

新型驱动器——压电陶瓷马达与展望

Research on Piezoceramic Motor

董蜀湘 李龙土

(清华大学材料科学与工程系 北京 100084)

周铁英

(清华大学现代应用物理系 北京 100084)

作为驱动器的微特电机,已深入国民经济的各个领域,是现代工业设备、军事国防装备、家用电器不可缺少的重要内容。据报道,当今全世界的微特电机年产量已逾 40 亿台,产值逾 50 亿美元,而且各行各业对微电机的需求量还以每年 15~20% 的速度增加,其中对伺服、步进型的高精密电机的需求量,以每年 60% 的速度增加,并逐步占主导地位。

正是基于这种形势,一种很有应用前景、结构简单、以廉价陶瓷元件为动力源,并具有低转速(无需减速器)、大力矩、快响应、高功率密度、无线线圈绕组和磁干扰特点的全新驱动器——压电陶瓷马达,正在国际上悄然兴起,开始逐渐形成一个新的高新技术产业。

压电马达工作原理

压电陶瓷马达,也称为超声电机,是利用压电陶瓷的逆压电效应——在交变电场作用下,陶瓷会产生伸缩的现象——直接将电能转变成机械能。通常要通过各种振动模式转换与复合,才能将压电体简单的伸缩模式变成所需要的可用来产生旋转或直线运动的驱动模式。因此从驱动方法上,压电陶瓷马达可划分成驻波驱动、行波驱动和蠕动型(仿生爬行)马达。

1. 驻波马达

压电与金属构成的复合体以单一振动或复合振动模式间断的驱动转子旋转,便是驻波马达。其工作原理和一个人不断地用手或脚推一个转子旋转的方式相似。

2. 行波马达

两个驻波在满足一定条件下,可合成行波。当在压电陶瓷/金属弹性体表面上激发一个前进的弯曲行波——类似水的表面波,则与其接触的物体在波动连续驱动下,将产生一个与前进行波反方向的运动。

3. 蠕动步进式马达

这种驱动器的驱动方法是从动物的仿生爬行方式引伸来的。蠕动马达有三部分,两端部分的压电体用于箝位,中间部分的压电体用于伸缩和驱动。

国内外压电陶瓷马达研究现状

压电马达的理论设想是 60 年代提出的,直到 70 年代才有原理样机和专利报道出现。80 年代至 90 年代,是压电马达发展最迅速的阶段,各种新的结构和新的驱动方法及其压电马达应用的报道层出不穷,据统计,近几年公开发表的文献和专利就有 500~600 篇。

1. 国外压电陶瓷马达研究现状

(1)理论研究 压电陶瓷马达的早期理论研究,主要是关心怎样激发用于驱动转子的行波;对于驻波,则关心怎样激发弹性体表面质点的椭圆运动。现代理论多采用有限元、机电类比和解析方法深入到压电马达驱动定子的振动模式、机电等效网络和转换效率,以及定子和转子的接触与摩擦、输出力矩与转速等深层次问题。由于压电体的非线性,影响压电马达性能的因素众多,涉及到结构、机电耦合、摩擦学、声学 and 压电材料,因此理论分析十分烦琐,到目前为止,有关压电马达的设计理论还不是完整的。

近几年日本还出版了几部超声波马达的专著,总结和概括了 10 多年来压电马达在各方面的研究进展,如驱动原理、马达结构、性能、定子的振动模式理论、驱动电路、摩擦材料以及某些典型应用等。

(2)实验研究 压电超声马达的实验研究,主要是探索、寻找和开发新的结构和新的驱动方式的压电马达,改善性能和扩大应用范围。早期的单振动模式驻波型压电马达,其转换效率高达 80%,但反转效果差。以后各种复合振动模式的可逆转或直

线驻波马达不断涌现,如纵一弯、径一纵、弯一弯、弯一扭、纵一扭等多种复合振动模式的驱动定子。

1994年日本报道了一种利用“纵一扭”复合模式的可逆转驻波马达,尺寸为 $\varnothing 80 \times 80(\text{mm})$,频率为21kHz,获得了 $200\text{kg} \cdot \text{cm}$ 的力矩输出和约每分钟几十转的低速。但效率不是很高,其他报道的一些驻波马达,效率都没有高于30%。

行波马达在量级上发生了很大变化:一种是大直径($\varnothing 600\text{mm}$)、大力矩输出;一种是微型($\text{mm} \sim \mu\text{m}$ 量级),由微电子工艺来完成。1992年美国报道了一种用于微型机器人中的压电超声微马达,是在一个厚为 $75\mu\text{m}$ 的硅片上沉积一层 $2 \sim 3\mu\text{m}$ 厚的压电薄膜材料来获得的。压电微硅马达比静电微硅马达的储能密度高三个量级。

(3)压电马达应用和产业化 1994年日本各类超声马达的产量约为400~600万台,到2000年,估计产值可达几十至100亿美元,马达主要用于照相机、摄像机的自动调焦,其他还有计算机软盘驱动、机器人、宇航、汽车制动、医疗器件等。近年来,

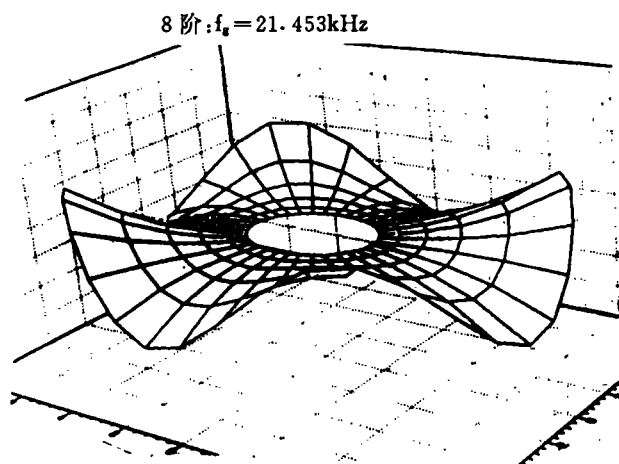
日本不断地有报道,研究用廉价的压电步进马达用于手表和座钟的驱动。除了日本,德国、美国都有一定规模的压电超声马达和压电蠕动马达的产业。

2. 国内压电马达发展概况

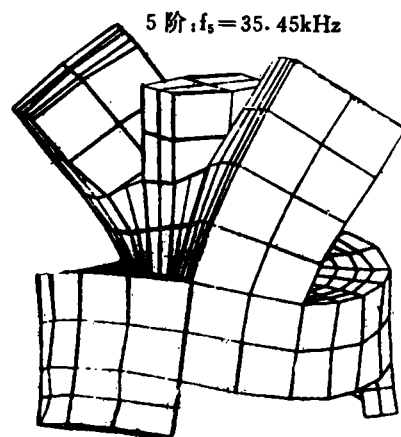
国内压电马达的研究起步较晚,直到80年代末,才开始有这方面的研究。清华大学压电马达的研究始于1988年。至今,先后在理论和实验方面作了许多系统研究。

在理论方面,笔者等人在考虑机电耦合情况下,首次建立了用于分析压电/金属复合板驱动定子的广义压电方程组,结合有限元方法计算并画出圆板型定子的各种特征频率下的三维图示。用有限元方法分析了驻波马达变换器各阶振动模,提出几种结构改进型的驻波马达。图1显示了行波马达压电/金属复合板驱动定子和驻波马达纵一扭变换器的有限元分析。

在实验方法,笔者利用超声波表面物理效应改变摩擦系数的方法,于1989年研制出国内第一个直线微动超声马达,并获一项国家发明专利。



(a)行波马达压电/金属复合定子有限元分析



(b)驻波马达纵一扭变换器有限元分析

图1 压电马达定子有限元分析

压电马达的力矩输出,最终是依靠驱动定子与转子之间的摩擦来获得,因此磨损以及因磨损导致的性能下降对各类压电马达来说似乎是不可避免的。1992年,笔者等人首次将最新功能材料电流变流体——具有在电场作用下能瞬间、可逆地变为固态的特性——用于压电马达定子与转子之间或移动体之间的无磨损传动,从而得到一种安静、无磨损、低能耗和高分辨率的新型压电步进驱动器,并获两项国家发明专利。而日本直到1994年,才有类似的研究报道。图2给出这两种马达的运行原理。

目前研制的环形超声压电步进马达及驱动电

路,已达实用化水平。

1994年,陈永校等出版了我国第一部“超声波电动机”的专著;此外,国内还有其他一些单位报道了有关压电超声马达的实验和理论的研究报道。

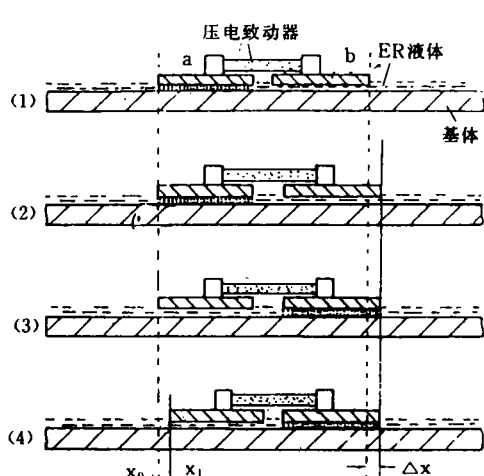
压电马达展望

当今微特电机与驱动器的发展潮流是:机电一体化,即集电机、变速、传感与控制为一体,形成新一代的电动伺服系统;微、轻、薄、高效率化;直接驱动和直线驱动化;智能化。

压电超声马达本身具有低速,大出力,快响应,控制性能好,可步进、伺服工作,容易同计算机接口,实现智能化和机电一体化等特点,此外压电马达使用的是廉价的压电陶瓷元件,无电磁干扰和抗磁干扰,用于步进驱动还可获得纳米量级的精度,用于微型化还可使压电马达的线度小至几十微米,用于微型机器人的驱动具有独到优点。这些都不是电磁马达所能比的。

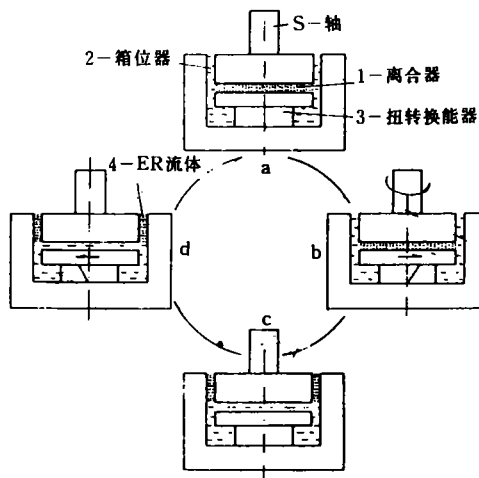
压电陶瓷马达在工业、国防、宇航、机器人、汽

车、办公设备、家用电器的应用前景、巨大市场,是无容置疑的,但和具有 100 多年发展历史的电磁马达相比,还是处于发展阶段,也是很不完美的。要实现压电马达的大规模产业化和大面积的推广使用,并能同电磁马达竞争,必须做到:①从根本上解决摩擦材料问题,②设计理论和马达结构有所突破,③驱动电路的模块化。对于①和②,我们已初步作了一些具有创造性的工作,取得一些可喜的成绩。



(a) 直线型驱动器

(1) a 箝位、b 松位 (2) 压电体伸长 (3) b 箝位、a 松位 (4) 压电体收缩, 马达右行一步



(b) 旋转型驱动器

(a) 2 松位、1 合位 (b) 3 扭转, 驱动 s 旋转一步 (c) 2 合位、1 松位 (d) 3 反扭复位

图 2 压电/电流变马达工作原理

我国“八五”期间已将压电陶瓷马达列入规划并给予了部分资助,建议国家有关部门继续就压电陶瓷马达的研究发展和力争用 5~10 年在我国实

现压电陶瓷马达的产业化,给予大力资助。

(本文参考文献较多,今略去,需者请与作者联系) (责任编辑 王宏章)

科技动态

我国研制出新型稀土永磁材料

我国具有丰富的稀土资源,研制稀土磁性材料是我国开发利用稀土资源的一个重要方面。自 60 年代以来,世界上已开发出三代稀土永磁产品,它们是:第一代 SmCo_5 型、第二代 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型和第三代 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 型。其中第三代与第一、第二代相比,具有“最大磁容积”高和成本低的显著优点,被视为永磁之冠。

但是,第三代 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 型烧结磁体与粘结磁体的专利权为日本和美国所有,我国有关产业的发展受到知识产权的制约。同时,它本身也存在着温度稳定性不足的缺点,其工作温度上限为 $100\sim 120^\circ\text{C}$,而在低温下则会失去高永磁性。所以近年来开发新型永磁材料一直是国内外研究的热点。目前国际公认的有开发前途的新型稀土永磁材料有三类,即中国拥有专利权的 1:12 型氮化物,爱尔兰和日本拥有专利权的 2:17 型氮化物,荷兰拥有专利权的低钕 Nd-Fe-B 双相耦合材料。

在国家自然科学基金资助下,北京大学杨应昌教授

等于 1990 年,通过研究氮的间隙原子效应,发现钕系和镨系 1:12 型氮化物具有可与日本、美国拥有专利权的第三代 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 型相媲美的内禀磁性。近几年来,在重点项目基金的进一步支持下,已研制成高性能磁粉。这种磁粉与当前美国 GM 公司的商品磁粉相比,在性能上具有适中的矫顽力,同时具有更高的磁能积和更低的成本,已具有良好的商业应用价值。与世界上其它两种有开发前景的永磁材料相比,这种磁粉也有其优势,主要表现在成本低、矫顽力较高和综合性能较佳,且不需加入钴等价格昂贵的掺杂金属。

目前国际市场上粘结磁体呈供不应求之势,而我国开发的这种永磁材料可用于制造粘结磁体,故有广阔的开发前景。

(国家自然科学基金委员会 靳达中撰稿)

(责任编辑 刘先曙)