

# 斜槽深度对模态转换型超声波电机性能的影响

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  $\Phi 20$  mm 的 3 台不同斜槽深度的纵扭模态转换型超声波电机样机. 采用激光转速表测量电机样机的输出转速, 对 3 台电机样机的输出转速特性进行对比分析. 结果表明: 斜槽深度对电机样机输出转速有明显影响. 3 台电机样机中, 斜槽深度为 1.5 mm 的样机的输出转速最好, 在谐振频率 40.5 kHz 时, 输出转速为 133 r/min; 斜槽深度为 0.5 mm 的样机的输出转速最差, 在谐振频率 40.8 kHz 时, 输出转速为 18.9 r/min. 斜槽深度为 2.5 mm 的样机更适合大输出力矩.

**关键词:** 超声波电机; 斜槽; 模态转换; 输出转速特性

**中图分类号:** TM359.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2018)01-0047-06

## Impact of the Depth of Diagonal Slits on the Output Characteristics of the Ultrasonic Motor Using a Longitudinal-torsional Vibration Converter

Chen Jianyi, Lin Xingling

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

**Abstract:** Three ultrasonic motor prototypes with the diameter of  $\Phi 20$  mm using a longitudinal-torsional vibration converter with diagonal slits were developed, which had different depths of diagonal slits. The revolution speed was measured by a laser tachometer. The output speeds of three prototypes were compared. The results indicate that the structure of diagonal slits has an obvious influence on the output speed. The output speed is the best for the prototype with 1.5 mm-depth of diagonal slits. The maximum revolution speed of the prototype is 133 r/min at frequency of 40.5 kHz. The output speed is the worst for the prototype with 0.5 mm-depth of diagonal slits. The maximum revolution speed of the prototype is 18.9 r/min at frequency of 40.8 kHz. And the prototype with 2.5 mm-depth of diagonal slits is more suitable for large output torque.

**Keywords:** ultrasonic motor; diagonal slits; mode conversion; output speed

超声波电机是近 30 年来发展起来的一种全新原理的驱动电机. 它是利用压电陶瓷的逆压电效应将电能转化为定子的振动能, 并通过定子与转子的摩擦作用驱动电机转子旋转运动或直线运动<sup>[1-2]</sup>. 这种新型电机具有结构简单、低速大力矩、响应快、定位精度高、无电磁干扰等突出优点<sup>[1-2]</sup>, 因此, 在航空航天、精密仪器、微机电系统、医疗器械等领域有着广阔应用前景. 现已广泛应用于高档相机自动调焦系统.

国内外研究者开展了大量的研究工作<sup>[3-14]</sup>, 已成功研制有驻波型、行波型及复合型等多种超声波电机. 本文研究的模态转换型超声波电机属于纵扭复合型超声波电机的 1 种, 它有 1 个带有斜槽的纵扭模态

收稿日期: 2015-10-09

基金项目: 2014 年福建省高校杰出青年科研人才培育计划资助项目(JA14424)

\* 通信作者, E-mail: jianyi@xmecu.cn

转换器.该转换器结构简单、紧凑,并且仅利用1个纵振子进行驱动.采用压电陶瓷高机电耦合系数的 $d_{33}$ 模式工作,可有效改善电机的转换效率,提高了电机的输出能力.

本文针对不同斜槽深度对纵扭模态转换型超声波电机输出特性的影响进行了对比实验研究,研制了3台 $\Phi 20$  mm的电机样机,测试了样机的输出转速特性.在此基础上,分析和比较了斜槽深度对电机样机输出转速特性的影响,为同类型电机的研究和开发可提供参考.

## 1 电机的工作原理

斜槽式模态转换型超声波电机利用斜槽结构实现纵振向扭振转换<sup>[3-4]</sup>,其工作原理如图1所示.电机定子的外圆柱面开设斜槽,当被激励的纵振压电陶瓷产生的纵振波经过斜槽时有一部分被转换成扭振波,而另一部分直接到达自由端面后反射回来.这样在电机的自由端面驱动处,产生了频率相同但相位不同的纵振波和扭振波,从而实现其驱动面质点的椭圆运动,驱动转子转动.

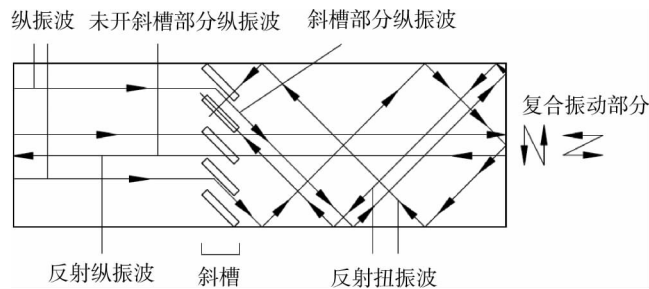


图1 斜槽式纵扭模态转换型超声波电机工作原理

## 2 电机的结构设计制作

本文设计电机样机 $\Phi 20$  mm,定子采用夹心式压电换能器的结构,夹心式压电换能器纵向振动模态设计频率为40 kHz.为了研究斜槽深度对电机样机输出性能的影响,设计制作了3种不同斜槽深度 $h=0.5, 1.5, 2.5$  mm的电机样机,如图2所示.图2中,斜槽参数和尺寸:斜槽轴向长度 $l=10$  mm,斜槽宽度 $b=1$  mm,斜槽倾角为 $45^\circ$ ,斜槽数量沿基体环形阵列6个.

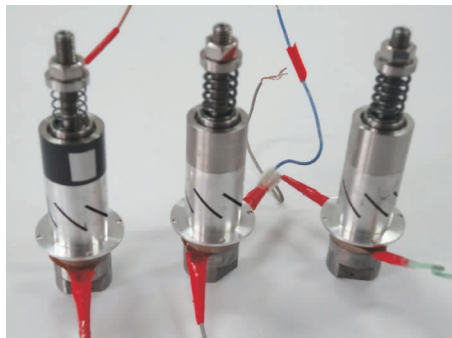


图2 3台不同斜槽深度的电机样机

## 3 实验测试与分析

采用自行研制的通用型超声波电机驱动电源来驱动电机样机,如图3所示.

该驱动电源可以方便的调整输出信号的频率和电压,满足电机的调频、调压的实验需要.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.实验测试了电机样机的输出转速与驱动电源频率、驱动电压以及预压力的关系.

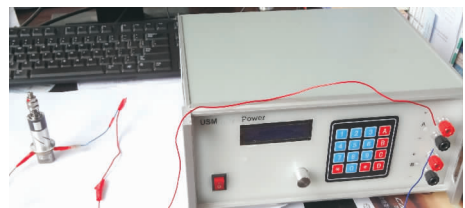


图3 超声波电机驱动电源

### 3.1 输出转速和激励频率

在工作电压为 100 V,预压力为 0.21 N 下,测试了 3 种不同斜槽深度电机样机的输出转速随驱动电源实际激励频率的变化趋势,实验结果如图 4~图 6 所示.从图 4~图 6 可以看出,3 种不同斜槽深度电机样机的输出转速随驱动电源激励频率的变化而改变,每台样机存在几个不同的谐振频率点,并且电机输出旋转的方向有正转(顺时针)和反转(逆时针).表 1 归纳了 3 台电机样机谐振频率点、输出转速和旋转方向的情况.每台样机存在几个不同的谐振频率点以及电机旋转有正转和反转,这主要是由于电机的不同振动模态导致的,与文献[12]有限元仿真分析结果是相符合的.从 3 种不同斜槽深度电机样机的输出转速特性分析,斜槽深度为 1.5 mm 的样机的输出转速最好,在谐振频率 40.5 kHz 时,输出转速为 133 r/min;斜槽深度为 0.5 mm 的样机的输出转速最差,在谐振频率 40.8 kHz 时,输出转速为 18.9 r/min.由此可以得出,斜槽深度对电机样机的输出特性是有明显影响.因此,在设计研制该类型超声波电机,斜槽结构参数和尺寸是一个重要设计要素,直接影响此类型电机的输出特性.

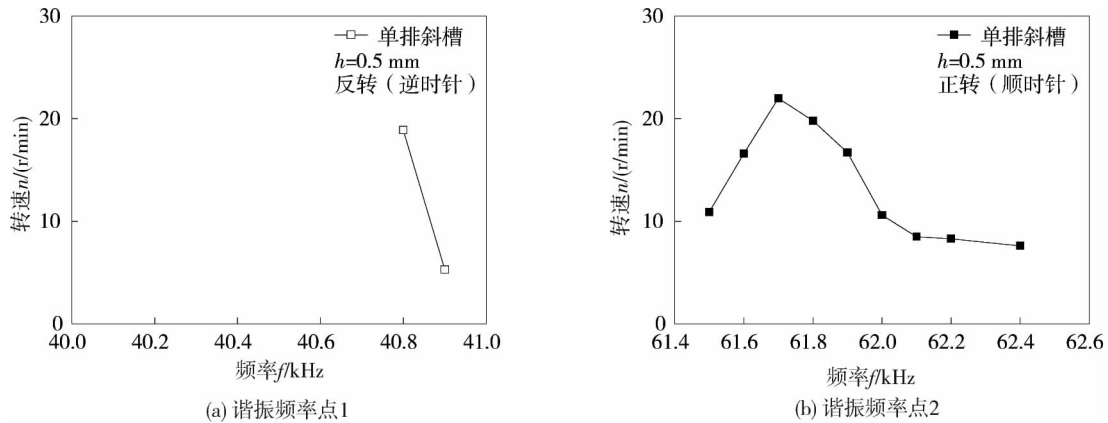


图 4 斜槽深度  $h=0.5$  mm 电机样机的输出转速与激励频率的曲线

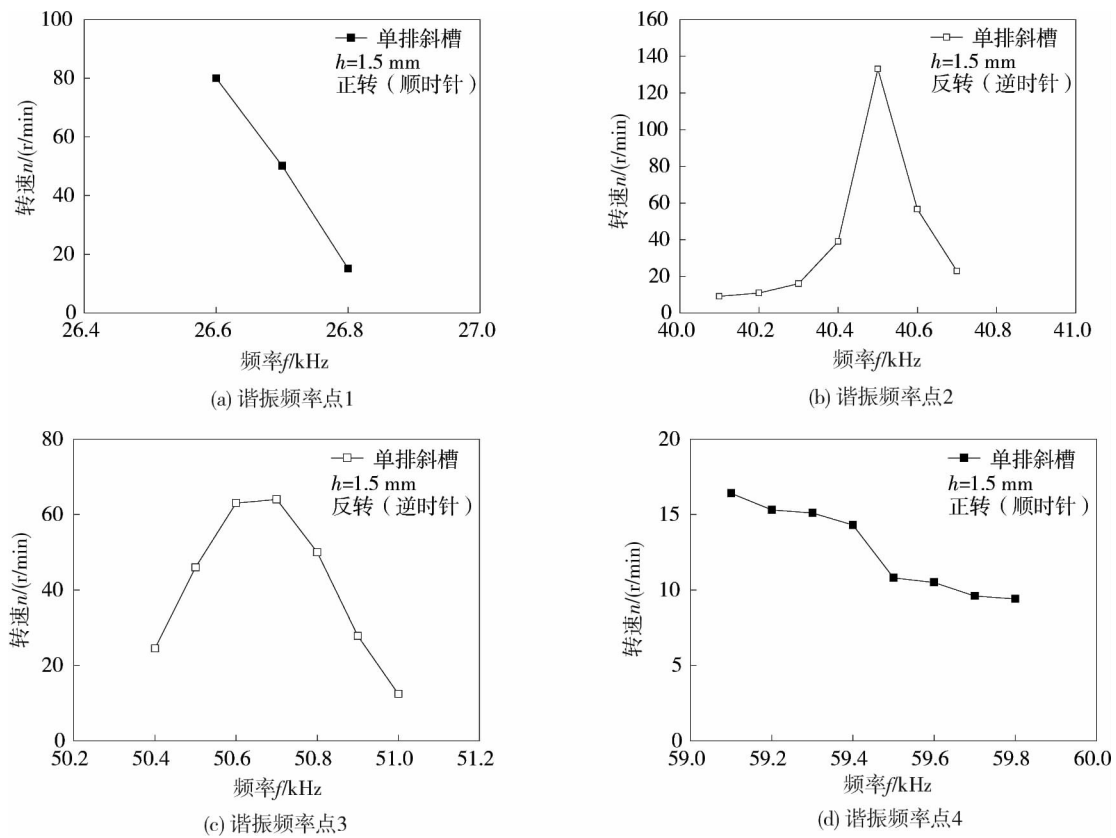


图 5 斜槽深度  $h=1.5$  mm 电机样机的输出转速和激励频率的曲线

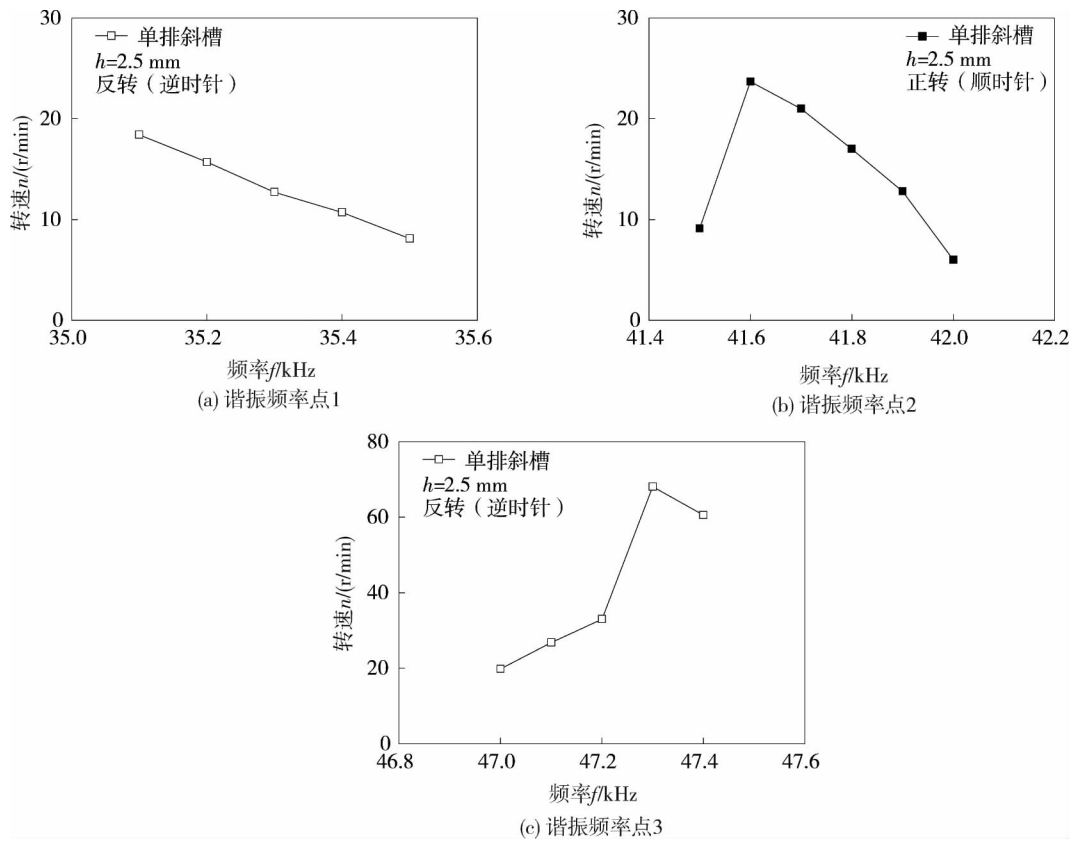


图 6 斜槽深度  $h=2.5$  mm 电机样机的输出转速和激励频率的曲线

表 1 3 种电机样机的谐振频率点

斜槽深度/mm	谐振频率点/kHz	输出转速/(r/min)	旋转方向
0.5	40.8	18.9	反转
	61.7	22.0	正转
1.5	26.6	80.0	正转
	40.5	133.0	反转
	50.7	64.0	反转
2.5	59.1	16.4	正转
	35.1	18.4	反转
	41.6	23.7	正转
	47.3	68.1	反转

### 3.2 输出转速和驱动电压

超声波电机是利用压电陶瓷的逆压电效应来实现能量变化的.当外加电场的电压发生变化时,其电机定子的振幅也发生改变,从而影响其输出特性.实验测试中,在电机实际谐振频率和相同的预压力 0.21 N 条件下,改变驱动电源的输出电压,分别测试 3 种不同斜槽深度电机样机输出转速特性,实验结果如图 7~图 9 所示.从图 7~图 9 中可以看出,3 种不同斜槽深度电机样机的输出转速随着驱动电压的增加而增大,并逐渐变缓.在 3 台样机中,斜槽深度为 1.5 mm 样机的输出转速最好.

### 3.3 输出转速和预压力

在电机实际谐振频率和相同的驱动电压 100 V 条件下,测试 3 种不同斜槽深度电机样机输出转速随预压力的变化关系,如图 10~图 12 所示.从图 10 可以看出,在谐振频率 61.7 kHz 时,随着预压力的增大,斜槽深度 0.5 mm 电机样机的输出转速变化不大.而在谐振频率 40.8 kHz 时,该电机样机随着预压力从 0.21 N 增大到 0.81 N 时,电机不能转动.从图 11 可以看出,在谐振频率 40.5 kHz 时,斜槽深度 1.5 mm 电

机样机的输出转速随着预压力的增大而快速减小,当预压力达到 2.61 N 时,电机不能转动,没有动力输出.从图 12 可以看出,随着预压力的增大,在谐振频率 41.7 kHz 时,斜槽深度 2.5 mm 电机样机的输出转速先增加后又减小.比较 3 台样机,斜槽深度为 2.5 mm 样机更适合大输出力矩.可见,预压力对超声波电机的输出特性有明显的影响.要使超声波电机高效、稳定运转,需要优化所施加的预压力.

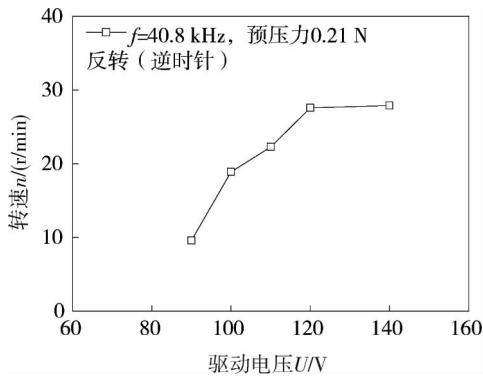


图 7 斜槽深度  $h=0.5$  mm 电机样机的输出转速和驱动电压的曲线

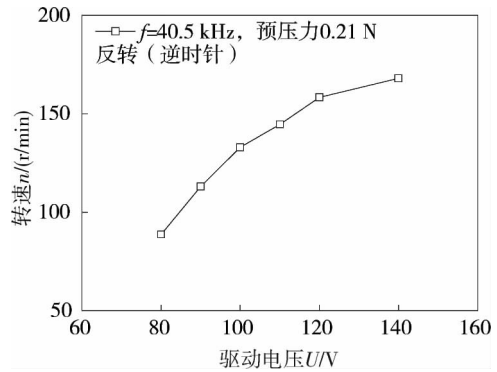


图 8 斜槽深度  $h=1.5$  mm 电机样机的输出转速和驱动电压的曲线

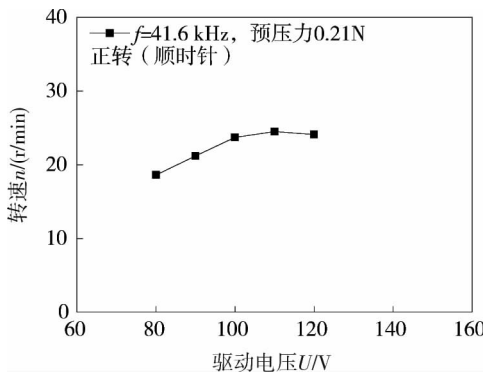


图 9 斜槽深度  $h=2.5$  mm 电机样机的输出转速和驱动电压的曲线

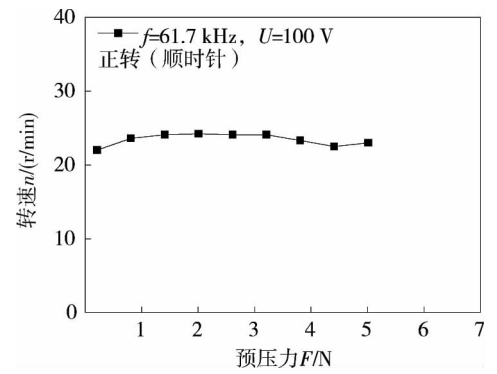


图 10 斜槽深度  $h=0.5$  mm 电机样机的输出转速和预压力的曲线

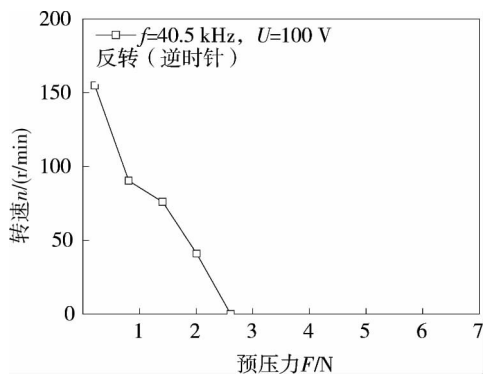


图 11 斜槽深度  $h=1.5$  mm 电机样机的输出转速和预压力的曲线

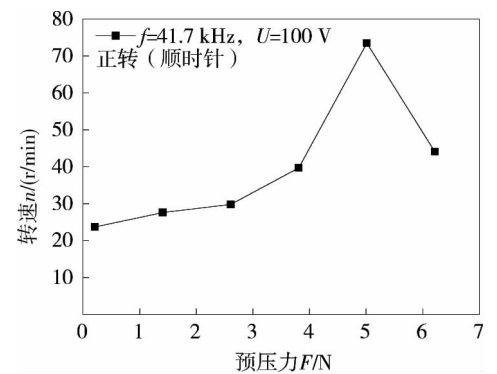


图 12 斜槽深度  $h=2.5$  mm 电机样机的输出转速和预压力的曲线

### 4 结论

1) 斜槽深度是一个重要参数,对斜槽式纵扭模态转换型超声波电机输出转速有明显影响.在 3 台样机中,斜槽深度为 1.5 mm 样机的输出转速最好,斜槽深度为 0.5 mm 样机的输出转速最差,斜槽深度为 2.5 mm 样机更适合更大的输出力矩.

2) 电机样机存在不同的谐振频率点,以及电机输出方向有正转和反转,这与斜槽结构参数和尺寸对电机的振动模式产生的影响有关.

3)还可以在理论模型方面和有限元数值分析方面对斜槽参数和尺寸的优化方面做进一步研究,以便能够准确反映出斜槽参数和尺寸对电机性能的影响。

#### 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] 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.
- [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] 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.
- [5] 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.
- [6] Mashimo T. Micro ultrasonic motor using a one cubic millimeter stator[J]. Sensors and Actuators A, 2014, 213: 102-107.
- [7] Peng T J, Shi H Y, Liang X, et al. Experimental investigation on sandwich structure ring-type ultrasonic motor[J]. Ultrasonics, 2015, 56: 303-307.
- [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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 罗辞勇,张帆,杜劲超. 行波型超声电机的稳定性分析[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(2): 46-53.
- [12] 郑祝堂,陈建毅. 斜槽式超声电机定子谐振频率的影响因素分析[J]. 微电机, 2014, 47(11): 23-25.
- [13] Qu W C, Yang M, Meng F, et al. Continuous high-performance drive of rotary traveling-wave ultrasonic motor with water cooling[J]. Sensors and Actuators A, 2015, 222: 220-227.
- [14] Wan Z J, Hu H. Modeling and experimental analysis of the linear ultrasonic motor with in-plane bending and longitudinal mode[J]. Ultrasonics, 2014, 54: 921-928.