

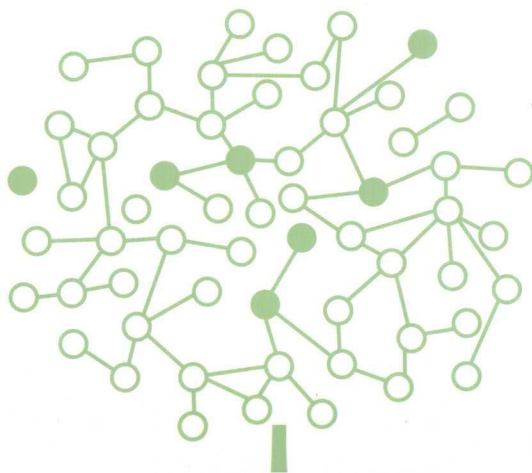
电子信息与电气工程技术丛书 E&E

SLIDING MODE CONTROL DESIGN AND MATLAB SIMULATION
(SECOND EDITION)

滑模变结构控制 MATLAB仿真

(第2版)

刘金琨 著
Liu Jinkun



清华大学出版社

电子信息与电气工程技术丛书 E&E

SLIDING MODE CONTROL DESIGN AND MATLAB SIMULATION
(SECOND EDITION)

滑模变结构控制 MATLAB仿真

(第2版)

刘金琨 著
Liu Jinkun

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书从 MATLAB 仿真角度系统地介绍了滑模变结构控制的基本理论、基本方法和应用技术,是作者多年来从事控制系统教学和科研工作的结晶,同时融入了国内外同行近年来所取得的最新成果。

全书共 11 章,主要内容包括滑模变结构控制发展综述、连续系统滑模控制、自适应鲁棒滑模控制、欠驱动系统滑模控制、反演及动态面滑模控制、基于滤波器及观测器的滑模控制、离散系统滑模控制、模糊滑模控制、神经滑模控制和机械手滑模控制。每种控制方法都通过 MATLAB 仿真程序进行了仿真分析。

本书各部分内容既有联系又相互独立,读者可根据自己需要选择学习。本书适用于从事生产过程自动化、计算机应用、机械电子和电气自动化领域工作的工程技术人员,也可作为大专院校工业自动化、自动控制、机械电子、自动化仪表、计算机应用等专业的教学参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

滑模变结构控制 MATLAB 仿真/刘金琨著.--2 版.--北京:清华大学出版社,2012.10

(电子信息与电气工程技术丛书)

ISBN 978-7-302-28624-0

I. ①滑… II. ①刘… III. ①变结构控制—系统仿真—Matlab 软件 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 074650 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:34.75 字 数:867 千字

版 次:2005 年 9 月第 1 版 2012 年 10 月第 2 版 印 次:2012 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:59.00 元

产品编号:047283-01

变结构控制出现于 20 世纪 60 年代,经历发展,已形成了一个相对独立的研究分支,成为自动控制系统的一种普遍的设计方法,适用于线性与非线性系统、连续与离散系统、确定性与不确定性系统、集中参数与分布参数系统、集中控制与分散控制等。这种控制方法通过控制量的切换使系统状态沿着滑模面滑动,使系统在受到参数摄动和外干扰的时候具有不变性,正是这种特性使得变结构控制方法受到各国学者的重视。

由于滑模变结构控制算法简单、鲁棒性好和可靠性高,被广泛应用于运动控制系统中,尤其适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统。

有关滑模变结构控制理论及其工程应用,近年来已有大量的论文发表。作者多年来一直从事控制理论及应用方面的研究和教学工作,为了促进变结构控制和自动化技术的进步,反映滑模变结构控制设计与应用中的最新研究成果,并使广大工程技术人员能了解、掌握和应用这一领域的最新技术,学会用 MATLAB 语言进行滑模变结构控制器的设计,作者编写了这本书,以抛砖引玉,供广大读者学习参考。

本书是在总结作者多年研究成果的基础上,进一步理论化、系统化、规范化、实用化而成的,其特点是:

(1) 滑模变结构控制算法取材新颖,内容先进,重点置于学科交叉部分的前沿研究和介绍一些有潜力的新思想、新方法和新技术,取材着重于基本概念、基本理论和基本方法。

(2) 针对每种滑模控制算法给出了完整的 MATLAB 仿真程序,并给出了程序的说明和仿真结果,具有很强的可读性。

(3) 着重从应用角度出发,突出理论联系实际,面向广大工程技术人员,具有很强的工程实用性。书中有大量应用实例及其结果分析,为读者提供了有益的借鉴。

(4) 所给出的各种滑模变结构控制算法完整,程序设计结构设计力求简单明了,便于读者自学和二次开发。

本书共 11 章。第 1 章为绪论,介绍了滑模变结构控制的基本原理及在理论和应用方面的发展状况,第 2 章介绍了滑模控制的基本设计方法,第 3 章介绍了几种典型的滑模控制设计方法,第 4 章介绍了自适应鲁棒滑模控制的设计和分析方法,第 5 章介绍了欠驱动系统的滑模控制设计与分析方法,第 6 章介绍了反演及动态面滑模控制的设计和分析方法,第 7 章介绍了基于滤波器及观测器的滑模控制设计和分析方法,第 8 章介绍了模糊滑模控制的设计方法,包括基本的模糊滑模控制、基于模糊自适应调节的滑模控制和模糊自适应滑模控制的设计,第 9 章介绍了神经网络自适应滑模控制的设计和分析方法,第 10 章介绍了离散滑模控制的设计和分析方法,第 11 章介绍了机械手滑模控制的设计和分析方法。

本书是基于 MATLAB 的 R2011a 环境下开发的,各个章节的内容具有很强的独立性,读者可以结合自己的方向深入地进行研究。

作者在研究过程中得到北京航空航天大学尔联洁教授的热情指导,在此表示感谢。在滑模控制的研究中,杨阔竣、贺庆、郭一、龚海生等研究生参与了部分算法的论证,在此表示感谢。

假如您对算法和仿真程序有疑问,请通过 E-mail 与作者联系, email 地址为 ljkbuaa@buaa.edu.cn。程序下载网址为 <http://ljkbuaa.buaa.edu.cn> 或 <http://siljkbuaa.buaa.edu.cn>。由于作者水平有限,书中难免存在一些不足和错误之处,欢迎广大读者批评指正。

刘金琨

于北京航空航天大学

第 1 章 绪论	1
1.1 滑模变结构控制简介	1
1.2 变结构控制发展历史	1
1.3 滑模变结构控制基本原理	2
1.4 滑模面的参数设计	4
1.5 滑模变结构控制理论研究方向	4
1.5.1 滑模变结构控制系统的抖振问题	4
1.5.2 离散系统滑模变结构控制	10
1.5.3 自适应滑模变结构控制	10
1.5.4 不匹配不确定性系统的滑模变结构控制	11
1.5.5 针对时滞系统的滑模变结构控制	11
1.5.6 非线性系统的滑模变结构控制	12
1.5.7 Terminal 滑模变结构控制	12
1.5.8 全鲁棒(Global)滑模变结构控制	13
1.5.9 滑模观测器的研究	13
1.5.10 神经滑模变结构控制	14
1.5.11 模糊滑模变结构控制	14
1.5.12 积分滑模变结构控制	15
1.6 滑模变结构控制应用	15
1.6.1 在电机中的应用	15
1.6.2 在机器人控制中的应用	15
1.6.3 在飞行器控制中的应用	15
1.6.4 在倒立摆控制中的应用	16
1.6.5 在伺服系统中的应用	16
1.7 滑模变结构控制相关研究著作	16
参考文献	17
第 2 章 滑模控制基本方法	25
2.1 滑模面设计及应用实例	25
2.1.1 滑模面的参数设计	25
2.1.2 一个简单的滑模控制实例	25
2.1.3 仿真实例	26
2.2 基于趋近律的滑模控制	29

目录

2.2.1	几种典型的趋近律	30
2.2.2	控制器设计	30
2.2.3	仿真实例	31
2.3	基于趋近律的滑模鲁棒控制	34
2.3.1	系统描述	34
2.3.2	仿真实例	35
2.4	基于上界的滑模控制	38
2.4.1	系统描述	38
2.4.2	控制器设计	39
2.4.3	仿真实例	39
2.5	基于准滑动模态的滑模控制	43
2.5.1	准滑动模态	43
2.5.2	仿真实例	44
2.6	等效滑模控制	50
2.6.1	系统描述	50
2.6.2	等效控制	50
2.6.3	滑模控制	51
2.6.4	仿真实例	51
2.7	滑模控制的数字化仿真	54
2.7.1	基本原理	54
2.7.2	仿真实例	55
第3章	几种典型滑模控制	58
3.1	基于名义模型的滑模控制	58
3.1.1	系统描述	58
3.1.2	控制系统结构	58
3.1.3	针对名义模型的控制	59
3.1.4	滑模控制器的设计	59
3.1.5	仿真实例	60
3.2	全局滑模控制	66
3.2.1	系统描述	66
3.2.2	全局滑模函数的设计	66
3.2.3	滑模控制器的设计	66
3.2.4	仿真实例	67

3.3	基于线性化反馈的滑模控制	71
3.3.1	线性化反馈控制	71
3.3.2	仿真实例	72
3.3.3	基于线性化反馈的滑模控制	75
3.3.4	仿真实例	76
3.4	输入输出反馈线性化控制	79
3.4.1	系统描述	79
3.4.2	控制器设计	79
3.4.3	仿真实例	80
3.5	基于输入输出反馈线性化的滑模控制	83
3.5.1	系统描述	83
3.5.2	控制器设计	83
3.5.3	仿真实例	84
3.6	模型参考滑模控制	87
3.6.1	系统描述	87
3.6.2	滑模控制器设计	87
3.6.3	仿真实例	88
	参考文献	92
第 4 章	自适应鲁棒滑模控制	93
4.1	自适应鲁棒滑模控制	93
4.1.1	问题的提出	93
4.1.2	自适应滑模控制律的设计	93
4.1.3	仿真实例	94
4.2	无需物理参数的倒立摆自适应滑模控制	100
4.2.1	系统描述	100
4.2.2	控制律设计	101
4.2.3	仿真实例	103
4.3	基于 HJI 理论的滑模鲁棒控制	108
4.3.1	基本原理	108
4.3.2	控制器设计与分析	108
4.3.3	仿真实例	110
4.4	控制输入受限条件下的滑模控制	114
4.4.1	基本原理	114

目录

4.4.2	控制器设计与分析	115
4.4.3	仿真实例	116
4.5	基于 RBF 网络补偿的控制输入受限滑模控制	120
4.5.1	系统描述	120
4.5.2	基于 RBF 网络控制受限逼近的滑模控制	120
4.5.3	仿真实例	121
	参考文献	127
第 5 章	欠驱动系统滑模控制	128
5.1	LMI 及其 MATLAB 求解	128
5.2	基于 LMI 的欠驱动倒立摆系统滑模控制	129
5.2.1	系统描述	129
5.2.2	基于等效的滑模控制	130
5.2.3	基于辅助反馈的滑模控制分析	130
5.2.4	仿真实例	131
5.3	一类欠驱动系统的滑模控制	138
5.3.1	系统描述	139
5.3.2	滑模控制律的设计	139
5.3.3	稳定性及收敛性分析	140
5.3.4	位置跟踪	141
5.3.5	仿真实例	142
5.4	VTOL 飞行器滑模控制	154
5.4.1	系统描述	154
5.4.2	模型解耦	154
5.4.3	控制律设计	157
5.4.4	仿真实例	159
5.5	基于 Hurwitz 稳定的小车倒立摆滑模控制	166
5.5.1	系统描述	166
5.5.2	滑模控制律设计	166
5.5.3	Hurwitz 稳定性分析	167
5.5.4	仿真实例	170
5.6	柔性机械手观测器设计及分析	174
5.6.1	问题描述	174
5.6.2	观测器设计	174

5.6.3	观测器分析	175
5.6.4	仿真结果	176
5.7	基于观测器的柔性关节机械手滑模控制	180
5.7.1	观测器的设计	180
5.7.2	控制器设计与分析	181
5.7.3	仿真实例	183
5.8	基于高增益观测器分离定理的滑模控制	188
5.8.1	高增益观测器分离定理	188
5.8.2	基于高增益观测器的倒立摆控制	188
5.8.3	闭环系统分析	190
5.8.4	仿真实例	191
5.9	基于欠驱动系统解耦算法的滑模控制	196
5.9.1	欠驱动系统解耦算法	196
5.9.2	倒立摆动力学系统的解耦	197
5.9.3	滑模控制器的设计	199
5.9.4	滑模参数 C 的设计	199
5.9.5	仿真实例	200
	参考文献	204
第 6 章	反演及动态面滑模控制	206
6.1	简单反演滑模控制	206
6.1.1	基本原理	206
6.1.2	滑模反演控制器的设计	207
6.1.3	仿真实例	207
6.2	鲁棒反演滑模控制	211
6.2.1	系统描述	211
6.2.2	backstepping 滑模控制器的设计	211
6.2.3	仿真实例	212
6.3	自适应反演滑模控制	216
6.3.1	控制律的设计	216
6.3.2	仿真实例	217
6.4	柔性机械手的反演滑模控制	220
6.4.1	系统描述	220
6.4.2	反演滑模控制器的设计	221

目录

6.4.3 仿真实例	224
6.5 简单动态面滑模控制	229
6.5.1 系统描述	229
6.5.2 动态面控制器的设计	230
6.5.3 动态面控制器的分析	231
6.5.4 动态面滑模控制器的设计	232
6.5.5 仿真实例	232
6.6 柔性机械手动动态面滑模控制	243
6.6.1 系统描述	243
6.6.2 控制律设计	244
6.6.3 稳定性分析	245
6.6.4 仿真实例	248
参考文献	257
第7章 基于滤波器及观测器的滑模控制	258
7.1 基于低通滤波器的滑模控制	258
7.1.1 系统描述	258
7.1.2 滑膜控制器设计	258
7.1.3 仿真实例	259
7.2 基于 Kalman 滤波器的滑模控制	262
7.2.1 系统描述	262
7.2.2 Kalman 滤波器原理	263
7.2.3 仿真实例	263
7.3 基于慢时变干扰观测器的连续滑模控制	266
7.3.1 系统描述	266
7.3.2 观测器设计	267
7.3.3 仿真实例	267
7.3.4 基于慢时变干扰观测器的连续滑模控制设计	270
7.3.5 仿真实例	271
7.4 基于高增益观测器的滑模控制	275
7.4.1 高增益观测器机理分析	275
7.4.2 基于高增益观测器的滑模控制设计	278
7.4.3 仿真实例	279
7.5 基于扩张观测器的滑模控制	285

7.5.1 扩张观测器的设计	286
7.5.2 扩张观测器的分析	286
7.5.3 仿真实例	288
7.5.4 基于扩张观测器的滑模控制设计	293
7.5.5 仿真实例	293
7.6 基于微分器的滑模控制	297
7.6.1 系统描述	298
7.6.2 传统滑模控制器的设计	298
7.6.3 微分器设计	298
7.6.4 基于微分器的滑模控制设计	299
7.6.5 仿真实例	300
7.7 基于输出延时观测器的滑模控制	305
7.7.1 系统描述	305
7.7.2 输出延时观测器的设计	305
7.7.3 滑模控制器的设计与分析	306
7.7.4 仿真实例	306
7.8 基于谐振抑制的滑模控制	315
7.8.1 谐振抑制滤波器设计	316
7.8.2 系统描述	316
7.8.3 基于名义模型的滑模控制	318
7.8.4 仿真分析	319
参考文献	322
第 8 章 模糊滑模控制	324
8.1 基于模糊切换增益调节的滑模控制	324
8.1.1 系统描述	324
8.1.2 滑模控制器设计	324
8.1.3 模糊规则设计	325
8.1.4 仿真实例	326
8.2 基于等效控制的模糊滑模控制	333
8.2.1 系统描述	333
8.2.2 模糊滑模控制律的设计	333
8.2.3 仿真实例	333
8.3 一种简单的模糊自适应滑模控制	339
8.3.1 问题描述	339

目录

8.3.2	模糊逼近原理	340
8.3.3	控制算法设计与分析	341
8.3.4	仿真实例	342
8.4	基于线性化反馈的自适应模糊滑模控制	347
8.4.1	线性化反馈方法	347
8.4.2	滑模控制器设计	347
8.4.3	自适应模糊滑模控制器设计	348
8.4.4	仿真实例	350
8.5	一种简单的切换模糊化自适应滑模控制	357
8.5.1	系统描述	357
8.5.2	自适应模糊滑模控制器设计	357
8.5.3	仿真实例	359
8.6	一种复杂的切换模糊化自适应滑模控制	364
8.6.1	系统描述	364
8.6.2	自适应模糊滑模控制器设计	364
8.6.3	仿真实例	366
8.7	具有积分滑模面的模糊滑模控制	373
8.7.1	系统描述	373
8.7.2	控制器的设计	373
8.7.3	仿真实例	374
8.8	控制输入模糊化的自适应滑模控制	379
8.8.1	系统描述	379
8.8.2	控制器的设计	379
8.8.3	自适应控制算法设计	380
8.8.4	仿真实例	381
8.9	基于模糊补偿的机械手自适应模糊滑模控制	387
8.9.1	系统描述	387
8.9.2	基于模糊补偿的滑模控制	388
8.9.3	只对摩擦进行模糊补偿的滑模控制	389
8.9.4	仿真实例	390
	参考文献	397
第9章	神经网络滑模控制	399
9.1	一种简单的RBF网络自适应滑模控制	399

9.1.1	问题描述	399
9.1.2	RBF 网络原理	399
9.1.3	控制算法设计与分析	400
9.1.4	仿真实例	400
9.2	RBF 网络自适应鲁棒滑模控制	404
9.2.1	问题描述	404
9.2.2	基于 RBF 网络逼近 $f(\cdot)$ 的滑模控制	404
9.2.3	仿真实例	405
9.3	一种复杂的 RBF 网络自适应鲁棒滑模控制	410
9.3.1	问题描述	410
9.3.2	基于 RBF 网络逼近 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 的滑模控制	410
9.3.3	仿真实例	412
9.4	基于模型逼近的机械手 RBF 网络自适应滑模控制	417
9.4.1	问题描述	417
9.4.2	基于 RBF 神经网络逼近的滑模控制	418
9.4.3	稳定性及收敛性分析	418
9.4.4	仿真实例	420
9.5	基于神经网络的直接自适应滑模控制	429
9.5.1	系统描述	429
9.5.2	理想的滑模控制器及神经网络逼近	430
9.5.3	控制器设计及分析	431
9.5.4	仿真实例	432
9.6	基于神经网络最小参数学习法的自适应滑模控制	436
9.6.1	问题描述	436
9.6.2	基于 RBF 网络逼近的自适应控制	437
9.6.3	仿真实例	438
9.7	基于 RBF 网络最小参数学习法的机械手自适应控制	443
9.7.1	问题的提出	443
9.7.2	基于神经网络逼近的滑模控制	443
9.7.3	基于单参数的自适应滑模控制	444
9.7.4	仿真实例	446
	参考文献	454

目录

第 10 章 离散滑模控制	455
10.1 离散滑模控制描述	455
10.2 离散时间滑模控制的特性	455
10.2.1 准滑动模态	455
10.2.2 离散滑模的存在性和可达性	456
10.2.3 离散滑模控制的不变性	456
10.3 基于趋近律的离散滑模控制	457
10.3.1 离散趋近律的设计	457
10.3.2 离散控制律的设计	458
10.3.3 仿真实例	458
10.3.4 基于趋近律的离散滑模控制位置跟踪	460
10.3.5 仿真实例	461
10.4 基于等效控制的离散滑模控制	467
10.4.1 控制器设计	467
10.4.2 稳定性分析	467
10.4.3 仿真实例	469
10.5 基于变速趋近律的滑模控制	471
10.5.1 变速趋近律设计	471
10.5.2 基于变速趋近律的滑模控制设计	471
10.5.3 基于组合趋近律的控制	473
10.5.4 仿真实例	473
10.6 自适应离散滑模控制	477
10.6.1 离散指数趋近律控制的抖振分析	477
10.6.2 自适应滑模控制器的设计	478
10.6.3 仿真实例	479
10.7 离散滑模控制的设计与分析	482
10.7.1 系统描述	482
10.7.2 控制器设计与分析	482
10.7.3 仿真实例	484
10.8 基于干扰观测器的离散滑模控制	486
10.8.1 系统描述	486
10.8.2 基于干扰观测器的离散滑模控制	486
10.8.3 干扰观测器的收敛性分析	487
10.8.4 稳定性分析	488

10.8.5 仿真实例	489
参考文献	492
第 11 章 机械手滑模控制	493
11.1 机械手动力学模型及特性	493
11.2 基于名义模型的机械手滑模鲁棒控制——上界方法	494
11.2.1 系统描述	494
11.2.2 控制律设计	494
11.2.3 仿真实例	495
11.3 基于名义模型的机械手滑模鲁棒控制——PI 鲁棒方法	500
11.3.1 问题描述	500
11.3.2 控制器设计	500
11.3.3 稳定性分析	501
11.3.4 仿真实例——双关节机械手滑模控制	502
11.4 基于名义模型的机械手滑模控制——趋近律方法	508
11.4.1 设计原理	508
11.4.2 基于名义模型的机械手指指数趋近律的设计	509
11.4.3 仿真实例	510
11.5 基于低通滤波器的机械手滑模控制	515
11.5.1 机械手动态方程	515
11.5.2 滑模控制器的设计	516
11.5.3 仿真实例——单关节机械手滑模控制	517
11.5.4 仿真实例——双关节机械手滑模控制	521
11.6 机械手自适应滑模控制	527
11.6.1 系统描述	527
11.6.2 自适应滑模控制器的设计	528
11.6.3 仿真实例	529
11.7 机械手滑模控制的收敛性分析	537
参考文献	539

1.1 滑模变结构控制简介

变结构控制(variable structure control, VSC)本质上是一类特殊的非线性控制,其非线性表现为控制的不连续性,这种控制策略与其他控制的不同之处在于系统的“结构”并不固定,而是可以在动态过程中,根据系统当前的状态(如偏差及其各阶导数等),有目的地不断变化,迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动,所以又常称变结构控制为滑动模态控制(sliding mode control, SMC),即滑模变结构控制。由于滑动模态可以进行设计且与对象参数及扰动无关,这就使得变结构控制具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识,物理实现简单等优点。该方法的缺点在于当状态轨迹到达滑模面后,难于严格地沿着滑面向着平衡点滑动,而是在滑模面两侧来回穿越,从而产生颤动。

变结构控制出现于20世纪60年代,经历多年的发展,已形成了一个相对独立的研究分支,成为自动控制系统的一种普遍的设计方法,适用于线性与非线性系统、连续与离散系统、确定性与不确定性系统、集中参数与分布参数系统、集中控制与分散控制等。并且在实际工程中逐渐得到推广应用,如电机与电力系统控制、机器人控制、飞机控制、卫星姿态控制等。这种控制方法通过控制量的切换使系统状态沿着滑模面滑动,使系统在受到参数摄动和外干扰的时候具有不变性,正是这种特性使得变结构控制方法受到各国学者的重视。

1.2 变结构控制发展历史

变结构控制的发展过程大致可分为3个阶段。

1. 1957—1962年

此阶段为初级研究阶段。前苏联学者 Utkin 和 Emelyanov 提出了变结构控制的概念,基本研究对象为二阶线性系统。