



“十二五”国家重点图书出版规划项目
先进制造理论研究与工程技术系列

PIEZOELECTRIC-METAL COMPOSITE BEAM TYPE ULTRASONIC
MOTORS USING LONGITUDINAL AND BENDING MODES

纵弯模态压电金属复合梁式超声电机

陈维山 刘英想 石胜君 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

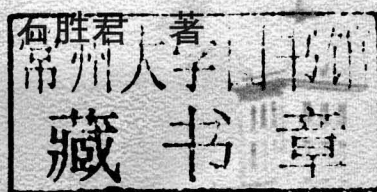


“十二五”国家重点图书出版规划项目
先进制造理论研究与工程技术系列

PIEZOELECTRIC-METAL COMPOSITE BEAM TYPE ULTRASONIC
MOTORS USING LONGITUDINAL AND BENDING MODES

纵弯模态压电金属复合梁式超声电机

陈维山 刘英想



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

序

关节驱动一直是机器人技术领域研究中的一个关键问题,其驱动电机需要具备响应快、输出力矩大以及低能耗锁定等特点,目前采用的是电磁电机加减速器的驱动方式。减速器多存在回程和传动误差、柔性、非线性摩擦和低阻尼等缺点,这些缺点将影响框架伺服系统的稳定性,降低系统输出速度和位置的精度;电磁电机自身不具备自锁特性,实现锁定往往会伴随能量消耗并使系统复杂化。这种情况下采用超声电机就非常合适。超声电机低速、大力矩/推力的特性使其可以实现机器人关节的直接驱动,省去了减速器环节,可使驱动系统得到很大程度的简化;超声电机由于采用摩擦驱动而具备断电自锁的优点;此外,超声电机可以不使用轴承和润滑,并且无电磁干扰和不受电磁干扰,这使得其更加适用于空间苛刻的工作条件。

超声电机是一种利用压电元件的逆压电效应激励弹性体固有振动并通过摩擦耦合实现致动输出的共振式驱动器,具有低速大转矩(推力)、力矩密度高、设计灵活、结构紧凑、定位精度高、响应速度快、断电自锁、无电磁干扰且不受电磁干扰以及可不使用轴承和润滑等优点,在机器人关节驱动、精密仪器仪表、医疗器械、航空航天以及精密制造等领域均具有广泛的应用前景。

作为国内最早研究超声电机的单位之一,哈尔滨工业大学陈维山教授所在的课题组于1991年开始相关研究工作,于1993年研制出超声直线电机,于1995年研制出圆板型行波旋转超声电机并对电机的振动特性进行了较为深入的理论分析和实验研究。近年来该课题组将研究重点定位在大力矩/推力的夹心式超声电机领域,并取得了一系列的研究成果,得到了国内外专家的一致认可。

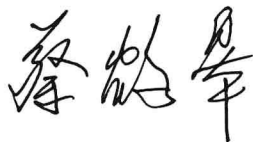
该书是著者在夹心式超声电机领域研究的总结和提炼。著者从四种常用的基本振动出发,详细地研究了可用的模式组合方案;并基于所提出的模式组合方案,衍生出多种新型的超声电机。夹心换能器激励式圆筒型行波超声电机解决了传统贴片式超声电机存在的不利因素;纵振复合模态压电金属复合梁式超声电机充分利用复合梁纵振模态实现了直线、旋转致动,在研究过程中提出了一种提高振动能量利用率的设计思想;纵弯复合模态压电金属复合梁式超声电机在解决国外相同原理样机缺陷的基础上提出了更具优势的新构型,并衍生出一种可实现平面致动的新构型;弯振复合模态压电金属复合梁式超声电机成功地避免了异型模态超声电机中存在的模态简并问题;压电陶瓷内嵌式环形行波超声电机通过陶瓷内嵌的全新设

计思想实现了经典的贴片式环形行波超声电机和换能器激励式行波超声电机优点的融合。本书中所述五大类超声电机构成了一个相对独立的研究体系,可以看做超声电机研究领域的一个重要分支。

该书全面而细致地阐述了著者在超声电机领域的研究成果,每一章中各种超声电机的提出都展现了一个研究思路不断深入的过程。该书对超声电机的工作原理、设计方法和制作技术的详细介绍便于读者进行参考和借鉴。该书的出版必将推动超声电机技术在我国的发展和应用。

看到超声电机研究工作在哈尔滨工业大学的蓬勃发展,作为老一辈教师,我感到十分欣慰,著者在该领域取得这样突出的成绩源于他们对该研究领域的专注和不断探索。我也衷心希望他们能够继续努力,进一步提升超声电机的性能,实现其在机器人关节驱动等领域的广泛应用,推动机器人技术的不断发展。

中国工程院院士



2011 年 11 月

于哈尔滨工业大学

前 言

超声电机是一种在近 30 年才开始受到重视并得到较快发展的特种电机,它利用压电材料的逆压电效应将电能转化为弹性体的机械振动能,使弹性体特定区域的表面质点发生具有致动效应的周期性规则轨迹运动,并进一步通过与另一物体(通常是动子)之间的摩擦耦合,实现宏观运动或机械力的输出。与传统电磁电机相比,超声电机具有低速大转矩(推力)、出力密度或功率密度高、运动形式设计灵活、结构紧凑、定位精度高、响应速度快、断电自锁、无磁场干扰且不受电磁干扰以及可不使用轴承和润滑等特点。基于超声电机的这些突出优点,其在航空航天、光纤通信、科学仪器、机床等工业、半导体制造业、微机电系统、精密定位控制、军事以及民用等领域具有广泛的应用前景。

超声电机是一种采用弹性体固有振动模态工作的共振式驱动器,其相关研究是集压电学、振动力学、接触力学、摩擦学、材料学、机械设计和自动控制等多学科理论与技术综合应用的一项应用基础研究。随着新材料、新工艺和新构型的不断涌现以及其他相关学科的不断发展,超声电机的构型和输出特性必然会得到不断的提升,从而有助于不断扩大其应用范围。超声电机不但能够在许多传统场合替代电磁电机,优化使用条件,获得更佳的使用效果,而且能够适用于许多电磁电机无法适应或根本不可能工作的场合,展现其独特的优势。

作为国内最早研究超声电机的单位之一,哈尔滨工业大学陈维山教授所在课题组于 1991 年开始指导研究生展开了相关研究工作,于 1995 年研制出圆板型行波旋转超声电机,其后对此类电机进行了较为深入的振动理论分析和实验研究。近年来在国家自然科学基金、机器人技术与系统国家重点实验室等部门的大力支持下,为使超声电机的驱动能力满足许多应用场合的直接驱动能力和对环境适应性等要求,著者将研究重点定位于大力矩/推力超声电机领域,取得了一系列的研究成果:近年来在国内外重要期刊和会议上发表学术论文 100 余篇,其中近 20 篇发表在国际高水平 SCI 源期刊上;申请国家发明专利 46 项,其中已经取得授权 29 项;研制出了具有自主知识产权的新型超声电机样机 30 余种;2011 年,“纵弯复合模态压电金属复合梁式超声电机”获黑龙江省技术发明二等奖;2009 年,题为“A Cylindrical Traveling Wave Ultrasonic Motor Using Longitudinal Vibration Transducers”的学术论文获 IMF-ISA-2009 国际会议(铁电领域国际顶级会议)最佳论文展示奖;2011 年,题为“纵振换能器式圆筒型超声电机中换能器耦生弯振研究”的学术论文被评为第十届振动理论及应用学术会议优秀论文。本课题组在压电超声驱动领域共培养了博士 12 名,硕士 20 余名。

自著者所在课题组开始从事超声电机的研究工作伊始,也曾将研究重点定位于对国外早期研究最多的行波型旋转超声电机的跟踪研究,也可以说此类超声电机也是最先投入使用的最成功的超声电机代表。随着研究工作的逐步深入,著者对该领域的研究工作进行了重新定位和思考。首先,实践证明非常具有实用价值的旋转型行波超声电机的知识产权和专利大多掌握在日本以及西方国家手中,而且从此类超声电机的出力等指标看,其最具应用潜力的照相机自动调焦领域在我国并不具有市场和技术优势;第二,在以环形行波型超声电机为代表的传统超声电机中,大量采用的是压电陶瓷元件的 d_{31} 工作模式,相对 d_{33} 工作模式而言,这是一种机电耦合效率相对低下的工作模式,而且压电陶瓷通常工作在高频拉压交变应力下,这对本属于脆性特征的压电陶瓷是一种非常不利的工作状态,从功能材料技术上严重制约了出力能力的有效提高;第三,超声电机的固有优点使其在航天领域具有巨大的潜在应用价值,但低温和辐射等空间环境对传统构型超声电机中广泛存在的胶层的耐用度提出了严峻考验,能否有效地避免胶层的低温脆化和性能蜕变将直接关系到能否在未来航天器设计中选用此种电机;最后,超声电机的出力指标目前还无法满足多数应用场合下的驱动能力需求,而采用压电陶瓷贴片的传统超声电机的种种内在缺陷恐怕也不能在短期内得到实质性解决。基于上述综合考虑,在国内外研究同行将关注点放在微型化超声电机的研发的另一面,著者将近年的研究重点定位在如何通过新的超声振动换能系统的机械构型实现出力指标的突破,并能实质性提高新构型对环境的适用度。这些指导思想将贯穿于本书将要介绍的各种夹心式超声电机的构型中。

纵观近年来的研究成果,著者在夹心式超声电机方面的研究成果主要体现在以下几个方面。

(1) 在夹心换能器激励式圆筒型行波超声电机领域:

基于压电金属复合梁纵向振动模态、弯曲振动模态和圆筒径向弯曲振动模态的振型特点,提出了四种采用压电金属复合梁纵振/弯振激励圆筒径向弯振的模式组合方案,并分析了相应的致动原理;鉴于圆筒径向弯振模态和圆环轴向弯振模态沿周向展开后振型具备相似性,所提出的四种组合方案同样适用于圆环轴向弯振模态的激励;基于所提出采用压电金属复合梁纵振激励圆筒径向弯振的模式组合方案,提出了一种纵振换能器式圆筒型行波超声电机,采用四个均布的纵振换能器实现了带驱动齿圆筒中弯曲振动行波的激励;受纵振换能器式圆筒型行波超声电机中换能器耦生弯振的启发,结合压电金属复合梁纵振和弯振激励圆筒径向弯振两种模式组合方式,提出了一种纵弯复合换能器式圆筒型行波超声电机,采用单个复合振动形式的换能器实现了圆筒径向弯振行波的激励;为了进一步提高构型的紧凑性,结合悬臂压电金属复合梁纵振和弯振激励圆筒径向弯振两种模式组合方式,提出了一种悬臂纵弯复合换能器式圆筒型行波超声电机;基于所提出的三种超声电机,建立了适用于夹心换能器纵振/弯振模态与圆筒弯振模态之间的合理匹配的设计方法;基于三种超声电机的振动特性分析,提出了采用换能器激励式行波电机中存在的波形畸变问题,揭示了产生行波畸变的原因。

(2) 在纵振复合模态压电金属复合梁式超声电机领域:

揭示了压电金属复合梁纵振模态组合的致动原理,以空间相交的两个纵向振动的组合为例,建立了描述区域质点运动轨迹与纵向振动的夹角、振幅和相位差之间的关系的模型;基于正交纵振复合的组合方式,提出了一种 T 型单足直线超声电机,实现了驱动区域高强度椭圆轨迹运动的激励;提出了采用压电金属复合梁纵振模态工作的超声电机所普遍存在的振动能量闲置问题,基于这一问题,研制了一种 U 型双足直线超声电机,充分利用水平换能器纵振能量实现了双足直线致动;为了完全避免振动能量闲置问题,提出了一种矩形四足直线超声电机,采用四个纵振换能器组成一个封闭的矩形结构,充分利用换能器纵振的组合,实现了四足直线致动;在矩形四足直线超声电机的基础上,将通过封闭构型避免振动能量闲置的设计思想扩展到旋转驱动领域,提出了一种方形四足旋转超声电机;通过振动特性分析,揭示了纵振复合模态压电金属复合梁式超声电机中换能器的实际振动状态为纵-弯复合振动;通过机械输出特性测试验证了通过有效降低振动能量闲置可实现输出特性显著提升的设计思想。

(3) 在纵弯复合模态压电金属复合梁式超声电机领域:

分析了压电金属复合梁纵弯模态复合的致动原理,建立了驱动区域质点运动轨迹方程;从驱动区域质点运动轨迹一致性角度出发,提出了驱动点位置改进方法,并设计出一种纵弯复合模态双足直线超声电机,实现了两个驱动足振动轨迹的一致;针对纵弯复合双足电机存在的纵振能量利用不充分、弯振横向位移小和机械振动损耗大等不足,提出一种纵弯复合单足直线超声电机,驱动足设置于结构的对称中心位置,该处纵弯振位移皆为最大处,有利于增大电机的输出推力;在两种直线电机基础上衍生出了纵弯复合两自由度平面电机,建立了驱动足处质点运动轨迹方程,分析了电机的平面致动原理,研究了驱动足在不同振动输入条件下不同驱动质点的运动情况,建立了驱动质点运动轨迹图谱,分析了驱动一致性问题;在研究过程中提出了不规则形状复合梁谐振频率计算方法和纵弯谐振频率简并方法。

(4) 在弯振复合模态压电金属复合梁式超声电机领域:

针对采用异型振动模态实现致动的超声电机存在的模态特征频率简并、机电耦合效率低、存在耦生振动、存在振型畸变、构型优化受限制等问题,提出了通过采用压电金属复合梁同型同阶正交弯振模态的复合实现致动的设计思想;建立了复合弯振模态下梁末端质点三维运动轨迹方程,指出了采用此致动机理工作的超声电机的驱动面应选择四个侧面中位于梁末端的区域,由弯振引起的轴向振动并不适合用于致动;提出了一种弯弯复合双足直线超声电机,通过两个正交的二阶弯振的复合在两个驱动足处形成了椭圆轨迹的运动,通过振动特性分析验证了驱动足处运动为三维的椭圆轨迹运动;针对弯弯复合双足直线超声电机中存在的两个驱动足振动特性不一致的问题,提出了一种改进构型,通过增加压电陶瓷片的数量,实现了两个驱动足振动特性的一致;在两种直线电机基础上又将弯振复合的设计思想扩展到了旋转驱动领域,提出了一种弯弯复合四足旋转超声电机,实现了大力矩输出;弯振复合模态压电金属复合梁式超声电机采用同型振动模态的复合实现致动,只需保证截面的对称性即可满足频率简

并的要求,这使得该类电机的设计具有很大的灵活性,可根据实际选择的弯振模态阶数、输出特性要求以及结构尺寸限制来灵活地确定电机的构型参数,这一优点对进一步扩展超声电机的应用领域具有十分积极的意义。

(5)在压电陶瓷内嵌式环形行波超声电机领域:

针对典型的贴片式环形行波超声电机和夹心换能器式行波超声电机的各自优点和不足,提出了一种压电陶瓷内嵌的构型设计思想,采用压电陶瓷高机电耦合效率的 d_{33} 模式激励环形定子的弯曲振动模态,克服了典型的贴片式环形行波超声电机存在的诸多问题,同时保留夹心式超声电机所具备的独特优势;提出了一种基于圆环轴向弯曲振动模态的陶瓷内嵌式行波超声电机,设计了用于实现陶瓷预紧的锯齿形弹簧块,建立了弹簧块等效弹性模量的调整方法,得到了圆环轴向弯曲振动模态下定子齿的三维椭圆轨迹运动;针对圆环轴向弯曲振动模态表面质点振动一致性差的问题,提出了一种基于圆环径向弯曲振动模态的陶瓷内嵌式行波超声电机,实现了机械输出特性的显著提升。

本书总结了上述五大类超声电机的构型思想与实验研究的原始结果,共同构成纵弯模态压电金属复合梁式超声电机这一相对独立的研究体系,希望能够为有意开展此类超声电机研究的人员提供有益的参考。

全书共分7章。

第1章绪论,叙述了超声电机的工作原理、起源、特点和分类,介绍了国内外超声电机的研究现状和应用现状,分析了目前研究的主要方向和发展趋势。

第2章简要地介绍了四种基本振动模态的振型特点,给出了四种基本振动的振动方程。分析了压电效应,并介绍了压电材料的基本特性和参数。详细地分析了四种基本振动模态的激励方式和应用,通过具有代表性的超声电机介绍了对应振动模态实现超声致动的工作原理。

第3章提出了四种采用压电金属复合梁纵振或弯振激励圆筒径向弯振的模态组合方式,分析了对应的致动原理。研制了纵振换能器式、纵弯复合换能器式和悬臂纵弯复合换能器式共三种换能器激励式圆筒型行波超声电机,并介绍了相应的实验研究结果;基于模态特征频率灵敏度分析,实现了圆筒和换能器振动模态之间的合理匹配以及定子基本振动模态特征频率之间的简并;并通过驱动齿运动轨迹实现了对定子振动特性的分析,分析了电机中存在的波形畸变问题。

第4章揭示了压电金属复合梁纵振复合致动原理。基于正交纵振复合的思想,提出并研制出三种直线超声电机和一种旋转超声电机。详细地分析了四种超声电机的工作原理,建立了电机两个基本振动模态特征频率简并的设计方法,分析了电机中存在的振动能量闲置问题,并提出了通过封闭构型来避免振动能量闲置的设计思想,最后介绍了样机制作的细节以及振动测试和输出特性测试结果。

第5章在分析了压电金属复合梁纵弯复合致动原理的基础上,提出了驱动足位置改进方法。提出并研制了两种纵弯复合直线超声电机;衍生出了一种两自由度平面电机,研究了驱动

足在不同振动输入条件下不同驱动质点的运动情况,建立了驱动质点运动轨迹图谱。

第6章在揭示了压电金属复合梁弯振复合致动原理的基础上,提出并研制了三种弯弯复合超声电机,详细地分析了驱动足处质点的三维椭圆轨迹运动,介绍了样机振动测试和输出特性测试结果。

第7章介绍了著者提出的一种压电陶瓷内嵌的构型设计思想,研制的基于圆环轴向和径向弯曲振动模态的陶瓷内嵌式行波超声电机,设计了用于实现陶瓷预紧的锯齿形弹簧块。分析了圆环轴向弯振模态下表面质点运动轨迹的不一致性问题。对两种电机的机械输出特性进行了对比。

本书第1、2、3、4、6、7章及附录由陈维山和刘英想共同撰写,第5章由陈维山和石胜君共同撰写。本书还吸收了本课题组其他研究人员以及部分已毕业的博士生和硕士生的研究成果,他们是贺思源、李霞、李有光、郝铭、张敏、李培、未倩倩等。可以说,本书的研究成果是著者所在课题组的集体创造和智慧的结晶。

需特别指出的是,本书涉及的研究成果大部分得益于著者所承担的国家自然科学基金项目(编号:50875057、51075082、51105097)、国家教育部博士点基金(编号:20102302110007)、机器人技术与系统国家重点实验室自主课题(编号:SKLRS200901A04)和黑龙江省自然科学基金(编号:E05050703)等的大力支持,在此特向国家自然科学基金委员会、国家教育部博士点基金、机器人技术与系统国家重点实验室和黑龙江省自然科学基金委员会表示诚挚的谢意。

特别感谢曾经对我们的研究工作给予支持的院士和教授们,他们是:赵淳生院士、王子才院士、蔡鹤皋院士、陈在礼教授、姚郁教授、谢涛教授、曲建俊教授。

由于著者知识水平有限,加之本书所研制的超声电机还多处于实验室研究阶段,本书中难免存在不妥和疏漏之处,恳请广大读者批评、指正。

著者 陈维山 刘英想 石胜君

2011年12月

于哈尔滨工业大学

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 超声电机概述	1
1.1.1 超声电机的定义和工作原理	1
1.1.2 超声电机的起源	2
1.1.3 超声电机的特点	3
1.1.4 超声电机的分类	4
1.2 超声电机的国内外研究和应用现状	9
1.2.1 超声电机的国外研究现状	9
1.2.2 超声电机的国内研究现状	10
1.2.3 超声电机的应用现状	12
1.3 超声电机目前研究的主要方向和发展趋势	14
1.3.1 高效强力压电超声电机基本构型	14
1.3.2 超声电机微型化	15
1.3.3 超声电机在空间机构中的应用	16
1.3.4 压电材料	16
1.3.5 摩擦材料	17
1.3.6 超声电机与执行机构的融合设计	17
参考文献	17
第2章 基本振动模态的激励与应用	30
2.1 四种基本振动	30
2.1.1 圆环轴向弯曲振动	30
2.1.2 圆筒径向弯曲振动	32
2.1.3 压电金属复合梁纵向振动	34
2.1.4 压电金属复合梁弯曲振动	35
2.2 压电材料及其基本特性	36
2.2.1 压电效应	36

2.2.2 压电材料基本特性与参数	38
2.3 四种基本振动的激励方式与应用分析	46
2.3.1 圆环轴向弯曲振动模态的激励与应用	46
2.3.2 圆筒径向弯曲振动模态的激励与应用	51
2.3.3 压电金属复合梁纵向振动模态的激励与应用	53
2.3.4 压电金属复合梁弯曲振动模态的激励与应用	56
参考文献	60
第3章 夹心换能器式圆筒型行波超声电机	62
3.1 圆筒/圆环弯振与压电金属复合梁纵振/弯振的模态组合研究	63
3.2 纵振换能器式圆筒型行波超声电机	65
3.2.1 电机结构	65
3.2.2 工作原理	66
3.2.3 振动模态简并	69
3.2.4 振动特性分析	72
3.2.5 实验研究	75
3.3 纵弯复合换能器式圆筒型行波超声电机	78
3.3.1 电机结构与工作原理	78
3.3.2 振动模态简并	80
3.3.3 振动特性分析	83
3.3.4 实验研究	84
3.4 悬臂纵弯复合换能器式圆筒型行波电机	87
3.4.1 电机结构与工作原理	88
3.4.2 振动模态简并与振动特性分析	89
3.4.3 实验研究	91
参考文献	93
第4章 纵振复合模态压电金属复合梁式超声电机	95
4.1 压电金属复合梁纵振复合致动原理	95
4.2 T型单足直线超声电机	98
4.2.1 电机结构和工作原理	98
4.2.2 振动模态简并	101
4.2.3 振动特性分析	103
4.3 U型双足直线超声电机	105
4.3.1 电机结构	105

4.3.2	工作原理	105
4.3.3	振动模态简并与振动特性分析	108
4.4	矩形四足直线超声电机	110
4.4.1	电机结构	110
4.4.2	工作原理	112
4.4.3	电机振动模态简并与振动特性分析	113
4.5	方形四足旋转超声电机	116
4.5.1	电机结构和工作原理	116
4.5.2	电机振动特性分析	118
4.6	实验研究	121
4.6.1	T 型单足直线超声电机振动测试	121
4.6.2	U 型双足直线超声电机振动测试	124
4.6.3	矩形四足直线超声电机振动测试	126
4.6.4	方形四足旋转超声电机振动测试	127
4.6.5	样机机械输出特性测试	129
	参考文献	133
第 5 章	纵弯复合模态压电金属复合梁式超声电机	135
5.1	压电金属复合梁纵弯复合致动原理	135
5.1.1	致动原理	135
5.1.2	驱动点运动轨迹分析	136
5.1.3	驱动点位置改进	138
5.2	纵弯复合双足直线超声电机	139
5.2.1	电机结构与工作原理	139
5.2.2	纵弯模态频率简并	141
5.2.3	电机振动特性分析	143
5.2.4	实验研究	145
5.3	纵弯复合单足直线超声电机	147
5.3.1	电机结构与工作原理	147
5.3.2	纵弯模态特征频率参数灵敏度	148
5.3.3	实验研究	153
5.4	纵弯复合平面超声电机	154
5.4.1	电机结构	154
5.4.2	电机平面致动原理	155
5.4.3	电机设计	161

5.4.4 驱动足振动特性分析	165
5.4.5 实验研究	175
参考文献	180
第6章 弯振复合模态压电金属复合梁式超声电机	182
6.1 压电金属复合梁弯振复合致动原理	182
6.2 弯弯复合双足直线超声电机	186
6.2.1 电机结构与工作原理	186
6.2.2 电机设计与振动特性分析	188
6.2.3 构型改进	191
6.2.4 实验研究	193
6.3 弯弯复合四足旋转型超声电机	197
6.3.1 电机结构与工作原理	198
6.3.2 换能器设计与振动特性分析	199
6.3.3 实验研究	201
参考文献	204
第7章 压电陶瓷内嵌式环形行波超声电机	207
7.1 压电陶瓷内嵌的初始构思	207
7.2 基于圆环轴向弯振模态的陶瓷内嵌式行波超声电机	208
7.2.1 电机结构与工作原理	208
7.2.2 定子模态分析	212
7.2.3 弹簧块的设计	216
7.2.4 定子振动特性分析	219
7.2.5 实验研究	222
7.3 基于圆环径向弯振模态的陶瓷内嵌式行波超声电机	228
7.3.1 电机结构与工作原理	228
7.3.2 电机设计	230
7.3.3 定子振动特性分析	233
7.3.4 实验研究	238
参考文献	242
附 录	243
术语索引	253

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction of ultrasonic motor	1
1.1.1 Definition and working principle of ultrasonic motor	1
1.1.2 Originality of ultrasonic motor	2
1.1.3 Characteristics of ultrasonic motor	3
1.1.4 Classification of ultrasonic motor	4
1.2 Research status and application of ultrasonic motor	9
1.2.1 Research status in the world	9
1.2.2 Research status in China	10
1.2.3 Application of ultrasonic motor	12
1.3 Development trends of ultrasonic motor	14
1.3.1 Basic structure of ultrasonic motor with high power and efficiency	14
1.3.2 Micromation of ultrasonic motor	15
1.3.3 Application in spatial mechanism of ultrasonic motor	16
1.3.4 Piezoelectric material	16
1.3.5 Friction material	17
1.3.6 Combination design of ultrasonic motor and actuating mechanism	17
References	17
Chapter 2 Excitations and applications of basic vibration modes	30
2.1 Four types of vibration modes	30
2.1.1 Axial bending vibration mode of ring	30
2.1.2 Radial bending vibration mode of cylinder	32
2.1.3 Longitudinal vibration mode of piezoelectric-metal composite beam	34
2.1.4 Bending vibration mode of piezoelectric-metal composite beam	35
2.2 Piezoelectric material and its basic characteristics	36
2.2.1 Piezoelectric effect	36
2.2.2 Basic characteristics and parameters of piezoelectric material	38
2.3 Excitations and applications of four basic vibration modes	46

2.3.1	Excitation and application of axial bending vibration mode of ring	46
2.3.2	Excitation and application of radial bending vibration mode of cylinder	51
2.3.3	Excitation and application of longitudinal vibration mode of piezoelectric-metal composite beam	53
2.3.4	Excitation and application of bending vibration mode of piezoelectric-metal composite beam	56
References		60
Chapter 3	Cylindrical traveling wave ultrasonic motor using sandwich transducer	62
3.1	Combination between bending vibration mode of cylinder or ring and longitudinal or bending vibration mode of composite beam	63
3.2	Cylindrical traveling wave ultrasonic motor using longitudinal vibration transducers	65
3.2.1	Structure of the ultrasonic motor	65
3.2.2	Working principle	66
3.2.3	Vibration modes degeneration	69
3.2.4	Vibration characteristics analysis	72
3.2.5	Experiments	75
3.3	Cylindrical traveling wave ultrasonic motor using longitudinal and bending composite transducer	78
3.3.1	Structure and working principle	78
3.3.2	Vibration modes degeneration	80
3.3.3	Vibration characteristics analysis	83
3.3.4	Experiments	84
3.4	Cylindrical traveling wave ultrasonic motor using cantilever type longitudinal and bending composite transducer	87
3.4.1	Structure and working principle	88
3.4.2	Vibration modes degeneration and vibration characteristics analysis	89
3.4.3	Experiments	91
References		93
Chapter 4	Piezoelectric-metal composite beam type ultrasonic motor using longitudinal vibration modes	95
4.1	Actuating mechanism of the combination of composite beams' longitudinal vibration modes	95
4.2	T-type linear ultrasonic motor with single driving foot	98

4.2.1	Structure and working principle	98
4.2.2	Vibration modes degeneration	101
4.2.3	Vibration characteristics analysis	103
4.3	U-type linear ultrasonic motor with double driving feet	105
4.3.1	Structure of the ultrasonic motor	105
4.3.2	Working principle	105
4.3.3	Vibration modes degeneration and vibration characteristics analysis	108
4.4	Rectangle type linear ultrasonic motor with four driving feet	110
4.4.1	Structure of the ultrasonic motor	110
4.4.2	Working principle	112
4.4.3	Vibration modes degeneration and vibration characteristics analysis	113
4.5	Square type rotary ultrasonic motor with four driving feet	116
4.5.1	Structure and working principle	116
4.5.2	Vibration characteristics analysis of the motor	118
4.6	Experiments	121
4.6.1	Vibration test of T-type linear motor with single driving foot	121
4.6.2	Vibration test of U-type linear motor with double driving feet	124
4.6.3	Vibration test of rectangle type linear motor with four driving feet	126
4.6.4	Vibration test of square type rotary motor with four driving feet	127
4.6.5	Mechanical output performance test	129
	References	133

Chapter 5	Piezoelectric-metal composite beam type ultrasonic motor using longitudinal and bending vibration modes	135
5.1	Actuating mechanism of the combination of composite beams' longitudinal and bending vibration modes	135
5.1.1	Actuating mechanism	135
5.1.2	Vibration trajectories analysis of the driving tips	136
5.1.3	Modification of the driving tips	138
5.2	Linear ultrasonic motor using longitudinal and bending vibration transducer with double driving feet	139
5.2.1	Structure and working principle	139
5.2.2	Frequency degeneration of the longitudinal and bending modes of the motor	141
5.2.3	Vibration characteristics analysis of the motor	143

5.2.4	Experiments	145
5.3	Linear ultrasonic motor using longitudinal and bending vibration transducer with single driving foot	147
5.3.1	Structure and working principle	147
5.3.2	Parameters sensitivity analysis of resonance frequencies of the longitudinal and bending modes	148
5.3.3	Experiments	153
5.4	Planar ultrasonic motor using longitudinal and bending vibration transducer	154
5.4.1	Structure of the motor	154
5.4.2	Planar actuating mechanism	155
5.4.3	Motor design	161
5.4.4	Vibration trajectories analysis of the driving feet	165
5.4.5	Experiments	175
	References	180
Chapter 6	Piezoelectric-metal composite beam type ultrasonic motor using bending vibration modes	182
6.1	Actuating mechanism of the combination of composite beams' bending vibration modes	182
6.2	Linear ultrasonic motor using bending vibration transducer with double driving feet	186
6.2.1	Structure and working principle	186
6.2.2	Motor design and vibration characteristics analysis	188
6.2.3	Improved structure	191
6.2.4	Experiments	193
6.3	Rotary ultrasonic motor using bending vibration transducers with four driving feet	197
6.3.1	Structure and working principle	198
6.3.2	Transducer design and vibration characteristics analysis	199
6.3.3	Experiments	201
	References	204
Chapter 7	Ring type traveling wave ultrasonic motor with nested PZT excitation	207
7.1	Conception of nested PZT excitation	207
7.2	Traveling wave ultrasonic motor using axial bending mode of ring with nested PZT excitation	208