

超声马达摩擦学及其摩擦材料研究进展

曲建俊 齐毓霖 张志谦 孙海涌
(哈尔滨工业大学机械工程系 哈尔滨 150001)

摘要 超声马达是一种新型原动机,与普通电磁马达不同,这是一种摩擦驱动马达。为了促进超声马达的发展,对其研究中关于定子与转子界面接触驱动特性和摩擦磨损特性,超声波振动对定子和转子接触界面摩擦学特性的影响,转子摩擦材料的选择及其寿命预测等,从摩擦学角度对国内外的研究进展进行了综合归纳与评述,并且针对超声马达摩擦驱动的特点,提出了当前值得重视的一些研究内容。

关键词 超声马达 摩擦学 摩擦驱动 摩擦材料 摩擦磨损

分类号 TH117.1

超声马达是70年代发展起来的一种新型电机,其在驱动方式上与普通电磁马达明显不同。图1给出的是行波型超声马达工作原理示意图。超声马达是利用压电陶瓷的逆压电效应,使定子弹性体产生超声波振动,弹性体表面上的质点作椭圆振动,转子或移动体以一定的预紧力 p_c 压在定子表面,转子或移动体的运动是由其与定子接触面之间的摩擦作用产生的^[1-3]。超声马达是一种摩擦驱动马达,具有电磁马达所没有的许多特性,如单位转矩很大且无磁场干扰等,被认为是一种未来型的微型电机^[4-6]。

近几年来,日本、美国和德国等发达国家都在对超声马达进行大力研究,并在机器人、汽车和照像机镜头等很多方面得到了应用^[7-9]。尽管国内从80年代末才开始在这方面进行研究,然而截至目前也已经试制出几种型式的超声马达^[10-14]。可以认为,超声马达是功能陶瓷、机械振动、超精加工和摩擦学研究等交叉发展的高科技产品。由于超声马达是通过接触面的摩擦传递驱动力,因而定子与转子接触界面的摩擦磨损特性,以及所用驱动摩擦材料的特性,都能够直接影响其使用寿命和工作性能。超声波振动对超声马达摩擦驱动的影响,给摩擦学研究带来了不少很受人们重视的新课题。

自80年代后期以来,超声马达摩擦学的发展很快(特别在日本更是如此),已经成为工业摩擦学研究的一个新领域,越来越受到广大摩擦学工作者的关注^[15-20]。与其它型式的超声马达比较而言,由于行波型超声马达具有许多突出的优点,事实上已经成了当今超声马达发展的主流^[5,21]。

因此,作者通过广泛的文献调查,同时结合自己研究工作的积累,主要围绕行波型超声

1996-10-24收到初稿,1997-12-28收到修改稿/本文通讯联系人曲建俊

曲建俊 男,34岁,副教授、硕士生导师,目前主要从事聚合物及其复合材料和超声马达摩擦学研究,发表论文30余篇

齐毓霖 简介内容见本刊本期第53页

张志谦 男,62岁,教授、博士生导师,从事树脂基复合材料和高分子材料表面改性研究,发表论文80余篇,专著1部

孙海涌 男,43岁,实验员,从事高分子材料及其复合材料力学性能试验研究

马达的定子与转子的接触驱动特性和摩擦磨损特性, 以及摩擦材料的选择和寿命预测等几个方面, 对国内外有关研究工作的进展加以归纳、总结与评述, 并且对超声马达摩擦学研究中的若干重要课题作了分析与讨论.

1 定子与转子的接触驱动机理及界面摩擦学特性研究

1.1 定子与转子的接触驱动机理

进行定子转子的接触驱动机理研究对控制定子弹性体与移动体之间的动态接触行为, 以及对定子和转子接触界面摩擦学特性的研究都具有重要意义. 目前, 较有代表性的定子与转子接触驱动力转换模型有:

a 滚子平板模型

由黑泽实等^[22]在 80 年代末提出的滚子平板摩擦力转换模型如图 2 所示. 他们把转子假设为刚性平板, 而将定子看作为刚性滚子, 认为定子对转子是以滑动摩擦方式传递驱动力.

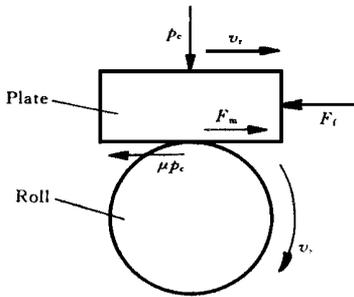


Fig 2 Schematic diagram of transmission model

of the force from a roll to a plate
 p_c —Normal pressure, v_r —Speed of rotor,
 F_l —Force of load, F_m —Force of driving,
 μ —Friction factor,
 v_s —Speed of one point on stator surface

图 2 滚子平板摩擦力转换模型简图

p_c —预压力, v_r —转子移动速度,
 F_l —负载力, F_m —转子驱动力,
 μ —摩擦因数, v_s —定子表面质点速度

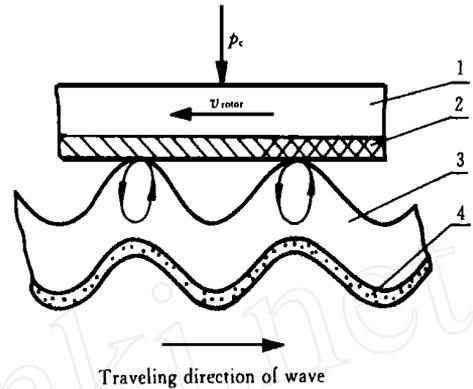


Fig 1 Principles of operation for traveling wave ultrasonic motor

1—Slider (rotor), 2—Friction material,
3—Elastic vibrator (stator), 4—Piezoceramic

图 1 行波型超声马达的工作原理简图

1—移动体(转子), 2—摩擦材料, 3—弹性振动体(定子), 4—压电陶瓷

应当指出, 这种模型的主要缺点是没有考虑剪切应力对接触驱动力的影响, 并且把定子与转子接触界面复杂的摩擦过程简单地视作为滑动摩擦.

b 有限元分析模型

Takashi 等^[23]在考虑了定子与转子接触的非线性和剪切变形所引起的摩擦滞后现象的基础上, 对环形行波马达通过计算发现, 定子与转子的相互接触是处于一种复杂的粘-滑交替变化的状态, 认为定子对转子的驱动力传递属于一种周期性的变化过程(如图 3 所示), 但对这种现象还有待于更进一步的实验证实. 此外, 他们还发现, 只有把比普通摩擦试验测得的更低的动静摩擦因数代入理论公式中, 才能够通过计算得到与实验结果一致的结论. 由此可见, 在超声波驱动下, 定子和转子的摩擦特性与普通摩擦试验的不同.

可以认为, 就以上所述滚子平板模型和有限元分析模型而言, 二者对定子与转子之间的界面作用力是如何影响定子行波振幅的问题都没有给予足够的重视, 因而这 2 种驱动力转换模型都还存在误差.

c 能量分析法模型

能量分析法模型是由 Nesbitt 等^[24]在 90 年代中期提出来的. 他们对定子与滚子接触区摩擦力转换的特点进行了比较深入的分析研究, 引入了一个由定子和转子接触点相对滑动速度关系所决定

点进行了比较深入的分析研究, 引入了一个由定子和转子接触点相对滑动速度关系所决定

的符号函数 $\text{sign}(r, \theta, t)$, 该函数有如下的表达式:

$$\text{sign}(r, \theta, t) = \begin{cases} -1, & |u_s| < |u_r|, \\ 0, & |u_s| = |u_r|, \\ +1, & |u_s| > |u_r| \end{cases}$$

式中: r 和 θ 分别表示圆柱坐标变量, t 表示时间变量, v_s 表示定子表面接触点的水平振动速度, v_r 表示转子移动线速度。

基于库仑摩擦定律, 求得了定子与转子之间摩擦力的转换方程为

$$F_m = \mu \iint_c \left\{ r \Phi_r - h \frac{\partial \Phi_r}{\partial \theta} \right\} \text{sign}(r, \theta, t) p(r, \theta, t) dr d\theta.$$

式中: F_m 表示定子对转子的摩擦驱动力, μ 表示摩擦因数, A_c 表示定子和转子接触区面积, r 表示接触区平均半径, h 表示不计定子齿时定子表面厚度, $p(r, \theta, t)$ 表示接触法向压力分布函数, Φ_r 和 Φ_t 分别表示文献[24]中设定径向 Φ 和轴向 Φ 机械模态矩阵的转置

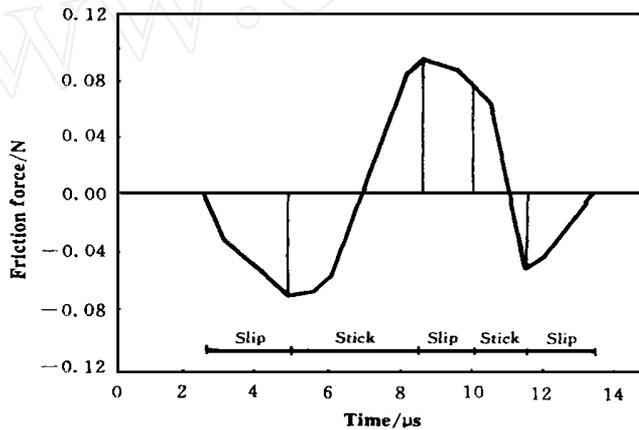


Fig 3 Friction force at one point on rotor interface

图3 转子上一点的摩擦力随时间的变化

由此可见, 定子对转子的有效驱动力系由定子与转子的滑动摩擦所产生, 而且只有在接触点处定子的水平速度比转子的低时, 才能产生有效的驱动力。

Nesbitt 等的上述模型虽然考虑了定子与转子间的作用力对摩擦驱动力转换的影响, 但这一模型的实际应用效果也并不算好。

国内关于超声马达驱动转换模型的研究较少. 崔天宏等^[10]应用弹性动力学的方法, 研究了超声马达传动的机理, 但没有对定子与转子的接触驱动作用进行探讨. 贺思源^[25]和陈维山^[37]分别在对定子振动模式进行仿真研究的基础上, 模拟了定子齿驱动轨迹的变化, 为进一步研究转子接触点摩擦力的变化提供了依据。

1.2 定子和转子的界面摩擦学特性研究

研究表明, 超声马达的定子与转子界面的摩擦因数比普通摩擦试验测得的低, 为了弄清产生这一差别的原因, 进行了对比试验研究^[16]: 利用表面涂敷有含 SiC 粒子的 Ni-P 薄膜的定子与表面涂敷有氧化铝薄膜的转子作普通滑动摩擦试验, 发现在定子与转子的摩擦方向上形成了不同大小的刮痕, 并且发生了明显的材料转移; 相反, 在超声马达试验中定子与转

子的摩擦方向上几乎没有刮痕存在而相当平滑, 摩擦副材料的转移非常少, 几乎所有的磨屑基本都被排除到摩擦界面之外, 只是在转子和定子的表面出现了压痕。分析认为, 超声马达的摩擦磨损之所以与滑动摩擦有如此大的差别, 很可能是因为定子和转子之间的空气流体动压效果不同^[26]。本田知己等^[17]通过对工作参数, 以及定子和转子的结构参数等对马达的转换效率、磨损率和摩擦驱动速度的影响, 以及对定子与转子接触界面的磨损特性与滑差率之关系的研究, 认为滑差率决定了接触界面的磨损状态, 当滑差率处于40%~50%的范围时, 转子和定子的磨损形态发生由平滑向严重擦伤转变, 并且依据磨损特征把界面磨损划分成3种类型, 如图4所示。

本田知己等的研究具有开拓性, 他们的研究结果可以作为改进马达结构设计时有价值的参考。值得一提的是, 本田知己等在用扫描电子显微镜(SEM)对表面状态进行观察时发

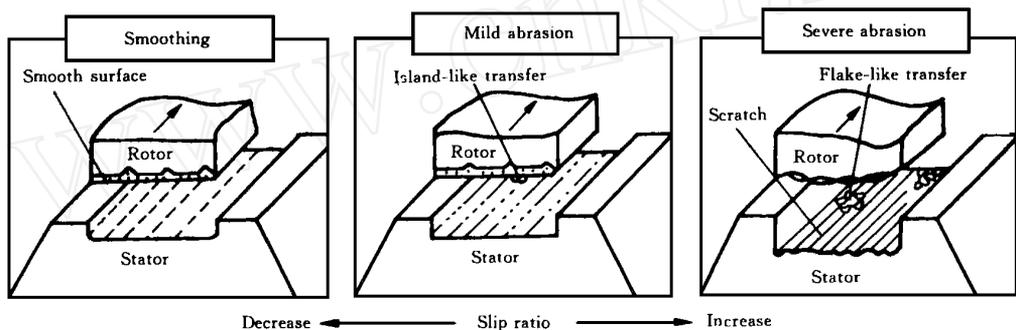


Fig 4 Interface wear model of stator and rotor

图4 定子和转子界面磨损状态模型

现有类似于文献[16]报道的“压痕”现象, 但是也没有对产生这一现象的原因作进一步的分析研究。另外, 这些研究都是对同一种形式的马达进行的, 其它型式的马达、其它种类的转子和定子界面接触状态和材料, 以及超声波振动条件对定子和转子摩擦磨损特性的影响等, 还有待进行深入探讨。

2 超声马达摩擦材料的特性与选择

研究表明, 摩擦材料的摩擦因数越高, 超声马达速度转变的损失越小, 而且摩擦材料的硬度对马达的速度和推进力都会产生影响。在以黄铜作定子弹性体的条件下, 就提高直线行波马达的性能而言, 橡胶基摩擦材料的实用效果比树脂基摩擦材料的好^[15]。一般地说, 马达用摩擦材料应当满足的基本要求有^[5, 27, 28]: 摩擦因数要尽可能地高, 以便将振动能高效地转化成回动能; 耐磨性好, 且其对偶件的磨损也很轻微; 摩擦力不随时间而发生变化, 能长期稳定地工作; 无摩擦噪音, 不引起转子和定子的附加振动; 可以进行精密机械加工, 热化学稳定性好。

对合成橡胶材料和工程塑料材料在2种行波型马达中进行试验, 当定子是用不锈钢制造时, 以芳纶纤维增强的聚酰亚胺复合塑料对圆盘马达满足上述要求, 而在圆环型马达中则是以聚氨脂基复合材料的实用性能较好^[5, 27, 28]。曾经对10多种橡胶和塑料基摩擦材料的杨氏模量、摩擦因数与马达的速度、推进力及最大效率的关系进行了对比试验研究, 试验在行波

型线性马达上进行, 作椭圆振动的弹性棒材料分别是硬铝和不锈钢. 结果表明, 具有较高杨氏模量的摩擦材料比较适合与硬铝匹配, 而具有较高摩擦因数的材料则更适合与不锈钢弹性体组合, 但却还没有对它们的摩擦磨损规律进行更深入的考察^[5, 18, 29]. 此外, 也有人研究了不锈钢定子与贴有粉末冶金烧结合油摩擦材料的转子, 以及不锈钢转子与陶瓷定子组合对马达稳定性和最大效率的影响, 发现采用粉末冶金烧结合油金属摩擦材料的马达效率下降, 但工作稳定性提高^[18].

目前, 用于制造超声马达的摩擦材料主要有以下几种:

- a 橡胶基摩擦材料^[15, 29, 30];
- b 塑料基摩擦材料^[5, 27, 28, 31];
- c 粉末冶金烧结合油金属摩擦材料^[18];
- d 表面陶瓷涂层摩擦材料^[32].

与转子摩擦材料组合的定子弹性材料主要有不锈钢、硬铝合金和铜合金^[33, 34].

研究不同型式的超声马达和不同定子弹性体与各种转子摩擦材料的摩擦磨损特性, 不仅能够揭示各种摩擦材料对超声马达工作特性和使用寿命的影响, 而且也可以为转子摩擦材料和定子弹性体的最佳匹配提供理论指导, 然而目前这方面系统的研究工作报道还比较少. 除了研究转子摩擦材料特性对超声马达驱动行为的影响以外, 最近研究发现转子摩擦材料的几何尺寸, 如摩擦材料的厚度变化对定子和转子之间的摩擦驱动力的转换有较大的影响^[35], 这对于超声马达的设计具有指导意义.

此外, 有关超声马达摩擦材料设计制造方面的具体报道也还很少, 特别是在针对超声马达的工作特点进行转子摩擦材料研究方面的文献报道更少. 目前, 一般都是根据普通试验测得材料的摩擦磨损性能数据进行马达设计, 这与实际要求必然产生较大的误差. 显然, 只有研究超声波振动对转子摩擦材料摩擦学特性的影响, 考虑超声波驱动特点进行摩擦材料的设计, 才能够制造出满足超声马达工作要求的摩擦材料.

3 超声马达摩擦材料的寿命预测

通过磨损试验预测马达用摩擦材料的寿命具有重要意义. 石井孝明等^[36]认为, 在影响摩擦材料磨损的诸多因素中, 最重要的是滑动副之间的预加载荷 p_c 和相对滑动距离 L . 其中, L 又决定于相对滑动速度 v 和滑动时间 t . 引入比例系数 K (代表单位磨损率), 得普通滑动磨损量 w 的方程为

$$w = Kp_c L = Kp_c v t$$

将上式应用于超声马达中, 并且注意到 p_c 和 v 均随时间而变化的特性, 可以得到马达摩擦材料的磨损量方程

$$w = K \int_0^t p_c |v| dt = K \frac{t}{T} p_c |v| dt = K \frac{W_e}{T} t$$

式中: w_e 代表被文献^[36]中定义的磨损功率, $w_e = K \int_0^t p_c |v| dt$; T 代表超声马达定子的行波振动周期.

文献^[36]的作者石井孝明等设计了2种滑动磨损试验装置, 分别测定了4种摩擦材料的单位磨损率 K 及其与磨损功率的关系, 并将其中2种摩擦材料应用于 π 型直线超声马达, 且对它们的磨损量进行了预测, 结果是预测值均比实际磨损值高. 分析认为, 产生这种差别的主要原因是理论预测时对超声波振动的减摩作用考虑不够. 因此, 关于超声波马达摩擦材料

的磨损预测,还必须进一步探讨单位磨损率 K 与超声波振动的关系.另外,石井孝明等只研究了1种超声波马达和2种摩擦材料的寿命预测,其方法是否具有-般性也还需要扩大范围进行更进一步的深入研究.

国内关于定子与转子界面摩擦学特性和转子摩擦材料的研究尚未见文献报道,摩擦材料的选择还处于试验阶段.

4 结束语

人们进行超声马达摩擦驱动机理的研究只有10多年,虽然已经取得了一些进展,但由于定子与转子接触的复杂性,不仅具有冲击振动,而且还存在着滚滑摩擦磨损现象,所以仍有许多问题需要进行深入研究

首先,要建立能够正确反映超声马达定子和转子接触驱动特性的驱动模型,这种模型需要考虑定子和转子接触变形对驱动振幅的影响.这不仅对揭示马达的驱动机理,而且对搞清楚马达工作时定子和转子界面作用力的大小和分布,以及相对滑动速度的变化规律和进行摩擦材料设计等都具有重要意义.

其次,研究超声波振动特性对转子和定子摩擦磨损特性的影响,这对正确选择摩擦材料,建立普通摩擦试验与超声波条件下试验的联系,进行摩擦材料和超声马达的寿命预测都具有重要的作用.

此外,针对不同型式的超声马达和定子弹性体,开发具有高摩擦因数且磨损率低、适于超声波振动条件下应用的超声马达摩擦材料,是既复杂而又迫切需要研究的课题.

从本质上讲,超声马达是一种摩擦驱动马达,其行为特性和工作寿命都同定子与转子之间的摩擦磨损特性密切相关.因此,超声马达的摩擦学研究是工业摩擦学研究的一个新领域,只有全面系统地从摩擦学角度进行研究,才能设计出性能优异的超声波马达.

参 考 文 献

- 1 指田年生.超音波モ-夕-.应用物理(日),1985,54(6):589~590
- 2 Kumada A. A piezoelectric ultrasonic motor. Japanese Journal of Applied Physics, 1985, 24(2): 739~ 741
- 3 Kuribayashi M, Ueha S, Mari E. Excitation conditions of flexural traveling waves for a reversible ultrasonic linear motor. J Acoust Soc Am, 1985, 77(4): 1431~ 1435
- 4 Ueha S. Present status of ultrasonic motors. In: Proceedings of Ultrasonics Symposium on IEEE, Japan, 1989. 749~ 753
- 5 Tokushima A. Ultrasonic motor. National Technical Report, 1987, 33(5): 542~ 550
- 6 金龙,朱美玲,赵淳生.国外超声马达的发展与应用.振动测试与诊断,1996,16(1):1~7
- 7 Hagedorn P, Wallashed J. Travelling wave ultrasonic motors. Journal of Sound and Vibration, 1992, 155(1): 31~ 46
- 8 Moroney R M, White R M, Howe R T. Ultrasonic micromotors. In: Proceedings of Ultrasonics Symposium on IEEE, Japan, 1989. 745~ 748
- 9 Akiyama Y. Present state of ultrasonic motors in Japan. J Electron Eng, 1987(4): 76~ 80
- 10 崔天宏,王立鼎,吕琼莹等.超声微电机传动机理的研究.机械工程学报,1995,31(3):71~76
- 11 王艳.超声马达的研究.[学位论文].哈尔滨:哈尔滨船舶工程学院水声工程系,1992
- 12 董蜀湘.直线微马达箱位超声换能器研究.声学学报,1993(1):19~28
- 13 Chen Y X. The mathematical model of ring ultrasonic motors. 1994 Inter conf on Electrical Machines, Paris, 1994. 208~ 222

- 14 Weishan Chen, Fujii L u, Siyuan He Nonaxisymmetric transeverse vibration of piezoelectric circular disk used for ultrasonic motors In: Proceedings of the Fourth International Symposium on Ultrasonics, Beijing, 1995. 160~ 165
- 15 Akira Endo, Nobutoshi Sasaki Investigation of frictional material for ultrasonic motor Japanese Journal of Applied Physics, 1987, 26(1): 197~ 199
- 16 金泽元, 月本贵之, 前野隆司等. 超音波モーターのトライボロジー. トライボロジスト, 1992, 38(3): 207~ 212
- 17 本田知己, 加藤康司. 進行波型超音波による摩擦駆動にずける摩擦摩耗の基本特征. トライボロジスト, 1992, 38(8): 727~ 734
- 18 中村健太郎, 黒泽实, 上羽贞行. 复合振動子型超音波モーター—摩擦材料及び諸特性. 平成元年春季音讲论集, 1989(3-P-18). 809~ 810
- 19 Takaaki Ishii, Sadayuki Ueha Wear properties and life prediction of frictional materials for ultrasonic motors Japanese Journal of Applied Physics, 1995, 34(5B): 2765~ 2770
- 20 本田知己, 加藤康司. 超音波駆動における摩擦摩耗特性に及ぼす超音波振幅の影響. トライボロジスト, 1996, 41(2): 170~ 177
- 21 黒泽实. 超音波モーターの原理と利用の現状. 機械の研究, 1994, 46(2): 239~ 244
- 22 黒泽实, 上羽贞行. 進行波型超音波モーターの効率. 日本音響学会志, 1988, 44(1): 40~ 46
- 23 Takashi Maeno, Takayuki Tsukamoto, Akira Miyake Finite element analysis of the rotor/stator contact in a ring-type ultrasonic motor IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Cont, 1992, 39(6): 668~ 674
- 24 Nesbitt W, Hagood IV, Andrew J *et al.* Modeling of a piezoelectric rotary ultrasonic motor IEEE Trans Ultrason Ferroelect and Freq Cont, 1995, 42(2): 210~ 224
- 25 贺思源. 新型超声马达的计算机仿真与研制: [学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学精密仪器系, 1995
- 26 Takashi Maeno, David B B. Effect of the hydrodynamic bearing on rotor/stator contact in a ring-type ultrasonic motor IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Cont, 1992, 39(6): 675~ 682
- 27 稻叶律夫, 徳島晃, 川崎修等. 超音波モーター. 信学技报, 1986, US86-64: 25~ 30
- 28 徳島晃, 稻叶律夫. 超音波モーター. 机械设计, 1987, 31(17): 51~ 58
- 29 Kentaro Nakamura, Minoru Kurosawa, Hisayuki Kurebayashi *et al.* An estimation of load characteristics of an ultrasonic motor by measuring transient responses IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Contr, 1991, 38(5): 481~ 485
- 30 Minoru Kurosawa, Kentaro Nakamura, Takashi Okamoto *et al.* An ultrasonic motor using bending vibrations of a short cylinder IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Cont, 1989, 36(5): 517~ 521
- 31 Fleischer M, Stein D, Meixner H. New type of piezoelectric ultrasonic motor IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Cont, 1989, 36(6): 614~ 619
- 32 月本贵之. カメラハの应用超音波モーターによるシズ駆動 エレクトロニクスライフ, 1991(10): 51~ 56
- 33 Hiroshi Hirata, Ueha S. Design of a traveling wave type ultrasonic motor IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Cont, 1995, 42(2): 225~ 231
- 34 Inaba R, Tokushima A, Kawasaki O. Piezoelectric ultrasonic motor. In: Proceedings of Ultrasonics Symposium on IEEE, Japan 1987. 747~ 756
- 35 曲建俊. 超声马达摩擦驱动机理和摩擦材料研究: [学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学理学院, 1998
- 36 石井孝明, 上羽贞行, 中村健太郎等. 超音波モーターに使用する摩擦材料の摩耗评价法. 日本トライボロジー学会 トライボロジー—会议予稿集, 1995(5): 189~ 190
- 37 陈维山. 行波超声马达的理论及实验研究: [学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学精密仪器系, 1996

Advances on Tribology of Ultrasonic Motor and Its Friction Materials

Qu Jianjun Qi Yulin Zhang Zhiqian Sun Haiyong

(Department of Mechanic Engineering

Harbin Institute of Technology Harbin 150001 China)

Abstract Ultrasonic motor is a new kind of motor developed in recent years. It is different from conventional electromagnetic motors. It is a kind of motor driven by frictional force and has a lot of different properties from electromagnetic motors. At present, the new motor has been developed rapidly and entered practical application stage in some developed countries. There has been some investigating basis of ultrasonic motor in China. More and more attentions to the new motor are being paid by researchers and engineers. In order to promote the motor development in China, the research advances in tribology of ultrasonic motor at home and abroad are introduced and reviewed synthetically from several main aspects that are the contact driving and friction and wear properties between stator and rotor, the effect of ultrasonic vibration on tribological properties of interface of stator and rotor and the choices and life prediction of friction material in motor and so on. Based on the friction driving characteristics of ultrasonic motor, several important research directions and topics are put forward.

Key words ultrasonic motor tribology friction drive friction material friction and wear

Classifying number TH117.1