

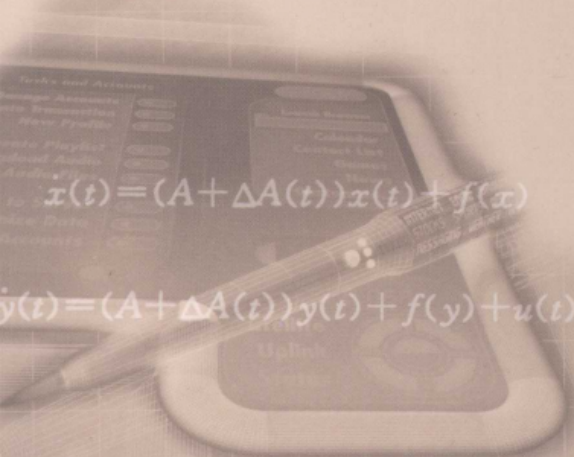


华中师范大学出版基金丛书
学术著作系列

不确定系统的滑模控制 理论及应用研究

瞿少成 著

C B J J



出版社

华中师范大学



责任编辑
封面设计

陈勇
罗明波
方汉交

ISBN 978-7-5622-3757-0



9 787562 237570 >

定价: 15.00元



华中师范大学出版基金丛书

学 术 著 作 系 列

本书由华中师范大学出版社提供的出版基金全额资助

不确定系统的滑模控制 理论及应用研究

瞿少成 著



华中师范大学出版社

新出图证(鄂)字 10 号

图书在版编目(CIP)数据

不确定系统的滑模控制理论及应用研究/瞿少成著.

—武汉: 华中师范大学出版社, 2008. 6

ISBN 978-7-5622-3757-0

I. 不… II. 瞿… III. 不确定系统—鲁棒控制—研究 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 096337 号

不确定系统的滑模控制理论及应用研究

© 瞿少成 著

责任编辑: 陈 勇

责任校对: 方汉交

封面设计: 罗明波

编辑室: 文字编辑室

电话: 027-67863220

出版发行: 华中师范大学出版社

社址: 湖北省武汉市珞喻路 152 号

电话: 027-67863040(发行部) 027-67861321(邮购)

传真: 027-67863291

网址: <http://www.ccupress.com> 电子信箱: hscbs@public.wh.hb.cn

经销: 新华书店湖北发行所

印刷: 武汉理工大印刷厂

督印: 章光琼

字数: 130 千字

开本: 880mm×1230mm 1/32

印张: 5

版次: 2008 年 6 月第 1 版

印次: 2008 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1-1500

定价: 15.00 元

欢迎上网查询、购书

敬告读者: 欢迎举报盗版, 请打举报电话 027-67861321

前 言

随着计算机控制技术的广泛应用与大功率电子切换器件的迅速发展,近 20 年来,滑模变结构控制技术受到了国内外控制界的广泛重视,已逐渐发展成为现代控制理论领域中的重要分支之一。

滑模变结构控制(Sliding Mode Variable Structure Control,简称 SMVSC)利用控制作用的不连续特性,使系统在两个控制之间切换,从而产生一种与原系统无直接关系的新运动——滑动模态,然后沿此流形渐近运动到平衡点。滑模变结构控制系统的综合问题被分解成两个低维的子系统综合问题,一是设计滑模变结构控制律使得系统在有限时间内到达指定的滑动模态,二是适当选取滑模面,确保滑动模态具有良好的动态特性。这种运动模态有两个主要的优点:首先,可以通过选择适当的滑模面来实现系统的动力学特征,以满足闭环系统的性能指标;其次,闭环系统的响应对满足匹配条件的不确定性完全不敏感。这表明滑模控制技术非常适合设计不确定系统的鲁棒控制器,目前,基于滑动模态的变结构控制理论在国际上受到了广泛重视。

由于实际控制系统的参数变化、外部扰动以及检测技术的限制等因素,通常难以获得控制对象的精确模型,且匹配条件往往难以满足,使得滑模控制系统难以达到理想的品质,因此滑模控制系统的趋近模态运动与滑动模态运动需要更深刻的研究。特别是 20 世纪 90 年代以来,不确定系统、不确定时滞系统、不确定非线性系统、不确定离散系统、随机不确定系统的稳定性结论及其控制等方面的研究都取得了更深刻的结论。越来越多的学者认识到,一个系统仅仅考虑滑模变结构控制本身的设计是不够的,必须针对不同的具体系统,借鉴其他控制理

论的新进展、新发现,进一步扩充与发展不确定系统的滑模控制理论,这对滑模控制理论的实用化研究将具有重大意义。

滑模变结构控制理论家乌特金教授和已故中国科学院院士高为炳出版的专著中比较系统地介绍了滑模变结构控制的基本理论,但相对于该学科的迅速发展而言,这些著作还未反映完全近年来的一些新方法与新结论,特别是有关非线性控制与智能控制等方法的新成果。本书是作者多年来对不确定滑模变结构控制理论研究工作的总结,全书包括八章:第一章绪论,介绍了研究背景,综述了国内外研究现状;第二章讨论了一类广泛采用的滑模面设计方法的本质,提出了设计滑模面的一个充分条件,得到了不确定滑模控制系统的动态品质的一个估计式;第三章提出了一种虚拟反馈控制与滑模控制相结合的策略,研究了不确定时滞系统的滑模控制问题,并进一步推广到一类不确定中立型时滞系统;第四章基于全程滑模思想与自适应控制策略,讨论了不确定时滞系统时滞依赖的滑模控制问题;第五章基于 T-S 模糊模型,把虚拟反馈控制与滑模控制相结合的结论进一步推广到不确定非线性时滞系统;第六章在离散趋近律的基础上,提出了一种扰动动态补偿的趋近律,改进了不确定离散滑模控制系统的动态品质与稳态指标;第七章设计了倒立摆系统的滑模控制器,并进行了实验研究;研究了一类混沌系统的同步问题;基于 T-S 模糊模型与虚拟反馈滑模控制思想,研究了不确定 Chen 混沌系统的镇定问题;应用扰动动态补偿的趋近律,研究了 BLDC 的离散滑模控制位置伺服问题;第八章对全书进行了总结,提出了不确定系统滑模控制有待于进一步深入研究的内容。

在本书出版之际,我由衷地感谢我的导师,华中科技大学王永骥教授与海军工程大学姚琼荃教授,两位导师渊博的学识和对当代控制理论的精辟分析,给了我巨大的启迪,为我的学习与科研奠定了基础。他们深刻而独特的思想方法、严谨的治学态度与孜孜不倦的追求精神,深深地影响着我,将使我终身受益。

我还要深深感谢华中科技大学黄心汉教授、关治洪教授、方华京教

授的悉心指导与热情鼓励;感谢华中科技大学孙希平博士、杨业博士、程磊博士、黄珍博士、余辉博士、徐建省博士与吴浩博士,与他们的交流讨论使我受益匪浅。在本书的写作过程中,得到了徐海祥博士、辛振涛博士、刘光然博士、刘继承博士、刘超博士与任祖华硕士的帮助。感谢华中师范大学王继新教授、江汉大学钱同惠教授对我学习和工作的帮助。最后,要深深感谢我的父母、妻子盛兰、儿子瞿家祥及家人,他们是我前进的动力。

本书研究内容得到了国家自然科学基金(69974017、60274020)、教育部博士点基金(20070511017)、华中科技大学优秀博士基金、华中师范大学“丹桂”基金与华中师范大学博士出版基金资助。

本书只是作者在不确定滑模变结构控制领域研究的初步成果,加之作者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,敬请广大读者批评指正。

瞿少成

2008年3月于武汉桂子山

目 录

第一章 绪论	1
一、引言	1
二、滑模控制概述	3
1. 滑模控制的基本思想	3
2. 滑模系统的设计	4
3. 滑模控制系统的“不变性”	5
4. 滑模控制系统的“抖振”	6
三、不确定系统滑模控制的研究进展	7
1. 不确定线性系统的滑模控制	7
2. 不确定时滞系统的滑模控制	9
3. 不确定非线性系统的滑模控制	13
4. 不确定离散系统的滑模控制	15
5. 不确定滑模控制系统的应用	17
四、本书的结构	17
第二章 不确定滑模控制系统的设计及其动态品质的估计	19
一、引言	19
二、基于二次稳定性的一种滑模面的设计	21
1. 系统描述	21
2. 主要结论	22
3. 仿真举例	24
三、不确定滑模控制系统动态品质的估计	26
1. 系统描述	26

2. 主要结论	28
3. 仿真举例	32
四、本章小结	35
第三章 不确定时滞系统时滞独立型的滑模控制研究	36
一、引言	36
二、一种新颖的基于虚拟反馈控制的滑模面设计	37
1. 系统描述	37
2. 基于虚拟反馈控制的滑模控制器的设计	38
3. 仿真举例	42
三、中立型不确定时滞系统时滞独立的滑模控制	46
1. 系统描述	46
2. 滑模控制的设计及其主要结论	47
3. 仿真举例	51
四、本章小结	54
第四章 不确定时滞系统时滞依赖型自适应滑模控制	
研究	55
一、引言	55
二、时滞转换模型的进展	56
1. 基本转换模型——牛顿-莱布尼茨公式型模型	57
2. 中立型时滞转换模型	58
3. 第三种时滞转换模型	59
4. 奇异型转换模型	59
5. 基于自由权矩阵的转换模型	60
三、不确定时滞系统时滞依赖的自适应滑模控制	61
1. 系统描述	61
2. 自适应滑模控制的设计及其主要结论	62
3. 仿真举例	66

四、本章小结	68
第五章 不确定非线性时滞系统的模糊滑模控制研究	69
一、引言	69
二、滑模控制与模糊控制的相似性	70
1. 系统描述	70
2. 模糊控制与滑模控制相似性	72
三、基于 T-S 模型的不确定非线性时滞系统的滑模控制	76
1. 系统描述	76
2. 基于 T-S 模型的非线性时滞系统的滑模控制	78
3. 仿真举例	82
四、本章小结	88
第六章 不确定离散系统的滑模控制研究	89
一、引言	89
二、一种新颖的扰动动态补偿的离散趋近律及其滑模控制研究	91
1. 系统描述	91
2. 一种扰动动态补偿的离散趋近律	92
3. 主要结论及其性能指标	94
4. 仿真举例	97
三、本章小结	99
第七章 不确定滑模控制系统的应用研究	100
一、倒立摆系统的滑模控制的实验研究	100
1. 实验装置简介及系统描述	101
2. 实验结果	102
二、基于主动滑模控制的一类不确定混沌系统的同步研究	106
1. 系统描述	107
2. 不确定混沌系统的主动滑模变结构控制同步	108

3. 仿真结果	110
三、基于 T-S 模糊模型的不确定 Chen 混沌系统的滑模控制 ...	114
1. 系统描述	114
2. 不确定 Chen 混沌系统的滑模控制	117
3. 仿真结果	120
四、基于离散滑模控制的 BLDC 伺服系统的应用研究	122
1. 系统描述	123
2. 仿真结果	124
五、本章小结	128
第八章 总结与展望	129
一、取得的研究成果	129
二、下一步研究工作的展望	131
参考文献	133

第一章 绪 论

一、引 言

控制器的设计一般基于物理系统的标称模型,当不确定性存在时,基于标称模型设计的控制系统往往难以达到预期的目的^[1-3]。鲁棒控制基于标称模型和不确定性的综合考虑,可以给出行之有效的控制。目前在线性控制领域,鲁棒控制的典型代表是 H^∞ 控制理论与 μ 控制理论^[4-5];与之对应的非线性控制领域中,鲁棒控制的典型代表则是滑模变结构控制理论^{[1][6]}。

滑模变结构控制(Sliding Mode Variable Structure Control,简称 SMVSC)利用控制作用的不连续特性,使系统在两个控制之间切换,从而产生一种与原系统无直接关系的新运动——滑动模态。这种运动有两个主要的优点:首先,可以通过选择适当的滑模面来实现系统的动力学特征,以满足闭环系统的性能指标;其次,闭环系统的响应对满足匹配条件的不确定性完全不敏感。这种不变性表明,滑模控制非常适合作为一种不确定系统的鲁棒控制器,目前,基于滑动模态的变结构控制理论在国际上受到了广泛重视^[7-9]。

然而,在实际控制系统中,由于系统参数变化、外部扰动以及检测技术的限制等因素的影响,通常难以获得控制对象的精确模型,

且匹配条件往往难以满足,使得滑模控制系统难以达到理想的品质。越来越多的学者认识到,一个系统仅仅考虑滑模控制本身的设计是不够的,必须针对不同的具体系统,借鉴其他控制理论的新进展、新发现,进一步扩充与发展不确定系统的滑模控制理论,这对滑模控制理论的实用化研究具有重大意义^[8-9]。

为此,出现了针对不确定系统的鲁棒滑模变结构控制、自适应滑模变结构控制等策略;以微分几何为工具的基于输入/状态和输入/输出精确线性化的非线性滑模控制策略;考虑执行机构、传感器动力学特性的高阶滑动模态控制策略;基于逐步修正算法的反步滑模控制(Backstepping)策略;针对滑模控制系统“抖振”的终端滑模控制策略;与模糊控制、神经网络、遗传算法等相结合的控制策略^[9]。这些滑模控制策略极大促进了滑模控制理论的进一步发展。

但必须指出,上述相当一部分控制策略算法复杂、动态性能较差,这与滑模变结构控制简单、灵活的特点并不一致。特别是 20 世纪 90 年代以来,线性矩阵不等式(LMI)再一次受到控制界的关注,并被广泛应用到系统和控制的各个领域。不确定系统、不确定时滞系统、不确定非线性系统、不确定离散系统的稳定性结论及其控制都取得了更深刻的结论。因此,作者认为构造一座桥梁,把基于 LMI 的鲁棒控制、自适应控制、模糊控制、非线性控制等策略的新结论引入滑模变结构控制系统的设计中,将具有重要意义。

本书以不确定系统为对象,研究了一般不确定线性系统的综合问题,估计了不确定滑模控制系统的动态品质;针对不确定时滞系统,提出了一种虚拟反馈控制策略,分别得到了设计时滞独立型、时滞依赖型滑模面的充分条件;并进一步分析了不确定中立型时滞系统的滑模控制问题;基于 T-S 模糊模型,设计了不确定非线性时滞系统模糊滑模控制器。此外,在离散趋近律的基础上,提出了一种

扰动动态补偿的离散趋近律,提高了离散滑模控制系统的动态品质;最后将以上理论应用于倒立摆系统、混沌镇定系统、混沌同步系统以及电机伺服系统等问题,得到了一些有意义的结论。

二、滑模控制概述

滑模变结构控制理论是由俄罗斯学者 Emelyanov 提出, Utkin 等人倡导的一种特殊的非线性控制理论,当控制系统处在滑动模态时,系统对满足匹配条件(即干扰矩阵处在控制通道中)的参数变化与外部扰动具有完全鲁棒性,目前已经在电力、机器人、航天器等系统中得到了广泛应用。滑模控制理论经过几十年的发展,已经形成了比较完整的理论体系。已经取得的主要成就有:1)简约型的建立;2)滑模面的两种设计方法,即极点配置法与二次型最优法;3)证明了滑动模态对系统的摄动与外部扰动的不变性条件,即所谓的匹配条件;4)滑模控制的控制模式的建立,即递阶控制模式、最终滑动模式、分散控制模式等。随着滑模控制理论的发展,它适用的系统与控制任务已越来越广泛,涉及确定与不确定系统、同步与时滞系统、连续与离散系统、线性与非线性系统、集中参数与分布参数系统、随机系统、大系统等^[1]。

下面简要回顾滑模控制理论的基本思想及优、缺点。

1. 滑模控制的基本思想

考虑非线性系统^[1]

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (1-1)$$

其中 $x \in \mathbf{R}^n, u \in \mathbf{R}^m, t \in \mathbf{R}$ 。选取滑模函数 $s(x) \in \mathbf{R}^m$ 。并寻求控制

$$u_i(x) = \begin{cases} u_i^+(x), s_i(x) > 0 \\ u_i^-(x), s_i(x) < 0 \end{cases} \quad (1-2)$$

使得:

1) 滑模面(即滑模函数 $s_i(x)=0$ 的超平面)以外的相轨迹于有限时间内到达滑模面。这称之为到达条件,即满足

$$\lim_{s \rightarrow +0} \dot{s} < 0, \quad \lim_{s \rightarrow -0} \dot{s} > 0 \quad (1-3)$$

此时系统的运动称之为趋近运动或趋近模态。

2) 滑模面上的降阶系统(当系统处于滑模面上,此时系统阶次降低,因而简称降阶系统)的运动渐近稳定,动态品质良好。此时系统的运动称之为滑动模态。

这种通过切换控制迫使系统产生一种具有良好动态品质的滑动模态运动的控制系统,称为滑动模态变结构控制系统,简称滑模控制系统。

2. 滑模系统的设计

滑模控制系统的设计通常被认为是一种综合方法,其特点是简单、灵活。设计滑模控制系统的基本步骤,包括两个相对独立的部分:

1) 设计滑模函数 $s(x)$,使它所确定的滑动模态渐近稳定且有良好的品质。

2) 寻求滑模控制 $u^\pm(x)$,使系统满足滑模到达条件(1-3),从而形成滑动模态。

这样,滑模变结构控制既保证了趋近运动(此时并不具备滑动模态的特征)于有限时间内到达滑模面,又保证了滑模面具有良好的品质。一旦滑模函数 $s(x)$ 和滑模变结构控制 $u^\pm(x)$ 都得到了,滑模变结构控制系统就完全建立起来了^[1]。

3. 滑模控制系统的“不变性”

从以上讨论可以看出,滑模控制系统的运动一般包含两个过程,即趋近运动(或称趋近模态)与滑动模态运动。系统一旦进入滑动模态运动,则对满足一定条件的内部参数摄动与外部扰动具有完全的自适应性或称“不变性”。

考虑下面不确定控制系统^[1]

$$\dot{x} = f(x, t) + \Delta f(x, t, p) + [B(x, t, p) + \Delta B(x, t, p)]u \quad (1-4)$$

其中, $\Delta f, \Delta B$ 为适当维数的不确定性, p 为不确定参数。

选择滑模函数 $S(x, t)$, 则

$$\dot{S} = \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} [f + \Delta f + (B + \Delta B)u] \quad (1-5)$$

一旦系统处于滑模面,由等效控制原理^[1](即 $\dot{S} = 0$ 所求得的控制)可知,等效控制满足

$$u_{eq} = - \left[\frac{\partial S}{\partial x} (B + \Delta B) \right]^{-1} \left[\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} (f + \Delta f) \right] \quad (1-6)$$

其中,假设 $\frac{\partial S}{\partial x} (B + \Delta B)$ 可逆。将等效控制(1-6)代入系统(1-4),得系统的滑动模态

$$\dot{x} = f + \Delta f - (B + \Delta B) \left[\frac{\partial S}{\partial x} (B + \Delta B) \right]^{-1} \left[\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} (f + \Delta f) \right] \quad (1-7)$$

假设存在 K_1, K_2 使得不确定项满足

$$\Delta f = BK_1, \quad \Delta B = BK_2 \quad (1-8)$$

把(1-8)式代入(1-7)式得

$$\dot{x} = f + BK_1 - (B + BK_2) \left[\frac{\partial S}{\partial x} (B + BK_2) \right]^{-1} \left[\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} (f + BK_1) \right]$$

$$\begin{aligned}
 &= f + BK_1 - B(1 + K_2) \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x} B \right) (1 + K_2) \right]^{-1} \left[\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} (f + BK_1) \right] \\
 &= f + BK_1 - B(1 + K_2) (1 + K_2)^{-1} \left(\frac{\partial S}{\partial x} B \right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial x} f \\
 &\quad - B(1 + K_2) (1 + K_2)^{-1} \left(\frac{\partial S}{\partial x} B \right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial x} BK_1 \\
 &\quad - B(1 + K_2) \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x} B \right) (1 + K_2) \right]^{-1} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (1-9)
 \end{aligned}$$

化简(1-9)式,则系统滑动模态为

$$\dot{x} = \left[1 - B \left(\frac{\partial S}{\partial x} B \right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial x} \right] f - B \left(\frac{\partial S}{\partial x} B \right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (1-10)$$

这表明滑动模态方程(1-10)此时与系统的参数摄动与外部扰动无关,即滑动模态对未知扰动与不确定性具有“完全适应性”,通常称之为“不变性”。

通常称条件(1-8)为滑动模态的匹配条件^[1]。

从理论上讲,只要不确定性与未知扰动有界,就可以通过适当的滑模控制使系统在有限时间内到达预先设计的滑模面。如果不确定性与未知扰动满足匹配条件(1-8),则此时的滑动模态对系统的不确定性与未知扰动具有完全的“不变性”。正是这种理想的“不变性”为不确定系统的控制提供了一种非常有效的途径。

4. 滑模控制系统的“抖振”

在实际应用中,滑模控制系统在不同的控制逻辑中来回切换,由于切换装置不可避免地存在惯性与滞后,这种时间上的延迟与空间上的滞后通常会导致实际滑动模态运动不是准确地发生在理想的滑模面上,而是沿着理想的滑模面作抖动运动,通常称之为“准滑动模态”,即在理想的滑模面上叠加了自振,这种现象称之为“抖振”。显然,这种“抖振”是滑模控制系统自身固有的。这种固有的“抖振”