

超声波马达的应用 *

陈 明 陈新业 姜开利 周铁英

(清华大学物理系 北京 100084)

1999 年 12 月 1 日收到

摘要 超声马达具有诸多优良特性,它已经在很多领域得到了广泛的应用。本文介绍了超声马达的应用现状和发展前景。

关键词 超声马达,应用,特性

Application of the ultrasonic motor

Chen Ming Chen Xinye Jiang Kaili Zhou Tieying

(Physics Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The newly developed ultrasonic motor(USM) has many excellent features. Therefore, the USM has been widely used. This paper presents some of these applications of USM.

Key words Ultrasonic motor, Application, Feature

1 引言 [1,2]

超声波马达是一种新型马达,它利用压电材料的逆压电效应使定子表面产生一定轨迹的运动,进而通过摩擦耦合将振动能转换成转子或滑块的动能。

早在 1948 年 Williamms 和 Brown 就申请了“压电马达”的美国专利,1961 年 Bulova 钟表公司研制成音叉驱动的手表,1973 年美国 IBM 公司的 H.V.Barth 和苏联的 V.V.Lavrinenco 提出了几种马达结构。之后,美国研制成功压电蠕动马达,其分辨率在纳米量级。这种马达在扫描隧道显微镜 (STM)(1986 年获诺贝尔奖)中获得成功的应用。但真正达到商业应用水平的

超声马达则是由日本人指田年生等于 1982 年研制成功的,即目前使用最多的环型行波和驻波超声马达。

超声马达 (USM) 比电磁马达具有一些显著的优点,如:大力矩密度,低噪音运行,低速,不需减速箱可直接驱动,自保持力矩大,惯性小,响应快,大力矩时效率高,可忽略磁效应,结构简单加工容易等等。下表是麻省理工学院 (MIT) 超声马达研究机构在其国际互联网站上 (<http://amsl.mit.edu/labtour/ultrason2.htm>) 提供的一组小功率马达对比数据 (EM, 电磁电机; USM, 超声马达)。可以说,如果设计合理,应用得当,超声马达可和电磁电机取长补短,获得广泛而有效的应用。

* 国家自然科学基金资助项目 (No 59607003)

表 1 超声马达与电磁电机性能比较表

| 类型 | 结构 | 制造商 | 停止力矩 (Ncm) | 空载转速 (rpm) | 能量密度 (W/kg) | 扭矩密度 (Nm/kg) | 最大效率 % |
|-----|-------------|----------|---------------|---------------|----------------|-----------------|-----------|
| EM | DC 无刷 | Aeroflex | 0.33 | 13500 | 106 | 0.29 | 71, |
| EM | DC 带刷 | Micro Mo | 0.99 | 4000 | — | 0.04 | ~20, |
| EM | DC 带刷 | Maxon | 1.27 | 5200 | — | 1.13 | 70, |
| EM | DC 带刷 | Mabuchi | 1.60 | 14500 | — | 0.42 | 53, |
| USM | 驻波纵扭 | Kumada | 133 | 120 | 80 | 8.8 | 80 |
| USM | 行波盘型 | Shinsei | 60 | 100 | 18 | 2.6 | 27 |
| USM | 行波盘型 | MIT | 170 | 40 | 12 | 5.2 | 15 |
| USM | 行波环形 8mm | MIT | 0.054 | 1750 | 108 | 2.1 | — |

2 超声马达的应用

2.1 超声马达应用概述^[3]

超声马达能够具有的或已经明确的特点决定了它的一般应用范围。它至少在如下几个方面可以得到应用:

(1) 机器人驱动器

目前使用的机器人大多为液压驱动,但由于机器人与液压装置必须使用压力油管联接液压站,对新一代需要自由移动的机器人而言,这种驱动形式是不合适的。此外,传统伺服马达作为机器人驱动器的最大缺点是功率/质量比小,采用小型电磁马达时,因低速力矩不足而必须用减速箱,导致结构复杂且重量大。而超声波马达却容易实现轻巧且直接产生低速大转矩的要求。如果在机器人的关节处使用圆环形或者圆筒形超声波马达,既可减小关节的重量,其中空的结构内部还可容纳信息和动力传递机构。随着社会进入老龄化,家庭中也开始使用机器人,特别是家务护理等特殊机器人将会大量地涌入家庭。这些机器人将十分需要超声波马达这类轻巧而大转矩的驱动机构。

(2) 民用驱动器

我们已经知道环形超声波马达已被应用在照相机的自动调焦系统中,并实现了产业化。这种圆环形超声波马达的中空构造正好适应了镜头的结构,同时满足了照相机良好的控制性能及低噪声要求,是一个成功的应用实例。另

外,小功率马达在汽车上应用非常广泛,所用转矩范围 0.98~4.9Nm,如用于车门的玻璃升降,刮雨器,座椅,头靠的调整等。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,豪华轿车则需 70~80 个以上。汽车上所用马达多是间歇式工作,目前小功率超声马达连续工作寿命在几千个小时,能够满足汽车的使用要求,而且可以用一个电源控制多个马达,既可以相对减少使用信号发生器造成的成本上升,又能充分发挥超声波马达低速高转矩及低噪声的特点。丰田汽车公司已在其产品中使用了这种马达。还有人根据超声波马达形状多样、低速高转矩及低噪声等特点,把它应用于汽车车窗或百叶窗开闭驱动机构上。

(3) 精密定位驱动器

具有纳米级精度且可快速定位的驱动装置在半导体生产中占有重要的地位,而且随着集成度的增加,其精度要求也日益提高。但是,传统的电磁马达用齿轮减速装置增大转矩,由于存在间隙,增加了误差积累环节,难以保证精度,而超声波马达可以直接驱动,步距小,无间隙,当配用合适的控制电路和精密传感装置以后,就可实现精确走位和定位,其精度可以达到配用传感器所能测得的程度。目前已经进行高精度的直线型和旋转型超声波马达及其控制方法的开发和研究,并已有产品及应用。

(4) 微小机械驱动器

电磁马达由于磁隙及线圈体积的要求,微

型化受到一定限制，最小体积充其量只能达到毫米程度。而毫米直径的微型超声波马达却早已被开发试制出来，且由于尚未发现限制其最小体积的本质因素，因而估计其体积尚可进一步减小，有关的研究正在进行之中。预计直径能做到微米量级，在与昆虫一样大小的微小机械中会具有良好的应用前景。

(5) 航天机械用马达

为了防止和减少机械在真空和失重情况下产生的反向冲击，真空且无重力状态下的航空机械通常在低速下运行，且大多不能使用润滑油。而超声波马达恰好可以在低速下工作且无需润滑油，因而作为航天领域的驱动机械具有很大的应用价值。事实上，超声马达在航天领域中已经有着相当成功的应用范例。

(6) 物料输送机

目前生产过程中使用着一种物料输送装置，它利用低频的机械振动形成了对物料的驱动，在工作中生成很大噪声。超声波马达是在高频机械振动下工作，如果将其转子或运动体置换为粉体或纸张等物料，就可以实现对物料的输送，且成本低而噪声小。

下面是一些较详细的实例。

2.2 照相机自动调焦装置^[4]

1987年日本佳能公司正式把超声马达应用到照相机中。如图1，这种低噪高精度的调焦系统给佳能相机带来了赞誉，目前，尼康等公司已有类似产品参与竞争。这种马达为环状旋转马达，它的质量小、结构简单、低速高转矩且控制性能良好，是用作照相机镜头驱动的理想结构。图2是这种马达的结构简图。其定子圆环的振动模态为7阶弯曲共振，以EF300/F2.8L型相机的超声马达为例，其空载转速及起动转矩各为40r/min和0.16Nm，满足镜头的驱动要求，其输入功率仅为1W以下，可用电池提供电力。传统的相机结构中，电磁马达被装在相机后侧主体中，通过减速等一系列传动机构将动力传送给镜头，由于传动间隙及惯性等的影响，响应时间通常都超过100 μ s，而现在超声

马达被安装在镜头的外周部且直接驱动镜头，无需中间传动，因此响应时间缩短到数微秒，且噪声极小。此外，目前还有弯曲摇头式超声马达也被大量用于低档佳能相机中^[3]。

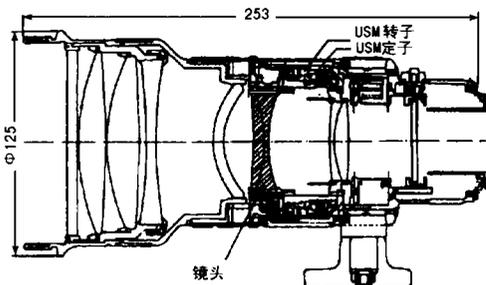


图1 佳能相机结构

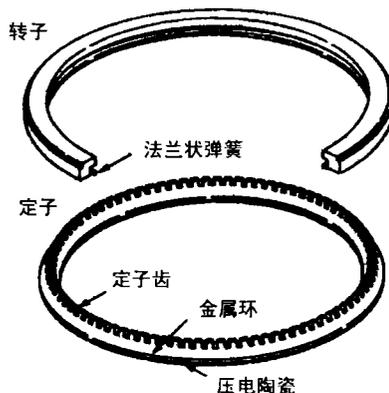


图2 相机马达结构简图

2.3 办公及民用设备

超声马达在办公及自动化设备中亦得到了应用，采用超声马达的纸张、卡片等薄片传送装置，可以实现打印机、磁卡机等办公自动化设备的小型化、扁平化。日本的NEC、Tokin、Tamura公司已设计出这类装置^[5]。松下电器公司用圆盘状旋转马达制成了摄像机旋转扫描架的驱动装置。超声马达的低噪声也使其在旅馆、医院等场合得到应用。在东京某些新的建筑物里，很多的窗帘自动升降装置是由超声马达驱动的，因为它们可以寂静地运转。

2.4 精密仪器仪表和微型机械

超声马达的良好控制性能和精度，使其

在精密设备、便携式信息设备、医疗器械等方面发挥着愈来愈重要的作用，例如图 3 就是一个利用 π 型移动马达的一维移动平台结构^[6]，其移动振子由弹性体与压电元件粘接而成。当使型振子足部的纵共振频率与弯曲共振频率大体相等并采用相位差为 $\pi/2$ 的两相交变电压激振时，就会形成足部前端的椭圆运动。如此将型振子压置在移动台上，并沿箭头方向施加预压力，则振子被激振时，移动台就会前后移动。事实上，超声马达已被应用于 X-Y 绘图仪，日本的 Takano 等还研制了用线性马达驱动光盘唱头的的装置。由于超声马达的启动和停止响应较好，因此驱动唱头有良好特性。

超声马达的驱动与电磁现象无关，而且超声马达结构简单、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。这使其在便携式仪器中具有极大的应用前景，例如有人将其应用于钟表^[7]，这种手表中马达的直径为 4.5mm，厚度为 2.5mm。

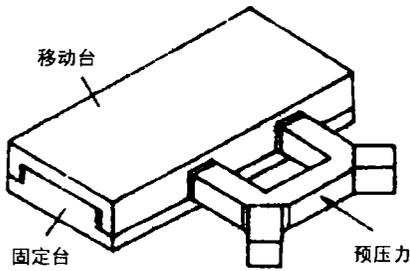


图 3 一维移动平台

2.5 航空航天领域^[8,9]

航空航天领域对于系统的尺寸和重量具有很高的要求，同时，还要求系统能够适应太空环境下高真空，极端温度，强辐射等恶劣条件。在这些情况下，超声波马达能充分发挥它的不少显著的优点。美国 Galileo 航天器上的滤色盘由于使用超声马达作为直接驱动器，使整体体积减小了四倍。

美国航空航天局 (NASA) 与麻省理工学院 (MIT) 自 94 年开始共同研究用于航天领

域的超声马达，并以行波超声马达为主要研究对象。在 95 年末，美国航空航天局喷气推进实验室首次将超声马达用于多功能自动爬行系统 (MACS)，该系统用于航天飞船的外舱壁检查。由于采用超声马达作为直接驱动器，MACS 结构紧凑，重量轻，其承载重量与自重比达 10:1。目前，NASA 的喷气推进实验室 (JPL)、材料研究室、MIT，正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。双面行波旋转超声马达完全满足这种手臂的操作要求，包括扭矩，功率，尺寸，驱动特性等。这里用到了超声马达的诸多优点，如结构紧凑，大力矩直接驱动，无需齿轮，无需制动器 (因为马达的停止力矩很大) 等。此外，MIT 研制了双面齿的对称结构形式的马达 (图 4) 一方面增大了扭矩，一方面大大提高了马达在恶劣环境中的热稳定性。这种马达采用双而陶瓷、双面齿转子和双定子结构 (图 5)。其性能参数：转速 40r/min 时，停止力矩达 2Nm，效率 > 40%，是目前功率、输出力矩最大的行波超声马达。

USM 在低温和真空下的特性如何，对其在航空航天上的发展前途至关重要。因而 JPL 在 1996 年完成了一个类似火星低温和真空环境的系统。他们用一个商用 0.113Nm 的 USM (USR-30E3) 来作实验，发现在 -48℃ 时还能保持其特性，而且其额定温度为 -10℃，这个结果说明 USM 在低温真空环境下可以使用。因而 1997 年在 LSR-1 (Lightweight Survival Rover) 上的全复合臂 MicroArmqs 上就使用了这种超声马达。

由于超声马达的独特优点，可以乐观地说，21 世纪的航空航天中 USM 必将大量取代电磁式电机而作为各类航天器的驱动器与伺服系统。超声马达在这方面的应用前景是极其广阔的。

2.6 对磁场有要求的场合

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，普通电磁马达不能工



图 4 MIT 的双面陶瓷马达

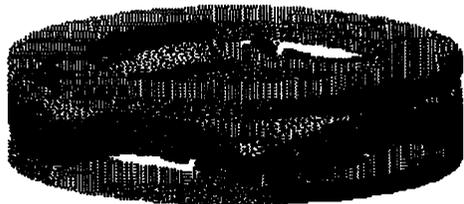


图 5 双面齿马达的原理图

作, 采用超声马达就可避免这些问题。利用这一点可作为核磁共振 (NMR) 环境下设备的驱动器, 另外在磁悬浮列车上, 为使磁悬浮列车悬浮在轨道上, 需要超导电流产生强磁场, 同时又要求大力矩和精确控制的驱动器, 这时电磁马达无法胜任, 而超声马达再合适不过了。

最近, 日立公司的研究者们又将超声马达应用到高清晰度 CRT 显示器的自动聚焦调节之中^[10]。当前普通的方式是利用电位器来控制高达 6-8kV 的高压以达到调节的目的, 由于存在难以克服的抖动, 即使熟练的操作人员或者机械手完成这项工作亦需要相当长的时间, 同时, 出于安全方面的考虑, 普通用户也不能根据自己的喜好进行选择。而利用超声波马达则可达到快速、精确、低成本的调节。图 6 是这个系统的示意图。由于超声马达所具有的精确定位、抱紧力大、无磁干扰亦不受磁干扰等特殊优点, 加上内嵌的超声马达调节装置后, 对 Hitachi HM-4721-D 型显示器 (21in, 1280×1024 像素) 进行了试验, 调节时间 (约 10s) 不到以往的三分之一, 行扫描线宽可达到 0.3mm。另外, 为了更加降低成本和使结构简单, 设计者使用了一种改进的超声马达结构, 它更适宜于

大规模生产。由此也可以看到超声马达的设计是相当灵活方便的。日立公司已计划在近期内将此套系统投入大规模生产。

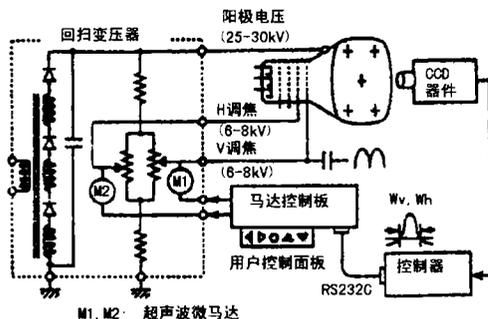


图 6 CRT 聚调焦电路原理图

3 结束语

近二十年来, 超声马达发展迅速, 新品种新应用层出不穷, 日本保持着这方面的优势, 其他西方国家也都积极投入大量人力物力进行研究与生产, 美国正在实施一项计划, 在最近几年内, 使美国超声马达的产量达到十亿台, 赶上并超过日本。我国 80 年代中后期“压电与声光”等杂志开始介绍超声马达, 1989 年清华大学首先研究超声马达。经过近十年的发展, 我国超声马达的研究已有了长足的进步, 但是, 在超声马达的应用研究和产业化等方面还有很大的差距, 还需要有关单位投入更多的人力物力财力到相关领域以促进该产业的发展。

参 考 文 献

- 1 周铁英, 董蜀湘, 刘呈贵. 物理, 1991. (5): 298-302.
- 2 周铁英, 姜开利. 自然杂志, 1999. 21(6): 340-343.
- 3 Ueha S, Tomikawa Y. Ultrasonic Motors: Theory and Application. Clarendon Press, Oxford, 1993. : 5-7.
- 4 Mukaishima H. Applications of piezoelectric ceramics. Gakken-sha Co.Ltd, Tokyo, 1989. 139-145.
- 5 李朝东, 赵淳生. 振动、测试与诊断, 1996. 16(2): 23-25.
- 6 Ohnishi K, Naito K, Nakazawa T, et al. Journal of the Acoustical Society of Japan, 1991. 47: 27-34.

- 7 Masao K, Akihiro I, Kenji S, et al. *Int.J.Japan Soc.Prec. Eng.*, 1998. 32(1): 5-7.
- 8 Glenn T S, Hagoood N W. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 1997. 3041: 326-38.
- 9 Backes Paul G, Bar-Cohen Yoseph, Joffe Benjamin. *Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation* 1997. (1): 335-340, 1050-4729.
- 10 Kazuo Kato, et al. *Journal of the Society for Information Display*, 1998. 6(2): 93-97.

“海底图像设备” 正样机通过海上验收试验

“海底图像设备”是声学所水声技术部所承担的“九五”重点项目，经过课题组人员三年的努力，于今年三月在我国南海顺利通过了有关单位组织的正样机的验收实验，各项性能指标均达到或超过了研制任务书的要求。

“海底图像设备”是用来探测水下地形地貌、水下沉积物和浅地层剖面的专用声呐设备。该设备分为水下部分和水上部分。水下部分为拖在工作船后水中的拖曳体(拖鱼)。水上部分安装在工作船上，它由主计算机、声呐接收机、数字信号处理器(DSP)、热敏记录器、全球定位系统(GPS)等组成。水上部分和水下部分通过铠装拖曳电缆、液压绞车、吊杆联系在一起。该设备在后处理时还可进行目标处理(目标测量、标注、放大和缩小等)、图像处理(灰度变换、直方图均衡、中值滤波、图像锐化等)和图形镶嵌。

“海底图像设备”主要用于海上救捞、海洋测绘、海洋工程和海洋科研等方面。在海上救捞工作中，可快速寻找失事沉入海底的船舶(舰艇)、飞机、导弹、鱼雷等物体，并以二维图形的方式提供沉物声像和沉物周围的地形地貌及海底沉积物的资料，为制定救捞方案提供依据；在海洋测绘工作中可大面积地测绘海底地貌声图和海底浅地层声图，为未来海上工作场的准备、专属经济区和大陆架的划分提供必要的资料。另外还可广泛用于海洋开发、海洋地质和海洋渔业研究等方面，该设备在军事和国民经济建设中均有极高的应用价值。

“海底图像设备”具有以下的特点：

(1) 采用双频(100kHz、500kHz)工作方式，较好地解决了侧扫声呐作用距离和分辨率的矛盾；在进行大面积搜索时，采用100kHz工作频率，以提高效率，在进行目标确认时，采用500kHz工作频率，以提高目标的分辨力。

(2) 通过精心设计，使换能器具有很高的发射和接收灵敏度，使设备具有很低的自噪声，从而提高了声呐的作用距离；100kHz工作频率的作用距离达到750m，500kHz工作频率的作用距离达到150m，处于同类产品的先进水平。

(3) 具有独立的测高功能，能够准确地跟踪测量拖鱼离海底的高度，保证拖鱼的安全；把测高线叠加到侧扫声呐的声图上，可以清晰地看出拖鱼正下方海底的起伏情况，对声图的判别有很大的帮助。

(4) 采用Chirp技术，解决了浅地层剖面探测距离和分辨力的矛盾。

(5) 拖鱼重量轻、航行稳定和下潜能力强。

(6) 采用模块化和标准化设计，提高了系统的可靠性和可维护性。

(7) 采用先进的DSP信号处理技术，大大提高了声图的质量。

(8) 软件采用WINDOWS界面，全中文菜单，提供了良好的人机对话界面，方便用户的使用。

(中国科学院声学所 魏建江等)