文章编号:1004-2474(2019)02-0203-04

一种圆筒型转子的中空型超声电机的研制

王 楠,陈 超,陈金燕

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘 要:针对某些飞行器舵机控制系统需要旋转型超声电机具有中空结构、转子与负载结构融合以及具备一定的保持力矩等特定工程技术需求,该文提出了一种圆筒型转子与舵翼结构一体设计(外圈输出)的中空型超声电机,开展了该型电机的结构及预压力施加方案的设计和试验研究。建立了电机定子的有限元模型,分析了不同结构尺寸对定子模态的影响,进行了结构尺寸的灵敏度分析,优化了定子的结构,计算出其共振频率、振动幅值。最后试制出了原理样机。实验表明,在激励电压为 450 V,激励频率为 40.2 kHz 时,样机的空载转速可达 208 r/min, 堵转力矩可达 0.35 N·m。

Development of A Hollow Ultrasonic Motor With Cylindrical Rotor

WANG Nan, CHEN Chao, CHEN Jinyan

(State Key Lab. of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China) **Abstract**: In this paper, a hollow ultrasonic motor with integrated design of cylindrical rotor and rudder wing (outer ring output) is proposed to meet the needs of a rotating ultrasonic motor control system with a hollow struc-

(outer ring output) is proposed to meet the needs of a rotating ultrasonic motor control system with a hollow structure, a fusion of rotor and load structure and a certain holding torque of some aircraft rudder control systems. The design and experimental study of the structure and pre-pressure applied scheme of the motor are carried out. The finite element model of the stator of the motor is established, and the influences of different structure sizes on the stator mode are analyzed. The sensitivity analysis of the structure size is carried out, the structure of the stator is optimized, and the resonance frequency and vibration amplitude are calculated. Finally, a prototype has been fabricated. The experimental results show that when the excitation voltage is 450 V and the excitation frequency is 40.2 kHz, the no-load speed of the prototype can reach 208 r/min and the blocking torque can reach 0.35 N \cdot m.

Key words: hollow; outer ring output; ultrasonic motor; finite element; size optimization

0 引言

超声电机利用压电陶瓷逆压电效应激发弹性体 的受迫振动,通过定、转子的摩擦作用将定子的微观 振动转化为转子的宏观直线运动或旋转运动。与传 统电磁电机相比,其具有低速大力矩、无电磁干扰、 位移分辨率高及结构紧凑等特点^[1],在精密驱动,航 空航天等领域应用前景好,近年来发展很快。但随 着应用领域的不断推广,也出现了一些局限,如某些 飞行器舵机需要电机具有中空结构,而现有超声电 机以实心轴输出为主。这使电机在系统集成过程中 总需要一系列的中间传动机构进行输出,系统体积 和质量变大,且电机的输出速度和系统效率降低。 虽已有学者提出中空型超声电机模型^[2],但目前中 空电机大多在现有超声电机的基础上将空心转子与 原实心轴融合设计。采用中空转子进行力和速度的 输出(内圈输出),不方便前、后零部件的安装,且易 隔断前、后零部件。因此,本文提出了一种新型的圆 筒型转子的中空超声电机,同属于旋转行波型超声 电机。该电机采用空心结构,外圈转子直接完成转 速与转矩的输出,使用过程无需中间传动机构,提高 了工作效率。分析其工作机理,利用有限元软件 Ansys 对定子结构进行模态计算和谐响应分析,进 一步优化了定子结构尺寸,确定其最佳工作模态频 率;制作了原理样机,并进行了相关的实验研究。

收稿日期:2018-05-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575259);国家重点基础研究发展计划("九七三"计划)基金资助项目(2015CB057500);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(NS2015004)

作者简介:王楠(1994-),男,河南周口人,硕士生,主要从事压电精密驱动方面的研究。通信作者:陈超(1976-),男,四川资中人,博士生导师,主要从事超声电机技术的研究。

1 电机结构及工作原理

1.1 电机结构布局

图1为外圈输出的中空型超声电机的结构示意 图。在现有行波型超声电机的基础上,定子取消了 固定内环,进一步扩大空心结构,使腹板尺寸更短, 抗过载能力有一定提高。转子采用刚性转子可保证 定、转子的接触宽度以增大定、转子间的实际接触面 积,提高工作效率。转子通过锁紧螺母、碟簧、轴承 和摩擦片压紧在定子齿面上,并完成二者间预压力 的施加。该设计结构简单,中心孔可用于穿过信号 线、电源线、光路及完成零部件的安装与固定^[3]。该 中空型超声电机直接通过转子进行转速和转矩的输 出,且转子可根据应用场合的实际情况进行结构融 合设计,不需中间传动机构,进一步提高了工作效 率,扩大了应用范围。



1.2 电机工作原理

该中空型超声电机选用的压电陶瓷片为环形压 电陶瓷,沿厚度方向极化,分为A、B两相,这两相在 空间上适当布置。压电陶瓷的极化和配置方式如图 2所示。



图 2 压电陶瓷的和配置方式

当 A、B 两相施加相位差为 90°的同频等幅交变 电压时,在定子中会激发出两相幅值相等、时间、空 间均相差 90°的驻波^[4],两相振型如图 3 所示。



两相驻波叠加后形成沿某一方向传播的行波, 定子的齿状表面各质点会分别形成椭圆轨迹,在定、 转子间预压力的作用下,将定子的微观振动转换为 转子的旋转运动。电机运行机理如图4所示。通过 定、转子间的摩擦作用带动转子旋转,从而输出一定 的转速和转矩。



图 4 电机运动机理图

2 定子结构设计与优化

定子是整个电机的核心部分,其完成能量的转换,并通过摩擦驱动转子转动,从而进行机械性能的输出^[5]。原实心轴超声电机定子通过定子固定内环固定在底座上,由于本文所述电机为中空结构,腹板尺寸较小,所以对定子的夹持方式进行了重新设计。本设计以实心轴超声电机定子为原型,取消了固定内环,通过一个开有内螺纹的压紧套筒对定子进行轴向固定,同时在远离定子齿的腹板面开有六边形凹槽,与中空底座上的六边形凸台相配合对定子进行周向限位。本文将定子结构尺寸分为基体厚度 L_1 、腹板高度 L_2 、定子齿高 L_3 和凹槽深度 L_4 4部分,如图 5 所示。



利用 Ansys 软件对定子进行建模,并采用六面 体主导的多分区方法进行网格划分。然后进行参数 化的模态分析^[6],分别确定各结构尺寸对 B09 模态 频率的影响趋势。求解过程发现,B09 模态前后始 终存在两干扰模态,如图 6 所示。



确定定子最佳工作模态时,首先采用摄动法, 即改变尺寸的1%^[6],求解得到上述结构尺寸对 B09模态及其前后两干扰模态的灵敏度,如图7 所示。



图 7 模态频率对结构尺寸的灵敏度

由图 7 可看出, L₁、L₃ 对 B09 模态影响较大, L₂、L₄ 对干扰模态影响较小。通过优化 L₃、L₂、L₁ 等结构参数,进而获得较大的速度因子及较好的工 作模态,最终确定其主要尺寸如表 1 所示。

表1 定子的主要参数

外径/mm	内径/mm	振动模态	谐振频率/kHz
Ø50	$\varnothing 25$	B09	40.1±3%

3 转子结构设计

提出的圆筒型转子的中空型超声电机,其工作 结构(舵翼)与电机转子是一体设计的。本文所述转 子采用刚性结构,如图 8 所示。定子与转子间的预 压力通过锁紧螺母、碟簧、轴承施加。在飞行器发射 过程,中空底座通过六边形凸台给定子提供向上加 速度,定子推动转子向上加速,柔性转子腹板太薄, 在高冲击环境下的表现差。而刚性结构使定、转子 间的接触状况更好,即使在高过载的情况下,定、转 子也能保证较好的接触宽度^[8],如图 9 所示。这提 高了二者间的接触摩擦力,使电机转速、转矩的输出 更平稳,有利于提高电机寿命。此外,本文采用通过 碟簧和刚性转子施加预压力的方式会提高电机的抗 过载能力得到。



图 8 转子结构图



图 9 高过载下定、转子接触示意图

4 实验研究

根据设计的结构,优化并确定各尺寸参数后制 作了原理样机,如图 10 所示。该样机的外形尺寸为 Ø60 mm×70 mm,质量约为 400 g。



图 10 电机实物图

4.1 定子模态实验

本文作者对加工好的定子进行了测振实验,利用 PSV 多普勒激光测振仪分别对 A、B 相进行扫频,定子两相的幅频特性曲线如图 11 所示。



图 11 定子 A、B 相频率响应特性

A、B 两相 B09 模态频率与前、后干扰模态频率 对比如表 2 所示。由表可知,该模态远离干扰模态, 满足设计要求。定子 A、B 相被激发出 B09 模态时 的频率分别为 39.67 kHz、39.68 kHz,两相频率差 为 10 Hz,可满足频率一致性要求^[9]。B09 模态下 定子 顶端质点的振幅为 2.078 μm,速度幅值为 0.5 m/s,与仿真结果相仿。

表 2 工作模态与干扰模态对比

	干扰(前)	B09	干扰(后)
A 相频率/kHz	32.56	39.67	46.93
B相频率/kHz	32.56	39.68	46.92

4.2 电机性能测试

对装配好的电机设计并搭建了相应的测试平台,如图 12 所示。进行了一系列的性能测试,绘制 了电机的负载特性曲线,如图 13 所示。该中空电机 在激励电压峰-峰值 450 V、频率 40.2 kHz 时,空载 转速可达 208 r/min,堵转力矩可达 0.35 N·m。



5 结束语

图 13

针对某些飞行器舵机等控制系统,要求超声电 机具有中空结构和一定的保持力矩等特定工程,本 文设计了一种圆筒型转子的中空型超声电机。分析 其工作机理,利用有限元软件 Ansys 对定子结构进 行建模和尺寸优化,确定了最佳尺寸。加工了原理 样机,进行了一系列的性能测试。实验表明,该中空 电机在激励电压峰-峰值 450 V,频率 40.2 kHz 时,空 载转速可达 208 r/min,堵转力矩可达0.35 N•m,可 满足实际的工程需要。

中空型超声电机的负载特性曲线

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: 1-6.
- [2] 田秀,王彦利,郎跃东,等.一种中空环形行波型超声电机的研制[J].振动、测试与诊断,2013,33(增2): 190-193.

TIAN Xiu, WANG Yanli, LANG Yuedong, et al. Development of a hollow ring-type of traveling wave ultrasonic motor [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013,33 (Suppl. 2): 190-193.

- [3] 李晓牛,周盛强.一种光阑用螺纹式空心超声电机[J]. 振动、测试与诊断,2013,33(增2):161-164.
 LI Xiaoniu, ZHOU Shengqiang. A hollow ultrasonic motor by screw diaphragm connected [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(Suppl. 2):161-164.
- [4] 王乐,王永杰,芦小龙,等.用于微型飞行器的高转速超 声电机[J].振动、测试与诊断,2018,38(1):170-175.
 WANG Le, WANG Yongjie, LU Xiaolong, et al. A new type of rotary ultrasonic motor applied to micro air vehicles[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2018,38(1):170-175.
- [5] 苏国兵,韩建超,齐鑫哲,等.行波型旋转超声电机定转 子设计及有限元分析[J].电机与控制应用,2017,44 (12):100-105.

SU Guobing, HAN Jianchao, QI Xinzhe, et al. Traveling wave rotary ultrasonic motor rotor-stator design and finite element analysis[J]. Electric Machines &. Control Application,2017,44(12):100-105.

- [6] 牛子杰,孙志峻,陈超,等.基于响应面模型与自适应遗传算法的中空型行波超声电机柔性转子结构优化[J].中国电机工程学报,2014,34(30):5378-5385.
 NIU Zijie, SUN Zhijun, CHEN Chao, et al. Optimization of the rotor structure of a hollow traveling wave ultrasonic motor based on response surface methodology and self-adaptive genetic algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(30): 5378-5385.
- [7] 陈超,赵淳生.基于半解析法的旋转型行波超声电机 定子的动态特性分析[J].中国机械工程,2005,16
 (21):1940-1944.
 CHEN Chao, ZHAO Chunsheng. Modeling of a trave-

ling wave rotary ultrasonic motor based on semi-analytical method [J]. China Mechanical Engineering, 2005,16(21):1940-1944.

[8] 陈超,任金华,石明友,等.旋转行波超声电机的冲击动 力学模拟及实验[J].振动、测试与诊断,2014,34(1): 8-14.

CHEN Chao, REN Jinhua, SHI Mingyou, et al. Impact dynamics simulation and experiment analysis of traveling wave type rotary ultrasonic motor [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34 (1):8-14.

[9] 杨淋,赵淳生.大力矩应力型纵扭复合超声电机[J].振 动、测试与诊断,2012,32(增1):126-131. YANG Lin, ZHAO Chunsheng. Stress-type hybrid ultrasonic motors using longitudinal and torsional vibration modes with large torque[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32 (Suppl. 1): 126-131.