

电子信息与电气工程技术丛书 E&E

滑模变结构控制 MATLAB 仿真 (第3版) 基本理论与设计方法

Sliding Mode Control Design and MATLAB Simulation (Third Edition)
The Basic Theory and Design Method

刘金琨
Liu Jinkun
著

清华大学出版社



电子信息与电气工程技术丛书 E&E

滑模变结构控制 MATLAB 仿真 (第3版) 基本理论与设计方法

Sliding Mode Control Design and MATLAB Simulation (Third Edition)
The Basic Theory and Design Method

刘金琨
Liu Jinkun
著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书从 MATLAB 仿真的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新成果。

本书是在第 2 版基础上修改而成的,并增加了部分内容。全书共分 12 章,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、基于干扰及输出测量延迟观测器的滑模控制、反演及动态面滑模控制、基于滤波器及状态观测器的滑模控制、模糊滑模控制、神经滑模控制、离散系统滑模控制、基于 LMI 的滑模控制、Terminal 滑模控制。每种控制方法都利用 MATLAB 程序进行了仿真分析。

本书各部分内容既相互联系又相对独立,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阅读,也可作为高等学校工业自动化、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:基本理论与设计方法/刘金琨著.--3 版.--北京:清华大学出版社,2015

(电子信息与电气工程技术丛书)

ISBN 978-7-302-40256-5

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(2015)第 106325 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:杨 艳

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 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:32.5 字 数:813 千字

版 次:2005 年 9 月第 1 版 2015 年 8 月第 3 版 印 次:2015 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:69.00 元

产品编号:059629-01

变结构控制出现于 20 世纪 50 年代,经历了 50 余年的发展,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典型的设计方法,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部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广泛重视。

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中,尤其适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统。

在滑模变结构控制理论及其工程应用领域,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教学和研究工作,为了促进变结构控制和自动化技术的进步,发布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、实用化后编写而成的,其特点如下:

(1) 滑模变结构控制算法取材新颖,内容先进,重点介绍学科交叉部分的前沿研究和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) 每种滑模控制算法都给出了完整的 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) 从应用领域角度出发,突出理论联系实际,面向广大工程技术人员,具有很强的工程性和实用性。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) 本书给出的各种滑模变结构控制算法非常完整,程序设计结构设计简单明了,便于自学和进一步开发。

全书共分 12 章,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、基于干扰及输出测量延迟观测器的滑模控制、反演及动态面滑模控制、基于滤波器及状态观测器的滑模控制、模糊滑模控制、神经滑模控制、离散系统滑模控制、基于 LMI 的滑模控制、Terminal 滑模控制。

本书程序算法使用说明如下:

(1) 本书程序可到 www.tup.com.cn 或 <http://ljk.buaa.edu.cn> 下载。

(2) 下载程序并复制到硬盘 MATLAB 运行的路径中,即可运行仿真。

(3) 所有算法均在 MATLAB R2013a 版本下运行成功,也兼容更高级版本。

(4) 所有控制算法按章归类,程序名与书中对应一致。

(5) 如果读者对算法和仿真程序有疑问,请通过电子邮件(ljk@buaa.edu.cn)与作者联系。

本书是基于 MATLAB R2011a^① 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研究方向深入地进行研究。

作者在滑模控制的研究中得到北京航空航天大学尔联洁教授的热情支持和指导。本书的撰写和研究工作得到了国家自然科学基金项目“N 连杆柔性机械臂 PDE 建模及自适应边界控制理论研究”(编号: 61374048)的支持。

由于作者水平有限,书中难免存在一些不足和疏漏之处,欢迎广大读者批评指正。

刘金琨

2015 年 5 月于北京航空航天大学

^① 由于采用的软件仿真环境为 MATLAB R2013a 英文版,所以书中仿真插图均为英文。

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
1.5.13 高阶滑模控制	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	16
1.6.3 在飞行器控制中的应用	16
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	17
1.8 控制系统 S 函数设计	17
1.8.1 S 函数介绍	17
1.8.2 S 函数基本参数	17
1.8.3 S 函数描述实例	18
1.9 简单自适应控制系统设计实例	19
1.9.1 系统描述	19
1.9.2 滑模控制律设计	19

目录

1.9.3 仿真实例	20
附录	24
参考文献	24
第2章 滑模控制基本方法	33
2.1 滑模面设计及应用实例	33
2.1.1 滑模面的参数设计	33
2.1.2 滑模控制的工程意义	33
2.1.3 一个简单的滑模控制实例	34
2.1.4 仿真实例	35
2.2 基于趋近律的滑模控制	38
2.2.1 几种典型的趋近律	39
2.2.2 控制器设计	40
2.2.3 仿真实例	40
2.3 基于趋近律的滑模鲁棒控制	46
2.3.1 系统描述	46
2.3.2 仿真实例	47
2.4 基于上界的滑模控制	51
2.4.1 系统描述	51
2.4.2 控制器设计	51
2.4.3 仿真实例	52
2.5 基于准滑动模态的滑模控制	56
2.5.1 准滑动模态	56
2.5.2 仿真实例	57
2.6 基于连续切换的滑模控制	62
2.6.1 双曲正切函数性质	62
2.6.2 基于双曲正切函数的滑模控制	64
2.6.3 仿真实例	66
2.7 等效滑模控制	69
2.7.1 系统描述	69
2.7.2 等效控制	69
2.7.3 滑模控制	70
2.7.4 仿真实例	70
2.8 滑模控制的数字化仿真	73
2.8.1 基本原理	74

2.8.2 仿真实例	74
参考文献	78
第3章 几种典型滑模控制	79
3.1 基于名义模型的滑模控制	79
3.1.1 系统描述	79
3.1.2 控制系统结构	79
3.1.3 针对名义模型的控制	79
3.1.4 滑模控制器的设计	80
3.1.5 仿真实例	81
3.2 全局滑模控制	87
3.2.1 系统描述	87
3.2.2 全局滑模函数的设计	87
3.2.3 滑模控制器的设计	88
3.2.4 仿真实例	89
3.3 基于线性化反馈的滑模控制	93
3.3.1 线性化反馈控制	93
3.3.2 仿真实例	93
3.3.3 基于线性化反馈的滑模控制	97
3.3.4 仿真实例	97
3.4 输入输出反馈线性化控制	101
3.4.1 系统描述	101
3.4.2 控制器设计	101
3.4.3 仿真实例	102
3.5 基于输入输出反馈线性化的滑模控制	105
3.5.1 系统描述	105
3.5.2 控制器设计	105
3.5.3 仿真实例	106
3.6 模型参考滑模控制	110
3.6.1 系统描述	110
3.6.2 滑模控制器设计	110
3.6.3 仿真实例	111
参考文献	115
第4章 自适应鲁棒滑模控制	116
4.1 自适应鲁棒滑模控制描述	116

目录

4.1.1	问题的提出	116
4.1.2	自适应滑模控制律的设计	116
4.1.3	仿真实例	118
4.2	无须物理参数的倒立摆自适应滑模控制	124
4.2.1	系统描述	124
4.2.2	控制律设计	125
4.2.3	仿真实例	126
4.3	基于 HJI 理论的滑模鲁棒控制	132
4.3.1	基本原理	132
4.3.2	控制器设计与分析	133
4.3.3	仿真实例	134
	参考文献	138
第 5 章	基于干扰及输出测量延迟观测器的滑模控制	139
5.1	基于慢时变干扰观测器的连续滑模控制	139
5.1.1	系统描述	139
5.1.2	观测器设计	139
5.1.3	仿真实例	140
5.1.4	基于慢时变干扰观测器的连续滑模控制	142
5.1.5	仿真实例	143
5.2	基于指数收敛干扰观测器的滑模控制	148
5.2.1	系统描述	148
5.2.2	指数收敛干扰观测器的问题提出	148
5.2.3	指数收敛干扰观测器的设计	149
5.2.4	滑模控制器的设计与分析	149
5.2.5	仿真实例	150
5.3	基于输出延时观测器的滑模控制	157
5.3.1	系统描述	157
5.3.2	输出延迟观测器的设计	158
5.3.3	滑模控制器的设计与分析	158
5.3.4	仿真实例	160
5.4	一种时变测量延迟观测器及滑模控制	169
5.4.1	系统描述	169
5.4.2	输出延迟观测器的设计	169
5.4.3	按 $A - KC$ 为 Hurwitz 进行 K 的设计	170

5.4.4	观测器仿真实例	170
5.4.5	基于时变测量输出延迟观测器的滑模控制	175
5.4.6	闭环控制仿真实例	176
	参考文献	180
第 6 章	反演及动态面滑模控制	181
6.1	简单反演滑模控制	181
6.1.1	基本原理	181
6.1.2	滑模反演控制器的设计	182
6.1.3	仿真实例	183
6.2	鲁棒反演滑模控制	187
6.2.1	系统描述	187
6.2.2	Backstepping 滑模控制器的设计	187
6.2.3	仿真实例	189
6.3	自适应反演滑模控制	192
6.3.1	控制律的设计	192
6.3.2	仿真实例	193
6.4	简单动态面滑模控制	197
6.4.1	系统描述	197
6.4.2	动态面控制器的设计	197
6.4.3	动态面控制器的分析	199
6.4.4	动态面滑模控制器的设计	200
6.4.5	仿真实例	200
6.5	基于反演的动态滑模控制	212
6.5.1	系统描述	212
6.5.2	控制律设计	212
6.5.3	仿真实例	213
	参考文献	216
第 7 章	基于滤波器及状态观测器的滑模控制	217
7.1	基于低通滤波器的滑模控制	217
7.1.1	系统描述	217
7.1.2	滑模控制器设计	217
7.1.3	仿真实例	218
7.2	基于 Kalman 滤波器的滑模控制	222
7.2.1	系统描述	222

目录

7.2.2	卡尔曼滤波器原理	222
7.2.3	仿真实例	223
7.3	基于高增益观测器的滑模控制	227
7.3.1	高增益观测器机理分析	227
7.3.2	高增益观测器的滑模控制器设计	228
7.3.3	仿真实例	230
7.4	基于扩张观测器的滑模控制	237
7.4.1	扩张观测器的设计	237
7.4.2	扩张观测器的分析	238
7.4.3	仿真实例	240
7.4.4	基于扩张观测器的滑模控制器设计	245
7.4.5	仿真实例	246
7.5	基于高增益微分器的滑模控制	250
7.5.1	系统描述	250
7.5.2	传统滑模控制器的设计	251
7.5.3	高增益微分器设计	251
7.5.4	高增益微分器的滑模控制器设计	252
7.5.5	仿真实例	253
7.6	基于K观测器的高阶系统设计与分析	258
7.6.1	K观测器设计与分析	258
7.6.2	按 A_0 为 Hurwitz 进行 k 的设计	260
7.6.3	基于K观测器的高阶系统滑模控制	260
7.6.4	仿真实例	262
	参考文献	267
第8章	模糊滑模控制	269
8.1	基于模糊切换增益调节的滑模控制	269
8.1.1	系统描述	269
8.1.2	滑模控制器设计	270
8.1.3	模糊规则设计	270
8.1.4	仿真实例	272
8.2	基于等效控制的模糊滑模控制	278
8.2.1	系统描述	279
8.2.2	模糊滑模控制律的设计	279
8.2.3	仿真实例	279

8.3	一种简单的模糊自适应滑模控制	286
8.3.1	问题描述	286
8.3.2	模糊逼近原理	287
8.3.3	控制算法设计与分析	288
8.3.4	仿真实例	289
8.4	基于线性化反馈的自适应模糊滑模控制	294
8.4.1	线性化反馈方法	294
8.4.2	滑模控制器设计	295
8.4.3	自适应模糊滑模控制器设计	296
8.4.4	仿真实例	298
8.5	一种简单的切换模糊化自适应滑模控制	305
8.5.1	系统描述	306
8.5.2	自适应模糊滑模控制器设计	306
8.5.3	仿真实例	307
8.6	一种复杂的切换模糊化自适应滑模控制	313
8.6.1	系统描述	313
8.6.2	自适应模糊滑模控制器设计	313
8.6.3	仿真实例	315
8.7	具有积分滑模面的模糊滑模控制	323
8.7.1	系统描述	323
8.7.2	控制器的设计	323
8.7.3	仿真实例	323
8.8	控制输入模糊化的自适应滑模控制	328
8.8.1	系统描述	328
8.8.2	控制器的设计	328
8.8.3	自适应控制算法设计	329
8.8.4	仿真实例	331
	参考文献	336
第 9 章	神经网络滑模控制	337
9.1	一种简单的 RBF 网络自适应滑模控制	337
9.1.1	问题描述	337
9.1.2	RBF 网络原理	338
9.1.3	控制算法设计与分析	338
9.1.4	仿真实例	339

目录

9.2	RBF 网络自适应鲁棒滑模控制	343
9.2.1	问题描述	343
9.2.2	基于 RBF 网络逼近 $f(\cdot)$ 的滑模控制	343
9.2.3	仿真实例	344
9.3	一种复杂的 RBF 网络自适应鲁棒滑模控制	349
9.3.1	问题描述	349
9.3.2	基于 RBF 网络逼近 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 的滑模控制	349
9.3.3	仿真实例	351
9.4	基于神经网络的直接自适应滑模控制	356
9.4.1	系统描述	356
9.4.2	理想的滑模控制器及神经网络逼近	357
9.4.3	控制器设计及分析	358
9.4.4	仿真实例	359
9.5	基于神经网络最小参数学习法的自适应滑模控制	364
9.5.1	问题描述	364
9.5.2	基于 RBF 网络逼近的自适应控制	365
9.5.3	仿真实例	366
9.6	基于 RBF 网络摩擦补偿的滑模控制	371
9.6.1	系统描述	371
9.6.2	基于 RBF 网络逼近的滑模控制	371
9.6.3	仿真实例	372
	参考文献	377
第 10 章	离散滑模控制	378
10.1	离散滑模控制描述	378
10.2	离散时间滑模控制的特性	378
10.2.1	准滑动模态	378
10.2.2	离散滑模的存在性和可达性	379
10.2.3	离散滑模控制的不变性	379
10.3	基于趋近律的离散滑模控制	380
10.3.1	离散趋进律的设计	380
10.3.2	离散控制律的设计	381
10.3.3	仿真实例	381
10.3.4	基于趋近律的离散滑模控制位置跟踪	384
10.3.5	仿真实例	385

10.4	基于等效控制的离散滑模控制	391
10.4.1	控制器设计	391
10.4.2	稳定性分析	392
10.4.3	仿真实例	393
10.5	基于变速趋近律的滑模控制	395
10.5.1	变速趋近律设计	395
10.5.2	基于变速趋近律的滑模控制	396
10.5.3	基于组合趋近律的控制	397
10.5.4	仿真实例	398
10.6	自适应离散滑模控制	403
10.6.1	离散指数趋近律控制的抖振分析	403
10.6.2	自适应滑模控制器的设计	404
10.6.3	仿真实例	405
10.7	离散滑模控制的设计与分析	409
10.7.1	系统描述	409
10.7.2	控制器设计与分析	409
10.7.3	仿真实例	411
10.8	基于干扰观测器的离散滑模控制	414
10.8.1	系统描述	414
10.8.2	基于干扰观测器的离散滑模控制	414
10.8.3	干扰观测器的收敛性分析	414
10.8.4	稳定性分析	415
10.8.5	仿真实例	417
	参考文献	420
第 11 章	基于 LMI 的滑模控制	421
11.1	LMI 及其 MATLAB 求解	421
11.1.1	传统的 LMI 求解方法	421
11.1.2	新的 LMI 求解方法——YALMIP 工具箱	422
11.1.3	YALMIP 工具箱仿真实例	423
11.2	基于 LMI 的一类线性系统控制	424
11.2.1	系统描述	424
11.2.2	基于 LMI 的线性系统稳定镇定	424

目录

11.2.3	基于 LMI 的线性系统跟踪控制	425
11.2.4	仿真实例	425
11.3	基于 LMI 的一类线性系统滑模鲁棒控制	432
11.3.1	系统描述	432
11.3.2	控制器设计	432
11.3.3	仿真实例	433
11.4	基于 LMI 的 Lipschitz 非线性系统稳定镇定	439
11.4.1	系统描述	439
11.4.2	镇定控制器设计	439
11.4.3	仿真实例	440
11.5	基于 LMI 的 Lipschitz 非线性系统跟踪控制	445
11.5.1	系统描述	445
11.5.2	跟踪控制器设计	446
11.5.3	仿真实例	447
11.6	基于 LMI 的欠驱动倒立摆系统滑模控制	452
11.6.1	系统描述	453
11.6.2	基于等效的滑模控制	453
11.6.3	基于辅助反馈的滑模控制	454
11.6.4	仿真实例	455
11.7	基于 LMI 的混沌系统动态补偿滑模控制	462
11.7.1	系统描述	462
11.7.2	传统的基于 LMI 的滑模控制	462
11.7.3	基于动态补偿的 LMI 滑模控制	463
11.7.4	仿真实例	465
	参考文献	473
第 12 章	Terminal 滑模控制	474
12.1	一种非线性系统的 Terminal 滑模控制	474
12.1.1	系统描述	474
12.1.2	Terminal 滑模控制器设计	474
12.1.3	仿真实例	478
12.2	快速 Terminal 滑模控制	483
12.2.1	传统快速 Terminal 滑模控制	483

12.2.2	非奇异 Terminal 滑模控制	485
12.2.3	仿真实例	486
12.3	全局快速 Terminal 滑模控制	490
12.3.1	全局快速 Terminal 滑动模态	491
12.3.2	全局快速滑模控制器的设计及分析	492
12.3.3	全局快速滑模控制的鲁棒性分析	497
	参考文献	504

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、无须系统在线辨识, 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 50 年代, 经历了 50 余年的发展, 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一般的设计方法, 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广泛重视。

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三个阶段:

1. 1957—1962 年

此阶段为研究的初级阶段。前苏联的学者 Utkin 和 Emelyanov 在 20 世纪 50 年代提出了变结构控制的概念, 基本研究对象为二阶线性系统。