

文章编号 1004-924X(2005)03-0324-08

# 超声波马达的真空和温度特性研究

曲建俊,程显敏,罗云霞,于佳庆

(哈尔滨工业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**研究了超声波马达在非常状态下的驱动行为,选取了5种工程塑料作为转子摩擦材料,利用真空试验机和自制的与其相匹配的超声波马达模拟试验台,采用对比试验方法,研究了接触预紧力、真空度和环境温度等对行波型超声波马达的驱动特性的影响。结果表明,随着预紧力和真空度的增加,马达的堵转力矩增加而空载转速下降;随着环境温度的增加马达的空载转速下降。运用声学理论分析了真空度对接触状态的影响,得出声悬浮作用使定子和转子的动态接触力减小的结论。在真空状态下,超声波马达的堵转力矩比常态下提高的主要原因是声悬浮作用降低引起定子和转子的动态接触力增加所致。

**关键词:**超声波马达;真空;温度

**中图分类号:** TM356; TM359.6 **文献标识码:** A

## Performance of ultrasonic motor under vacuum and high temperature condition

QU Jian-jun, CHENG Xian-min, LUO Yun-xia, YU Jia-qing

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The performance of ultrasonic motor under abnormal conditions are researched, with five kinds of engineering plastics chosen as the rotor friction materials of traveling wave ultrasonic motor (TWUSM). By means of contrast test methods, effects of pre-load, degree of vacuum and surrounding temperature on friction driving properties of TWUSM are studied by using vacuum equipment and simulative TWUSM tester suitable. The results show that stalling torque increases and no load speed decreases with the increase of the pre-load and degree of vacuum. The no load speed decreases with the increase of surrounding temperature. Effects of degree of vacuum on contact states are analyzed by acoustics theory. The conclusion is that action of acoustic levitation makes dynamic contact force between stator and rotor reduce. The major reason the stalling torque in vacuum is higher than that in normal is that the effects of acoustic levitation decrease and the dynamic contact force increases.

**Key words:** ultrasonic motor; vacuum; temperature

收稿日期:2005-02-14;修订日期:2005-04-12.

基金项目:哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金(No. HIT. MD2002. 08),哈尔滨市学科后备带头人基金(No. 2002AFXXJ047)资助项目

## 1 引言

超声波马达是靠定子和转子接触面间的摩擦力来传递驱动力的一种新型驱动器,与电磁马达相比,具有低速大转矩、无需制动机构、结构简单、无润滑、不产生电磁干扰等优点。不仅在办公自动化、精密光学仪器、机器人、汽车工业等领域有着广泛的应用前景,而且被认为是适合于航空航天的真空及高、低温条件下的理想驱动器<sup>[1-2]</sup>。美国和日本学者率先开展了在非常态和真空条件下的超声波马达驱动特性的基础性研究<sup>[3-6]</sup>。近几年,国外已将超声波马达应用于航空航天领域,如美国在宇宙飞船、火星探测器、导弹、核弹头等航天工程中都陆续应用了超声波马达<sup>[2,7]</sup>。联合体也做了一些探索性工作<sup>[8]</sup>。在真空条件下超声波马达驱动特性与普通状态明显不同,许多关键数据未见报道。

随着我国探月计划的提出,作为探月车的驱动装置,应积极发展我国拥有自主知识产权的超声波马达驱动器,而真空环境下驱动器的摩擦学特性是月球探测车设计的关键技术之一,急需开展此方面的研究。因此,作为特殊情况下的应用,研究超声波马达在真空及高低温条件下的驱动特性,及其转子与定子接触预紧力的确定,改进超声波马达的结构设计,使其能适应月球条件,平稳可靠地运行,特别是研制适合超声波马达在包括真空、高温等各种条件下使用要求的高性能转子摩擦材料,具有重要的理论和实际意义。本文将初步探讨超声波马达在非常态下的驱动行为,为航天器用超声波马达提供技术支撑。

## 2 试验设备和方法

在试验中,应用了一台通用的真空试验机,该真空设备的真空腔可提供  $1.0 \times$

$10^{-3}$  Pa 的绝对压力环境,并且可以把真空腔内温度加热至  $100^{\circ}\text{C}$ 。其中置于真空试验机中的超声波马达摩擦特性模拟试验台结构原理与文献[9]采用的试验装置类似。该试验台可模拟超声波马达的实际工作过程,可方便地进行模拟负载力矩的施加,也可实现对转速及负载力矩的测量,并可以调整转子和定子间的预紧力,方便地更换摩擦材料。试验测得的数据通过数据采集卡及微机系统进行采集和处理。试验采用真空及高温与常压对比方式进行。

本文选用了5种耐热型热塑性工程塑料作为超声波马达的转子摩擦材料,它们分别是以聚酰亚胺、国产聚醚醚酮、聚苯硫醚、进口聚醚醚酮和聚四氟乙烯为基体的复合材料,编号分别为 FM1、FM2、FM3、FM4 和 FM5。首先,在常态和低真空下研究不同摩擦材料对马达特性的影响,筛选出一种合适的摩擦材料。然后,分别在常压、真空及高温条件下进行模拟超声波马达试验,探讨非常态下超声波马达工作特性。真空条件分为低真空和高真空两种情况,低真空的绝对压力值为 1 Pa,高真空的绝对压力值为  $10^{-3}$  Pa。

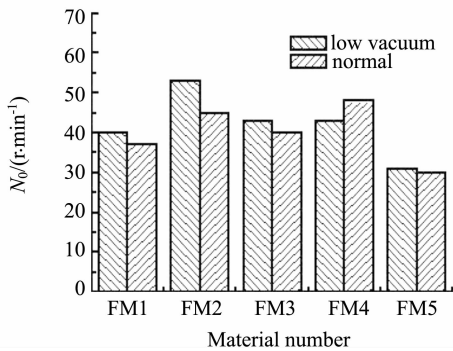
超声波马达为一圆环行波型,国内某大学制造,其定子材料为锡青铜,尺寸为外径  $\varphi 58$  mm,内径  $\varphi 50$  mm;其驱动器带有频率自动跟踪系统,试验的激励电压峰峰值为 300 V,频率为 46 kHz;使用的转子摩擦材料尺寸为外径 63 mm,内径 52 mm,厚度 2.5 mm。

选用圆柱螺旋压缩弹簧来调整马达转子与定子间的预紧力  $P_c$ ,弹簧刚度为 11.9 N/mm。选择 3 种预紧力,研究不同环境压力下马达负载特性变化,通过调节磁滞制动器的电流来改变马达的负载力矩,负载力矩从 0 N·m 变化到使马达堵转。

### 3 试验结果和讨论

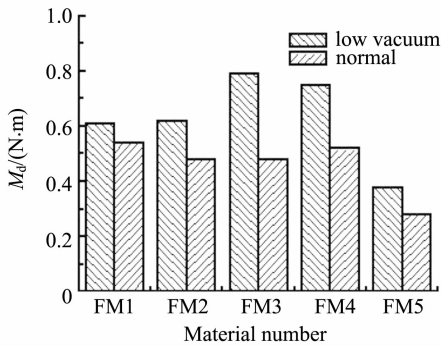
#### 3.1 摩擦材料对马达特性的影响

图 1 是固定预紧力  $P_c=179.9\text{ N}$ , 所选 5 种摩擦材料在常态和低真空下, 马达的堵转力矩  $M_d$  和空载转速  $N_0$  的测试结果。由图 1 可见, 使用不同的转子摩擦材料马达的特性明显不同。无论在常态, 还是在真空条件下, 摩擦材料的性能对超声波马达的性能都有较大的影响。由图 1(a) 和 (b) 可见, 摩擦材料 FM2 的空载转速在低真空下最高, 达到  $53\text{ r/min}$ , 堵转力矩中等,



(a) 空载转速

(a) No-load speed



(b) 堵转力矩

(b) Stalling torque

图 1 不同真空度下  $M_d$  和  $N_0$  随摩擦材料的变化 ( $P_c=179.9\text{ N}$ )

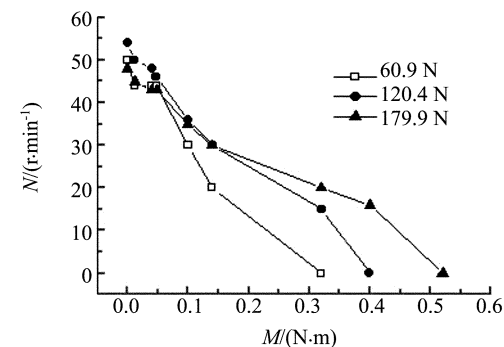
Fig. 1 Variations of  $M_d$  and  $N_0$  with friction material under different vacuum degrees ( $P_c=179.9\text{ N}$ )

但是其噪音较大;虽然摩擦材料 FM5 运转平稳,无噪音,但是在真空下的空载转速和堵转力矩均较低,其  $N_0$  比最大值下降了  $42\%$ ,在同样接触条件下,其  $M_d$  比最大值下降了  $52\%$ ;而摩擦材料 FM3 和 FM4 空载转速较高,FM3 在真空下的堵转力矩最大,达到  $0.789\text{ N}\cdot\text{m}$ ,比较两者,FM4 材料运转平稳,噪音小,耐磨性也较好,适合超声波马达的要求,因此,决定选择以进口聚醚醚酮为基体的摩擦材料 FM4 作为真空及常压非常态下对比试验材料。

#### 3.2 定转子预紧力的影响

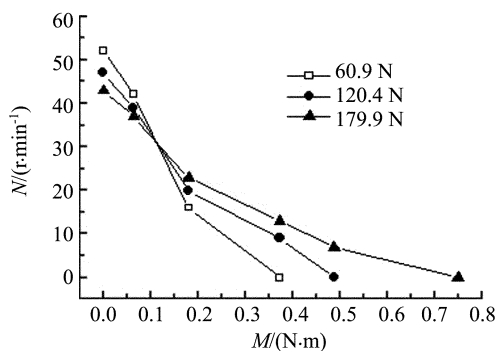
选择 FM4 作为超声波马达的摩擦材料,在不同的真空条件下,当预紧力从  $60.9\text{ N}$  到  $179.9\text{ N}$  分 3 种情况变化时,通过调节磁滞制动器的电流来改变负载力矩,得到超声波马达转速  $N$  和转矩  $M$  负载特性随预紧力的变化如图 2(a)、(b) 和 (c) 所示。

由图 2 可见,无论在何种环境状态下,转速随着负载力矩的变化趋势都是一致的,即随着负载力矩的增加,转速逐渐降低,直至到零,这与普通的电磁马达是一致的。然而,转子与定子间的预紧力对超声波马达的特性影响很大,而且不同的真空状态的影响效果也不同。在同一种环境状态下,在试验的预紧力范围内,随着预紧力的增加,马达的堵转力矩都增大,空载转速都降低,即负载特性曲线变得比较平缓,负载特性曲线的硬特性增加。但在试验中也发现,预紧力增大到一定的程度后,马达运行极不稳定,甚至不能输出任何的转速和转矩,有时还出现马达的稳定性变差,振动及噪音变大现象。比较图 2(a) 到 (c),还可以发现,在同一种预紧力情况下,随着真空度的增加,出现堵转力矩增大,空载转速下降的现象,这种情况有点类似于同一种环境压力下,预紧力的影响效果,这种原因将在下节分析。



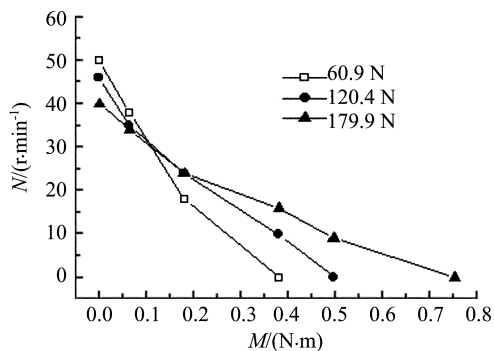
(a) 常压条件

(a) Normal



(b) 低真空

(b) Low vacuum



(c) 高真空

(c) High vacuum

图 2 不同真空条件下马达的负载特性随预紧力的变化

Fig. 2 Variations of load properties  $M-N$  with pre-load under different vacuum degrees

### 3.3 环境压力的影响

选择定子与转子的预紧力为 1.4 N 和空载转速的情况, 分别在常压及真空条件

下使马达运行 1 h。因为在这种状态下, 马达的运行比较稳定, 从而避免了其他因素对环境压力影响的干扰, 得出了不同环境压力下转速随时间变化的曲线, 如图 3 所示。此外, 在固定预紧力为 179.9 N 情况下, 做出了在 3 种环境压力条件下马达的负载特性曲线, 见图 4。

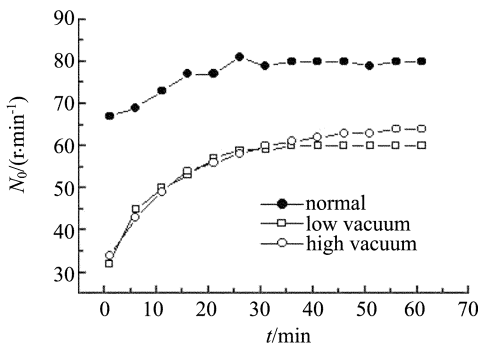


图 3 马达的转速随时间的变化

Fig. 3 Variations of USM speed with time

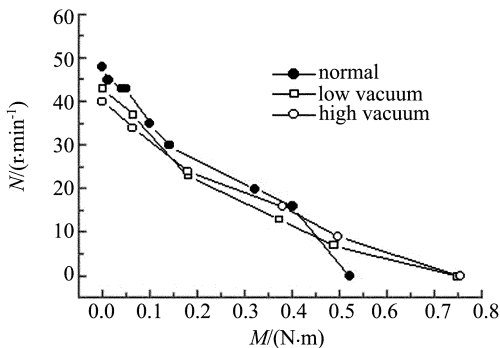


图 4 马达的负载特性随环境压力的变化 ( $P_c = 179.9 \text{ N}$ )

Fig. 4 Variations of USM load properties with vacuum degree ( $P_c = 179.9 \text{ N}$ )

由图 3 可见, 真空状态下马达的稳态转速比常态下明显下降, 大约降低了 25%。而高真空比低真空状态下马达的转速略有增加。由图 4 也可以看出, 预紧力相同时, 在真空状态下马达的堵转力矩比常态下增大, 大约增加了 30%, 而空载转速随着真空度的增加, 呈现降低的趋势。

产生这种现象, 与真空条件下的材料

的摩擦系数增大,马达的定子向转子能量的传递效率增加有关,同时还与超声振动下的声悬浮作用有关。研究表明,在超声振动条件下,摩擦副的摩擦力将受到振动振幅、接触面积及滑动速度等各种因素的影响<sup>[9-10]</sup>。超声振动会对物体产生声悬浮的作用<sup>[11]</sup>,它是高声强条件下的一种非线性效应,其基本原理是利用超声与物体的相互作用产生竖直方向的悬浮力以克服物体的质量。

由文献[11]可知,在如图 5(a)所示的平面声场条件下,声辐射压强的大小如公式(1)

$$P = \frac{1}{2} \rho c^2 \left( \frac{\xi_0}{z} \right)^2, \quad (1)$$

其中, $P$  是辐射压强, $\rho$  是环境介质密度, $c$  为介质声速, $\xi_0$  为超声振幅, $z$  是悬浮体距振动表面的距离。

对于超声波马达定子和转子接触情况,取转子为分离体,其受力分析如图 5(b)所示。假设水平运动和垂直运动独立分析,其垂直运动方程为

$$ma = F_d + F_x - mg - P_c, \quad (2)$$

其中, $m$  是转子的等效质量, $F_d$  是定子对转子的支撑力, $F_x$  是超声振动产生的声悬浮力,其大小  $F_x = P \cdot S$ ,  $S$  为超声波作用面积, $P_c$  是转子与定子间的预紧力, $mg$  是转子自身的重力, $f(t)$  是定子对转子的摩擦驱动力, $Q$  为转子受到的负载阻力。

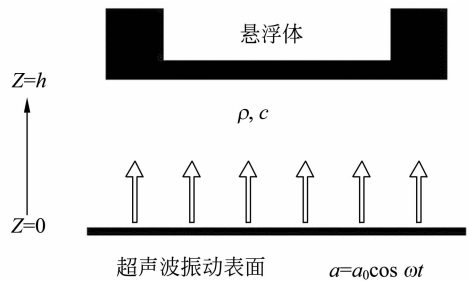
由式(2)得定子与转子间的动态接触力  $F_d$

$$F_d = ma + mg + P_c - F_x, \quad (3)$$

可见,考虑声悬浮的作用,在同样预紧力情况下,定子和转子的动态接触力降低,而动态接触力的减小,将导致定子和转子的动态接触宽度减小。根据行波超声波马达的接触特点<sup>[12]</sup>,将产生马达的空载转速增加,堵转力矩减小现象。由于在真空条件下,环境介质密度  $\rho$  比大气中小,所以声

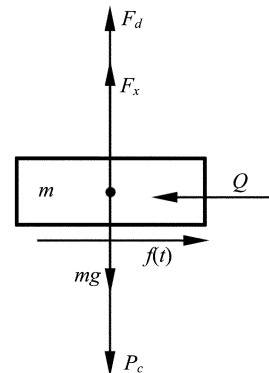
辐射压强很小,产生的声悬浮力  $F_x$  也很小,因此,在真空条件下,定子和转子的动态接触力比大气中大,使得定子和转子的接触宽度增加,堵转力矩增大,空载转速降低。

此外,超声波悬浮还会产生减摩效应,这种减摩效应会导致转子与定子处于有规律的非接触状态。研究表明,当定子和转子的预紧力较小时,声悬浮力的减摩影响比较显著,声悬浮力将足以克服转子的质量和预紧力的作用,将转子悬浮起来<sup>[13]</sup>。在大气中存在较明显的声悬浮作用,转子与定子间的分离时间要比真空中的长,即相对接触时间短,所以,在常压下超声振动引起的声悬浮减摩作用比真空下明显,致使常压下马达的堵转力矩没有真空条件下的大。



(a) 超声波悬浮原理

(a) Ultrasonic levitation principle



(b) 转子受力

(b) Force acting on rotor

图 5 超声波悬浮和转子受力示意图

Fig. 5 Schematic diagram of ultrasonic levitation principle and force acting on rotor

### 3.4 环境温度的影响

选取转子摩擦材料 FM4,在常态及真空条件下,研究了环境温度对超声波马达特性影响。

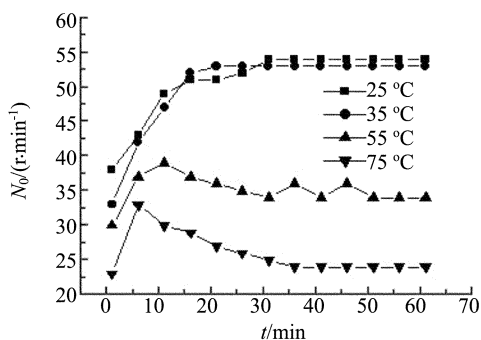
首先,在常压下分别将环境温度稳定在常温、35℃、55℃及75℃等4种情况下,选取转子与定子间的预紧力为1.4 N,负载力矩为零,在常压各个温度条件下,马达连续运行1 h,马达的空载转速随时间变化如图6(a)所示。然后,将马达的转子与定子间的预紧力调整为13.3 N,将环境温度升至55℃,分别在常压和真空 $1.0 \times 10^{-3}$  Pa条件下连续运行1 h,马达的转速随时间变化如图6(b)所示。

从图6(a)可见,在常压下,比较马达的稳态转速,当温度较低时,马达的转速变化较小,随着温度的升高,马达的转速明显下降,当温度为75℃时,转速比常温约降低50%。

从图6(b)可见,当预紧力变化到13.3 N,在真空条件下,高温对马达的空载转速影响更大,在运行过程中,马达转速呈现逐渐下降的趋势。

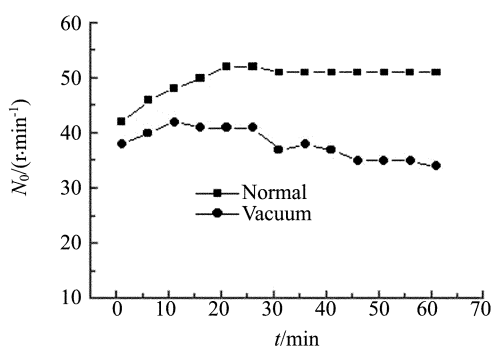
上述现象可以从2方面加以分析。一方面,当高温摩擦时,随着温度的升高,分子热运动加剧,高分子材料的物理化学性能都会发生变化,材料表面的硬度降低,形成表面污染膜,它们会大大降低摩擦副界面的剪切强度极限,使摩擦系数降低。在试验中,测得摩擦材料 FM4 在常温下的摩擦系数为0.48,随着温度的升高逐渐降低,当温度达到100℃时,降低到0.1左右。摩擦系数下降,导致马达的能量传递效率随之降低,所以转速降低。另一方面,当温度增加到某一值后,高分子材料的硬度、弹性模量大大降低,摩擦表面容易变形,在同样的预紧力下,转子与定子的接触区宽度变大,由行波超声波马达定子和转子的接触特点可知,此时与转子转速相同的定子上

的表面点的位置更接近于波谷,其水平振动的分速度较低<sup>[12]</sup>,从而导致马达的空载转速也就较低。在真空条件下,由于摩擦表面产生的热量不易及时地散出,所以高温负面的影响就更加明显,转子转速更低。



(a)不同的温度

(a) Different temperatures



(b)固定的温度(55℃)

(b) Constant temperature (55°C)

图6 在固定和不同温度下马达的转速随时间的变化

Fig. 6 Variations of USM speed with time under constant and different temperatures

## 4 结论

(1)在常压和真空条件下,预紧力对超声波马达性能都有较大的影响。在试验的预紧力范围内,随着预紧力的增加,马达的堵转力矩增大,空载转速降低。也即负载特性曲线变得比较平缓,其硬特性增加。

(2)真空度对超声波马达性能的影响与预紧力类似,随着真空度的增加,马达的空载转速下降,堵转力矩增大。主要原因是在真空下声悬浮作用减小,定子和转子的动态接触力增加,使转子与定子的接触区宽度增大,导致堵转力矩增加,空载转速下降。

(3)环境温度影响超声波马达的性能。随着温度的升高,马达空载转速呈现下降

趋势。主要与高分子材料摩擦系数、硬度和弹性模量随温度增加减小,定子和转子接触状态改变,转换效率降低有关。

(4)试验研究表明,合理选取转子摩擦材料,超声波马达可以被应用于诸如真空、高温等非常态的条件下,虽然马达的性能有一些改变,但是最终都能稳定在某一状态下正常地工作。

## 参考文献:

- [1] 马建旭,吴清文,卢铎. 纵弯式压电微电机自然频率的有限元计算[J]. 光学精密工程, 1997, 5(6):81-85  
MA J X, WU Q W, LU E. Finite element analysis on natural frequency of longitudinal-bending piezoelectric micromotor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(6):81-85. (in Chinese)
- [2] 郭吉丰,伍建国. 航天用大力矩高精度超声波电机研究[J]. 宇航学报, 2004, 25(1):70-76.  
GUO J F, WU J G. Research on the high torque and high precision ultrasonic motor for aerospace application [J]. *Journal of Astronautics*, 2004, 25(1):70-76. (in Chinese)
- [3] ISHII T, MAESUO E, NAKAMURA K, *et al.* Characteristics of ultrasonic motor driven in a vacuum[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, (37):2956-2959.
- [4] MORONEY R M M, WHITE R M, HOWE R T. Ultrasonic micromotors: physics and applications[C]. *Proceedings IEEE micro electro mechanical systems: an investigation of micro-structures, sensors, actuators, machines*, 1990:182-187.
- [5] MORITA T, NIINO T, ASAMA H. Rotational feedthrough using ultrasonic motor for high vacuum condition [J]. *Vacuum*, 2002, 65:85-90.
- [6] MORITA T, TAKAHASHI S, ASAMA H, *et al.* Rotational feedthrough using an ultrasonic motor and its performance in ultra high vacuum conditions [J]. *Vacuum*, 2003, (70):53-57.
- [7] 李华峰, 辜承林. 超声波电机在航空航天中的应用[J]. 微电机, 1998, 31(6): 31-34.  
LI H F, GU CH L. Application of ultrasonic motor on aeronautics and space [J]. *Micromotor*, 1998, 31(6): 31-34. (in Chinese)
- [8] SNITKA V. Ultrasonic actuators for nanometre positioning [J]. *Ultrasonics*, 2000, (38):20-25.
- [9] 曲建俊,姜开利,张凯. 超声驱动的超声波振动减摩作用研究[J]. 声学学报, 2000, 25(2):115-119.  
QU J J, JIANG K L, ZHANG K. Study on antifriction effect of vertical ultrasonic vibration in ultrasonic driving [J]. *Acta Acustica*, 2000, 25(2):115-119. (in Chinese)
- [10] 高印寒,于向军,王连武. 超声波振动精密切削 GFRP 的实验研究[J]. 光学精密工程, 2003, 11(6):591-595.  
GAO Y H, YU X J, WANG L W. Finish cutting of GFRP by ultrasonic vibration [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(6):591-595.
- [11] UEHA S, HASHIMOTO Y, KOIKE Y. Non-contact transportation using near-field acoustic levitation [J]. *Ultrasonics*, 2000, 38:26-32.
- [12] 曲建俊. 超声马达的摩擦驱动机理及摩擦材料研究[D]. 哈尔滨工业大学, 1998:15-96.

QU J J. Friction driving mechanism and friction material research on ultrasonic motor [D]. Harbin: A Dissertation for the Degree of Doctor in Harbin Institute of Technology, 1998: 15-96. (in Chinese)

- [13] QU J J, ZHOU T Y. An electric contact method to measure contact state between stator and rotor in a traveling wave ultrasonic motor [J]. *Ultrasonics*, 2003, 7(41): 561-567.

**作者简介:**曲建俊(1962—),男,黑龙江人,哈尔滨工业大学机电学院,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为压电驱动技术与控制,摩擦学功能材料,新型滑动轴承等,发表论文 50 余篇。Email: qujianjun@hit.edu.cn

程显敏(1972—),女,黑龙江人,哈尔滨工业大学机电学院,硕士研究生,主要研究方向为压电超声波马达非常态下的行为。

罗云霞(1962—),女,黑龙江人,哈尔滨工业大学机电学院,硕士,教授,主要研究方向为超声波摩擦驱动。