文章编号　1004-924X(2009)02-0375-05

单相激励旋转步进超声电机原理

时运来,金家楣,赵淳生
(南京航空航天大学 精密驱动研究所,江苏 南京 210016)

摘要:提出了一种单相激励的旋转步进超声电机并阐述了其结构与工作原理。该电机采用同一种工作方式实现驱动和定位,避免了现有自校正步进超声电机失步或多步的问题,并解决了现有自校正步进超声电机的定、转子摩擦界面难以设计的问题,具有开环控制下无累积误差的特点。利用有限元仿真方法对定子结构进行了设计,制作的原理样机实验中未发现错步现象,其堵转力矩、步距角和单步运行最大误差分别为 0.003 2 N ·m,7.5°和 0.6°。

关　键　词:超声电机;步进电机;自校正
中图分类号:TM35;TB559　　**文献标识码**:A

Rotary stepping ultrasonic motor driven by single-phase signal

SHI Yun-lai, JIN Jia-mei, ZHAO Chun-sheng

(*Precision Drive Laboratory, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing* 210016, *China*)

Abstract: A rotary stepping ultrasonic motor driven by single-phase signal is proposed in this paper. It can realize driving and positioning under the same operating pattern to avoid miss steps and can solve the difficulty in designing a frictional interface between the stator and the rotor which is usually presented in the self-correction ultrasonic motors. Proposed rotary stepping ultrasonic motor is characterized by its no cumulative errors in open-loop control. Moreover, the construction of stator is designed with ANSYS software. Desiged prototype shows it runs steady without miss-step on trial, and the stall torque, stepping angle, and the error of one step are 0.003 2 N ·m, 7.5° and 0.6°, respectively.

Key words: ultrasonic motor; stepping motor; self-correction

1　引　言

步进超声电机具有一般超声电机的特点,与电磁步进电机相比较,具有结构简单、易于小型化、无电磁干扰、环境适应性强等特征[1]。在光学仪器、机器人、空间探测、自动控制、军事设施、医疗设备等方面将会有广泛的应用前景。

在给定的激励下,按规定的步距运行规定步数的超声电机称为步进超声电机。以步距为特征可以把步进超声电机分为:可调步距型步进超声电机和定步距型步进超声电机。

可调步距型步进超声电机是由驱动电源的通断使超声电机产生起停而实现步进运动的超声电机[2-3]。基本方法为输入电源的脉宽控制步距,超声电机启动、关断时速度的波动影响单步定位精

收稿日期:2008-10-28;**修订日期**:2008-11-25.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10874090, No. 50775109);江苏省高技术研究重大资助项目(No. BG2006005)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

度,步距越小,影响越大。大步距或多步运行时,需用反馈回路减小其定位误差。近年来出现的惯性式压电电机即属于可变步距型。该电机利用加载和卸载的时间不同而获得两个方向上惯性力的差异,使得机构产生运动。一次加载和卸载组成的一个周期导致的位移即该类电机的步距,步距依赖于激励电压峰值和波形[4],误差与压电陶瓷的非线性、磁滞等特性有关[5-6],开环控制时存在累计误差。

定步距型步进超声电机是采用了一些特殊结构形式实现开环控制的步进超声电机[7-12]。这类步进超声电机在多步运行时没有累计误差。单步定位误差主要来源于机械加工和装配误差,步距角是确定的。

比较而言,定步距型步进超声电机不需要反馈系统来消除累计误差,具有更广泛的应用前景。其中,自校正步进超声电机[12]利用了转子槽与定子齿相配合的方式实现转子定位,定位可靠。但是,由于每一步运行由驻波驱动和自校正定位两种工作模式来完成,其工作模式的切换时刻至关重要。如果由于负载变化或其它原因使得其驱动速度发生波动,可能还没有离开当前自校正区域就切换为定位工作状态,导致原地踏步;或超过了下一个自校正区域进入到后面的自校正区域才切换为自校正工作状态,导致多步的现象。此外,驻波驱动时,定转子接触界面上的摩擦力为驱动力,摩擦系数越大,电机的承载能力越强。而在自校正定位时,定转子接触界面上的摩擦力为阻力,摩擦系数越大,电机的承载能力越弱。因此,摩擦副的设计是比较困难的。

本文描述的单相激励的旋转步进超声电机采用同一种工作方式实现驱动和定位。在整个工作过程中,界面上的摩擦力都是阻力,对摩擦副只需考虑减小摩擦系数即可。避免了上述自校正步进超声电机的摩擦副难以设计的问题;单步运行中无须进行工作方式的切换,避免了上述自校正步进超声电机失步或多步的问题。

2 定子结构及工作模态

定子采用端面具有 16 个齿的圆板结构,如图 1(a)所示。反面粘贴单向极化的压电陶瓷环,如图 1(b)所示,其上具有 16 个均匀扇形电极分区,电极分区与定子齿在轴向一一对应,用于激励圆板工作模态。

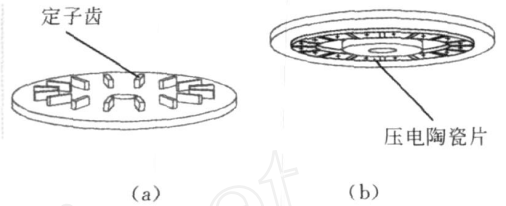


图 1 定子结构

Fig. 1 Configuration of stator

工作模态选用圆板的 B_{12} 模态,如图 2 所示。下标 1 表示圆板节圆数,下标 2 表示圆板周向节径数。

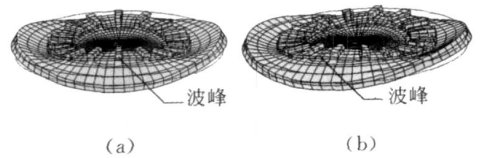


图 2 定子模态

Fig. 2 Modes of stator

利用 ANSYS 软件对定子进行的模态分析发现:由于齿的影响,定子板上存在两个 B_{12} 模态。一个振型的波峰处有齿,如图 2(a)所示,模态频率为 29.795 kHz;另一个振型波峰位于两个相邻齿的中间,如图 2(b)所示,模态频率 31.952 kHz。其中,图 2(a)所示为工作模态,图 2(b)所示为非工作模态。

3 电机结构及驱动机理

电机结构如图 3 所示,转子在周向均匀开有 12 个槽,将圆板分为 12 个扇形部分,转子与定子同轴,经弹簧压在定子齿上。

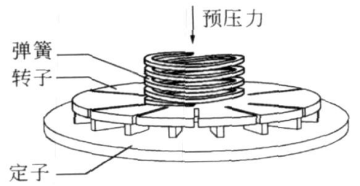


图 3 单相激励型旋转步进超声电机结构示意

Fig. 3 Construction of rotary stepping ultrasonic motor driven by single-phase signal

为方便观察,将定、转子沿周向展开,其展开

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

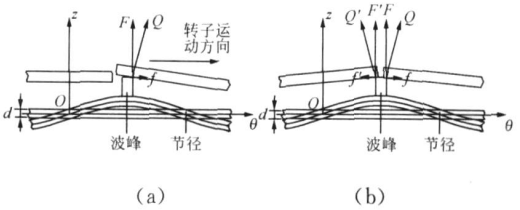


图 4　驱动机理

Fig. 4　Driving principle

图如图 4 所示。

设初始状态定子齿位于转子槽附近,当定子振动时,定子齿产生沿 z 向的往复运动。转子小叶在定子齿的作用下产生扭转变形,从而产生周向力 f (图 4(a)) 推动转子转动。当转子槽位于定子齿处时,定子齿对相邻两个转子小叶的周向力 f 与 f 大小相等、方向相反,转子不再转动(图 4(b))。因此,只要波峰处的定子齿不在转子槽处,定子的振动就可以使得转子转动,而当转子槽位于定子波峰处的齿处时,转子就不再转动。定子波峰处的齿即为驱动齿,如果切换压电陶瓷通电分区,可使定子上另一组齿位于振型的波峰处,成为新的驱动齿。只要这组齿不在转子槽处,就可推动转子继续转动。因此,通过切换压电陶瓷通电分区,可以控制电机实现步进运动。

由于波峰处的定子齿没有周向运动分量,转子的驱动力全部来源于预压力作用下定转子接触界面上的周向分量,界面上的摩擦力作负功。

4　步进原理及步距角

为方便观察,将如图 4 所示电机定转子沿周向展开,如图 5 所示。

按图 5(a) 所示给压电陶瓷提供电压信号,定子板在压电陶瓷环的振动下产生 B_{12} 弯曲驻波。转子扇形块在定子波峰处齿的作用下产生扭转弹性变形和周向力,推动转子在图示方向上运动(图 5(b)、(c))。当转子槽位于定子波峰处时(图 5(d)),转子停止转动。电机第一步运动完成,转子转过角度 $\delta = 2\pi/48$ rad。按图 5(f) 所示给压电陶瓷提供电压信号,定子板在压电陶瓷环的振动下产生 B_{12} 弯曲驻波,此时定子振型已绕电机轴转动 $2\pi/16$ rad 弧度。转子扇形块在定子波峰处齿的作用下扭转弹性变形,产生周向力,推动转子在图示方向上运动(图 5(g)、(h))。当转子槽位于定子波峰处时(图 5(i)),转子停止转动。电机第二步运动完成,转子转过角度 $\delta = 2\pi/48$ rad。如此不断改变压电陶瓷供电分区可使振型一步步旋转,推动转子实现步进运动。电机步距角为 $\delta = 2\pi/48$ rad。同理,定子振型向反方向旋转可使转子步进运动反向。

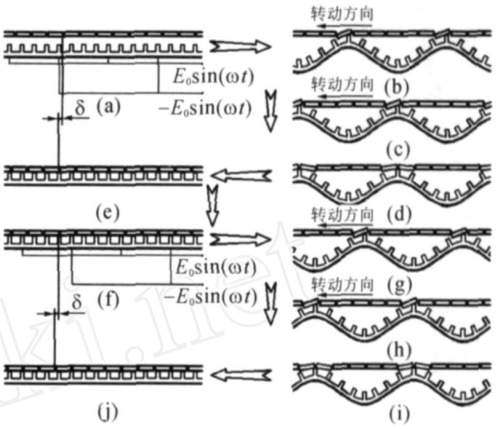


图 5　步进原理

Fig. 5　Stepping principle

该型步进超声电机的步距角等于转子上相邻槽间夹角与定子相邻齿间夹角之差。定子齿与电极分区一一对应,齿数等于电极分区数。电极分区数与采用的工作模态相关,若采用 B_{1k} 模态,参与工作的齿数为 $2k$,至少需要 $2\times 2k$ 个齿才能使模态转动进行新位置的自校正,因此电极分区数应为 $2ik$(其中 i 为大于 1 的自然数)。转子槽数应为 $2k$ 的倍数即 $2jk$(j 为自然数),同时应小于定子齿数(即 $j < i$),定子相邻齿间夹角小于转子槽间夹角。步距角为:

$$\theta = 2\pi/(2jk) - 2\pi/(2ik) = 2\pi(1/j - 1/i)/(2k),$$

本例中 $j = 3$; $i = 4$,步距角为 $\delta = 2\pi/48$ rad。

5　原理样机及试验结果

定子材料为磷青铜,PZT8 压电陶瓷片外径为 30 mm、内径为 20 mm、厚度为 0.5 mm,用环氧树脂胶粘贴在定子上。用激光多普勒测振仪 OFV056(Polytec) 对定子进行扫频和定频测试。

定子扫频结果如图 6 所示。B_{12} 振型波峰处有齿时,模态频率为 28.62 kHz;波峰处无齿时,模态频率为 29.28 kHz。

定子的振幅以峰峰值 300 V、频率 28.62

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

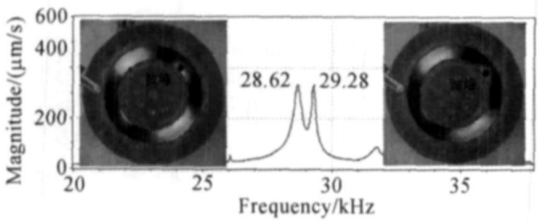


图6 定子模态测试

Fig.6 Modal test of stator

kHz激励压电陶瓷上相邻4个电极分区获得,结果如图7所示。

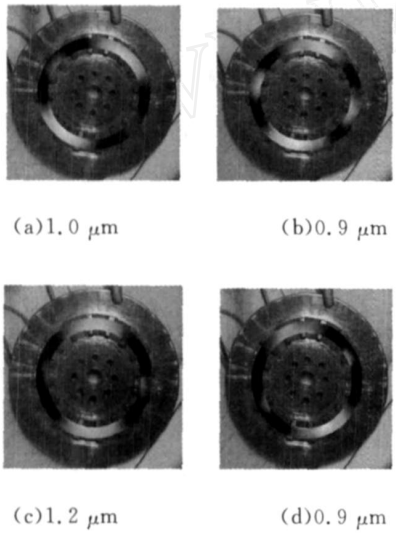


图7 定子振幅测试

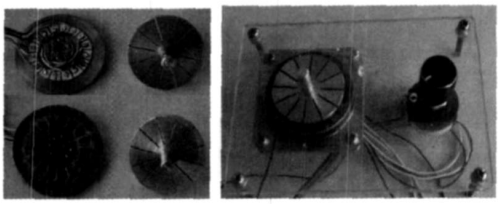
Fig.7 Amplitude test of stator

图8为单相激励型旋转步进超声电机原理样机。转子经弹簧压在定子齿上,定子由螺栓固定在底座上,转子材料为硬铝。

驱动信号输入导线直接焊接在压电陶瓷环的电极分区上,经一个四相切换开关与驱动器相连。顺时针旋转切换开关,电机转子顺时针步进;逆时针旋转切换开关,电机逆时针步进。

在电机轴上安装指针,电机外壳上粘贴分度盘,用于测量电机单步角位移。无负载时,步进测试结果如图9所示,步距角6.5°,最大误差0.6°,无失步现象。

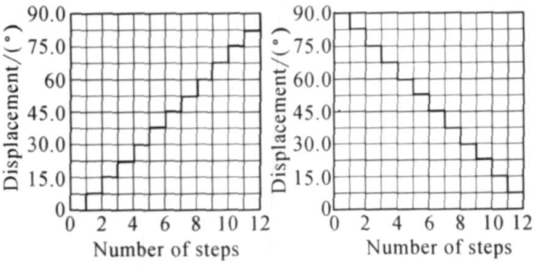
用绳子悬挂一个塑料桶经滑轮支撑,连接在电机输出轴上,在电机运行状态下,往桶里添加沙子,直到电机不能运转。将桶和砂子的质量和电机轴的半径相乘获得电机最大输出力矩,即堵转



(a) (b)

图8 单相激励型旋转步进超声电机原理样机

Fig.8 Prototypes of rotary stepping ultrasonic motors driven by single-phase signal



(a) (b)

图9 原理样机步进试验

Fig.9 Stepping tests of prototype

力矩为0.0032 N·m。

6 结 论

单相驱动步进超声电机采用了波峰自校正原理实现了驱动和定位功能,提高了电机步进运动的可靠性,具有在开环控制下无累积误差的特点。驱动和定位采用同一种工作模式,避免了现有自校正步进电机中工作状态切换时间难以掌握的问题;在整个工作期间摩擦力作负功,避免了自校正步进电机界面摩擦性能难以设计的问题。

制作的原理样机堵转力矩、步距角和单步运行最大误差分别为0.0032 N·m,7.5°,0.6°。其定子的4个工作模态下振幅不同,主要是由于定子加工误差和压电陶瓷粘贴不均匀造成。试验中发现转子磨损严重,同时伴有噪声,主要是由于转子使用的硬铝材料耐磨性差所致。控制加工精度和选用摩擦系数小的耐磨材料可以改善该型电机的输出性能。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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,2007:369-370.
ZHAO CH S. *Ultrasonic Motors Technologies and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2007: 369-370. (in Chinese)

[2] SNITKA V. Ultrasonic actuators for nanometer positioning [J]. *Ultrasonics*, 2000, 38:20-25.

[3] CHU X C, XING Z, Li L, *et al*.. High resolution miniaturized stepper ultrasonic motor using differential composite motion [J]. *Ultrasonics*, 2004, 41: 737-741.

[4] 温建明,陈光明,曾平,等. 改变正压力的惯性式压电旋转机构[J]. 光学 精密工程,2008,16(1):82-86.
WEN J M, CHEN G M, ZENG P, *et al*.. Inertial piezoelectric rotary actuator based on changing positive pressure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):82-86. (in Chinese)

[5] 范伟,余晓芬,奚琳. 压电陶瓷驱动系统及控制方法研究[J]. 光学 精密工程,2007,15(3):368-371.
FAN W, YU X F, XI L. Research on driving system and controlling means of PZT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3):368-371. (in Chinese)

[6] 李黎,刘向东,王伟,等. 压电陶瓷执行器迟滞特性的广义非线性 Preisach 模型及其数值实现[J]. 光学 精密工程,2007,15(5):706-712.
LI L, LIU X D, WANG W, *et al*.. Generalized nonlinear Preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramic actuator and its numerical implementation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 706-712. (in Chinese)

[7] JIN J M, ZHAO CH S. A vibrators alternation stepping ultrasonic motor[J]. *Ultrasonics*, 2006, 44:565-568.

[8] JIN J M, ZHAO CH S. Linear stepping ultrasonic motor[J]. *Journal of Electroceramics*, 2008, 20: 193-196.

[9] 金家楣,赵淳生. 双模态切换式步进超声电机[J]. 南京航空航天大学学报,2006,38(5):600-604.
JIN J M, ZHAO CH S. Bi-Mode Alternation Stepping Ultrasonic Motors[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2006, 38(5):600-604. (in Chinese)

[10] KUSAKABE C, TOMIKAWA Y, TAKANO T, *et al*.. An encoder-less ultrasonic stepping motor using open-loop control system [C]. *Proceedings of 12th Symposium on Ultrasonic Electronics. Tokyo: Japanese Journal of Applied Physics, Supplement*, 1992, 31(1): 239-241.

[11] MIYAZAWA O. Drive control unit for an ultrasonic step motor. U. S. Patent: 5229678. 1993.

[12] CHEN X, KUSAKABE C, TOMIKAWA Y, *et al*.. Rotor displacement of the ultrasonic motor having an angular displacement self-correction function [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1993, 32(1): 4198-4201.

作者简介:

时运来(1976-)男,山东人,博士研究生,主要研究方向为超声电机技术。E-mail: shiyunlai950438 @nuaa. edu. cn

赵淳生(1938-)男,湖南人,教授,中科院院士,主要研究方向为机械设计及理论。E-mail: cszhao @nuaa. edu. cn

金家楣(1965-)男,浙江人,博士研究生,主要研究方向为超声电机技术。E-mail:jjm3452001 @yahoo. com. cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net