

环状压电超声电机的多频率驱动分析与实验

郭 辉¹, 路素银¹, 李迅波¹, 赵淳生²

(1. 电子科技大学机械电子工程学院 成都 610054; 2. 南京航空航天大学超声电机研究中心 南京 210016)

【摘要】针对压电超声电机的多频率驱动问题进行研究,设计并制作了利用定子内圆周面驱动的环状压电超声电机,明确了利用行波驱动电机转子的机理。通过有限元计算给出了电机定子所用弯曲模式的振型与位移云图。以计算结果为基础,分析了电机所用的压电陶瓷片的极化分区与定子弯曲模式激发之间的关系,得出了所用的压电陶瓷片能够实现电机多频率转动的结论。完成了所研制的超声电机的多频率驱动实验。实验结果表明,电机能够在多频率点的转动。依据本文分析思路,可以对其他结构形式的超声电机的多频率驱动问题进行研究。

关键词 频率; 模式; 超声电机; 定子

中图分类号 TM3

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.03.032

Design and Experiment of Annular Piezoelectric Ultrasonic Motor with Multi-Frequency Driving

GUO Hui¹, LU Su-yin¹, LI Xun-bo¹, and ZHAO Chun-sheng²

(1. School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Research Center of Ultrasonic Motors, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing 210016)

Abstract An annular ultrasonic motor driven by circle side was designed and fabricated. The mechanism that traveling wave revolves the motor rotor is expounded. According to finite element calculation and analysis, the vibration shape and the displacement contour of bending modes of the motor stator is presented. And on the basis of these calculation results, the relationship between electrode arrangement of PZT and bending mode excitation of the stator is analyzed. Results show that piezoelectric ceramic pieces used can rotate the motor with multi-frequency. The multi-frequency driven experiments of the motor have been completed. The experimental results verify the correctness of the analysis. Therefore, based on the idea presented in this paper, the problems for ultrasonic motors of other structure with multi-frequency driving can be studied.

Key words frequency; mode shape; ultrasonic motor; stator

压电超声电机以其响应的快速性、结构形式的多样性、低转速条件下的良好输出特性以及易于小型化等特点,在微小型器械的驱动领域有较广泛的应用前景。在种类众多的超声电机中,环形压电超声电机一直是该领域的研究热点之一,国内外专家曾对该类电机进行了多方面的分析和研究^[1-5]。近年来,针对该类电机的工作主要集中在以下方面:(1)电机性能的提高^[6-8];(2)电机的建模与仿真^[9-10];(3)电机的具体应用。文献[11]和文献[12]分别研究了该类电机在机器人手臂中的应用和在低温环境中的工作问题。现有的超声电机只有一个工作频率,所以电机本身只能提供一种输出特性。而为使微小型机电装置完成更为复杂的动作,需要其驱动电机在不同的工作场合,能够提供不同的转速与转矩,即应

该具备不同的机械输出特性,因此有必要对压电超声电机开展该方面的研究。基于上述原因,本文针对环形行波超声电机多种不同机械特性的输出问题展开探讨。由于超声电机依靠定子的超声振动驱动转子,定子的共振频率不同,则电机的输出特性不同。所以,可以通过实现电机在定子多种不同频率下的运转,使电机提供多种不同的输出特性。本文首先利用有限元方法得出了环形定子的弯曲模式振型和相应的位移云图,在此基础上分析了压电陶瓷片的极化分区与电机多频率驱动的关系,并研制了利用定子内圆周面驱动的超声电机样机,完成了样机的多频率驱动实验。实验结果表明,本文所研制的样机能够实现多频率驱动。以此为基础,可以进一步深入研究超声电机定子多个振动模式的激发与

压电陶瓷片极化分区的关系, 以及超声电机多频率驱动的深层次问题。

1 样机结构与驱动机理

本文研制的样机结构如图1所示, 定子由圆环钢片与环状压电陶瓷片粘结而成, 定子内圈均布矩形小齿。电机转子为一端带有台肩结构的圆形钢片, 转子台肩面与端面的倾角为45°, 电机转子驱动端嵌装在定子内圈。由于在这种结构中, 电机定子和转子的接触不沿定子的圆环端面, 而沿定子圆环的内圆周侧面, 所以与电机定子和转子的接触定子的圆环端面电机相比, 可以有效地减小电机厚度。



图1 电机结构简图

电机定子在两相激励时, 圆环型电机定子上激发出一列弯曲行波, 即有:

$$S_1 = AJ_m(kr) \cos m\varphi \cos \omega t \tag{1}$$

$$S_2 = AJ_m(kr) \sin m\varphi \sin \omega t \tag{2}$$

式中 J_m 为第 m 阶贝塞尔函数; m 为波数; ω 为角频率; r 为质点的半径坐标。

定子表面任意质点的位移为式(1)和式(2)的合成^[4], 即:

$$S_z = S_1 + S_2 = AJ_m(kr) \cos(m\varphi - \omega t) \tag{3}$$

由式(3)可知, 环形定子表面质点竖直方向的位移除与圆周方向的坐标 φ 有关外, 还与质点所处的径向坐标 r 有关。对于相同周向坐标 φ 上的各个质点, 其振幅随径向坐标 r 的增大而增大。由于存在上述变形特征, 使得圆环定子质点的位移除有一竖直方向的分量外, 还会产生一个径向分量。该径向分量的存在使得电机定子质点的椭圆运动轨迹随之发生倾斜。这种倾斜使得定子圆环内圆柱侧面的上端质点的椭圆运动可以推动嵌装在定子内圈的转子。因此, 利用定子内圆周质点的推动同样能实现电机的正常运转。

图2所示为定子行波状态下的横截面图, 图中上下两个倾斜矩形分别表示定子振动过程中波峰和波谷时的横截面位置, 中间的矩形为平衡位置时的横截面位置, 从中可以看到波峰位置时内圈左上角点

A 存在径向位移 S_r , 使位移 S 相对于竖直方向位移 S_z 倾斜, 也使行波状态下的椭圆轨迹倾斜。

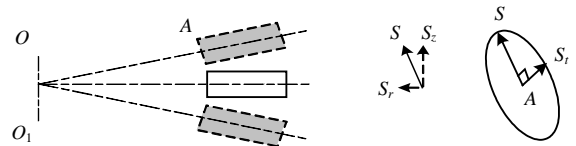
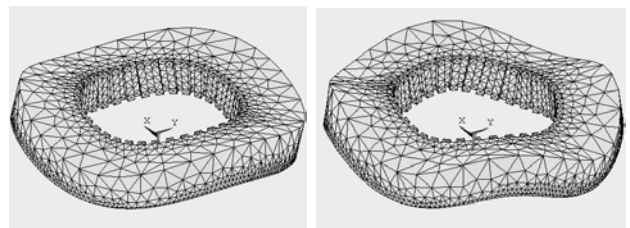


图2 定子波峰质点位移特征

2 样机多频驱动分析与实验

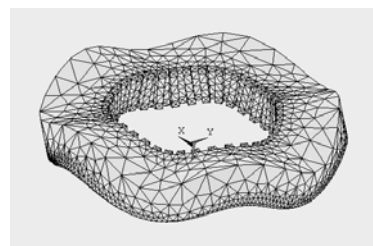
超声电机利用定子的超声振动来驱动, 电机设计时须选择合适的定子振动模式。而定子的振动又依靠粘接于其上的压电陶瓷的激励, 因此压电陶瓷的极化分区对电机振动模式的激发有直接的影响。基于上述原因, 在确定多频率电机定子所用多个振动模式时, 可以首先得出定子所用多个模式的振型和相应的位移云图, 以此为依据分析压电陶瓷片的极化分区能否激发出定子所用的多个振动模式。

本文所选电机定子的振动模式为 $B(0,3)$ 、 $B(0,4)$ 、 $B(0,5)$, 为了考察定子在上述3个模式的变形特征, 可利用有限元软件 ANSYS 计算出定子在不同频率点的弯曲模式振型。图3给出了电机定子的 $B(0,3)$ 、 $B(0,4)$ 、 $B(0,5)$ 弯曲模式振型的计算结果及相应的位移云图。颜色的深浅表示定子相对位移的大小不同。由图3可知, 电机定子的 $B(0,3)$ 、 $B(0,4)$ 、 $B(0,5)$ 弯曲模式位移云图有以下共同的特点: (1) 3个弯曲模式的位移变化均沿径向呈放射状; (2) 位移变化沿圆周方向则呈周期性变化。不同之处只是 $B(0,4)$ 、 $B(0,5)$ 弯曲模式的位移云图沿圆周方向的变化周期数在 $B(0,3)$ 模式位移变化周期数的基础上依次增加。



a. $B(0,3)$ 振型

b. $B(0,4)$ 振型



c. $B(0,5)$ 振型

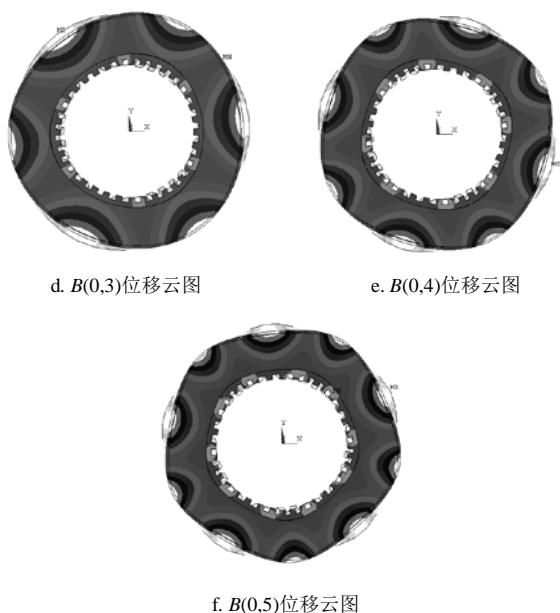


图3 $B(0,3)$ 、 $B(0,4)$ 、 $B(0,5)$ 弯曲模态振型与位移云图

本文所用的电机电压电陶瓷片的极化分区形式如图4所示,从大的分区来看,陶瓷片的极化分区从左至右分为A和B两个区域,A区和B区显然都没有完全布满整个圆环面,而是各占陶瓷片的左右两个局部区域。在A和B的每一区域内,又分别按照正负相间的顺序分为6个小区域,每相邻两个小区域的极性相反。另外,在压电陶瓷圆环的正上方与正下方分别存在两块分隔A和B的隔离区域。由B区沿顺时针方向,正下方的隔离区域使得A和B两个区域在空间位置上相差四分之一波长;正上方的隔离区域使得A和B两个区域相隔四分之三个波长。电机工作时,A和B两个区域作为A和B两相,分别连接正弦和余弦交变电压,则会分别在整个圆环定子上激发出相应的弯曲模态即驻波,该两个驻波合成行波,可以推动电机转子旋转。

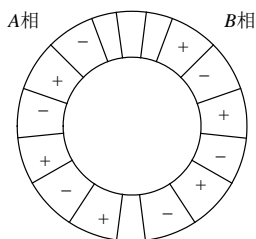


图4 压电陶瓷片极化方案

由上述压电陶瓷片的极化分区方案可知,无论是A相还是B相,在激发定子的弯曲模态时,压电陶瓷片由于逆压电效应产生的对定子作用力并没有布满整个圆周。在A相和B相的各自区域内,作用力对定子的变形有一定的约束作用,但这种约束力并不

足以唯一确定电机定子的振动模态。对A相和B相而言,在超出各自区域以外的另一个区域,其作用力对定子变形的约束作用进一步减弱,会导致压电陶瓷片在定子的不同共振频率点,可能激发出定子的多个不同弯曲模态,可以作为超声电机多频率驱动的基础。

如前所述,压电陶瓷片的极化分区影响激发电机定子振动所需要的外力分布,进而影响整个电机定子各点的位移。当只考虑压电陶瓷片极化分区的上述作用时,由图4可知,本文所用的压电陶瓷片A和B两区域内各有3组正负相间的小极化区域,在电机工作时可分别使A和B两区域产生3个应力变化周期,计入上下两个隔离区,定子的应力分布在整个圆周上出现7个变化周期。与此对应,定子的位移在整个圆周上也会出现7个变化周期。因此在激发定子的弯曲振动模态时,容易激发出定子的七阶弯曲模态 $B(0,7)$ 。

另一方面,由于定子材料本身的刚性会抵抗它的上述弯曲变形。因此,当计入定子本身的刚性作用时,定子各点的位移变化在圆周方向上的变化次数将小于七阶弯曲模态的变化次数。即利用图4所示的压电陶瓷片,不仅能激发七阶弯曲模态,还可能激发出定子低于七阶的弯曲模态。而要使这些低阶模态更容易被激发,除去压电陶瓷片的激振频率等于定子的相应阶共振频率之外,一个重要条件是每一阶模态下的位移变化特点,应与图4所示压电陶瓷片的激化分区有尽可能多的一致性。对比图3和图4可以看出,两者沿径向均呈放射状,沿圆周方向均呈周期性变化。所以,当综合考虑压电陶瓷片极化分区和定子本身刚性两者的共同作用时,电机定子的 $B(0,3)$ 、 $B(0,4)$ 、 $B(0,5)$ 弯曲模态也可能被陶瓷片激发,从而使电机在上述3个模态下均能转动。

为了验证上述分析,本文制作了图1所示的电机样机,并完成了电机样机运转实验。在实验中,样机在25.8、45.6、66.9 kHz处均能推动转子转动。按照有限元计算结果,上述3个频率点恰为电机定子的 $B(0,3)$ 、 $B(0,4)$ 、 $B(0,5)$ 弯曲模态频率点。表1所示为定子弯曲模态频率的计算值和实验值,表2所示为定子有限元计算所用材料参数。由表1中数据可知,图3的方案能够激发定子的 $B(0,3)$ 、 $B(0,4)$ 、 $B(0,5)$ 弯曲模态,从而证实了本文的分析。

表1 图3方案的弯曲模态频率计算值和电机驱动频率实测值

模态阶数	$B(0,3)/\text{kHz}$	$B(0,4)/\text{kHz}$	$B(0,5)/\text{kHz}$
频率有限元计算值	27.0	47.2	69.5
驱动频率实测值	25.8	45.6	66.9

表2 电机有限元计算所用的材料参数

材料	杨氏模量/GPa	杨氏模量/GPa	杨氏模量/GPa	密度/ $\text{e}^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	泊松比	泊松比	泊松比
钢	210	210	210	7.86	0.27	0.27	0.27
压电陶瓷	70	70	82	7.55	0.20	0.20	0.22

3 结 论

本文通过有限元计算分析了本文所研制的样机能够实现多频率驱动的原因。结果表明, 参照定子弯曲模态的位移云图, 合理规划压电陶瓷片的极化分区, 可以实现该种电机的多频率驱动。样机多频率下的运转实验证实, 在考虑定子本身刚性的基础上, 利用有限元计算所得定子弯曲模态振型和位移云图能够研究电机多频率驱动的实验现象。以上述工作为基础, 可以进一步对压电陶瓷片的极化分区与定子振动模态的激发问题进行系统的研究, 优化压电陶瓷极化分区方案, 用于多频率超声电机的驱动。此外, 可以探讨其他结构形式超声电机的多频率驱动问题。

参 考 文 献

- [1] LEINVUO J T, WILSON S A, WHATMORE R W. Flextensional ultrasonic motor using the contour mode of a square piezoelectric plate[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2004, 51(8): 929-936.
- [2] BAI Dong-zhe, ISHII T, NAKAMURA K, et al. An ultrasonic motor driven by the phase- velocity difference between two traveling waves[J]. IEEE transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2004, 51(6): 680-685.
- [3] DONG shu-xiang, ZHANG Jin-dong, WOO Hyeoung, et al. Flexural traveling wave excitation based on shear-shear mode[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2004, 51(10): 1240-1246.
- [4] 郭 辉, 谭台哲, 宁新宝, 等. 薄型超声电机两相及单相激励的工作机理与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 153-157.
- [5] GUO Hui, TAN Tai-zhe, NING Xin-bao, et al. Mechanism analysis and experiment research on thin-type ultrasonic motor exciting by two-phase and single-phase voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 153-157.
- [6] AOYAGI M, NAKAJIMA T, TOMIKAWA Y, et al. Examination of disk-type multidegree-of-freedom ultrasonic motor[J]. J Appl Phys, 2004, 43(5B): 2884-2890.
- [7] LEINVUO J T, WILSON S A, WHATMORE R W, et al. A new flextensional piezoelectric ultrasonic motor-Design, fabrication and characterization[J]. Sensors and Actuators, 2007, A 133: 141-151.
- [8] 胡敏强, 王心坚, 金龙, 等. 行波超声波电机瞬态特性的分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 120-125.
- [9] HU Min-qiang, WANG Xin-jian, JIN Long, et al. Measurement and analysis on transient response of traveling-wave ultrasonic motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 120-125.
- [10] 陈 宇, 刘庆利, 周铁英. 大力矩行波超声电机的性能[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(3): 396-398.
- [11] CHEN Yu, LIU Qing-li, ZHOU Tie-ying. Performance of large torque traveling ultrasonic motor[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46(3): 396-398.
- [12] 王光庆, 陆国丽, 郭吉丰. 基于能量等效模型的行波型超声电机解析模型[J]. 机械工程学报, 2008, 44(2): 74-81.
- [13] WANG Guang-qing, LU Guo-li, GUO Ji-feng. Analytical model of traveling-wave type ultrasonic motor based on the energy equivalent method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 74-81.
- [14] 陈 超, 曾劲松, 赵淳生. 旋转型行波超声电机理论模型的仿真研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(2): 129-133.
- [15] CHEN Chao, ZENG Jin-song, ZHAO Chun-sheng. Study on the analytical model of the rotary traveling wave type ultrasonic motor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(2): 129-133.
- [16] RHO Jong-seok, OH Kwang-II, KIM Hong-seok. Characteristic analysis and design of a B14 rotary ultrasonic motor for a robot arm taking the contact mechanism into consideration[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2007, 54(4): 715-728.
- [17] DONG Shu-xiang, YAN Li, VIEHAND D, et al. Hackenberger, a piezoelectric single crystal traveling wave step motor for low-temperature application[J]. Appl Phys Lett, 2008, 153504(92): 1-3.

编辑 黄 莘