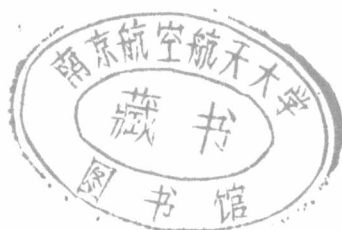


系 —



目 录

一〇三教研室(61篇)下

日本超声电机的产业化、应用和发展	赵淳生等 J
A New Type of Self - Correction Ultrasonic Motor Using Standing Wave ...	赵淳生等
一种单元谐波平衡法	韩景龙等 H
压电阻尼主动控制中局部应变的电路补偿及其参数识别	姚 军等 H
弯扭耦合型驻波超声马达定子的研究	刘 剑等 H
一种新的超声马达相位控制技术	魏守水等 H
Study on Dynamic Characteristics of Piezoelectric Ultrasonic	
Motor's Stator	金 龙等
基于阶跃响应的环形行波式超声马达特性测量	杨 明等 H
环形行波式超声马达解析模型的仿真与实验研究	杨 明等 H
考虑预压力的纵 - 扭单 - 模态超声电机的结构动力学设计方法 ...	孙合明等 H
纵 - 扭复合型压电超声电机最佳预压力的确定方法	孙合明等 H
薄型径向驱动超声马达的结构设计与材料选择	郭 辉等 H
驻波型自校正超声电机的研究	王桂芹等 H
Research on A Kind of Self - Correction Ultrasonic Motor Using Standing	
Waves	王桂芹等
新型驻波自校正超声电机	王桂芹等 H
The characteristics of hybrid transducer type linear ultrasonic motor with	
large thrust and large stroke	李朝东等
复合振子型大推力大行程直线超声电机特性研究	李朝东等 H
Intelligent system of condition Monitoring and Fault Diagnosis for	
Power Plant	韩西京等
超声马达的驱动与控制技术研究进展	韩西京等 J
超声马达的等效电路及其性能估算	韩西京等 H



利用非轴对称振动模态的压电超声电机研究	韩西京等 H
Study on a New Thin Type Ultrasonic Motor	韩西京等
动载荷识别的时间有限元理论及其工程应用	张方 朱德懋等
结构系统的动力学与控制	朱德懋
非确定结构系统区间分析的直接优化法	陈怀海 H
仅用响应数据进行随机模型模态参数识别	陈怀海等 H
平稳噪声背景下周期信号基频初相位检测	余建航等 J
周期测量误差对周期信号相位谱的影响	余建航等 J
周期测量误差对周期信号时域平均处理结果的影响	余建航等 H
利用响应自相关函数的 ARMA 模型模态识别法	郑 敏等 H
从互相关函数中提取模态参数的复指数法	郑 敏等 H
确定声源频率和位置的超分辨阵列处理方法	俞 靖等 H
确定相干机器多噪声源位置的方法研究	俞 靖等 H
未知噪声背景下多声源方位角的估计方法	俞 靖等 H
振动环境试验失败原因分析及其对策	徐庆华等 H
用力传感器测量位移和加速度的方法	徐庆华 H
Optimal Placement of Actuators and Sensors for Vibration Active Control ...	刘福强等
一种改进的特征系统实现算法及在智能结构中的应用	刘福强等 H
振动控制中传感器优化配置的频域方法及在智能结构中的应用 ...	刘福强等 H
大跨径斜拉桥相似模型结构动态特性试验的分离模态法	张令弥等 J

◀专家论坛▶

日本超声电机的产业化、应用和发展

赵淳生 李朝东

(南京航空航天大学超声电机研究中心 南京, 210016)

摘要 叙述了日本超声电机的产业化现状、应用研究和新型超声电机的发展情况。大量实例充分证明:日本超声电机技术处于世界的前列。在这个技术领域,我国与日本尚有很大的差距。文中分析了产生这个差距的原因,并提出了迅速地缩小这个差距的有效途径。最后总结出我国必须努力跟上世界超声电机技术的发展步伐,并且要在短期内达到与日本超声电机技术相同的水平的结论。

关键词 超声电机 直线电机 产业化 日本
中图分类号 TM356 TM359.6

引言

1998年10月笔者出席了日本仙台市召开的1998IEEE国际超声学会议,发表了题为“使用棒形振子纵向和弯曲模态的大推力直线型超声电机的研究”的学术论文。为实地了解日本超声电机的研究和应用的最新动态,在会议期间和会议之后,笔者做了为期两周的参观考察,同日本超声电机学术界和产业界进行了广泛的接触,走访了东京大学(The University of Tokyo)、东京工业大学(Tohyo Institute of Technology)、山形大学(Yamagata University)、爱知工业大学(Aichi Institute University)、东北大学(Tohoku University)、东北工业大学(Tohoku Institute of Technology)等6所高校和佳能公司(Canon Inc.)、新生工业公司(Shinsei Co.)、精工公司(Seiko Instruments Inc.)、本多电子公司(Honda Electronics Co.)等4家企业。这些高校和企业代表了当前日本超声电机的研究、产业和应用的实际水平。访问期间,同上羽、富川、指田、内野、高野、铃木、加藤、黑泽、中村等一批从事超声电机研究的著名学者、教授、专家进行了深入的交谈,对日本超声电机技术的产业化、应用和发展有了一个比较全面的了解。

1 日本超声电机产业化的现状

最近十年,在日本,超声电机已进入实用化的商业应用阶段。环形行波型和棒形行波型电

• 国家自然科学基金资助项目(编号:59775048)。

收稿日期:1999-02-26。

机已大批量生产。最近,一种驻波型电机也投入批量生产。超声电机实用化的范围,目前局限于短时工作的、精度高的以及应用于某种特定功能的机器或领域中。

日本最早开始超声电机产业化的是新生工业公司的指田年生(T. Sashida)先生。他从1974年起就开展超声作动器的研究。1981年在“日本第三届小型马达会”上,他宣布行波型超声电机在日本首次研制成功。此后他不断进行实用性开发,于1986年实现了产品化。又经过多年的提高性能和可靠性研究,已成功地开发出成本较低且便于推广普及的产品。目前,新生工业公司超声电机生产规模为20万台/年。

新生工业公司已开发和应用的超声电机产品系列有:Ø60标准型、Ø30标准型、可装入机器的通用型、轿车头靠专用型、辊式屏幕自动开闭专用型、超小型机器人专用型、超小型转台专用型、单镜头相机自动聚焦专用型、核磁共振(MRI-CT)专用型、带编码器的高精度定位或速度控制专用型、核电站细管修复专用型、不使用磁性材料的非磁型。

据新生工业公司1997年的统计资料,超声电机在日本实际应用数量见表1。

为协调各企业超声电机的发展,日本现已成立了超声电机联络会。联络会成员单位有:佳能公司、新生工业公司、精工公司、尼康公司、Fukoku公司、本多电子公司、松下电器产业公司等。

日本超声电机生产技术水平最高的企业是佳能公司。该公司把超声电机用于照相机的聚焦机构中已有10年的业绩。现在已有37种型号的照相机安

装了超声电机。该公司投入近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。超声电机以其高精度和快速响应使得照相机快速聚焦成为可能。该公司使用的超声电机有两种:内径50 mm的圆环形行波电,如图1(a)所示;直径10 mm的短柱形行波电机如图1(b)所示。前者能将镜头等光学系统置于其中,实现快速聚焦和低噪音工作。后者采用Langevin振子型结构,大大改善了工艺性,提高了可靠性,同时也降低了成本。

除佳能公司以外,尼康公司的相机也采用了超声电机。西格玛公司在大口径望远镜上采用了超声电机。

精工公司开始进行超声电机

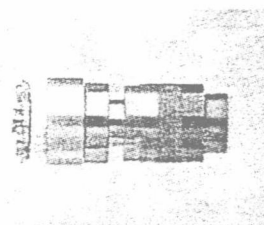
的开发是在1988年。1991年安装了Ø10 mm行波超声电机作为振动报时的指针式石英表在世界各地出售。同时,该公司用两个超声电机直接驱动的机器人在精密工程学会竞赛中连续3年取胜。为了降低成本,简化驱动电路,1993年起精工公司开始发展驻波型单相驱动微型超声

表1 新生工业公司1997年的统计数据

应用领域	应用数量/万台
光学机器(照相机等)	500
轿车(座椅等)	20
精密机器(手表等)	30
航空设备(图像处理等)	1
产业机器(XY定位仪、机器人等)	20
住宅设备(百叶窗、窗帘等)	2



(a)



(b)

图1 佳能公司生产的用于照相机的超声电机

电机。其中规格为 $\varnothing 8\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$ 的超声电机用于手表振动报警,如图2(a)所示。由于超声电机不带磁性,它不会干扰手表指针的转动,从而不影响手表的准确性。以后又开发出直径仅 4.5 mm 的超声电机用于手表日历盘的驱动,如图2(b)所示。该型手表于1998年正式投入批量生产,月产20万个。

除用于手表报警和自动日历外,该公司生产的微型超声电机还可用于手表时针和分针驱动、小型便携式信息机器、检测仪器、医疗仪器、电子娱乐装置和微型机器人等。

本多电子公司生产的超声电机用于粉料输送机^[1]。粉料输送机是利用超声电机的椭圆运动原理,实现高精度地定流量、定量两种控制模式运送粉料。该装置的突出优点是:定流量和定量容易、精度高、可远距离控制、自动运行和无噪音等。

此外,丰田公司已在出口到美国的汽车反光镜、方向盘和座椅头靠应用了超声电机。图3为用于座椅头靠的超声电机及其装置。而且在该公司策划下,又新成立一家公司专门生产和提供丰田汽车所需的超声电机。现在该公司正在开始生产力矩为 2 Nm 的超声电机,将用于小轿车上窗门玻璃的升降装置。

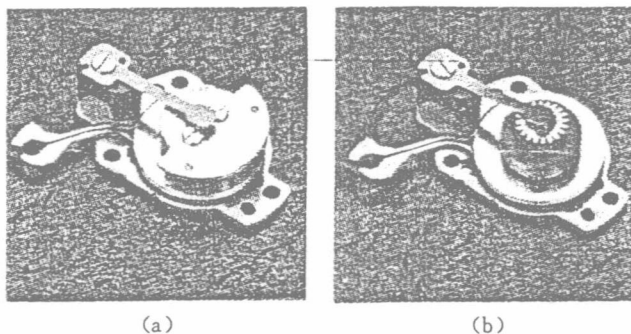
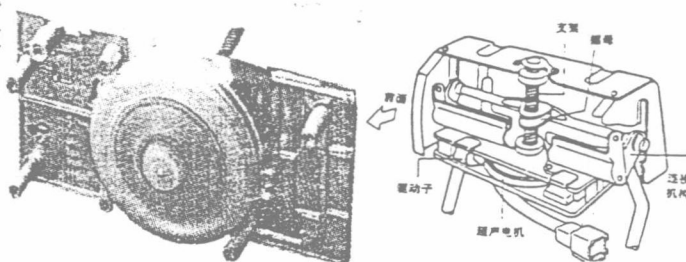


图2 精工公司生产的用于手表的超声电机



(a) 超声电机安装部位 (b) 座椅头靠调节装置

图3 丰田公司将超声电机用于汽车上的座椅头靠

2 日本超声电机的应用研究

由于超声电机具有许多独特的性能:很高的功率密度、低速大力矩、响应快、控制性能好、能断电自锁、与磁场无缘、噪声小等等。在日本,除上述单位针对自己的应用领域将超声电机进行产业化外,更多的单位正在进行超声电机的应用研究,扩大超声电机的应用领域。例如,爱知工业大学加藤厚生(A. Kato)教授应用新生工业公司生产的URS-45型超声电机对人造手进行控制,如图4所示。山形大学富川义朗(Y. Tomikawa)教授将超声电机应用于微型机器人,如图5所示。参观访问时笔者看到,只要用手电筒照射该机器人,通过光电转换就可以开动藏在机器人内部的微型超声电机,使机器人朝着电筒照射的方向走来。东京工业大学精密与智能实验室(Precision and Intelligence Lab.)正把超声电机放在真空罩内做环境试验,如图6(a)所示,其真空度有二种规格: $1 \times 10^0\text{ Pa}$, $1 \times 10^{-2}\text{ Pa}$ 。此外,该实验室还对旋转型和直线型超声电机做耐久性试验。据介绍,一台纵扭复合型超声电机的累积工作时间已长达 $5\,000\text{ h}$ 。图6(b)

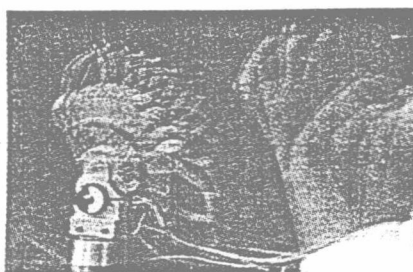


图4 超声电机用于人造手的控制

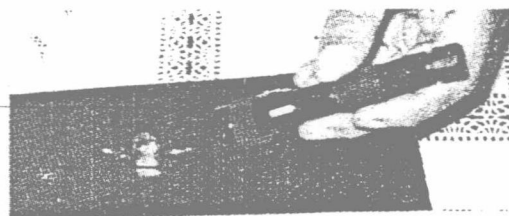


图5 超声电机用于微型机器人

为直线型超声电机带载荷耐久性试验。从图上看试验往复次数已达74 890次。

特别值得提出的是,笔者看到一份关于1991~1993年日本超声电机应用专利统计表,共98项,涉及风扇、自动门、机器人、微动台、控制阀、光偏向器、图像输入装置、指示装置、X-Y定位仪、磁盘驱动装置、家电产品等。选取1993年的一部分专利列举于表2。

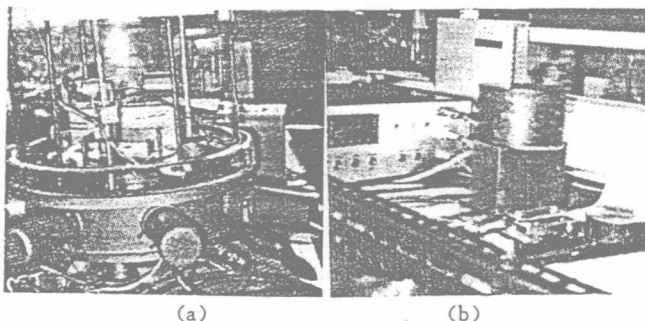


图6 东京工业大学对超声电机做真空环境试验和耐久性试验

表2 1993年日本有关超声电机应用专利统计

专利号	超声电机的应用	开发应用公司
4139	机床的被加工物设置装置	三菱电气公司
33877	切换阀	岛津制作所
38171	减速机构内置的超声电机	东洋电机制造公司
73146	用超声电机的小型移动装置	SEIKO 电子工业公司
126518	微动装置及其信息存储、读出装置	Canon 公司
147821	记录纸输送装置	岛津制作所
184165	X-Y 工作台装置	奥林巴斯光学工业公司
258453	桌面驱动装置	Canon 电子公司
278870	媒体输送装置	冲电气工业公司
272038	圆编织机用压电式选针装置	Work Data Service 公司
275876	冷却装置	田村电机制作所
294491	图像记录装置及其驱动系统	SEIKO 公司
296227	球铰链的角度变换装置	川崎重工业公司
325475	卡片型媒体记录器	TDK 公司
340341	移动机器人	富士通公司
344763	超高真空用超声电机驱动装置	日本电子工程公司

3 新型超声电机在日本的发展

除了产业化和应用研究之外,日本的另一个特点是:继续发展新型超声电机。

(1) 大力矩超声电机

针对机器人的要求,日本正在研究大力矩超声电机。在东京工业大学精密与智能实验室(Precision and Intelligence Lab.)开发了40 Nm的纵扭复合型超声电机^[2]。该实验室还在研究力矩可达100 Nm的超声电机。据介绍,研制大力矩超声电机的关键在于找到较好的摩擦材料和适合的预压弹簧。

(2) (微)小型超声电机

针对微型机械,日本正在开发(微)小型超声电机。东京大学黑泽实(M. Kurosawa)教授已研制出旋转型微型超声电机^[3],其定子外径为1.4 mm,内径1.2 mm,长5 mm。6 μm 厚的PZT薄膜用于激发柱体的弯曲振动。转速为680 r/min,堵转力矩为6.7 μNm ,驱动电压为20 $V_{\text{p-p}}$ 。薄膜化的压电材料是该电机的关键。

(3) 直线型超声电机

针对计算机软盘、光盘和硬盘驱动装置,日本一些大学里正在研究一种微型的、能精确控制的(精度达微米或纳米级)直线型超声电机。图7为东北工业大学高野刚浩(T. Takano)教授正在调试的小型直线超声电机。该电机定子长约50 mm,宽15 mm,厚6 mm。无载荷速度达26 cm/s,位置分辨力达1 μm 。

(4) 声表面波超声电机^[4]

声表面波(如Rayleigh波)是在介质表层传播的一种高频波,其频率可达100 MHz以上。由于压电装置的能量密度基本上是与工作频率成正比,所以利用在高频工作的表面波来做直线型超声电机可以期望获得优越的性能,如大的输出力、高的速度、厘米级的长行程、高的能量密度、容易自锁和高的位移分辨率。图8为东京大学黑泽实教授研制的直线型声表面波超声电机。其定子尺寸为4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 0.3 mm,工作频率为9.6 MHz,振幅仅10~20 nm,最大速度0.7 m/s,最大推力0.45 N,步进运动分辨率为5 nm。

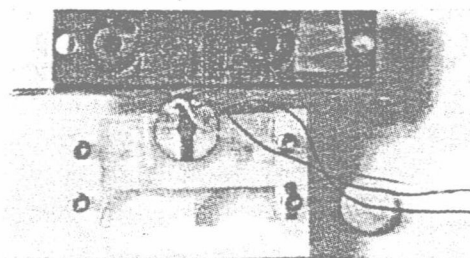


图7 东北工业大学正在研制的直线型电机

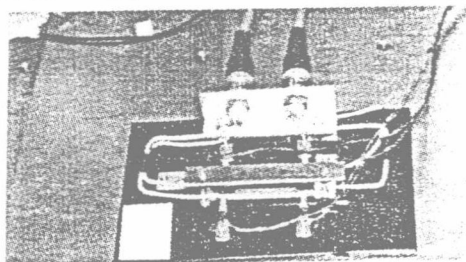


图8 东京大学正在研制的声表面波型直线电机

(5) 非接触式超声电机^[5]

目前流行的超声电机都是依靠定子和转子之间的摩擦来获得力矩的。显然摩擦会使定子和转子磨损,从而使超声电机的寿命受到限制。最近几年,东京工业大学上羽贞行(S. Ueha)教授和山形大学铃木胜义(K. Suzuki)教授都在研究非接触式超声电机。这种电机定子和转子不

直接接触,它们之间隔着一层空气或是液体介质。目前这种电机已经能够旋转,力矩极小,运动机理尚待研究。图9为山形大学研制中的非接触式超声电机群。

(6) 三自由度超声电机^[6]

通常的超声电机是一个自由度(旋转或平移)。针对机器人关节作多自由度运动的需要,日本已有些单位在研究多自由度或三自由度超声电机。图10为东京工业大学精密与智能实验室正在试验中的三自由度超声电机。

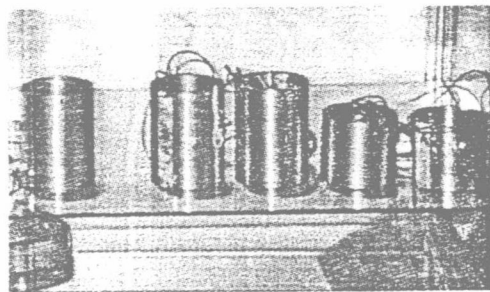


图9 山形大学正在研制中的
非接触式超声电机群

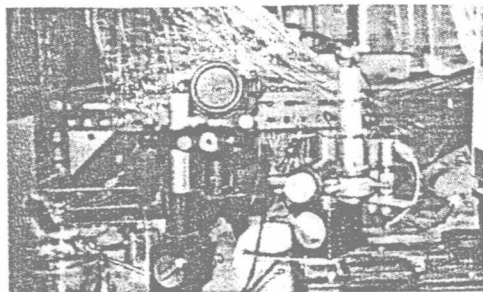


图10 东京工业大学正在试验中的
三自由度旋转型超声电机

当然,随着这些新型超声电机的发展,电机的运动机理、数学模型、压电材料和摩擦材料以及控制技术的研究,也都在不断深入之中,这里就不一一叙述了。

4 加速发展我国的超声电机技术

通过参观访问,笔者已清楚地看到:无论是超声电机的产业化,或是超声电机的应用研究,还是新型超声电机的发展,日本都处于世界领先地位。尽管我国从80年代开始就有一些单位从事超声电机的研究,但至今我国和日本的差距仍然很大。最近几年,我国从事超声电机研究的单位越来越多,个别单位已有成功的产品,甚至也开始在某些领域试用,但仍未形成产业化,未进入商业化应用。问题究竟在哪里?笔者认为:

(1) 超声电机的发展尚未受到政府有关部门的重视,投资太少,因而研究超声电机的力量(包括人力、物力)单薄;

(2) 国内压电陶瓷和摩擦材料性能尚不能达到超声电机的要求,而且目前还没有专门研究单位配合研究这些材料;

(3) 各研究单位之间缺乏交流和沟通,分散精力,重复劳动,进展很慢;

(4) 没有人开发应用市场。

日本有关专家预言,21世纪将是超声电机广泛应用的时代。日本正在实现一个雄心勃勃的超声电机研究和应用计划。

美国、德国、法国、英国等都不甘落后,他们已经或正在投入大批的人力、物力开发超声电机,努力追赶日本超声电机技术。以美国为例,仅Pennsylvania州立大学在1994~1998年投资1.5亿美元从事超声电机研究。早在1994年,美国有关研究报告就预计:在不远的将来,超声

电机将可能取代全部的小型传统电机。美国年产超声电机将达10亿台。事实上,这几年美国的一些公司已开始批量生产超声电机,如Allid Signal公司批量生产旋转型超声电机供给美国军方使用,Anorad公司批量生产直线型超声电机供给信息产业领域使用。

面对日本及全球蓬勃发展的超声电机形势,我们不应消极等待着若干年后应用别国的产品,而应把握现在积极发展拥有自主知识产权的超声电机。因为“世界上有些最先进的技术是买不来的”。我们应该而且有能力、有基础赶上世界超声电机的发展步伐,跟踪这一世界先进科技前沿,大力发展我国的超声电机技术,迅速缩小与日本超声电机技术的差距,尽快地开拓国内超声电机应用市场,继而打入国际市场。

国家自然科学基金委员会十分敏锐地看到超声电机技术的发展和前景。近几年来,工程和材料科学部、信息科学部都资助了一些单位从事这一领域的研究。最近,国家自然科学基金委员会工程和材料科学部委托南京航空航天大学超声电机研究中心发出通知:将在今年5月3~4日在南京航空航天大学召开首次全国超声电机技术研讨会,以展示全国各单位的研究成果,交流工作经验,对我国发展超声电机发表意见和建议,并为国家自然科学基金委员会在该领域资助策略的制定提供依据。届时来自全国该领域的专家、学者、教授和研究工作者将聚集一堂,广泛交流,深入探讨,找出一条迅速发展我国超声电机技术的有效途径。乘着会议的东风,我国超声电机研究、发展和产业化必将出现新的起色,呈现一个崭新的局面!

参 考 文 献

- 1 Takano T, Tomikawa Y. Characteristics of a power supplying device using flexural progressive waves in a lossy ultrasonic transmission line. In: Proceedings of World Congress on Ultrasonics. Japan, 1997. 39~40
- 2 Salonobu J, Torii N, Nakamura K et al. Construction of megatorque hybrid transducer type ultrasonic motor. Jpn. J. Appl. Phys. 1996, 135: 5038~5041
- 3 Morita T, Kurosawa M, Higuchi T. A micro ultrasonic motor fabricated by hydrothermal method. 1998 IEEE International Ultrasonics Symposium. Japan, 1998
- 4 Kurosawa M, Chiba M, Higuchi T. Evaluation of a surface acoustic wave motor with multi-contact-point slider. Smart Materials and Structure, 1998, 7: 305~311
- 5 Ueha S. Ultrasonic actuators using near-field acoustic levitation. 1998 IEEE International Ultrasonics Symposium. Japan, 1998
- 6 Amano T, Ishii T, Nakamura K et al. An ultrasonic actuator with multi-degree of freedom using bending and longitudinal vibrations of a signal stator. 1998 IEEE International Ultrasonics Symposium. Japan, 1998



第一作者简介:赵淳生 男,1938年11月生,法国工程力学博士,教授、博士生导师,享受国家特殊津贴专家。先后担任过南京航空航天大学振动工程研究所所长、江苏省振动工程学会副理事长和航空部633所、扬州无线电二厂、宝应应用技术研究单位技术顾问。现任南京航空航天大学超声电机研究中心主任,兼任全国高校机械测试技术研究会副理事长、《振动、测试与诊断》杂志主编、中国设备管理委员会专家委中会委员、中国航空学会结构与强度委员会委员、南京新技术产业开发和专家咨询委员会委员等职。合作编著、编译或译用有《机械振动参数识别及其应用》、《工程师机械振动学》、《模态试验:理论与实践》等。曾获国家科技进步三等、国家发明四等奖以及省、部级科技进步二等奖多项。目前主要从事机械故障诊断技术、模态试验和分析技术、高能激振器和压电超声电机的研究。

A New Type of Self-correction Ultrasonic Motor Using Standing Wave

Chunsheng Zhao, Guiqin Wang and Long Jin

Research Center of Ultrasonic Motors

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China

Abstract - This paper developed a new type of self-correction ultrasonic motor using standing wave. It differs from current self-correction ultrasonic motors in driving and control method. In operating stage of self-correction, the slits on rotor of the motor stay always at the projection teeth on the stator when two signals applied simultaneously to piezoelectric element which is adhered to stator are in phase for the new type of self-correction motor, but in opposite phase for current types of self-correction motor. It is notable that the projection teeth are located on the crests and troughs of a vibration mode of the stator for the new self-correction motor, but on the nodal diameters of a vibration mode of stator for current types. The experiments have shown that the self-correction function of the new type of self-correction motor is stronger than that of current types of self-correction motor. The rotation mechanism of the new type of self-correction motor is described in the paper.

INTRODUCTION

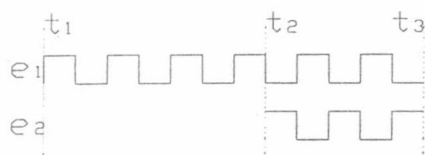
Ultrasonic motors are driven by friction, which produce wear between rotor and stator and shorten their life. So the ultrasonic motors are applied mainly to some discontinuous working conditions at present. A lag effect of piezoelectric material and a stochastic effect of frictional material create slides between contact surfaces. That make it impossible to locate precisely a given position unless a closed-loop system using a rotary encoder as sensor for detection of an angular displacement is introduced, but this greatly complexes the control system.

A self-correction ultrasonic motor possesses a function of an angular displacement self-correction, which can eliminate the deviation of the angular displacement for every step drive, then, the deviation

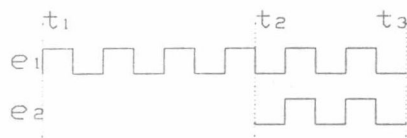
is not accumulated. In the condition, we need to design only a open-loop control system without use of the rotary encoder. It simplifies the control system.

Based on the phenomenon that a powder or some particles are consolidated around the nodal line in standing wave field, one can make the slits on rotor stay precisely at the nodal diameters of stator when the motor operates as stepping motor. According to the principle, Japanese researchers^[1-3] developed some ultrasonic motors with self-correction function in 1990s. It can realize a self-correct irregular angular displacement in certain range. The projection teeth on its stator are nearly placed on the nodal diameter of the stator and its rotor has slits cut radically at every 45° or 60° along the circumference of the rotor. By using the driving and control method as shown in Fig.1(a), the motor can run in clockwise, anticlockwise and with self-correction function.

At first, we designed an ultrasonic motor using standing wave according to current principle. The motor has two input terminals 1 and 2, as shown in Fig.1(a). In the time (t_1, t_2), if a signal e_1 is applied to terminal 1, the motor runs clockwise; if another signal e_2 is applied to terminal 2, the motor runs anticlockwise. In the time (t_2, t_3), the two signals in opposite phase are used to stimulate the stator, the motor operates in stepping. We developed a prototype of a current motor. By making some experiments, we can see that it has the ability for self-correction. But some times it may has some errors. By chance, we found that if the voltage signals shown in Fig.1(b) are applied to excite the stator, the motor shows stronger self-correction function which make the slits on rotor stay precisely at the projection teeth of the stator. This kind of self-correction ultrasonic motor has not been reported till now. So we have researched on the new type of self-correction ultrasonic motor and have made some experiments for the motor.



(a) In opposite phase signals for current types



(b) In phase signals for the new type

Fig.1 Driving and control methods of the self-correction motors

CONSTRUCTION AND PRINCIPLE

This new motor is based on current self-correction ultrasonic motor. It has the same stator and use B_{12} vibration mode. The stator is a circular disk with 4 projection teeth distributed on it evenly. The rotor has 16 slits, which are designed according to required stepping angle, as shown Fig.2.

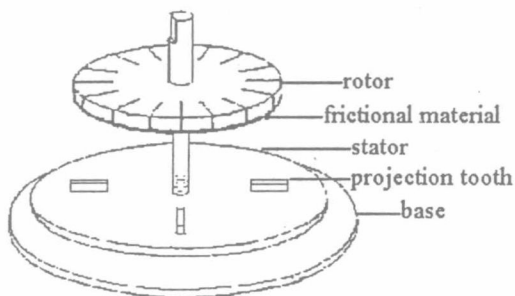


Fig.2 Construction of self-correction motor

A main difference between the new motor and current motor is the phase angle of the input signals. Although the two types of the motor possess same distribution of polarity and same position of piezoelectric ceramic element on stator, as shown in Fig.3. The distributions of exciting forces produced by piezoelectric ceramic elements are different due to the phase difference of the input signals.

If the input signals shown in Fig.1(a) are used, we obtain a distribution of exciting forces, as shown in

Fig.4(a). In the time (t_1, t_2) , the stator has a degenerate mode which enables the rotor to run clockwise or counter-clockwise when e_1 or e_2 applied to terminal 1 or 2. In the time (t_2, t_3) , the stator has another degenerate mode, as shown in Fig.5(a), when two signals e_1 and e_2 in opposite phase are applied simultaneously to terminal 1 and 2. From Fig.5(a), we can see that the projection teeth are just located on the nodal diameters of the mode. In the condition, the motor operates in stepping and possesses self-correction function. It is the operational principle for current self-correction ultrasonic motors.

If the input signals shown in Fig.1(b) are used, we have another distribution of exciting forces, as shown in Fig.4(b). In the time (t_1, t_2) , there is same state of operation as current self-correction motors. In the time (t_2, t_3) , the stator has another degenerate mode, as shown in Fig.5(b), when two signals e_1 and e_2 in phase are applied simultaneously to terminal 1 and 2. From Fig.5(b), we can see that the projection teeth are just located on the crests and troughs of the mode. Many experiments have shown that the motor can operate in stepping and possesses stronger self-correction ability than that of current self-correction motors. It is the motor, which we call a new type of self-correction ultrasonic motor.

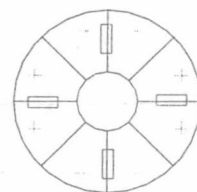
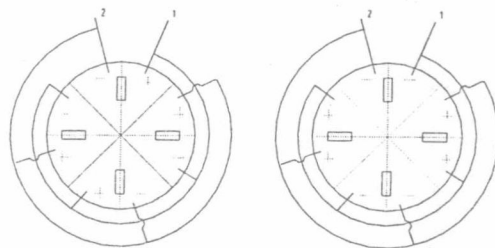
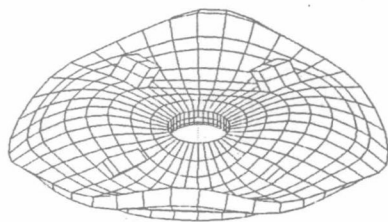


Fig.3 Distribution of polarity and location of piezoelectric ceramic elements of the motors

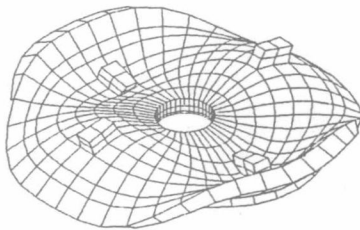


(a) For the current types (b) For the new type

Fig.4 Distribution of exciting forces



(a) For current type motors



(b) For the new type motor

Fig.5 Contrast of vibration mode of stator

ROTATION MECHANISM

As mentioned above, current types of self-correction motor is based on the phenomenon that a powder or some particles are consolidated around the nodal line in standing wave field. In stepping operation, although the slits on rotor for the two types of motor stay always at the stator's projection teeth, which locate on the nodal diameters of the stator for current motors, but on the crests and troughs of the stator for the new motor. In consequence, we consider that this new type of self-correction motor is not relative to the phenomenon happened in standing wave field. We believe that there is a new rotation mechanism, which hides in the new motor. It is very interested problem, which we have analyzed as follows:

1. Shown as in Fig. 5(b), the 4 projection teeth are located respectively on two crests and troughs of the mode and have no horizontal movement;

2. When the stator drives the rotor in a certain frequency, the rotor will also deform due to its stimulation. The rotor has 16 slits distributed evenly along the circumference. We have studied a sector plate using finite element method, and get first mode of the sector, as shown in Fig. 6.

As mentioned above, the projection teeth of the stator have no horizontal movement, but a combination effect of deformation for stator and rotor

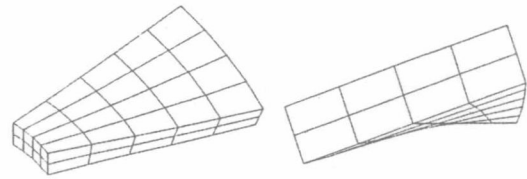


Fig.6 Vibration mode of the sector

enables still the rotor move to the projection teeth and the rotor stops finally at a position, where the slits stay just at the projection teeth. The movement mechanism is analyzed initially as follows:

An interaction force F is produced when the rotor contacts the stator. Because a minute angle ϕ is formed by the deformation of rotor, there is a horizontal force $F \sin \phi$. Although this force is small, it can still drive the rotor. Then the tooth applies a same force to the two sectors which locate on left and right of the tooth respectively when the slit stays at the tooth, so the rotor is in an equilibrium state. In consequence, the motor can correct itself the rotor angular displacement. Fig.8 explains the rotation mechanism of the new type of self-correction motor.

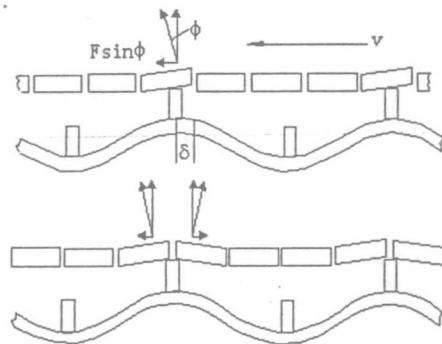


Fig.7 Rotation mechanism of the new motor

EXPERIMENTAL RESULTS

We have successfully developed this new type motor. By making a series of experiments, we found that the performance of this new motor is satisfactory. By changing the input signals, the motor can run clockwise, counter-clockwise and self-correct. When operating frequency $f=32.87\text{kHz}$, voltage $U=50\text{V}$, and rotate speed arrives 350r/min , Maximum torque is 200gf.cm .

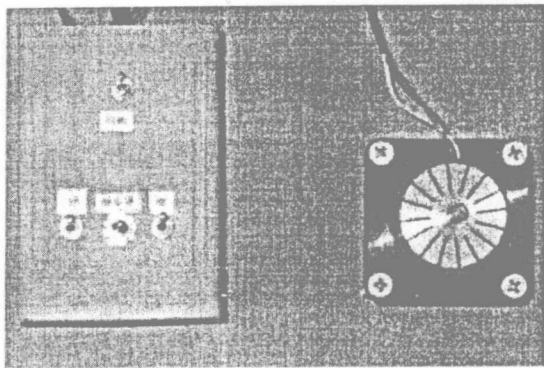


Fig.8 Prototype of the new type motor

To verify theoretical computations, we have tested for the stator with laser speckle pattern interferometry, which can measure the displacement of the stator and display its vibration modes. We can obtain the amplitude of each point of the stator by further calculation.

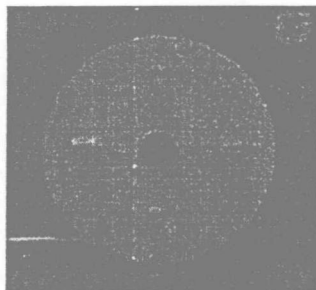


Fig. 9 Laser image of stator

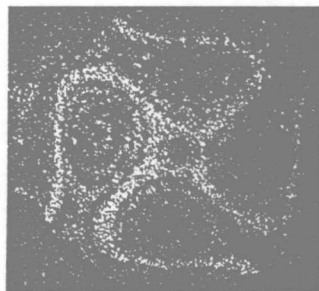


Fig. 10 B_{12} vibration mode image of stator

Fig. 9 shows the laser image of stator without stimulating signal. It shows position of the teeth on the stator. Then, we can compare the image of stator with the vibration mode image of the stator. When the two signals in phase with the same frequency are applied simultaneously to terminal 1 and 2, as shown

in Fig.1(a). B_{12} vibration mode shown in Fig.10 is obtained, where the white part represents the nodal lines and nodal circles, the black vortexes represent the crests or troughs of the mode. Form the comparing Fig.9 with Fig.10, we can conclude that the teeth locate indeed on the crests or troughs of the mode when the motor is self-correct stage.

CONCLUSION

This paper discoveries and investigates a new type of self-correction ultrasonic motor:

At first, we designed the construction and the distribution of the polarity of piezoelectric ceramic element of this new motor;

Then, we investigate the rotation mechanism of the new motor;

Finally, we successfully manufactured a prototype of the new motor and completed some experiments. The results have shown that the self-correction function of the new motor is stronger than that of current motors.

ACKNOWLEDGMENT

The project supported by the National Science Foundation in Division of Materials and Engineering, Grant No. 59877007.

REFERENCES

- [1] Chiharu Kusakabe et al, An encoder-less ultrasonic stepping motor using open-loop control system, Japanese Journal of Applied physics, Vol. 31 (1992) Supplement 31-1, pp. 239-241.
- [2] Xiaoduo Chen, Chiharu Kusakabe, Yoshiro Tomikawa and Takehiro Takano, Rotor displacement of the ultrasonic motor having an angular displacement self-correction function, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 32 (1993), pp. 4198-4201.
- [3] Xiaodou Chen, Manabu Aoyagi, Chinaru Kusakabe and Yoshiro Tomikawa, Self-oscillated ultrasonic stepping motor with function of angular displacement self-correction: nonaxisymmetric ((2,1))-mode thin disk motor, Japanese journal of Applied Physics, Vol. 33 (1994), pp. 3054-3057.

一种单元谐波平衡法¹⁾

韩景龙 朱德懋

(南京航空航天大学振动工程研究所, 南京 210016)

摘要 基于有限元离散, 对于工程中的非线性响应问题, 提出一种单元谐波平衡法. 与常规的谐波平衡法不同, 本文将谐波平衡方程建立在有限元素上, 从而兼顾了有限元素法和常规谐波平衡法两大优势. 有限元技术的应用能使得求解问题的范围扩大到复杂工程结构, 而谐波平衡概念的使用将使得含有复杂变形和复杂本构关系的动力学响应问题得到有效解决. 所提方法能适用于工程结构中具有复杂非线性关系的动力学响应问题.

由于谐波平衡法的实施依赖于谐波系数方程及其切线刚度矩阵的解析推导, 尽管已经局限到有限元素上, 但对于较为复杂一些的本构关系, 推导仍非易事. 为解决这些问题, 放弃通常对于变形梯度和应变张量所作的向量假设, 而是从连续介质力学中基本的几何关系入手, 提出一种矩阵分解形式. 通过利用张量的内蕴导数定义以及关于迹函数的有关性质, 给出应力增量的一种新的表现形式. 当它与变形梯度的矩阵分解相结合时, 使得切线刚度矩阵的导出变得十分简单, 而且所得计算形式也比通常紧凑和方便许多.

关键词 谐波响应, 非线性有限元, 粘弹性结构, 非线性动力学

引 言

谐波平衡法, 由于其特有的简单性和有效性, 被广泛应用于常微分方程的强迫响应问题中. 将谐波平衡法与 Newton-Raphson 方法相结合, 是近年来解决多自由度非线性振动问题的强有力方法. 文 [1] 曾提出一种增量谐波平衡法. 最近文 [2] 等将其应用于三次非线性系统, 并推出相应于谐波系数方程的切线刚度矩阵的表示式. 但是必须指出, 大多数工程非线性问题, 由于需用有限元等一些方法进行离散, 其非线性项往往不具有显然的解析表达式且方程的维数相当高, 这就需要一种更加有效的分析方法来解决这类的动力学响应问题.

本文基于 Hamilton 变分原理和张量的内蕴导数和迹的性质, 提出一种单元谐波平衡法. 这种方法具有广泛的适用性. 作为应用, 我们对现代直升机上的一种橡胶减摆器进行了谐波响应分析. 这种橡胶减摆器的材料特性具有明显的非线性和不可压缩性, 且具有不可逆热动力学和减退记忆特征, 因而在直升机旋翼系统中起耗能减振作用. 其数学模型是一个带有不可压缩性约束的高维无穷延滞型非线性泛函微分方程组. 对它的成功应用, 可以说包括了相当一类工程非线性问题.

1 变形梯度的矩阵分解

对于一个具有 r 个节点的各向同性的有限元来说, 其插值函数矩阵 N 可以写为

$$N = [N_1 I, N_2 I, \dots, N_r I] \quad (1.1)$$

1999-01-10 收到.

1) 国家自然科学基金和航空科学基金资助项目.

这里, N_i 是第 i 个节点的插值函数, I 表示 3×3 单位矩阵 (后同), 则单元中一个质点的坐标 X 和位移 u 能够被表示为

$$X = \sum_i^r N_i X_i, \quad u = \sum_i^r N_i u_i \quad (1.2)$$

这里 X_i 和 u_i 分别表示单元中第 i 个节点的坐标向量和位移向量. 定义单元的插值函数梯度

$$H_i = \left[\frac{\partial N_i}{\partial X} \right]^T, \quad i = 1, \dots, r \quad (1.3)$$

那么变形梯度 F , 变形张量 C 和应变张量 E 能被表示为

$$\left. \begin{aligned} F &= I + \frac{\partial u}{\partial X} = I + \sum_i^r u_i H_i^T \\ C &= F^T \cdot F = I + \sum_i^r [H_i u_i^T + u_i H_i^T] + \sum_{i,j}^r (u_i^T u_j) H_i H_j^T \\ E &= (C - I)/2 = \sum_i^r [H_i u_i^T + u_i H_i^T]/2 + \sum_{i,j}^r (u_i^T u_j) H_i H_j^T/2 \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

对 F 及其转置求变分

$$\delta F = \sum_i^r \delta u_i H_i^T, \quad \delta F^T = \sum_i^r H_i \delta u_i^T \quad (1.5)$$

从而

$$\delta E = (F^T \delta F + \delta F^T F)/2 \quad (1.6)$$

尤其是

$$A : \delta E = A : (F^T \delta F) = A : (\delta F^T F) \quad (1.7)$$

这里 A 是一个任意的 3×3 对称矩阵. 并且为书写简单起见, 已在方程 (1.4) 和 (1.5) 中略去了 u_i^e 的上角标.

2 谐波系数方程及其切线刚度矩阵

基于 Hamilton 变分原理, 一个单元的虚功方程可以写为

$$\int_{t_1}^{t_2} \left[\int_{\Omega^e} S : \delta E d\Omega + \int_{\Omega^e} \rho N^T N d\Omega \ddot{u}^e \cdot \delta u^e - f^e \cdot \delta u^e \right] dt = 0 \quad (2.1)$$

这里 S 是 Kirchhoff 应力张量, f^e 是作用在单元上的广义外力, Ω^e 是单元体积, t 代表时间. 当考虑 t_1 和 t_2 具有任意性时, Hamilton 变分原理就转化为虚位移原理, 也即有下述虚位移方程成立

$$\int_{\Omega^e} S : \delta E d\Omega + \int_{\Omega^e} \rho N^T N d\Omega \ddot{u}^e \cdot \delta u^e - f^e \cdot \delta u^e = 0 \quad (2.2)$$