

研究生教育书系
自动控制工程学科

交流电动机的 非线性控制

Nonlinear Control of AC motor

王久和 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

研究生教育书系
自动控制工程学科

交流电动机的非线性控制

王久和 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统地论述了非线性控制理论及其在交流电动机控制中的应用。

全书分为7章。第1章介绍了交流电动机非线性控制的现状及趋势;第2章论述了交流电动机在各种坐标系中的数学模型及空间矢量模型;第3章首先讨论系统反馈线性化设计方法,随后论述了反馈线性化设计方法在交流电动机中的应用;第4章首先讨论 Backstepping 设计方法,随后论述了 Backstepping 设计方法在交流电动机控制中的应用;第5章简介了逆系统方法,论述了基于逆系统方法的交流电动机控制策略;第6章介绍了无源控制理论、交流异步电动机无源控制数学模型,论述了交流异步电动机及交流永磁同步电动机无源控制策略;第7章介绍了自抗扰控制方法,论述了自抗扰控制在交流异步电动机及交流永磁同步电动机中的应用。

本书可供作为高等院校本科高年级学生、研究生参考,亦可供从事电力传动和非线性控制的科研和工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

交流电动机的非线性控制/王久和编著. —北京:电子工业出版社,2009.8

(研究生教育书系. 自动控制工程学科)

ISBN 978-7-121-09303-6

I. 交… II. 王… III. 交流电机—自动控制—研究生—教材 IV. TM340.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 125179 号

责任编辑:陈晓莉 特约编辑:李双庆 杨晓红

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:720×1 000 1/16 印张:13.25 字数:275 千字

印 次:2009 年 8 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:25.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

交流电动机变频调速控制技术是近代世界范围内的重大技术进步之一,广泛应用于交流电动机的速度控制。变频调速以其优异的调速和起制动性能,高效率、高功率因数和节能效果,广泛的适用范围及其他许多优点而被国内外公认为最有发展前途的调速方式。

为提高变频调速系统的性能,针对交流电动机的数学模型具有高阶、多变量、强耦合、非线性、参数时变的特点,20 世纪 70 年代西门子公司工程师 F. Blachke 首先提出交流异步电动机矢量控制理论,用来解决电动机的转矩控制问题,其基本思想是通过矢量坐标变换将一台异步电动机等效为直流电动机进行控制,从而获得与直流调速系统相媲美的静、动性能。目前,矢量控制技术已用在 SIEMENS、ABB、AB、GE、FUJI 等国际化大公司 & 国内一些电气设备公司制造的变频器中,使交流调速系统的动态性能与直流调速相媲美。但在运行中常出现控制性能不稳定现象,其原因有二:

一是没有针对交流电动机模型的复杂性采用相应有效的控制理论与控制方法,通常是在高度假设的条件下,按照经典控制理论设计控制器。

二是矢量控制系统对电动机的参数依赖性很大,检测误差及参数时变等因素会造成磁场定向坐标的偏差,从而导致解耦控制失效。因此,转矩的实际控制效果难以达到理论分析的结果,使调速系统的控制精度降低、动态性能变差,不能很好地满足现代化生产的需要。

继矢量控制方法之后,发展起来的是直接转矩控制。直接转矩控制的本质是在电动机定子坐标系中,采用空间矢量的分析方法,直接计算和控制电动机的电磁转矩,采用“砰一砰”控制。虽然直接转矩控制器简单,但增加了较大的脉动转矩分量;没有电流环,不能做电流保护,实际系统中需要加限流措施;对定子参数依赖大。

为了进一步提高交流电动机的控制性能,国内外学者开始将非线性控制理论应用到交流电动机控制系统中,取得了一定的进展。为推动交流电动机非线性控制的研究,开发高性能交流电动机控制系统,本书作者结合国内外学者将非线性控制理论在交流电动机中的应用成果,系统地论述了交流电动机的动态数学模型、各种非线性控制理论及其在交流电动机控制中的应用。

本书分为 7 章。第 1 章介绍了交流电动机非线性控制的现状及趋势;第 2 章论述了交流电动机在各种坐标系中的数学模型及空间矢量模型;第 3 章首先讨论系统

反馈线性化设计方法,随后论述了反馈线性化设计方法在交流电动机中的应用;第4章首先讨论 Backstepping 设计方法,随后论述了 Backstepping 设计方法在交流电动机控制中的应用;第5章简介了逆系统方法,论述了基于逆系统方法的交流电动机控制策略;第6章介绍了无源控制理论、交流异步电动机无源控制数学模型,论述了交流异步电动机及交流永磁同步电动机无源控制策略;第7章介绍了自抗扰控制方法,论述了自抗扰控制技术在交流异步电动机及交流永磁同步电动机中的应用。

此书由北京科技大学李华德教授担任主审。清华大学黄立培教授、北京交通大学郑琼林教授对此书的编写提出许多有益的建议,使本书内容选取和编写更加合理,保证了此书的质量和科学性。本书的出版得到了北京市教育委员会科技发展重点项目/北京市自然科学基金重点项目(B类)(KZ200710772015)及北京高等教育教学名师项目的资助。

此书除选用自己的一些研究成果外,还选用了国内外学者对交流电动机非线性控制研究成果,在此表示衷心的感谢。

由于本人的写作能力和学术水平有限,书中难免存有不妥之处,敬请读者给予批评指正。

作者
2009年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 交流电动机数学模型	1
1.1.1 基本数学模型	1
1.1.2 典型的非线性数学模型	1
1.2 交流电动机控制策略	2
1.2.1 交流电动机控制策略回顾	2
1.2.2 非线性控制理论在交流电动机控制中的应用	3
参考文献	7
第 2 章 交流电动机动态数学模型	9
2.1 三相交流异步电动机基本动态数学模型	9
2.1.1 三相交流异步电动机在三相静止 uvw 坐标系中的数学模型	9
2.1.2 异步电动机在两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系中的数学模型	14
2.1.3 交流异步电动机在两相同步旋转 dq 坐标系中的数学模型	18
2.1.4 交流异步电动机空间矢量数学模型	20
2.2 交流同步电动机基本动态数学模型	21
2.2.1 永磁同步电动机在三相静止 uvw 坐标系中的数学模型	21
2.2.2 永磁电动机在两相同步旋转 dq 坐标系中的数学模型	23
参考文献	24
第 3 章 交流电动机反馈线性化控制	25
3.1 反馈线性化控制理论	25
3.1.1 状态反馈线性化控制理论	25
3.1.2 输入/输出反馈精确线性化	36
3.1.3 多输入/多输出(MIMO)仿射非线性系统	37
3.2 交流电动机状态反馈线性化控制	41
3.2.1 交流异步电动机状态反馈线性化控制	41
3.2.2 永磁同步电动机状态反馈线性化控制	42
3.3 交流电动机输入/输出反馈线性化控制	48
3.3.1 交流异步电动机输入/输出反馈线性化控制	48
3.3.2 永磁同步电动机输入输出反馈线性化控制	53

参考文献	58
第4章 基于反步法的交流电动机控制	60
4.1 反步法控制原理	60
4.1.1 反步法控制原理的基本思想	60
4.1.2 反步法控制原理	60
4.2 交流异步电动机反步法控制	67
4.2.1 交流异步电动机自适应反步法控制 ^[3]	67
4.2.2 交流异步电动机变结构反步法控制	72
4.3 交流永磁同步电动机自适应反步法控制	78
4.3.1 永磁同步电动机数学模型	79
4.3.2 自适应反步法控制器设计	79
4.3.3 永磁同步电动机自适应反步法控制仿真研究	84
参考文献	85
第5章 基于逆系统方法的交流电动机控制	87
5.1 逆系统方法	87
5.1.1 逆系统方法的基本概念与原理	87
5.1.2 单变量逆系统方法	90
5.1.3 多变量逆系统方法	92
5.2 基于逆系统方法交流异步电动机控制	95
5.2.1 基于逆系统方法的交流异步电动机解耦控制	95
5.2.2 基于自适应逆系统方法的交流异步电动机控制	98
5.3 基于逆系统方法永磁同步电动机解耦控制	102
5.3.1 永磁同步电动机数学模型	102
5.3.2 永磁同步电动机的逆系统解耦控制	103
5.3.3 永磁同步电动机的逆系统解耦控制仿真研究	104
参考文献	105
第6章 交流电动机无源控制策略	107
6.1 无源控制理论	107
6.1.1 系统的无源性	107
6.1.2 欧拉—拉格朗日(EL)系统	109
6.1.3 端口受控的耗散哈密顿(PCHD)系统	110
6.2 交流异步电动机无源控制数学模型	112
6.2.1 交流异步电动机电气—机械系统统一数学模型	112
6.2.2 电气子系统和机械子系统互联数学模型	114

6.2.3	交流异步电动机 PCHD 数学模型	115
6.3	交流异步电动机无源控制策略	120
6.3.1	基于 EL 模型的交流异步电动机无源控制	120
6.3.2	基于无源性的交流异步电动机自适应控制	124
6.3.3	负载转矩未知时变时的交流异步电动机无源控制	128
6.3.4	基于无源的交流异步电动机能量最优控制	136
6.3.5	基于 PCHD 模型的交流异步电动机无源控制	148
6.4	交流永磁同步电动机无源控制	154
6.4.1	交流永磁同步电动机无源控制数学模型	155
6.4.2	交流永磁同步电动机无源控制策略	157
	参考文献	162
第 7 章	交流电动机自抗扰控制	165
7.1	自抗扰控制	165
7.1.1	PID 控制的优缺点	165
7.1.2	自抗扰控制	166
7.2	自抗扰控制在交流异步电动机中的应用	173
7.2.1	基于 ADRC 的交流异步电动机控制策略	173
7.2.2	交流异步电动机磁链观测	182
7.2.3	自抗扰控制器参数整定	188
7.3	自抗扰控制在交流永磁同步电动机中的应用	195
7.3.1	基于 ADRC 的交流永磁同步电动机矢量控制	195
7.3.2	基于 ADRC 的永磁同步电动机直接转矩控制	199
	参考文献	203

第 1 章 绪 论

随着电力电子技术和高速数字信号处理器(DSP)的发展,使交流传动处于工业电气传动系统的主导地位。由于交流电动机为高阶、强耦合及非线性系统,古典线性控制方法不能解决输入和输出的耦合及输出的独立控制等问题,不能满足高性能调速系统的控制要求。国内外学者开始将非线性控制理论应用到交流电动机控制系统中,取得了进展。本章对交流电动机的数学模型及非线性控制策略进行简述。

1.1 交流电动机数学模型

1.1.1 基本数学模型

交流电动机是一个机电系统,其数学模型可由电气部分和机械部分的数学模型组成。

电气部分的数学模型主要由定、转子的电压方程构成,在三相坐标系中有 6 个方程,在两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系或两相同步旋转 dq 坐标系中有 4 个电压方程(详见第 2 章)。电压方程是由电阻、电流、磁链决定的。电动机的状态变量可取定、转子电流,定、转子磁链,也可取定子电流、转子磁链。

机械部分的数学模型主要由运动方程构成,由电动机的电磁转矩、磁阻转矩、转子角速度、系统转动惯量决定。

由于交流电动机为高阶、强耦合、非线性系统,为简化系统设计,可根据具体情况对模型进行降阶处理。

1.1.2 典型的非线性数学模型

1.1.2.1 仿射非线性数学模型

根据基本数学模型,经过适当的变换和选取系统的输入、输出,交流电动机基本数学模型可变换为仿射非线性^[1]形式

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (1.1.1)$$

式中, x 为系统的状态矢量; u 为控制矢量; y 为输出矢量; $f(x)$ 、 $h(x)$ 为平滑的矢

量场。

模型式(1.1.1)可用于基于反馈线性化、逆系统方法的交流电动机控制策略中^[2-5]。

1.1.2.2 欧拉—拉格朗日(EL)数学模型

根据基本模型,可得交流电动机欧拉—拉格朗日(Euler-Lagrange,缩写为EL)形式的模型^[6]为

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{x}}+\mathbf{C}\mathbf{x}+\mathbf{R}\mathbf{x}=\mathbf{u} \quad (1.1.2)$$

式中, $\mathbf{M}$ 为正定对称矩阵, $\mathbf{M}=\mathbf{M}^T$; $\mathbf{C}$ 为反对称矩阵, $\mathbf{C}=-\mathbf{C}^T$; $\mathbf{R}=\mathbf{R}^T\geq 0$; $\mathbf{u}$ 为系统控制输入。

1.1.2.3 端口受控的耗散哈密顿(PCHD)数学模型

选取系统哈密顿能量函数 H 为

$$H=\frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{M}\mathbf{x} \quad (1.1.3)$$

则电动机的端口受控的耗散哈密顿(port controlled Hamiltonian with dissipation,缩写为PCHD)模型^[7]为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}=[\mathbf{J}(\mathbf{x})-\mathfrak{R}(\mathbf{x})]\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x})+\mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y}=\mathbf{g}^T(\mathbf{x})\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (1.1.4)$$

式中, $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 为 $n\times n$ 反对称矩阵, $\mathbf{J}(\mathbf{x})=-\mathbf{J}^T(\mathbf{x})$; $\mathfrak{R}(\mathbf{x})=\mathfrak{R}^T(\mathbf{x})\geq 0$ 代表耗散; $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 和 $\mathfrak{R}(\mathbf{x})$ 都是状态 $\mathbf{x}$ 的平滑函数。

交流电动机的EL及PCHD模型可用于基于无源控制的交流电动机控制策略中^[8-10]。

1.2 交流电动机控制策略

1.2.1 交流电动机控制策略回顾

1.2.1.1 经典的标量控制

对交流电动机的标量控制是基于非线性方程在稳态平衡点的线性化。这个方法的优点在于可以运用经典的线性控制理论设计控制器。标量控制可以用正弦定子电

压或电流的幅值和频率作为控制变量。基于标量控制的设计方法可以改变非线性系统的动态性能,改变的程度依赖小信号假设的程度,即依赖于距系统期望平衡点的远近。对交流电动机多变量系统使用这种方法的缺点在于输入和输出之间的耦合问题,即解耦的困难。例如,对于一个交流电动机来说,转矩和气隙磁链是电压幅值及频率的函数,当仅仅控制转矩时,出现的耦合会导致响应速度变慢。即便有很好的控制方案,交流电动机也很难达到直流电机所能达到的性能。

1.2.1.2 矢量控制

为克服经典标量控制方法的缺点,1969—1972年间发展起来的交流电动机矢量控制方法解决了传统的线性方法的一些缺点。这些方法能够通过转矩的渐进解耦和对磁链的控制,使交流电动机的性能如同直流电动机。为了达到这个目的,控制器设计中使用了电动机的非线性数学模型。

矢量控制方法^[11-12]是由一个非线性坐标变换和非线性解耦反馈构成。该方法需要大量且复杂的计算,因此,起初只是被认为是“纯学术”的方法,未能获得广泛的应用。直到1980年数字微处理器的出现,大量复杂的运算得以解决,使得矢量控制策略得到实现。矢量控制的基本变量是旋转的二维的定子电流矢量,而这些矢量又是通过非线性反馈电压控制律直接或间接地进行控制的。它的动态性能可以和传统的线性方法相媲美了。

矢量控制中最基本的一种控制是转子磁场定向控制,这种方法的主要缺点是假设全部状态可测量(磁链测量),控制律复杂,对参数的计算的精确度依赖性大。

1.2.1.3 直接转矩控制

继矢量控制方法之后,发展起来的是直接转矩控制^[13]。直接转矩控制的本质是在电动机定子坐标系中,采用空间矢量的分析方法,直接计算和控制电动机的电磁转矩,采用“砰—砰”控制。虽然控制器简单,但增加了较大的脉动转矩分量;没有电流环,不能做电流保护,实际系统中需要加限流措施;对定子参数计算的精确度依赖大。

1.2.2 非线性控制理论在交流电动机控制中的应用

在过去的20年,随着高速微处理器的出现,非线性控制理论得到了飞速的发展,包括线性理论所不能解决的一些领域。应用到交流电动机中的非线性控制理论主要有:反馈线性化、反步法、逆系统方法、无源理论及自抗扰技术等,这些非线性控制理论的应用,改善了电动机的控制性能,成为国内外学者研究的热点。

1.2.2.1 非线性控制理论在交流电动机控制中的应用现状

1. 反馈线性化控制理论在交流电动机控制中的应用

基于反馈线性化控制理论的控制器设计方法的目标是利用非线性控制律,将非线性系统转换成输入与输出为线性关系的线性系统,再由线性理论设计控制器,从而提高系统的动、静性能。该设计方法首先将电动机的数学模型转化为仿射非线性形式,通过对输出方程的简单求导,得到所需的坐标变换和非线性状态反馈,实现了交流电动机系统的输入/输出的线性化。这个方法最根本的是要保证系统的坐标的选择,在新坐标中可以达到内闭环解耦的功能。

反馈线性化方法需要全部的状态都是可测的,还需要动态模型的精确性,以及控制器的优化等。同时,在反馈线性化方法中,通过抵消系统的全部非线性因素,使闭环系统获得输入/输出线性关系。这其中有两个不足^[6]:第一个是,如果不能精确抵消非线性因素,容易引起严重的鲁棒性问题;第二个是,从数学观点看,并不是所有的非线性特征都对闭环动态性能有害。

综上,这种方法的缺点是:需要全状态可测量、需要精确抵消动态、引入控制器奇异性(特别是零转子磁链),对参数的依赖性大;控制律复杂,甚至比矢量控制策略的控制律还复杂。

2. 反步控制理论在交流电动机控制中的应用

反步控制法的基本思想是将复杂的非线性系统分解成不超过系统相对阶数的子系统,然后为每个子系统设计部分 Lyapunov 函数和中间虚拟控制量,一直“后退”到整个系统,将它们集成起来完成整个控制律的设计。其基本设计方法是从一高阶系统的内核开始(通常是系统输出量满足的动态方程),设计虚拟控制律保证内核系统的某种性能,然后对得到的虚拟控制律逐步修正算法,但应保证既定性能;进而设计出真正的镇定控制器,实现系统的全局调节或跟踪,使系统达到期望的性能指标。反步设计法适用于可状态线性化或具有严格参数反馈的不确定非线性系统。对于交流电动机,为了实现速度和磁链幅值跟踪的目标,自适应反步设计步骤如下:首先针对速度和磁链幅值跟踪的目标,定义跟踪误差并计算其导数,当负载转矩 T_L 为已知时,利用误差构成 Lyapunov 函数;二是重新定义含有期望变量的误差信号并计算其导数,考虑负载转矩估算误差,再计算速度和磁链幅值跟踪误差的导数;三是为了获得控制和参数的更新规律,由上述误差及负载转矩估算误差形成新的 Lyapunov 函数。

反步设计法的缺点是不能对转子磁链进行有效的跟踪,不能对电气参数进行补偿,且计算量大,限制了实测值^[6]。

3. 逆系统方法在交流电动机控制中的应用

逆系统方法的实质是应用反馈线性化方法来实现多变量、非线性、强耦合系统的线性化解耦。由于它不依赖于对非线性系统的求解或稳定性分析,只需讨论系统的反馈变换,因此是一种更具一般性的方法。逆系统方法的基本思想是:对于给定的系统,先用对象的模型生成一种可用反馈方法实现的原系统的“ γ 阶积分逆系统”,并将对象补偿成为具有线性传递关系且已解耦的规范化系统(称为伪线性系统),再用线性系统的各种设计理论来完成伪线性系统的综合。逆系统设计方法的应用前提是系统具有可逆性。

对于非线性系统 $\dot{x}=f(x,u), y=h(x,u)$, 在 (x_0, u_0) 的某个邻域可逆的充分的条件是系统存在相对阶 $\gamma=\{\gamma_1, \dots, \gamma_m\}$, 且满足 $\sum_{i=1}^m \gamma_i \leq n$ 。对于 2 输入/2 输出交流电动机非线性系统逆系统解耦如图 1.2.1 所示。

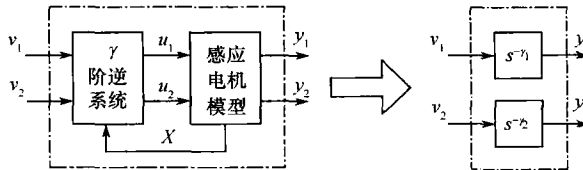


图 1.2.1 交流电动机与其 γ 阶积分逆系统组成的伪线性系统

逆系统方法的缺点^[1]是基于精确的数学模型和系统的参数,且须满足 $\sum_{i=1}^m \gamma_i \leq n$ 。因此,逆系统方法鲁棒性差。

4. 无源控制理论在交流电动机控制中的应用

基于无源控制(passivity-based control, 缩写为 PBC)方法最早用于机器人控制中,Ortega 等学者将无源性概念引入到电机控制中。无源控制从电动机的能量入手,利用不影响稳定性的无功功率简化控制器的设计,坐标变换不影响系统的无源性,可以选择不同的输出函数和能量函数,设计多种不同的无源控制方法;在定子坐标系下,系统的反馈不需要观测器,直接利用输入输出反馈就可实现系统的全局稳定性,无奇异点问题^[8]。由于无源控制是基于能量的观点,是一种全局定义且全局稳定的控制策略,对系统参数变化及外来摄动有较强的鲁棒性,是一种本质上的非线性控制。

交流电动机无源控制所采用的数学模型是 EL 模型及 PCHD 模型。对于电磁子系统,系统的能量函数设为电磁能量,根据系统转矩给定、速度给定,设计渐进跟踪给定的无源控制器,控制律简单。对于采用机电系统的统一 EL 模型,将系统的电磁、机械能量之和设为能量函数,根据系统转矩给定、速度给定,设计渐进跟踪给定的

无源控制器,控制律复杂。

交流电动机本身就是一个严格无源系统^[14],可采用一些措施(如输出反馈)实现闭环系统的渐进稳定,同时可获得更优秀的动、静性能。

5. 自抗扰控制在交流电动机中的应用

为提高交流电动机控制系统的鲁棒性,抑制电动机参数波动及负载扰动的影响,提出了适用于交流电动机控制系统的自抗扰控制(Active Disturbances Rejection Controller, 缩写为 ADRC)方案^[15]。自抗扰控制器由跟踪—微分器(Tracking Differentiator, 缩写为 TD)、扩张状态观测器(Extended State Observer, 缩写为 ESO)和非线性状态误差反馈控制律(Nonlinear State Error Feedback, 缩写为 NLSEF)三部分组成,如图 1.2.2 所示。

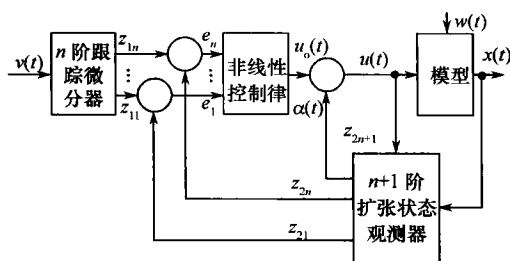


图 1.2.2 自抗扰控制器

ADRC 这项新的控制技术核心是把系统的未建模动态和未知外扰作用都归结为对系统的“总扰动”而进行评估并给予补偿。采用的方法是充分运用特殊的“非线性”效应。

这种技术的优点如下:安排过渡过程解决了“快速性和超调性之间的矛盾”,不用反馈也能实现“无静差”,避免了积分反馈的副作用。统一处理了确定系统和不确定系统的控制问题。

当被控对象阶数较低(如小于 3)时,根据对象模型的变化范围适当地选取观测器中的非线性函数及相应的参数,会取得较好的控制效果。但当对象模型阶数大于 3 时,要得到一组满意的非线性函数及相应的参数并非易事。同时计算量大,导致控制周期变长,实时性差,影响了电动机的控制性能;这是 ADRC 的缺点和不足。

除上述非线性控制理论在交流电动机中应用外,还将自适应和滑模变结构控制理论应用到电动机控制中^[16]。

1.2.2.2 交流电动机非线性控制研究趋势

根据上述五种交流电动机非线性控制策略及应用的论述,反馈线性化、反步法、逆系统方法的问题是需精确的数学模型、对参数的依赖性强、有奇异点、鲁棒性差等。

对于 ADRC,当对象模型阶数较高时,要得到一组满意的非线性函数及相应的参数难度很大。尽管交流电动机本身是严格无源系统,也存在缺点。对此可以从以下几个方面进行研究:

(1) 采用交流电动机 EL 或 PCHD 模型,按照互联和阻尼注入设置(Interconnection and Damping Assignment,缩写为 IDA)方法,进行能量函数成形,设计的控制器使新的能量函数 $H_d(x)$ 在期望平衡点(给定) $x^* = \arg \min H_d(x)$ 。若阻尼注入过大,系统的稳定性能好,但系统的放大倍数变小,反应速度变慢;若阻尼注入过小,系统的放大倍数变大,反应速度快,但稳定性能差。因此,确定合适的阻尼注入,采用 EL 或 PCHD 模型研究交流电动机控制问题,会收到好的动、静性能,且设计具有灵活性。

(2) 由于交流电动机本身就是一个严格的无源系统,从能量角度看它具有稳定的属性;但无源系统的能量函数与表征系统能量属性的参数(如电感 L 、系统转动惯量 J 等)有关,系统的控制律又与系统的数学模型(在某些假定条件下获得)有关,模型中有些参数在实际工作中变化较大(如转子电阻)。因此,可研究以无源控制为主、自干扰控制技术为辅的控制策略,实现优势互补,获得优秀的动、静性能。

参考文献

- [1] 王久和,黄立培,李华德. 感应电动机数学模型及非线性控制策略[J]. 辽宁工程技术大学学报,2009,28(2):246-249
- [2] 宋文超,林飞,张春朋. 基于定子磁链模型的异步电动机反馈线性化控制[J]. 电工技术学报,2003,18(4):85-88
- [3] Seok Ho Jeou, Dane Baang, and Jin Young Choi. Adaptive Feedback Linearization Control Based on Airgap Flux Model for Induction Motors[J]. International Journal of Control, Automation, and System, 2006,4(4):414-427
- [4] 杨立永,李正熙,李华德,王久和. 感应电动机调速系统的自适应逆控制[J]. 控制理论与应用,2007,24(1):95-98
- [5] 张兴华,戴先中. 基于逆系统方法的感应电动机调速系统[J]. 控制与决策,2001,15(6):708-711
- [6] Ortega, R., Loria, A., Nicklasson, P. J., Sira-Ramirez, H. J. Passivity-Based Control of Euler-Lagrange Systems: Mechanical, Electrical and Electromechanical Applications [M]. Springer Verlag,1998
- [7] 孙元章,刘前进,杨新林 译. 非线性控制中的 L_2 增益和无源化方法[M]. 北京:清华大学出版社,纽约:施普林格出版社,2002
- [8] 纪志成,薛花,沈艳霞. 感应电动机无源性控制方法研究[J]. 电工技术学报,2005,20(3):1-6
- [9] 王海亮,于海生. 异步电动机哈密顿控制系统的建模与仿真[J]. 青岛大学学报(工程技术

版),2006,21(1):33-38

- [10] R. Ortega, G. Espinoza-Pérez. Passivity-based control with simultaneous energy-shaping and damping injection; the induction motor case study[C]. Proceeding of the 16th IFAC World Congress. Prague: Elsevier Science, 2005
- [11] 杨耕, 罗应立. 电机与运动控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006
- [12] 李华德. 电力拖动控制系统(运动控制系统)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006
- [13] Depenbrock M. Direct self control (DSC) of inverter-fed induction machine[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1988, 3: 420-429
- [14] 陈峰, 徐文立. 基于无源性的异步电动机自适应控制[J]. 自动化学报, 2000, 26(6): 776-781
- [15] 冯光, 黄立培, 朱东起. 异步电机的新型非线性自抗扰控制器的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(3): 30-33
- [16] 陈伯时, 谢鸿鸣. 交流传动系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2000, 15(5): 11-15

第 2 章 交流电动机动态数学模型

本章主要介绍三相交流异步电动机和永磁同步电动机在不同坐标系中的基本动态数学模型,为建立其他数学模型(如仿射非线性模型、EL 模型及 PCHD 模型等)奠定基础。

2.1 三相交流异步电动机基本动态数学模型

三相交流异步电动机基本动态数学模型^[1-2]是推出其他非线性数学模型的基础。下面首先介绍在三相静止 uvw 坐标系、两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系、两相同步旋转 dq 坐标系中的电动机基本动态数学模型,再介绍电动机空间矢量模型。

2.1.1 三相交流异步电动机在三相静止 uvw 坐标系中的数学模型

为研究三相交流异步电动机的多变量数学模型,作如下假设:①忽略空间谐波,三相绕组在空间上互差 120° 电角度,所产生的磁势沿气隙圆周按正弦规律分布;②忽略磁路饱和,各绕组的自感和互感都是恒定的;③忽略铁芯损失;④不考虑频率和温度变化对绕组电阻变化的影响。无论电机转子是绕线式的还是鼠笼式的,都将它等效成绕线式转子,并折算到定子侧,折算后的每相匝数都相等。基于上述假设得到的电动机物理模型如图 2.1.1 所示。

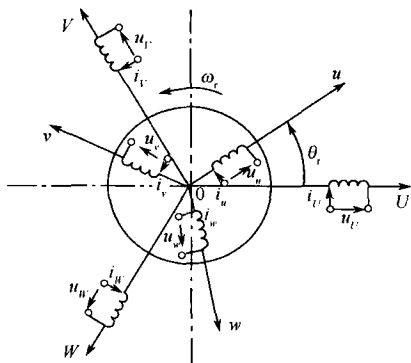


图 2.1.1 三相交流异步电动机物理模型