文章编号:1004-2474(2016)03-0497-04

双斜槽式纵扭转换型超声波电机的实验研究

陈建毅,林星陵

(厦门城市职业学院 机械与自动化工程系,福建 厦门 361008)

摘 要:研制了两台双斜槽结构(A型和B型)的纵扭模态转换型超声波电机样机,针对其输出特性进行了对比实验研究。通过激光转速表测量了电机样机的输出转速,分析了工作频率、驱动电压、预压力对电机样机的输出转速的影响。实验结果表明:斜槽结构是影响这种模态转换型超声波电机输出特性的关键因素。在相同谐振频率37.7 kHz,工作电压100 V和预压力0.21 N下,A型双斜槽电机样机的最高转速为87 r/min,B型双斜槽电机样机的最高转速为135 r/min。

关键词:超声波电机;双斜槽;模态转换;转速

中图分类号:TM38;TM359.9 **文献标识码**:A

Experimental Study on the Ultrasonic Motor Using a Longitudinal-torsional Vibration Converter With Multiple Diagonal Slits

CHEN Jianyi, LIN Xingling

(Dept. of Mechanical and Automatic Engineering, Xiamen City University, Xiamen 361008, China)

Abstract: In this paper, the comparative experiments were carried out to investigate the output characteristics of two different ultrasonic motor prototypes (type A and type B) using a longitudinal-torsional vibration converter with multiple diagonal slits. The rotational speed was measured by a laser tachometer. The effects of operating frequency, driving voltage and pre-pressure on the rotational speed the two prototypes are analyzed. The results indicate that the structure of multiple diagonal slits has obvious influence on the output speed. The maximum revolution speed of the prototype (type A) is 87 r/min and the maximum revolution speed of the prototype (type B) is 135 r/min with the same resonant frequency of 37.7 kHz at the conditions of input voltage of 100 V and rotational speed of 0.21 N.

Key words: ultrasonic motor; multiple diagonal slits; mode conversion; rotational speed

0 引言

超声波电机(USM)是20世纪80年代发展起来的一种全新原理和全新结构的驱动电机。其驱动原理完全不同于传统的电磁电机,它利用压电陶瓷的逆压电效应将电能转换成定子的机械振动能,通过定子与转子的摩擦耦合作用驱动电机转子旋转转动,或驱动动子直线运动[1]。超声波电机具有低速大力矩、响应快(毫秒级),定位精度高(分辨率高)及无电磁干扰等独特的优点,在精密仪器、航空航天、微机电系统、医疗器械等领域有着广泛的应用前景,在相机自动调焦、设备精密定位中等已有成功应用[1]。

近年来,国内外学者对超声波电机结构及振动驱动模式不断地探索,已成功研制有驻波型及行波型等多种不同结构形式及振动模式的超声波电机[2-13]。其中,模态转换型超声波电机是一种针对大力矩、单一旋向等特殊需求的超声波电机。一般情况下,作为驱动力源的振动采用机电转换能力较高的纵振子来完成,因此,模态转换型超声波电机的转换效率较高,适于大功率输出。

本文以双斜槽式纵扭模态转换型超声波电机为对象,研制了两种双排斜槽结构的超声波电机样机,对两种电机样机的输出特性进行对比实验研究,探讨斜槽结构对电机样机输出性能的影响,为今后同

收稿日期:2015-07-06
基金项目:2014年福建省高校杰出青年科研人才培育计划基金资助项目(JA14424)
作者简介:陈建毅(1979-),男,福建厦门人,副教授,博士,主要从事超声电机开发研究。

类型电机的应用研究和开发提供一定的参考依据。

1 电机的驱动机理

斜槽式超声波电机是模态转换型超声波电机的一种，该电机通过在定子圆周上开斜槽来实现纵振向扭振的转换。其驱动机理如图 1 所示。该电机定子在其第一阶纵振的节平面附近开有斜槽，斜槽使得纵振陶瓷片所激励出的纵振波一部分转换成扭振波，而另外一部分则直接到达驱动端面。这样，定子端面上的质点在两个频率相同但相位不同（由于两种振动在相同介质中的传递速度及传递路程的不同所致）的纵、扭振波的作用下产生椭圆运动，驱动转子运动。因此，斜槽式的定子结构可将纵向振动转换为扭转振动，实现模态转换。

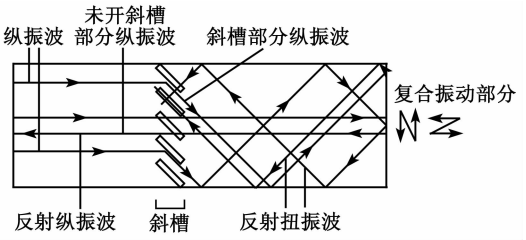
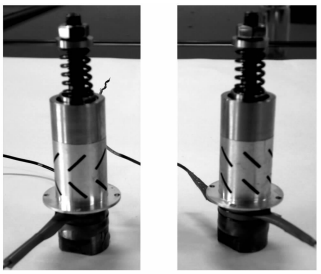


图 1 斜槽式纵扭模态转换型超声波电机驱动机理的示意图

2 电机样机的结构设计与制作

本文设计的电机样机直径为∅20 mm，主要由定子、转子和施加预压力机构等部件构成。其中，双斜槽式结构的定子是超声波电机的关键部分，其结构和尺寸参数的选择和设计是否合理，将直接影响电机的输出性能。为了研究斜槽结构对电机样机输出性能的影响，设计制作了两种双排斜槽结构的电机样机，如图 2 所示。图中，斜槽参数和尺寸为：轴向长度 7 mm，宽度 1 mm，深度 2.5 mm，与中心轴线的夹角为 45°，沿基体环形阵列 6 个，排数 2 排。其中，图 2(a)中的倾斜角度相反，定为双排斜槽 A 型；图 2(b)中的倾斜角度相同，定为双排斜槽 B 型。



(a) 双排斜槽A型 (b) 双排斜槽B型

图 2 两种双排斜槽结构的电机样机

3 实验研究

实验中，采用自行研制通用型超声波电机的驱动电源来驱动电机样机，样机的输出转速采用 DM6236P 型激光非接触/接触转速表进行测量，样机测试实验的照片如图 3 所示。实验测试了电机样机的输出转速与驱动电源频率、驱动电压和预压力的关系。

图 3 超声波电机驱动电源和样机的照片

3.1 激励频率-转速特性

实验中，在工作电压为 100 V，预压力为 0.21 N 下，测试了两种不同双排斜槽形式电机样机的输出转速随驱动电源实际工作频率的变化趋势，如图 4 所示。

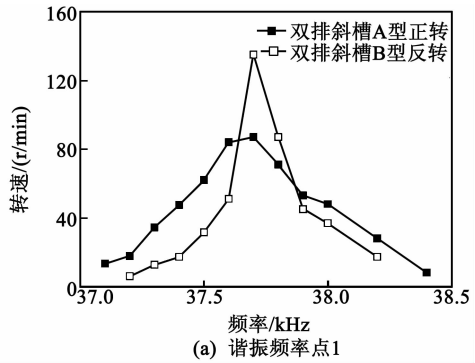


图 4 样机转速-激励频率曲线图

由图 4 可看出，两种双排斜槽电机样机的输出转速随工作频率的变化而改变，在谐振频率工作时，电机输出转速大；两种双排斜槽形式的电机样机都有 2 个不同的谐振频率点。实验中还发现，两种双排斜槽形式的电机样机输出旋转方向不一样。其中，双排斜槽 A 型的电机样机在两个谐振频率点

下,输出旋转方向都是正转(顺时针);而双排斜槽 B 型的电机样机在两个谐振频率点下,输出旋转方向都是反转(逆时针)。这可能主要是由于斜槽形式对电机的振动模态产生了影响。由图 4(a)可见,两种电机样机的谐振频率相同,均为 37.7 kHz,且双排斜槽 B 型的电机样机输出转速高于双排斜槽 A 型的电机样机输出转速。在实际谐振频率下,双排斜槽 A 型的电机样机输出转速为 87 r/min,双排斜槽 B 型的电机样机输出转速为 135 r/min。由图 4(b)可见,在第 2 个谐振频率点,两种电机样机的谐振频率很接近,同样双排斜槽 B 型的电机样机输出转速高于双排斜槽 A 型的电机样机输出转速。由此可得出,斜槽结构和尺寸是影响这种模态转换型超声波电机输出特性的关键因素。

3.2　驱动电压-转速特性

实验中,在相同电机的谐振频率 37.7 kHz 和相同的预压力 3.81 N 条件下,分别测试两种双排斜槽形式电机样机的输出转速与驱动电压之间的变化关系,如图 5 所示。由图可看出,电机样机的输出转速随着驱动电压的增加而增大。这是由于驱动电压变大会引起压电陶瓷的形变变大,导致超声振动系统的振幅变大,从而增大了电机的输出转速。由图可见,双排斜槽 B 型样机的输出转速明显高于双排斜槽 A 型样机的输出转速。

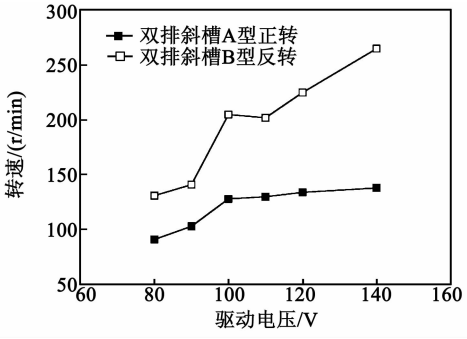


图 5　样机转速-驱动电压曲线图

3.3　预压力-转速特性

定子与转子之间预压力的大小,直接影响到超声波电机的输出特性。实验中,在相同电机的谐振频率 37.7 kHz 和相同驱动电压 100 V 条件下,测试两种双排斜槽形式电机样机输出转速随预压力的变化关系,如图 6 所示。由图可看出,随着预压力的增大,两种电机样机的输出转速先增加后减小。当预压力增大到一定值后,双排斜槽 B 型电机样机输出转速明显下降。比较图中两台样机的输出转速,当预压力小于双排斜槽 B 型样机的最佳预压力时,双排斜槽 B 型样机的输出转速明显高于双排斜槽 A 型样机的输出转速;当预压力大于双排斜槽 B 型样机的最佳预压力时,双排斜槽 B 型样机的输出转速明显低于双排斜槽 A 型样机的输出转速。因此,预压力存在一个最佳范围。在超声波电机设计和实际应用时,预压力应给予充分的重视。

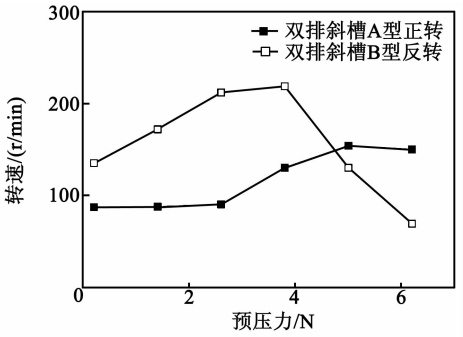


图 6　样机转速-预压力曲线图

4　结论

本文设计制作了两台不同双排斜槽形式的超声波电机样机,测试了样机输出转速特性,对实验结果进行分析和比较,定性地说明此次设计的两种双斜槽式结构超声波电机样机的输出转速影响的好坏,得出了以下的结论:

1) 斜槽结构是直接影响斜槽式模态转换型超声波电机输出特性的关键因素。

2) 预压力对超声波电机的输出特性有明显的影响,存在一个最佳范围。

3) 电机样机的输出转速随着驱动电压的增加而增大,通过电压的控制可以实现对电机输出转速的控制。

4) 双斜槽式超声波电机样机输出转速方向可以是正转,也可能是反转,这与斜槽形式对电机的振动模态产生的影响有关。

5) 在设计两种不同双斜槽式模态转换型超声波电机的电机样机中,双排斜槽 B 型的电机样机的输出转速要明显高于双排斜槽 A 型的电机样机的输出转速。

参考文献:

[1] 赵淳生. 超声波电机技术与应用[M]. 北京:科学出版社,2007.

[2] UCHIKI T, NAKAZAWAT T, NAKAMURA K, et al. Ultrasonic motor utilizing elastic fin rotor[J].

IEEE Ultrasonics Symposium, 1991: 929-932.

[3] TSUJINO J, SUZUKI A. Load characteristics of ultrasonic motor with a longitudinal-torsional converter and various nonlinear springs for inducing static pressure[J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 2001: 545-550.

[4] 陈建毅，郑祝堂，陈方辉. 模态转换型超声波电机的驱动机理与研究进展[J]. 微电机，2013，46(6)：76-82.
CHEN Jianyi, ZHENG Zhutang, CHEN Fanghui. Driving principle and recent development of modal conversion ultrasonic motor[J]. Micromotors, 2013, 46(6): 76-82.

[5] 王剑，白洋，郭吉丰. 旋转-直线型两自由度超声波电机建模与设计[J]. 电工技术学报，2013，28(11)：48-53.
WANG Jian, BAI Yang, GUO Jifeng. Modeling and optimal design of the rotary-linear type two-degree-of-freedom ultrasonic motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 48-53.

[6] 胡百振，李有光，赵淳生，等. 新型纵弯超声波电机振子的设计与分析[J]. 压电与声光，2014，36(3)：353-356.
HU Baizhen, Li Youguang, ZHAO Chunsheng, et al. Design and analysis of a new ultrasonic motor vibrator with longitudinal and bending modes[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(3): 353-356.

[7] 张健滔，金家楣，赵淳生. 新型多自由度圆环形驻波超声波电机[J]，振动与冲击，2011，30(12)：223-225.
ZHANG Jiaotao, JIN Jiamei, ZHAO Chunsheng. Novel multi-DOF ring-shaped standing-wave type ultrasonic motor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(12): 223-225.

[8] 王剑，白洋，郭吉丰. 两自由度微型超声波电机的优化设计[J]. 振动、测试与诊断，2013，33(S2)：45-48.
WANG Jian, BAI Yang, GUO Jifeng. Optimal design of two-degree-of-freedom micro ultrasonic motor[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2013, 33(S2): 45-48.

[9] 程廷海，郭向东，包钢. 中空柱状定子二阶弯振的旋转-直线超声波电机[J]. 电机与控制学报，2013，17(3)：8-12.
CHENG Tinghai, GUO Xiangdong, BAO Gang. Rotary-linear ultrasonic motor based on second bending vibration mode of hollow cylindrical stator[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(3): 8-12.

[10] 苏松飞，姚志远，王长茹，等. 一种弯曲模态直线超声的研究[J]. 压电与声光，2012，34(3)：400-403.
SU Songfei, YAO Zhiyuan, WANG Changru, et al. Research on linear ultrasonic motor based on bending modal[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2012, 34(3): 400-403.

[11] 万志坚，胡泓. 面内弯纵型直线超声电机的数学模型与实验研究[J]. 压电与声光，2013，35(2)：229-233.
WAN Zhijian, HU Hong. The mathematical model and experimental study on linear ultrasonic motor using longitudinal and bending mode[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(2): 229-233.

[12] 王瑞霞，金龙，潘鹏，等. 一种方底座短柱超声波电机的设计[J]. 电工技术学报，2015，30(2)：134-139.
WANG Ruixia, JIN Long, PAN Peng, et al. A short cylindrical utrasonic motor with square base[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 134-139.

[13] 杨淋，赵淳生，张建辉，等. 斜槽式模态转换型超声电机振动分析及性能[J]. 北京工业大学学报，2010，36(7)：870-875.
YANG Lin, ZHAO Chunsheng, ZHANG Jianhui, et al. Vibration analysis and characteristics of ultrasonic motor using a longitudinal-torsional convertor with oblique slots[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(7): 870-875.