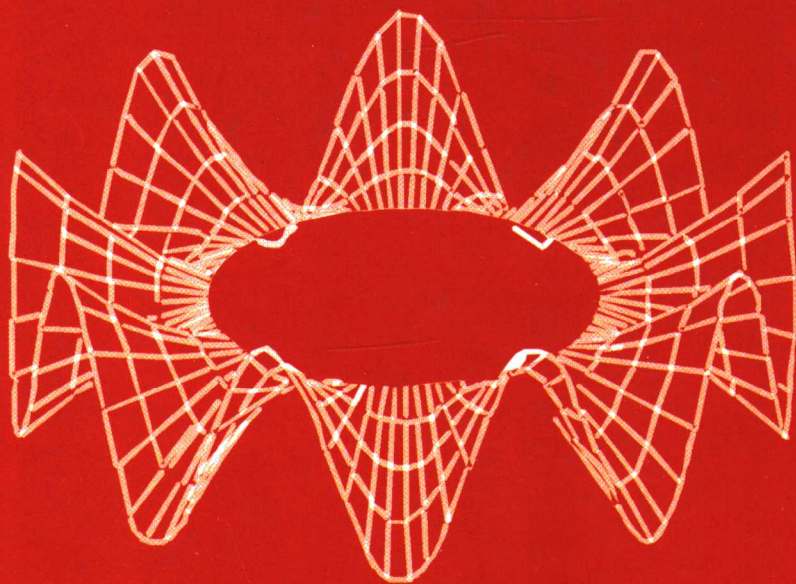


赵淳生 著

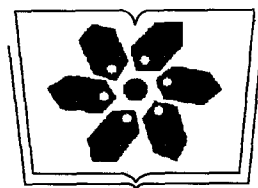
超声电机技术与应用

**Ultrasonic Motors Technologies
and Applications**

Zhao Chunsheng



科学出版社
www.sciencep.com



中国科学院科学出版基金资助出版

超声电机技术与应用

Ultrasonic Motors Technologies and Applications

赵淳生 著

Zhao Chunsheng

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从振动和波动理论出发,全面而系统地阐述了超声电机的运动机理、机电耦合模型、结构参数优化设计、驱动与控制技术,深入而完整地总结了著者及其团队15年来在超声电机技术方面的发展与创新。全书共16章。第1章为绪论;第2~5章为研究超声电机技术的基础知识;第6~14章介绍各类超声电机及其驱动器,是全书的重点;第15章为超声电机试验技术;第16章为超声电机在工程中的应用。

本书不仅总结了超声电机的系统的理论和方法,而且也反映了著者及其团队在试验研究和工程应用方面所做的工作和积累的经验。

本书适于从事超声电机或作动器研究、设计和应用的工程技术人员参考,并可作为高等院校精密工程或精密驱动等相关专业的博士和硕士研究生教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

超声电机技术与应用/赵淳生著. —北京:科学出版社,2007.8

ISBN 978-7-03-019750-4

I. 超… II. 赵… III. 超声波-电机 IV. TM38

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第131190号

责任编辑:段博原 贾瑞娜 / 责任校对:李奕莹

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年9月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007年9月第一次印刷 印张: 36

印数:1—3 000 字数: 684 000

定 价: 98.00 元

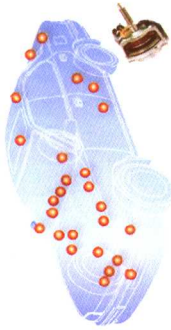
(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)



智能飞机



磁悬浮列车



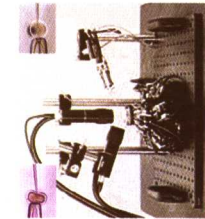
汽车



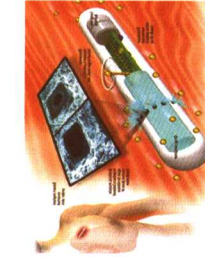
手机



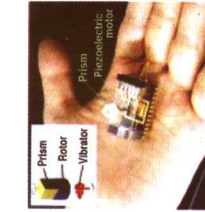
人造卫星



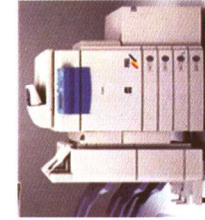
细胞穿刺



智能药片(应用压电泵)



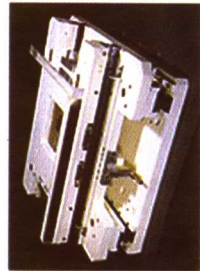
集成式 USM



彩色复印机



火星探测器



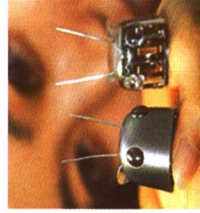
半导体制造业



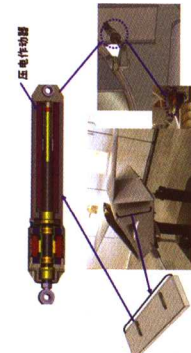
照相机



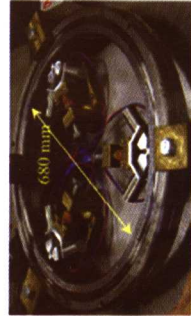
手表



昆虫机器人



变形机翼(应用压电作动器)



天文望远镜



空中机器人



太空机器人手

彩图 1 超声电机在国外已应用的领域



彩图 2 南京航空航天大学精密驱动研究所研制的部分超声电机及其应用

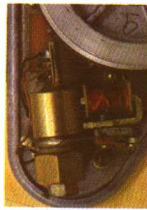


图 1.6

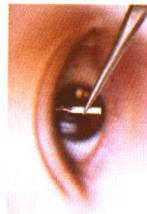


图 1.11



图 1.12



图 1.13

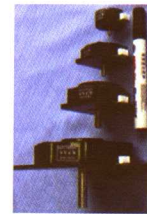


图 1.15(a)



图 1.15(b)



图 1.15(c)

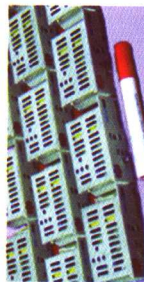


图 1.47



图 4.30



图 5.20(b)

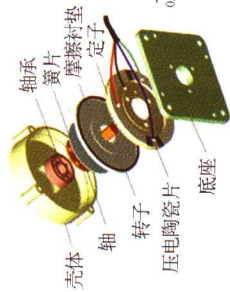


图 6.2

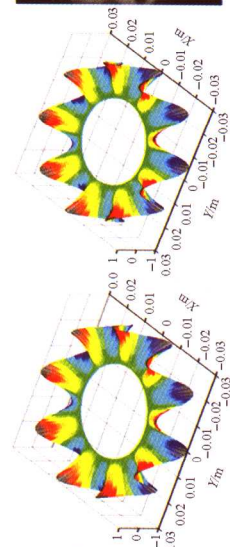


图 6.19(b)

图 6.19(a)

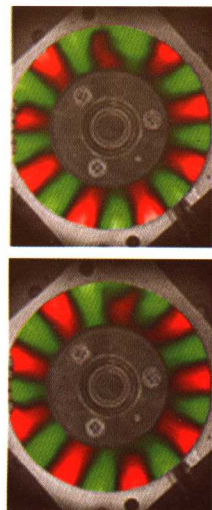


图 7.12(a)

图 7.12(b)

彩图 3 书中部分插图彩图

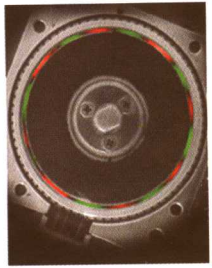


图 7.30 (a)



图 7.30 (b)

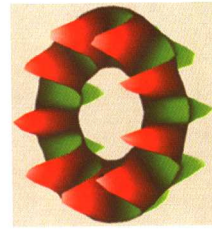


图 7.19

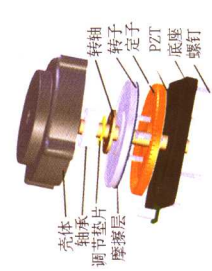


图 7.17

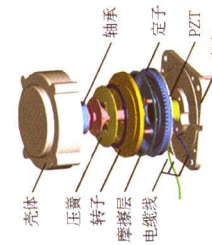


图 7.16



图 12.44(a)

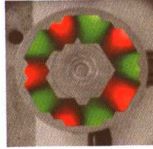


图 12.25 (b)

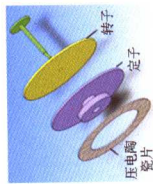


图 12.24 (b)

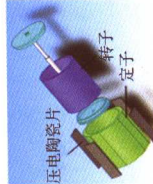


图 12.20

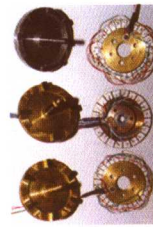


图 11.30



图 10.34

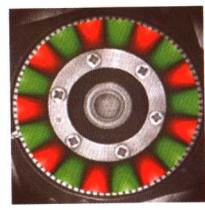


图 15.13

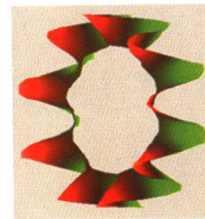


图 15.12 (图 7.18)

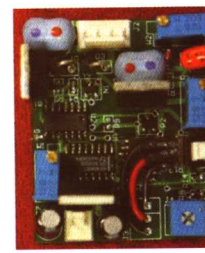


图 13.60

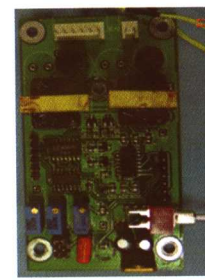


图 13.36



图 12.47

彩图 4 书中部分插图的彩图

序

“振动利用工程”是 20 世纪后半期逐步形成和发展起来的一门新兴科学,它是振动工程学科的一个重要分支,由于该学科在学术上的重要意义和实际应用上重要的价值,中国振动工程学会在本世纪初成立了“振动利用工程”专业委员会,并定期举行有关的学术会议和技术交流活动,以促进这个分支学科的理论与技术更广泛的应用和进一步的发展。

赵淳生院士是我国振动理论和应用学术界的知名专家,长期从事振动工程和振动利用工程方面的研究工作,取得了丰硕的理论与实际应用成果。

1992~1994 年,赵淳生教授在美国麻省理工学院(MIT)访问期间,一次有关超声电机的学术报告引起了他的极大兴趣,他敏锐地感觉到超声电机是一项典型的振动利用工程产品,为了发展我国的超声电机技术,他没有等到访问期满就提前回国,着手在国内继续开展超声电机的研究。1995 年春,他组织了包括教师、博士后、博士生和硕士生在内的“超声电机研究”课题组,不到一年的时间,就研制出我国结构完整的、能实际运转的行波型旋转超声电机,于 1996 年初通过了由航空工业总公司组织的鉴定;该项成果处于国内领先地位。在原课题组的基础上,1997 年他创立了南京航空航天大学超声电机研究中心。1999 年,他主持召开了“全国首届超声电机技术研讨会”,进一步推动了我国超声电机技术研究的热潮。

正值赵淳生教授超声电机研究工作蒸蒸日上的时刻,由于长期超负荷地工作,他积劳成疾,无情的癌症降临到他的身上。当时他的家庭成员和所有亲朋好友都劝他停止超声电机的研究工作,可是他坚决不同意。在与病魔斗争的日日夜夜里,他始终没有忘记超声电机事业,他躺在病床上完成了多份研究报告,并通过手机指导研究生和整个研究中心的工作。出院后,他无力爬楼到实验室上班,就把试验仪器搬到家中,和研究生们一同在他家里工作。令人十分惊奇和深感幸运的是,疾病不仅没有摧垮他的身体,反而日见康复。

“功夫不负有心人”,坚持 10 多年的艰苦努力,赵淳生教授和他领导的团队,在超声电机理论与技术的研究方面取得了一个个骄人的成果。先后研制出 20 多种具有自主知识产权的超声电机,授权和申请发明专利达 35 项,在国内外杂志和学术会议上发表论文 300 多篇。2003 年“超声电机研究”获国防科学技术一等奖;2004 年“新型超声电机技术”获国家技术发明二等奖。他们把我国的超声电机技术推进到国际先进水平,受到国内外同行的重视和关注,国内外著名专家对他们取得的成果给予了高度的评价。

该书是赵淳生院士及其科研团队 15 年来从事超声电机技术研究的总结和提炼,具有以下几个特点:

(1) 从超声电机所涉及的基本振动理论和波动理论出发,在超声电机的运动机理、机电耦合模型、结构参数优化设计、驱动与控制技术等方面提炼出系统的理论和设计方法。

(2) 将振动理论中的一些现代分析方法和技术引入超声电机机电耦合模型和优化设计中,创造性地应用了动态子结构法、结构动力修改技术以及模态识别和分离技术等。

(3) 揭示了超声电机研制中的许多关键技术,提出了相应的解决办法。例如,提出了一种有效的自动频率跟踪技术,解决了超声电机转速随温度升高而下降的难题;提出了应用于行波超声电机的“反共振点+恒流驱动”的论点,提高了超声电机的综合性能,等等。

(4) 从无到有,自行研制或与国内有关单位合作建立了一系列超声电机试验装置,提出了一整套关于超声电机零部件和整机的试验方法,并对各种新型超声电机进行了大量的试验研究。

(5) 该书理论密切联系实际。不仅有系统的理论和方法,而且在工程应用方面也做了大量研究工作,开展了以超声电机为执行器的定位和恒速的多变量控制技术的研究,包括把超声电机应用于二元机翼颤振抑制、核磁共振注射器、视觉目标的自动跟踪以及机器人,等等。

此外,著者在写作方面严肃认真,公式推导、试验数据和图表可信,便于参考与实际使用。

综上所述,该书是我国比较全面和系统地论述超声电机技术及其应用的优秀著作。全书贯穿着科学发展观和自主创新的指导思想。该书的出版将会大大促进我国超声电机技术的发展与应用,也将为世界超声电机技术的发展做出积极的贡献。

透过这本厚厚的近六百页的宏著,我作为赵淳生院士的多年挚友,深深地感受到呕心沥血的含义。在此谨用“老牛明知夕阳晚,不用扬鞭自奋蹄”共勉。

中国科学院院士

闻邦椿

2007年7月1日

前 言

超声电机是 20 世纪 80 年代迅速发展和应用的一种新型微电机。它与传统的电磁电机的工作原理不同,是一种基于压电效应和超声振动的高新技术产品。它的研究和试制涉及机械振动和波动、摩擦学、材料学、机械设计、电力电子学、自动控制和超精加工等众多学科,以及它们之间的相互交叉和相互融合。超声电机具有扭矩/质量比大、结构紧凑、低速大扭矩、响应快、电磁兼容性和控制性能好等优点,已在机器人、精密仪器仪表、医疗器械、航空航天以及新型武器装备等领域得到广泛的应用。

随着新材料、新工艺和新的结构形式的不断涌现,超声电机的构造和性能必将不断完善,逐步提高,因而它的应用范围必将不断扩大,从而在未来空天飞行器、武器装备、微机电系统(MEMS)中,以及在半导体制造技术、生命科学等领域中都将具有广阔的应用前景。

1992~1994 年,本书著者(以下简称著者)MIT 作访问学者,参与了该校航空航天系、电机与计算机系的超声电机研究工作。为了发展我国自己的超声电机技术,未及访问期满,便于 1994 年底提前回国。1995 年春,在南京航空航天大学(以下简称南航大),带领以博士后、博士生及硕士生为主体的课题组,开始了超声电机的研发工作。经过艰苦的努力,终于在 1995 年底,成功地研制出国内结构完整的、能实际运行的行波型旋转超声电机,并于 1996 年 1 月在中国航空总公司的主持下,通过了以东南大学教授冯纯伯院士为首的专家组的技术鉴定。1997 年,著者创立了南航大超声电机研究中心。1999 年,在国家自然科学基金委员会的大力支持下,在南航大主持召开了首次“全国超声电机技术研讨会”。2001 年,在江苏省发展和改革委员会的倡导和组织下,在原南航大超声电机研究中心的基础上,创建建立了江苏省超声电机工程研究中心。2006 年,在中心的基础上,成立了南京航空航天大学精密驱动研究所(以下简称本研究所,PDLab)。2007 年 9 月,即将由著者在南航大主持召开“第四届国际压电陶瓷材料及其在作动器上的应用研讨会”(The 4th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators)。

近 15 年来,著者及其领导下的科研团队,在新型超声电机运动机理、机电耦合模型、结构参数优化设计、驱动与控制技术等方面进行了系统而深入的研究,取得了一系列研究成果;研发成功 20 多种具有自主知识产权的新型超声电机及驱动器,授权和申请国家发明专利 35 项;在国内外杂志和会议上发表论文 300 余篇。

2003年,“超声电机研究”获国防科学技术一等奖;2004年,“新型超声电机技术”获国家技术发明二等奖;2004年,“超声电机技术”获第五届中国国际发明展览会金奖。这期间,培养了博士17名,硕士29名和博士后12名。

综观15年来的科研工作,著者及其团队在超声电机方面的研究成果主要体现在以下几个方面:

(1) 在超声电机理论方面:应用动态子结构理论建立了较为完善的行波型旋转超声电机的机电耦合模型,提出了考虑定子齿形和定、转子间径向滑动的新的摩擦界面模型,能精确预估超声电机的输出特性;提出了应用于行波型超声电机的“反共振点+恒流驱动”的新论点,在效率、发热和稳定性等综合性能上都优于传统的“共振点+恒压驱动”论点;提出了一种有效的频率自动跟踪控制方法,使行波型超声电机转速的不稳定度小于5%,解决了超声电机转速随温度漂移的难题;提出了解决圆环或圆板式定子近频模态混叠方法,提高了超声电机运行的稳定性;推导了杆式行波型超声电机的椭圆运动方程,提出了有效椭圆轨迹等概念,为该类超声电机的优化设计提供了理论依据。

(2) 在设计方法方面:提出了超声电机结构参数优化设计方法并研发了相应软件;将动态特性灵敏度分析和结构动力修改技术应用到超声电机设计中,提出了调节定子二相或多相工作模态频率一致的有效方法;提出超声电机中用来激励的压电陶瓷元件设计应依据定子的应变模态而不是位移模态;提出并实现了综合利用平面内、外不同类型的振动模式(伸缩、弯曲、扭转)设计各类超声电机的方法;指出超声电机转子柔性设计的重要性,并初步提出一些设计方法;提出步进超声电机的概念和设计准则。

(3) 在实验技术方面:从无到有自行或国内合作研制了一系列超声电机试验装置,提出了一些试验方法,解决了实验中的难题。其中包括:超声频段内具有微米级振幅的零部件面内、外模态试验;低转速、超声工作频率的超声电机机械特性试验;毫秒级超声电机启动和关断响应时间的测定;在实验室和生产线上预压力的精确测量装置和测量方法;定子/转子间动态摩擦力的测量装置和测量方法;超声电机寿命试验设备和试验方法;超声电机在极端环境下(真空、高/低温)的试验方法;以及新型摩擦材料的制备、性能测量方法及测量装置。

(4) 在工程应用方面:自行研制了TRUM和BTRUM两个系列超声电机,除了国防、医疗、精密仪器等领域应用之外,还为某些公司提供了样机,为在我国实现超声电机产业化创造了条件。与此同时,还开展了以超声电机为执行器的定位和恒速的多变量(速度、频率和相位)控制系统的研究,其中包括:二元机翼颤振抑制的超声电机定位控制系统;应用于核磁共振注射器的超声电机恒速控制系统;基于超声电机驱动的机器人模糊神经网络的复合控制系统;基于超声电机的视觉目标自动跟踪系统以及以超声电机为执行机构的便携式汽油发电机模糊控制系统。

本书在总结以上成果和创新点的基础上,还吸收了国内外该领域所取得的最新重要成果,使本书的内容更加充实和丰富。

全书共分 16 章。

第 1 章绪论,简要地叙述了超声电机技术的发展、特点和分类,以及国内外的应用概况。

第 2、3 章提供了超声电机在设计 and 试验中所必需的振动和波动理论。第 2 章首次详细提供了超声电机定子常用矩形板、圆形板、环形板以及圆柱壳等弹性体的位移振型、振型云图和应变振型;第 3 章证明了应变振型是超声电机所使用的压电激励元件极化分区设计的依据,并对驻波和行波的关系、模态叠加、模态分离、模态转换等概念及其应用作了较为详细的论述。

第 4 章扼要介绍了机械摩擦和超声电机用的摩擦材料。并根据著者多年来的研究经验,提出了超声电机对摩擦材料性能的要求。还给出了本研究所最近研制的两种新型摩擦材料的配方及其制备方法。

第 5 章对压电效应及压电材料作了扼要阐述,强调压电材料的特性对超声电机性能的影响,并提供了一些选取和制备超声电机所需要的压电材料的基本知识。

第 6~12 章分别叙述了圆板式行波型、杆式行波型、纵扭复合型、直线型、步进型、非接触型、离合器耦合型、表面波型等超声电机运动机理、机电耦合模型、结构优化设计方法以及其试验研究。这是本书的重点所在,比较集中地反映了著者及其团队多年来的研究成果,以及理论和应用上的创新点。

第 13、14 章论述超声电机驱动与控制技术。其中,第 13 章详细介绍了超声电机的驱动原理和设计方法,并提供了一个本研究所正在使用的驱动器线路图。第 14 章以本研究所研制的超声电机为作动器,应用现代多种智能控制技术,对自行研制的三关节机器人实例,进行了系统的研究。还首次公布了本研究所提出的一种有效的频率自动跟踪方法及其线路图。

第 15 章详细地介绍了超声电机所必须进行的各种试验,包括试验原理、试验方法、试验装置以及对试验结果的分析。

第 16 章在介绍目前国内外超声电机应用情况的基础上,展望了未来的应用前景。

参加本书著述和撰写的有李华峰、陈超、姚志远、朱华、杨颖、孙志峻、黄卫清、金家榴、时运来和杨淋等。本书还吸收了本科研团队其他研究人员以及历届博士后、博士生和硕士生的研究成果。他们是陈志华、曾劲松、祖家奎、李志荣、赵向东、魏守水、刘俊标、孙合明、鹿存跃、李朝东、杨明、张贵林、郭辉、许海、陶征、季叶、贺红林、朱美玲、金龙、张铁民、韩西京、陆永耕、沈寿林、纪跃波、董迎晖、刘剑、刘长青、熊振华、胡伟、王桂芹、陈乾伟、周斌、苏鹤玲、黄国庆、马相林、展凤江、李杰、张龙、郭浩、刘群亭、徐东良、苏娜、苏艳文、梁操、焦小卫、袁又春、白永明、顾文波、蔡铖尧、袁小红等。可以说,本书凝聚了以著者为首的科研团队的集体创造和智慧。

本书得到闻邦椿、温诗铸、钟掘、沈志云、王立鼎等院士和胡海岩、周铁英、辜承林、杨志刚、汪凤泉、裘进浩、戴振东等教授的审阅和指导。在本书付印前，孙平凡、张建辉两位教授应邀对本书在文字上作了精心的修改，为保证本书的质量提供了切实的帮助。在打印过程中，陈琪和王平两位副编审仔细地校对清样，力求使全书图表、单位、文字达到出版要求。博士生郑伟和张含蓄为本书制作了多幅插图。本研究所秘书史从云和著者办公室秘书丁毅以及南航大印刷厂为打印本书初稿和有关出版前的准备工作付出了辛勤的劳动！著者谨向上述所有人员和其他为本书出版提供过帮助的人一并致以衷心的感谢！

应该特别强调，本书涉及的研究成果大部分取自著者及其团队承担的国家自然科学基金重点项目（编号 50235010）和面上项目（编号 59775048、59877007、59902002、50005010、50175050、90405010、50407004、50575103、50675098、10604032）、863 高技术项目以及省、部级基金项目。在此特向国家自然科学基金委员会和其他资助部门表示深切的谢意！

还要借此机会，特别感谢曾经对我们的研究工作十分关心和热情支持过的院士和教授们。他们是：杨叔子、陈达、冯纯伯、齐康、沈国荣、宋玉泉、龚惠兴、蔡鹤皋、熊有伦、周尧和、汪承灏等院士和姜澄宇、王占林、熊诗波、雷源忠、黎明、黄斐梨、王国彪、薛万荣、王树林、孙庆鸿、董蜀湘、郭吉丰、郭万林、郑万泔、周传荣、孙良新、昂海松、熊克、夏品奇、陈卫东、朱春玲等教授。

要特别感谢我的导师张阿舟教授，感谢他多年来对我们的研究工作的大力支持和热情指导，感谢他在超声电机研究初期给我的鼓励和帮助！

要特别感谢的单位有：国防科工委、江苏省发展和改革委员会、江苏省科技厅、江苏省教育厅、南京市科技局、贵阳林泉电机厂、无锡海鹰集团公司、常州宏华电子股份有限公司、苏州汉宁电子（苏州）股份有限公司、江苏省联能电子技术有限公司、西安创联超声电机技术有限公司以及南航大党政机关等。

最后，还要衷心感谢我的夫人王凤英女士、女儿赵颖博士和女婿周楚新博士，感谢她（他）们多年来对我的事业上的支持和理解，生活上的关心和体贴，精神上的鼓励和安慰！

由于知识水平有限，加上本书所述内容均是发展中的高新技术，书中难免有不妥甚至错误之处，恳请广大读者批评、指正！

赵淳生

2007年6月30日

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 超声电机的发展	1
1.2 超声电机的特点及其分类	6
1.3 超声电机与电磁电机的比较.....	11
1.4 超声电机的应用和发展趋势.....	14
参考文献	19
第 2 章 弹性体的固有振动	23
2.1 均匀梁的固有振动.....	23
2.2 均匀薄板的固有振动.....	38
2.3 圆柱壳体的固有振动.....	53
参考文献	57
第 3 章 弹性体的强迫振动	60
3.1 单自由度系统强迫振动特性.....	60
3.2 均匀杆的纵向强迫振动.....	63
3.3 均匀梁的横向强迫振动.....	72
3.4 均匀薄板的强迫振动.....	79
3.5 在弹性体中传播的波动.....	85
3.6 模态转换及其应用.....	91
参考文献	94
第 4 章 机械摩擦及超声电机用的摩擦材料	97
4.1 机械摩擦.....	97
4.2 超声电机用的摩擦材料	105
4.3 摩擦材料对超声电机性能的影响	109
4.4 摩擦材料性能测试及其耐磨性试验	120
参考文献.....	126
第 5 章 压电材料及其在作动器上的应用	128
5.1 压电材料的分类	129
5.2 压电材料的性质与压电方程	130

5.3	压电振子的振动模式	136
5.4	压电陶瓷材料的主要参数及其测量	141
5.5	超声电机用的压电陶瓷材料	145
5.6	压电材料及其在作动器上的应用	152
	参考文献	158
第6章	行波型旋转超声电机的机电耦合模型	161
6.1	行波型旋转超声电机的运动机理	162
6.2	基于子结构法的定子半解析机电耦合模型	174
6.3	定/转子接触模型	186
6.4	行波型旋转超声电机的机电耦合模型及仿真	193
	参考文献	200
第7章	行波型旋转超声电机的设计与制造	203
7.1	结构设计及其材料的选取	203
7.2	压电陶瓷元件设计和采用等分的极化分区	208
7.3	定子模态分离技术	210
7.4	定子两相模态频率一致性调节方法	215
7.5	柔性转子设计	219
7.6	超声电机等效电路模型及其应用	226
7.7	行波型旋转超声电机设计的一般过程	233
7.8	行波型旋转超声电机制造技术	234
	参考文献	236
第8章	杆式行波型旋转超声电机	239
8.1	杆式行波型超声电机的发展	239
8.2	单自由度杆式电机定子的结构和运动机理	241
8.3	单自由度杆式电机定子的优化设计	246
8.4	单自由度杆式电机的性能仿真	257
8.5	多自由度杆式电机的运动机理	261
8.6	多自由度杆式电机定子的优化设计	264
8.7	多自由度超声电机的性能测试	267
8.8	多自由度超声电机的驱动与控制技术	270
	参考文献	274
第9章	纵扭复合型超声电机	277
9.1	纵扭复合型超声电机的研究现状	277
9.2	振子多模态型超声电机	280
9.3	振子单模态型超声电机	303

9.4 模态转换型超声电机	305
参考文献	310
第 10 章 直线型超声电机	313
10.1 直线型超声电机的发展	314
10.2 基于面内模态的直线型超声电机	317
10.3 基于面外模态的直线型超声电机	328
10.4 双驱动足大推力直线型超声电机	334
10.5 惯性式直线型超声电机	342
10.6 直线型超声电机的并联技术	348
参考文献	350
第 11 章 步进超声电机	353
11.1 可调步距型步进超声电机	354
11.2 定步距型步进超声电机	362
11.3 纳米步距型步进超声电机	383
参考文献	387
第 12 章 其他类型压电电机	390
12.1 非接触型超声电机	390
12.2 离合器耦合传动型压电电机	402
12.3 直线型表面波电机	413
参考文献	422
第 13 章 超声电机驱动技术	426
13.1 频率发生器	427
13.2 分频分相器	430
13.3 基于 DDS 正弦信号发生器	434
13.4 驱动信号的功率放大技术	436
13.5 超声电机脉冲变压器的设计	439
13.6 匹配电路对超声电机性能的影响	442
13.7 市电驱动的超声电机驱动器	451
13.8 无变压器式谐振升压电路	456
13.9 超声电机驱动技术的发展趋势	462
参考文献	463
第 14 章 超声电机控制技术	465
14.1 超声电机控制的分类	465
14.2 超声电机调速机理与控制方式	466
14.3 超声电机稳定性控制技术	469

14.4	超声电机的伺服控制技术·····	479
14.5	超声电机控制技术的发展趋势·····	500
	参考文献·····	501
第15章	超声电机试验技术 ·····	504
15.1	零/部件模态试验·····	505
15.2	预压力试验·····	511
15.3	瞬态特性试验·····	513
15.4	机械特性试验·····	516
15.5	环境试验·····	520
15.6	寿命试验·····	527
	参考文献·····	531
第16章	超声电机在工程中的应用 ·····	534
16.1	在照相机、手机等精密装置上的应用·····	535
16.2	在大型结构系统中的应用·····	540
16.3	在工程中的应用前景·····	551
	参考文献·····	554
	主要符号表·····	556
	附录·····	559