

超声波电机运动控制 理论与技术

■ 史敬灼 著



科学出版社

超声波电机运动控制理论与技术

史敬灼 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者近年研究工作的总结,阐述了超声波电机运动控制理论及具体装置的设计方法与实现技术,反映了超声波电机运动控制领域的最新进展。本书内容丰富,深入浅出,主要包括超声波电机驱动控制电路设计、系统建模方法与仿真技术、运动控制理论与实现技术等。书中给出了多种超声波电机新型驱动控制电路的电路图及详细设计方法,分析了超声波电机系统的控制非线性问题,论述了适合于控制应用的超声波电机运动控制系统建模方法,研究了针对超声波电机运行特点的运动控制策略。

本书可作为高校电力电子与电力传动、控制理论与控制工程、自动化、电气工程及其自动化等专业师生的参考书,也可供从事超声波电机驱动控制装置开发、设计、生产的工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

超声波电机运动控制理论与技术/史敬灼著. —北京:科学出版社,2011.10
ISBN 978-7-03-032487-0

I. ①超… II. ①史… III. ①超声波电机-运动控制-高等学校-教材
IV. ①TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 203545 号

责任编辑:陈 婕 潘继敏 / 责任校对:包志虹
责任印制:赵 博 / 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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2011年10月第一版 开本:B5(720×1000)

2011年10月第一次印刷 印张:26 3/4

印数:1—2 000

字数:525 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

超声波电机是一种新型的运动控制部件,它依靠压电材料的逆压电效应实现机电能量转换,其工作机理与运行特性不同于传统的电磁电机。超声波电机因具有无电磁干扰、形状自由度大、抗恶劣环境等优点,已在精密及普通运动控制领域成功应用,其工业化应用前景广阔。

关于超声波电机的研究,早期主要集中于材料特性、材料工艺、运动机理及机械结构的研究。随着研究的深入、应用范围的拓展及性能要求的逐步提高,近年超声波电机的运动控制技术研究越来越受到重视。根据超声波电机不同于传统电机的运动机理及不同应用场合的特殊要求,研发合适的驱动控制电路、合适的控制策略,提高超声波电机运动控制部件的运动精度、重复精度、整体效率及可靠性已经成为目前国际超声波电机研究的重点。

对超声波电机控制系统而言,能够用于实现控制目的的可控自变量有电机驱动电压的幅值、频率及两相电压之间的相位差三个量。由于包含压电能量转换、摩擦能量传递等过程,超声波电机非线性及内部多变量耦合较为严重,不易得到高性能的控制效果。对于这类控制对象,控制策略应是具有自适应能力的,但变量耦合及电机时变特性使得这一自适应控制过程复杂化。现有控制策略通常进行简化处理,多采用单变量控制。目前,几乎所有应用于电磁电机的控制方法,包括 PID、自适应、滑模变结构、神经网络、逆模型、 H^∞ 等,都已在超声波电机研究中进行了有益尝试。但是由于对超声波电机非线性的认识是随着研究的进行而不断深入的,受到当时研究状况的限制,现有文献的控制策略还没有使超声波电机运动控制的潜能得到充分发挥,此方面的研究仍有待深入。

超声波电机是一类具有明显时变非线性的被控对象。从控制角度来看,其非线性主要表现在三个方面:一是不同驱动参数(电压幅值、频率、相位差)情况下的电机动态运行特性存在差异;二是固定驱动参数运行情况下,由于能量损耗引起电机温度升高,电机定子压电材料特性及定转子间摩擦状况发生变化,导致电机内部机电能量转换及传递特性变化;三是驱动电路直接可控变量(PWM 占空比、相位差)与电机端电压实际表现之间的非线性,即驱动电路自身的非线性及其与时变负载(超声波电机)之间相互作用带来的耦合非线性。

时变非线性及控制变量之间的耦合,使超声波电机运动控制性能不易提高。为提高其运动控制性能,尤其是动态性能,应针对控制应用需求,充分研究电机系统控制非线性的机理与表现特征;然后,在此基础上,设计有针对性的自适应控制策略。

对超声波电机非线性的研究以及在此基础上的电机建模研究是超声波电机运动控制研究的基础。由于超声波电机机电能量转换包含多个相互关联、相互影响的转换、传递过程,理论建模复杂且不易在线实现。从控制应用角度出发,作为控制基础的电机(及其系统)模型应是适合于实时控制应用的,相对简单又能够准确反映非线性的主要方面。目前看来,理论与实验相结合的辨识建模方法较为合适,神经网络可以作为全部或部分模型的具体实现手段。

随着研究与实践的逐步深入,超声波电机运动控制正在向着充分利用控制自由度、实现性能优化的方向发展。其在线控制过程应是根据某一优化目标(如效率最优)及约束条件,在由频率、幅值、相位三个可控输入变量张成的空间中动态选取最优工作点及路径的过程。现在,随着我们对超声波电机系统非线性认识的不断深入,细致探求超声波电机系统运动控制理论与实现技术的条件逐步成熟。

本书是作者近年研究工作的总结。近年来,作者在超声波电机运动控制领域进行了较为深入的研究。由于运行机理的特殊性,超声波电机的正常运行离不开专门的驱动控制电路,通常所说的超声波电机运动控制装置都是由超声波电机、驱动控制电路及适当的控制算法软件构成的。作者细致研究了超声波电机的驱动控制电路,针对高、低端不同应用场合先后设计了十余种驱动控制电路,以不断满足工业应用的需求。作者依托这些硬件平台,进一步在超声波电机运动控制系统的建模方法和控制策略研究方面做了大量工作。建模方法研究的目的是得到适合于控制应用的、相对简单又能表征超声波电机动态非线性主要方面的控制模型,为运动控制算法的研究提供基础;控制策略的研究则主要考虑如何应对超声波电机系统的强时变非线性以充分发挥超声波电机的优势。同时,针对超声波电机系统运行效率相对较低的缺点,作者细致研究了超声波电机的效率优化控制策略,该策略显著提高了超声波电机的运行效率,为超声波电机应用领域的进一步拓展提供了必要条件。

感谢河南省基础与前沿研究基金、河南省高校杰出科研人才创新工程等对相关研究工作的资助。这些研究工作是作者和作者所指导的研究生刘博、张慧敏、王海彦、许颜颜、姚春丽、王龙帅、尤向阳、陈欢、贺冠华、王秀丽、吕方方、吕琳、李文娟等共同完成的,感谢各位同学的辛勤工作。此外,感谢河南科技大学专著出版基金对本书出版的资助。

由于经验和水平所限,书中难免有不足之处,殷切希望读者提出宝贵的意见。作者的联系地址:河南省洛阳市西苑路 48 号河南科技大学 88 号信箱,邮编 471003, E-mail: shijz@mail. haust. edu. cn。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 超声波电机驱动控制技术的发展	1
1.1.1 超声波电机系统建模的研究	3
1.1.2 超声波电机的运动控制策略	4
1.2 本书的内容安排	7
参考文献	9
第 2 章 超声波电机驱动控制电路	12
2.1 超声波电机低成本推挽式驱动电路	13
2.2 可调频、调幅、调相的超声波电机控制电路	16
2.3 具有正反转不对称补偿的超声波电机闭环控制电路	22
2.3.1 基于 VCO 的超声波电机控制电路	22
2.3.2 电机定子振幅闭环控制与正反转不对称补偿	27
2.4 基于 DSP 的驱动控制电路设计	29
2.4.1 基于 DSP 的驱动控制电路设计	29
2.4.2 基于 DSP 的对称 PWM 信号产生方法	33
2.5 基于对称 PWM 控制信号发生器的超声波电机驱动控制电路	36
2.5.1 对称 PWM 控制信号发生器工作原理	37
2.5.2 PWM 信号发生器控制参数的设置	41
2.5.3 基于 CPLD 的对称 PWM 控制信号发生器	42
2.5.4 基于 CPLD 的 DSP 多 SPI 端口通信设计与实现	44
2.6 基于 DDS 的超声波电机驱动控制电路	49
2.6.1 系统功能分析和结构设计	49
2.6.2 基于 CPLD 的 DDS 信号发生器设计与实现	49
2.6.3 DDS 中 ROM 分时复用的实现	51
2.6.4 低通滤波器设计与实现	54
2.6.5 用于超声波电机驱动的 DDS 信号发生器误差分析	57
2.6.6 基于 DDS 的对称 PWM 信号产生方法	61
2.6.7 DSP 对 DDS 信号发生器的控制	62
2.7 基于相移 PWM 的超声波电机 H 桥驱动控制电路	66

2.7.1	H 桥相移 PWM 控制方法	67
2.7.2	低成本相移 PWM 控制信号发生器	68
2.7.3	基于 CPLD 的相移 PWM 控制信号发生器	71
2.7.4	H 桥控制电路设计与实现	79
2.7.5	H 桥相移 PWM 电路与推挽式电路对比分析	82
2.8	超声波电机谐振驱动电路	85
2.8.1	行波超声波电机谐振驱动电路的仿真研究	86
2.8.2	行波超声波电机谐振驱动电路的实验分析	87
2.9	行波超声波电机驱动电路非线性研究	89
2.9.1	驱动超声波电机的推挽式变换器工作过程分析	90
2.9.2	超声波电机串联电感匹配电路研究	98
	参考文献	105
第 3 章	两相行波超声波电机驱动控制系统的建模	107
3.1	超声波电机驱动控制系统的建模与仿真	109
3.1.1	环形行波超声波电机的建模与仿真	109
3.1.2	超声波电机驱动控制系统建模与仿真	114
3.1.3	采用神经网络进行辨识建模与仿真的展望	115
3.2	两相行波超声波电机转速特性的仿真计算与神经网络建模	116
3.2.1	压电陶瓷与定子系统的振动模型	117
3.2.2	定、转子接触摩擦模型	121
3.2.3	超声波电机的转速特性	122
3.2.4	超声波电机速度特性的神经网络模型	125
3.3	两相行波超声波电机等效电路模型及其参数辨识	129
3.3.1	超声波电机等效电路模型	129
3.3.2	超声波电机等效电路的谐振特性	132
3.3.3	基于导纳圆的等效电路参数近似计算	133
3.3.4	基于 L-M 法的等效电路参数辨识	135
3.4	两相行波超声波电机频率-转速控制的阶跃响应建模	138
3.4.1	数据测试实验设计	138
3.4.2	基于阶跃响应的超声波电机模型辨识	140
3.5	两相行波超声波电机频率-转速控制的动态辨识建模	145
3.5.1	数据测试实验设计	145
3.5.2	超声波电机频率-转速控制模型辨识	147
3.5.3	频率-转速控制模型参数时变的模型表述	149
3.6	两相行波超声波电机电压幅值-转速控制的辨识建模	151

3.6.1 数据测试实验设计	151
3.6.2 超声波电机电压幅值-转速模型辨识	152
3.6.3 超声波电机电压幅值-转速模型辨识结果	154
3.7 两相行波超声波电机转速控制的稳态模糊建模	155
3.7.1 实验获取建模所需数据	156
3.7.2 模糊建模的基本步骤	157
3.7.3 转速控制的稳态模糊建模	158
3.8 两相行波超声波电机转速控制的动态模糊建模	162
3.8.1 实验获取建模所需数据	163
3.8.2 超声波电机系统模糊动态建模方法	164
3.8.3 超声波电机转速控制的动态模糊建模	165
3.9 基于蚁群优化的超声波电机动态模糊辨识建模	168
3.9.1 用于超声波电机模糊建模的蚁群算法	169
3.9.2 基于蚁群算法的超声波电机动态模糊建模	170
3.10 基于粒子群优化的超声波电机非线性 Hammerstein 辨识建模	176
3.10.1 非线性 Hammerstein 模型	177
3.10.2 粒子群优化算法	178
3.10.3 超声波电机非线性 Hammerstein 优化辨识建模	181
3.10.4 超声波电机多输入单输出非线性 Hammerstein 辨识建模	187
参考文献	191
第4章 采用推挽驱动的超声波电机运动控制策略研究	193
4.1 超声波电机转速 PI 控制	193
4.1.1 超声波电机驱动的 DSP 软件实现	194
4.1.2 超声波电机 PI 转速控制与实验结果	196
4.2 基于动态递归神经网络的超声波电机转速控制	198
4.2.1 控制系统结构	198
4.2.2 DRNN 神经网络及其训练方法	198
4.3 超声波电机的低频 PWM 控制方法	203
4.3.1 三种低频 PWM 控制方法	204
4.3.2 三种低频 PWM 控制的实现方法	205
4.3.3 三种低频 PWM 控制方法的比较	209
4.4 行波超声波电机单神经元自适应转速控制	215
4.4.1 驱动控制结构	215
4.4.2 单神经元自适应控制结构	217
4.4.3 单神经元自适应控制算法的设计与实现	218

参考文献	220
第 5 章 采用 H 桥驱动的超声波电机运动控制策略研究	221
5.1 行波超声波电机电压幅值闭环控制	221
5.1.1 电压幅值闭环控制设计与实现	221
5.1.2 实验结果与分析	226
5.2 基于神经网络的行波超声波电机起动控制	228
5.2.1 超声波电机高转速起动实验分析	228
5.2.2 基于前向神经网络的起动控制	231
5.3 超声波电机转速的双变量复合控制	236
5.3.1 以频率为控制变量的转速闭环控制	236
5.3.2 频率与电压幅值双变量复合速度控制	242
5.3.3 转速控制实验结果与分析	246
5.3.4 行波超声波电机位置控制	251
5.4 行波超声波电机转速的极点配置控制	254
5.4.1 关于超声波电机伺服控制中频率调节精度的讨论	254
5.4.2 超声波电机转速的极点配置控制	256
5.4.3 闭环控制实验结果分析	259
5.4.4 极点配置控制器参数的在线自校正	260
5.5 行波超声波电机的效率优化控制	263
5.5.1 超声波电机系统效率反馈单元设计	265
5.5.2 超声波电机系统效率变化特性实验研究	268
5.5.3 转速前馈调频控制	273
5.5.4 系统效率变步长降压优化	276
5.6 两相行波超声波电机的模型参考自适应控制	284
5.6.1 超声波电机模型参考自适应转速控制器设计	285
5.6.2 超声波电机 MRAC 转速控制的实现	298
5.6.3 超声波电机 MRAC 转速控制实验分析	302
5.6.4 超声波电机 MRAC 控制算法的改进	309
5.7 基于电压调节的行波超声波电机转速模糊 PID 控制	313
5.7.1 模糊 PID 转速控制器设计	313
5.7.2 模糊规则的实验调整	316
5.8 行波超声波电机模糊-模型参考 PID 转速控制	318
5.8.1 模糊-模型参考自适应转速控制	318
5.8.2 控制参数的实验整定	320
5.9 基于在线辨识的超声波电机极点配置自校正转速控制	322

5.9.1 极点配置自校正转速控制策略	323
5.9.2 极点配置自校正转速控制实验与分析	326
5.9.3 效率优化情况下的自校正转速控制实验结果	330
5.10 基于动态模糊模型的超声波电机转速模糊控制	334
5.10.1 转速模糊控制器设计	335
5.10.2 模糊控制规则的蚁群算法离线优化	337
5.10.3 转速模糊控制实验	347
5.11 基于 Hammerstein 模型的超声电机非线性自适应转速控制	352
5.11.1 超声波电机非线性自适应转速控制策略的设计	352
5.11.2 非线性多步预测自校正转速控制的实验研究	365
参考文献	380
第 6 章 超声波电机混沌运行分析与控制	382
6.1 基于相空间重构的行波超声波电机混沌运行分析	382
6.1.1 实验装置与实验设计	382
6.1.2 相空间重构	384
6.1.3 实测数据序列的混沌分析	388
6.2 基于理论数学模型的行波超声波电机混沌运行分析	390
6.2.1 行波超声波电机的混沌分析模型	390
6.2.2 行波超声波电机转速控制系统的混沌分析	396
6.3 基于延时反馈的超声波电机混沌控制方法	403
6.3.1 行波超声波电机系统的延时反馈混沌控制	404
6.3.2 行波超声波电机延时反馈混沌控制仿真结果	405
6.4 基于模糊延时反馈的超声波电机混沌控制方法	409
6.4.1 行波超声波电机系统的模糊延时反馈混沌控制	410
6.4.2 仿真结果	413
参考文献	415

第 1 章 绪 论

为了满足现代自动化设备对运动控制装置提出的诸多新要求,如短、小、轻、薄、无电磁干扰、低噪声等,从 20 世纪 80 年代开始,许多国内外学者开始致力于超声波电机(ultrasonic motor, USM)这种新型微特电机的研究与开发工作。超声波电机结构及运行原理不同于传统的电磁电机,它是利用压电材料的逆压电效应产生超声波振动,从而把电能转换为弹性体的超声波振动,并通过摩擦传动的方式转换成运动体的回转或直线运动。

这种电机的输入驱动电源频率在 20kHz 以上,内部没有磁极和绕组,一般由振动体(相当于传统电机中的定子,由压电陶瓷和金属弹性体制成)和移动体(相当于传统电机中的转子)组成。为了减少振动体和移动体之间相对运动产生的机械磨损,通常在二者之间粘贴一层特殊的摩擦材料。在振动体表面粘贴的压电陶瓷片上施加超声频率的交流电压时,压电陶瓷的逆压电效应在振动体内激发出通常为 20~100kHz 的超声波振动,使得振动体表面质点形成具有一定运动轨迹的超声频率微观振动,振幅一般为几微米。该微观振动通过振动体和移动体之间的摩擦作用,推动移动体沿某一方向做连续宏观运动。由此可见,超声波电机是通过重复应用小的位移来获得旋转或直线运动的一种机电能量转换装置。因此,与传统的利用电磁感应原理工作的电磁电机相比,超声波电机具有体积小、质量小、低速大扭矩、结构紧凑、无电磁干扰、控制精度高、动作响应快、运行无噪声、无输入自锁等特性,这些优点使它适合于微机电系统、精确定位控制、航空航天、军工、机器人、医疗设备、办公自动化等高端运动控制应用领域。正是由于超声波电机所具有的这些突出特点,关于它的研究备受关注,成为当今世界范围内的新兴研究领域。

1.1 超声波电机驱动控制技术的发展

关于超声波电机的研究,早期主要集中于材料特性、材料制备加工工艺、运动机理及机械结构的研究,目前则集中于新的电机结构、运动控制策略、应用技术三方面。在电机结构研究方面,先后提出了行波型、驻波型、直线及模态耦合型、兰杰文振子等不同结构的超声波电机。有关超声波电机的应用技术研究目前已经涉及航空航天、半导体工业、汽车、家用电器等众多领域。由于应用场合的多样性和复杂性,也由于超声波电机结构及外形设计的灵活性,超声波电机结构方面的研究工作仍将随着应用领域的拓展不断深入进行。

在各类超声波电机中,两相行波超声波电机应用最为广泛。本书所述研究工作均以此类电机为研究对象,下面所述超声波电机均指两相行波超声波电机。

两相行波超声波电机的运行离不开合适的驱动电路。究其原因,一是两相行波超声波电机必须工作在超声频段。根据各种电机不同的结构形式,要求驱动器能够输出频率在 20~100kHz 的高频电压,而且要求驱动器必须提供超声频段内两相具有一定相位差的同频、等幅的正弦交流驱动电压,电压峰峰值要求在几十伏特到上千伏特。二是由于压电材料具有容性负载的特点,不同于传统电机的感性或阻性特性,为了提高驱动电路效率,实现能量的高效转换,使超声波电机获得足够的功率,在驱动电源和电机之间必须加上匹配电路,以改善驱动电压波形、减小高频谐波分量,避免激发出定子的非工作模式。因此,传统电磁式电机的驱动装置对超声波电机并不适用,必须为其设计专用驱动电路。

驱动控制电路设计是否合理与超声波电机的运行性能和更大范围的推广应用息息相关。目前,驱动电路的设计大都采用全控型电力电子器件、PWM 高频逆变电路等现代电力电子技术手段。使用较多的主电路拓扑结构有推挽、半桥、H 桥等,与主电路结构相适应的不同 PWM 方法则被用来调节驱动电压的幅值、频率及相位差,进而实现对电机转速、位置的控制。可以看出,在超声波电机的闭环控制系统中,基于 PWM 技术的主电路是控制前向通道中的执行机构,其输入-输出线性度与调节精度直接关系到控制系统的动态性能。由此可以说,现代电力电子技术是超声波电机高性能控制的基础。

由于超声波电机特殊的本体结构和运行机理,使其控制也不同于传统的电磁电机。其输出特性会随着环境温度、摩擦损耗、预压力、驱动激励频率等因素的变化而呈现出严重的非线性与分散性,且不易建立精确数学模型。为了实现超声波电机的高性能运行,必须获取相关反馈信号并进行闭环控制。所以超声波电机通常不能像传统电磁电机那样开环工作,转速和/或位置的闭环控制是发挥和提高超声波电机运行性能的必要环节。

对两相行波超声波电机进行控制,就是改变电机内部行波的波幅、速度和定子表面质点的椭圆运动轨迹,相应的控制变量为电机两相驱动电压的幅值、频率、相位差。若电机端电压过低,压电元件难以起振;过高则会超过电机允许的电压极限,损坏电机;而且在一定的电压调节范围内,电压幅值的改变对电机转速影响较小,在需要大范围调速的应用中较少使用,可用于转速在小范围内的高精度调节。调频控制通过改变两相电压激励频率来控制定子的共振状态。由于电机通常工作在其谐振频率点附近,调频调速具有响应快、调速范围大等特点。电机两相电压的相位差与定子表面质点的运行速度有一定的函数关系,所以通过改变两相电压之间的相位差也可对转速进行控制。

对超声波电机伺服定位和速度控制的研究大致始于 20 世纪 90 年代,Yuji、

Senjyu、Lin 等学者在该领域进行了较多研究。随着机理研究的深入及性能要求的逐步提高,近年来关于超声波电机运动控制技术的研究越来越受到重视。由于包含压电能量转换、摩擦能量传递等过程,超声波电机非线性及内部多变量耦合较为严重,不易控制。众多控制策略,如 PID、自适应、滑模变结构、神经网络、模型参考、逆模型、 H^∞ 等,都已被尝试用于超声波电机运动控制,改善了超声波电机运行过程中的谐振频率点漂移、温度补偿等问题,提高了速度稳定性与跟踪性能。但是,由于对超声波电机研究历史不长,对超声波电机不同于电磁电机的运行机理及非线性特点认识不足,超声波电机的潜能未得到充分发挥,控制效果仍有较大的改进余地。根据超声波电机的运动机理及不同应用场合的特定要求,研究合适的驱动控制电路及适当的控制策略,提高电机运动控制系统的运动精度、重复精度、整体效率及可靠性已经成为目前超声波电机研究的重点。

电机驱动控制系统的模型是控制策略研究的基础,因此,本节将从建模与控制策略两方面评述超声波电机运动控制的国内外发展现状。

1.1.1 超声波电机系统建模的研究

系统模型是控制系统设计的前提条件。超声波电机作为一种新型机电能量转换装置,其能量转换过程包括多个层次^[1],首先是通过压电陶瓷材料逆压电效应将高频高压电能转换为定子表面质点的波动机械能,随后这一质点运动通过定转子接触表面的摩擦作用转换为转子的旋转运动。复杂的能量转换过程及功能材料的非线性特性,使得超声波电机具有较强非线性,内部状态变量耦合关系复杂,因而也就使超声波电机的准确理论建模难于实现。

从控制应用的角度出发,为使所建立的超声波电机系统模型更适合于控制应用,需考虑理论精确建模之外的其他方法,目前主要有等效电路模型、平均值模型和辨识建模三类。其中,等效电路模型已有较多研究,能够用来较好地表述超声波电机工作原理和静态特性,但在动态特性描述方面尚显不足,等效电路参数的在线辨识是将该模型用于高性能控制的一种途径^[2]。Maas 提出的超声波电机平均值模型^[3,4],虽然未能确切描述能量的摩擦传递过程,但为研究者提供了可借鉴的思路。通过进一步研究^[5]与融合,平均值模型有可能成为一类有应用前景的建模方法。

近几年,超声波电机的辨识建模方法逐渐兴起,目前已成为超声波电机运动控制研究中采用的主要建模方法。文献中给出的辨识建模方法多种多样,模型形式也有差异。其中,最为常见的是差分模型,如文献[6]中所用模型形式为

$$\begin{cases} Ay(k) = q^{-d}Bu(k) + w(k) \\ A = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \cdots + a_nz^{-n} \\ B = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \cdots + b_mz^{-m} \end{cases} \quad (1.1)$$

式中, $y(k)$ 为系统输出; $u(k)$ 为输入的控制量; $w(k)$ 为白噪声信号;多项式 A 、 B 中

的待定系数 $a_1, \dots, a_n$ 和 $b_0, \dots, b_m$ 由辨识获得,模型阶次根据应用所需模型精度确定。

根据控制算法设计或仿真分析的不同需求,模型形式也可以是传递函数,如文献[7]中以电机驱动器的输入给定电压作为输入量,得到的模型为

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{\alpha}{J_r s + \delta} = \frac{K}{T_s + 1} \quad (1.2)$$

式中, K, α 为比例系数; J_r 为转子转动惯量; δ 为阻尼力矩系数。

为了描述超声波电机的时变特性,差分或传递函数模型中的模型参数可以表述为一个或多个电机状态量的函数。例如,文献[8]中所用模型形式为

$$\frac{y(k)}{u(k)} = \frac{b_1(f) + b_2(f)z^{-1} + \dots + b_5(f)z^{-4}}{1 + a_1(f)z^{-1} + \dots + a_5(f)z^{-5}} \quad (1.3)$$

式中, $a(f), b(f)$ 均为以电机驱动频率 f 为自变量的多项式函数。文献[7]中则采用如下形式:

$$Gm[s, u] = e^{-\tau_m[u]s} \frac{K_m[u]}{T_m[u]s + 1} \quad (1.4)$$

式中, $K_m[u], T_m[u]s, \tau_m[u]s$ 用来表示模型参数随电机驱动器输入给定电压 u 变化的关系。

针对超声波电机系统不同控制需求,如何设计建模方法及建模过程以得到合适的模型,尤其是模型参数如何用来更准确地表述时变特性,仍需要进一步的细化研究。

1.1.2 超声波电机的运动控制策略

如前所述,超声波电机运行过程中表现出显著的时变及非线性特性,这给超声波电机的运动控制带来了不小的难度。按照超声波电机的运行机理,其控制的实质在于改变定子表面行波的波幅、速度以及质点的椭圆运动轨迹,相应的可控输入量为电机驱动电压的幅值、频率和相位差。已有许多控制策略应用于超声波电机,下面分类阐述比较典型的控制策略。

1. PID 控制

用于超声波电机的 PID 控制有固定参数 PID 和变参数 PID 控制两类。因为超声波电机的时变特性,固定参数 PID 控制难以取得好的控制效果,变参数 PID 则要好一些。神经元 PID 控制采用单个神经元实现 PID 控制^[9],并利用神经网络的在线学习算法实时更新连接权重,这就实现了 PID 控制参数的动态调节。文献[10]中则利用遗传算法在线优化 PI 控制器参数,优化过程以位置偏差最小为目标,能够在一定程度上补偿超声波电机的非线性及时变特性;但是遗传算法的随机

特性,以及在线计算量与控制实时性、时变跟踪能力之间的折中考虑会影响到效果。

2. 自适应控制

自适应控制能通过不断调整控制器参数来补偿被控对象的特性变化,适用于超声波电机这样的时变对象。从实用角度讲,自适应控制可分为自校正、模型参考自适应和非线性自适应控制等几类。

1) 自校正控制

文献[11]以驱动电压相位差作为控制量,使用包含在线参数辨识的最小方差自校正控制器来补偿电机的时变特性。电机数学模型采用差分形式,控制原则是使代价函数 J_1 最小

$$J_1 = E\{[y(k+d) - y_m]^2 + \lambda[u(k)]^2\} \quad (1.5)$$

式中, $y(k+d)$ 和 y_m 分别为实际位置和期望的转子位置; $u(k)$ 为输入控制量(相位差); λ 为加权因子,用以限制输入使之不致过大,同时也改善系统的闭环稳定性。文献[11]采用经典的自校正算法进行控制,控制计算所需的电机参数由最小二乘法在线辨识获得,可实现对阶跃信号的快速准确响应。

2) 模型参考自适应控制

模型参考自适应控制(MRAC)利用参考模型输出与实际系统输出之间的差值,不断调整控制器参数补偿被控对象的参数变化。文献[12]采用驱动电压相位差为控制量,采用标准的二阶环节作为参考模型,设计了模型参考自适应控制系统;控制器由前置滤波器 $\hat{F}_2(t)$ 、反馈补偿器 $\hat{F}_1(t)$ 、自适应机构和参考模型组成。为确定 $\hat{F}_1(t)$ 和 $\hat{F}_2(t)$ 的自适应律,定义 Lyapunov 函数

$$V = e_m^T P e_m + \text{tr}(\psi^T \Gamma^{-1} \psi) \quad (1.6)$$

式中, e_m 为实际输出与模型输出间的差值; P, Γ^{-1} 为正定对称矩阵; ψ 为可调系统 $\hat{F}_1(t)$ 和 $\hat{F}_2(t)$ 与模型的偏差向量。由此 Lyapunov 函数得自适应律为

$$\begin{cases} \hat{F}_1(t) = -\mu B_m^T P e_m x^T \\ \hat{F}_2(t) = -\mu B_m^T P e_m r^T \end{cases} \quad (1.7)$$

式中, μ 为正实数。依此自适应律调节控制器参数,可使电机的转角较快地跟踪参考模型的输出。

3) 非线性自适应控制

超声波电机是非线性、时变的被控对象,设计合适的非线性自适应控制算法,有可能达到更为理想的控制效果。但是从控制理论的发展来看,非线性系统的控制是十分复杂的问题,目前,只是针对某些特定的非线性控制问题取得了一些研究成果,还没有一般性的控制算法可以遵循。对于超声波电机而言,适当的非线性自适应控制算法仍有待细致探求。

文献[13]采用驱动电压相位差作为控制变量,对超声波电机的非线性自适应控制问题进行了初步研究,给出了一种超声波电机 Hammerstein 模型。该模型由静态非线性、动态线性脉冲传递函数两部分串联构成。根据实验结果,电机稳态转速 ω_{ss} 与驱动频率 f 、负载转矩 T_L 和温度 φ 的关系被表述为

$$\omega_{ss}(f, T_L, \varphi) = 3.4333 \times 10^{-6} [f + 5(\varphi - 25)]^2 - 0.2868 [f + 5(\varphi - 25)] - 66.6667 T_L^2 + 5.9924 T_L + 5.9925 \times 10^3 \quad (1.8)$$

式(1.8)就是 Hammerstein 模型的静态非线性部分。动态线性部分的模型则取为

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{Km}{\tau s + 1} \quad (1.9)$$

根据上述 Hammerstein 模型,文献[14]采用广义预测控制实现了具有较强抗扰能力的位置控制。

3. 智能控制

1) 模糊控制

目前,单一的固定参数模糊控制方法应用于超声波电机控制,虽然可提高系统鲁棒性,但难以得到较高的控制精度,因而多采用变参数模糊控制,或是与其他控制算法相结合,如 PI+模糊控制。文献[15]将模糊推理与 MRAC 相结合,模糊控制器用来补偿相位差控制死区,MRAC 主要完成位置控制功能,两个控制器输出的和作为控制量。

2) 人工神经网络

人工神经网络(ANN)具有非线性逼近、自适应特征,在许多领域已获得广泛应用。目前,ANN 在超声波电机领域已被用于模型辨识和控制。ANN 用于辨识建模,可以得到前向模型或逆模型。逆模型可直接用作非线性控制器,如文献[16]采用神经网络构建了一种多自由度超声波电机的逆模型,并给出了一种基于逆模型的控制方法来实现转子绕任意轴旋转的目标。ANN 用于超声波电机控制的具体形式多种多样。文献[17]在神经网络结构中加入小波层,能更好地实现非线性特性映射,用于超声波电机 X-Y 运动台定位控制时具有较好的抗扰能力。

3) 模糊神经网络控制

模糊与人工神经网络相结合,构成的控制方法可称为模糊神经网络控制。这种结合的形式多种多样。例如,文献[18]采用模糊与神经网络控制器各自独立工作、互相切换的方式,模糊控制器用来加快系统响应速度,系统进入稳态后才开始工作的神经网络控制器则用于消除稳态误差;这是一种互相独立的“结合”,神经网络仅用于克服模糊控制的缺陷。

综上所述,对超声波电机非线性的研究^[19~24],及在此基础上的电机建模研究^[25~27],是超声波电机运动控制研究的基础。由于超声波电机包含多个相互关

联、相互影响的机电能量转换、传递过程,理论建模复杂且不易在线实现。从控制应用角度出发,在理论指导下的实验辨识建模方法较为合适。

随着我们对超声波电机系统非线性认识的不断深入,细致探求超声波电机系统控制策略的条件已日渐成熟。对于超声波电机这类非线性、时变控制对象,控制策略应具有自适应能力。随着研究与实践的逐步深入,超声波电机运动控制正在向着充分利用控制自由度、实现性能动态优化的方向发展。

超声波电机运动控制技术研究以应用为目的,一方面,如上所述,需要研究高性能运动控制策略及实现方法;另一方面,也应注重面向工业应用,研究低成本、高可靠性的驱动控制装置^[28~31]。为降低成本,控制算法应相对简单,如固定及可变参数 PID 控制方法。

随着超声波电机的广泛应用,对其驱动控制技术提出了越来越高的要求,现有驱动控制技术有待进一步改进和完善^[42];而微型化、高性能的驱动控制电路和适合的控制算法依然是近年来国内外学者研究的热点和难点。

1.2 本书的内容安排

本书系统介绍了作者近年来在超声波电机运动控制领域进行的研究工作。其主要内容包括以下方面:

(1) 超声波电机理论建模与辨识建模方法。较为深入地研究了超声波电机的运行机理,建立了超声波电机的理论数学模型,并实现了仿真计算;研究了超声波电机系统平均值建模方法;研究了基于改进 LMS 法的超声波电机等效电路模型参数辨识问题;研究了基于神经网络的超声波电机辨识建模方法;研究了适合于转速控制应用的超声波电机辨识建模方法。

(2) 超声波电机新型及特种驱动控制电路。针对不同应用场合需求,先后研制了推挽、微功率谐振、推挽 LC、Boost-LC、相移 H 桥等十余种不同结构形式的驱动电路。设计了适合于两相行波超声波电机控制应用的对称 PWM 信号发生器、相移 PWM 信号发生器。对驱动电路及其与超声波电机相互作用导致的控制非线性进行了细致分析与讨论,给出了减弱这种非线性的 PWM 调节方法和逆变电路、匹配电路设计原则。

(3) 超声波电机运动控制策略。在研究超声波电机系统控制非线性的基础上,提出了动态神经网络自适应、多变量复合自适应、单神经元低频 PWM、基于模型增益的极点配置参数自校正、模糊-模型参考自适应 PID 控制、Lyapunov 模型参考自适应等多种有效的超声波电机运动控制策略。

(4) 超声波电机混沌运行分析与控制。分别采用基于实验数据的相空间重构、混沌建模方法,对行波超声波电机进行了混沌运行分析,指出超声波电机运动