

超声电机的研究现状及其进展

郑祝堂, 陈建毅

(厦门城市职业学院, 福建 厦门 361008)

摘要: 超声电机与传统电机相比, 具有结构简单、响应快、定位精度高、可直接驱动等优点, 在精密驱动、航空航天、生物医学等高精尖领域具有显著的应用优势。概述超声电机核心驱动原理和典型实际应用实例, 从直线型、旋转型两种类型, 全面综述超声电机的研究现状及其新进展; 重点介绍不同结构形式超声电机的驱动机理、结构优化以及性能提升等; 对超声电机技术发展进行总结, 指出今后研究重点。

关键词: 超声电机; 驱动机理; 直线型; 旋转型

中图分类号: TM359.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2022)05-0182-06

Research Status and Progress of Ultrasonic Motors

ZHENG Zhutang, CHEN Jianyi

(Xiamen City University, Xiamen 361008, China)

Abstract: Ultrasonic motor, with the advantages such as simple structure, fast response, high positioning accuracy and direct drive etc., has good applications in sophisticated fields of precision drive, aerospace, biomedicine, etc. This article summarizes its core driving principle and cites typical practical application examples of ultrasonic motor. The research status and the new development of the linear ultrasonic motor and the rotary ultrasonic motor are comprehensively reviewed. The driving mechanism, the structure optimization and the output performance improvement of ultrasonic motors in different structures are highlighted. The future development of ultrasonic motor technology is summarized with the reference to its future research focus.

Keywords: ultrasonic motor; driving principle; linear type; rotary type

0 引言

超声电机作为一种新型驱动器, 是结合多学科智慧的产物, 涉及振动学、摩擦学、动态设计、电力电子、自动控制、新材料和新工艺等学科的新技术, 在 20 世纪得到了迅速发展。它不像传统的电机那样利用电磁的交叉力来获得其运动和力矩。超声电机是以压电材料的逆压电效应激发定子共振为核心驱动原理, 利用压电陶瓷的逆压电效应将输入的电能转化成机械振动能, 激励起定子在超声频段内的微幅振动, 再通过定子、转子(动子)接触界面的摩擦作用转换成转子(动子)做旋转(直线)运动, 将定子的振动能转换为转子(动子)的宏观能量输出, 实现对负载驱动^[1-2]。

与传统电磁电机相比, 超声电机具有结构简单、小型轻量、能量密度大、响应快(毫秒级)、定位精度高(高分辨率)、无电磁干扰、断电自锁、可直接驱动等诸多优点, 此外, 它还具有耐低温、耐真空等适应太空环境工作的特点。因此, 超声电机在精密仪器、航空航天、武器装备、机器人、医疗器械、监控探测等诸多领域具有广阔的应用前景和重要的应用价值, 已有多种超声电机在光学仪器、照相机、生物、医疗、航天、国防等高精尖技术领域中得到应用。例如, 日本最早开发出真正达到具有商业应用价值的超声电机, 并成功引入到商业应用领域, 广泛应用在相机镜头的

自动对焦系统, 令对焦的过程变得快速、准确和接近无声, 给自动对焦系统带来了巨大的变革; 以色列 Nanomotion 公司和德国 PI 公司都开发出商业用途的直线超声电机, 并广泛应用在精密定位平台系列产品, 具有很高的分辨率和优良的启停特性, 可以实现高运动精度和稳定性; 我国和美国都将超声电机应用到航天工程, 美国首先将超声电机用于火星探测器上, 我国将超声电机用到月球巡视器上, 为“嫦娥三号”、“嫦娥四号”、“嫦娥五号”的探月工作起到很重要的支撑, 可满足 -120 ℃ ~ 180 ℃ 的工况要求和适应月球表面环境要求, 可精确地控制光谱仪等仪器, 其作用很关键。

超声电机涉及到机械、材料、控制和摩擦学等多门学科, 是微特电机和微驱动技术领域的研究热点。因此, 国内外学者开展了大量的研究工作, 成功研制了多种不同驱动机理、不同结构形式的超声电机。本文针对直线型、旋转型和多自由度超声电机的驱动机理、电机的新结构设计、提升电机的输出性能等方面的研究和所取得的新进展进行全面介绍和总结。

1 直线型超声电机的研究现状和动态

直线超声电机可以直接将定子的超声振动转换成动

基金项目: 福建省中青年教育科研项目资助项目(JAT201347)

第一作者简介: 郑祝堂(1967—), 男, 山东乳山人, 副教授, 学士, 研究方向为超声电机开发。

子的直线运动,是超声电机一种很重要的类型和分支。近年来,直线超声电机发展迅速,在电机的结构、建模仿真、样机制造和实验测试等多方面的研究工作都取得了新的研究成果,应用日益显著,尤其在精密驱动领域。目前,已研制出矩形板振子、V形结构、U形结构、T形结构、H形结构以及大功率夹心式纵弯复合型等多种不同结构形式的直线超声电机。

1.1 矩形板直线超声电机

矩形板直线超声电机按照定子的工作模态是复合振动模式还是单一振动模式分为复合模态型和单一模态型。其中,矩形板面内纵弯复合模态型直线超声电机是最早出现的直线超声电机之一。早在 1995 年,以色列的 Nanomotion 公司在前苏联学者 Banslavichus 提出的一种基于矩形薄板复合模态型直线超声电机的基础上深入研究,研制了一系列矩形板弯纵模态复合型的驱动直线超声电机,并将其产业化,其电机结构和驱动原理如图 1 所示^[3]。

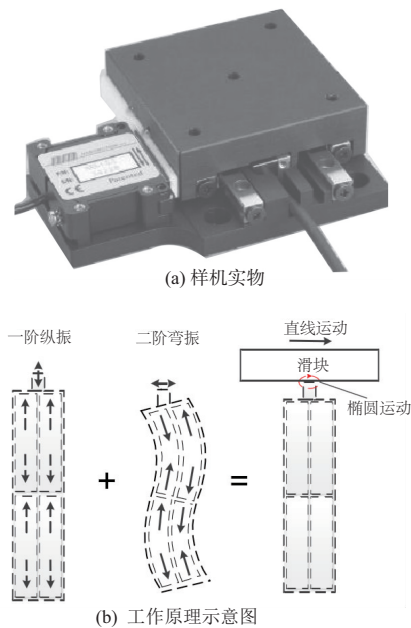


图 1 矩形板面内纵弯复合型直线超声电机及其工作原理示意图

该电机利用矩形板振子的一阶纵振和二阶弯曲振动两个工作模态同时被激发,一阶纵振提供驱动足的法向振动位移,二阶弯曲振动提供驱动足的切向振动位移,两者在驱动足处合成一个椭圆运动从而推动动子做直线运动。为了提高电机的输出性能,WAN Z J 等^[4]在矩形压电振子的金属弹性体开有 4 个对称的孔,并设计一种具有双驱动足矩形压电振子;范佳丽等^[5]在金属弹性体上开有 4 个对称的槽,所研制样机的左、右运行最高空载速度分别为 250 mm/s 和 220 mm/s,最大输出推力为 3.4 N,推重比(推力与定子质量比值)达 46;SHI Y L 等^[6]在矩形压电振子增加了三角形结构,研制多台不同夹角的样机,在夹角为 20° 时,电机的最高空载速度为 98 mm/s,最大输出推力 3.2 N。

在单一模态型直线超声电机中,工作时只需要一个工作模态被激发即可。其中,以德国 PI 公司研发的一款商

业用途的单模态直线超声电机最为著名,如图 2 所示^[7]。该电机通过采用一整块矩形压电陶瓷作为振子,振子表面的电极被分为两个区。电机工作时,当在振子其中的任一个分区施加激励电压(图 2(b)中“Active”表示)、另外一个分区不施加激励电压(图 2(b)中“Free”表示),则导致振子两个区域的变形不一致,从而在驱动足处产生与滑块成一定角度的直线运动轨迹,进而推动动子(滑块)运动。具体工作过程如下:在①状态,振子无电压激励,振子无明显变形,驱动足质点处于平衡位置;在②状态,振子左边分区正电压激励,振子扩张变形,驱动足质点处于扩张最大变形位置;在③状态,振子无电压激励,振子无明显变形,驱动足质点回到平衡位置;在④状态,振子左边分区负电压激励,振子收缩变形,驱动足质点处于收缩最大变形位置。反之,当另外一个分区被单独激励时,则推动动子(滑块)反向运动。该电机的最大空载速度为 0.6 m/s,最小位移分辨率可达 50 nm。为了提高板结构直线超声电机的输出力,LIU Z 等^[8]提出了夹心式的矩形板结构直线超声电机。该电机利用矩形板的面内一阶纵振和一阶弯振模态作为工作模态,实现电机的双向运动,最高空载速度为 504 mm/s,最大输出推力为 65 N。ZHANG B 等^[9]提出了一种夹心式压电振子的 L 形单驱动足直线超声电机。该电机定子由两个相互垂直的矩形板振子构成 L 形定子,利用两振子弯曲振动所形成的对称和反对称模态作为工作模态,实现导轨的正、反向运动,最高空载速度为 435 mm/s,最大输出推力达 100 N,推重比为 54.6。

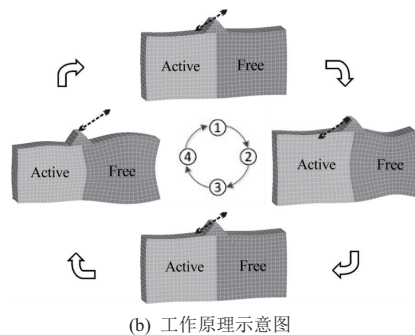
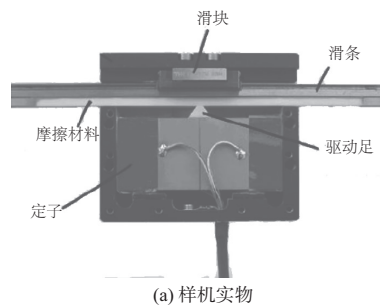


图 2 PI 公司的单模态直线超声电机及其工作原理示意图

1.2 V 形直线超声电机

V 形直线超声电机是一种单驱动足结构的电机,该类型电机利用 V 形定子的对称模态和反对称模态复合作为工作模态,对称模态提供驱动足的法向振动位移,反对称

模态提供驱动足的切向振动位移。这个两个正交的振动模态在时间上有 90° 相位差时,驱动足处形成椭圆运动,驱动动子运动,如图 3 所示^[10]。V 形直线超声电机可分

为夹心式和贴片式。夹心式定子由前端盖、压电陶瓷和后端盖组成,通过高强度螺栓固定。贴片式定子由压电陶瓷片和金属基体组成,并通过环氧胶粘在一起。

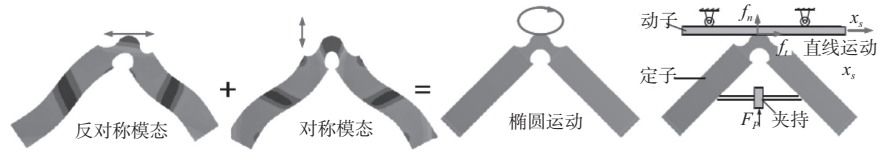


图 3 V 形直线超声电机的工作原理

早在 1998 年,日本学者 WAKAI T 等^[11]利用两个相互垂直的杆结构兰杰文振子设计了一种 V 形直线超声电机,该电机最高空载速度为 3.5 m/s,最大推力可达 51 N,推重比为 17。之后,杨东等^[12]利用超声变幅杆原理来放大驱动足的振幅,设计一种具有连续变截面超声变幅杆的 V 形直线超声电机,该电机的最高空载速度为 235 mm/s,最大输出推力为 21.4 N。乔木等^[13]设计一种双阶梯型超声变幅杆的 V 形直线超声电机,该电机的最高空载速度为 206 mm/s,最大输出推力为 10.5 N。为了改善定、动子间预压力的作用形式,提高电机的输出性能和稳定性,JIANG Y 等^[14]采用了一种一端铰支夹持方式的 V 形直线超声电机,最高空载速度为 1.4 m/s,最大输出推力为 43 N,推重比达 46.7。为了使 V 形直线超声电机小型化,杨模尖等^[15]设计了贴片式压电振子的 V 形直线超声电机,并研究了 V 形定子不同夹角对输出特性的影响,发现在夹角为 90° 时电机输出性能最佳,最高空载速度达到 784 mm/s,最大输出力达到 14 N,推重比达 70。

同样,针对直线超声电机的小型化问题,苏松飞等^[16]提出一种基于柔性夹持技术的 U 形直线超声电机。这种 U 形直线超声电机和 V 形直线超声电机也是一种单驱动足结构。U 形定子采用贴片式压电振子,由两个相互平行的梁结构和一个拱形梁组成,顶点为驱动足,如图 4 所示。该电机利用 U 形定子的 2 个正交工作模态(对称模态和反对称模态)在其驱动足处形成有一定振幅的椭圆运动,驱动动子运动。通过对该 U 形电机样机测试,在电机最佳工作频率时,最高输出速度 470 mm/s,最大输出推力为 9 N,定子质量 25 g,推重比达 36。王光庆等^[17]设计一种贴片式 T 形定子的单驱动足直线超声电机,如图 5 所示。通过采用 3 个压电双晶复合悬臂梁结构,并利用 PZT d_{31} 工作模式激发压电双晶悬臂梁产生纵向振动,同时激励出模态 I 与模态 II 的工作模式,两者复合使驱动足处形成椭圆运动,再通过驱动足与动子间的摩擦作用带动动子作直线运动。该电机的最高输出速度 250 mm/s,最大输出推力为 7.6 N。张健等^[18]提出一种贴片式 H 形振子结构,利用 H 形振子纵弯复合振动模式使其在两驱动足处形成椭圆运动,实现双侧力的输出以及提高驱动能力。

1.3 大功率夹心式纵弯复合型直线超声电机

大功率夹心式纵弯复合型直线超声电机利用夹心式换能器输出能量大的特点,以单一或多个换能器组合构成定子,来获得更大的输出速度、输出推力和输出功率。石



图 4 U 形定子结构图

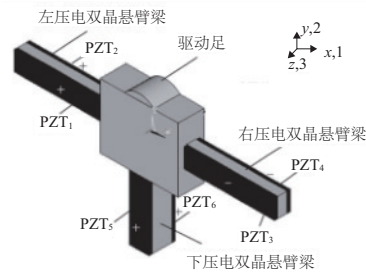


图 5 T 形定子结构图

胜君等^[19]研制了一种单驱动足的大功率纵弯复合型直线超声电机,其定子由 2 个带指数型变幅杆的夹心式换能器直线相对连接而成,中间连接部分为定子的驱动足。该电机通过定子激发出的纵振和弯振在其驱动足形成一个椭圆轨迹运动,从而驱动动子作直线运动。研制样机的最高空载速度达 1 280 mm/s,输出推力的最大值达 45 N。刘英想等^[20]研制了一种双驱动足的纵振复合直线超声电机。通过 3 个换能器纵向振动的合理组合实现双足直线驱动,最高空载速度达 602 mm/s,输出推力的最大值达 32 N。YANG X H 等^[21]研制一种双足驱动的纵弯复合型直线超声电机,定子采用一个由 2 组弯振压电陶瓷构成的夹心式换能器结构,如图 6 所示。电机样机的最高空载速度为 560 mm/s,最大输出推力达 55 N。



图 6 夹心式纵弯复合双足直线超声电机的定子图

表 1 列出了几种直线型超声电机的性能比较。可以看出,夹心式结构直线型超声电机的输出推力大,贴片式结构的直线型超声电机有利于获得最大推力比(输出推力和定子质量比值)。

表 1 几种直线型超声电机的性能比较

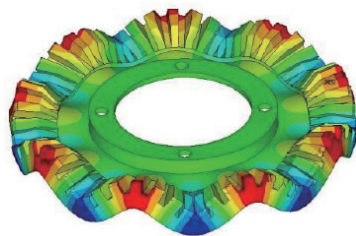
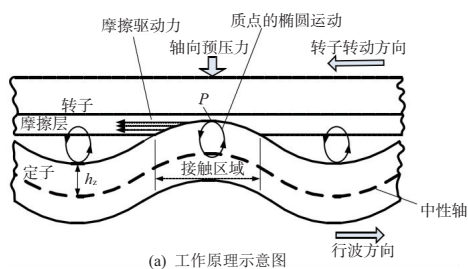
电机	定子尺寸/ mm ³	最大速度/ (mm/s)	定子质量/ kg	最大推力/ N	最大 推力比
Nanomotion 公司 HR4	42×46.6×15	250	0.73	18	25
文献[5]电机 (开槽矩形板)	42×10×2	250	0.074	3.4	46
PI 公司 U-521	35×35×15	200	0.4	20	50
文献[9]电机 (夹心式 L 形矩形板)	62×30×8	435	1.83	100	54.6
文献[15]电机 (V 形贴片式)	—	784	0.2	14	70
文献[16]电机 (U 形贴片式)	33×20×3	470	0.25	9	36
文献[21]电机 (夹心换能器式)	—	560	—	55	—

2 旋转型超声电机的研究现状和动态

旋转型超声电机在外部形状和输出方式等方面与传统电磁电机比较接近,也是超声电机最早研究和极具代表性的一种类型,对超声电机的驱动机理、样机试制、材料制备、控制方法、实验装置等方面已经做了大量的研究工作。目前,研制有行波型^[22]、驻波型及复合型等不同驱动原理和类型的旋转型超声电机。

2.1 行波型旋转超声电机

行波型旋转超声电机是当前最具代表性且实际应用最多的一类旋转型超声电机。行波型旋转超声电机驱动是连续的,通常采用圆环型压电陶瓷片和金属弹性体粘结而成的环形定子。其工作原理和定子的振动模式如图 7 所示,当在定子压电陶瓷上施加两路相位差为 $\pi/2$ 的高频驱动信号,由于压电陶瓷的逆压电效应在定子激发出两相幅值相等、在时间和空间上相位差为 90° 的驻波,两相驻波在定子内叠加后形成沿某一方向传播的弯曲行波,定子的齿状表面的各质点会分别形成椭圆轨迹。在定、转子间预压力的作用下,通过定子和转子之间的摩擦作用带动转子旋转,将定子的微观振动转换为转子的旋转运动,从而输出功率、驱动负载。



(b) 定子振动模式图 (B09)

图 7 行波型旋转超声电机的工作原理示意图和定子的工作振动模式图

早在 1982 年,日本 Sashida 设计并制造了最早的环形行波超声电机,极大地减少了定转子接触面间的摩擦磨损,为超声电机的发展和稳定应用迈出了关键的一步。随后,日本 Canon 公司将 Sashida 研发的不同系列环形行波超声电机应用于相机的自动调焦系统中,这标志着环形行波超声电机正式进入商业实用阶段。自 Sashida 将环形行波超声电机产业化后,这种全新概念的超声电机逐渐吸引了越来越多研究者的关注。1995 年,我国自主研发的环形行波超声电机在南京航空航天大学研制成功,此后又成功研发了具有自主知识产权的系列圆板式旋转型行波超声电机和圆杆式旋转型行波超声电机,并不断朝着向超声电机产业化和商品化的道路迈进。至此之后,全国各大高校研究所也展开了大量的相关研究和样机研制,取得了一系列突破性进展和创新性成果。徐志科等^[23]研制了一种直径为 $\Phi 100$ mm 的大直径行波型超声电机,该电机的空载转速 50 r/min,堵转转矩为 $3.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。陈如娟等^[24]研制了一种直径 $\Phi 10$ mm 的微小旋转型行波超声电机,该微型结构电机的空载转速 380 r/min,堵转转矩约为 $6.7 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 。王楠等^[25]研制了一种圆筒型转子的中空旋转行波超声电机,该中空结构电机的外圈转子直接完成转速与转矩,输出空载转速可达 208 r/min,堵转转矩为 $0.35 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。为了增大电机的转矩,尹育聪等^[26]研制了直径为 $\Phi 60$ mm 的双定子单转子结构和双定子结构的行波型超声电机,双定子单转子结构电机的空载转速 100 r/min,最大转矩为 $1.3 \text{ N} \cdot \text{m}$;双定子结构电机的空载转速 170 r/min,最大转矩为 $1.8 \text{ N} \cdot \text{m}$,两种结构均能提高最大转矩,比日本 Sashida 产业化的 USR-60 的 $0.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 提高了 2~3 倍。董兆鹏^[27]研制了一种双谐振环形行波超声电机,利用双振子(振动的定子和振动的转子)同时驱动,并依靠双振子两路行波能量在接触面的叠加达到提升电机性能的目的。通过实验证实,双谐振电机双驱动的最大输出转速为 48.1 r/min;最大转矩为 $0.83 \text{ N} \cdot \text{m}$,最大功率为 1.52 W,分别是单驱动定子的 1.59 倍、1.28 倍、1.62 倍。LU X L 等^[28]研制一种 4 个弯振兰杰文振子激励的双定子环型旋转行波超声电机,样机的空载转速为 120 r/min,堵转力矩为 $1.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。刘英想等^[29]研制了一种 4 个纵振夹心换能器式圆筒型行波超声电机,通过 4 个周向均布的纵振夹心换能器实现了带有驱动齿的圆筒型定子中弯曲行波振动的激励,该电机的空载转速为 110 r/min,堵转转矩为 $0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。芦小龙^[30]研制一种 4 个弯振兰杰文振子面内弯振模态的双锥面型超声电机,通

过4个周向均布的弯振子激发定子的面内弯曲振动模式,该样机的空载转速为100 r/min,堵转转矩约为0.3 N·m,最大输出功率0.82 W。

2.2 驻波型旋转超声电机

第二类旋转超声电机是驻波型旋转超声电机,其驱动是间断的,通常采用机电转换能力高的夹心式压电振子,可以带动大负载。日本学者 SASHIDA T^[31] 在1982年研制了性能满足实际使用要求的楔形振动片式驻波超声电机,样机的输出转矩0.25 N·m,机械输出功率为50 W,效率可达55%。这种驻波超声电机驱动机理的示意图如图8所示,通过夹心式换能器产生纵向振动,带动定子的楔形振动片纵向振动,同时纵振使其端面与转子间断的作用,并使振动片产生弯振,两个振动使振动片的顶端形成沿椭圆轨迹的运动,并通过振动片与转子之间摩擦作用驱动转子实现转动。

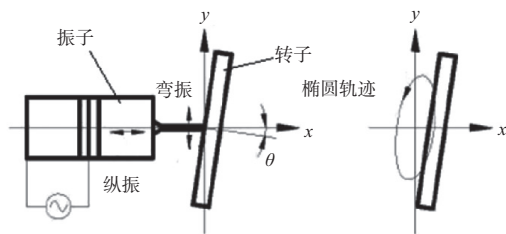


图8 驻波型旋转超声电机驱动机理示意图

之后,国内外学者进一步开展相关研究。许芦君等^[32-33]对单振动片式以及多振动片驻波超声电机进行了研究,对比了不同倾角振动片对电机样机输出特性的影响。邵培革等^[34]研制一种直径为 $\Phi 10$ mm纵弯式微超声电机,输出转速可达300 r/min,输出力矩为6.25 mN·m,其最大输出效率为5.9%。沈润杰等^[35]研制了一种直径为 $\Phi 10$ mm微型斜齿超声电机,电机的空载转速840 r/min,堵转力矩为10 mN·m。谢天等^[36]提出了一种扇形齿-凹槽结构的双转子驻波型超声电机,电机的空载转速可达475 r/min。日本的TSUJINO J等^[37]在1992年提出一种斜槽式结构的驻波超声电机,利用斜槽式结构实现振子的纵扭模态转换,并进行了大量的研究,研制不同直径 $\Phi 15$ mm、 $\Phi 40$ mm、 $\Phi 50$ mm和 $\Phi 60$ mm的样机,获得0.3 N·m、11 N·m、17 N·m和23 N·m的输出转矩。SHENG M W等^[38]研制出一种双转子斜槽式的纵扭模态转换超声电机,电机的最大空载转速为30 r/min,最大转矩为1.8 N·m。杨淋等^[39]研制一种新型孔式的纵扭模态转换超声电机,电机的空载转速可达1 000 r/min,最大转矩为0.15 N·m。杨淋等^[40]研究斜槽式超声电机在各种类型摩擦副下的负载特性,实际研制的直径 $\Phi 15$ mm样机,最大转矩为0.32 N·m,空载转速最高达1 325 r/min,效率最高可达32.3%。陈建毅等^[41-42]研究不同斜槽式结构参数对超声电机的输出特性影响,电机的空载转速最大为250 r/min。

2.3 纵扭复合型旋转超声电机

纵扭复合型旋转超声电机具有转矩/体积比大的特

点,也是旋转型超声电机一个重要类型,浙江大学、南京航空航天大学、清华大学等高校进行了相关的研究。纵扭复合型超声电机采用图9所示的夹心式换能器结构定子,纵振压电陶瓷片和扭振压电陶瓷片被安置在定子之中,从而同时激发定子的纵向振动和扭转振动,在纵向振动和扭转振动共同作用使定子顶端面任一质点作椭圆运动,驱动转子旋转运动,实现输出。

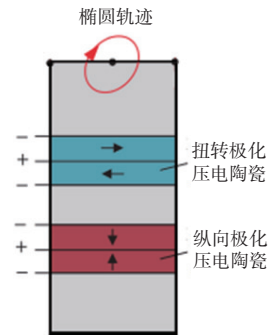


图9 纵扭复合型超声电机的夹心式换能器结构定子示意图

赵衡兵等^[43]从大转矩入手,研制的一台直径为 $\Phi 80$ mm的纵扭复合型超声电机,其空载转速为12 r/min,最大堵转转矩达到13 N·m。杨淋等^[44]研制一种双转子纵扭复合型超声电机,电机的空载转速为53 r/min,堵转转矩达到1.28 N·m,最高效率为14%,最大输出功率为3.55 W。YANG L等^[45]研制了一种贴片式的纵扭复合型超声电机,如图10所示。该电机通过一阶纵向振动和二阶扭转振动复合实现驱动转子的旋转运动,最高空载转速为405 r/min,堵转转矩为20 mN·m。



图10 贴片式的纵扭复合型超声电机

3 结语

超声电机的工作原理独特,并且压电陶瓷的极化和激励具有多样性,振子的振动模式也具有多样性,因而可以组合构造出多种不同结构形式以及结构灵活的超声电机。在国外,日本和欧美等发达国家的超声电机已经实现产业化,并有成熟产品用于照相机、精密定位平台、航天等高科技领域。近年来,我国超声电机技术发展迅速,在科学理论和应用层面都取得了丰硕的研究成果,处于世界的先进水平。从当前的研究进展来看,随着精密工程、医疗器械及生物技术等高新技术领域对微小型电机的需求越来越多,今后可考虑在高位移精度的直线型超声电机、大转矩质量比的高性能旋转型超声电机等发展方向开展重点研究。相信经过产业化、商品化研制,超声电机将会广泛应用在精密机械装备、航空航天、生物医学、监控探测等诸

多领域,对人类生活产生重要的影响。

参考文献:

- [1] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [2] 洪尚任. 超声波马达[J]. 自动化仪表,1996,17(10):1-4.
- [3] ZUMERIS J. Ceramic motor;US ,US5453653[P]. 1995-09-26.
- [4] WAN Z J, HU H. Modeling and experimental analysis of the linear ultrasonic motor with in-plane bending and longitudinal mode[J]. Ultrasonics,2014,54(3):921-928.
- [5] 范佳丽,张彦虎,周玉华,等. 新型面内纵-弯复合型直线超声电机研究[J]. 压电与声光,2019,41(6):819-823,829.
- [6] SHI Y L, ZHAO C S. A new standing-wave-type linear ultrasonic motor based on in-plane modes[J]. Ultrasonics,2011,51(4):397-404.
- [7] VYSHNEVSKY O, KOVALEV S, WISCHNEVSKIY W. A novel, single-mode piezoceramic plate actuator for ultrasonic linear motors[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,2005,52(11):2047-2053.
- [8] LIU Z, YAO Z Y, JIAN Y, et al. A novel plate type linear piezoelectric actuator using dual-frequency drive [J]. Smart Materials and Structures,2017,26(9):095016.
- [9] ZHANG B, YAO Z, LIU Z, et al. A novel L-shaped linear ultrasonic motor operating in a single resonance mode[J]. The Review of Scientific Instruments,2018,89(1):015006.
- [10] 李晓牛. V形直线超声电机动力学建模与应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
- [11] WAKAI T, KUROSAWA M K, HIGUCHI T. Transducer for an ultrasonic linear motor with flexible driving part [C]//1998 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings (Cat. No. 98 CH36102). Sendai, Japan; IEEE,1998:683-686.
- [12] 杨东,姚志远. 双变幅杆V形直线超声电机研究[J]. 压电与声光,2009,31(5):685-687,691.
- [13] 乔木,洪尚任. 双兰杰文振子V型直线超声波电动机设计与实验[J]. 微特电机,2012,40(5):40-42.
- [14] JIAN Y, YAO Z Y, SILBERSCHMIDT V V. Linear ultrasonic motor for absolute gravimeter[J]. Ultrasonics,2017,77:88-94.
- [15] 杨模尖,姚志远,李响,等. V型贴片式直线超声电机的结构优化设计[J]. 振动与冲击,2017,36(7):213-218,270.
- [16] 苏松飞,姚志远,耿冉冉,等. U形直线超声电机结构设计[J]. 哈尔滨工程大学学报,2012,33(6):759-763.
- [17] 王光庆,徐文潭,杨斌强. T型直线超声波电动机的运行机理及其特性分析[J]. 电工技术学报,2017,32(15):111-119.
- [18] 张健,王笑竹,何勃,等. H形直线超声电机振子的结构分析及模态优化[J]. 科学技术与工程,2019,19(25):183-190.
- [19] 石胜君,陈维山,刘军考,等. 大推力推挽纵振弯纵复合直线超声电机[J]. 中国电机工程学报,2010,30(9):55-61.
- [20] 刘英想,姚郁,陈维山,等. 纵振复合双足直线超声电机[J]. 西安交通大学学报,2012,46(8):111-115.
- [21] YANG X H, LIU Y X, CHEN W S, et al. Longitudinal and bending hybrid linear ultrasonic motor using bending PZT elements[J]. Ceramics International,2013,39:S691-S694.
- [22] 赵淳生. 超声电机在南京航空航天大学的研究与发展[J]. 振动、测试与诊断,2005,25(3):167-173.
- [23] 徐志科,胡敏强,金龙,等. 大直径行波型超声电机的优化[J]. 微电机,2005,38(3):16-19.
- [24] 陈如娟,陈超,宋小刚. 微小旋转型超声电机瞬态特性测试及机械特性估计方法[J]. 中国机械工程,2011,22(11):1284-1288.
- [25] 王楠,陈超,陈金燕. 一种圆筒型转子的中空型超声电机的研制[J]. 压电与声光,2019,41(2):203-206.
- [26] 尹育聪,姚志远,赵淳生. 行波型旋转超声电机两种组合方式的实验研究[J]. 中国机械工程,2011,22(1):84-87.
- [27] 董兆鹏. 双谐振环形行波超声电机设计及优化[D]. 上海:上海交通大学,2018.
- [28] LU X L, HU J H, YANG L, et al. A novel dual stator-ring rotary ultrasonic motor[J]. Sensors and Actuators A:Physical,2013,189:504-511.
- [29] 刘英想,陈维山,杨小辉,等. 纵振换能器式圆筒型超声电机振动特性的研究[J]. 振动工程学报,2012,25(1):1-5.
- [30] 芦小龙. 用于空间环境的超声电机的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [31] SASHIDA T. Trial construction and operation of an ultrasonic vibration driven motor. Theoretical and experimental investigation of its performances [J]. Oyo Buturi, 1982, 51(6):713-720.
- [32] 许芦君,洪尚任,石菊荣. 超声波马达振动片的设计与实验[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2002,23(1):70-76.
- [33] 杨建红,洪尚任,陈建毅. 多振动片式驻波型超声波电动机及其实验研究[J]. 微特电机,2004,32(1):15-16,42.
- [34] 邵培革,王立鼎. 纵弯式压电微电机研究[J]. 中国机械工程,2001,12(6):704-706.
- [35] 沈润杰,王波,郭吉丰. 微型斜齿超声波电机的研究[J]. 振动工程学报,2007,20(5):543-548.
- [36] 谢天,周铁英,陈宇. 一种双转子模态转换型超声波电动机设计[J]. 微特电机,2009,37(10):18-21.
- [37] TSUJINO J, TAKEUCHI M, KOSHISAKO H. Ultrasonic rotary motor using a longitudinal-torsional vibration converter[C]//IEEE 1992 Ultrasonics Symposium Proceedings. Tucson, AZ, USA; IEEE,1992:887-892.
- [38] SHENG M W, CHEN W S, LIU J K, et al. Study and test of a double-rotor ultrasonic motor with symmetrical longitudinal-torsional converter [C]//2009 18th IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics. Xi'an, China; IEEE,2009:1-4.
- [39] 杨淋,金家楣,赵淳生. 一种新型孔式模态转换型超声电机[J]. 振动、测试与诊断,2009,29(2):133-136,237.
- [40] 杨淋,丁庆军,黄卫清,等. 斜槽式纵扭模态转换型超声电机在不同摩擦副下的负载特性研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(15):94-98.
- [41] 陈建毅,林星陵. 双斜槽式纵扭转换型超声波电机的实验研究[J]. 压电与声光,2016,38(3):497-500.
- [42] 陈建毅,林星陵. 斜槽深度对模态转换型超声波电机性能的影响[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2018,33(1):47-52.
- [43] 赵衡兵,刘晓东,陈永校,等. 大扭矩超声波电机的结构分析[J]. 微特电机,1999,27(4):15-18.
- [44] 杨淋,赵淳生. 大力矩应力型纵扭复合超声电机[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(增刊1):126-131,155.
- [45] YANG L, REN W H, MA C C, et al. Mechanical simulation and contact analysis of the hybrid longitudinal-torsional ultrasonic motor[J]. Ultrasonics,2020,100:105982.