

超声马达发展与应用

石新军

超声马达(简称 USM)是国内外日益受到重视的一种新型直接驱动电机。同传统的电磁电机不同, USM 没有磁极和绕组,不依赖电磁相互作用来传递能量,而是利用压电陶瓷的逆压电效应,将材料的微观形变通过共振放大和磨擦耦合转换成转子或滑块的宏观运动(直线或旋转)。

USM 具有功率密度大、无电磁干扰、低速大转矩、动作响应速度快、运行无噪音、无输入自锁等特性,在非连续运动领域比传统电机性能优越,USM 在工业控制系统、汽车专用电器、超高精密测量仪器、办公自动化设备、智能机器人等领域具有广阔的应用前景,近年来倍受科学界和工业界的重视,是机电控制领域的一个研究热点。

超声马达的分类与驱动原理

超声波马达主要由定子和转子两部分组成,依定子的基本驱动原理可分为行波型和驻波型,按运动方式分直线型和旋转型两种,按定子表面椭圆振动的激发方式分,有采用单模振动和采用多模振动之分。图 1 是依据马达的运动形式及采用的振动模式对马达的分类。尽管这些马达形态各异,但是它们

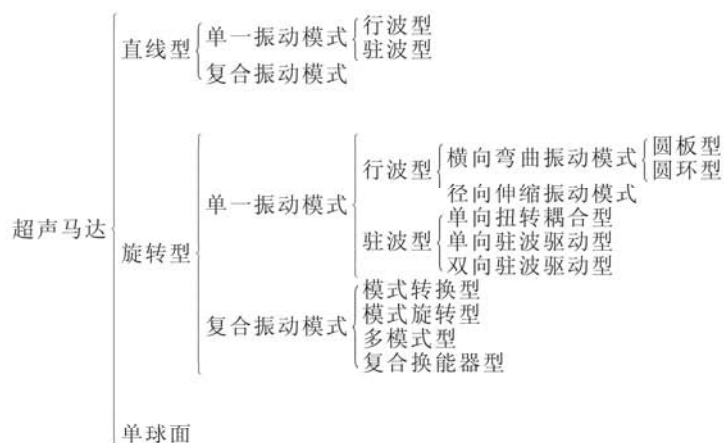


图 1 依据马达的运动形式及振动模式对马达的分类

的原理却大同小异,都是通过超声振动激发定子弹性体表面的椭圆运动,然后利用摩擦耦合驱动转子运动。

而依据马达的驱动力特性,超声波马达又可分为磨擦驱动型、非磨擦驱动型、非接触驱动型。磨擦驱动型是指通过定子与转子直接接触,依靠摩擦力

驱动,磨擦驱动型马达大致可分为三类,行波型、驻波型、蠕动式压电马达。

行波型 例如,环形行波超声马达、椭圆形行波超声马达、圆板形行波超声马达等。它们的基本原理可以用图 2 来说明:行波在定子中向右传播,定子表面上任一点在一个周期内的轨迹都是椭圆形,椭圆旋转方向为逆时针。当一金属块压在表面上与波峰接触,由于波峰处粒子旋转方向相同,金属块将在波峰处粒子的磨擦驱动下逆着行波传播方向运动。

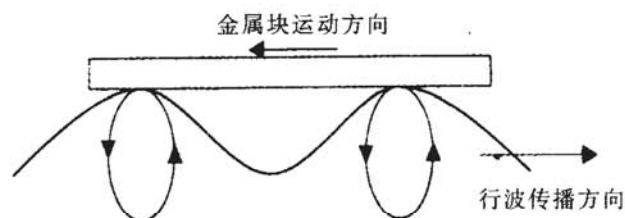


图 2 行波型马达驱动原理

驻波型 例如,单一驻波型超声马达,振动模式转换型驻波超声马达,纵扭复合型驻波超声马达,平面型驻波马达。它们依靠压电体的振动在定子中产生驻波,而定子表面粒子的轨迹为同相椭圆,再通过粒子椭圆运动磨擦驱动转子。与行波马达不同的是定子表面在驱动过程中为平面,即面上各点椭圆运动相位相同。

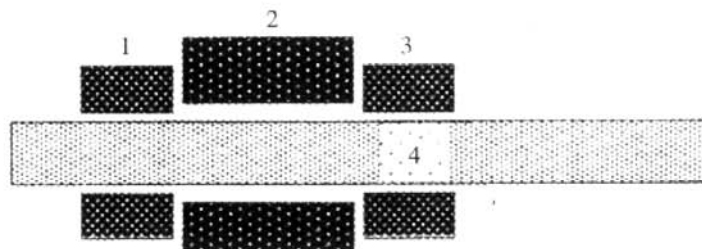


图 3 蠕动式马达驱动原理

蠕动式压电马达 例如,压电圆管式步进微动超声马达,超声钳位压电微动超声马达,多层压电体微动马达等。它的驱动原理可用图 3 来解释:对钳位器 1、3 和伸缩器 2 按一定的时续施加驱动电压,则可实现以下驱动过程:‘1’收缩抱紧导轴,‘3’扩张放

松,同时‘2’沿轴向伸长;然后,‘3’收缩抱紧导轴,‘1’放松导轴,‘2’沿导轴缩短,这样压电管向右蠕动一步,重复以上过程,压电管不断向右蠕动。

非磨擦驱动型超声马达主要指流体耦合的行波电机和利用电流变液在电场的作用下,由液态转变为固态的物理性质,从而构造成的蠕动式马达,简称压电-电流变直线(或旋转)马达。图4中压电-电流变直线马达的工作原理与图3蠕动式压电马达相类似。

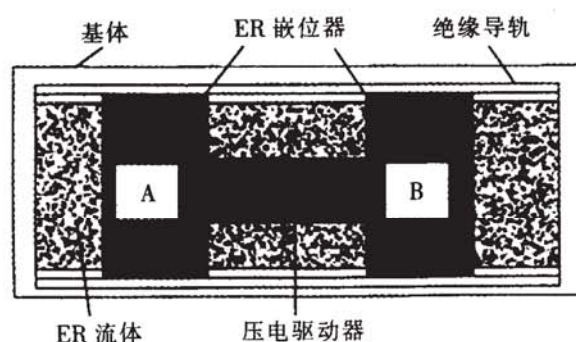


图4 电流——流变体马达驱动原理

非接触驱动型超声马达主要是指空气或其他气体耦合的超声马达,它是靠声场中的辐射力、粘滞力和非线性效应,推动转子旋转或者将浮在其上的物体进行输运。图5为一种圆筒型非接触超声马达的实验研究,当采用四路信号激发时,转子形成连续运动。在定子筒内放入小钢球,发现钢球转动并在筒内跳动,放入小纸片时,纸片被悬浮起来。

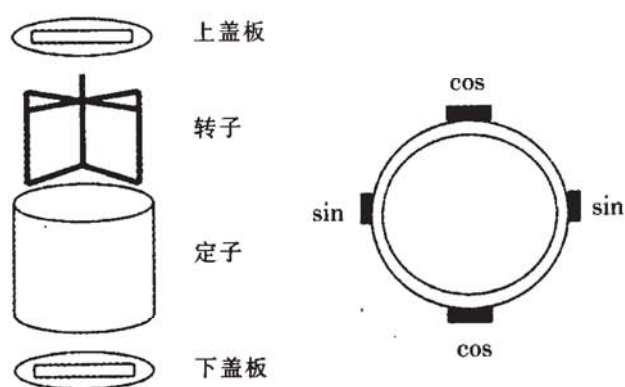


图5 马达结构图及定子圆筒压电陶瓷的粘

各类超声马达的特点

磨擦型驱动超声马达与电磁马达相比有如下优点:低转速、大转矩,不需要减速机构可直接驱动负载;体积小、结构灵活、功率体积比是电磁电机的3~

10倍;启动停止响应快、响应时间小于1毫秒;不产生电磁干扰,也不受电磁干扰;有自保能力,无齿轮间隙,可精密定位,运行安静无噪声。其缺点是:由于定、转子的接触磨擦磨损大大降低马达的寿命,磨擦生产热量,降低马达的工作效率,定、转子的接触表面限制马达的转速的提高,另外由于马达不能长时间运行(目前寿命最长为5000小时)使其应用领域受到一定限制。

非磨擦驱动型超声马达 它的优点是功耗小、无磨损及噪音。对压电电流变式电机来讲主要运行特点依赖于电流变的性质。目前使用的电流变的响应速度慢,其中的电介质颗粒易沉淀。改进电流变的性质是其急需解决问题之一。

非接触驱动型马达 由于定子和转子不接触,因此它克服了接触磨擦型马达的缺点。由于其特有的传动特性使其可用来搬运如半导体晶体片、纳米微米材料等物品,从而避免了接触污染。此搬运的物体本身就是转子。这种声悬浮技术及输运方法与磁悬浮、静电悬浮相比具有结构简单、价格便宜、容易实现的优点。具有很大应用潜力。

USM 国外研究现状

日本的USM技术处于世界领先地位,掌握着世界上大多数USM的技术发明专利,现在日本几乎所有的知名大学和大公司都在进行超声电动机的研究。美、英、法、德等国紧随其后,各自在相关方面取得了一定的研究成果。目前,在环形和棒形行波USM批量生产和应用的同时,新型USM研究仍在不断地进行,其研究的内容有以下几个方面。

大矩超声马达 目前实用中的最大转矩的USM为AEG公司的AWM90-0-11,达到6Nm,这对机器人应用的要求是远远不够的,日本和美国正在研究大力矩USM,喷气推进实验室(JPL)联合MIT等共同研究的应用于火星探测器操作臂关节驱动的USM采用了双面结构,东京工业大学精密与智能试验室正在开发40Nm的扭转复合USM后,正在研制可达100Nm的超声马达。

微小型超声马达 针对微小型机械,东京大学黑泽实教授已研制出旋转微型USM定子外径1.4mm,内径1.2mm,长5mm。使用6 μ m厚的PZT(压电陶瓷)激发柱体的弯曲振动。美国的加州大学伯克利分校研制出直径达8mm微型行波超声马达,MIT和新加坡的南洋理工大学也在从事马达微型化

的研究。3~8mm 的 USM 在大多数的办公自动化设备有商用价值,如软盘驱动器、打印机、CD 磁带机、照相机。更小的 USM 在显微外科手术中可取得良好的应用。

直线型超声马达 针对计算机软盘、光盘和硬盘驱动装置,日本一些大学里在研究一种微型的、能精确控制的(精度达到微米或纳米级)直线型 USM。东北工业大学高野刚浩(T. T. akano)教授调试了一台小型马达样机,转子长约 50mm,宽 15mm,厚 6mm。无负载速度达 26cm/s,位置分辨率大于 $1\mu\text{m}$ 。

声表面波超声马达 声表面波是在介质表面传播的一种高频波,其频率可达 100kHz 以上,由于压电装置的能量密度基本是与其工作频率成正比,所以利用在高频工作的表面波来做的直线型马达有望获得优越的性能,如大力矩、高速度、高能量密度、容易自锁和高的分辨率等。

非接触超声马达 目前大多数 USM 都是靠定子和转子之间的磨擦耦合来获得力矩的。定子、转子会由磨擦产生磨损其寿命受到限制。非接触 USM 的定、转子间隔着一层空气或者液体介质,由超声产生的声压或者流体效应驱动转子,可以应用于特殊物料输运。目前日本的东京大学和山形大学正从事这方面研究。

双自由度、多自由度超声马达 通常的 USM 是单自由度的(旋转或平移)。针对平面移动和机器人关节等多自由度运动的要求,日本有些单位已经在从事多自由度或三自由度马达的研究。

USM 国内研究现状

我国于 80 年代开始 USM 的研究,起步虽晚,但发展迅速。哈工大、清华、浙大、长春光机所、南航、天津大学、东南大学、信息产业部等单位在马达的结构和驱动控制等方面进行不同侧重点的研究。目前国内研究单位正在进行的研究为:新型 USM 的运动机理和结构的研究,例如大力矩 USM、无接触式 USM 以及 USM 的建模和设计理论研究。USM 产业化应用研究,包括环形行波型马达和棒形扭转复合型 USM 的产业化生产技术的研究。驱动控制装置的小型集成化的研究等。USM 驱动控制研究,包括 PID 控制、自适应控制、神经网络控制技术。USM 实验及测量技术方面的研究,包括压电材料高电压激励下马达特性的测量、USM 等效电路参数的测量、USM 瞬态和定态运行特性测量等。

在国家自然科学基金、省部基金、863 基金等支持下,我国超声马达研究与日本、美国等国差距逐步减小,并在电机结构、理论分析等方面领先于国际水平。

USM 工程应用

最近几年来,日本 USM 已经进入实用化的商业应用阶段,相对成熟的环形、棒形行波超声马达已经批量生产。在美国,USM 也在军事及航空上取得良好的应用。目前 USM 的应用主要局限在短时工作的、高精度的以及应用特定功能的机器或者领域中。举例如下:

照相机的自动聚焦装置 USM 已经成功应用于佳能公司的 37 种型号的照相机中,月产量多达 40 万台。尼康公司的相机也采用 USM。

机器人多自由度移动 球形 USM 的结构精巧性及良好的控制精度为多自由度机器人的驱动装置解决了诸多的难题。美国 NASAR 的火星探测者计划中,采用了高力矩密度的双面齿轮结构 USM,实现多功能自动爬行系统(MACS)直线或旋转运动,不仅满足了手臂运动所需的力矩、能量、尺寸及驱动特性的要求,而且能够可靠地工作在火星恶劣的环境中。

精密定位控制 带有反馈闭环控制的步进驱动超声电机,其步进分辨率大于 $0.01\mu\text{m}$,在光学和光电学的 CD-ROM 监视系统中得到了实际应用。

物料的输运 这种电机主要以直线为主,利用其低速和较大输出力。这方面德国和日本的应用研究比较系统。同时,利用无接触 USM 技术制成的非接触晶片传输装置已经应用于日本的导体工业。

汽车专用电器 目前,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 USM。目前该公司正在生产力矩为 2NM 的 USM,将应用于小轿车上窗门玻璃的升降。此外,USM 还在医疗器械、微机械系统的集成、特种加工工艺、办公自动化设备等方面都得到了较好的应用。

总之,超声马达是功能材料、超声振动与传播、摩擦驱动、精密加工、电力电子、自动控制等多学科交叉的边缘新兴学科,其产品是高新技术,从而使其研究成为目前最为活跃、最具应用前景和价值的科学研究之一。

(广东武警广州指挥学院训练部 510440)