

超声波电机原理与设计

胡敏强 金龙 顾菊平 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是有关超声波电机原理与设计的专著,是以东南大学“超声波电机及其控制研究”课题组近十多年来的科学研究工作为基础编著而成。内容涉及超声波电机的原理、设计理论与方法、性能分析模型、驱动控制系统、样机制造和测试等各个方面。书中的大部分内容是作者们科研成果的总结。

全书共分 11 章,书中对各种结构超声波电机的原理、分析和设计方法,驱动控制系统、样机设计和制作、测试原理和方法等一一做了相应的介绍。第 1 章是绪论,对超声波电机及应用的研究历史、现状和未来作了介绍和展望;第 2~4 章对超声波电机的基础理论和数学模型进行了介绍;第 5~7 章对行波超声波电机的分析设计及其驱动控制进行了介绍;第 8 章介绍了圆柱定子超声波电机;第 9 章介绍了步进超声波电机;第 10 章介绍了直线超声波电机;第 11 章对超声波电机的样机制作主要技术、测试技术及测试结果进行了介绍。

本书可供从事超声波电机研究及其应用的科技人员和高等学校有关专业教师阅读参考,特别适于作为电气工程、机械振动、自动控制等专业研究生、本科高年级学生和工程技术人员的科研参考资料,也可作为了解和掌握超声波电机的专门教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

超声波电机原理与设计/胡敏强,金龙,顾菊平编著. —北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-015344-8

I. 超… II. ①胡…②金…③顾… III. 超声波-电机 IV. TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 030264 号

责任编辑:巴建芬 朱海磊 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 9 月 第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2005 年 9 月 第一次印刷 印张: 19 1/2 插页: 2

印数: 1—2 000 字数: 375 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

超声波电机(ultrasonic motor, USM)是国内外日益受到重视的一种新型直接驱动电机。与传统的电磁式电机不同,超声波电机没有磁极和绕组,不依靠电磁介质来传递能量,而是利用压电陶瓷的逆压电效应,通过各种伸缩振动模式的转换与耦合,将材料的微观变形通过共振放大和摩擦耦合转换成转子或者滑块的宏观运动。在其研究和发展过程中,曾有很多不同的命名,如振动电机、压电电机、声表面波电机、超声马达等,现在国内比较常用的称谓是超声电机或超声波电机。超声波电机具有功率密度大、无电磁干扰、低速大转矩、动作响应快、运行无噪声、无输入自锁等卓越特性,在非连续运动领域、精密控制领域要比传统的电磁电机性能优越得多。超声波电机在工业控制系统、汽车专用电器、超高精度测量仪器、办公自动化设备、智能机器人等领域有着十分广阔的应用前景,近年来备受科技界和工业界的重视,是当前非连续驱动控制领域的一个研究热点。

利用电致伸缩或压电振子产生的强力超声振动能量作为动力的尝试早在 20 世纪 40 年代就有人提出,但碍于当时功能材料及技术上的难题,这一设想没有能够实现。从 20 世纪 60 年代起,包括原苏联、德国、美国、日本等国在内的研究人员相继开展了超声波电机的研究,这些探索为超声波电机走向实用化奠定了理论和实验研究的基础。1982 年,日本新生公司的指田年生研制成功的振动片型超声波电机和行波型超声波电机,引起了众多公司和大学的兴趣,包括新生、松下、佳能、日电等公司和东京工业大学、山形大学、东北大学、神奈川工大学、东京大学等高校共约 40 余家单位相继对超声波电机进行研究和开发,从而使超声波电机进入大规模的实验研究和实用化开发阶段。各种结构的超声波电机不断被提出,驱动控制电路、应用产品专利也不断地出现。1987 年,佳能公司将其开发的环形行波超声波电机正式应用于 EOS 相机自动调焦系统,月需量 2 万~3 万个,使超声波电机的研究开发达到高峰。日本在超声波电机方面的成功引起了其他国家的充分重视,英、法、美、德、中等国纷纷于 20 世纪 80 年代末投入到超声波电机的研究行列中。

我国在超声波电机的研究方面虽然起步较晚,但发展迅速,先后有多个单位开展了超声波电机的研究,在超声波电机的设计理论、制造技术、控制策略和性能分析等方面的研究上取得了突破性的研究成果,已开发研制了多种具有实用价值的样机,有的已经在工程上得到了应用。

东南大学“超声波电机及其控制研究”课题组在胡敏强教授的带领下,从 1994 年开始对超声波电机设计理论、控制技术、性能分析、样机制造、测试方法及产业化关键技术等方面开展了较深入的研究工作,取得了一系列研究成果。

在设计理论上,对各种形式超声波电机的数学模型、运行性能进行了定性分析

和定量计算,给出了超声波电机机电耦合能量转换模型和等效电路分析模型。利用有限元分析方法,建立了超声波电机定子模型,从而实现了超声波电机性能的工程计算及结构的优化设计,较好地解决了设计计算中的若干理论和技术难题。

在样机制造技术上,基于超声波电机定子振动有限元分析法,详细分析了黏结层对超声波电机定子振动特性的影响。通过对压电陶瓷机电耦合效应的分析计算,给出了黏结层厚度、黏结材料特性与定子表面质点运动轨迹之间的关系,确定了超声波电机黏结层材料特性要求及黏结层厚度的范围。针对由于黏结层的原因引起超声波电机定子制作质量不稳定这一难题,指出了黏结过程中必须注意的问题;同时,在超声波电机制造工艺、性能测试方面,提出了切实可行的方案;提出了环形行波超声波电机及其控制器的技术质量标准,并通过了江苏省技术监督局的论证,较好地解决了超声波电机生产制造技术中的部分关键技术难题。

在控制策略上,根据超声波电机等效电路模型,进行了驱动控制系统的仿真和试验,提出采用反馈控制、相位差控制和脉宽调制控制的控制策略,实现了电机的正反转、调速、步进以及位置的控制;研究了超声波电机闭环控制技术,在位置和速度控制方面提供了可行方案,为超声波电机优越性能的发挥提供了技术保障。

在实践应用上,研制了多种具有实用价值的超声波电机及其控制系统,形成了较为完整的设计方法和样机制造技术,开发了相关的设计软件和性能仿真程序,为超声波电机的产业化生产及其应用奠定了基础。

本书是东南大学“超声波电机及其控制研究”课题组近 10 年来研究成果的总结。先后参加本课题研究工作的有金龙博士、顾菊平博士、石斌博士、莫岳平博士、徐志科博士、王心坚博士、何小虎硕士、褚国伟硕士、施一峰硕士、翟晓军硕士、陈慧硕士、王敏才硕士、张华硕士,以及杜炎森教授、秦申蓓副教授等。本书涉及的研究工作,得到了 20 余个科研基金和项目的支持,它们是:国家自然科学基金、教育部优秀青年教师基金、江苏省科技厅自然科学基金和青年科学基金、江苏省“333”工程基金、江苏省“青蓝工程”基金、江苏省教育厅产业化基金和高校自然科学基金、江苏省发展与改革委员会高新技术发展基金、江苏省博士后基金等。

在此,课题组向国家自然科学基金委员会、教育部、中共江苏省委、江苏省发展与改革委员会、江苏省科技厅、江苏省人事厅、江苏省教育厅、南京市科技局、南通市科技局、宁波市科技局、国家电力公司南京自动化股份有限公司、东南大学、西安微电机研究所、南通大学等单位给予经费、资料和试验等方面的支持表示衷心的感谢!特别感谢国家电力公司南京自动化股份有限公司总经理吴济安先生和徐进亮先生,他们对本课题所涉及的产业化研究工作给予了大力支持和帮助;东南大学郑建勇教授、胡仁杰教授长期支持本课题的研究,在工作中进行了许多有益的探讨和帮助。

本书由胡敏强教授统一规划、修改补充并最后定稿,金龙副教授和顾菊平副教

授直接参加了本书的编写,博士生徐志科、王心坚做了大量的文字工作,硕士生施一峰、陈慧、褚国伟、翟晓军、张华、王敏才等参与本书的整理和图表绘制。在编写本书过程中,曾参阅了大量的国内外学术专著、教材、论文和文献资料,以及胡敏强教授指导的各届博士生和硕士生的学位论文,主要的已全部列入参考文献目录,以便希望进一步了解相关研究工作的读者查阅。在此,向上述所有学术著作、学术论文和学位论文的作者表示衷心的感谢!

东南大学赵家璧教授认真审阅了全稿,对本书的编写和修改提出了许多建设性的意见;科学出版社的编辑对本书的编写给予了具体指导和帮助,作者在此致以衷心的感谢!

由于超声波电机及其控制技术的研究还处于发展阶段,书中的一些研究成果和结论还在发展之中,书中难免有不完善和错误之处,敬请各位专家和读者予以批评指正。

作 者

2005年1月于东南大学

主要符号表

a	赫兹接触宽度;定子圆环截面宽度	F_T	定转子滑动摩擦力
A	力系数	F_t	定转子接触面切向模态合力向量
A_p	压力分布常数	F_n	定转子接触面垂直模态合力向量
b	压电陶瓷的宽度	g, g_{ij}	压电电压常数矩阵及其元素;机械振动模态位移矩阵及其元素
c, c_{ij}	弹性刚度常数矩阵及其元素	G	剪切模量
c^E	恒定电场强度下刚度常数矩阵	h, h_{ij}	压电刚度常数矩阵及其元素
C_d	压电振子的夹持电容	h_0	压电陶瓷底部至弹性体中性层距离
C_m	压电振子的等效电容	h_p	压电陶瓷厚度
C_p	压电电容矩阵	h_m	金属梁厚度
C_0	压电陶瓷的静态电容	h_c	无齿金属梁厚度
d, d_{ij}	压电应变常数矩阵及其元素	h_s	黏结层厚度
D	电位移;阻尼	h_t	齿高
D	圆柱定子直径;占空比;阻尼系数	h	压电振子总厚度
e, e_{ij}	压电应力常数矩阵及其元素	I_J	横截面的二次惯性矩
E	电场强度	k	弹性波振动的波数
E_e	定子的电场能	k_c	周向接触比
E_k	定子的动能	k_{me}	压电材料的机电耦合系数
E_p	定子的势能	k_r	转子弹性刚度
E_Y	杨氏模量	K	刚度矩阵
E_{Ym}	金属梁的弹性模量	L	定子环圆周长,拉格朗日能量函数
E_{Yp}	压电陶瓷的弹性模量	L_m	压电振子的等效电感
f_{0n}	定子 n 阶谐振频率	L_{mech}	映射算子矩阵
f_m	谐振频率	M_{int}	电机接触界面的转矩
f_n	反谐振频率	M_L	电机负载转矩
f_s	串联谐振频率	M_r	电机输出转矩
f_p	并联谐振频率	M_{rb}	电机堵转力矩
F	机械端输出力	$M_{rb_{max}}$	电机最大堵转力矩
F	界面广义力矩阵	M_{rh}	电机保持力矩
F_B	加在转子上的摩擦力	M	质量矩阵
F_{int}	定转子界面接触力		
F_N	预压力;正压力		

n	周向振动模态阶数;转子转速	β^S	恒定机械应变下的介电隔离常数矩阵
n_0	空载转速	δ	压电陶瓷的损耗角
$p(x), p(r, \theta, t)$	定子压力分布函数	δW	外力所做功的变分
P_1	电机功率损耗	$\varepsilon, \varepsilon_{ij}$	介电常数矩阵及其元素
P_m	电机输出机械功率	ε^T	恒定机械应力下的介电常数矩阵
$P_{m \max}$	电机最大输出机械功率	ε^T	自由介电常数
Q_b	复合梁的品质因数	ε^S	恒定机械应变下的介电常数矩阵
Q_e	电学品质因数	ε^S	夹持介电常数
Q_m	机械品质因数	Φ_{mech}	机械振动模态矩阵
Q_p	压电陶瓷的品质因数	γ	泊松比
r	定子环平均半径	γ_1	定子的泊松比
r_0	定子支撑内径	γ^2	转子材料的泊松比
r_1	压电振子内径	η	复合梁的损耗系数
r_2	压电振子外径	η_p	电机机械输出的效率
R_d	介质损耗电阻	η	压电陶瓷损耗系数
R_m	压电振子损耗电阻	λ	行波波长
S, S_{ij}	机械应变矩阵及其元素	μ^d	滑动摩擦系数
s, s_{ij}	柔度矩阵及其元素	μ_s	静态摩擦系数
$\frac{E}{S}$	恒定电场强度下的柔度矩阵	ρ_p	压电陶瓷密度
T, T_{ij}	机械应力矩阵及其元素	ρ_s	定子密度
T_m	金属梁应力	ω_0	转子空载角速度
T_p	压电陶瓷应力	ω	转子角速度
U_p	压电陶瓷势能	ω_{\max}	转子的最大角速度
U_b	复合梁势能	ξ	横向振动位移
v_r	转子速度	ξ^A	A 相横向振动的振幅
v_{rx}	定子表面质点运动的纵向速度	ξ^B	B 相横向振动的振幅
v_{rz}	定子表面质点运动的横向速度	ζ	纵向振动位移
V	电压;体积	Θ	机电耦合矩阵
w	弯曲挠度, 横向位移		
β^T	恒定机械应力下的介电常数矩阵		

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 超声波电机及其控制的发展历史与现状	1
1.1.1 超声波电机的发展简史	1
1.1.2 超声波电机控制技术的发展简史	6
1.1.3 超声波电机的研究现状	9
1.2 超声波电机的分类	11
1.2.1 驱动方式	11
1.2.2 机械振动获取方式	11
1.2.3 定转子接触方式	11
1.2.4 定子表面椭圆运动获取方式	12
1.3 超声波电机的特点和应用	13
1.3.1 与传统电磁电机的比较	13
1.3.2 超声波电机的特点	15
1.3.3 超声波电机及其驱动控制存在的不足	16
1.3.4 超声波电机的应用	17
参考文献	20
第 2 章 压电陶瓷和压电振子的特性	25
2.1 压电陶瓷及压电效应	25
2.2 压电方程	26
2.2.1 介电特性	26
2.2.2 弹性特性	27
2.2.3 机电耦合	29
2.2.4 振动模态	30
2.2.5 压电方程	32
2.2.6 描述压电材料物理特性的重要参数	32
2.3 压电振子及其等效电路	35
2.3.1 压电陶瓷的系统方程	35
2.3.2 等效电路模型	37
2.3.3 压电振子的谐振特性分析和参数辨识	39
2.4 圆板的振动分析	41
2.4.1 圆板的自由振动	41
2.4.2 圆板内的行波运动	44

参考文献	45
第 3 章 行波超声波电机的运动机理	46
3.1 行波超声波电机的结构	46
3.2 行波超声波电机的运动分析	47
3.2.1 定子行波的产生	47
3.2.2 定子表面质点的椭圆运动轨迹分析	49
3.2.3 共振频率与共振振幅的计算	51
3.3 行波超声波电机的定转子间接触模型	56
3.3.1 线接触、库仑摩擦模型	57
3.3.2 面接触、库仑摩擦模型	60
3.3.3 赫兹接触模型	65
3.4 行波超声波电机的等效电路分析	69
3.4.1 机械系统-电学系统的对应关系	69
3.4.2 自由定子单相等效电路	70
3.4.3 整体等效电路	70
3.5 极限性能估计	72
3.5.1 性能限制因素	72
3.5.2 极限性能估计	73
参考文献	74
第 4 章 行波超声波电机的运动方程及其仿真	75
4.1 定子模型的基本假定和运动方程	76
4.1.1 应变-应力关系	79
4.1.2 应变-位移关系	80
4.1.3 电场-电压关系	81
4.1.4 电能所做的功	82
4.2 定转子的接触界面模型	83
4.3 转子的运动方程	84
4.4 行波超声波电机系统的数学模型及仿真	85
4.4.1 数学模型	85
4.4.2 系统的模型仿真	86
4.5 超声波电机接触模型仿真	89
4.5.1 接触模型	89
4.5.2 模型仿真	90
4.5.3 实验结果	92
4.6 定子的有限元分析及仿真	92
4.6.1 有限元分析方法	93
4.6.2 超声波电机定子的有限元分析	94
4.6.3 定子的模态分析	95

4.6.4	定子的谐响应分析	96
4.7	黏结层对定子振动的影响	96
4.7.1	黏结层厚度对振动模式的影响	96
4.7.2	厚度对表面质点运动影响	97
	参考文献	100
第5章	环形行波超声波电机的分析与设计	102
5.1	超声波电机的分析方法	102
5.1.1	等效电路方法	102
5.1.2	解析方法	103
5.1.3	有限元方法	104
5.1.4	超声波电机分析中的技术难点	105
5.2	环形行波超声波电机的设计方法	105
5.3	一种环形行波超声波电机的综合设计方法	106
5.4	环形行波超声波电机定子的设计	109
5.5	环形行波超声波电机转子的设计	113
5.5.1	转子的柔性	113
5.5.2	定转子径向弯曲配合	114
5.5.3	摩擦层的设计	116
5.6	设计方法的应用	116
	参考文献	118
第6章	行波超声波电机的驱动	120
6.1	行波超声波电机驱动电路特点	120
6.2	开关逆变型驱动电路	121
6.2.1	三种开关驱动电路	121
6.2.2	推挽型开关驱动电路的设计	123
6.3	线性放大型驱动电路	126
6.4	超声波电机的电匹配	129
6.4.1	匹配电路及其对超声波电机共振性能的影响	129
6.4.2	匹配电路的实现	132
6.5	谐振升压式驱动电路	135
	参考文献	139
第7章	行波超声波电机的控制	140
7.1	行波超声波电机的控制特点及控制策略	140
7.1.1	行波超声波电机的控制特点	140
7.1.2	行波超声波电机的控制策略	144
7.2	行波超声波电机的速度控制	145
7.2.1	行波超声波电机速度稳定性控制	145

7.2.2	行波超声波电机速度精确控制系统的硬件系统设计	151
7.2.3	行波超声波电机速度精确控制的算法实现	153
7.3	行波超声波电机定位控制	159
7.4	两自由度机械臂的超声波电机控制系统	162
	参考文献	167
第 8 章	圆柱定子超声波电机的分析与设计	169
8.1	栓固定兰杰文振子	169
8.2	圆柱定子弯曲振动超声波电机的分析与设计	170
8.2.1	圆柱定子超声波电机结构特点与运行机理	171
8.2.2	短圆柱定子超声波电机的分析与设计	175
8.2.3	短圆柱定子超声波电机优化设计与性能测试	181
8.3	圆柱定子纵、扭复合振动超声波电机的分析与设计	184
8.3.1	圆柱定子纵、扭复合型超声波电机的基本结构	184
8.3.2	圆柱定子纵、扭复合型超声波电机定子表面椭圆运动的形成及运动机理	186
8.3.3	圆柱定子纵、扭复合型超声波电机结构的设计	189
8.4	圆柱定子球转子多自由度超声波电机的分析与设计	192
8.4.1	圆柱定子三自由度球转子超声波电机研究的意义及存在问题	192
8.4.2	圆柱定子三自由度球转子超声波电机理论分析	195
8.4.3	圆柱定子三自由度球转子超声波电机的任意两相的几何学运动机理	198
8.4.4	圆柱定子三自由度球转子超声波电机的合成运动轨迹	202
8.4.5	圆柱定子三自由度球转子超声波电机的定子阻抗特性	206
8.4.6	圆柱定子三自由度球转子超声波电机的驱动控制	207
8.4.7	基于 DSP 的圆柱定子三自由度球转子超声波电机的驱动控制	209
8.4.8	圆柱定子三自由度超声波电机的应用	213
	参考文献	214
第 9 章	步进超声波电机的分析与设计	216
9.1	自校正超声波电机的发展和特点	216
9.2	同相驱动的超声波电机	217
9.2.1	工作原理	218
9.2.2	结构设计	219
9.3	多相式步进超声波电机的机理与设计	219
9.3.1	步进运动机理	220
9.3.2	步进超声波电机的设计	222
9.3.3	定子的有限元分析	224
9.4	多相步进超声波电机的参数优化设计	226
9.4.1	半步驱动的多相步进超声波电机的原理	226
9.4.2	大步距角控制	228
9.5	步进超声波电机的驱动控制和实验	229

9.5.1	步进超声波电机的驱动	229
9.5.2	步进超声波电机的控制	230
9.5.3	步进超声波电机的试验	233
	参考文献	235
第 10 章	直线超声波电机的分析与设计	237
10.1	直线超声波电机简介	237
10.2	模态耦合型直线超声波电机	239
10.2.1	模态耦合型直线超声波电机基本结构	239
10.2.2	模态耦合型直线超声波电机的运行机理	240
10.2.3	模态耦合型直线超声波电机共振模态的简并	243
10.3	驻波型直线超声波电机	244
10.3.1	直线超声波电机的运动机理	244
10.3.2	直线超声波电机定子梁的振动分析	246
10.3.3	实验验证	247
	参考文献	248
第 11 章	超声波电机的制造技术及测试技术	250
11.1	超声波电机的制造技术	250
11.1.1	工艺流程	250
11.1.2	工艺要求	251
11.1.3	黏结过程	252
11.1.4	引线过程	252
11.1.5	装配过程	253
11.1.6	时效处理	253
11.2	超声波电机的测试技术	253
11.2.1	自由定子的阻抗测试	253
11.2.2	压电陶瓷参数的测量	255
11.2.3	定子的振型和振幅测量	256
11.2.4	转子预压力测量	257
11.2.5	阻抗自动测试系统	258
11.2.6	性能测试	263
11.2.7	噪声测试	266
11.3	性能测试结果及实验分析	266
11.3.1	自由定子的动态阻抗测试	266
11.3.2	振动测量	266
11.3.3	阻抗特性测试结果及分析	267
11.3.4	超声波电机的性能测试	271
	参考文献	278
附录 A	279
附录 B	283

第 1 章 绪 论

在电子信息技术及控制技术迅速发展的今天,系统中必不可少的实现驱动和控制的微电机伺服系统,在很大程度上决定了系统整体性能的优劣。为适应灵活性、快速性、简便性控制的要求,多年来国内外科技界和工业界就一直致力于研究各种新型微电机。其中,性能卓越的超声波电机利用压电陶瓷逆压电效应产生超声振动,并将这种振动通过摩擦耦合来直接驱动转子或滑块的旋转,它作为一种直接驱动电机从 20 世纪 80 年代以来备受各国科研工作者的青睐,已成为当前机电控制领域的一个研究热点。本章结合压电陶瓷的发展历程,全面介绍了超声波电机的发展历史、特点、分类、应用,以及研究超声波电机及其驱动控制技术的重要意义;在分析了超声波电机研究历史和现状的基础上,结合国内外超声波电机技术的发展趋势,论述了超声波电机及其驱动控制技术的研究及其进展。

1.1 超声波电机及其控制的发展历史与现状

1.1.1 超声波电机的发展简史

超声波电机是多学科交叉的产物,涉及机械、声学、振动、材料、摩擦、电力电子及自动控制等多学科领域。超声波电机制造技术是随着以上学科的发展而发展的,是随着各种新结构、新原理超声波电机的出现而逐渐完善的。如压电陶瓷等新材料科学与技术的发展促进了实用超声波电机的研究,电力电子及控制学科和技术的发展完善了超声波电机驱动控制技术及其控制设备的实用化研究和生产。超声波电机的发展可分为三个阶段,即超声波电机概念阶段、具有实用前景的样机阶段和产业化生产及应用阶段。1942~1970 年为理论基础研究及实验室原理样机研究阶段;20 世纪 70~80 年代中期进入实用产品的研制阶段;1987 年下半年开始进入工业应用阶段。

自 1880 年居里夫妇发现压电效应以来,压电学已成为现代科学与技术的一个重要领域,它研究的是机电相互作用及能量的耦合和转换,对晶体结构的对称性与压电和铁电性的关系有较为深刻的认识,但压电换能器最早应用于工程的仅有作为滤波器件的石英晶体谐振器,压电效应在工程中的应用也只局限于水声和电声器件^[1]。

直到 20 世纪 40 年代初期,美国和原苏联的科学家几乎同时发现了 BaTiO_3 陶瓷的铁电性,而 BaTiO_3 铁电性的发现无论在理论上还是在应用上对压电陶瓷的

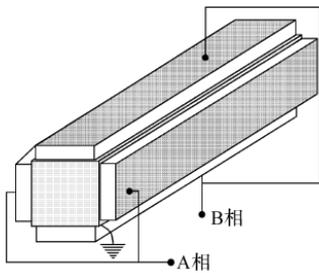


图 1-1 第一个超声波电机模型的专利

发展均具有重要意义。1942 年,美国学者 A. Williams 和 W. Brown 申请了第一个超声波电机模型的专利(压电电机)^[2],其结构如图 1-1 所示,四片压电陶瓷分为两组粘接在截面为正方形的长条弹性体的四个侧面上,对其施以两相交变电压激励,能够在长条弹性体中激励起两个方向和频率相同的弯曲振动,从而在弹性体端部质点形成椭圆摇摆运动,此椭圆摇摆运动就可驱动压于其上的转子或移动体。

1947 年, S. Robert 发现在 $BaTiO_3$ 陶瓷上加直流偏压,呈现强的压电效应,撤除外场后仍持续显示这种效应,从而为压电陶瓷的广泛应用揭开了序幕。1954 年贾菲等发现锆钛酸铅(PZT)系固溶体在多元相界附近具有良好的压电、介电性能,其机电耦合系数接近 $BaTiO_3$ 陶瓷的一倍,其他电学、力学、压电性能及稳定性也都有不同程度的改善,使压电陶瓷的应用从传统的滤波器及换能器扩展到压电变压器、引燃引爆装置、超声延迟线等。1956 年 B. T. Mattias 发现了三硫酸甘氨酸(TGS)晶体的铁电性,并应用在激光、红外技术中^[1]。1961 年,日本的 Bulova 钟表公司开始出售一种利用音叉的往复位移拨动棘轮而获得驱动的钟表,月误差仅为 1min,这种超声波电机技术在当时十年内是领先的^[3],其驱动机构如图 1-2 所示。从 20 世纪 60 年代起,前苏联的科学家也开始了超声波电机的研究^[4]。1963 年, M. E. Archangelskij 设计了一台利用轴向、弯曲耦合振动的振动片型超声波电机,根据振动合成和间断接触理论解释了超声波电机的工作原理。1964 年,原苏联的 V. V. Lavirenco 利用压电陶瓷片制作了第一台旋转超声波电机,并用等效电路的方法分析了压电陶瓷片的振动。

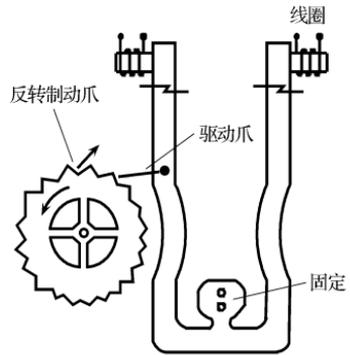


图 1-2 音叉钟表的驱动机构

1970 年前后, G. H. Haertling 和 C. E. Land 将掺 La 的 PZT (PLZT) 经过通氧热压工艺制成透明陶瓷,并发现其双折射和光散射可由外电场控制,使压电陶瓷进入了过去由单晶独占的电光领域。1971 年, A. H. Meitzler 等将这种材料制成图像存储显示器,利用电控双折射和电控光散射效应,使压电陶瓷可以制成各种电光器件,如光阀、光闸、光存储、映像存储显示器、偏光器、光调制器件等^[1]。1972 年前后,德国西门子公司和日本松下公司研制出了利用压电谐振工作的直线驱动机械,其谐振频率约几十千赫兹,但振幅较小,无法获得大的转矩和输出功率,松下公司为此电机申请了专利,这也是超声波电机的第一个有样机的专利^[5]。1973 年, IBM

公司的H. V. Barth提出了如图 1-3 所示的超声波电机^[6],该电机有两个分置左右的楔形超声振子,两个角型驱动足由 PZT 提供振动,其前部置压在转子上,保持摩擦接触。当激励其中左边的振子时,转子顺时针转动;激励右边的振子时,转子逆时针转动。与此同时,原苏联的 V. V. Lavrinenco 等人研究了具有同样原理的几种超声波电机^[7],并给出了结构简单的超声波电机,它具有成本低、低速大转矩、单位质量功率大、运动精确、能量转换效率高等一些优良特性。1978 年,原苏联的 Vasiliev 等成功地构造了一种

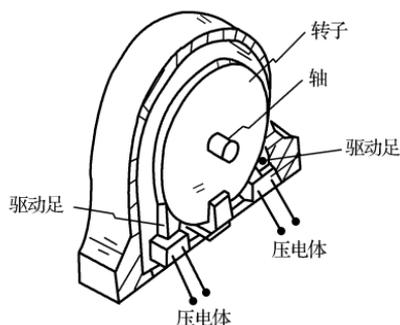


图 1-3 H. V. Barth 发明的超声波电机

能够驱动较大负载的超声波电机^[8],如图 1-4 所示。这种电机使用两个金属块夹持压电元件的结构,利用振动片的纵向振动及其所诱发的弯曲振动,通过摩擦来使转子转动。其结构不仅能够降低超声波电机定子的共振频率,而且还可以放大振幅。但由于此电机在运转条件下,磨损和发热严重,很难保持振动片的恒幅振动,故未能获得实际应用。同时,日本山形大学的富川义郎教授对压电陶瓷的振动弹性力学理论及其应用的研究证明了超声波电机设计和实用的可行性。

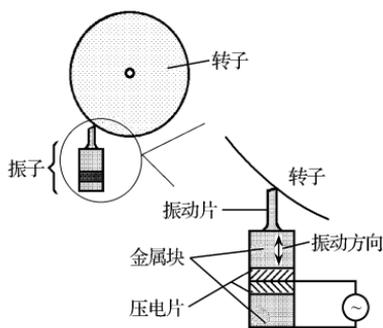


图 1-4 原苏联 Vasiliev 构造的电机

1980 年,日本的指田年生在 Vasiliev 研究的基础上,提出并成功地制造了一种振动片型(驻波型 standing wave)超声波电机^[9],该电机的定子由一个螺栓紧固型兰杰文(langevin)振子和薄振动片组成,振动片以微小倾角压于转子之上,如图 1-5 所示,当振子以超声频率纵向振动时,薄片末端将形成椭圆运动,从而对转子产生驱动力。该电机的工作频率为 27.8kHz,驱动电压为 300V,输入功率为 90W,输出扭矩为 0.25Nm,机械输出功率为 50W,转速为 2000 r/min,效率为 55%。该电机是第一个满足了实际使用要求的电机,但由于振动片几乎与转子相垂直,电机只能单向转动,并且磨损严重。为了解决这个问题,指

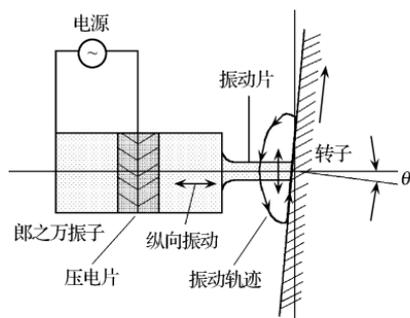


图 1-5 日本指田年生的振动片型

田年生于 1982 年发明了行波型超声波电机(traveling wave),实现了由定点定期推动转子(断续点接触)变换成多点(实际是局部接触面)连续不断地推动转子,从而大大地降低了定子与转子接触界面上的摩擦和磨损,如图 1-6 所示。1985 年,指田年生首先在美国提出了行波型超声波电机的专利,较系统地阐述了电机各部件结构及振动原理,是目前行波型旋转电机的基础^[9]。1985 年,日本的熊田明生博士

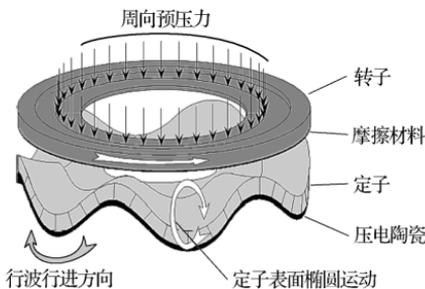


图 1-6 日本指田年生的
环形行波型超声波电机

研制的单电源驱动型纵扭振动超声波电机,开创了复合振动型超声波电机的先河^[10],该电机转速为 120r/min,最大力矩为 $1.3\text{N}\cdot\text{m}$,效率可达 80%。1987 年,东京工业大学的上羽贞行等人研制了直线型行波超声波电机并通过对超声波电动振动系统的优化,将传递效率由原来的 56% 提高到 86%,最大速度达到 1m/s ,且其暂态性能优于电磁型直线电机^[11]。同年,松下公司的伊势等人在指田年生的基础上,设计的定子采用了一种梳齿结构^[12],如图 1-7 所示。该电机在基本不影响定子刚度的情况下扩大定子振动的振幅,大大提高了电机的效率,被目前的大多数各种原理的超声波电机广泛采用。1988 年,东京工业大学黑泽实教授和上羽贞行教授研究的纵扭复合振动超声波电机^[13],如图 1-8 所示,进一步提高了输出转矩。1986 年获得诺贝尔物理奖的扫描隧道显微镜 (STM) 便成功地应用了超声波电机。1987 年,指田年生创建的新生工业公司正式商业出售行波超声波电机,佳能公司将其开发的圆环行波超声波电机正式应用于 EOS 相机

自动调焦系统^[14],使相机业界为之鼓舞,这标志着超声波电机开始走向实用阶段。

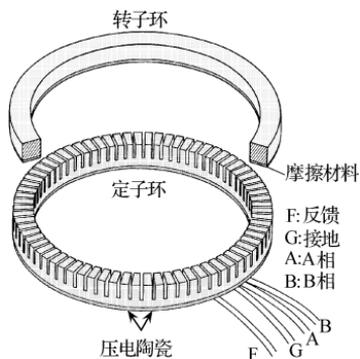


图 1-7 具有梳齿结构的行波超声波电机

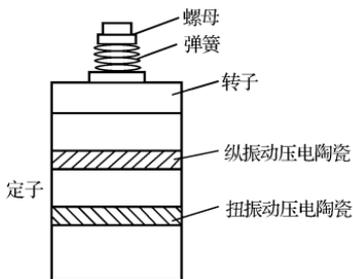


图 1-8 纵扭复合振动超声波电机

由于行波超声波电机的原理是利用行波在有限弹性体内传播时表面质点产生的椭圆运动,即只要定子弹性体表面产生椭圆运动,就可以构造各种原理的超声波电机,由此促进了各种振动模态超声波电机的产生。此后的几年,先后有日本的新生、松下、佳能、日电等公司和东京工业大学、山形大

• 4 •

学、东北大学等高校,共 40 多家科研单位投入了大量的人力、物力和财力从事超声波电机基础理论的研究和实际电机样机的制造,一系列超声波直线电机、旋转电机相继问世,在很多国家申请了超声波电机专利,1972~ 1990 年间公布的专利分布如表 1-1 所示。这一时期超声波电机的研究和开发达到高峰,超声波电机制造技术走向产业化生产,许多新产品不断地被研制出来并推向市场^[15]。其中,Hattori Seiko 公司用在钟表上的定时报警电机,如图 1-9 所示,电机外径为 10mm,厚度仅为 4.5mm,转速可达 6000 r/min,为超声波电机在微型传动领域的应用开辟了道路^[16]。M. Flynn 等人研制出用于微型机器人的压电微型电机,由它组成的微型机械系统体积小、价格便宜,而且实现了完全自由控制,代表着现代机器人控制的一个发展方向。1998 年,上羽贞行等人又研究出近场声悬浮超声波电机,他们成功地将 10kg 的质量加在圆盘上,通过近场声悬浮能驱动转子转动^[17]。

表 1-1 1972~ 1990 年间公布的专利中各种技术所占的比率

1972~ 1984 年间 508 个专利中各种技术所占的比率	超声波电机	5%
	脉冲驱动电机	40%
	伺服位移变压器	12%
	材料	43%
1988~ 1990 年间 550 个专利中各种技术所占的比率	超声波电机	11%
	伺服位移变压器	8%
	材料	5%
	驱动/控制	15%
	摩擦处理	20%
	多层电路板	19%
	脉冲驱动电机	8%
	电磁机构	4%
双压电晶片	10%	



图 1-9 无声(振动报时)手表及超声波电机

日本在超声波电机设计、制造和销售方面的成功引起了其他国家的广泛重视,德、法、美、英、中、韩等国于 20 世纪 80 年代末 90 年代初,西班牙、葡萄牙、波兰等国于 90 年代以后纷纷投入到超声波电机的研究和制造行列中来。目前,美国已将

超声波电机成功应用到航空航天、信息和汽车产业领域^[18],法国用于空-空导弹导引装置^[19],德国用于飞机的电传操纵系统中等^[20]。

1.1.2 超声波电机控制技术的发展简史

虽然,超声波电机产品从出现到现在仅有十多年的时间,但它已经广泛应用于工业控制、精密仪器仪表、汽车专用电器、办公自动化设备、智能机器人等领域中。从民用的自动对焦相机到航天的“火星旅行者”,从微型机械驱动到超导悬浮列车,以及高级汽车、医疗器械上,超声波电机都以其卓越的特性发挥了重要的驱动控制作用。据有关专家预测:随着超声波电机卓越性能日益被人们认识和采用,它将在较大程度上替代小型电磁微电机。需要强调的是,超声波电机的推广应用是和它的驱动控制技术分不开的,只有结合有效的控制方法和控制策略,才能充分发挥超声波电机的卓越性能^[21]。

如前所述,图 1-1 所示的第一个超声波电机模型,如果以相位差 90° 电压激励时,此模型的工作机理就与 20 世纪 80 年代出现的行波超声波电机原理基本相同,遗憾的是,由于对超声频率激励源的设计和制作要求超出了当时的工艺水平,这一最初的超声波电机模型却没能做成实际样机。1964 年, V. V. Lavirenco 用等效电路的方法分析了旋转超声波电机的压电陶瓷片的振动,虽然当时超声波电机的应用和推广受限主要是由于压电陶瓷材料以及超声波电机理论的滞后,但电子技术的滞后、超声波电机驱动控制设备的体积庞大和技术滞后也间接限制了超声波电机的应用。

1982 年,指田年生发明的行波超声波电机只需改变驱动相位差就可实现正反转,并且定子、转子之间是多轮流接触,磨损很小,行波超声波电机的原理已基本建立,加上当时控制技术的飞快发展也刺激了几年后超声波电机应用在日本的快速发展。

进入 20 世纪 90 年代以来,伴随着各国各种原理超声波电机的出现及各具特色的应用,许多国家将超声波电机性能的研究放到了重要位置,建模与分析 and 驱动控制技术也逐渐成为超声波电机研究的主要内容^[22-24]。另外,在大力矩超声波电机、微型超声波电机及多自由度超声波电机等领域的研究也进一步深入^[25-27]。

20 世纪 90 年代后,日本在超声波电机研究及其制造工艺方面占据着世界领先的地位,而且超声波电机驱动控制技术的实用化研究,如定位及速度跟踪控制方面也遥遥领先于其他国家。1986 年,日本的 Takeshi Hatsuzawa 系统地研究了环形行波型超声波电机控制的速度控制特性^[28],得到了超声波电机速度与驱动电压、驱动频率、相位差及正反转切换频率之间的关系。1990 年, Yuji Izuno 等人实现了超声波电机的负载自适应跟踪控制的两相谐振逆变器^[29], 1991 年,实现了基于模糊推理的高性能速度/位置控制策略^[30],并在 1994 年分别进行了使用软件变增益比例积分控制器和改进模糊控制器的超声波电机驱动控制伺服系统的定位控制

的研究^[31]。

1990年,富川义郎研究小组开始进行了消除电机残余振动及避免超声波电机金属噪声的驱动脉冲串波形的研究^[32]。1991年,Atsuo Kato等人实现了环形行波型超声波电机的柔顺控制,并于两年后实现了超声波电机直接驱动机械臂的柔顺控制系统^[33]。1994年,Tomonobu Senjyu等人实现了自适应控制下的超声波电机自适应速度控制^[34],1995年实现了同时控制频率及相位差的双模控制的超声波电机精密定位控制^[35],1996年实现了应用混合控制的精密快速定位控制,并开展了应用神经网络技术进行超声波电机位置控制的研究^[36]。1994年,Seiji Aoyagi等人应用相移输入及电压输入与一个模糊控制器,实现了电机的快速精密定位控制^[37]。1995年,Kaneko Makoto等人通过双自由度的PWM控制,实现了动态控制电机的自锁特性^[38]。1995年,T.Kamano等人实现了超声波电机定位系统的前馈控制。同时,Tomonobu Senjyu和S.Yokoda等人用最基本的比例积分控制^[39],实现了电机运行点或负载转矩不变化时的定位控制,但当电机的速度特性随温度变化或负载变化时,电机的控制效果变得很差。于是,Tomonobu Senjyu等人又提出了PI控制加频率补偿器控制方法,虽然克服了超声波电机速度抖动,但电机的动态性能不理想^[40]。1996年,Tomonobu Senjyu等学者再利用神经网络进行了精确的定位控制,实现了超声波电机控制网络的非线性输入输出,并应用模糊神经网络控制实现了超声波电机速度控制^[41]。同年,Nobuyuki Iwatsuki和Iwao Hoyashi等用一对二维的超声波电机实现了旋转线性电机的精确定位控制,轴向固定的步距误差只有0.007mm,旋转角度误差^[42]为0.05°。1997年,K.Nishibori等研究了振动型超声波电机驱动机器人的机器手指的PWM驱动特性^[43],如图1-10所示。Tomonobu Senjyu等提出了超声波电机的变结构控制方案^[44]。

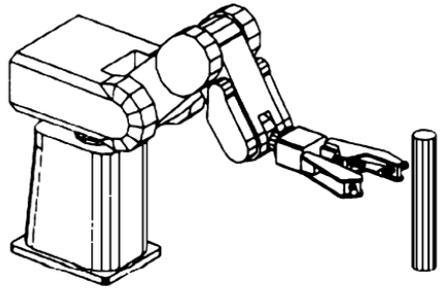


图 1-10 装有 3 个超声波电机的机械臂机械手控制

1998年,Tomonobu Senjyu等继续应用多控制输入变量的滑模控制超声波电机的位置,即将输入电压的频率和两相电压的相位差同时作为输入控制变量,并利用多模自适应控制和自适应死区补偿实现了超声波电机的快速准确定位控制,提出了基于简化数学模型的自适应控制方案^[45]。Yuji Izuno等人将速度跟踪伺服系统用于行波超声波电机控制并进行了可行性实验验证^[46]。随后,日本各超声波电机研究小组进行了各种超声波电机驱动控制方法的研究和实验及产品的研发,取得了领先于世界的超声波电机及其驱动控制技术和丰厚的市场回报,获得了用户的青睐。20世纪80年代末90年代初,由于超声波电机的迅速产业化,超声波电机控制技术的研究在世界各国开展开来。其中,参与行波超声波电机驱动控制研究的

德国帕德博恩大学 J. Maas 超声波电机研究小组对环形行波型电机的速度控制、精密位置控制、超声波电机参数的在线识别等进行了一系列的研究,极大地丰富了超声波电机控制策略的多样性^[47]。1997年,中国台湾学者 Faa-Jeng Lin 等将在线训练神经网络应用于超声波电机伺服驱动,能快速训练反馈并减小参数变化和外部干扰引起的误差^[48]。1997年,法国的 P. Vanheeghe 和 E. Duflos 等人应用

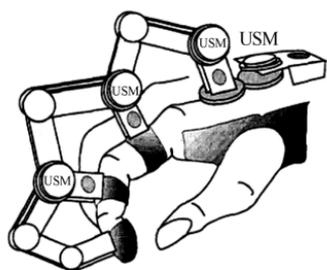


图 1-11 安装有 4 个超声波电机模拟食指的骨骼原理图

DSP 和 PI 算法进行了超声波电机速度控制的实验研究^[49]。1996年,韩国 In-SuCha 和 Hea-AmPark 等人采用模糊控制策略解决了超声波电机温度补偿的问题^[50]。1999年,韩国的 B. H. Choi 和 H. R. Choi 等将超声波电机用于半直接驱动手腕骨的原理样机及控制装置的设计,如图 1-11 所示^[51]。1999年,香港大学的 S. W. Chung、K. T. Chau 等人设计了模糊神经网络双模控制器,实现了超声波电机的精确快速位置控制^[52]。2001年,中国台湾的 Faa-Jeng Lin 和

台湾国立中央大学的 Rong-Jong Wai 等人提出了针对直线超声波电机的逆向模糊神经网络控制策略^[53]。

在 20 世纪 90 年代期间,各种新型超声波电机不断出现,还出现了与环形行波超声波电机驱动控制不一样的驱动控制方法。1995年,法国的 Antoine Ferreira 等研制了多自由度球形原理性超声波电机样机及其驱动装置^[54];Toyama Shigeki 等发明了两自由度超声波电机^[55,56],如图 1-12 所示。该电机的两对定子分别工作时,球体转子可分别绕两根轴旋转,实现两自由度运动。该电机最大输出转矩为 $0.07\text{N}\cdot\text{m}$,最高转速为 $30\text{r}/\text{min}$ 。1998年,Takafumi Amano 等制成了柱体定子三自由度超声波电机^[57],如图 1-13 所示。该电机最大输出转矩为 $0.035\text{N}\cdot\text{m}$,转速为 $100\text{r}/\text{min}$ 。

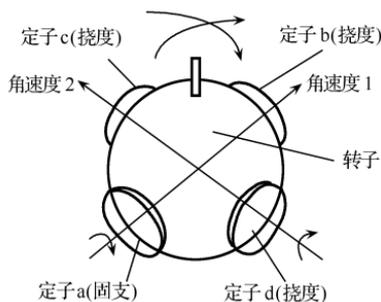


图 1-12 两自由度球形超声波电机

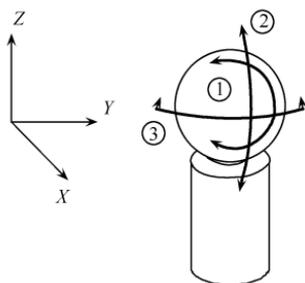


图 1-13 三自由度球形超声波电机

1.1.3 超声波电机的研究现状

1. 超声波电机的国外研究现状

由于超声波电机具有低速大转矩、无电磁干扰、动作响应快、无输入自锁等卓越特性,在非连续运动、精密控制等领域要比传统的电磁电机性能优越得多^[58],因而相关的应用开发一直受到业界的重视。日本的超声波电机及其驱动控制技术的产业化应用处于世界领先地位,它掌握着世界上大多数的超声波电机制造及控制技术的发明专利,几乎所有的知名大学和研究院都在进行研究,如东京大学、东京工业大学、东北工业大学、东京农工大学、山形大学、爱知工业大学等都有至少一个本校的超声波电机研究小组,或进行理论分析研究、或进行新原理、新结构的超声波电机的研究、或进行超声波电机控制专用芯片的集成。日本参与研发、商业制造及销售的大公司更多,如佳能公司、新生公司、本多公司、松下公司、美能达公司、尼康公司、精工和 NEC 公司等。近 10 年,日本的超声波电机已进入实用化的商业应用阶段,如环形行波型超声波电机、柱体棒形行波超声波电机已商业化生产和销售^[59,60]。表 1-2 是新生公司 1997 年生产的超声波电机的应用场合及估计的需求。

表 1-2 新生工业公司 1997 年的统计数据

应用领域	应用数量/万台
光学仪器(照相机等)	500
轿车(座椅等)	20
精密仪器(手表等)	30
航空设备(图像处理等)	1
产业机器(XY 定位仪、机器人等)	20
住宅设备(百叶窗、窗帘等)	2

由于日本在超声波电机及其驱动控制领域所获得的极大成功和较高的商业利润,美、英、法、德等国不甘落后,紧随日本之后,各自在相关的超声波电机及其驱动控制、新结构、新原理、新的应用领域等方面取得了一定的研究成果。

美国的密苏里(Missouri-Rolla)大学主要从事电机工作时定子和转子之间的接触模型以及接触力对电机寿命影响的研究^[61],并同 Allied Signal Aerospace 公司合作进行行波超声波电机加工工艺及控制技术的研究。美国国家航空宇航局(NASA)的喷气推进实验室、材料研究室、MIT 的 AMSL 共同研究开发了用于火星探测器操作臂关节驱动的大力矩超声波电机^[62,63]。

英国的伯明翰(Birmingham)大学主要从事基于“谐波齿”理论的超声波电机的研究,以及实现超声波电机高精度的定位控制、探索开环的可控性^[64,65]。

德国 Paderborn 大学的 J. Wallaschek 所领导的科研小组主要从事超声波电

机振动分析和动态接触等方面的研究,如:线性、旋转行波电机的振动分析和动态接触问题^[66,67],电机的线性和非线性振动稳定性的问题^[68],电机运动的控制问题^[69],复合材料的动态特性以及结构的阻抗匹配研究等^[70]。

法国的 Cedrat Recherche 研究所借助光学干涉仪及电测量的方法,对所研制的线性电机定子的切线振动位移、法线位移、切线振动速度、法线力因子做了系统的测试和评估^[71]。

另外,还有许多国家陆续参与到超声波电机及其驱动控制技术的研究中来,但目前大多数其他国家主要侧重于驱动控制技术的研究和实际应用。

2. 超声波电机国内的研究现状

国外超声波电机获得成功应用被多次报道,因而在 20 世纪 80 年代末 90 年代初获得了我国科学工作者的关注。虽然我国超声波电机及其驱动控制技术的研究起步较晚,但发展迅速。

1986~ 1990 年间,四川压电与声光技术研究所的王大春、刘一声等人将日本有关超声波电机的研究情况陆续介绍到了国内^[72~ 75]。

进入 20 世纪 90 年代以来,随着国内的科研人员从国外学成回国,国内的超声波电机样机的试制工作逐步进入正轨,国内除东南大学外,有多个高校^[76~ 79]加入到超声波电机的研究行列,主要有清华大学、南京航空航天大学、浙江大学、哈尔滨工业大学、北京科技大学、天津大学、华中科技大学、吉林工业大学、天津大学、上海交通大学、山东大学、陕西师范大学和中科院、电子工业部 21 所、长春光机所、上海冶金研究所、西安微电机研究所等高等院校和科研院所,对典型的几种超声波电机的运行原理、数学建模、仿真计算、样机制作及驱动技术等进行了研究,并获得了一批研究成果。

东南大学研制的系列行波型、步进型和柱状夹心式超声波电机样机水平已接近实用要求,直径为 100mm 的均压行波超声波电机(最大转矩达到了 $3.5\text{N}\cdot\text{m}$)及超声波电机多功能驱动控制装置分别获得了国家专利^[80~ 85];南京航空航天大学研制出多种结构型式的样机,如环形行波型超声波电机、双面齿型、圆板型、驻波型超声波电机^[86~ 89];清华大学则研究了目前国内直径最小(1mm)的超声波电机,有望在心脏的微循环系统中应用,环形中空用超声波电机的样机已进行了优化设计^[90~ 92];浙江大学研制了大力矩(堵转力矩接近 $10\text{N}\cdot\text{m}$)和高重复定位精度(0.025 度)的纵扭复合型超声波电机^[93];华中科技大学研制了大扭矩行波型超声波电机并对转子尺寸和形状对输出功率和输出转矩的影响作了深入的研究^[94]。国内所研制的超声波电机已接近实用要求并可望逐步实现批量生产,有些拟用于军工的导弹导引装置,有些电机的产业化应用前景被国内大型企业和传统电机生产厂家看好。

1.2 超声波电机的分类

与传统的电磁型电机相比,超声波电机没有绕组和磁极,它是一种全新的自动驱动控制器,是对传统电磁型电机的突破和有力补充。近 20 多年,出现了各种原理、形式和结构的超声波电机,但超声波电机的分类一直比较模糊,根据压电激励模式、结构形式、电机功能、应用场合等可以将超声波电机分成不同的种类^[95]。本书分别从驱动方式、超声波电机获得椭圆运动的方式、定转子的接触状态等方面进行了分类和归纳^[96,97]。

1.2.1 驱动方式

按照驱动方式的不同,超声波电机可分为行波型、驻波型和电致伸缩公转子型,如表 1-3 所示。

表 1-3 超声波电机按驱动方式分类

驱动方式	振动模式	具体实例
行波方式	同型简并模式	环形、圆盘形
	单一振动模式	挠曲振动线性电机
驻波方式	同型简并模式	双重模式音片电机
	异型简并模式	平板状电机、多孔原板电机
	单一振动模式	振动片型、扭转耦合子型
	多模态振动模式	纵向转子+ 扭转振子
	复合振动模式	扭转振子+ 层压元件
电致伸缩公转子方式	单一振动模式	电致伸缩公转子型

1.2.2 机械振动获取方式

按照机械振动获取方式的不同,超声波电机可分为非谐振驱动和谐振驱动两种类型,如表 1-4 所示。

表 1-4 超声波电机按机械振动获取方式分类

非谐振驱动超声波电机	蠕动电机,惯量电机
谐振驱动超声波电机	行波电机,驻波电机,模式转换电机,多模电机,混合换能器电机

1.2.3 定转子接触方式

按照定转子接触方式不同,超声波电机可分为摩擦驱动、非摩擦驱动和非接触型三种类型,如表 1-5 所示。

表 1-5 超声波电机按定子接触方式分类

定子接触方式	电机类型	具体实例
摩擦型	行波超声波电机	直线型
		旋转型环形
		声表面波
	驻波超声波电机	平面等幅同相驱动型
		平面驻波驱动型
		平面型带开环自校正步进
		棒型组合式
	弯曲摇头式超声波电机	棒型弯曲摇头式
		圆管型弯曲摇头式
	蠕动式超声波电机	电致伸缩公转型
多自由度超声波电机	三自由度超声波电机	
非摩擦型	压电电流变直线步进超声波电机	
	压电电流变旋转步进超声波电机	
非接触型	雷诺剪切力驱动的制动器	
	辐射压力(垂直雷诺力)驱动的制动器	

1.2.4 定子表面椭圆运动获取方式

按照定子表面椭圆运动获取方式不同,超声波电机可分为单振动模型和多振动模型两种类型,如表 1-6 所示。

表 1-6 超声波电机按定子表面椭圆运动获取方式分类

椭圆运动获取方式	电机类型或应用的具体振动模式	
单振动模式	驻波型 行波型	
双 振 动 模 式	模式转换型	振动片型 扭转耦合型 偏心耦合型
	多模振子型	纵向-弯曲耦合振动型 同心剪切与径向模耦合 环形元件的非轴对称振动与径向扩张振动 十字型振子的纵向和弯曲振动 极板的两个弯曲振动或有两个不同长度臂的音叉的弯曲振动
	模式旋转型	利用双筒并振动模 环的弯曲和扩张振动 环形极板的弯曲或非轴对称振动 空心圆柱的弯曲振动
	混合换能器型	扭转振子多层压电伸缩器 相互垂直的两个纵向振动 两个相互垂直的双晶片

由上面可见,按照不同的分类标准,超声波电机可以分为不同的形式,本书以介绍行波超声波电机为主,兼顾驻波超声波电机,涉及的超声波电机有环形行波超声波电机、圆柱定子超声波电机、单定子三自由度超声波电机、直线超声波电机、步进超声波电机、纵扭复合型超声波电机等。

1.3 超声波电机的特点和应用

1.3.1 与传统电磁电机的比较

超声波电机(USM)是一种新型的直接驱动型微电机,由于其原理完全不同于传统的电磁电机,因而具有很多不同于传统电磁电机的特性。为了更好的理解USM在驱动控制领域可能引起的技术革新,从以下几个方面将USM与传统电磁电机进行了比较。

1. 能量转换过程

传统电磁电机的定、转子皆为刚体,二者之间存在气隙,无物理接触。通常,输入电源功率由流经定子或转子线圈的电流产生气隙磁场,磁场将力施加到转子上,从而获得机械功率输出。其电能转化为机械能的能量转换过程是通过电磁感应实现的。如果不考虑定转子中磁性材料的饱和和磁滞,能量转化过程是线性可逆的,能够反过来产生电能。

超声波电机的定转子直接接触,靠摩擦驱动。通常,对黏结在超声电机定子上的压电陶瓷元件施加交变电压,能够激发出定子弹性体的机械振动,此振动通过定转子之间的接触摩擦转化为转子的定向运动。由此可见,在超声波电机中的存在着两个能量转换过程。压电陶瓷和定子间的机电能量转换是通过逆压电效应实现的,而定子和转子间的机械能量转换是通过摩擦耦合实现的。若忽略压电陶瓷和弹性材料的滞后效应,定子自由振动和压电陶瓷机电能量转换是线性可逆的,反过来能产生电能。

2. 机械特性和效率

直流(DC)电机为典型的电磁电机,其转矩-转速和效率-转速曲线如图 1-14 所示。而 USM 的转矩-转速和效率-转矩曲线如图 1-15 所示。

对比二者的机械特性曲线和效率曲线,可以得出如下结论:USM 具有类似于 DC 电机的机械特性,DC 电机的最大效率在小转矩、高转速(接近空载速度)附近,而 USM 的最大效率在低速、大转矩附近。也就是说,DC 电机适合高速运转而 USM 适合低速运转^[95]。

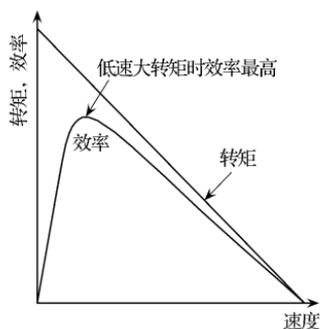
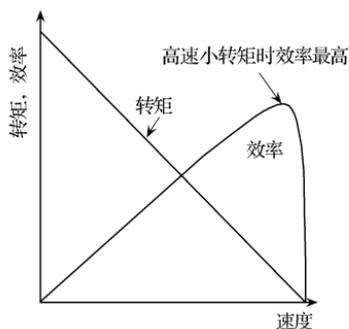


图 1-14 DC 电机转矩-转速、效率-转速曲线 图 1-15 USM 转矩-转速及效率-转速曲线

3. 能量密度与转矩密度

进行不同电机性能比较时,除了转矩、转速特性外,由单位质量或体积的功率输出和转矩输出表示的功率密度和转矩密度也是非常重要的指标,特别是当电机用于对重量和体积有特别要求的场合时,功率密度和转矩密度成为首要考虑的指标。表 1-7 对传统的 DC 电磁电机和 USM 进行了比较。

表 1-7 超声波电机与 DC 电磁电机的性能对比^[97]

类型	产品	厂家	质量 /g	堵转力矩 /Ncm	空载转速 /(r/min)	功率密度 /(W/kg)	转矩密度 /(Ncm/kg)	效率 /%
DC	FK-280-2865/ 直流有刷	Mabuchi	6	1.52	14 500	160	42	3
DC	1319E003S/ 直流有刷	Micro Mo	1.2	0.33	13 500	104	29	1
DC	直流有刷	Maxon	8	1.27	5200	45	33	
DC	直流无刷	Kannan	20	8	5000	17	13	
DC	直流无刷	Aaeroflex	56	0.98	4000	4.0	3.8	
USM	8mm 行波、环形	MIT	0.26	0.054	1750	108	210	
USM	驻波、纵扭	Kumada	50	133	120	~ 50	887	0
USM	USR60 行波盘式	Shinsei	30	62	105	16	270	3
USM	EF300/2.8 环形	Canon	5	16	40	~ 5	356	5
USM	双面齿	MIT	30	170	40	7.3	520	3

由表 1-7 的比较可以看出,同目前的小型电磁电机相比,多数 USM 的功率密度略低,但其转矩密度却是电磁电机 10 倍以上,同具有大比例减速箱的电磁电机的转矩密度相当。

4. 响应特性

电机能否用于定位控制系统在很大程度上取决于电机启停时的瞬态响应特性。应用闭环位置和速度反馈能够将定位最终控制在纳米级精度范围内,但响应时间和频率限制却取决于电机和传动机构的动态特性,一般由输出转矩和转动惯量表示。

电磁电机转速高、转矩小、转子惯量大,响应时间常大于 10ms,且随着减速箱的增加而增大。而且由于响应慢,电机的启停角度很大,通常是转动的一部分。

USM 由于转矩大、空载转速低、转子惯量小,其响应时间常小于 1ms。如 Cranfield 的模型 USM 由静止加速到全速仅需 0.5ms,能在 0.1ms 内停止^[98]。快速响应需要以 100kHz 或更高的频率采样的电机才能获得加速过程,在这些瞬态运动中,转子位置以 0.01°数量级变化,此处的小角度响应解释了为什么 USM 能在闭环控制中实现几个纳米的分辨率,反映在角度上可达百分之几弧度秒的分辨率。快速响应性极大地增加了闭环系统的稳定性,使得定位调整频率可高达 1kHz,而电磁电机仅能达到 100Hz 左右。

1.3.2 超声波电机的特点

1) 低速、大转矩^[98]。超声波电机振动体的振动速度和摩擦传动机制决定了它是一种低速电机,但它在实际运行时的转矩密度一般是电磁电机的 10 倍以上,如表 1-7 所示。因此,超声波电机可直接带动执行机构,这是其他各类驱动控制装置所无法达到的。由于系统去掉减速机构,这不仅减小体积、减轻重量,而且还能提高系统的控制精度、响应速度和刚度。

2) 无电磁噪声、电磁兼容性(EMC)好。超声波电机依靠摩擦驱动,无磁极和绕组,工作时无电磁场产生,也不受外界电磁场及其他辐射源的影响,非常适用在光学系统或超精密仪器上。如表 1-7 所示。

3) 动态响应快、控制性能好。超声波电机具有直流伺服电机类似的机械特性,但超声波电机的启动响应时间在毫秒级范围内,能够以高达 1kHz 的频率进行定位调整,而且制动响应更快。

4) 断电自锁。超声波电机断电时由于定、转子间静摩擦力的作用,使电机具有较大的静态保持力矩,实现自锁,省去制动闸保持力矩,简化定位控制。

5) 运行无噪声。由于超声波电机的振动体的机械振动是人耳听不到的超声振动,低速时产生大转矩,无齿轮减速机构,运行非常安静。

6) 微位移特性。超声波电机振动体的表面振幅一般为微米、亚微米,甚至纳米数量级。在直接反馈系统中,位置分辨率高,较容易实现微米、亚微米级、纳米级的微位移步进定位精度。

7) 结构简单、设计形式灵活、自由度大,易实现小型化和多样化。由于驱动机

理的不同,超声波电机形成了多种多样的结构形式,如为了满足不同的技术指标(如额定转矩、额定转速、最大转速等),可方便的设计成旋转、直线及多自由度超声波电机。为充分满足不同应用场合中结构空间的要求,如体积(长、宽、高)、重量等,即使同一种驱动原理的超声波电机,也可以设计成不同的安装形式,超声波电机的定、转子可以与拟采用超声波电机控制的运动系统中的固定部件和运动部件做成一体,简化整个系统的体积和重量。

8) 易实现工业自动化流水线生产。超声波电机的结构简单,只需要金属材料的定、转子,激励振动的压电陶瓷,有些场合需应用的热塑性摩擦材料和不同的胶粘剂,没有电磁电机线圈绕组那样需要人工下线,比传统电机更易实现工业自动化流水线生产。

9) 耐低温、真空,适合太空环境。超声波电机及其驱动控制装置的耐低温、真空的特性,可将其作为宇航机械系统和控制系统的驱动装置。由于超声波电机是一种可以直接驱动的结构,不仅解决了减速机构带来的机械噪声问题,传统电机的润滑等引起的一系列问题也不复存在。如定、转子间不需润滑系统,不仅可以保证电机的正常运行,还可以减少使用润滑油或润滑脂给环境带来的污染。在太空环境中,避免了润滑油泄漏与挥发在外层空间带来的麻烦。

1.3.3 超声波电机及其驱动控制存在的不足

1) 输出功率较小。由于超声波电机及其驱动控制装置的输出功率较小、难以制造输出功率大于 1kW 的超声波电机。目前,环形行波型超声波电机的最大输出功率不大于 50W。

2) 效率较低。由于超声波电机在激励下的运行过程中,存在两种能量转换,即一种是压电陶瓷的逆压电效应产生的电能转换为机械能,另一种是定子的振动转换为转子的轴向输出,能量转换过程中的效率比较低。

3) 定转子界面间材料存在磨损。由于超声波电机是利用定子的超声振动,依靠摩擦驱动转子转动的,定转子接触界面间的材料会有磨损,甚至会损坏其中的摩擦材料等,常需要耐磨材料。定子机械振动也会导致电机整体结构或压电陶瓷的疲劳损坏。而且目前的黏结方法和低断裂韧度压电陶瓷,使电机在高温条件下就会出现热失配而损坏整个电机。

4) 需要专用高频电源。为了能够激发定子振动体中的超声振动,并使能量转换效率达到最大,就必须有专用的高频激励电源,一般需要能够输出两相或多相交变高频电压的电源来驱动电机。

5) 价格较高。由于压电陶瓷等基础材料及其工艺的高精度要求,超声波电机控制用高频电源的专用集成电路的开发和应用的成本较高,同时批量也较少,使得超声波电机在应用中的性价比不高,目前其价格还无法同早已成熟的微电磁电机的价格竞争。但在一些特殊场合,超声波电机性价比还是较高的。

6) 寿命问题。超声波电机及其驱动控制装置的寿命跟其制作材料有着极大的关系,如定转子接触界面间的磨损问题会直接影响超声波电机的长久稳定工作。

7) 缺乏通用的超声波电机优化设计及制造工艺。由于各种原理的超声波电机的运行特征不一样,目前还没有一套像电磁电机一样的通用超声波电机设计方法、电机设计的优化方法及对应的工业自动化生产制造工艺。

8) 能量不能逆转换。由于超声波电机中的压电陶瓷一旦设计完成后,不能再逆转换为电能,也就是说超声波电机不能像电磁电机一样反馈制动(再生制动)。

随着科学技术的发展,这些问题正逐一得到不断的解决,如国外专用超声波电机驱动控制集成芯片的生产,高频开关电源技术的不断提高有利于通用超声波电机驱动控制电源的设计及制作。

1.3.4 超声波电机的应用

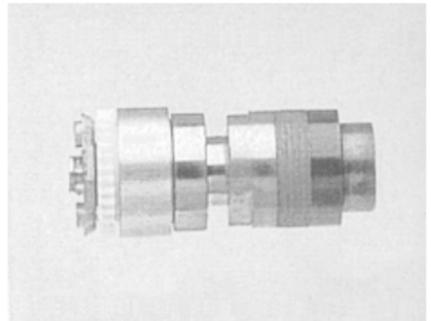
由于超声波电机的性能优良,如结构简单、体积小、低速大转矩、响应速度快、定位精度高、无电磁干扰等,超声波电机被认为在机器人、计算机、汽车、航空航天、精密仪器仪表、伺服控制等领域有广阔的应用前景,有些领域已有成功应用。

(1) 照相机调焦

日本佳能公司从1982年起开始研究将超声波电机应用到照相机的镜头调焦中,至1987年,成功地将超声波电机应用到EOS系列照相机配用的EF50mmF1.0L、EF300mmF2.8L、EF28~80mmF2.8L-4L等镜头中^[99],电机照片如图1-16(a)所示,该系列超声波电机数据见表1-8。



(a) 环形行波型电机



(b) 柱体行波型电机

图 1-16 佳能公司生产的用于照相机的超声波电机

20世纪90年代中期,佳能公司又研制了一种直径10mm、长24mm的柱体行波型超声波电机用于照相机的调焦,如图1-16(b)所示。该电机采用Langevin 振子结构,便于生产,降低了成本,同时提高了可靠性。除佳能公司外,尼康公司的相机也采用了超声波电机,西格玛公司也将超声波电机应用到大口径望远镜上。与采用

电磁型电机的镜头相比,使用超声波电机的镜头有如下特点:静音、定位精度高、调焦时间短、无齿轮减速机构等,因而结构简单、重量轻。

表 1-8 佳能公司照相机用超声波电机数据^[99]

镜头型号	EF50mmF1.0L	EF300mmF2.8L	EF28~80mmF2.8L-4L
外径/mm	77	77	73
内径/mm	67	67	63
厚/mm	11.2	10	10.6
重量/g	40	45	45
频率/kHz	29	29	31
输入功率/W	1	1	1
空载转速/(r/min)	40	40	40
启动转矩/N·m	0.16	0.16	0.14
效率/%	45	35	35
角度分辨率/'	5	1.25	5

(2) 太空机器人中的应用

美国国家航空宇航局(NASA)承担着探测火星的任务,为了满足太空机器人对电机的特殊要求,即轻量化、大转矩、能在超低温环境正常工作等,其属下的喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory)开发了直径分别为 1.1、2.5 和 2.8 英寸的环形行波型超声波电机(图 1-17)^[100,101]用于太空行走微型机器人的微型仪器机械臂(MIA-Micro Instrument Arm)和微型桅杆式机械臂(MMA-Micro Mast Arm)(用于全景观察和自我校正)等。图 1-18(a)、(b)分别为有超声波电机驱动的太空机器人机械臂在收集小岩石和安放科学仪器。

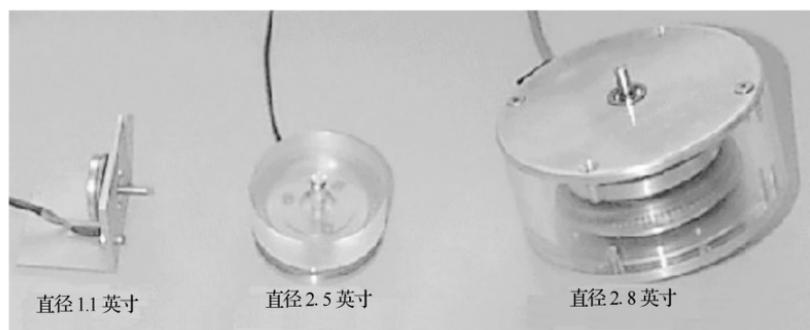


图 1-17 用于太空机器人的环形行波型超声波电机

(3) 精密定位装置和随动系统中的应用^[102,103]

超声波电机还可用于精密定位装置,如坐标平台的驱动源。由于超声波电机响