

文章编号 1004-924X(2014)08-2081-07

光阑用螺纹式超声电机

李晓牛*, 周盛强

(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:研制了一种新型螺纹式空心超声电机,用于驱动光阑并控制和调节光束。由于光阑仅需有限角度转动,故采取螺纹方式连接超声电机定子和转子来施加轴向预压力和实现转子周向运动的耦合。电机仅由转子、定子和底座组成;其中转子与光阑定圈固定,实现了与光阑的一体化设计。运用有限元软件对定子进行了模态分析,选定工作频率为 38.26 kHz。受可加工螺纹螺距尺寸的限制,电机轴向运动使电机预压力变化较大,电机转动角度小,不能驱动光阑完成闭合或开启,故对转子进行了柔性化设计。仿真实验表明,在转动 90°范围内,定、转子预压力变化在 27%之内。试验研究表明:设计的电机定子振动特性良好,干扰模态距工作模态 5 kHz 以上;阻抗值变化不超过 10%。得到的结果验证了预压力变化对电机影响小;电机驱动光阑开启时间为 5 s,闭合时间为 4.4 s,开启、闭合直径与电机运行时间呈线性关系。该空心电机满足了光阑调节需求,具有结构简单、零部件少等特点。

关键词:光阑;超声电机;螺纹式电机;空心结构

中图分类号:TM35;TB559 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142208.2081

Ultrasonic motor connected by screw for aperture

LI Xiao-niu*, ZHOU Sheng-qiang

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

* Corresponding author, E-mail:lixiaoniu@nuaa.edu.cn

Abstract: A new type of hollow ultrasonic motor connected by a screw was proposed to drive an aperture and control and adjust the intensity of the beam. According to the characteristics of a limited angle of rotation for the aperture, the screw was used to connect the stator and the rotor of the ultrasonic motor to apply a pre-pressure to the axial and to implement the circumferential movement of the coupling. The motor is consist of a rotor, a stator and a base and the rotor and aperture were fixed in a setting ring, by which the diaphragm integrated design was realized. The stator modal was analyzed at an operating frequency of 38.26 kHz by using the finite element software. As motor pre-axial movement brings greater pressure changes, the motor has a smaller rotary angle and can not drive the aperture to open or close. To overcome the pre-pressure changes, flexible design of the rotor was performed. Simulation results show that, at default rotation 90° range, pre-pressure changers are within 27% of the variation. Tests show that the stator has excellent vibration characteristics, and its interference from work modal is 5 kHz or more; the impedance variation is not more than 10%, and the pressure change has a little

收稿日期:2013-12-02;修订日期:2014-01-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51275242, No. 51175264);南京航空航天大学基本科研业务费专项资金资助项目(No. NJ20120013)

effect on the motor. Furthermore, opening time of the aperture is 5 s, and its closing time is 4.4 s. The diameter of the aperture shows a linear relationship with motor run time. The motor meets the demands of aperture adjustment, and is characterized by simpler structure and a few parts.

Key words: aperture; ultrasonic motor; screw thread motor; hollow structure

1 引言

光阑是控制光束通过多少的设备,主要用于调节通过光束的强弱等。光阑在卫星合成孔径雷达、激光精密加工和精密光学仪器中有着广泛的应用。光阑由叶片、动圈和定圈组成,通过动圈和定圈的相对运动实现控制光阑叶片的运动和光阑的调节。早期的光阑采用手动调节方式,文献[1]提到采用电磁电机通过齿轮减速机构来带动光阑,实现调节功能;该装置需要额外的减速机构,整体结构复杂,体积大且不易实现高精度控制。文献[2]提出改变液晶的透光率实现光阑调节,但这种方法对材料性能要求高,应用环境受到限制。

超声电机是一种利用逆压电效应激发弹性体振动,进而通过摩擦传动实现宏观运动的新型电机。与电磁电机相比,超声电机能直接输出低转速大力矩,具有结构紧凑、不产生磁场、瞬态响应快、定位精度高等特点,适合取代传统的伺服电机,目前已被广泛应用于航空、航天、光学、医疗和微机电系统领域^[3,4]。不过,行波型旋转超声电机(Traveling-wave Rotary Ultrasonic Motor, TRUM)受其结构限制,即采用实心轴输出,光路不能穿过,故不能直接应用在光阑调节装置中。而环形超声电机由于采用叠弹簧施加预压力,其输出扭矩较小,不足以带动光阑的定圈和动圈实现相对运动。

本文设计了一种新结构的超声电机用于光阑调节,实现了光阑与电机的一体化。超声电机定、转子均采用中空设计,可实现光路的通过,且空心直径大;其通过螺纹施加预压力,由于施加的预压力大,可实现较大的输出扭矩;另外,电机结构简单,与光阑连接方便。本文加工制作了样机,对定子进行了有限元分析,并对转子进行了柔性化设计。

2 电机结构

2.1 现有行波型旋转超声电机结构上的限制

行波型旋转超声电机是目前应用较多的一类

超声电机,其 60 型(TRUM-60)结构如图 1 所示^[5-6]。

现有 TRUM-60 采用压簧和壳体限制定、转子位移施加预压力,输出轴在轴承支撑下实现旋转运动,预压力的施加和旋转轴承提供定转子间的旋转副互相独立;由于预压力施加复杂,不易实现空心化设计;另外,其定子通过螺钉固定在底座上,这种定子夹持方案限制了电机空心直径大小,不能满足光阑调节的要求。

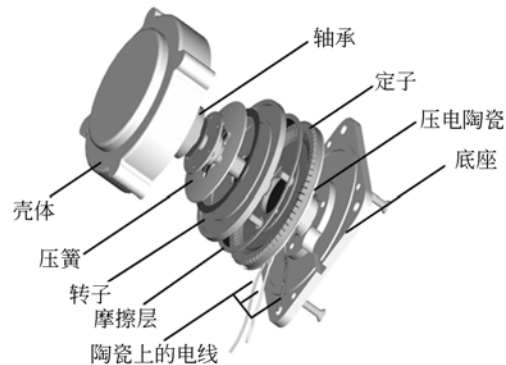


图 1 TRUM-60 结构示意图

Fig. 1 Block diagram of TRUM-60

光阑用螺纹式空心电机在 TRUM-60 的基础上改进了定子夹持方式和预压力施加方式;实现了空心直径大,预压力施加和转子转动功能的耦合;克服了 TRUM-60 应用上的限制。

2.2 螺纹式空心电机的结构

针对光阑动圈控制摆杆的运动范围为 90° , 空心直径为 22 mm 的要求,用于光阑调节的空心型超声电机仅需要在一定旋转角度范围内作旋转运动。相比轴承实现定、转子转动副而言,定、转子间用螺纹副连接可实现转动和施加预压力两种功能的耦合,同时可使电机的空心直径大。

图 2 所示为用于光阑的螺纹式空心超声电机的结构图。电机包括转子、定子、底座、摩擦材料层和压电陶瓷片等部分。在 TRUM-60 基础上,对转子和定子采取空心化设计,定子通过外螺纹与旋紧固定于底座。底座有阶梯环面,用于限制定子轴的轴向运动。定子和转子之间亦通过螺纹

连接,由拧紧力矩直接施加预压力,省去了原有电机的垫圈、轴承和外壳。实现了转动和施加预压力的耦合,减少了电机的零部件数,使结构更加紧凑。不需要旋转行波超声电机施加预压力的压簧、壳体 and 轴承(转动)等部件。

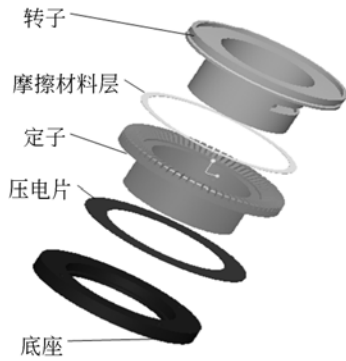


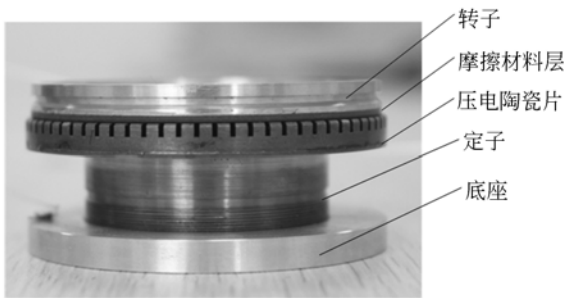
图 2 螺纹式空心超声电机结构简图

Fig. 2 Block diagram of a hollow USM connected by screw



(a)各组件图

(a)Component parts of motor



(b)整机图

(b)Fabricated motor

图 3 光阑用螺纹式空心超声电机实物图

Fig. 3 Pictures of a hollow USM connected by screw

图 3 所示为电机的各个部件。可以看出电机结构简单,零部件少。在转子与定子接触圆环接触面上贴有摩擦材料。定子的高频微幅振动形成的行波在摩擦力的作用下,可推动转子形成宏观的转动。光阑动圈与定子通过双头螺栓相固定;光阑定圈与转子内腔所设置的光阑安装部连接,

且转子内腔依照转子运动轨迹开设用于限制光阑定圈与动圈相对运动的限位槽。随着电机定转间的相对运动带动光阑的动圈和静圈之间发生相对运动,进而带动光阑完成闭合和开启。

3 定子设计

定子的性能决定了超声电机机械输出特性。螺纹式空心电机与 TRUM-60 定子的夹持方式不同,TRUM-60 定子通过 3 个螺钉将定子固定于底座;螺纹式电机的定子由于内孔直径加大,导致没有空间布置连接螺钉,因此采用定子和底座螺纹旋紧固定的方式。

空心电机定子与底座采取螺纹固定,故夹持方式发生了改变;其一端伸出长轴,还改变了定子的结构。由于空心设计的变化,需要建立定子的有限元模型,进行动力学分析。螺纹式空心电机利用了圆环形薄板 9 节径面外弯曲(B09)振动模式,采取了内圈固定外圈自由的夹持方式。本文利用 ANSYS 软件对空心超声电机进行了模态分析^[7],如图 4 所示。选定其工作模态为 38.26 kHz。

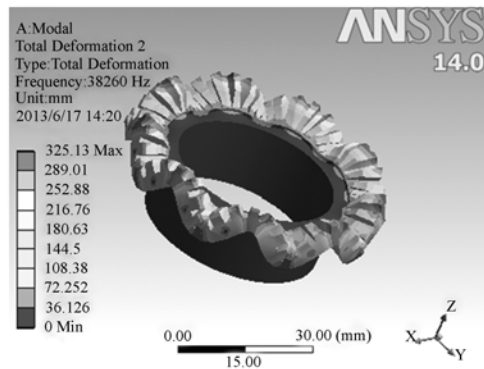


图 4 定子工作模态

Fig. 4 Mode shape of a hollow USM connected by screw

4 电机转子的设计

4.1 转子预压力变化的控制

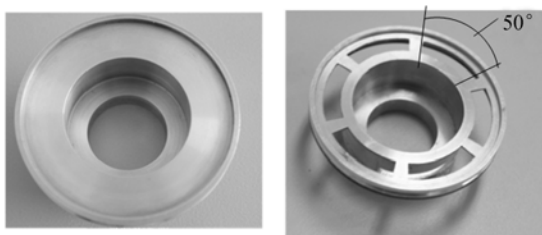
为使定子的微幅高频振动转化为转子的宏观转动,需要在定、转子之间预加一定压力,此压力

称为预压力。电机为实现光阑的开启和闭合,转子需要旋转 90°;而采取螺纹式连接的定、转子在电机运行时会发生轴向位移,进而使预压力发生较大变化。预压力的变化对超声电机输出特性有直接影响,甚至使电机不能正常运行^[8,9]。由于电机转动和预压力施加功能是耦合的,因而减小预压力的变化(定、转子间轴向运动)是螺纹式超声电机转子设计的关键。

减小螺纹式超声电机预压力变化的方法主要有调小螺纹螺距、增厚摩擦材料和降低转子的刚度。受加工条件限制,定、转子螺纹副的螺距为 0.5 mm。电机在旋进或旋出 90°时,定、转子会沿着轴向相对运动 0.125 mm。电机实际运行中预压力的不断变化影响超声电机运行。摩擦材料存在吸振作用,影响电机的驱动特性^[10],因而不能无限地增厚摩擦材料层。采用厚度为 1.2 mm 的摩擦材料层。尽量降低转子的刚度是进一步减少预压力变化的有效手段。

4.2 转子的柔性化设计

为降低转子刚度,对转子进行了柔性化设计。在电机转子柔性化设计时,既要满足预压力施加方向的刚度尽量小,又要满足驱动方向上(即转子运动方向上)刚度要求;因此需要控制电机在 90°范围内预压力尽量小的变化。对电机的转子表面进行了开槽处理,降低其刚度,实现了转子的柔性化设计,如图 5 所示。



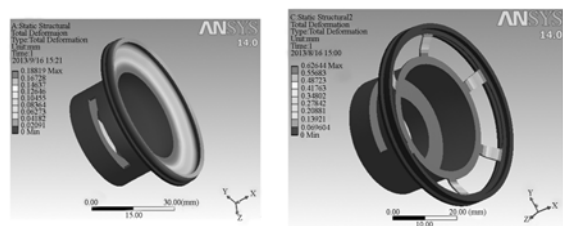
(a)未开槽转子 (b)开槽转子
(a)Rotor without slot (b)Rotor with slot

图 5 转子降刚度设计图

Fig. 5 Reducing stiffness design of rotors

通过有限元方法分析了不同结构形式的转子在转动过程中的预压力变化。在 ANSYS 计算中采用 Solid186 单元进行网格划分,转子下端面

施加固定约束;电机转动 90°,轴向位移为 0.125 mm;计算位移前后预应力的变化图 5 所示。未开槽的转子,启动时预设预压力为 223.5 N,旋进 90°后,预压力为 689.15 N;做开槽的转子,启动时预设预压力为 223.5 N,旋进 90°后,预压力为 285.31 N。可知在轴向位移在转子的变形在线弹性范围内,转子的轴向位移与预压力变化成线性关系。开槽后转子在一定轴向位移下,预压力变化相对较小;仿真显示定、转子预压力变化在 27%之内;开槽前转子轴向刚度为 37 240 N/mm,开槽后轴向刚度为 4 944.8 N/mm,如图 6 所示。对比在实际运行中开槽前后电机运行情况,开槽前电机最大能旋转 70°,开槽处理后的电机可旋转 300°。



(a)未开槽转子 (b)开槽转子
(a)Rotor without slot (b)Rotor with slot

图 6 转子变形云图

Fig. 6 Deformation of pre-pressure rotors

5 试验研究

5.1 定子模态实验

利用 PSV 激光多普勒测振仪对加工好的定子进行了模态试验,定子的扫频曲线如图 7 所示。定子的 B08、B09、B10 模态频率分别为 32 937.5、39 812.5 和 46 906.3 Hz。有限元计算结果与模

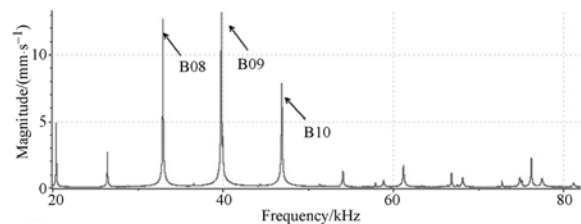


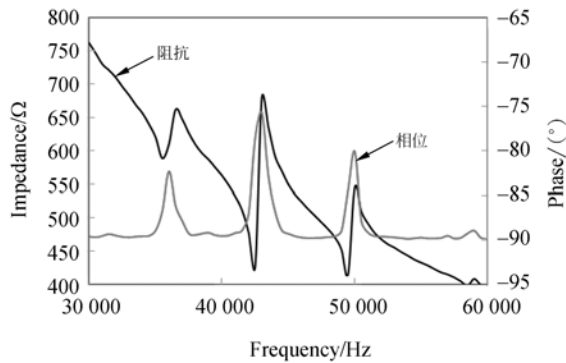
图 7 定子频率响应特性

Fig. 7 Frequency response of stator

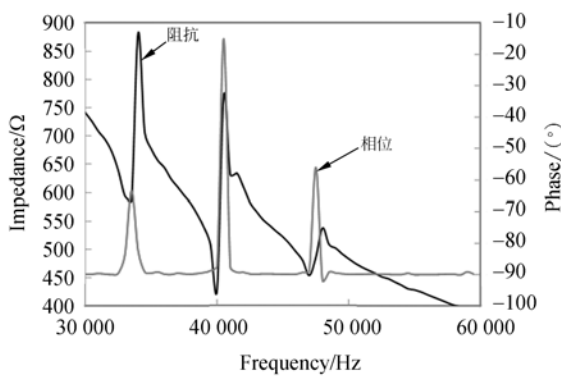
态试验结果相吻合,选择定子的 B09 模态作为工作模态。可以看出该模态与其它模态分开较远,可以有效避免模态干扰。定子在 39 812.5 Hz 时,被激发出 B09 模态,其顶端质点沿轴向位移和速度幅值分别为 2 μm 和 0.5 m/s。

5.2 电机阻抗测试实验

由于螺纹式空心超声电机定、转子间采用螺纹连接,所以定、转子会发生相对运动,预压力随之改变,影响超声电机的运行性能。电机预压力不易直观测量,为评估螺纹式电机预压力对电机性能的影响,采用间接方法测试未旋进时和旋进 90°时定子的阻抗来间接反映预压力对电机的影响^[11]。



(a) 旋进 90°时阻抗图
(a) Plot of impedance at precession of 90°



(b) 0°时阻抗图
(b) Plot of impedance at precession of 0°

图 8 定子阻抗测试

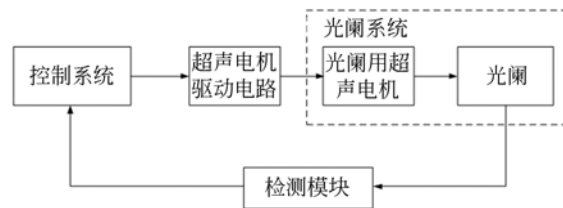
Fig. 8 Impedance test for stator

在未旋进(即 0°)时电机的阻抗和旋进 90°时的阻抗如图 8 所示。可以看出:由于螺纹预压力

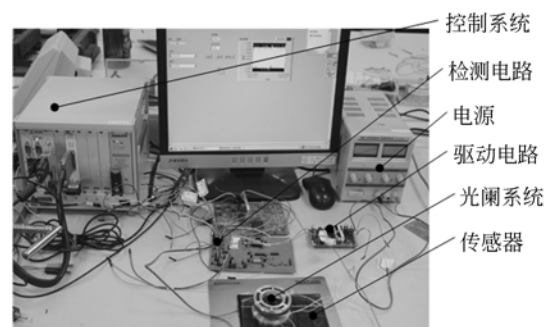
产生的模态力以及安装加持导致的边界条件的变化使得电机的谐振频率比自由定子谐振频率有所增加;随着旋紧运动,预压力增加,谐振频率上升;未旋进时(0°时),阻抗值大于旋进 90°时的阻抗值;其中电机所选运行模态为 B09,未旋进时和旋进 90°时阻抗相对变化不超过 10%,说明螺纹式空心超声电机运行 90°,预压力变化对电机影响不大。

5.3 光阑调节试验

为研究光阑用超声电机调节性能,搭建了电机试验装置。该系统由控制系统,超声电机驱动的光阑系统、超声电机驱动电路和检测模块等组成,如图 9 所示。驱动电路采用 CD4046 为核心的驱动电路;检测模块由光电检测传感器和检测电路组成,可检测光阑孔径大小;控制系统由凌华科技 PXI-3910 控制器和 NI PXI-6229 数据采集卡构成,完成对数据采集和对电机的控制。



(a) 试验装置原理图
(a) Structure diagram of test device



(b) 试验装置实物图
(b) Photo of test device

图 9 光阑调节试验装置

Fig. 9 Experimental setup for aperture

电机在电压峰峰值为 200 V、频率为 40.8 kHz 条件下可转动 300°,完全满足光阑动圈控制摆杆运动 90°的要求。在实际运行中选择了噪声

小,运行平稳的转动区间作为 90° 工作区间。

实验表明,电机驱动光阑开启时间为 5 s,闭合时间为 4.4 s,如图 10 所示。电机工作时间与孔径直径的关系如图 11、12 所示。可以看出电机工作时间与孔径直径呈线性关系;电机运行过程中平稳,调节准确,取得了良好的效果。

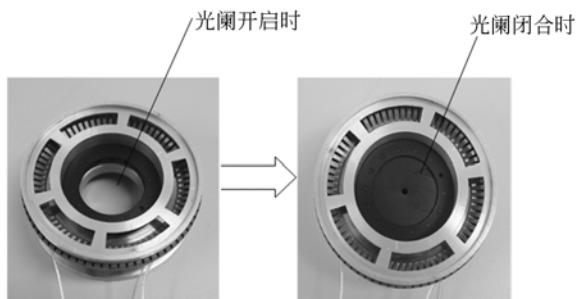


图 10 光阑开启和闭合

Fig. 10 Aperture with opened and closed states

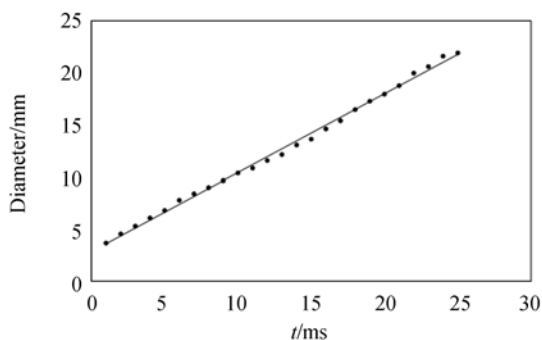


图 11 电机工作时间与光阑开启直径的关系

Fig. 11 Relationship between motor working time and opening diameter of aperture

参考文献:

- [1] 董莉莉,金宏. 采用可变光阑的自动调光系统的稳定性分析[J]. 光学精密工程, 1999, 7(1): 100-104. DONG L L, JIN H. The stabilization analysis of automatically adjustable optical-intensity system using Iris diaphragm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(1): 100-104. (in Chinese)
- [2] 索尼株式会社. 电调光器设备和其驱动方法[R]. CN: 1463377A, 2003. Sony Corporation. Dimmer electrical apparatus and driving method thereof [R]. CN: 1463377A, 2003. (in Chinese)
- [3] ZHAO C S. *Ultrasonic Motors Technologies and*

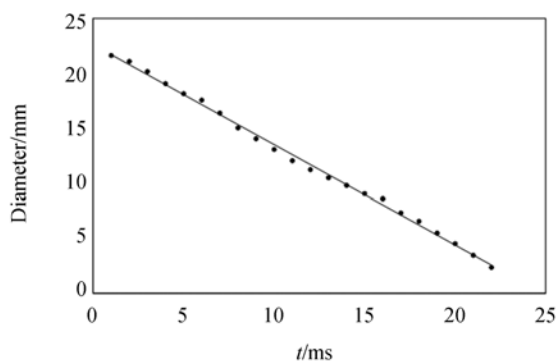


图 12 电机工作时间与光阑开启直径的关系

Fig. 12 Relationship between motor working time and closing diameter of aperture

6 结 论

针对光阑调节的需求,设计制造了一种新型螺纹式空心超声电机。定、转子采用螺纹式连接,实现了超声电机预压力施加和转子转动功能的耦合。在定子设计中,干扰频率与工作频率相差 5 kHz 以上。对转子进行了柔性设计;仿真表明,预压力变化不超过 27%,开槽前转子刚度为 37 240 N/mm,开槽后刚度为 4 944.8 N/mm,有效降低了转子刚度。电机运行阻抗相对变化不超过 10%。光阑调节实验中取得了良好的效果,开启时间为 5 s,闭合时间为 4.4 s,电机工作时间与光阑闭合开启直径呈线性关系,满足了光阑调节需求,实现了光阑、电机一体化。该空心电机具有结构简单、零部件少等特点。

Applications [M]. Scientific Press, Beijing, 1997.

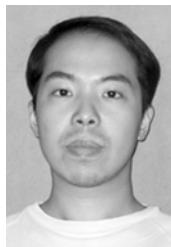
- [4] 王金鹏,全家福,赵淳生. 用于精密定位平台的直线超声电机的异步并联 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2693-2702. WANG J P, JIN J M, ZHAO CH SH. Asynchronous bundling of linear ultrasonic motor for position positioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2693-2702. (in Chinese)
- [5] LI X N, ZHOU S Q, YAO ZH Y. Research on locking device driven by ultrasonic motor for magnetic bearing flywheel [C]. *Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA)*, Shanghai: 2012: 56-60.
- [6] 周盛强,赵淳生,黄卫青. 旋转型行波超声电机接触

- 界面空间域分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12):63-68.
- ZHOU CH Q, ZHAO CH SH, HUANG W Q. Contact analysis of traveling wave type rotary ultrasonic motor in space domain [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(12):63-68. (in Chinese)
- [7] 赵向东, 赵淳生. 预压力对超声电机输出特性的影响的实验研究[J]. 力学与实践, 2002, 24(4):46-48.
- ZHAO X D, ZHAO CH SH, Effects of preload pm the output characteristics of ultrasonic motors[J]. *Mechanics in engineering*, 2002, 24(4):46-48. (in Chinese)
- [8] 王光庆, 沈润杰, 郭吉丰. 预压力对超声波电机特性的影响研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(3):436-440.
- WANG G Q, SHEN R J, GUO J F. Researches on effects to ultrasonic motor's performance of preload [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2007, 41(3):436-440. (in Chinese)
- [9] 周盛强, 赵淳生. 超声电机定子振动分析的模态选择[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12):3009-3015.
- ZHOU SH Q, ZHAO CH SH, Modal truncation to vibration analysis of stator in ultrasonic motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12):3009-3015. (in Chinese)
- [10] 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.
- ZHU H, CHEN CH, ZHAO CH SH, Investigation on a cylindrical ultrasonic micromotor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(12):128-133. (in Chinese)
- [11] 曲建俊, 周铁英, 齐毓霖, 等. 超声马达转子摩擦材料厚度对驱动性能的影响研究[J]. 摩擦学学报, 2002, 22(02):134-137.
- QU J J, ZHOU T Y, QI Y L, *et al.*. Effect of thickness of rotor friction material on the performance of ultrasonic motor [J]. *Tribology*, 2002, 22(02):134-137. (in Chinese)

作者简介:



李晓牛(1985-),男,山东济宁人,博士研究生,2013年于南京航空航天大学获得硕士学位,主要从事超声电机技术与应用研究。E-mail: lixiaoniu@nuaa.edu.cn



周盛强(1975-),男,博士,副研究员,主要从事动力学建模仿真及优化设计。zhousq@nuaa.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)