure stator in terms of the output speed. Under the excitation conditions of the resonant frequency, with the driving voltage of 170 V and the pre-pressure of 0.065 N, the maximum rotating speed of the prototype motor with the oblique tooth structure stator is 278 r/min, and the maximum rotating speed of the prototype motor with diagonal slits structure stator is 118.5 r/min.

Keywords: ultrasonic motor; standing-wave; oblique tooth type; diagonal slits type; simulation analysis; output performance

0 引言

超声电机是一种结合多学科智慧的产物, 涉及压电学、振动学、摩擦学和自动控制等多门学科。这种新型的微电机突破了传统电机利用电磁场产生转矩的驱动原理。它以逆压电效应与机械共振为核心原理, 通过逆压电效应将输入给压电陶瓷的电能转换成机械能, 激励出定子的共振, 然后通过定子和转子(或动子)接触界面的摩擦作用来实现驱动转子(或动子)动力输出和直接驱动负载^[1-3]。由于压电陶瓷的不同振动模式和定子的不同工作振动模式, 超声电机的结构形式可

以有很多不同类型。与传统电磁电机相比, 超声电机的结构相对简单多样、更易于微小型化, 同时具有响应快、重复定位精度高、可直接驱动以及无电磁干扰问题等独特优点。在精密仪器领域具有独特的技术优势, 尤其在相机自动对焦系统和精密定位平台等精密驱动领域的商业化应用上。我国将超声电机成功应用到嫦娥四号、嫦娥五号、嫦娥六号等举世瞩目的探月工程中, 发挥了超声电机在极端环境下仍能高效工作的优势和重要作用。

随着微小型直驱超声电机在精密仪器领域的使用量的不断增长, 各种毫米级的微小型超声电

基金项目: 厦门市自然科学基金项目(3502Z20227431); 福建省特种能场制造重点实验室科技创新平台(华侨大学)开放研究课题项目(FKLSEM-2023-01)

第一作者简介: 陈建毅(1979—), 男, 福建厦门人, 教授, 博士, 研究方向为超声电机及压电精密驱动技术, 30955670@qq.com。

机不断地被研制出来。陈如娟等^[4]研制出直径 10 mm 的微小旋转型行波超声电机,样机的最大空载转速达 380 r/min,最大输出转矩为 6.7 N·m。沈润杰等^[5]研制出直径 10 mm 微小型斜齿式驻波超声电机,样机的最大空载转速 840 r/min,最大输出转矩为 10 N·m。谢天等^[6]研制出直径 8 mm 的微小型双转子模态转换超声电机,样机的最大空载转速 475 r/min。朱华等^[7]研制出直径 5 mm 的柱式微型超声电机,利用定子 B₁ 弯曲振动模态作为电机工作模态。样机的最大空载转速为 350 r/min,最大输出转矩为 2.5 N·m。张凯等^[8]研制出直径仅为 1 mm 的柱式微型超声电机,直接采用压电陶瓷柱作为定子。样机的最大空载转速达 1 800 r/min,最大输出转矩 4 μN·m。MASHIMO^[9]研制出边长为 1 mm 的立方体样机,在激励频率 935 kHz、驱动电压 98 V 条件下,样机的最大输出转速为 2 500 r/min,最大输出转矩为 0.2 μN·m。KIKUCHI 等^[10]研制出迄今最小定子的微型旋转超声电机,其定子大小为 0.41 mm×0.41 mm×0.25 mm,在激励频率为 4.21 MHz、驱动电压 44.8 V 条件下,样机的最大输出转速为 714 rad/s,最大输出转矩为 5.4 nN·m。HUTAMA 等^[11]将立方体微型超声电机(定子边长为 2 mm)作为驱动器应用于毫米级滚动微型机器人,可以实现滚动微型机器人 45°斜坡的爬坡,在水平面上的速度达 5.6 mm/s。杨剑之等^[12]将杆式微型直线超声电机(定子尺寸为 4 mm×4 mm×15 mm)作为驱动元件应用于微量注射系统,使整体尺寸大幅减小,可精确地控制注射系统的流速,精度高于传统医用注射泵。WANG 等^[13]研制出微型杆式旋转-直线超声电机,电机的定子外径 7 mm、长度为 30 mm,质量仅为 20.5 g,并探索在医学的三维血管内成像系统应用。MASUDA 等^[14]研制出一种用于微型相机模块的微型直线超声电机,采用方形中空结构的定子,方形长宽高 4.6 mm×4.6 mm×0.55 mm,中心孔直径 2.7 mm。在激励频率为 121 kHz、驱动电压 100 V 条件下,样机的最大输出速度为 233 mm/s,最大输出推力为 4.8 mN。

微小型超声电机越来越受到关注,在各类精密仪器、机电系统以及生物医疗等领域具有很好的应用潜力。驻波型超声电机利用夹心式压电振子,具有较高的机电转换效率和较大的输出转矩。目前,针对驻波型超声电机的微小型样机研制和实验研究相对较少。本文设计了两种直径 10 mm 的微小型驻波超声电机,进行了有限元仿真

分析和试验,并制作了样机,测试了不同驱动条件下样机的输出转速,对比了两种样机输出转速特性的差别,为微小型驻波超声电机进一步开发和性能提升提供了参考依据。

1 有限元仿真分析

驻波超声电机通常采用郎之万型(夹心式)压电振子,其工作原理是利用压电振子的 1 阶纵振为主要工作模态,并通过振子端面的斜齿结构或者圆周上的斜槽结构^[15]来实现纵弯或纵扭模态转换,将纵向振动转换为弯曲振动或者扭转振动,从而驱动转子旋转。定子是超声电机的核心和关键部件,本文两种微小型驻波超声电机定子采用夹心式换能器,由前后金属块、压电陶瓷片(纵振式)、电极片、预应力螺栓等组成,并且定子还带有斜齿式结构或者斜槽式结构。因此,采用有限元方法进行模态分析和谐响应分析,模拟仿真两种样机定子工作的振动模态,设计和修正其定子结构的尺寸,从而获得定子工作需要的振动模态、共振频率和振幅大小。

1.1 定子有限元模型

采用 ANSYS 有限元软件分别建立了两种样机定子的有限元模型如图 1 所示。定子主体的夹心换能器长度为 30 mm。图 1(a)中,定子的斜齿结构中轴向长度 3.2 mm,宽度 1 mm,径向厚度 1.25 mm,斜齿角度为 80°,环形阵列 6 个。图 1(b)中,定子的斜槽结构中轴向长度 5 mm,宽度 1 mm,径向深度 1.25 mm,与定子轴线成 45°夹角,环形 6 个,上下共 2 排。定子具体材料参数如表 1 所示,前金属块选用硬铝材料,后金属块选用 45 钢材料,压电陶瓷片采用 PZT4。该 PZT4 压电陶瓷的材料属性见文献[16]。

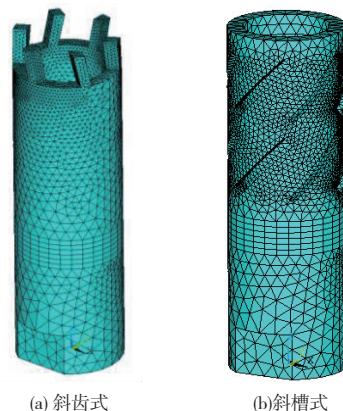


图 1 超声电机定子的有限元模型

表1 定子的材料参数

名称	材料类型	密度/ (kg/m^3)	弹性 模量/Pa	泊松比
前金属块	硬铝	2 700	7.0×10^{10}	0.30
后金属块	45 钢	7 800	2.09×10^{11}	0.28
压电陶瓷	PZT4	7 600	7.65×10^{10}	0.32

1.2 模态分析

ANSYS 模态分析计算过程中,选用 Block Lanczos 模式提取方法进行求解,得到两种微小型驻波超声电机定子的工作振动模态如图 2 和图 3 所示。由图 2 和图 3 可知,1 阶纵向振动模态是这两种定子的工作模态,其 1 阶纵振的谐振频率为 56.793 kHz 和 56.586 kHz。还可以发现,图 2 中斜齿式定子形成了定子纵向振动和斜齿弯曲振动的复合模态;图 3 中斜槽式定子形成了定子纵向振动和斜槽扭转振动的复合模态。可见,定子的两种不同结构是决定这类驻波超声电机实现模态转换和形成不同复合模态的关键。

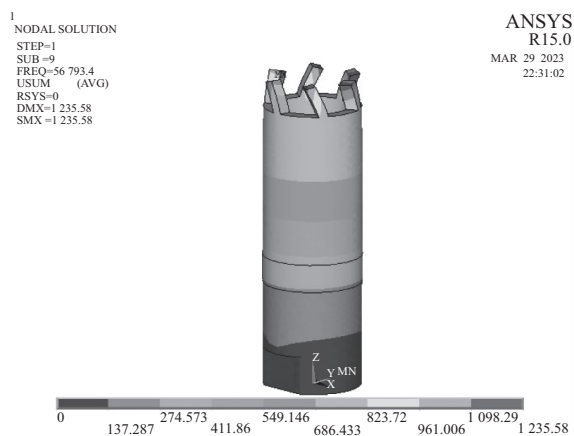


图2 斜齿式超声电机定子的工作振动模态

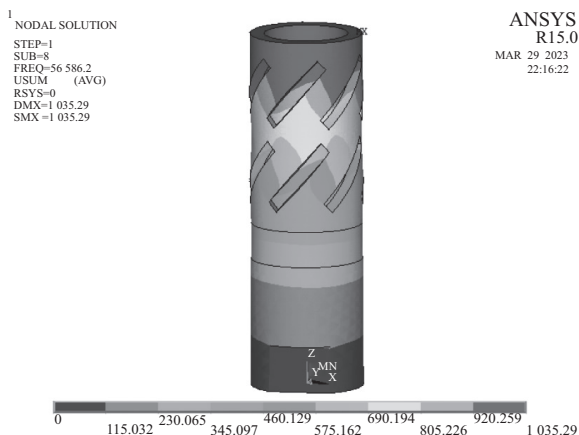


图3 斜槽式超声电机定子的工作振动模态

1.3 谐响应分析

在模态分析结果基础上,采用模态叠加法对两种定子进行谐响应分析。按照夹心式压电振子的激励方式,对中间正极位置压电陶瓷施加幅值 200 V 的激励电压,两端负极位置的压电陶瓷施加 0 V,激励频率范围设置为 56~57 kHz,加载子步数为 100,仿真斜齿式定子齿顶和斜槽式定子驱动端面最外圈的某一质点在轴向方向上(z 轴方向)的位移,得到了纵向振动振幅随频率变化的幅频特性曲线如图 4 和图 5 所示。比较图 4 和图 5 可知,斜齿式定子的振幅为 $1.9 \mu\text{m}$,斜槽式定子的振幅为 $1.5 \mu\text{m}$,斜齿式定子的振幅值要大于斜槽式定子的振幅值。

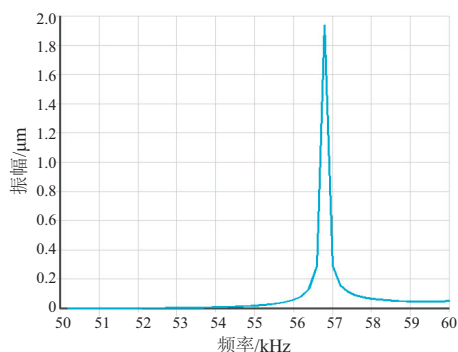


图4 斜齿式定子的频率响特性曲线

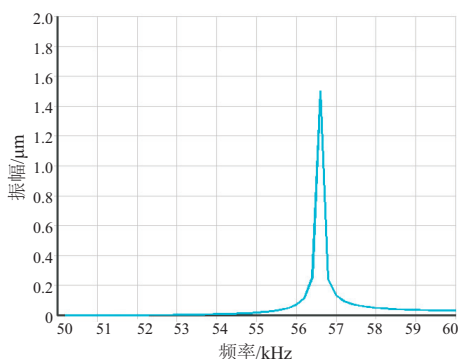


图5 斜槽式定子的频率响特性曲线

2 实验研究

为研究两种微小型驻波超声电机的输出性能,在有限元仿真分析基础上,进行样机设计,并加工制作出直径 10 mm 的斜齿式结构和斜槽式结构两种驻波超声电机的样机,如图 6 所示。

采用自行研制两通道方波信号的驱动电源、某公司的示波器(TDS1012B-EDU)、激光非接触/接触转速仪(DM6236P),搭建了测试电机样机输出特性的实验平台,如图 7 所示。测试了不同的

激励频率、不同的驱动电压和不同的预压力实验条件下,样机的输出转速变化情况。

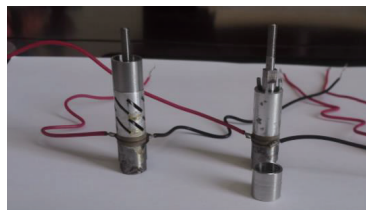


图6 两种微小型驻波型超声电机样机

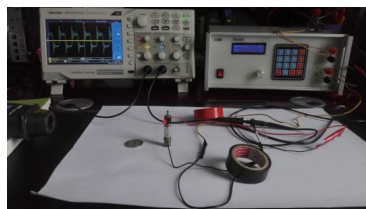


图7 电机样机的输出转速特性测试实验平台

2.1 激励频率-输出转速特性

在相同的预压力 0.065 N 和驱动电压 130 V 实验条件下,测试得到了激励频率与输出转速的变化关系如图8所示。由图8可以看出,两种样机的输出转速均随着激励频率的升高呈现先增速后减速;当激励频率达到电机实际谐振频率时,电机样机的输出转速最大。从图8可以得到,斜齿式样机的实际谐振频率为 56.15 kHz ,最大的输出转速为 211 r/min ;斜槽式样机的实际谐振频率为 53.10 kHz ,最大的输出转速为 115.5 r/min 。两种样机试验测试得到的实际谐振频率与有限元仿真计算得到的谐振频率相比要小些。这与定子有限元建模简化、相关材料参数的理论值与实际值有差别、实际加工尺寸与电机装配的误差等因素有关。比较图8(a)和图8(b)的输出转速特性,斜齿式样机的输出转速要明显比斜槽式样机的输出转速更好,主要原因是由于斜齿可以对振幅起到放大作用。

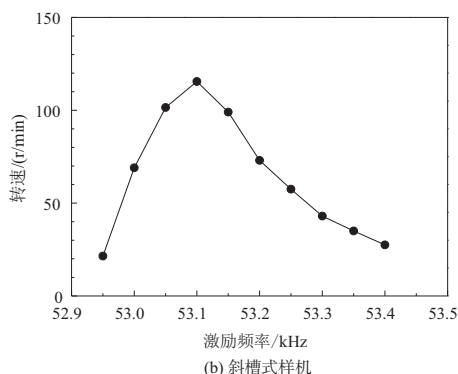
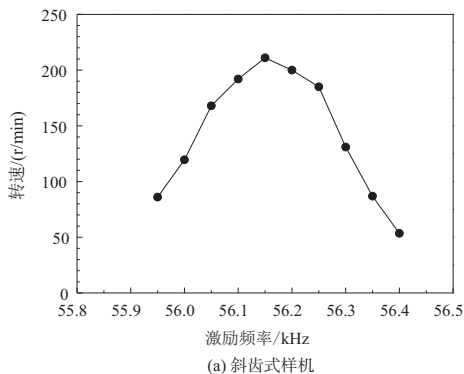


图8 样机转速和激励频率的特性曲线图

2.2 驱动电压-输出转速特性

施加相同的 0.065 N 预压力,驱动电压从 $90\text{ V} \sim 170\text{ V}$,测试了两台样机的输出转速变化情况,实验结果如图9所示。从图中可以看出,在固定的每个驱动频率情况下,随着驱动电压的提高,两台样机的输出转速均逐渐增大,有一定线性关系。其主要原因是驱动电压增大使得逆压电效应产生的形变增大,进而导致定子的振幅变大,使得转子的旋转速度也更快。其中,斜齿式样机的输出转速增大的幅度明显;而斜槽式样机的输出转速增大趋势总体平缓。当驱动电压为 170 V 时,在样机的实际谐振频率下,斜齿式样机和斜槽式样机的最大输出转速分别为 278 r/min 和 118.5 r/min 。比较图9中两种样机的输出转速,斜齿式样机要明显优于斜槽式样机,其增幅更为明显。

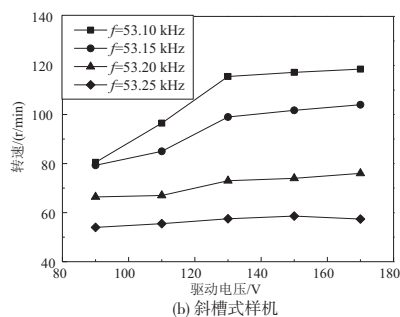
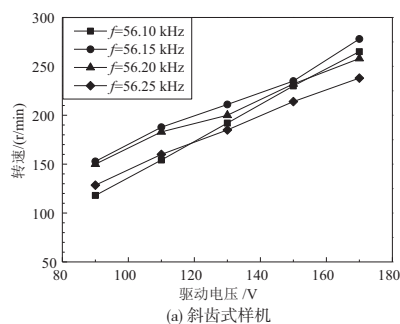


图9 样机转速和驱动电压的特性曲线图

2.3 预压力-输出转速特性

在电机最佳的实际谐振频率和 130 V 相同驱动电压的条件下,施加不同大小的预压力,测试两台样机输出转速的变化,如图 10 所示。从图中可以看到,随着施加预压力的增大,两种微小型驻波超声电机样机的输出转速均随着施加预压力的增大而呈减小的变化趋势。其中,斜齿式样机的输出转速则减小显著,变化明显;斜槽式样机的输出转速减小平缓,变化不大。而且,斜齿式样机的输出转速要明显好于斜槽式样机的输出转速。增加预压力可以增大定子和转子之间的摩擦力,有利于提高电机的输出转矩。因此,实际应用时要综合考虑电机的输出转速和输出转矩的需要,调节定子和转子之间预压力的最佳值及最佳范围。预压力的调节可以通过定子和转子之间加压弹簧压力的大小来实现。

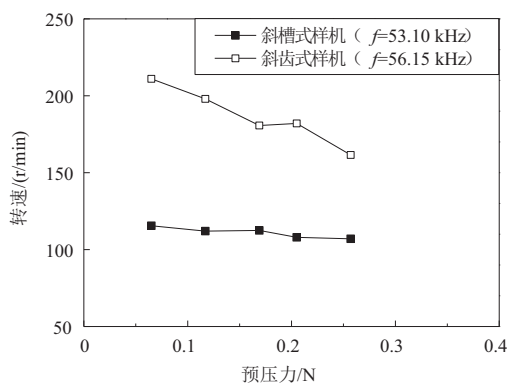


图 10 样机转速和预压力的特性曲线图

3 结语

通过研制两台不同定子结构的微小型驻波超声电机样机,开展了对比试验研究,比较和分析了两种定子结构样机的输出转速特性的优劣,得出了以下的结论。1) 对于两种微小型驻波超声电机,斜齿式样机的输出转速要明显好于斜槽式样机的输出转速。当驱动电压为 170 V 时,斜齿式样机的最大输出转速为 278 r/min,斜槽式样机的最大输出转速为 118.5 r/min。其主要原因是斜齿可以对定子的振幅起到更好的放大作用。2) 通过斜齿结构和斜槽结构可以实现定子的模态转换来驱动转子的旋转运动,对电机的输出特性影响很大,是两种驻波超声电机实现驱动的关键。3) 驱动电压和预压力对超声电机的输出转速都有很明显的影

响,调节预压力的大小可以获得较好的输出转速和运行状态。

参考文献:

- [1] 洪尚任. 超声波马达[J]. 自动化仪表, 1996, 17(10): 1-4.
- [2] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 郑祝堂, 陈建毅. 超声电机的研究现状及其进展[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(5): 182-187.
- [4] 陈如娟, 陈超, 宋小刚. 微小旋转型超声电机瞬态特性测试及机械特性估计方法[J]. 中国机械工程, 2011, 22(11): 1284-1288.
- [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): 543-547.
- [6] 谢天, 周铁英, 陈宇. 一种双转子模态转换型超声波电动机设计[J]. 微特电机, 2009, 37(10): 18-21.
- [7] 朱华, 陈超, 赵淳生. 一种微型柱体超声电机的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 128-133.
- [8] 张凯, 周铁英, 王欢, 等. 1 mm 压电柱式超声微电机的研制[J]. 声学学报, 2004, 29(3): 258-261.
- [9] MASHIMO T. Micro ultrasonic motor using a one cubic millimeter stator[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 213: 102-107.
- [10] KIKUCHI K, HUSSAIN M, MASHIMO T. Fabrication and characterization of a submillimeter-scale ultrasonic motor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 360: 114524.
- [11] HUTAMA R Y, KHALIL M M, MASHIMO T. A millimeter-scale rolling microrobot driven by a micro-gear ultrasonic motor [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(4): 8158-8164.
- [12] 杨剑之, 彭瀚旻, 圣娟, 等. 基于杆式直线超声电机的微量注射系统[J]. 振动·测试与诊断, 2019, 39(6): 1311-1315, 1366-1367.
- [13] WANG B, ZHOU Y, WANG Y, et al. Three-dimensional intravascular ultrasound imaging using a miniature helical ultrasonic motor [J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2022, 69(2): 681-690.
- [14] MASUDA N, IZUHARA S, MASHIMO T. Miniature camera module with a hollow linear ultrasonic motor-based focus feature [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 354: 114248.
- [15] 陈建毅, 林星陵. 斜槽深度对模态转换型超声波电机性能的影响[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(1): 47-52.
- [16] 陈建毅, 郑祝堂, 林星陵. 微小型驻波超声电机定子振动特性的仿真分析[J]. 压电与声光, 2018, 40(6): 951-954, 959.

收稿日期: 2025-01-10