

面向 21 世纪的超声电机技术

赵淳生

(南京航空航天大学 超声电机研究中心, 南京 210016)

[摘要] 叙述了新型微特电机——超声电机的特点, 回顾了 20 世纪末期超声电机的发展和应用情况, 介绍了南京航空航天大学超声电机研究中心在超声电机研究方面的进展, 预测了 21 世纪国内外市场对超声电机技术的需求, 列举了超声电机技术在我国国防和国民经济各部门的应用前景, 指出了超声电机技术的发展趋势, 针对我国超声电机技术开发和研究的现状, 提出了为发展我国超声电机技术亟需解决的若干关键问题。

[关键词] 超声电机; 压电陶瓷; 摩擦材料

[中图分类号] TM359.9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)02-0086-06

1 引言

现代微特电机技术融合了电机、计算机、电力电子、自动控制、精密机械、新材料和新工艺等多种高新技术, 是现代武器装备自动化、工业自动化、办公自动化和家庭生活自动化不可缺少的重要技术。传统电机的发明和发展已有 100 多年的历史, 无论在理论上、设计方法上还是制造技术上, 都达到了十分完善的程度。由于它的工作原理和结构的限制, 难以满足当前宇宙飞船、人造卫星、飞机和运载火箭等国防产品以及其他电子设备、精密仪器等对电机进一步提出的短、小、薄、低噪声、无电磁干扰等要求。为此, 世界各国都在探索其他新型微特电机, 如静电电机、超声电机、仿生电机、光热电机、形状记忆合金电机和微波电机等等。其中, 超声电机是较为适用的一种。

超声电机 (ultrasonic motor, 缩写 USM) 是利用压电材料的逆压电效应, 使弹性体 (定子) 在超声频段产生微观机械振动 (振动频率在 20 kHz 以上), 通过定子和转子 (或动子) 之间的摩擦作用, 将定子的微观振动转换成转子 (或动子) 的宏观的单方向转动 (或直线运动)。它打破了由电磁效应获得转速和转矩的传统电机的概念。

超声电机与传统电机相比, 具有以下特点: 结

构简单、紧凑、转矩/质量比大 (是传统电机的 3~10 倍); 低速大扭矩, 无需齿轮减速机构, 可实现直接驱动; 响应快 (毫秒级); 断电自锁; 在闭环条件下速度和位置控制好, 分辨率高; 不产生磁场, 不受外界磁场干扰; 容易做成直线型超声电机; 形状可以多样化 (圆的、方的、空心的、杆状的), 等等。因此, 超声电机技术在 20 世纪末期得到迅速发展, 并在航空航天、机器人、汽车、精密定位仪、微型机械等领域得到成功的应用^[1~6]。

2 超声电机技术的发展和应

1973 年, 美国 IBM 公司的 H. V. Bath 博士首先研制成功原理性超声电机。与此同时, 前苏联的 V. V. Lavrinenko 等人也研制出几乎与 Bath 相同的原理性超声电机。80 年代, 日本以指田年生为代表的一批学者致力于将美、苏的原理性样机开发成实用性超声电机。到 80 年代末 90 年代初, 日本的超声电机开始进入商业应用。

超声电机技术在 20 世纪末期发展和应用中, 日本一直处于世界领先地位。它掌握着世界上大多数超声电机技术的发明专利, 几乎各知名大学和许多公司都对超声电机进行了研究和生产^[4]。其中 Canon 公司投入了近 10 亿日元建了一条超声电机自动化生产线, 每月能生产超声电机 20~40 万台。

[收稿日期] 2001-08-10; **修回日期** 2001-09-21

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (59775048)

[作者简介] 赵淳生 (1938-), 男, 湖南衡山县人, 法国工程力学博士, 南京航空航天大学教授, 博士生导师

它所生产的超声电机在照相机自动聚焦系统、手表、汽车、机器人、核磁共振仪、电动窗帘以及卡片传输机等产品上都得到了成功的应用。图 1 为日本 Canon 公司装有环形行波超声电机的照相机。该相机聚焦系统结构简单，聚焦快，噪声小。Canon 公司已有 37 种照相机聚焦镜头应用了超声电机。Nikon, Olympus 等公司的照相机也在逐步应用超声电机。

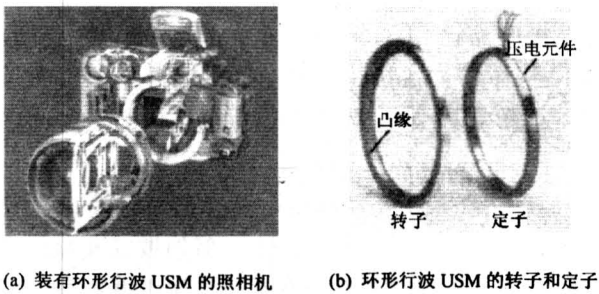


图 1 USM 应用于照相机自动聚焦系统

Fig.1 Application of USM in a camera auto-focusing system

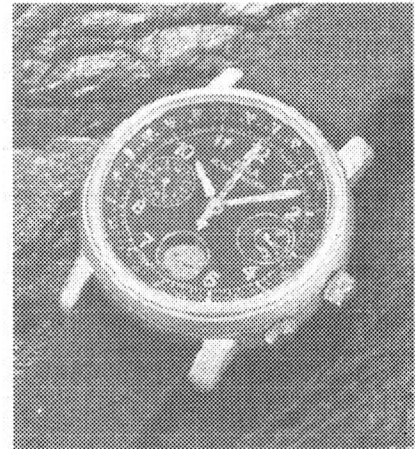
日本 Seiko 公司研制出 $\phi 8\text{ mm}$ 、厚度 4.5 mm 和 $\phi 4.5\text{ mm}$ 、厚度 2.5 mm 的两种小型超声电机，分别用作手表日历驱动和振动报时，见图 2。

由于超声电机能减轻机器人质量，简化结构，提高响应速度，世界各国都正在把超声电机用于机器人。图 3 (a) 为 Seiko 公司将两个小型超声电机用于昆虫机器人。该机器人在日本精密工程学会 (Japan Society for Precision Engineering) 举行的微型机器人竞赛中，连续三次获胜。图 3 (b) 为日本山形大学将超声电机应用于光控的爬行机器人。日本丰田公司还在某些豪华轿车上，用超声电机来操纵反光镜和座椅靠头，如图 4 所示。美国、德国、法国、英国等不甘落后，在 20 世纪末期都投入了大批人力、物力开发超声电机，努力追赶日本。特别是美国，仅 Pennsylvania 州立大学在 1994 ~ 1998 年就投入 1.5 亿美元专门从事压电材料和超声电机研究。事实上，最近几年美国在宇宙飞船、火星探测器、运载火箭、核弹头等航空航天工程中陆续应用了超声电机。

图 5 为美国喷气推进实验室 (JPL) 和麻省理工学院 (MIT) 联合研制的超声电机应用于火星探测微着陆器。该电机的扭矩达 $2.8\text{ N}\cdot\text{m}$ ，使用最



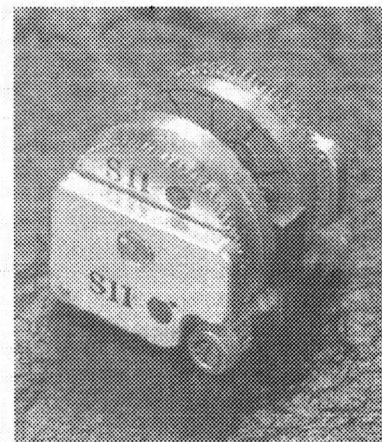
(a) USM 用于日历驱动



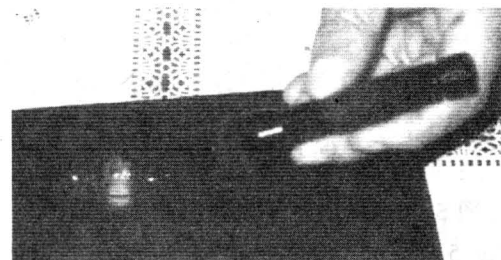
(b) USM 用于振动报时

图 2 用于手表的小型 USM

Fig.2 Application of the mini USM to watches



(a) 昆虫机器人



(b) 爬行机器人

图 3 USM 应用于机器人

Fig.3 Application of USM to robots

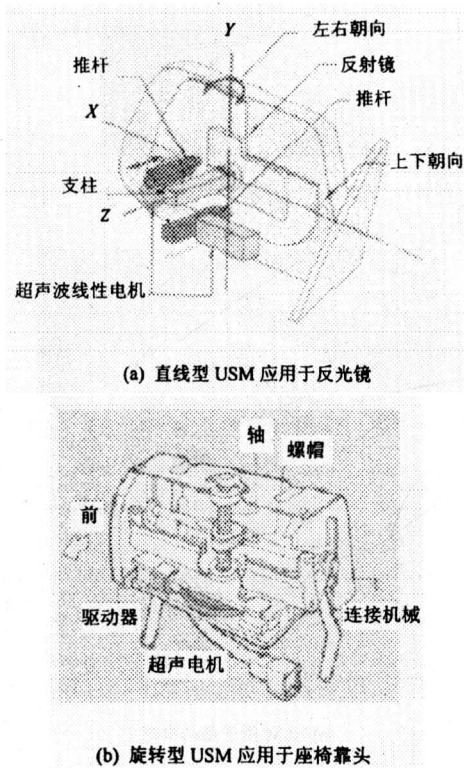


图4 USM用于某些轿车上

Fig.4 Application of USM in some cars

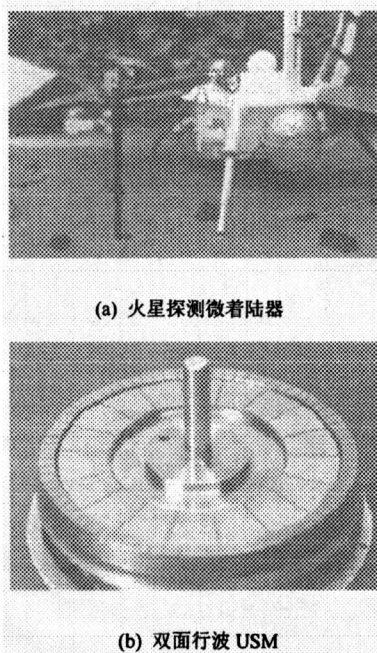


图5 USM应用于火星探测微着陆器

Fig.5 Application of USM to micro lander for Mars exploration

低温度达 -100°C ，比用传统的电机减轻质量30%。美国 NASA 的 Coddar Space Flight Center 将超声电机应用于空间机器人技术。其中微型机械手 MicroArm I 使用了扭矩 $0.05\text{ N}\cdot\text{m}$ 的超声电机。火星机械手 MarsArm II 使用了三个扭矩为 $0.68\text{ N}\cdot\text{m}$ 和一个扭矩为 $0.11\text{ N}\cdot\text{m}$ 的超声电机。它们比使用同等功能的传统电机轻 40%。在德国，University of Paderborn 和 Darmstadt University of Technology 在研究超声电机，且 GmbH 公司的超声电机产品已用于奔驰汽车自动窗门。在英国，University of Cambridge 工程系对超声电机进行了研究和开发，EMS 公司已开始小批量生产。在法国，Besancon University 和 University of Franche Come 也在研究和开发超声电机，但目前尚未见到有关产品报道。意大利、瑞士、新加坡以及韩国等国的名牌大学都有人在研究和开发超声电机技术。

我国超声电机研究是从 20 世纪 90 年代开始的，其中清华大学、哈尔滨工业大学、吉林工业大学、浙江大学先后开展了超声电机的研究并研制出一些原理性样机。近几年又相继开展了大扭矩、小型和特种超声电机的研究，取得了不少研究成果，但到目前为止，尚未进入商业应用。

笔者于 1992—1994 年在 MIT 时，曾参与了该校航空航天系和计算机与电子工程系的超声电机研究工作。为了发展我国自己的超声电机技术，1994 年回到了祖国。1995 年春组织了以博士后、博士生及硕士生为主体的课题组，在南京航空航天大学开始了超声电机的研究工作。1995 年底研制成功首台实际能运行的环形行波超声电机，并于 1996 年 1 月通过中国航空总公司的技术鉴定，获得 1996 年度江苏省国防科技进步二等奖。此后，除了对它进行多次改进并应用于遥控电动窗帘外，又研制了 10 多种旋转型超声电机和直线型超声电机，其中 TRUM 系列旋转型超声电机已接近国际同类产品水平，如图 6 所示。最近又圆满完成了某国防部门急需的环形行波超声电机及其驱动、控制电源，如图 7 所示。1998 年以来，在超声电机技术领域，笔者和所指导的研究生已申请了 10 项中国专利：6 项发明专利和 4 项实用新型专利。课题组围绕产品开发，开展了一系列基础性研究工作，包括超声电机的运动机理、优化设计、计算机仿真以及实验研究等等，取得一系列的研究成果，在国内外杂志和会议上发表文章 80 多篇。研究过程获得

江苏省科技计划基金、航空科学基金（5 项），“八六三”高技术发展计划、中国博士点基金、国家自然科学基金（4 项）的支持和资助。为了集中人力、物力投入超声电机的研究，南京航空航天大学 1997 年底率先在国内成立了超声电机研究中心。该研究中心曾受国家自然科学基金委的委托，于 1999 年 5 月 3 日~4 日在南京航空航天大学主持召

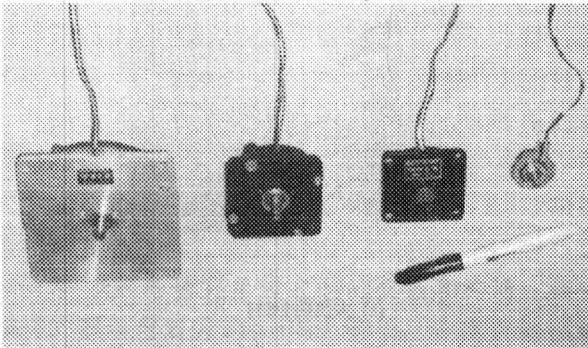


图 6 TRUM 系列旋转型 USM

Fig.6 A TRUM series of a rotary type of USM

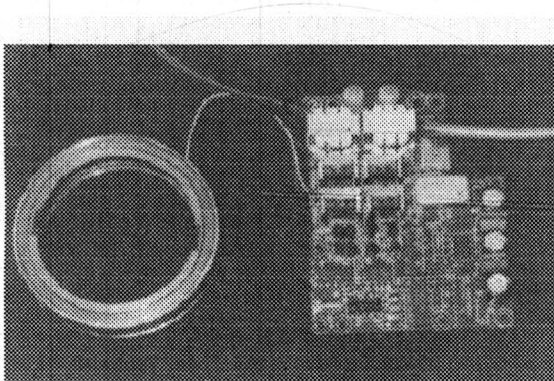


图 7 环形 USM 及其驱动、控制电源

Fig.7 A ring-shaped USM with a drive and control electrical source

开了我国首次超声电机技术研讨会，来自全国 30 多个单位的 70 多名代表聚集一堂，交流研究成果，共商我国发展超声电机技术策略。此次会议对我国超声电机的进一步发展具有深远的意义。为了把科研成果及早地转化为生产力，在江苏省政府支持下，南京航空航天大学和常州微特电机总厂于 2000 年底共同成立了“江苏省超声电机工程研究中心”。它将瞄准 21 世纪我国国民经济各个领域对超声电机技术的需求，发展拥有我国自主知识产权的超声电机技术，开拓我国的超声电机新产业。

3 21 世纪对超声电机技术的需求

有关专家预言：21 世纪将是超声电机在全世界广泛应用的年代，它将部分取代微、小型传统的电磁电机。据有关方面透露：美国政府正在实施一项研究和生产计划，要在最近几年内，使美国的超声电机年产量达到 10 亿台以上，赶上并超过日本，获得 1 000 亿美元的市场。

可以预计，为了发展我国人造卫星、运载火箭、飞机、机器人、微型机械、汽车、磁悬浮列车以及其他精密仪器，也将需要大量的、高性能的超声电机。例如：

1) 21 世纪，国防工业是我国重点发展的领域之一，从国外情况看，它一定会应用超声电机，如纳米卫星、微型飞机、宇宙飞船和空间探测器等，应用超声电机可减轻飞行器质量，增强可控性；

2) 机器人和微型机械也是我国 21 世纪重点发展的领域；超声电机可使机器人和微型机器简化结构，减轻质量，增强其可控性；

3) 随着超声电机的微型化，它可进入人体，如作为人造心脏的驱动器；这将会大大推动 21 世纪我国人造器官的产业化进程；

4) 21 世纪，我国将要大力发展磁悬浮列车，磁悬浮列车上的强磁场干扰，使得在磁悬浮列车上的传统的电磁电机工作有可能失效，超声电机这时大有可为；

5) 未来豪华轿车上的电机可多达 80 个；采用传统电机将使汽车体积增加，电磁干扰增强；应用超声电机，由于不需齿轮箱，从而大大降低了体积；由于超声电机不产生磁场，使汽车的电磁兼容性得到大大改善；

6) 随着掌上电脑、可视电话、手提式仪器等的发展，微型（直线型和旋转型）超声电机将会得到广泛应用；超声电机将减小这些微型仪器的质量和体积，减少能量损耗；

7) 超声电机的位置控制精度可达微米级甚至纳米级，因此，超声电机将会在一些精密仪器、医疗设备以及半导体制造技术中得到广泛应用。

4 面向 21 世纪的超声电机技术

超声电机技术虽然经过 20 多年的潜心研究和开发，但还存在一些问题：

1) 超声电机理论和设计方法还不成熟，特别

是由于它靠摩擦传递功率，故运行效率较低，只有 10%~40%，而传统电机可达 80% 以上；

2) 由于超声电机靠定子和转子间摩擦传递功率，接触面间磨损严重，致使寿命较短，目前只有 1 000~5 000 h，多用于间隙工作的场合；

3) 输出功率还不小，目前实际应用的只能达 10 W 左右；

4) 超声电机的可靠性和对各种环境（如高温、低温、真空等）的适应性，还有待研究；

5) 超声电机作为自动控制系统的作动器，其动态特性有待深入研究。

针对这些问题，世界各国正在从理论模型、优化设计、制造工艺、实验技术和新材料等方面作深入探讨。图 8 为笔者于 1998 年访问日本东京工业大学时，亲眼看到的该校精密工学研究所对直线型超声电机进行负载耐久试验的情况。此外，世界各国还在不断开发新型的超声电机——大扭矩的超声电机、微型超声电机、非接触式（不通过摩擦作用传递扭矩）超声电机以及多自由度（围绕多个轴旋转）超声电机，等等。如日本东京工业大学最近研制出扭矩达 $40 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、转速为 $6 \text{ r}/\text{min}$ 的纵-扭原型超声电机，见图 9 (a)。新加坡国立大学研制出直径为 1.5 mm 、扭矩为 $45 \mu\text{N}\cdot\text{m}$ 、转速达 $1\,500 \text{ r}/\text{min}$ 的微型超声电机，见图 9 (b)。

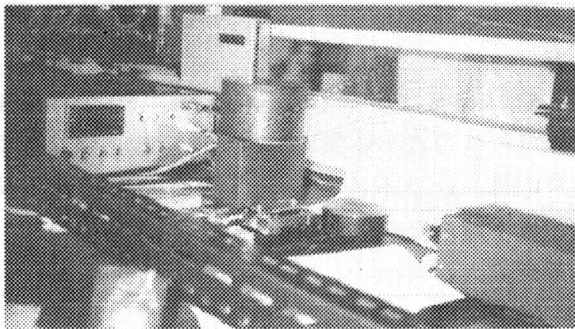
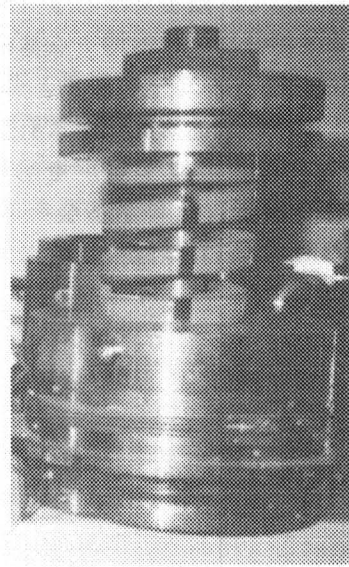


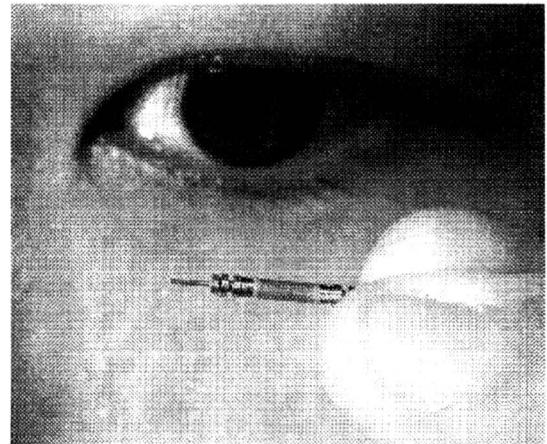
图 8 对直线型 USM 进行负载耐久试验

Fig. 8 Durance test with load of a linear USM

值得注意的是：现代的计算机软盘、光盘和硬盘驱动器中所需要的直线运动，都采用旋转型传统电机通过齿轮机构将旋转运动转换为直线运动。在这样的传动系统中，要使机构进一步小型化和提高运动精度是十分困难的。改用直线型超声电机，不需要齿轮机构，可以使传动系统变小、变薄。此外，直线型超声电机具有快速响应（启动和停止响



(a) 大扭矩 USM



(b) 微型 USM

图 9 大扭矩 USM 和微型 USM

Fig. 9 An USM with mega torsion and a micro-USM

应时间为毫秒级)、很高的位置分辨率（达纳米级）以及低振动、低噪声等特点。毫无疑问，21 世纪人们将会把直线型超声电机逐步引入信息产业。据悉，美国人为了发展空间的反导弹、反卫星及情报侦察系统，近几年将发展 100 个以上的纳米卫星（质量 $7\sim 8 \text{ kg}$ ）。这种纳米卫星的核心技术之一是微机械和微传感系统，包括微传感/遥感器、微陀螺、微驱动系统。为此，美国将在 21 世纪加倍发展微型超声电机（直径仅 $1\sim 2 \text{ mm}$ ）。

我国面对超声电机技术与国际水平的差距，面对 21 世纪世界各国蓬勃发展的超声电机技术，面

对加入 WTO，是消极等待若干年后应用别国的超声电机技术，还是把握现在，积极发展有我国自主知识产权的超声电机技术？参加首次全国超声电机技术研讨会的代表们响亮地回答：应当是后者，因为“世界上有些先进技术是买不来的”。为此，笔者认为应从下列几方面着手：

1) 建议有关部门在近期大幅度增加对超声电机技术研究和开发的投资力度；许多从事超声电机技术研究的单位，经费严重缺乏，研究力量（人力、设备）十分单薄，无法保证基本的研究条件；

2) 压电陶瓷和摩擦材料是超声电机所需的关键材料，国内目前生产的这两种材料的性能尚不能完全满足超声电机的要求，建议有关部门迅速组织专门研究单位研究这些材料；

3) 加强各研究单位之间的交流和沟通，集中精力，避免重复劳动；1999 年 5 月在南京航空航天大学召开过首次全国超声电机技术研讨会，建议这种交流形式经常化、固定化；

4) 目前光有一些高等学校和研究所研究和开发超声电机技术，而没有人或单位把这些技术转化为生产力；有必要形成产、学、研一体化的超声电机产业化基地；

5) 积极开展超声电机长寿命、高可靠性设计和先进制造技术的研究；

6) 在深入研究超声电机理论、制造技术和材料的基础上，进行大量的实验研究，包括：超声电机各种性能试验、超声电机寿命试验、可靠性试验

和环境（高温、低温、湿度和真空）试验等等；

7) 发展新型超声电机技术，包括新型超声电机运动机理，新的模态变换方法以及研制大功率超声电机、微型超声电机、直线型超声电机和非接触式超声电机等等。

只要抓住机遇，加倍努力，踏踏实实地解决以上几个问题，我国自己的超声电机技术就一定能够得到迅速发展，缩小与国外超声电机技术的差距，进而赶上世界超声电机技术发展的步伐，研制出我国自己的高性能的超声电机，开拓国内超声电机技术应用市场，继而打入国际市场。

参考文献

- [1] 赵淳生. 超声电机的发展与应用[J]. 测控技术, 1996, 15(3): 1~3
- [2] 赵淳生, 熊振华. 国内压电超声马达研究的现状与应用[J]. 振动、测试与诊断, 1997, 17(2): 1~7
- [3] 赵淳生, 陈启东. 微型机械的特点、研究现状和应用[J]. 振动、测试与诊断, 1998, 18(1): 8~15
- [4] 赵淳生, 李朝东. 日本超声电机的产业化、应用和发展[J]. 振动、测试与诊断, 1999, 19(1): 2~7
- [5] 赵淳生. 微小型压电超声马达的发展及其在航天领域中的应用前景[A]. 微小卫星应用微小型技术讨论会论文集[C]. 北京, 1997. 289~295
- [6] 赵淳生. 微型机械的发展及其在诊断过程中的应用[A]. 第一届全国诊断工程技术学术会议论文集[C]. 武汉, 1998. 61~66
- [7] Uchino K. Piezoelectric actuators and ultrasonic motors [M]. Kluwer Academic Publisher, 1997. 10~11

Ultrasonic Motor Techniques for 21st Century

Zhao Chunsheng

(Research Center of Ultrasonic Motors, NUAA, Nanjing 210016, China)

[Abstract] Firstly, a review of the development and applications of the ultrasonic motor techniques since the seventies of the last century, both at home and abroad is outlined, and a presentation of progress in the research on the techniques in the Research Center of Ultrasonic Motors of NUAA is summarized. Secondly, the author predicts that a great and growing market for the motors will be found in the 21st century, and the techniques will have a good future of applications in the building of national defense and economy. Finally, the trend of the development of the motor in the 21st century is pointed out. According to the actual condition of the studies for the techniques in China, some key problems, which are urgent for further development of the technologies in the new century, are proposed in the paper.

[Key words] ultrasonic motor; piezoelectric ceramics; friction materials