

压电陶瓷超声波马达*

褚祥诚[†] 李龙士

(清华大学材料科学与工程系 新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室 北京 100084)

摘要 压电陶瓷超声波马达是利用压电陶瓷材料激发超声波实现驱动的一种新型电机,同传统的电磁马达和静电马达比较,它具有低速下大力矩输出、无电磁干扰、静音操作、保持力矩大、响应速度快、结构简单等特点。在国外,它已经在精密仪器、航天航空、自动控制、办公自动化、微型机械系统、微装配、精密定位等领域得到了实际应用。文章系统地总结了压电陶瓷声马达的特点,简略介绍了国内外相关技术的发展情况及前沿性研究方向,并提出进一步开发研究的几点建议,希望对我国压电陶瓷声马达的研究以及相应产品的开发起到积极的促进作用。

关键词 超声波马达 压电驱动器 压电陶瓷

PIEZOELECTRIC CERAMIC ULTRASONIC MOTORS

CHU Xiang-Cheng LI Long-Tu

(Department of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Piezoelectric ceramic ultrasonic motors are a new type of actuator using ultrasonic wave stimulated by piezoelectric ceramics. Compared to conventional electromagnetic and electrostatic motors, they have features such as high torque at low speed, absence of electromagnetic disturbance, no noise, high holding torque, quick response, and simple construction, etc. They have been applied in the fields of precision instruments, aeronautics and aerospace, control automation, office automation, micromechanical systems, microfabrication, precision positioning, etc. This paper summarizes their features, recent advances in related research and several suggestions on further development.

Key words ultrasonic motor piezoelectric actuators piezoelectric ceramic

1 引言

压电陶瓷作为信息功能陶瓷的主流材料之一,已经在水声换能器、传感器、滤波器、变压器、点火器、陀螺仪、液流泵等方面得到了实际应用。鉴于压电陶瓷材料高功率密度的特点,人们一直尝试将压电陶瓷的逆压电效应产生的振动转换成可以利用的驱动源。

20世纪70年代初,伴随着工程技术和先进制造技术的发展对驱动器的特殊要求而出现了一些新型驱动器,如磁致伸缩驱动器、电致伸缩驱动器、记忆合金驱动器、超导电机、压电驱动器及压电超声马达、静电马达、离子交换型驱动器、混合型驱动器(融合磁致伸缩和压电驱动技术,形成宽频带输出型驱动器)等。

在各类驱动器中,压电驱动器和超声马达的种

类最繁多,从毫米级的微型马达到厘米级的小型马达,从单自由度的直线马达到多自由度的平面马达和球型马达,从原理上基于摩擦的超声马达到利用声悬浮的非接触式超声马达,从高分辨率的蠕动式压电马达到无磨损的压电-电流变复合型步进马达应有尽有^[1,2]。

2 压电陶瓷超声波马达的特点

同电磁马达、静电马达相比,压电陶瓷超声波马达具有以下显著特点:

(1)低功耗、高功率密度:小型电磁马达的功率密度一般为30W/kg左右,压电陶瓷的功率密度是电磁气隙功率密度的10—1000倍,考虑摩擦等因

* 国家自然科学基金(批准号 69785006)资助项目

2001-07-18收到初稿,2001-11-12修回

† 通讯联系人, E-mail: chuxiangcheng@mail. tsinghua. edu. cn

素,超声马达实际功率密度应为电磁马达的5—10倍。

(2)低速下大力矩 超声马达的力矩密度是电磁马达的100—1000倍以上,这是超声马达不同于其他各类驱动器的最显著的特点。它可以直接带动执行机构,去掉减速机构,这不仅减小体积、减轻重量,而且能提高系统的精度、响应速度和刚度。

(3)结构简单灵活,运动形式多样:设计中可考虑空间、形状、重量和使用要求对超声波马达进行灵活设计,易于实现结构小型化、轻量化,便于批量规模化生产。

(4)无磁性扰动:工作时无电磁场产生,也不受外界电磁场及其他辐射源的影响,这使它非常适合用在光学系统或超精密仪器上。

(5)响应快,断电静态保持力矩大:超声马达启动时间一般在几个毫秒之内,而制动时间更短。马达在断电时,由于定、转子间静摩擦力的作用,使马达具有较大的静态保持力矩,使用中可省去制动闸。

(6)成本低:驱动器结构简单,所需材料只是压电陶瓷片或薄膜、金属材料、热固性或热塑性摩擦材料,不含有电磁马达的线圈绕组,批量生产可大幅度地降低成本。

(7)位置分辨率高:压电驱动器的表面振幅一般为微米、亚微米,甚至纳米数量级,在无降速机构的情况下,系统可达到亚微米级、纳米级的定位精度。

(8)无需润滑:驱动器定、转子间不需润滑油或润滑脂就可保证它的正常工作,这减少了它在使用中给环境带来的污染。同时,作为宇航机械系统中理想的驱动源,可以避免传统电磁马达在外层空间润滑油泄漏与挥发带来的麻烦。

鉴于超声波马达的诸多优点,各国专家越来越重视这种新型驱动器的研究与开发,试图在某些领域实现它的规模化生产以取代传统的电磁马达。目前,在超声波马达技术开发和产品研制方面日本处于世界领先地位,它掌握着世界上大多数压电驱动器的发明专利,而且在照相机、手表、汽车等行业中得到了不同规模的应用。尤其在日本照相机、摄像机产业中,超声马达的应用最为普遍。

3 国内外前沿性研究内容

我国自20世纪90年代初期开始,各大院校及科研院所陆续开展了各类压电陶瓷驱动器的研制工作,其中,最早开展压电陶瓷声马达研究的单位主要

是中国科学院声学研究所和清华大学等为数不多的几家。但随着压电驱动技术、功能陶瓷材料、电子集成技术、计算机技术等方面的飞速发展,仅十年时间,开展压电马达研究的单位就发展到如今的十几家^[3]。

各单位的研究基础、研究内容、研究水平各不相同,在这里不能一一详细地加以介绍,仅根据清华大学材料科学与工程系承担国家“八五”重点攻关项目“压电陶瓷声马达”的工作进展以及部分参考文献,介绍一些有代表性的研究成果以及前沿性研究方向。

3.1 微动超精密压电驱动器

该种驱动器由于具有高刚度、高输出力、高定位精度和很高的分辨率,可以用到超精密机械和纳米检测与操纵器械中,例如,用于精密定位和误差补偿的设备可提高仪器和机械的测量和加工精度。微型机械的发展,需要建立全新的用于微小型零部件精加工的特种加工装置,装置中用于加工的工具以及零部件定位的超精密微动驱动器是必不可少的。德国的Kuleuven的Hendrik Van Brussel研究了高刚度的精密定位压电驱动器用于微电火花加工。美国UCLA大学的Grev P. Carman研制了用于减少直升机螺旋桨振动的微蠕动压电驱动器^[4]。清华大学也对高分辨率压电行波旋转马达的特性进行了系统的研究^[5,6]。这些微动器可以独立成为一种产品,由用户选型自己配套使用。利用上述驱动器可进一步开发用于生物医学、毒物细胞研究的微定位、微装配、微测量等方面的超精密装置。

3.2 微小型压电超声马达

随着微型机械的发展,对精密的具有高力矩输出能力的微小型马达提出了更高的要求。特别是伴随着微型机械、特种加工技术和电子集成技术的发展,需要更多的超精密微小型驱动器。由于压电马达采用的是块状功能陶瓷或陶瓷薄膜,而非电磁马达复杂的线绕式结构,这为其微型化带来极大方便。压电马达具有很高的能量密度,力矩输出是静电马达3个数量级,是电磁马达2个数量级,特别是微小型压电马达不会因为尺寸的减少而降低转换效率,这也为研制大力矩、高效的微小型压电马达提供了可能。国内外微小型压电马达目前主要有四类:表面波压电陶瓷马达、在硅基体上沉积薄膜的压电微马达、在金属上沉积薄膜的压电微马达和陶瓷块体结构的压电微马达。表面波压电马达的外形尺寸一般比较大,因为所激励的表面波具有纳米数量级,所以也将

它归入微型压电声马达的类型。薄膜压电陶瓷马达是在金属基体的表面沉积有压电薄膜的另一类固态微压电马达,这类马达外形尺寸小,日本东京大学 Takeshi MORITA 等人研制的这类压电马达定子直径为 2.4mm,长 10mm,最大转速 650rpm,最大输出力矩 0.22mN·m,输入电压 100V,驱动频率 85kHz^[7]。陶瓷块体结构的压电微马达是这几种类型中输出力矩最大的一类。美国麻省理工学院(MIT)人工智能实验室的 Anita M Flynn 研制的直径 8mm、长 3mm 的行波微压电马达,最大输出力矩为 1mN·m^[8];日本新生工业公司推出的直径 11mm、长 2mm、并将压电陶瓷纵向振动变换成旋转运动的超小型超声波马达,其启动转矩为 70mN·m。

清华大学材料科学与工程系的毫米级压电微马达是针对医学、航天航空、军工等方面研制开发的,原该系的董蜀湘副教授曾在新加坡研制出直径分别为 1.5mm 和 2.2mm 压电微马达,重量分别为 0.3gf 和 0.5gf,分别可以产生大于 45 和 140 μ N·m 的力矩输出,最大转速为 1800r/min。该系褚祥诚博士最新研制的直径 2mm 的压电微马达,采用结构更简单的棒状压电陶瓷实现驱动,有效地降低了研制成本,现产品样机正在不断完善阶段,阶段性成果见文献[9],微马达照片见图 1。

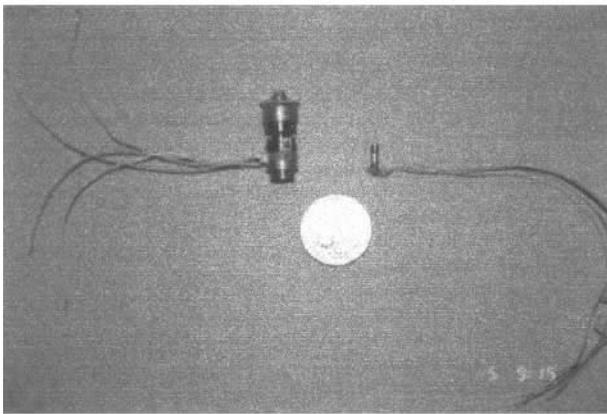


图 1 清华大学的 $\phi 10\text{mm}$ 和 $\phi 2\text{mm}$ 棒状微超声马达

3.3 多自由度压电马达

图 2 是东京农工大学与日本欧姆龙公司研制的球型超声波马达(最大转速 30r/min,最大输出力矩 0.07N·m,定位误差小于 0.3mm)。球马达由两组超声马达驱动,具有两个自由度,可以满足智能机器人机械手臂对柔性驱动器的需求^[10]。

为获得具有更高运动精度的多自由度压电驱动器,清华大学还研制了一种压电效应和电流变效应结合的压电-电流变多自由度平面步进驱动

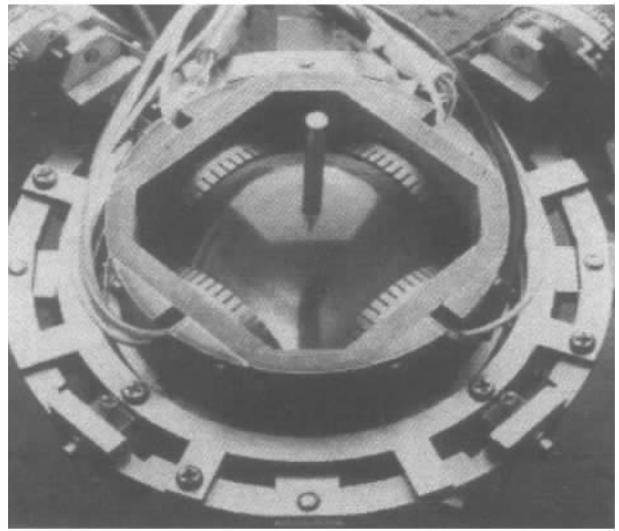


图 2 球型超声波马达



器^[11]。电流变效应是指一种流体在电场的作用下,能瞬间可逆地变为“弱固态”,这种效应可以巧妙地用于压电马达“爬行”中的箝位。研制的驱动器具有四个提供驱动力和产生位移的多层压电驱动器,以及四个用来箝位的电流变箝位器。根据仿生运动模式,箝位器与压电驱动器的不同组合,可实现沿 x 方向或 y 方向的蠕动式步进运动。实验显示,平面步进驱动器在 x 方向或 y 方向都能灵活地运动,并具有大行程和低于 0.5 μ m 的高的分辨率特性,驱动器的最高步进速度为 6mm/min,最大承载能力为 170gf (1gf = 9.8×10^{-3} N)。这种驱动器与普通的压电超声马达相比有独到的特点,例如,无摩擦、无工作噪音、大行程和高分辨率等。目前,这种驱动器的实用化,还有待电流变液体性能的改进。图 3 是这种驱动器的结构外形照片。

3.4 大力矩压电陶瓷超声马达

低速大力矩是压电马达区别于其他类型电机最

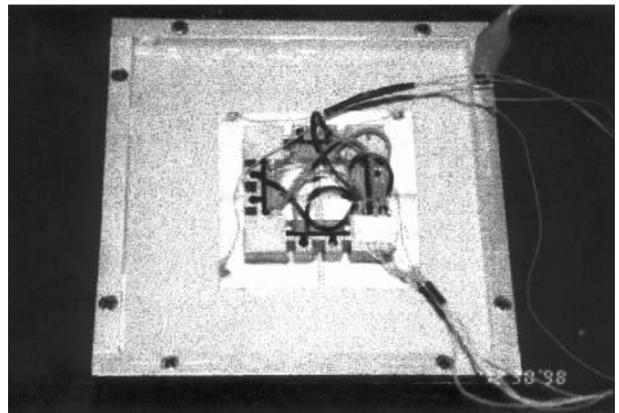


图 3 压电-电流变平面步进马达

显著的特点.美国航空航天局(NASA)与 MIT 自 1994 年开始共同研究用于航天领域的压电超声波马达,并以行波超声马达作为主要的研究对象进行产品开发.1995 年末,NASA 喷气推进实验室首次将超声马达用于飞船外舱壁检查的多功能自动爬行系统上,由于是采用超声马达作为直接驱动器,该系统具有结构紧凑、重量轻、承载重量与自重比达 10:1 的特点.目前,NASA 喷气推进实验室、材料研究室与 MIT 共同研究开发用于火星探测器操作臂关节驱动的大力矩超声马达.为此,MIT 研制出的新一代行波超声马达采用双面陶瓷、双面齿转子和双定子结构^[12].样机性能:转速 40r/min 时力矩达 2N·m,效率大于 40%.

3.5 压电陶瓷及摩擦材料

压电陶瓷声马达中使用的主要材料包括两种:功能陶瓷材料(如压电陶瓷材料、电致伸缩材料等)和摩擦材料.功能陶瓷材料是压电马达的超声振动发生器件和传感反馈器件,而摩擦材料是压电马达输出力矩的传播介质,两者都直接关系到马达的输出特性,所以材料的研究始终是关系到是否能有效地提高压电马达综合性能的重点.韩国的 Jin-Soo KIM 和美国宾州州立大学的 Kenji UCHINO 共同研究了用于压电马达的大功率压电陶瓷材料^[13].他们具体研究了掺杂 Fe_2O_3 的 $0.5\text{Pb}(\text{Sc}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3 - 0.43\text{PbTiO}_3$ 陶瓷材料的压电和介电特性.实验中发现 0.1wt% 和 0.3wt% 的 Fe_2O_3 掺杂量会使压电常数 d_{33} 和机电耦合系数 K_p 略微有所下降,但 0.3wt% 的 Fe_2O_3 掺杂量时机械品质因数 Q_m 会有显著增加,为 297,是不加 Fe_2O_3 掺杂的 4.4 倍. Yamashita 在 $0.575\text{PSN} - 0.425\text{PT}$ 中掺杂 Nb_2O_5 也可以获得 0.69 的机电耦合系数,但 Nb_2O_5 的掺杂会使其他参数有所降低.

德国 Universitat GH Paderborn 的 J. Wallaschek 研究了聚合物和钢、铝和铝在高频微振磨损条件下的摩擦和损耗问题^[14].高频微振条件为:20kHz,4.5—24 μm 宏观滑动:1Hz,1—10mm 的行程.对应行波压电马达研究人员采用了以下一组摩擦材料:PTFE (polytetrafluoroethylene),PTFE + 10% 碳纤维,PI (polyimide),PI + 30% PTFE,PI + 20% 碳纤维,PI + 20% PTFE + 20% 碳纤维材料与标准试件 100Cr6 的高频摩擦和磨损行为进行了深入研究.以往关于压电马达磨损、负载、振幅等微振磨损特性的研究,国内外绝大多数是在频率 1—100Hz 的条件下进行测试的.

但在压电马达高频($f > 15\text{kHz}$)工作环境下,这种低频测试结果与实际情况有很大差别.现在还没有商业化的高频条件下测试摩擦相关参数的产品,国外还没有报道在完全与行波压电马达相同工作环境条件下对摩擦行为能进行详细测试的装置,研究人员多数是在近似相仿的条件下进行的实验研究. J. Wallaschek 的研究表明:PI 基体材料具有高的机械强度和热抗能力,而 PI + 30% PTFE 和 PI + 20% PTFE + 20% 碳纤维的材料磨损小而且稳定.其中组分 PTFE 在摩擦材料中起到润滑剂、稳定剂的作用,而碳纤维组分则起到抗磨损的作用.

清华大学材料科学与工程系为压电马达制备了三种不同压电特性、物理特性的低烧压电陶瓷材料:铌镁-铌钼-钨钛酸铅、铌镁-铌镍-钨钛酸铅和二氧化锰添加改性的铌镁-铌镍-钨钛酸铅.材料各项性能指标已达到国际领先水平^[15].目前,有关摩擦材料的稳定性、耐磨性研究也取得阶段性研究成果^[16].除此之外,清华大学材料科学与工程系也正在研究压电马达表面镀层减磨与噪音抑制技术.

3.6 压电陶瓷超声马达应用开发

在美国,超声马达的研究多数得到军方和政府的支持,应用目标多数是减震及主动控制,空间和军用装备.在超声马达研究上,美国正奋起直追,试图超过日本.他们正试图开发一类压电驱动器,用于计算机的光盘、硬盘和软盘驱动.其中 Allied Signal Aerospace 公司已生产旋转型超声马达供给美国军方使用,Anorad 公司已生产直线压电驱动器用于信息产业.

压电驱动器与超声马达无论是在空间和军用技术或在办公自动化、汽车工业、精密机械等消费类产品中都展现了广阔的应用前景.这其中最成功的是日本照相机的自动聚焦系统.清华大学材料科学与工程系经过多年的努力,研制出可用于照相机的直径为 10mm 的压电超声微马达,其结构外形见图 1.该类型的样机机械部分已经可以替代日本佳能公司用于单反相机电子镜头聚焦系统中的原装压电马达,且聚焦性能良好.表 1 给出了该超声马达的尺寸与性能参数.

表 1 压电超声微马达的尺寸与性能参数

定子直径	$\phi 10\text{mm}$	马达长度	25mm
启动力矩	$> 60\text{gf}\cdot\text{cm}$	最大转速	600r/min
重量	11gf	平均效率	$> 6.5\%$
驱动电压	6V	品质因数	> 300

图 4 是清华材料科学与工程系用压电微马达驱

动的二维微动平台结构^[17]。微动平台由可以相对移动的带中心通孔的上下板、一组拉力弹簧、两个微调旋钮、支撑滚珠和两个压电微马达构成。两个微马达通过轴直接驱动两个微调旋钮来驱动控制二维微动平台。该平台经清华大学电子工程系在新型激光器的应用研究中获得了很好的实验结果。



图4 清华大学的压电超声马达控制的二维微动平台

3.7 理论建模

作为一种新概念驱动器的初级发展阶段,近十多年来超声马达的发展可以说是迅速和卓有成效的。但不可否认,这期间的研究基本上是一种以功能实现为主要目标的定性的实验研究与开发。对于超声马达的量化理论模型的研究虽然取得了一些初步成果^[18],但由于超声马达是一多学科交叉的新的研究对象,这就注定了超声马达理论模型建立的复杂性和长期性。目前,要使超声马达的各项性能指标取得更大的进展,必须以完善的数学模型为理论基础。

4 压电陶瓷马达应用领域广阔

压电超声马达本身具有低速下大力矩输出、响应快、控制性能好、可步进、伺服控制,容易同计算机接口,实现智能化和机电一体化,无电磁干扰和抗磁干扰等特点,用于步进驱动可获得纳米量级的精度,用于微型化还可以获得小于毫米的限度,用于微型机器人驱动又具有低速下力矩较大的优点,这些都是电磁马达所无法相比的。可见该类型的马达具有很好的应用前景,可望应用推广的场合包括:

(1) 航空、航天领域。该领域对系统的尺寸和重量都有很高的要求,同时,系统还要适应太空环境高真空、极端温度、强辐射等恶劣条件。为防止机械系统在真空和失重条件下工作时产生的反作用力,空

间机械装置一般在低速下工作,这使得太空中运动机构的有效润滑非常困难。而压电超声波马达的使用可在有效地减轻系统重量的同时,实现直接驱动。例如,美国 Galileo 航天器上的滤色盘(filter wheel)由于使用超声马达作为直接驱动器,使整体体积减小了4倍。

(2) 精加工设备的进给机构。选择合适类型的直线压电步进驱动器或电致伸缩驱动器,可以实现高分辨率、大行程、高刚度、快速响应的直线进给。美国康乃狄格大学研制了用于钻石精加工设备的超声波直线马达,其性能为行程300mm,分辨率5nm,刚度 $90\text{N}/\mu\text{m}$,移动速度1.6mm/s。

(3) 汽车行业。小功率马达在汽车上应用广泛,如车门的玻璃升降,刮雨器,靠背调整机构等。据统计,普通轿车需要小功率马达约30—40个,高级轿车需要50—60个,豪华轿车需要马达数在70—80个以上。

(4) 精密仪器或医疗器械。许多科学仪器、医疗器械会产生强磁场或对电磁干扰有严格要求,普通电磁马达不能适合此要求,而采用超声马达就可避免这些问题。目前,超声马达已经在XY绘图仪、精密手表、照相机自动聚焦系统、CD光盘磁头自动定位装置等方面得到应用。

(5) 机器人关节驱动。用超声马达作为机器人的关节驱动器,可将关节的固定部分和运动部分分别与超声马达的定、转子作为一体,从而使整个机构非常紧凑,并且可在中空型超声马达中间走线或安放传感器等检测元件。

(6) 办公自动化设备。超声马达可消除使用普通电磁马达所带来的电磁噪声和减速机构的噪声,目前在东京一些新建高楼上已装上成千上万个超声马达,用于升降窗帘。

(7) 微型机械。微型马达是微型机械的核心部分,在一定程度上成为微型机械发展水平的重要标志。由于电磁马达需要线圈有磁饱和特性,低速运转时需要齿轮箱,最小的电磁马达只能做到毫米级,这些都限制着它在微型机械上的应用。而超声马达结构简单,设计灵活、紧凑,不存在任何限制微型化发展的因素,可以做得很小,理论上可达昆虫级。

其他方面应用还包括:军事工业(如:核弹头保护装置、导弹羽翼自动调节机构、军用望远镜光路开关、武器装备的自动瞄准系统与目标跟踪、军事侦察用微型机械虫和微型直升机驱动等);生产加工行业(如:直线超声马达用于半导体加工业,直线、旋转超

声马达用于电火花加工业等),计算机行业(如:针式打印机的打印头等);医疗器械行业;量具业;电动自行车行业等方面。

现在,由于压电马达的某些特点以及比较高的成本,还难以与传统电磁马达相比。但对于小尺寸压电马达、低速大力矩的应用场合以及某些电磁马达无法使用的场合,目前压电马达还是具有一定市场潜力的。考虑到压电马达低速大力矩、静音操作特性、结构设计灵活的特点,环形压电马达可用于楼宇百叶窗的电动控制,板形压电马达可用于电视摄像机的扫描旋转控制。利用压电马达具有电磁辐射小、而且不受电磁干扰的特点,可用于核磁共振仪器的旋转扫描机构中。高档轿车上马达的数量在70个以上,如果采用压电马达实现驱动,可以采用一个电源驱动,可有效降低采用压电马达的成本。

5 需要解决的问题

为了更有效地推动国内超声马达相关技术的发展,促进早日实现超声马达产业化的目标,我们提出进一步在以下几方面开展深入的研究:

(1)根据市场的需求,目前需要加强对具有微小体积、大力矩输出、高精度步进特性的超声马达的研制。如:微马达制作的工艺过程、微装配、微观实验测试及其驱动理论研究;大力矩马达的新机理、结构优化、大功率薄压电陶瓷片以及驱动波形优化等问题的研究;高精度超声马达的新机理、启动和制动特性、频率跟踪等方面的研究。

(2)需要建立完整的超声马达的数学建模。由于超声马达所用陶瓷材料的各向异性、定子振动的高度非线性、非规则接触齿的存在、定转子间高频振动接触等难点问题的存在,国内外尚无系统的理论来指导压电陶瓷马达的结构设计和特性预测,尤其是对压电马达定、转子间微观接触行为还没有给出准确的理论解释。

(3)需要重点从提高摩擦材料的耐磨性和稳定性,提高压电陶瓷材料综合性能指标和改进其制备工艺,研制具有高稳定性反馈跟踪电源这三方面入手来提高马达的综合性能。

(4)国内研究单位多数重视新型马达的研制,而忽视超声马达实验测试部分的研究。而有些问题,如摩擦材料耐磨性和稳定性、高频摩擦导致的温升、马达效率和负载特性等与马达实用直接相关的技术,需要通过实验来发现问题和解决问题。

(5)超声马达实用技术的开发。国外在20世纪90年代初开始有商品化的超声马达及其应用产品,如照相机的自动聚焦系统、XY绘图仪、直角坐标自动定位装置、机动车辆刮水器等。近两年,国内如清华大学材料科学与工程系、南京航空航天大学等单位也在初步尝试开发实用化的产品。但由于超声马达还难以做到像传统电磁马达那样低的成本,驱动电源的集成度不高,频率跟踪效果不佳,摩擦材料稳定性不够以及对口单位多以追求短期经济效益为目标而难以大力扶持压电马达技术的发展,所以国内超声马达产业化步伐还是比较慢。为提高超声马达与不同电机的竞争能力,还是应该充分发挥其自身的特点,寻找与其相匹配的使用场合。

参 考 文 献

- [1] Kenji Uchino. Smart Mater. Struct. ,1998 7
- [2] Ueha S ,Tomikawa Y *et al.* Ultrasonic Motors Theory and Applications. Oxford :Oxford University Press ,1991
- [3] 褚祥诚.哈尔滨工业大学工学博士论文.1999[Chu X C. Harbin Institute of Technology Doctoral Thesis. 1999(in Chinese)]
- [4] Chen Q F ,Yao D J ,Kim C-J *et al.* Sensors and Actuators ,1999 , 73 :30
- [5] 董蜀湘,李龙土等.声学学报,1997,22:217 [Dong S X ,Li L T *et al.* Chinese Acta Acustica ,1997,22:217]
- [6] 董蜀湘,魏晓勇,李龙土等.声学学报,1997,22:494 [Dong S X ,Wei X Y ,Li L T *et al.* Chinese ACTA Acustica ,1997,22:494 (in Chinese)]
- [7] Takeshi Morita ,Minoru Kuribayashi *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. , 1999,38:3347
- [8] Anita M Flynn. Smart Mater. Struct. ,1998 7:286
- [9] 褚祥诚,阎立,董蜀湘等.压电与声光,2001,23:103 [Chu X C ,Yan L ,Dong S X *et al.* Piezoelectrics & Acoustooptics ,2001,23:103 (in Chinese)]
- [10] 远山茂.精密工学会,1995:61
- [11] 董蜀湘,王树昕等.中国发明专利,97112474.4,1997 [Dong S X ,Wang S X *et al.* Chinese Invention Patent ,97112474.4,1997 (in Chinese)]
- [12] Glenn Timothy S ,Hagood Nesbitt W. SPIE ,1997
- [13] Jin-Soo Kim ,So-Jung Kim ,Ho-Gi Kim *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. , 1999,38:1433
- [14] Rehbein P J. Wallaschek. Wear. ,1998 216:97
- [15] Gui Zhilun *et al.* Ferroelectrics ,1990,101:93
- [16] 龚文.清华大学毕业设计论文.2001. [Gong W. Tsinghua University Graduation Thesis. 2001. (in Chinese)]
- [17] 董蜀湘,邱海波等.中国发明专利,97111802.7,1997 [Dong S X ,Qiu H B *et al.* Chinese Invention Patent ,97111802.7,1997 (in Chinese)]
- [18] Chu X C ,Chen Z L ,Xie T *et al.* Chinese Journal of Acoustics , 1999,18:327