

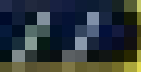


滑模变结构 的智能控制理论与应用研究

张昌凡 何 静 著



科学出版社
www.sciencep.com



滑模变结构

的稳定性理论及应用研究

张纪成 著



科学出版社
SCIENCE PUBLISHING HOUSE

滑模变结构的智能控制 理论与应用研究

张昌凡 何 静 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了滑模变结构智能控制的理论及应用. 全书共分7章, 内容包括变结构控制基本理论, 基于模糊神经网络的滑模变结构控制, 神经网络自适应变结构控制, 基于观测器的变结构智能控制以及滑模变结构智能控制理论在电机控制、工业过程控制中的应用等.

本书可作为自动化、控制理论与控制工程等相关专业的高年级本科生以及研究生的学习参考书, 对从事非线性控制系统理论与应用研究与开发的专业人员也有较好的参考价值.

图书在版编目(CIP)数据

滑模变结构的智能控制理论与应用研究/张昌凡, 何静著. —北京: 科学出版社, 2005

ISBN 7-03-014472-4

I. 滑… II. ①张…②何… III. 变结构控制-智能控制论 IV. O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 115949 号

责任编辑: 杨 波 陈玉琢 贾瑞娜/责任校对: 赵桂芬
责任印制: 钱玉芬/封面设计: 王 浩

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>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年3月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2005年3月第一次印刷 印张: 8 3/4

印数: 1—2 500 字数: 164 000

定价: 28.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

前 言

针对交流传动等快速变化的非线性复杂系统,人们已提出了各种控制方案,这些方案解决了一些问题,但还存在一些不足之处.因此对快速变化的复杂工业系统,研究一种工程实用的有效控制方法是有待解决的问题.

滑模变结构控制作为一种非线性控制方法,因其控制的不连续性而与常规方法有着根本区别.它利用滑模这种特殊的控制方式,强迫系统的状态变量沿着人为规定的相轨迹滑到期望点,从而使系统在滑模面上运动时具有比鲁棒性更加优越的不变性.将其与模糊神经网络相融合而产生的滑模变结构智能控制方法则更进一步地促进了其在复杂工业控制中的应用.

滑模变结构响应快,对系统参数和外部干扰呈不变性,可保证系统是渐近稳定的.尤其可贵的是其算法简单,易于工程实现.其缺点是存在抖动和需知不确定参数上下界等问题.模糊控制无需建立数学模型,控制的机理符合人们对过程控制作用的直观描述和逻辑思维.其缺点是设计缺乏系统性,控制规则的选择多采用试凑法.神经网络具有较强的自学习能力,可以充分逼近任意复杂的非线性.其缺点是学习速度较慢,难以控制较复杂的对象.

由此可见,变结构控制、模糊控制和神经网络控制相互之间具有很强的互补性.而研究这种互补性,实现滑模变结构的智能控制就是本书研究的目的.

本书介绍了滑模变结构智能控制的理论及应用.全书共分7章.第1章研究了模糊系统、神经网络的特点,对滑模变结构的发展现状进行了较为详细的评述,分析了交流传动的控制策略.第2章对电流源逆变器(CSIM)构成的交流变频调速系统,首先分析了CSIM在低速存在的问题,利用滑模变结构对参数变化的不灵敏性,推导出CSIM的简化数学模型,并以常规滑模变结构理论为指导,设计了CSIM控制器.最后利用微型计算机实现了该控制系统,并给出了实验和仿真结果.第3章提出了一种基于模糊神经网络的滑模变结构控制.首先通过模糊神经网络在线调整符号函数项的幅值,利用Lyapunov稳定性定理推出保证控制系统稳定的模糊神经网络学习率取值范围;对于大范围参数摄动,研究了一种全参数调节的模糊神经网络滑模控制;提出了一种神经网络滑模鲁棒控制器设计方法,以使系统在任意初始条件下都处于滑动状态,实现运动过程中的全程滑模控制.第4章针对神经网络学习速度收敛较慢的问题,重点研究了提高神经网络收敛速度的方法.首先采用一种快速的变尺度优化学习算法,对不确定系统进行逼近,提出了一种基于系统辨识的滑模变结构控制方法;结合单层Adaline网络,研究了一种具

有滑模变结构的权值训练法,提出了一种神经网络自适应滑模变结构控制,对它的稳定性和收敛性进行了深入探讨;研究了一种基于神经网络的自学习滑模变结构设计方法,对三层自适应神经网络结构、算法进行了分析,最后给出了仿真实验结果.第5章主要研究基于观测器的滑模变结构鲁棒智能控制.针对离散多变量系统,对系统确定性部分设计了一个 Luenberger 观测器,然后用一个神经网络来动态补偿系统的不确定性.为了进一步提高观测器的观测全局性,设计了一个在线神经网络滑模参数调节器;针对一类仿射非线性系统,本文还提出了一种智能滑模变结构状态观测器的设计方法,并对系统的鲁棒特性进行了研究.第6章应用实例,针对有色金属冶炼过程反应机理复杂,存在分散、时变、非线性和强耦合等特性,以铅烧结生产过程为应用实例,综合运用本书前述的滑模变结构理论,提出了一些优化控制方法,如以滑模变结构理论为基础的核子秤称量调节方法,基于现场总线的智能湿度控制器,通过现场总线设备实现的对点火炉温度、煤气流量以及空气流量进行控制的模型跟踪控制方法等.第7章对本书进行总结并给出今后发展方向.

本书的撰写得到了湖南大学博士生导师王耀南教授的大力支持与悉心指导,在此深表谢意.书中还引用或摘录了其他研究者的成果,在参考文献中均予以列出,在此也谨向他们致以深切的谢意.若有遗漏不全或引用不当,敬请批评指正.对科学出版社的编辑在本书的出版过程中所付出的辛勤劳动,以及兰志杰研究生进行的校对工作一并表示衷心感谢.

作者学识疏浅加之写作时间仓促,使得本书存在颇多不足之处,敬请读者批评指正.

作者

2004年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 模糊控制与人工神经网络	1
1.3 变结构控制理论	2
1.3.1 滑模面设计	3
1.3.2 滑模条件	4
1.3.3 抖动问题	4
1.3.4 离散变结构控制	5
1.3.5 状态观测	6
1.3.6 自适应变结构	7
1.3.7 变结构控制的应用	8
1.4 交流传动系统控制策略	8
1.5 本书的研究意义及研究内容	9
1.5.1 研究意义	9
1.5.2 研究内容	10
参考文献	11
第 2 章 电流源变频调速的滑模变结构控制	17
2.1 引言	17
2.2 电流源变频调速的数学模型	17
2.3 电流源变频调速的滑模变结构控制系统设计	21
2.4 电流源控制系统数字仿真	24
2.5 电流源变频调速滑模变结构控制系统的微机实现	29
2.6 实验	33
2.7 小结	38
参考文献	38
第 3 章 基于模糊神经网络的滑模变结构控制	40
3.1 引言	40
3.2 三相感应电动机数学模型	40
3.3 基于模糊神经网络的滑模控制系统	43

3.3.1	一般滑模控制器的设计	44
3.3.2	模糊神经网络控制器的设计	45
3.3.3	模糊神经网络的收敛性分析	48
3.3.4	在三相交流异步电动机中的应用	51
3.4	全参数调节的模糊神经网络滑模控制	52
3.4.1	滑模变结构控制器的设计	52
3.4.2	全参数调节的模糊神经网络滑模控制器的设计	53
3.4.3	实验研究	56
3.4.4	小结	57
3.5	神经网络滑模鲁棒控制器的设计	57
3.5.1	基于神经网络的滑模面设计	58
3.5.2	控制器参数设计	60
3.5.3	仿真实验研究	61
3.5.4	在伺服系统中的应用	62
3.5.5	小结	64
	参考文献	64
第4章	神经网络自适应变结构控制	66
4.1	引言	66
4.2	一种非线性系统的滑模变结构综合设计方法和应用	67
4.2.1	引言	67
4.2.2	非线性系统的滑模变结构控制	68
4.2.3	基于系统辨识的变结构控制系统	68
4.2.4	仿真研究	72
4.2.5	小结	72
4.3	神经网络自适应变结构控制的研究	73
4.3.1	引言	73
4.3.2	问题的描述	73
4.3.3	神经网络自适应变结构控制器的设计	73
4.3.4	仿真研究	76
4.3.5	小结	77
4.4	基于神经网络的自学习滑模变结构控制	78
4.4.1	引言	78
4.4.2	系统的描述	78
4.4.3	SMC的设计	79
4.4.4	三层自适应神经网络结构	79

4.4.5 学习算法	80
4.4.6 小结	81
参考文献	82
第5章 基于观测器的变结构智能控制	83
5.1 引言	83
5.2 智能 Luenberger 观测器的研究	84
5.2.1 系统的描述	84
5.2.2 神经网络控制器的设计	85
5.2.3 动态补偿神经网络 NNM 的学习算法	86
5.2.4 参数调整神经网络 NNC 的学习算法	87
5.2.5 应用举例	87
5.2.6 小结	90
5.3 智能变结构状态观测器的研究	91
5.3.1 滑模观测器的设计	91
5.3.2 智能变结构状态观测器的设计	92
5.3.3 应用实例	95
5.3.4 结论	96
参考文献	97
第6章 应用实例	99
6.1 引言	99
6.1.1 现场总线的发展	99
6.1.2 本章研究的主要内容	101
6.2 系统的集成与应用软件开发	101
6.2.1 引言	101
6.2.2 铅烧结工艺流程	102
6.2.3 几种典型的现场总线	103
6.2.4 现场总线的选择及集成方案	105
6.2.5 系统软件的设计	106
6.2.6 小结	107
6.3 铅配料控制系统的设计	107
6.3.1 引言	107
6.3.2 系统的组成及工作原理	107
6.3.3 核子秤称量控制器的设计	108
6.3.4 小结	114
6.4 混合料湿度控制	114

6.4.1 引言	114
6.4.2 系统的描述	114
6.4.3 基于现场总线的湿度控制方案	115
6.4.4 湿度控制器的设计	117
6.4.5 小结	118
6.5 烧结机点火炉温度控制	118
6.5.1 引言	118
6.5.2 系统工艺流程	119
6.5.3 现场控制总线的实现	119
6.5.4 模型跟踪控制的设计	122
6.5.5 实验结果	124
6.5.6 小结	126
参考文献	126
第7章 结论与展望	128

第 1 章 绪 论

1.1 引言

随着科学技术的发展,自动控制理论得到了不断的完善和提高. 20 世纪 60 年代出现的现代控制理论在许多方面都弥补了古典控制理论的不足. 在取得控制对象模型的基础上,它采用了各种控制系统分析综合方法. 系统辨识、自适应控制和鲁棒控制等均是目前现代控制理论的重要分支.

系统辨识,是根据系统的输入输出,从一组给定的模型中,确定一个与所测系统等价的模型. 但由于对于非线性与时变系统,还很难找到易于处理的统一的数学模型,因此系统辨识方法目前还仅限于某些特殊类型的非线性系统与慢时变系统的控制.

自适应控制,是在控制系统运行过程中,根据对象或扰动的动态性能改变自动控制律的参数或结构,以保证控制质量.

鲁棒控制,是在控制系统设计时就考虑对象参数的变化,使得所设计的控制器不需改变自己的参数或结构就能够在对象参数发生在一定范围内的变化时,保证系统控制质量不变.

上述三种方法,本质上都还没有摆脱基于被控对象数学模型的定量化思想,难以对复杂和具有强烈非线性的不确定系统进行有效而精确的控制. 智能控制的出现为解决这类问题提供了新的思路.

智能控制以模糊控制、神经网络和专家系统控制为代表,它所研究的主要目标不再是被控对象,而是控制器本身. 在智能控制中,控制器不再是单一的数学解析模型,而是数学解析和知识系统相结合的广义模型,是多学科知识控制系统.

智能控制的发展已经经历了一段时间,但目前仍可认为处于开创性研究阶段,待研究问题还很多. 如何将智能控制与其他控制相结合,形成更实用、性能更优越的控制系统,是控制领域研究的重点之一.

本章先对模糊控制、人工神经网络的控制特点进行阐述,然后详细对变结构控制进行论述,并对本书的被控对象——交流传动系统的控制策略进行了分析. 最后给出了本书研究的主要内容.

1.2 模糊控制与人工神经网络

1965 年, L. A. Zadeh 教授创立了模糊集理论,其后,该理论得到了较快的发展

和实际应用^[1],成为智能控制领域中的一个重要分支. 20世纪70年代中期,以 E. H. Mamdani^[2]为代表的一批学者提出了模糊控制的概念,标志了模糊控制的诞生.

模糊控制的基本思想是把人类专家对特定被控制对象或过程的控制策略总结成一系列以“IF(条件) THEN(作用)”的形式表达的控制规则,通过模糊推理得到控制作用集,作用于被控对象或过程. 模糊控制完全是在操作人员所具有的控制经验的基础上实现对系统的控制,无需建立数学模型,且控制具有较强的鲁棒性,被控对象参数的变化对控制影响不明显,因此是解决不确定系统的一种有效途径,可用于非线性、时变系统的控制^[3~4]. 然而模糊控制的设计尚缺乏系统性,无法定义控制目标,而控制规则的选择、论域的选择、模糊集的定义、量化因子的选取等多采用试凑法,这对复杂控制难以奏效^[5~6].

对于智能控制的另一分支——神经网络控制系统的研究已有较长的历史. 进入20世纪80年代后,Rumelhart, McClelland以及 Hopfield 等人在神经网络领域取得了突破性进展,神经网络已进入实用阶段^[7].

人工神经网络从仿生学的角度出发,模拟人脑神经元系统,使机器具有类似人脑那样的感知、学习和推理功能. 人工神经网络可以充分逼近任意复杂的非线性系统^[8],因而可学习和自适应不知道或不确定的系统. 但是,由于人工神经网络的高度非线性,使得整个系统从数学上进行稳定性与收敛性证明比较困难. 同时要满足实时控制要求,还必须研究较快的学习算法^[9~10].

1.3 变结构控制理论

变结构控制是前苏联学者 Emelyanov、Utkin 和 Itkin 在20世纪60年代初提出的一种设计方法^[11~13]. 当初研究的主要是二阶和单输入高阶系统,并用相平面法来分析系统特性. 进入70年代,则开始研究状态空间线性系统,使得变结构控制系统设计思想得到了不断丰富,也提出了多种变结构设计方法. 但这其中只有带滑动模态的变结构控制被认为是最有发展前途的.

所谓滑动模态是指系统的状态被限制在某一子流形上运动. 一般来说,系统的初始状态未必在该子流形上,而变结构控制器的作用就在于把系统的状态在有限时间内驱动到并维持在该子流形上. 这一过程称为到达过程.

设有一非线性系统

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (1.3.1)$$

式中, $x \in R^n, u \in R^m, t \in R$.

我们需要确定滑模函数向量 $S(x), S \in R^m$, 并寻求变结构控制

$$u_i(x) = \begin{cases} u_i^+(x) & S_i(x) > 0 \\ u_i^-(x) & S_i(x) < 0 \end{cases} \quad (1.3.2)$$

这里变结构控制体现在 $u_i^+(x) \neq u_i^-(x)$, 使得以下设计目标得以满足:

(1) 滑动模态存在.

(2) 满足到达条件: 在切换面 $S_i(x)=0$ 以外的相轨迹将于有限时间内到达切换面.

(3) 滑模运动渐近稳态并具有良好的动态品质.

而以上三个设计目标可归纳为下面两个设计问题: 选择滑模面 $S_i(x)$ 和求取控制 u_i^\pm .

下面我们针对几个问题叙述变结构控制系统的发展情况.

1.3.1 滑模面设计

变结构控制通常要求具有理想的滑动模态, 良好的动态品质和较高的鲁棒性, 这些性能要通过适当的滑模面来实现.

线性滑模面的设计方法有很多种, 文献[14],[15],[16]中列举了较常见的极点配置法、几何法、最优控制法. 文献[17]中, Utkin 提出按闭环系统的稳定性和快速性来选择滑模面, 文献[18]中, Ghezawi 用广义逆矩阵法, 根据闭环特征根的要求来设计滑模面. Young^[19] 和 Dorling^[20] 选择二次型函数为目标函数, 从而得到最优滑模面. 上述线性滑模面因其设计简单, 工程实现方便而得到了广泛的使用.

为进一步提高系统性能, 许多新的滑模面设计方法被提出, Young 提出了一种基于频域整形的滑模面设计方法^[21], 文献[22]对此加以了改进, 使之能适用于线性二次型控制指标对所有频率不为常数的情况. 为避免未建模误差对系统性能影响, 文献[23]采用频域整形 H_∞ 的滑模面设计方法. 文献[24],[25]提出采用双滑模面减少一类非线性系统的稳态误差. 文献[26],[27]提出了积分滑模面, 分析结果表明这种滑模面能保证由初始时刻到最终时刻系统都具有鲁棒性. 文献[28]研究了一种状态变量中含有噪声的变结构控制, 提出了随机滑模面概念. 文献[29]提出对不确定非线性系统, 采用分段滑模面, 并分别对每段滑模面提出一种模糊控制.

与静态滑模面的设计相对应, 文献[30]~[33]提出了旋转和移动滑模面的概念. 文献[34],[35]针对二阶非线性系统, 提出了一种时变滑模面设计方法, 使得系统刚开始运动就处于滑模面上, 避免了滑模控制中的趋近运动. 然而这两种方法的收敛速度还须进一步提高. 文献[36]针对二阶系统也提出一种时变滑模面方法. 它首先将滑模面设置为经过初始点, 然后通过改变其斜率和截距, 使其向期望滑模面移动. 然而该方法计算量大, 难以应用到高阶系统. 而针对高阶系统, 文献[37]提出了一种基于模糊理论的移动滑模面方法, 但它仅对期望滑模面的特征方

程有重根情况进行了分析。

虽然滑模面的设计方法有多种,但对于一般非线性系统至今还未找到比较有效的方法。

1.3.2 滑模条件

在文献[38]中,Utkin 首先提出了滑动模态存在的充分条件

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{S} < 0 \quad \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{S} > 0 \quad (1.3.3)$$

或

$$\lim_{s \rightarrow 0} S\dot{S} < 0 \quad (1.3.4)$$

在此基础上,各国学者均开展了深入的研究,提出了同等意义下的滑动条件^[39~42]

$$S\dot{S} < 0 \quad (1.3.5)$$

$$S\dot{S} < -f(s) \quad f(s) > 0 \quad (1.3.6)$$

但是,上述滑模存在的充分条件,也就是滑动模态能够到达的条件,只能保证系统从任一点出发的状态能够到达滑模面,而不能反映出状态是如何到达滑模面的。而且对于多输出系统,利用这种方法求解控制律,将会非常麻烦。为此我国学者高为炳^[43]提出了滑动模态趋近律概念。这种趋近律一般形式为

$$\dot{S} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - f(s) \quad (1.3.7)$$

随着 $f(s)$ 选取不同,可以有各种形式趋近律:

等速趋近律

$$\dot{S} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) \quad \epsilon > 0 \quad (1.3.8)$$

指数趋近律

$$\dot{S} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - kS \quad \epsilon, k > 0 \quad (1.3.9)$$

幂次趋近律

$$\dot{S} = -k |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) \quad k > 0 \quad 0 < \alpha < 1 \quad (1.3.10)$$

趋近律(1.3.7)把求解滑模变结构从传统的求解不等式问题化为求解代数方程的问题,通过选择不同趋近律函数,可得到希望的动态品质特性。这对于多变量线性系统及其他类型的复杂系统的滑模变结构设计显得尤为重要。

1.3.3 抖动问题

在实际滑模变结构系统中,由于开关器件的时滞及惯性等因素的影响,系统的状态到达滑模面后,不是保持在滑模面上做滑动运动,而是在滑模面附近做来回穿

越运动,甚至产生极限环振荡.这种现象称为抖动.它有可能激励起系统中未建模高频运动成分,引起系统的高频振荡.因此,削弱或消除抖动是变结构控制在实际应用中要着重解决的重要问题,一些学者在这方面开展了广泛而深入的研究.

Slotine 在文献[40],[44]中提出了一种设立边界层的连续化方法

$$S_b = \{x \in R^n; |S(x)| < \delta\} \quad (1.3.11)$$

在 S_b 之外取滑模变结构控制 $u^+(x)$, S_b 之内将开关量作线性的连续化处理,使之变为关于滑模函数 S 的负反馈控制.这样就有效地克服了抖动现象,但同时却失去了变结构控制的完全自适应能力,而退化成为一种鲁棒控制策略.文献[45]提出用饱和函数代替符号函数的消除抖动的方法.然而该方法一方面难以确定控制器参数,另一方面在消除抖动的同时不可避免地影响控制的稳定精度.高为炳^[46]提出一种利用趋近律概念

$$\dot{S} = -kS - \epsilon \operatorname{sgn}(s) \quad (1.3.12)$$

减少抖动的方法.通过调整参数 k 和 ϵ 使其既可保证滑动模态的动态品质,又可削弱系统的高频抖动. Burton^[47]则提出在单位向量变结构控制的分子中加入一个正常数 δ ,从而形成了连续控制

$$u = \frac{kS}{\|S\| + \delta} \quad (1.3.13)$$

并给出了根据精度选择 δ 的方法.王丰尧在文献[48]中提出变结构频域近似设计法,对抖动的抑制有所帮助,但此时滑动模态的实现是近似的.

滑模变结构抖动的产生与控制律中控制项 $k \operatorname{sgn}(s)$ 有关,利用模糊控制在线调整 k 值而得的模糊滑模变结构控制既可大大减少抖动,同时也增加了系统的鲁棒性^[49~50].但这种方案仅适用于简单系统,对于复杂的未建模系统难以达到较高的精度.文献[51]给出了滑模控制与模糊控制相结合的设计方法,提出了用模糊控制减少抖动的方法.但由于模糊规则的选取有很大的任意性,因此为达到一定精度而选取的模糊规则可能会非常复杂.对此可利用遗传算法对模糊规则进行最优化,则可在保证系统性能的同时,使模糊规则数量减少^[52].

1.3.4 离散变结构控制

离散变结构具有控制器输出量切换次数少、有利于减少系统抖动和可用于采样周期较长的控制系统等优点.对于离散变结构的研究最早见于俄文资料,随后又有许多作者对其加以研究,如文献[53]~[56].

近年来离散变结构控制的研究主要以到达条件为出发点.1995年高为炳在文献[57],[58]中提出的到达条件为等式形式

$$S(k+1) = (1-qT)S(k) - \epsilon T \operatorname{sgn}(S(k)) \quad (1.3.14)$$

式中, $1-qT > 0, \epsilon > 0, q > 0, T$ 是采样周期.

但是高氏趋近律明显的缺点在于: 系统在切换带中运动, 最终不可能到达原点, 只能在原点附近的一个邻域内抖动, 其抖动范围为 $\frac{2\epsilon T}{2-qT}$ [59].

对于下式所述的不确定系统

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + \Delta Ax(k) + bu(k) + f(k) \\ Y(k) = h^T x(k) \end{cases} \quad (1.3.15)$$

式中, ΔA 为系统不确定项, $f(k)$ 为外部干扰.

1998 年 Bartoszewicz 提出了两种新的趋近律 [53]

$$S(k+1) = d(k) - d_0 + S_d(k+1) \quad (1.3.16)$$

$$S(k+1) = d(k) - d_0 + S_d(k+1) - \sum_{i=0}^k [S(i) - S_d(i)] \quad (1.3.17)$$

式中, $d_1 \leq d(k) = c^T \Delta Ax(k) + c^T f(k) \leq d_u, d_0 = \frac{d_1 + d_u}{2}, S_d(k)$ 为一个预先定义的函数.

由于系统状态不穿过滑模面而是在沿着滑模面的一个邻域内运动, 因此抖动有所减少.

姚琼荟将高氏趋近律与高氏指数趋近律相结合提出了一种可产生扇形切换区的变速趋近律 [60]. 文献 [61] 也提出了一种具有扇区特性的离散变结构设计方法. 这类方法虽然减少了抖动, 但系统状态轨迹距平衡点越远, 系统鲁棒性越差. 针对此问题, 文献 [62] 提出了一种综合设计方法: 首先利用变结构保证系统运动到滑模扇区, 然后再通过一个 Lyapunov 函数使系统收敛到原点.

传统的离散变结构控制律均是以等效控制为基础 [63], 长期的应用表明这种设计思想欠合理 [64]. 为此, 很多改进设计方案被提出. 姚琼荟提出了以衰减控制代替等效控制 [65]. 文献 [66] 提出用神经网络构成等效控制, 但此方案不能满足实时应用的要求. 文献 [67] 提出基于递归神经网络的非线性离散变结构设计方法, 相对于其他方法, 其收敛速度有所提高.

1.3.5 状态观测

在变结构控制中, 一般来说滑模面包括了所有状态变量, 但有些状态不可或不易直接测量. 随着微分几何理论的兴起, 全局线性化、伪线性化以及扩展线性化方法均可被用于非线性系统的状态观测. 然而, 应用这些方法均需要有精确的模型, 一旦存在不确定因素及建模误差, 则观测器的鲁棒性就无法保证. 为避免直接测定状态变量, 由 Young 首先提出的变结构输出反馈控制 [68] 采用输出变量作为滑

模面. 文献[69]提出了一种利用最佳输出逼近和极点配置设计滑动模态的方法, 改进和推广了文献[70]结果.

文献[71]~[74]利用变结构控制的强鲁棒性提出滑模观测器和辨识器. 由于测量噪声的存在可能影响状态估计的最终收敛性, 因此文献[75]提出将符号函数用一些连续函数代替并引入边界层的方案. 文献[76]提出的方法适用于不确定参数不满足匹配条件的情况, 但其构造的观测器中含有不确定参数, 因此无法实现. 文献[77]对其加以改进, 使得观测器的结构只涉及不确定的界, 因此所提出的变结构观测器能够实现. 文献[78]对扩展 Kalman 滤波器和滑模观测器进行了分析比较, 得出了对存在有界建模系统, 滑模观测器性能优于 Kalman 滤波器的结论. Yongsoon^[79]考虑了外部干扰和参数的不确定性, 利用观测器对系统不确定进行观测和补偿, 并通过小增益理论分析了系统的稳定. Abdelkrim 等利用滑模观测器对交流电机的转子磁通进行了估计, 并对带有滑模观测器的变结构控制、输入/输出线性化和矢量控制这三种控制方法进行了分析比较. 分析结果表明, 前者不仅对参数变化有较大适应力, 而且系统低速性能较好^[80].

1.3.6 自适应变结构

对于变结构控制系统, 若干扰、参数变化以及建模误差等不确定因素满足“匹配条件”, 则滑模面上的运动对这些不确定因素具有完全的不变性. Drazenovic^[81]最早对这种不变性系统进行了研究. El-Ghezawi 等给出了滑模不变性的条件^[18]. 当匹配条件不满足时, 则滑模特性直接取决于这些不确定量. Spurgeon 和 Davis^[82]对此种情况进行了初步分析, Zak^[83]则较全面地分析了不确定因素对变结构控制器、观测器的滑模收敛区的影响. 针对不满足匹配条件文献[84]给出了鲁棒滑模控制的设计方法.

当外部干扰及参数变化有界时, 变结构系统可取得较理想控制效果. 但要确定不确定参数变化的上下界, 在实际中存在一定困难. 文献[85], [86]提出了变结构直接自适应控制方法, 利用一个简单的自适应律消除不确定的界. 文献[87]对普通变结构控制和变结构自适应控制器分别在永磁同步伺服电机位置控制中的应用进行了分析比较, 可知后者不需预知不确定参数上下界, 且抖动现象也有所改善. 近来, 利用模糊控制消除对不确定参数上下界依赖的研究工作也取得了一些进展. 文献[88]提出了两种方案, 首先用模糊逻辑系统逼近一个正常向量, 使得不确定值小于其正常向量的加权值, 然后用滑模变结构进行补偿. 文献[89]将自适应模糊系统和滑模控制相结合, 定义一个滑模平面和临界面, 然后由 Lyapunov 方法设计自适应律. 这类方案的控制效果直接依赖于模糊逻辑系统对系统不确定部分的估计和逼近能力. 文献[90]则提出了一种基于模糊 CMAC 神经网络的多面