

超声波电机控制技术

史敬灼 著

非
外
借



科学出版社

超声波电机控制技术

史敬灼 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要阐述超声波电机控制技术及具体装置的设计与实现方法,反映超声波电机控制领域的最新进展,内容丰富,深入浅出,包括超声波电机改进PID控制技术、黄金分割自适应控制技术、模型参考自适应控制技术等。针对超声波电机产业化应用需求,书中给出多种在线计算量小的超声波电机新型控制策略及详细设计方法,分析超声波电机系统的控制非线性问题,并论述了适合控制应用的超声波电机控制系统建模方法。

本书可作为高等院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

超声波电机控制技术/史敬灼著. —北京:科学出版社,2018.11

ISBN 978-7-03-059351-1

I. ①超… II. ①史… III. ①超声波电机-控制系统 IV. ①TM38

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第251420号

责任编辑:陈 婕 / 责任校对:张小霞

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝 正

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年11月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年11月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:300 000

定价:98.00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。因超声波电机具有无电磁干扰、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。

由于超声波电机主要基于逆压电效应的机电能量转换过程,以及定子、转子间的机械能摩擦传递过程,其运行过程的非线性、时变特性明显,且电机内部多变量耦合较为复杂,因此不易实现良好控制。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,能量损耗引起电机温度升高,电机定子压电材料特性及定子、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发生变化;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。

对超声波电机非线性的研究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。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,因此其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,既相对简单,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。

电机本体固有的非线性,是制约超声波电机驱动系统运动控制性能的关键因素。多年来,研究者不断探求新的控制策略与实现形式,控制算法渐趋复杂。许多复杂的控制策略先后被提出,并用于超声波电机。这些控制策略的算法复杂,不仅增加了系统复杂度、降低了系统可靠性,而且在线计算量大,其实现需要更高档的 DSP 芯片甚至台式计算机,从而增加了系统成本,不利于超声波电机的产业化应用。

另外,由于超声波电机非线性运动过程的复杂性,其运动控制策略为了抵消或补偿这种非线性,需要具有与超声波电机相适应的非线性特征和复杂度。如果所用控制策略的复杂度超出了超声波电机控制所需,或者控制策略具有的非线性与超声波电机的非线性特征不匹配,就类似于“过拟合”,反而会使超声波电机运动过程呈现出更多的非线性。

面对产业化应用需求,在满足系统性能要求的前提下,探求相对简单、在线计算量小的控制策略以降低系统复杂度,从而降低成本并提高系统可靠性,已成为当前超声波电机控制策略研究的热点。

作者课题组近年在超声波电机控制策略研究方面做了一些探索性的研究工作,本书是对这些研究工作的总结。感谢国家自然科学基金、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项目对与本书内容相关的研究工作的资助。感谢研究生尤冬梅、王晓阳、刘玉、沈晓茜、王晓节、赵福洁等同学在相关研究工作中的付出。

由于作者经验和水平所限,书中难免存在不妥之处,殷切希望读者批评指正。作者的联系地址是:河南省洛阳市开元大道 263 号河南科技大学电气工程学院 60 信箱,邮编 471023,Email:shijz@haust.edu.cn。

史敬灼

2018 年 3 月

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	2
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	5
1.2 本书的内容安排	7
参考文献	8
第 2 章 超声波电机系统的辨识建模	11
2.1 超声波电机系统的阶跃响应辨识建模	12
2.1.1 数据测试实验设计	12
2.1.2 基于阶跃响应的超声波电机模型辨识	13
2.2 超声波电机系统的转速控制 Hammerstein 辨识建模	19
2.2.1 非线性 Hammerstein 模型	20
2.2.2 粒子群优化算法	21
2.2.3 基于粒子群优化的超声波电机非线性 Hammerstein 辨识建模	24
2.3 超声波电机系统的位置控制 Hammerstein 辨识建模	33
2.3.1 超声波电机 Hammerstein 位置控制模型的结构	34
2.3.2 超声波电机 Hammerstein 位置控制模型的辨识	35
2.3.3 菌群觅食优化算法参数值的确定	40
2.3.4 超声波电机系统位置控制模型阶次的确定	42
参考文献	45
第 3 章 超声波电机改进 PID 控制策略	46
3.1 超声波电机常规 PID 转速控制性能	46
3.1.1 超声波电机固定参数 PID 控制方法仿真研究	47
3.1.2 超声波电机固定参数 PID 控制性能的实验研究	52
3.1.3 基于曲线拟合的变参数 PID 控制器	57
3.2 超声波电机的简单专家 PID 速度控制	58
3.2.1 专家规则的设计	58
3.2.2 专家规则的实验研究	62
3.2.3 简单专家 PID 控制器的性能测试	69

3.3 超声波电机单输入 Takagi-Sugeno 模糊转速控制	72
3.3.1 单输入 T-S 模糊转速控制器的设计	73
3.3.2 与传统模糊控制器的计算量对比	75
3.3.3 单输入 T-S 模糊转速控制实验	75
参考文献	76
第4章 基于特征模型的超声波电机自适应控制策略	77
4.1 超声波电机的特征模型建模	78
4.1.1 超声波电机的特征模型	78
4.1.2 固定参数模型的辨识建模	84
4.1.3 超声波电机的特征建模	87
4.1.4 以转速误差为输出的特征建模	92
4.2 超声波电机转速的黄金分割控制	98
4.2.1 超声波电机线性黄金分割控制策略	98
4.2.2 线性黄金分割控制的仿真研究	99
4.2.3 超声波电机线性黄金分割控制的实验研究	109
4.2.4 超声波电机非线性黄金分割自适应控制策略	118
4.2.5 非线性黄金分割自适应控制的仿真研究	119
4.2.6 超声波电机非线性黄金分割控制的实验研究	125
4.3 超声波电机转速的全系数自适应控制	136
4.3.1 超声波电机全系数自适应控制策略	136
4.3.2 全系数自适应控制的仿真研究	138
4.3.3 超声波电机全系数自适应控制的实验研究	140
参考文献	150
第5章 超声波电机模型参考自适应控制策略	152
5.1 超声波电机 MIT 模型参考自适应转速控制策略	152
5.1.1 超声波电机 MIT 模型参考自适应转速控制	153
5.1.2 基于 Lyapunov 稳定性的超声波电机 MIT 转速控制	163
5.1.3 超声波电机改进 MIT 模型参考自适应转速控制	167
5.1.4 基于 Lyapunov 稳定性的超声波电机改进 MIT 转速控制	178
5.2 基于超稳定理论的超声波电机模型参考自适应控制	183
5.2.1 基于超稳定理论的超声波电机转速控制策略	183
5.2.2 超声波电机转速控制策略的具体设计	189
5.2.3 模型参考自适应转速控制策略的仿真研究	190
5.2.4 采用滤波导数的超声波电机转速控制策略	198
参考文献	204

第 6 章 超声波电机迭代学习控制策略	205
6.1 迭代学习控制的思路与基本算法	206
6.2 超声波电机 P 型迭代学习控制	208
6.2.1 学习增益 K_P 的确定	208
6.2.2 实验分析	210
6.3 超声波电机 PI 型迭代学习控制	219
6.4 超声波电机 PD 和 PID 型迭代学习控制	225
6.4.1 超声波电机 PD 型迭代学习转速控制	225
6.4.2 超声波电机 PID 型迭代学习转速控制	228
6.5 超声波电机非线性正割迭代学习控制	231
参考文献	234

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,自 20 世纪 80 年代起,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为运动体的回转或直线运动。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,下文所述超声波电机均指两相行波超声波电机。

应用领域的不断拓展,对行波超声波电机的转速控制性能提出了越来越高的要求。但由于超声波电机基于逆压电效应的机电能量转换过程,以及定子、转子间的机械能摩擦传递过程,其控制非线性及内部多变量耦合较电磁电机复杂,因此不易实现良好控制。电机本体固有的非线性,是制约超声波电机控制性能的关键因素。从控制的角度来看,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子、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发生变化;三是驱动电路可控变量与电机端电压实际表现之间的非线性。

对超声波电机的控制动作都是通过调节外加驱动电压来实现的。上述非线性体现在电机的驱动电压上,还表现出以下两个方面的特征:一方面,电机两相特性不一致使得两相驱动电压幅值差异较大,导致定子表面各质点的椭圆运动轨迹发生畸变;另一方面,驱动电压幅值存在波动现象。驱动电压幅值波动主要源于以下原因:一是电机定子每相压电陶瓷片各个分区材料特性不完全一致;二是电机定子、转子接触表面各点接触状态有差异;三是电机运行过程中,各部位发热导致的温度变化不均匀等。这些电机特性差异使得电机每相等效电参数发生时变,导致驱动电压幅值波动。驱动电压的这些非线性表征,直接影响电机转速控制精度和响应速度。

如何克服超声波电机系统固有的非线性及时变特征,得到符合应用期望的转速控制性能和运行稳定性,是超声波电机转速控制研究面临的核心问题。近年来,研究者不断探求新的控制策略与实现形式,控制算法渐趋复杂化。许多复杂的控制策略,先后被提出并用于超声波电机。这些控制策略的算法复杂,不仅增加了系

统复杂度、降低了系统可靠性,而且在线计算量大,其实现需要更高档的 DSP 芯片甚至台式计算机,增加了系统成本,不利于超声波电机的大规模产业化应用。

面对产业化应用需求,在满足系统性能要求的前提下,探求相对简单、在线计算量小的超声波电机控制策略,以降低系统复杂度,从而降低成本并提高系统可靠性,已成为当前超声波电机控制策略研究的又一热点。

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,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,其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。由于超声波电机应用场合的多样性和复杂性,以及其结构与外形设计的灵活性,其结构方面的研究工作仍将随着其应用领域的拓展而不断深入展开。

两相行波超声波电机的运行离不开合适的驱动电路。其原因有两点: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 $20\sim 100\text{kHz}$ 的高频电压,且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之间;二是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态。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。

由于超声波电机具有特殊的本体结构和运行机理,故超声波电机的控制不同于传统的电磁电机。超声波电机的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振频率来控制定子的共振状态。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。因为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始于20世纪90年代,Yuji、Senjyu、Lin等学者在该领域进行了较多的研究。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。由于超声波电机的运行包含压电能量转换、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,一直是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,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,因此,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。Maas 等(1997,2000)提出的超声波电机平均值模型,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(庞华山等,2010)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,模型形式亦有差异。其中最为常见的是差分模型,如 Senjyu 等(1998)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,如张新良等(2008)以电机驱动器的输入给定电压作为输入量,得到的模型为

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

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,刘博等(2010)所用模型形式为

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

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。张新良等(2008)则采用如下形式:

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

式中, $K_m(u)$ 、 $T_m(u)$ 、 $\tau_m(u)$ 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(傅平等,2007)采用单个神经元实现 PID 控制,并利用神经网络的在线学习算法实时更新连接权重,实现了 PID 控制参数的动态调节。贺红林等(2009)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优化效果。

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

李华峰等(2003)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 分别为实际的转子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,使之不至过大,同时也改善系统的闭环稳定性。李华峰等(2003)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。Senjyu 等(2002)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:

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

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; ϕ 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

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

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。

Bigdeli 等(2004a)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_s 与驱动频率 f 、 T_L 和温度 φ 的关系可表述为

$$\begin{aligned} \omega_s(f, T_L, \varphi) = & 3.4333 \times 10^{-6} [f + 5(\varphi - 25)]^2 - 0.2868 [f + 5(\varphi - 25)] \\ & - 66.6667 T_L^2 + 5.9924 T_L + 5.9924 \times 10^3 \end{aligned} \quad (1.8)$$

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

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

根据上述 Hammerstein 模型, Bigdeli 等(2004b)采用广义预测控制实现了具有较强抗扰性的位置控制。

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,因此目前多采用变参数模糊控制,或与其他控制算法相结合,如 PI+模糊控制。Senjyu 等(2002)将模糊推理与 MRAC 相结合,用模糊控制器来补偿相位差控制死区,用 MRAC 主要完成位置控制功能,将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 Take-mura 等(2002)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。Lin 等(2004)在神经网络结构中加入小波层,更好地实现了非线性特性映射,将其用于超声波电机 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。如贺红林等(2006)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,用模糊控制器来加快系统响应速度,用系统进入稳态后才开始工作的神经网络控制器消除稳态误差;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。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,因此其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。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的改进和完善;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课题组近年在超声波电机控制领域进行的研究工作,章节内容安排如下:

第1章简单叙述了超声波电机驱动控制技术的发展。

第2章讨论两相行波超声波电机驱动控制系统的建模方法:采用系统辨识方法,建立适合于超声波电机转速闭环控制应用的电机系统模型,为后续章节控制策略研究提供基础。这里给出的辨识建模方法对其他类型的超声波电机及传统电磁电机的建模研究均有借鉴意义。

第3章针对超声波电机产业化应用需求,在满足系统性能要求的前提下,研究相对简单、在线计算量小的控制策略,以降低成本并提高系统可靠性;在研究PID控制性能的基础上,给出了简单专家PID、单输入Takagi-Sugeno模糊控制等超声波电机控制策略。

第4章建立了超声波电机的特征模型,并基于该模型设计了超声波电机线性与非线性黄金分割转速控制策略、全系数自适应控制策略。实验结果表明,所提控制策略具有较好的鲁棒性,且具有在线计算量相对较小的特点。

第5章研究超声波电机模型参考自适应控制策略:首先设计改进MIT模型参考自适应转速控制策略,降低控制策略复杂度,以利于超声波电机的工业化推广应用;其次,为了保证系统的稳定性,给出采用Lyapunov稳定性理论推导自适应律的改进MIT转速控制策略;最后,基于波夫超稳定理论,采用输入输出值微分反馈网络方法,设计了超声波电机模型参考自适应转速控制策略。

第6章尝试将迭代学习控制策略用于超声波电机控制,针对超声波电机的控制特点,设计了P型迭代学习、PI型迭代学习和非线性迭代学习等多种控制律,并根据超声波电机的非线性、时变特点,给出了改进的控制算法。

参 考 文 献

- 傅平,郭吉丰. 2007. 基于神经元自适应PID的超声波电机速度位置控制[J]. 电工技术学报, 22(2):28-33.
- 郭吉丰,楼少敏,刘晓. 2002. 微系统用超声微电机的研究现状和发展趋势[J]. 工程设计学报, 19(4):173-177.
- 贺红林. 2007. 超声波电机及其在机器人上的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学.
- 贺红林,赵淳生. 2006. 超声波电机驱动的机器人的模糊神经网络控制[J]. 压电与声光, 28(2): 143-146.
- 贺红林,朱华,赵淳生. 2009. 行波超声波电机的遗传算法变增益PI位置控制[J]. 机械科学与技术, 28(10):871-875.
- 胡敏强. 2000. 超声电动机的研究及其应用[J]. 微特电机, 28(5):8-11.
- 蒋天发,王江晴. 2003. 神经网络PID复合智能控制参数自整定研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 36(4):111-114.
- 李华峰,辜承林. 2003. 使用自适应控制的超声波电机精密位置控制[J]. 压电与声光, 25(2): 155-158.

- 刘博,史敬灼. 2010. 超声波电机频率-转速控制的动态辨识建模[J]. 微特电机, 38(7): 65-68.
- 庞华山,史敬灼,刘兆魁. 2010. 两相行波超声电机系统平均值模型研究[J]. 微特电机, 38(1): 4-8.
- 钱卫忠,曾周末,杨学友. 2000. 超声波电机驱动源的频率跟踪[J]. 天津大学学报, 33(3): 375-377.
- 上羽贞行,富川义郎. 1998. 超声波马达理论与应用[M]. 杨志刚,郑学伦,译. 上海:上海科学技术出版社.
- 史敬灼. 2006. 基于 Boost 升压与 LC 谐振的超声波驱动电路[J]. 电气应用, 25(8): 20-22.
- 史敬灼. 2008. 调频调幅调相的超声波电动机控制电路[J]. 微特电机, 36(1): 46-49.
- 史敬灼. 2011. 超声波电机运动控制理论与技术[M]. 北京:科学出版社.
- 史敬灼,候义铭. 2007a. 超声波电机低成本驱动电路[J]. 电气传动, 37(1): 62-64.
- 史敬灼,尤向阳. 2007b. 超声波电动机等效电路模型参数辨识[J]. 微特电机, 35(12): 52-54.
- 史敬灼,徐迎曦. 2009. 具有正反转不对称补偿的超声波电机闭环控制电路[J]. 电机控制与应用, 36(2): 41-46.
- 史敬灼,吕方方,吕琳. 2011. 超声波电机运动控制技术的发展[J]. 微特电机, 39(5): 76-78.
- 史婷娜,徐绍辉,夏长亮,等. 2003. 超声波电机模糊-PI 双模自适应速度控制[J]. 电工技术学报, 18(3): 1-4.
- 孙志峻,黄卫清. 2009. 超声电机驱动多关节机器人的类 PID 小波神经网络控制[J]. 机械工程学报, 45(3): 215-221.
- 王心坚,胡敏强,金龙,等. 2008. 基于单神经元 PID-PI 的行波超声波电机速度复合控制研究[J]. 微电机, 41(3): 19-22.
- 张新良,谭永红. 2008. 行波型超声波电机基于输入电压变化的参数模型辨识[J]. 系统仿真学报, 20(13): 3492-3496.
- 赵淳生. 2002. 面向 21 世纪的超声波电机技术[J]. 中国工程科学, 4(2): 86-91.
- 赵淳生. 2004. 世界超声电机技术的新进展[J]. 振动、测试与诊断, 24(1): 1-5.
- 赵淳生. 2006. 对发展我国超声电机技术的若干建议[J]. 微电机, 39(2): 64-67.
- 祖家奎,赵淳生. 2004. 行波超声波电机的驱动控制技术现状与发展[J]. 微特电机, 32(6): 38-42.
- Bal G, Bekiroglu E. 2005. A highly effective load adaptive servo drive system for speed control of traveling-wave ultrasonic motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 20(5): 1143-1149.
- Bigdeli N, Haeri M. 2004a. Modelling of an ultrasonic motor based on Hammerstein model structure[C]. The 8th Control, Automation, Robotics and Vision Conference, Washington DC.
- Bigdeli N, Haeri M. 2004b. Position control of an ultrasonic motor using generalized predictive control[C]. The 8th Control, Automation, Robotics and Vision Conference, Washington DC.
- Furuya S. 1992. Load adaptive frequency tracking control implementation of two-phase resonant inverter for ultrasonic motor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 7(3): 542-550.
- Izuno Y J, Izumi T, Yasutsune H, et al. 1998. Speed tracking servo control system incorporating traveling-wave-type ultrasonic motor and feasible evaluations[J]. IEEE Transactions on Indus-