

# 行波型超声波电机摩擦特性的实验研究

王文浩<sup>1</sup>, 郭吉丰<sup>1\*</sup>, 金龙<sup>2</sup>, 曲建俊<sup>3</sup>, 王光庆<sup>4</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 东南大学 电气工程学院, 南京 210096;  
3. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 4. 浙江工商大学 信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 超声波电机是通过逆压电效应产生高频振动并通过摩擦实现驱动的电机, 其定转子摩擦接触面的高频、小幅的行波振动有其特殊性, 跟以往的摩擦接触显著不同, 并对电机的换能效率、电机寿命和摩擦材料的选择等都有影响. 本文建立了超声波电机定转子接触面摩擦系数测量装置, 通过试验比较了摩擦接触面在常规、定子驻波振动以及行波振动下的动态摩擦系数, 分析了定子相对转速(速度)、预紧力以及温度对定转子接触面摩擦系数的影响. 根据摩擦二项式和电机定转子表面弹塑性接触状态对摩擦系数与预紧力等的对应关系进行了说明, 分析了驻波振动和行波振动的超声减摩效果以及温度对摩擦系数的影响, 确定了适合行波型超声波电机的摩擦系数计算模型. 超声波电机的驱动摩擦特性是1项基础性工作, 有助于行波形超声波电机设计、建模和驱动控制等.

**关键词:** 行波型超声波电机; 摩擦特性; 摩擦系数; 超声减摩; 曲线拟合

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2010)01-0168-06

## Experimental Investigation on Friction Characteristics of Ultrasonic Motor

WANG Wen-hao, GUO Ji-feng\*, JING Long, QU Jian-Jun, WANG Guang-qing

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Huangzhou 310027, China

2. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

3. College of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

4. College of Information and Electronics Engineering, Zhejiang Gongshang University Hangzhou, 310018, China)

**Abstract:** Ultrasonic motor is an unconventional motor driven by frictional force and high frequency vibration based on the principle of inverse piezoelectric effect. The high frequency vibration and minor amplitude between the stator and rotor have its own characteristics at friction interface, which is different from the traditional interface. The characteristics have significant effect on conversion efficiency, motor's lifetime and the choice of frictional material. This paper presented the dynamic friction coefficient in normal, standing wave and the traveling wave measured by self-manufactured experiment structure. The influences of the relative speed, preload and temperature's impact on friction coefficient between the stator and rotor were analyzed. The relationship between friction coefficient and preload was explained from friction binomial and elastoplasticity contact state of the interface. The paper also explained the effect of friction reduction in the presence of ultrasonic vibrations both from standing wave and traveling wave. The impact of temperature on friction coefficient was also tested. Finally, this paper revealed a friction model for ultrasonic motor. The friction reduction for ultrasonic motor was a fundamental work, which was useful for design, modeling and controlling of ultrasonic motor.

**Key words:** ultrasonic motor, friction properties, friction coefficient, friction reduction, curve fitting

行波型超声波电机定转子之间通过高频振动的摩擦来实现能量传递, 为了保证电机平稳、无噪声、

长寿命的运行,一般在定子或转子上复合1层耐磨的高分子材料,这种高分子通常是以聚四氟乙烯、环氧胶或聚酰亚胺为基体的摩擦材料.这样,定转子接触面就是金属与高分子材料间的摩擦驱动.在摩擦材料及其摩擦系数方面,文献[1-2]研究了金属与聚四氟乙烯之间的摩擦系数,是在常温且相对速度较高情况下的动态摩擦系数.以直径60 mm的行波型超声波电机为例,其定转子之间的相对速度差在0.3 m/s以下,而文献[1]中的相对速度差在2 m/s以上.文献[3-6]中探讨了超声波电机适用的摩擦材料,研究了预紧力和输入电压对摩擦系数和磨损等的影响.但均未涉及到摩擦系数与转速差之间的对应关系.

在电机建模时,把行波型超声波电机定转子之间的摩擦系数常作为黏滑模型<sup>[6]</sup>或线性模型<sup>[7]</sup>处理,对于黏滑模型,即把摩擦系数定义为:

$$\mu = \text{sign}(v - v_m) \varepsilon \quad (1)$$

式中: $\varepsilon$ 是比例系数, $v$ 和 $v_m$ 分别是定子和转子的接触点速度.对于线性模型,即把接触面的摩擦系数 $\mu$ 定义为与其摩擦两界面的速度差成正比<sup>[7]</sup>.

$$\mu = \varepsilon(v - v_m) \quad (2)$$

国内外不少学者采用上述模型进行电机的驱动特性计算,此种处理方法不够精准.由于行波型超声波电机的定子是微幅的高频的行波振动,其当采用相位差控制时(控制两相的相位角),行波振动会变成驻波,或者是驻波与行波的中间状态,另外,其定转子的相对速度在低速区,其摩擦状态显然有别于经典的摩擦问题.

本文作者进行了常规、驻波以及行波情况下的摩擦系数试验,比较相对速度、预紧力和温度等因素对摩擦系数的影响,阐述了摩擦系数变化的主要原因,其次分析了行波和驻波振动的超声减摩效果.最后,通过曲线拟合方法给出了行波型超声波电机的摩擦系数计算模型及其应用范围.

## 1 摩擦系数的测量装置及方法

行波型超声波电机定转子摩擦系数测量试验系统如图1所示.直流电机①与超声波电机③的输出轴之间采用柔性联轴器②连接.并通过接近开关⑧测量电机①、③的转速.另有温度传感器④测量定子的工作温度.图中⑤、⑥、⑦分别是电机的温度、预紧力,转速,显示仪表.超声波电机③定转子之间的预紧力 $F$ 测量结构如图2所示,在行波型超声波电机端盖上安装平面轴承,

在其后端安装压力传感器.

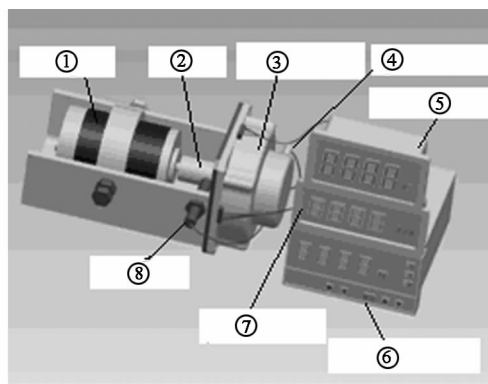


Fig. 1 Test rig for measuring friction coefficient  
图1 摩擦系数测量装置结构图

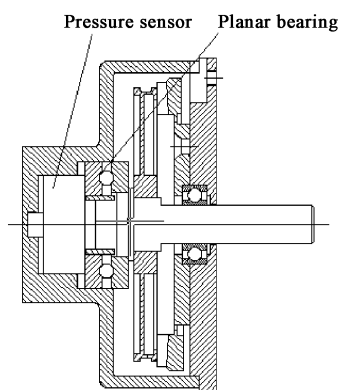


Fig. 2 Schematic illustration for measuring preload of ultrasonic motor  
图2 行波型超声波电机的预紧力测量结构

定转子之间的摩擦系数按下式计算

$$\mu = \frac{M}{FR} \quad (3)$$

其中, $M$ 为直流电机的输出力矩, $F$ 为定转子之间的预紧力, $R$ 为定转子接触平均半径. $M$ 通过直流电机输入电流和转速换算来测定,并对直流电机事先进行标定.试验研究对象为定子直径60 mm的行波型超声波电机,其最佳工作点是预紧力 $F$ 为70.7 N时,堵转力矩为0.8 N·m,空载转速为108 r/min.试验装置中的直流电机的型号分别采用(温州正科)ZYTD-45SRZ-B-07012和ZYTD-50SRZ-B-08010,其中前者的最大输出力矩为6 N·m,用于常规和驻波振动状态下超声波电机的拖动,后者直流电机作为负载,用于行波状态下试验,其额定堵转力矩为0.576 N·m,保持力矩小于0.1 N·m.压力传感器采用美国AmCells公司的NK-SS500N,其量程达到500 N,分辨率为0.1 N.

电机定子材料是锡表铜,表面通过研磨,粗糙度  $R_a$  可达 0.01. 转子采用以环氧树脂为基的摩擦材料,用胶黏法黏涂,待固化后对其表面进行加工、研磨,保证摩擦材料层的厚度在 0.2 ~ 0.3 mm 之间,粗糙度  $R_a$  同样达到 0.01.

采用 3 种不同状态进行对比分析,分别是:①常规状态下的摩擦系数.即定子不通电,通过直流电机带动转子转动,定子不动,记录定子的预紧力、直流电机的力矩和转子转速(由于定子速度为 0,即认为转子转速就是定转子的转速差)来计算摩擦系数;②驻波状态下的摩擦系数.定子 A、B 两相通过相位差为  $0^\circ$  或  $180^\circ$  的定子谐振超声频率的电信号.即使定子产生驻波振动,这时,定子的驱动速度仍为零.还是通过直流电机来带动转子,其他方法与①一样;③行波状态下的摩擦系数.定子 A、B 两相通过相位差为  $90^\circ$  定子谐振超声频率的电信号,便能够使定子产生行波振动,这时,定子的驱动速度即为定子表面质点的最大切向速度,转子被动,同样测量直流电机的电参数,其中定转子的转速差即为定子的最大切向速度和转子速度的差值,并且其摩擦系数的计算方法同上.

## 2 结果与分析

### 2.1 摩擦系数测试结果

图 3 是常规状态下的摩擦系数,在定转子转速差接近于零时,其摩擦系数较小,但不为零,即存在静态摩擦系数,随着定转子的相对转速差的增加,定

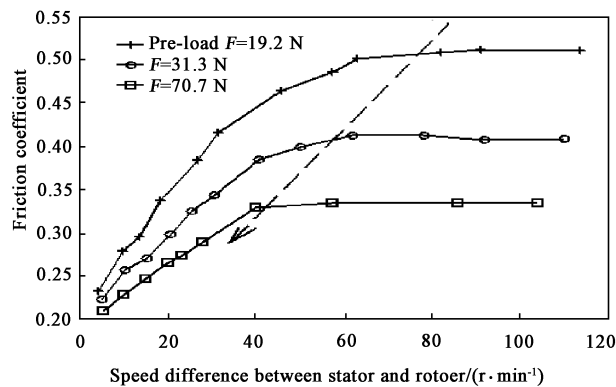


Fig. 3 Friction coefficient at conventional state  
图 3 常规状态下的摩擦系数

转子的摩擦系数也相应增大,但当其相对转速达到 40 ~ 90 r/min 时,即定转子的相对速度达到 0.12 ~ 0.25 m/s 时,摩擦系数增加会趋缓,相对转速至某一极限值后,其摩擦系数不变,成为常数.不同预紧

力时,其摩擦系数的变化规律相似,预紧力小时,其摩擦系数大;预紧力大时,其摩擦系数反而小,而且摩擦系数成为常数的转折点也会随着压紧力的增加而前移,即相对转速的极限值变小,如图中的箭头方向所示.

图 4 为驻波情况下的摩擦系数.给超声波电机通入两相同相位的高频高压电(其中单相驻波产生的效果与之一致),并通过直流电机带动超声波电机转子回转.较之常规下的摩擦系数,驻波下的摩擦系数明显减小,这也就是超声减摩的原理,其摩擦系数曲线的走势总的趋势与常规状态下的摩擦系数相似.另外在行波状态下的摩擦系数如图 5 所示,其摩擦系数与驻波状态下的十分接近.

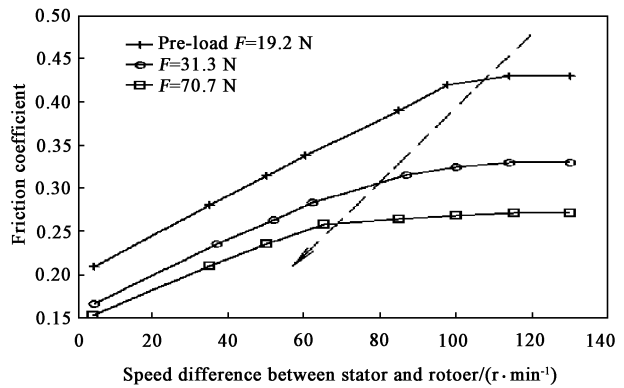


Fig. 4 Friction coefficient in standing wave  
图 4 驻波情况下的摩擦系数

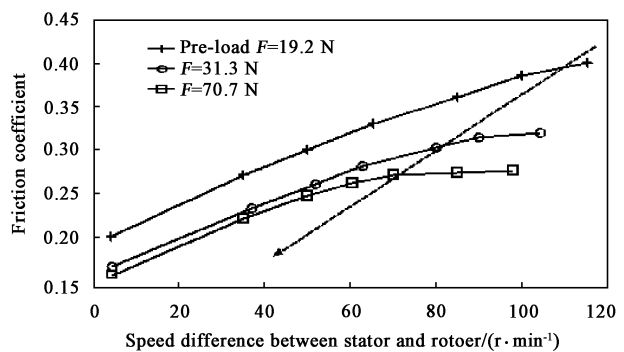


Fig. 5 Friction coefficient in traveling wave  
图 5 行波情况下的摩擦系数

从上述结果来看,摩擦系数与预紧力和定转子之间的相对转速差有关,与定转子相对速度也并不是简单的一阶线性关系,特别当转速增加到一定值时,曲线存在 1 个明显的拐点,且随着预紧力的增大,拐点逐渐左移.

### 2.2 预紧力对摩擦系数的影响

从图 3、4 和 5 可以得到随着预紧力的增加,摩

擦系数呈现变小的趋势. 根据经典摩擦二项式定律, 滑动摩擦是克服表面粗糙峰的机械啮合和分子吸引力的过程, 因而摩擦力就是机械和分子作用阻力的总和<sup>[9]</sup>, 即:

$$f = (A_0 + B_0 p^b) S_0 + (A_m + B_m p^b) S_m \quad (4)$$

式中:  $S_0$  和  $S_m$  分别为分子作用和机械作用的面积;  $A_0$  为分子作用的切向阻力, 与表面清洁度有关;  $B_0$  为粗糙度影响系数;  $b$  为趋近于 1 的指数;  $A_m$  为机械作用的切向阻力;  $B_m$  为法向载荷的影响系数,  $p$  为单位面积上的法向载荷. 那么, 若令:

$$S_m = \gamma S_0$$

预紧力:

$$F = pS$$

其中  $S$  是实际接触面积, 满足:

$$S = S_0 + S_m$$

那么式(4)左右两边除以  $F$  可以得到:

$$\mu = \frac{\alpha S}{F} + \beta \quad (5)$$

其中:

$$\alpha = \left( \frac{\gamma A_m + A_0}{\gamma + 1} \right); \quad \beta = \left( \frac{\gamma B_m + B_0}{\gamma + 1} \right)$$

由于超声波电机的定转子表面处于弹塑性接触状态, 实际接触面积  $S$  的增大程度低于法向预紧力  $F$  的变化程度, 从而使得摩擦系数随着预紧力的增加而减少.

### 2.3 超声驻波和行波的减摩效果

对图 3、4 和 5 得到的试验数据, 在相同预紧力时比较常规状态、驻波、行波情况下摩擦系数的变化规律. 如图 6 所示, 定子行波和驻波振动时的摩擦系数比常规状态下都明显减小, 即所谓超声减摩擦现象非常明显. 而且驻波和行波时的摩擦系数十分接近.

当定子通入高频高压交流电后, 定子表面由于

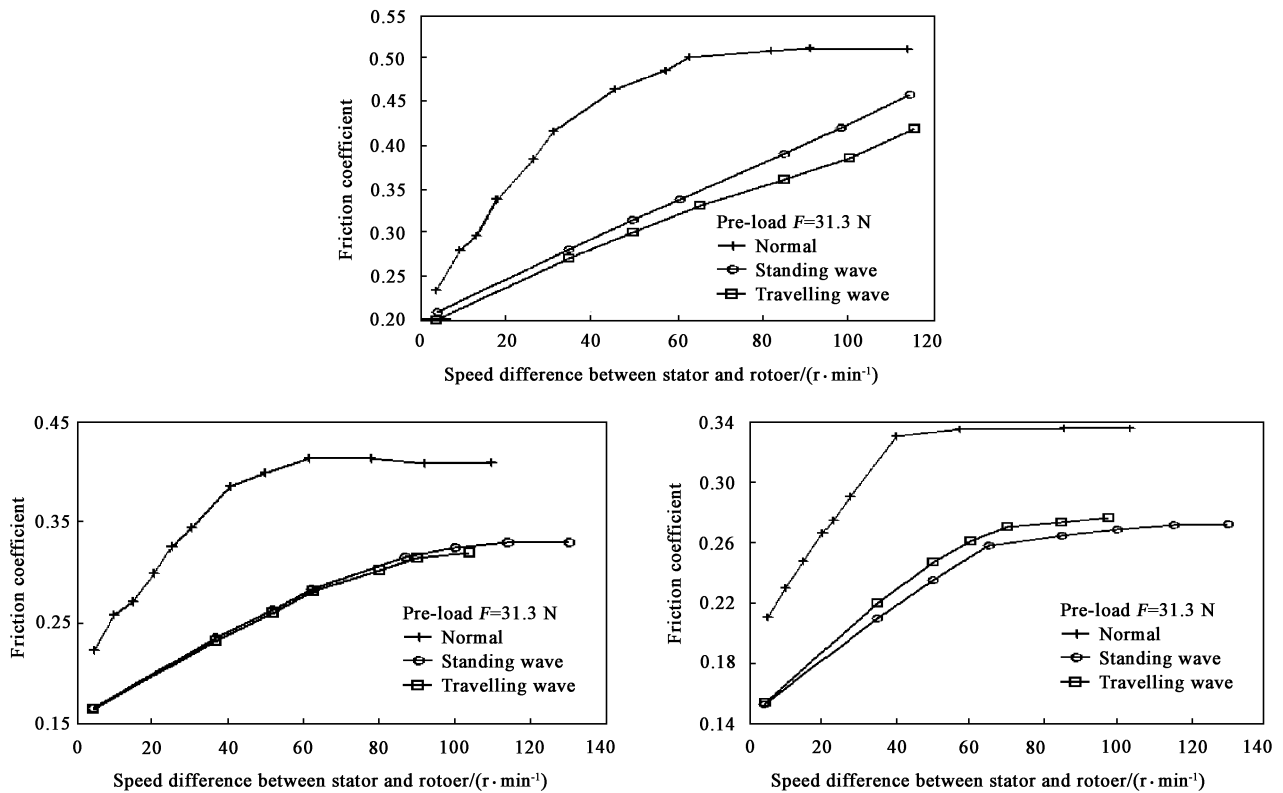


Fig. 6 Friction coefficient in different preload and working condition

图 6 各种预紧力下常规状态、驻波、行波时的摩擦系数

振动而产生多个的波峰和波谷, 由于只有波峰接触, 减少了定转子之间的实际接触面积, 从式(5)可以分析得到由于实际接触面积  $S$  的减少, 定转子之间的摩擦系数也随之下降. 且从图 7 也可以看到在预紧力比较小的情况下 ( $F = 19.2 \text{ N}$ ) 行波减摩比驻波

更加明显. 但是随着预紧力的增加 ( $F = 70.7 \text{ N}$ ), 驻波减摩效果优于行波.

### 2.4 温度对摩擦系数的影响

给超声波电机加热, 测得电机的摩擦系数如图 8 所示, 随着温度的增加, 摩擦系数逐渐变小. 预

紧力大时其摩擦系数变化相应较大.

### 3 行波型超声波电机的摩擦系数计算模型

分析上述试验结果可得:摩擦系数在相对速度为零时存在1个基本值,即存在1个静态摩擦系数,随着相对速度的增加摩擦系数相应增加,但到一定的相对速度后,摩擦系数逐步稳定.根据上述摩擦系数曲线变化情况,选择摩擦系数三阶拟合公式:

$$\mu = a + b(\nu - \nu_m) + c(\nu - \nu_m)^2 + d(\nu - \nu_m)^3 \quad (6)$$

进行拟合.

对图5~7所得到的试验数据进行最小二乘法

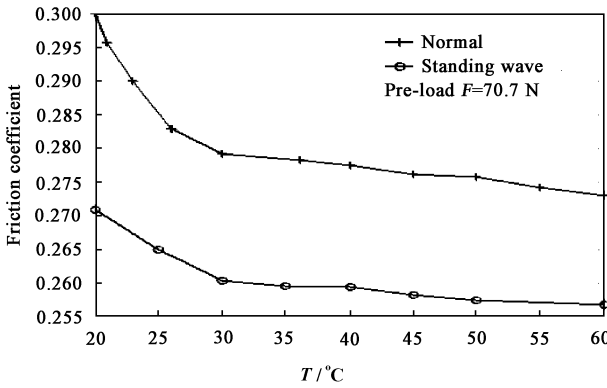


Fig. 7 Friction coefficients at elevated temperatures

图7 摩擦系数随温度变化曲线

拟合.假设第*i*个数据点的值 $y_i$ 和相应拟合值 $\hat{y}_i$ 之间的差值为残差 $r_i$ ,并定义残差 $r_i$ 范数 $W$ 为

$$W = \sum_i r_i = \sum_i |y_i - \hat{y}_i| \quad (7)$$

通过判断其大小就可以比较曲线拟合的效果.比较各种情况下不同阶数拟合范数大小,即 $W$ 越小,拟合效果越好.具体结果如表1~3所示.

从表1~3可以看到,在常规状态和小预紧力的驻波情况下,三阶拟合曲线的效果远远高于二阶和一阶.但是在较大的预紧力时的驻波或行波情况下,三阶与二阶的拟合效果基本相似,但是明显优于一阶.其中三阶拟合各系数如表4、5、6所示.

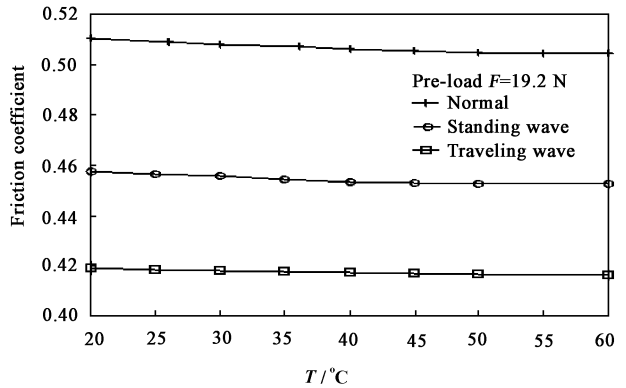


表1 常规状态下各阶拟合下的范数

Table 1 Norm of different order fitting in conventional state

Pre-load/N	First order	Second order	Third order
19.2	0.150	0.037	0.014
31.3	0.115	0.029	0.018
70.7	0.075	0.022	0.014

表2 驻波状态下各阶拟合下的范数

Table 2 Norm of different order fitting in standing wave

Pre-load/N	First order	Second order	Third order
19.2	0.0203	0.0126	0.0074
31.3	0.0313	0.0067	0.0071
70.7	0.0382	0.0074	0.0073

表3 行波状态下各阶拟合下的范数

Table 3 Norm of different order fitting in travelling wave

Pre-load/N	First order	Second order	Third order
19.2	0.0203	0.0038	0.0032
31.3	0.0250	0.0067	0.0026
70.7	0.0369	0.0048	0.0040

表4 常规状态下的a,b,c,d值

Table 4 a,b,c,d values in conventional state

Pre-load/N	a	b	c	d
19.2	0.189	0.0097	$-9.9 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-7}$
31.3	0.183	0.0074	$-7.7 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-7}$
70.7	0.177	0.0058	$-6.8 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-7}$

表5 两相驻波状态下的a,b,c,d的数值

Table 5 a,b,c,d values in two phase standing waves

Pre-load/N	a	b	c	d
19.2	0.197	0.0026	$-5.9 \times 10^{-5}$	0
31.3	0.156	0.0021	$3.5 \times 10^{-5}$	$-1 \times 10^{-7}$
70.7	0.142	0.0024	$-1 \times 10^{-5}$	0

在超声波电机运行速度范围内,摩擦系数和定转子之间的转速差之间呈现高阶关系.只有当电机定转子转速差比较小时,摩擦系数与定转子之间的转速差可作线性处理.另外,动态摩擦系数中存在1个常系数a,即存在1个初始值,与相对速度无关,即在速度差为零的情况下的静态摩擦系数.在常规

状态不同预紧力下,其变化很小,基本是稳定的,但在定子是驻波振动和行波振动情况下,受预紧力影响较大,是变化的,且预紧力越大其值越小。

表6 行波状态下的 $a, b, c, d$ 的数值

Table 6 Value of  $a, b, c, d$  in traveling wave

Pre-load/N	$a$	$b$	$c$	$d$
19.2	0.187	0.0029	$2.2 \times 10^{-6}$	$-2.2 \times 10^{-8}$
31.3	0.160	0.0019	$7.0 \times 10^{-6}$	$-1.0 \times 10^{-7}$
70.7	0.140	0.0026	$7.7 \times 10^{-6}$	$-5.1 \times 10^{-8}$

## 4 结论

a. 行波型超声波电机的摩擦系数与预紧力、定转子相对速度和电机本体温度等有关,在相同的转速下随着预紧力的增加,电机的摩擦系数逐步减少。随着温度的增加,摩擦系数略有下降。

b. 定转子之间的摩擦系数和转速不能采用简单的关系进行描述,在超声波电机运行范围内可以近似认为二或三阶,用一阶线性关系误差较大,且存在1个初始值,即静态摩擦系数。

c. 当定子高频(超声)振动时,定转子之间的摩擦系数较常态大幅下降;在小预紧力情况下,行波减摩效果大于驻波,而大预紧力情况下则相反。

## 5 致谢

本研究得到国防基础科研基金项目(50505041)的资助,在此表示感谢。

## 参考文献:

- [1] Chen Z, Wang J X, Zheng X G, *et al.* Study on friction and wear properties of PTFE [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(4): 74-77 (in Chinese) [陈站, 王加序, 郑小光, 等. 聚四氟乙烯工程材料的摩擦磨损性能研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(4): 74-77].
- [2] Gu N N, Wu D Q, Huang X M. Physical and mechanical properties of PTFE composites [J]. Lubrication Engineering, 1997, (6): 51-56 (in Chinese) [古年年, 吴德谦, 黄雪梅. 聚四氟乙烯复合材料的物理机械性能[J]. 润滑与密封, 1997, (6): 51-56].
- [3] Luo Y X, Qu J J, Xu X X, Research on friction properties of

ultrasonic drive [J]. Lubrication Engineering, 2005, 16(3): 29-31 (in Chinese) [罗云霞, 曲建俊, 徐晓希. 超声波驱动得摩擦特性研究[J]. 润滑与密封, 2005, 16(3): 29-31]

- [4] Qu J J, Zhang K, Zhou T Y, *et al.* Study on wear properties of rotor friction material of ultrasonic motor [J]. Tribology, 2001, 21(4): 283-286 (in Chinese) [曲建俊, 张凯, 周铁英, 等. 超声马达转子摩擦材料磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(4): 283-286].
- [5] Gong W, Chu X C, Li L T. Research on friction material for traveling wave ultrasonic motor [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics 2003, 25(4): 305-307 (in Chinese) [龚文, 褚祥成, 李龙土. 行波超声马达摩擦材料研究[J]. 压电与声光, 2003, 25(4): 305-307]
- [6] Liu J B, Chen Y X. Investigation on contact model of ultrasonic motor and its experiments [J]. Proceedings of the CSEE 2000, 20(4): 59-63 (in Chinese) [刘锦波, 陈永校. 超声波电机定转子接触的摩擦传动模型及其实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 59-63].
- [7] M Kurosawa, S Ueha. Efficiency of USM using traveling wave [J]. Trans of Acou, 1988, 44(1): 40-46 [in Japanese].
- [8] Wen Shi-zhu. Principles of Tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 385-391 (in Chinese) [温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 385-391]
- [9] H Storek, W Littmann. The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to traveling wave ultrasonic [J]. Trans. of Acou. In Japan, 2002, 40(1): 379-383.
- [10] Qu J J, Qi Y L. Advances on tribology of ultrasonic motor and its friction materials [J]. Tribology, 1998, 18(1): 80-87 (in Chinese) [曲建俊, 齐毓霖. 超声马达摩擦学及其摩擦材料研究进展. 摩擦学学报, 1998, 18(1): 80-87]
- [11] Qu Jianjun. Friction driving mechanism and friction material research on ultrasonic motor [D] Harbin: Department of Applied Chemistry, Harbin Institute of Technology, 1998: 15-96 (in Chinese) [曲建俊. 超声电机的摩擦驱动机理及摩擦材料研究[D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1998: 15-96]
- [12] Sun F Y, Tian X, Qu J J. Performance simulation of traveling wave ultrasonic motor based on visco-elastic contact model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 5(42): 125-128 (in Chinese) [孙凤艳, 田秀, 曲建俊. 基于粘弹性接触模型的行波型超声波电动机特性模拟[J]. 机械工程学报. 2006, 5(42): 25-128].
- [13] Aoyagi M. The practice use of ultrasonic motor [J] the Audio magazine, 2001, 57(6): 411-416 (in Japanese) [奥村一郎. 超音波モータの実用化[J]. 日本音响学会誌, 2001, 57(6): 411-416].