

基于 ANSYS 的径向驻波型超声波电机设计与分析*

蒋春容, 夏凯, 陆旦宏

(南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 研究了一种采用径向振动的驻波型超声波电机。首先分析了电机的结构, 然后利用有限元分析软件 ANSYS 建立定子有限元模型, 基于该模型分析了压电陶瓷的结构尺寸对定子振动特性的影响, 进而确定了定子的结构尺寸, 并进一步分析了定子的瞬态响应特性。最后根据理论分析结果试制了样机, 对样机进行了试验测试, 测试结果表明, 所设计的电机具有较好的输出性能。

关键词: 超声波电机; 径向振动; 驻波型; 结构尺寸设计; 试验测试

中图分类号: TM 35 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)04-0054-05

doi: 10.12177/emca.2019.183

Design and Analysis of Radial Standing Wave Type Ultrasonic Motor Based on ANSYS*

JIANG Chunrong, XIA Kai, LU Danhong

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

Abstract: A standing wave type ultrasonic motor working on radial vibration mode is studied. Firstly, the structure of the motor is analyzed. Secondly, a finite element model of the stator is built with finite element analysis software ANSYS. The impacts of piezoelectric ceramic structural parameters on the vibration characteristics of the stator are investigated based on the finite element model. The structural parameters of the stator is determined. Transient response of the stator is further analyzed. Finally, a prototype motor is manufactured according to the theoretical results. Experimental tests are conducted on the prototype motor. The test results show that the designed motor has good output performances.

Key words: ultrasonic motor; radial vibration; standing wave type; structural size design; experimental test

0 引言

随着科学技术的飞速发展, 航空航天、汽车电器、医疗设备、武器装备以及精密机械等领域对电机提出了越来越高的要求: 微型轻量化、快速精密定位、低噪声、电磁兼容、低速大转矩等。传统电磁电机由于结构和工作原理的局限性, 不能很好地满足这些特殊领域的要求。超声波电机凭借自

身高能量密度、断电自锁、快速响应、无电磁干扰等电磁电机所无法比拟的优点, 在这些特殊领域具有很好的应用前景, 受到国内外的广泛关注^[1-2]。

超声波电机结构设计灵活多变, 利用不同的振动模态可以构造出各种不同的电机结构。迄今为止, 已有各种不同类型的超声波电机被提出, 如行波型^[3-4]、驻波型^[5]、模态转换型^[6]等。其中,

收稿日期: 2019-12-10; 收到修改稿日期: 2020-02-24

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51507076); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(KTHY-040)

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

行波型超声波电机的研究最为广泛和成熟。近年来,许多学者对驻波型超声波电机开展了研究,如 Li 等^[7]研究了一种双模态驻波型直线超声波电机;王波等^[8]提出了双向直线运动的板式驻波型超声波电机;姜晓玉等^[9]研究了圆环定子驻波型步进超声波电机。在对驻波型超声波电机的研究中,以采用板式弯曲振动的驻波型超声波电机较为常见,且运动形式以直线运动为主,而对采用径向伸缩振动的驻波型超声波电机的研究较少。

本文研究了一种径向驻波型超声波电机,采用定子的一阶径向伸缩振动作为工作模态,实现电机的旋转运动。首先设计电机的结构,利用有限元分析软件 ANSYS 分析不同的结构尺寸对定子振动性能的影响,进而确定定子的结构尺寸,并进一步分析了定子瞬态响应特性。最后试制了电机样机,对样机进行了试验测试。试验结果表明,所设计的径向驻波型超声波电机具有较好的输出性能。

1 电机结构尺寸设计

径向驻波型超声波电机的结构如图 1 所示。电机主要由定子、转子和转轴构成,其中定子包括压电陶瓷、金属环和弹性叶片。压电陶瓷粘接在金属环内部,8 个弹性叶片沿周向均匀布置在金属环外圈。弹性叶片与转子内侧接触并保持一定的弹性弯曲变形。压电陶瓷沿轴向方向极化。给压电陶瓷上下表面施加特定频率的单相交流电,激发出压电陶瓷和金属环这一复合结构的一阶径向伸缩振动,即径向驻波振动,带动弹性叶片产生径向方向的位移。弹性叶片与转子接触并将径向方向的位移转化为沿转子切向的运动,从而推动转子旋转。

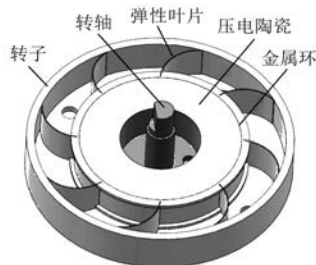


图 1 径向驻波型超声波电机

定子是超声波电机的关键部分,其结构尺寸

的选择是否合理,将直接影响电机的输出性能。在径向驻波型超声波电机中,定子结构的主体部分是压电陶瓷,压电陶瓷的结构尺寸对定子振动特性将起到决定性作用。因此,需要分析压电陶瓷的结构尺寸对定子振动性能的影响,进而确定压电陶瓷的结构尺寸。压电陶瓷的结构尺寸包括 3 个参数,即内半径 r_1 、外半径 r_2 、高度 h ,如图 2 所示。因为金属环的径向厚度较小,所以在设计中选择金属环的径向厚度为 0.5 mm 不变,而金属环的内外半径随着压电陶瓷外半径的变化进行相应调整。为了保持弹性叶片的弹性弯曲变形能力,弹性叶片的厚度很薄,且弹性叶片的作用是将金属环的径向振动通过自身的弯曲变形转化为转子的旋转运动,因此在分析压电陶瓷的结构尺寸对定子径向振动特性的影响时可以将弹性叶片忽略。

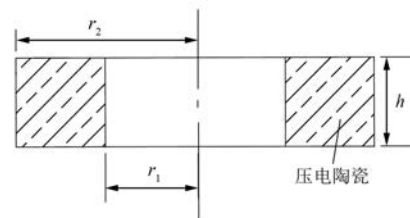


图 2 压电陶瓷结构参数

为了确定压电陶瓷的结构尺寸参数,选择有限元分析软件 ANSYS 进行模态分析,以得到压电陶瓷不同的内半径、外半径和高度对定子振动特性的影响。在建立 ANSYS 有限元模型时,忽略弹性叶片的影响,仅需要建立含有压电陶瓷和金属环的定子有限元模型,如图 3 所示。将所建立的模型选用适用于直接耦合解法的八节点六面体 SOLID5 耦合单元进行网格划分。

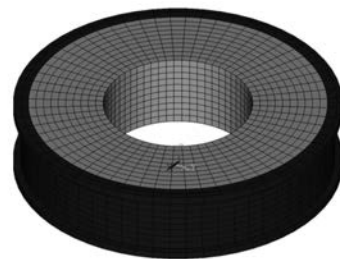


图 3 定子有限元模型

模型中的材料参数设置如表 1 所示。

表 1 材料参数设置

参数名称	参数值
压电陶瓷柔度系数 $s_{11}^E / (\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	1.32×10^{-11}
压电陶瓷柔度系数 $s_{12}^E / (\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	-5.20×10^{-12}
压电陶瓷柔度系数 $s_{13}^E / (\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	-6.30×10^{-12}
压电陶瓷柔度系数 $s_{33}^E / (\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	1.59×10^{-11}
压电陶瓷柔度系数 $s_{44}^E / (\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	3.71×10^{-11}
压电陶瓷压电应变常数 $d_{31} / (\text{m} \cdot \text{V}^{-1})$	-1.09×10^{-10}
压电陶瓷压电应变常数 $d_{33} / (\text{m} \cdot \text{V}^{-1})$	3.00×10^{-10}
压电陶瓷压电应变常数 $d_{15} / (\text{m} \cdot \text{V}^{-1})$	4.50×10^{-10}
压电陶瓷介电系数 ϵ_{11}	$1375 \times \epsilon_0^*$
压电陶瓷介电系数 ϵ_{33}	$937 \times \epsilon_0$
压电陶瓷密度 $\rho_p / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 600
金属环的杨氏模量 $E / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	2.11×10^{11}
金属环的泊松比 ν	0.288
金属环的密度 $\rho_m / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 820

* 注: ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

根据电机的设计,采用定子一阶径向振动作为工作模式。首先分析压电陶瓷内半径 r_1 变化对一阶径向振动模式共振频率的影响,选择压电陶瓷外半径 r_2 为 10 mm、高度 h 为 5 mm 作为基准,内半径 r_1 选取 4~6 mm、每隔 0.5 mm 选取一个点进行模式分析,得到工作模式的共振频率 f 随压电陶瓷内半径 r_1 变化的情况如图 4(a) 所示。由图 4(a) 可知,随着压电陶瓷内半径 r_1 的增大,定子的一阶径向振动频率 f 逐渐降低,并且呈近似线性降低关系。同理,选择压电陶瓷内半径 r_1 为 5 mm、高度 h 为 5 mm 作为基准,外半径 r_2 选取 8~12 mm、每隔 1 mm 选取一个点进行模式分析,得到工作模式的共振频率 f 随压电陶瓷外半径 r_2 变化的情况如图 4(b) 所示。需要注意的是,当压电陶瓷外半径变化时,金属环的内半径和外半径与之同步变化并保持金属环的径向厚度为 0.5 mm 不变。由图 4(b) 可知,随着压电陶瓷外半径 r_2 的增大,一阶径向振动频率 f 呈近似线性减小的关系。最后再选择压电陶瓷内半径 r_1 为 5 mm、外半径 r_2 为 10 mm 作为基准,高度 h 选取 3~7 mm、每隔 1 mm 选取一个点进行模式分析,得到工作模式的共振频率 f 随压电陶瓷高度 h 变化的情况如图 4(c) 所示。由图 4(c) 可知,定子工作模式的共振频率 f 基本不受压电陶瓷高度 h 变化的影响。

由以上分析可知,对定子共振频率影响较大的参数是压电陶瓷的内半径和外半径,而压电陶

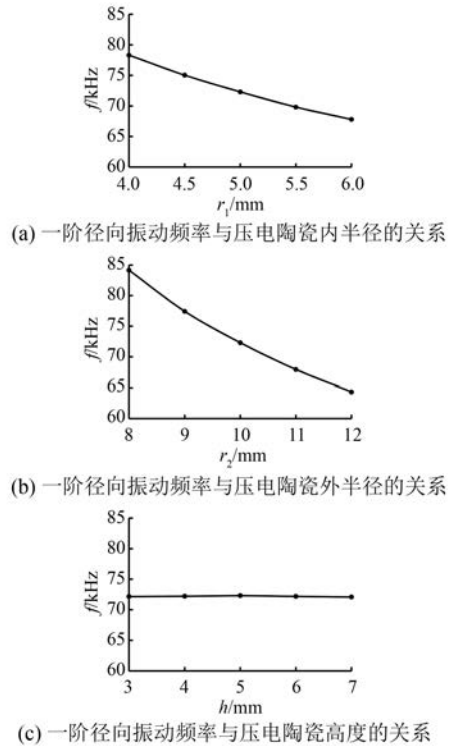
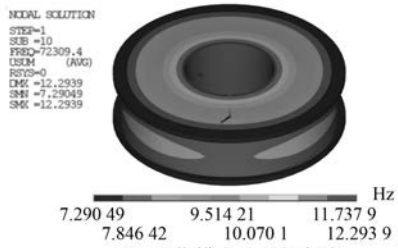


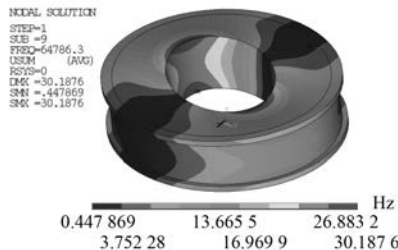
图 4 定子一阶径向振动频率与压电陶瓷结构尺寸的关系

瓷高度则影响较小。根据以上分析,结合电机制作加工的难易以及电机体积小巧的角度考虑,初步选择压电陶瓷的尺寸:内半径 r_1 为 5 mm,外半径 r_2 为 10 mm,高度 h 为 5 mm。

在初步确定了压电陶瓷的尺寸后,进一步分析在选定的结构尺寸下,定子工作模式与前后干扰模式的共振频率距离是否足够,以保证定子工作时不受其他模式的干扰。如果在工作模式的附近有干扰模式,就会导致模式混叠,最终会影响超声波电机的机械性能和运行稳定性。一般而言,当定子工作模式的共振频率与前后干扰模式的共振频率相差 2 kHz 以上时,可以避免干扰模式对工作模式的影响^[10]。根据以上选定的结构尺寸建立模型进行模式分析,得到定子工作模式及其对应的共振频率和前后干扰模式及其对应的共振频率如图 5 所示。由图 5 可知,定子工作模式的共振频率为 72.3 kHz,前后干扰模式的共振频率分别为 64.8 kHz 和 74.4 kHz。前后干扰模式与工作模式的共振频率均相差 2 kHz 以上,可以忽略前后干扰模式对定子工作模式的影响。因此可知,压电陶瓷的结构尺寸选择是可行的。



(a) 工作模式及共振频率



(b) 前一干扰模式及共振频率

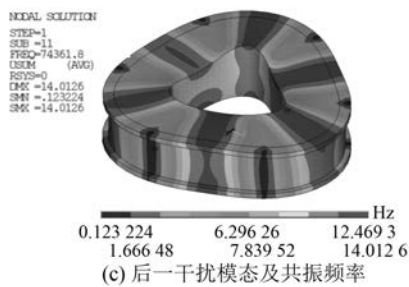


图5 振动模式及其对应的共振频率

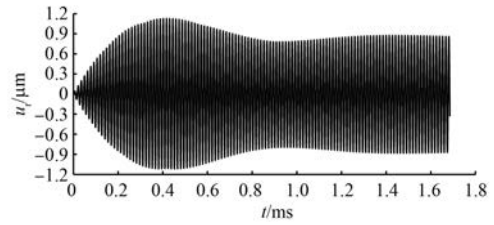


图6 定子瞬态响应特性

果表明,定子一阶径向振动模式的共振频率为73.5 kHz,与理论分析结果较为接近。误差产生的原因是厂家提供的压电陶瓷典型参数与实际参数存在偏差。最后,对样机的转矩-转速特性进行测试。给电机施加幅值为80 V、频率为74 kHz的正弦交流电,测量电机的转矩和转速值,测试结果如图9所示。测试结果显示:电机的空载转速约为30 r/min,堵转力矩约为0.16 N·m。试验测试结果表明,所设计的径向驻波型超声波电机具有较好的输出性能。

2 定子瞬态动力学特性分析

为了分析定子在特定电压激励下的振动特性,对定子的瞬态动力学特性进行研究。瞬态分析时,在压电陶瓷上下表面施加电压,表达式为

$$U = U_m \sin(2\pi \times 72\ 300t) \quad (1)$$

其中: $U_m = 100\text{ V}$ 。

图6为定子金属环外表面质点的径向振动位移 u_r 的时间响应曲线。从图6可以看出,定子径向振动达到稳态的时间约为1.4 ms,表明电机具有较快的响应速度。达到稳态后,定子的径向振幅达到了0.85 μm ,表明定子具有较好的激振效果。

3 样机及试验验证

根据理论分析结果确定的电机结构尺寸,试制的径向驻波型超声波电机样机如图7所示。为了验证理论分析结果,采用阻抗特性分析仪对定子进行了阻抗频率特性测试。测试时设置扫频范围为70~80 kHz,测试结果如图8所示。测试结

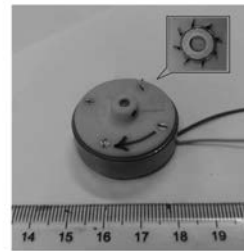


图7 径向驻波型超声波电机样机

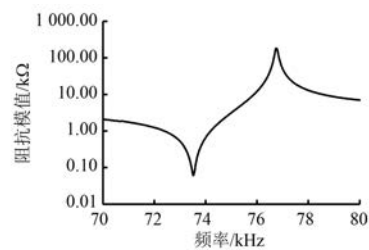


图8 定子阻抗频率特性

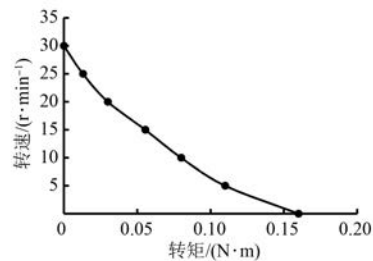


图9 电机的转矩-转速特性

4 结 语

本文研究了一种径向驻波型超声波电机,分析了电机的结构,利用有限元分析软件建立了定子的有限元模型,研究了压电陶瓷的内半径、外半径和高度变化对定子振动的影响。结果表明,压电陶瓷的内半径和外半径增大,均使定子一阶径向振动的共振频率下降,而压电陶瓷高度变化则对一阶径向振动的共振频率基本无影响。根据理论分析结果确定了定子的结构尺寸,并进一步分析了定子的瞬态响应特性,结果表明定子具有良好的瞬态响应特性。最后试制了电机样机,并对样机进行了测试。试验测试结果表明,所设计的径向驻波型超声波电机具有较好的输出性能。

【参考文献】

- [1] 陈欢,史敬灼.基于遗传神经网络的超声波电机转速控制系统[J].电机与控制应用,2010,37(6): 38.
- [2] 刘泽浪,罗萍,黄龙.一种用于超声电机驱动的半桥集成电路的设计[J].压电与声光,2018,40(6): 843.
- [3] 周先立,罗萍,黄龙,等.行波型超声波电机等效电路建模[J].压电与声光,2019,41(2): 199.
- [4] MARQUEZ I A R, BOLBORICI V. A dynamic model of the piezoelectric traveling wave rotary ultrasonic motor stator with the finite volume method[J]. Ultrasonics, 2017, 77: 69.
- [5] 蒋春容,谭宇渲,周良志,等.基于有限元法的驻波型直线超声波电机振动特性分析[J].电机与控制应用,2018,45(2): 62.
- [6] 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.
- [7] LI X, YAO Z, LV Q, et al. Modeling stick-slip-separation dynamics in a bimodal standing wave ultrasonic motor[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 382: 140.
- [8] 王波,戴吉岩,郭吉丰,等.一种新结构的双向直线运动驻波型超声波电机(英文)[J].中国电机工程学报,2009,29(24): 49.
- [9] 姜晓玉,洪尚任,王国炎.圆环定子驻波型步进超声波电机设计[J].华侨大学学报(自然科学版),2011,32(3): 263.
- [10] 韩雪.超声电机稳定性关键影响因素分析及试验研究[D].廊坊:北华航天工业学院,2019.
- [5] 何玉辉,熊健,吕伟,等.交流牵引系统 PWM 策略切换研究[J].电力电子技术,2012,46(1): 82.
- [6] KAVOUSI A, VAHIDI B, SALEHI R, et al. Application of the bee algorithm for selective harmonic elimination strategy in multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4): 1689.
- [7] 张晓华,葛兴来.基于 SHEPWM 的三电平 NPC 逆变器中点电位平衡控制算法[J].电力系统自动化,2017,41(16): 144.
- [8] CIMORONI M G, TINARI M, BUCCELLA C, et al. A high efficiency selective harmonic elimination technique for multilevel converters [C] // 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2018.
- [9] 徐超.特定谐波消除技术中方程组快速求解研究[D].吉林:东北电力大学,2007.
- [10] 叶满园,周琪琦,蔡鸿,等.基于捕食策略遗传算法的 3 电平中点箝位型逆变器特定谐波消除脉宽调制技术[J].高电压技术,2014,40(11): 3569.
- [11] 张永昌,赵争鸣,张颖超,等.三电平变频调速系统 SVPWM 和 SHEPWM 混合调制方法的研究[J].中国电机工程学报,2007,27(16): 72.
- [12] 周明磊,李强,游小杰,等.基于 SHEPWM 的多模式调制切换策略研究[J].铁道学报,2014,36(1): 34.
- [13] 薛娴.基于 SHEPWM 调制策略的永磁同步电机三电平逆变器设计与实现[D].厦门:华侨大学,2016.

(上接第 53 页)