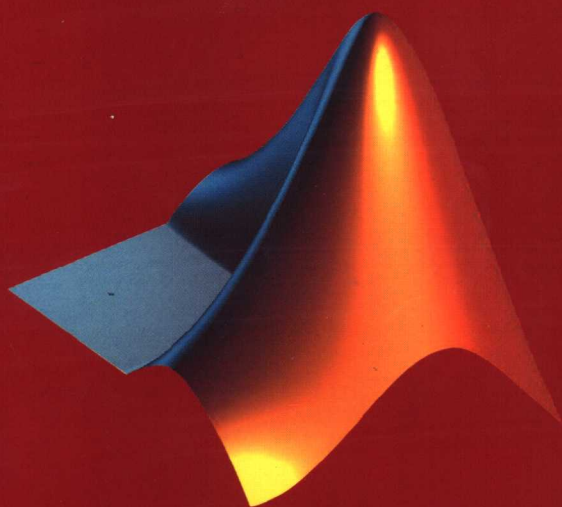


MATLAB Simulation for Sliding Mode Control

滑模变结构控制 MATLAB 仿真

刘金琨 著
Liu Jinkun



清华大学出版社

MATLAB Simulation for Sliding Mode Control
滑模变结构控制 MATLAB 仿真

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新成果。

全书共分 10 章,包括滑模变结构控制发展综述、连续时间系统滑模控制、离散时间系统滑模控制、模糊滑模控制、神经滑模控制、基于反演设计的滑模控制、动态滑模控制、基于干扰估计的滑模控制、Terminal 滑模控制以及几种新型滑模控制。每种控制方法都通过 MATLAB 仿真程序进行了仿真分析。

本书各部分内容既相互联系又相互独立,读者可根据需要选择学习。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学习,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。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

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。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

滑模变结构控制 MATLAB 仿真/刘金琨著. —北京:清华大学出版社,2005.10
ISBN 7-302-11144-8

I. 滑… II. 刘… III. 变结构控制—计算机仿真—计算机辅助计算—软件包, MATLAB IV. ①O231
②TP391.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 061370 号

出 版 者: 清华大学出版社

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

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客 户 服 务: 010-62776969

责任编辑: 王一玲

印 装 者: 清华大学印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×260 印 张: 29.25 字 数: 739 千字

版 次: 2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-11144-8/TP·7360

印 数: 1~3000

定 价: 48.00 元(含光盘)

前 言

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时具有不变性,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,故被广泛应用于运动控制中,尤其被用于可建立精确数学模型的确定性控制系统中。

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。本书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,使广大工程技术人员能够及时了解、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,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均给出了完整的 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) 所给出的各种滑模变结构控制算法力求完整,程序设计、结构设计力求简单明了,便于自学和进一步开发。

本书共分 10 章。第 1 章为绪论,介绍了滑模变结构控制的基本原理及其在理论和应用方面的发展状况;第 2 章介绍连续系统滑模变结构控制的理论基础,并介绍了连续时间系统变结构控制律的几种基本设计方法,通过仿真和分析进行了说明;第 3 章介绍离散系统数字滑模控制的理论基础,并介绍了离散时间系统变结构控制律的几种基本设计方法及其改进方法,通过仿真和分析进行了说明;第 4 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 5 章介绍了神经滑模控制的设计方法,包括基本的神经滑模控制、基于神经网络自适应调节的滑模控制和神经网络自适应滑模控制的设计;第 6 章介绍了基于反演设计的滑模控制设计方法,包括基本的反演控制器、自适应反演滑模控制和基于名义模型的反演滑模控制的设计;第 7 章介绍了动态滑模控制的设计方法,包括一阶动态滑模控制、基于动态切换函数的动态滑模控制和基于反演设计的自适应动态滑模控制的设计;第 8 章介绍了基于干扰估计的滑模控制,包括基于干扰观测器的连续滑模控制器和离散滑模控制器的设计、基于灰色不确定参数估计

的灰色滑模控制器的设计;第9章介绍了 Terminal 滑模控制方法,包括高阶 MIMO 非线性系统的 Terminal 滑模控制、动态 Terminal 滑模控制和快速 Terminal 滑模控制器的设计;第10章介绍了几种新型滑模控制器的设计方法,包括全局滑模控制、基于滤波器的滑模控制、积分滑模控制和模型参考自适应滑模控制的设计。

本书是基于 MATLAB 5.3 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学习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。东北大学薛定宇教授在 S 函数设计及 Simulink 仿真方面给了作者很大帮助,清华大学徐文立教授对本书给予了热情的推荐和建议。在滑模控制的研究中,研究生李斐、李蓓、钟友武、邬强等参与了部分算法的论证,在文字校对中得到了研究生曹立的帮助,在此一并表示感谢。

本书的研究工作得到了航空基金(编号:00E51022)的资助。

由于作者水平有限,书中难免存在一些不足和错误之处,真诚欢迎广大读者批评指正。若有指正或需与作者商讨,请通过电子邮件 ljf@buaa.edu.cn 与作者联系。

刘金琨
北京航空航天大学
2005年5月

目 录

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 滑模变结构控制理论的研究方向	4
1.4.1 滑模变结构控制系统的抖振问题	4
1.4.2 离散系统滑模变结构控制	9
1.4.3 自适应滑模变结构控制	9
1.4.4 非匹配不确定性系统的滑模变结构控制	10
1.4.5 针对时滞系统的滑模变结构控制	10
1.4.6 非线性系统的滑模变结构控制	10
1.4.7 Terminal 滑模变结构控制	11
1.4.8 全鲁棒滑模变结构控制	11
1.4.9 滑模观测器的研究	12
1.4.10 神经滑模变结构控制	12
1.4.11 模糊滑模变结构控制	13
1.4.12 积分滑模变结构控制	13
1.5 滑模变结构控制应用	13
1.5.1 在电机中的应用	13
1.5.2 在机器人控制中的应用	14
1.5.3 在飞行器控制中的应用	14
1.5.4 在倒立摆控制中的应用	14
1.5.5 在伺服系统中的应用	14
参考文献	15
第 2 章 连续时间系统滑模控制	22
2.1 滑动模态的存在和到达条件	22
2.2 等效控制及滑动模态方程	22
2.2.1 等效控制	22
2.2.2 滑动模态运动方程	23
2.3 滑模变结构控制匹配条件及不变性	23
2.4 滑模控制器设计基本方法	24
2.5 基于比例切换函数的滑模控制	25

2.5.1	控制器设计方法	25
2.5.2	仿真实例	25
2.6	台车式倒立摆的滑模控制	30
2.6.1	台车式倒立摆模型	30
2.6.2	滑模控制器设计	31
2.6.3	仿真实例	31
2.7	用趋近律方法设计滑模控制器	35
2.7.1	几种典型的趋近律	35
2.7.2	基于趋近律的滑模控制	36
2.7.3	基于趋近律的位置跟踪	40
2.8	准滑动模态控制	44
2.8.1	准滑动模态控制原理	44
2.8.2	仿真实例	45
2.9	滑模控制在低速摩擦伺服系统中的应用	50
2.9.1	伺服系统摩擦模型	50
2.9.2	一个典型伺服系统描述	51
2.9.3	滑模控制器设计	52
2.9.4	仿真实例	52
2.10	一种基于上下界的滑模控制器设计	59
2.10.1	系统描述	59
2.10.2	滑模控制器设计	59
2.10.3	仿真实例	60
	参考文献	64
第3章	离散时间系统滑模控制	65
3.1	离散滑模控制描述	65
3.2	离散时间滑模控制的特性	65
3.2.1	准滑动模态	65
3.2.2	离散滑模的存在性和可达性	66
3.2.3	离散滑模控制的不变性	66
3.3	基于趋近律的离散滑模控制	67
3.3.1	离散趋近律的设计	67
3.3.2	离散控制律的设计	68
3.3.3	仿真实例	68
3.4	基于等效控制的离散滑模控制	71
3.4.1	控制器设计	71
3.4.2	仿真实例	73
3.4.3	位置跟踪控制器的设计	75
3.4.4	仿真实例	77

3.5	基于趋近律的离散滑模控制位置跟踪	81
3.5.1	控制器设计	81
3.5.2	仿真实例	82
3.6	基于滤波器的趋近律滑模控制	88
3.6.1	Kalman 滤波器的设计	88
3.6.2	仿真实例	89
3.7	基于变速趋近律的滑模控制	93
3.7.1	变速趋近律及控制	93
3.7.2	基于组合趋近律的控制	95
3.7.3	仿真实例	96
3.8	自适应离散滑模控制	101
3.8.1	离散指数趋近律控制的抖振分析	101
3.8.2	自适应滑模控制器的设计	102
3.8.3	仿真实例	103
	参考文献	108
第 4 章	模糊滑模控制	109
4.1	常规模糊滑模控制	109
4.1.1	基本原理	109
4.1.2	模糊滑模控制器的设计	109
4.1.3	仿真实例	111
4.2	基于模糊自适应调节的滑模控制	117
4.2.1	模糊自适应调节原理	117
4.2.2	仿真实例	117
4.3	基于模糊切换增益调节的滑模控制	123
4.3.1	系统描述	123
4.3.2	滑模控制器设计	123
4.3.3	模糊控制器设计	124
4.3.4	仿真实例	126
4.4	基于等效控制的模糊滑模控制	141
4.4.1	系统描述	141
4.4.2	滑模控制器设计	141
4.4.3	模糊控制器设计	142
4.4.4	仿真实例	143
4.5	基于线性化反馈的自适应模糊滑模控制	150
4.5.1	线性化反馈方法	150
4.5.2	滑模控制器设计	151
4.5.3	自适应模糊滑模控制器设计	151
4.5.4	仿真实例	153

4.6	基于切换模糊化的自适应模糊滑模控制	161
4.6.1	系统描述	162
4.6.2	自适应模糊滑模控制器设计	162
4.6.3	仿真实例	164
4.7	具有积分滑模面的模糊自适应滑模控制	171
4.7.1	系统描述	171
4.7.2	模糊控制器的设计	172
4.7.3	仿真实例	172
4.8	自适应模糊滑模控制	179
4.8.1	控制器设计	179
4.8.2	自适应控制算法设计	179
4.8.3	仿真实例	181
	参考文献	187
第 5 章	神经滑模控制	188
5.1	RBF 神经网络逼近	188
5.1.1	网络结构	188
5.1.2	逼近算法	188
5.1.3	仿真实例	189
5.2	基于 RBF 神经网络的等效滑模控制	196
5.2.1	系统描述	196
5.2.2	等效控制器设计	196
5.2.3	神经滑模控制器设计	197
5.2.4	仿真实例	198
5.3	RBF 神经滑模控制	202
5.3.1	控制器设计	202
5.3.2	仿真实例	203
5.4	基于 RBF 网络上界自适应学习的滑模控制	207
5.4.1	系统描述	207
5.4.2	控制器的设计	208
5.4.3	仿真实例	211
5.5	基于线性化反馈的神经网络滑模控制	217
5.5.1	线性化反馈方法	217
5.5.2	滑模控制器的设计	218
5.5.3	自适应神经滑模控制器的设计	218
5.5.4	仿真实例	220
5.6	基于 RBF 网络切换增益调节的滑模控制	226
5.6.1	系统描述	227
5.6.2	固定增益滑模控制器的设计	227

5.6.3 基于 RBF 网络的增益调节	228
5.6.4 仿真实例	229
参考文献	235
第 6 章 基于反演设计的滑模控制	236
6.1 一种简单反演控制器的设计	236
6.1.1 基本原理	236
6.1.2 仿真实例	237
6.2 自适应反演滑模控制	240
6.2.1 系统描述	240
6.2.2 Backstepping 滑模控制器的设计	241
6.2.3 仿真实例	242
6.2.4 自适应 Backstepping 滑模控制器的设计	246
6.2.5 仿真实例	247
6.3 基于名义模型的反演滑模控制	251
6.3.1 系统描述	251
6.3.2 控制系统结构	252
6.3.3 名义模型 Backstepping 控制器的设计	252
6.3.4 实际对象全局滑模控制器的设计	253
6.3.5 仿真实例	255
6.4 移动机器人的滑模轨迹跟踪控制	262
6.4.1 移动机器人运动学模型	262
6.4.2 切换函数的设计	264
6.4.3 滑模控制器设计	264
6.4.4 仿真实例	265
6.5 一种简单的移动机器人变结构控制	276
6.5.1 控制器设计	276
6.5.2 稳定性分析	276
6.5.3 仿真实例	276
参考文献	278
第 7 章 动态滑模控制	279
7.1 一阶动态滑模控制	279
7.1.1 控制器的设计	279
7.1.2 仿真实例	279
7.2 基于动态切换函数的动态滑模控制	283
7.2.1 控制器的设计	283
7.2.2 仿真实例	285
7.3 基于反演设计的自适应动态滑模控制	289

7.3.1	常规自适应滑模控制器	289
7.3.2	仿真实例	289
7.3.3	反演自适应动态滑模控制	292
7.3.4	仿真实例	294
7.3.5	新型反演自适应动态滑模控制	298
7.3.6	仿真实例	298
	参考文献	302
第 8 章	基于干扰估计的滑模控制	303
8.1	一种简单滑模观测器的设计	303
8.1.1	系统描述	303
8.1.2	仿真实例	303
8.2	基于干扰观测器的连续滑模控制	304
8.2.1	系统描述	305
8.2.2	常规滑模控制器	305
8.2.3	带干扰观测器的滑模控制器	306
8.2.4	仿真实例	307
8.3	基于干扰观测器的离散滑模控制	313
8.3.1	系统描述	313
8.3.2	基于干扰观测器的离散滑模控制器	313
8.3.3	稳定性分析	314
8.3.4	仿真实例	316
8.3.5	基于饱和函数的控制器	319
8.3.6	稳定性分析	320
8.3.7	仿真实例	321
8.4	灰色滑模控制	324
8.4.1	系统描述	325
8.4.2	灰色滑模控制器的设计	325
8.4.3	仿真实例	326
	参考文献	332
第 9 章	Terminal 滑模控制	333
9.1	一种高阶 MIMO 非线性系统的 Terminal 滑模控制	333
9.1.1	系统描述	333
9.1.2	Terminal 滑模控制器设计	333
9.1.3	仿真实例之一: SISO 系统的 Terminal 滑模控制	336
9.1.4	仿真实例之二: MIMO 系统的 Terminal 滑模控制	343
9.2	动态 Terminal 滑模控制	352
9.2.1	系统描述	352

9.2.2	动态 Terminal 滑模控制器的设计	352
9.2.3	仿真实例	355
9.3	快速 Terminal 滑模控制器的设计	360
9.3.1	快速 Terminal 滑模的设计	360
9.3.2	全局快速滑模控制器的设计	362
9.3.3	全局快速滑模到达时间及稳定性分析	363
9.3.4	仿真实例	364
9.3.5	位置跟踪控制器的设计	368
9.3.6	仿真实例	368
9.3.7	具有鲁棒性的全局快速滑模控制	372
9.3.8	仿真实例	374
9.4	非奇异 Terminal 滑模控制	379
9.4.1	普通 Terminal 滑模控制	379
9.4.2	非奇异 Terminal 滑模控制器的设计	380
9.4.3	仿真实例	381
9.4.4	刚性机器人非奇异 Terminal 滑模控制	386
9.4.5	仿真实例	388
	参考文献	396
第 10 章	几种新型滑模控制	397
10.1	二阶不确定系统的全局滑模控制	397
10.1.1	系统描述	397
10.1.2	全局滑模切换函数设计	397
10.1.3	控制器设计	398
10.1.4	稳定性分析	398
10.1.5	仿真实例	399
10.2	N 阶不确定系统的全局滑模控制	403
10.2.1	系统描述	403
10.2.2	控制器设计	403
10.2.3	稳定性分析	404
10.2.4	仿真实例	408
10.3	基于滤波器的机器人滑模控制	414
10.3.1	机器人动态方程	414
10.3.2	滑模控制器的设计	414
10.3.3	仿真实例之一	416
10.3.4	仿真实例之二	420
10.4	一种基于积分切换函数的自适应滑模控制	427
10.4.1	系统描述	427
10.4.2	积分型切换函数的设计	427

10.4.3	滑模控制器的设计·····	428
10.4.4	仿真实例·····	428
10.4.5	自适应滑模控制器的设计·····	431
10.4.6	仿真实例·····	432
10.5	基于积分型切换增益的滑模控制·····	436
10.5.1	系统描述·····	436
10.5.2	常规滑模控制器的设计·····	436
10.5.3	具有积分型切换增益的滑模控制器·····	437
10.5.4	仿真实例·····	438
10.6	模型参考滑模控制·····	445
10.6.1	系统描述·····	445
10.6.2	滑模控制器设计·····	446
10.6.3	仿真实例·····	446
	参考文献·····	452

第 1 章 绪 论

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 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时具有不变性,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,其基本研究对象为二阶线性系统。

(2) 1962—1970 年

60 年代的学者开始针对高阶线性系统进行研究,但仍然限于单输入、单输出系统。主要讨论了高阶线性系统在线性切换函数下控制受限与不受限及二次型切换函数的情况。

(3) 1970 年以后

在线性空间上研究线性系统的变结构控制。主要结论为变结构控制对摄动及干扰具有不变性。1977 年, V. I. Utkin 发表了一篇有关变结构控制方面的综述论文^[1],提出了滑模变结构控制 VSC 和滑模控制 SMC 的方法。此后,各国学者对变结构控制的研究兴趣急剧上升,开始研究多维变结构系统和多维滑动模态,对变结构控制系统的研究由规范空间扩展到更一般的状态空间。K. D. Young 等^[2]从工程的角度,对滑模控制进行了全面的分析,并

对滑模控制所产生的抖振进行了精确的分析和评估,针对连续系统中的抑制抖振给出了七种解决方法,并针对离散系统在三种情况下的滑模设计进行了分析,为滑模控制在工程上的应用提供了有益的指导。

对变结构控制的研究大多集中在滑动模态上,而对进入切换面之前的运动,即正常的运动段研究较少。中国学者高为炳院士等^[3]首先提出了趋近律的概念,列举了诸如等速趋近律、指数趋近律、幂次趋近律直到一般趋近律,高氏等还首次提出了自由递阶的概念。

在解决十分复杂的非线性系统的综合问题时,变结构系统理论作为一种综合方法得到重视。但是滑模变结构对系统的参数摄动和外部干扰的不变性是以控制量的高频抖振换取的,由于在实际应用中,这种高频抖振在理论上是无限快的,没有任何执行机构能够实现;同时,这样的高频输入很容易激发系统的未建模特性,从而影响系统的控制性能。因而抖振现象给变结构控制在实际系统中的应用带来了困难。

由于人们认识到变结构系统中的滑动模态具有不变性,这种理想的鲁棒性对工程应用也是很有吸引力的。高精度伺服系统存在着许多不利于控制系统设计的因素,如非线性因素、外干扰及参数摄动等。由于离散滑模变结构控制自身的缺点,将其直接应用到高精度的伺服系统中将会有一定的困难,因为控制输出的高频抖振会损坏伺服系统中的电机和其他设备。要将离散滑模变结构控制应用到伺服系统中,使其真正发挥它的强鲁棒性,必须对传统的离散滑模变结构控制进行改进,并针对抖振现象改进离散滑模控制器,将有害的抖振减小到一定程度,并且又要保证滑模控制的不变性。因此,对传统的离散滑模变结构控制的改进、抖振的削弱成为研究的重点。

1.3 滑模变结构控制基本原理

滑模变结构控制是变结构控制系统的一种控制策略。这种控制策略与常规控制的根本区别在于控制的不连续性,即一种使系统“结构”随时间变化的开关特性。该控制特性可以迫使系统在一定特性下沿规定的状态轨迹作小幅度、高频率的上下运动,即所谓的“滑动模态”或“滑模”运动。这种滑动模态是可以设计的,且与系统的参数及扰动无关。这样,处于滑模运动的系统就具有很好的鲁棒性。

滑动模态控制的概念和特性如下:

(1) 滑动模态定义及数学表达

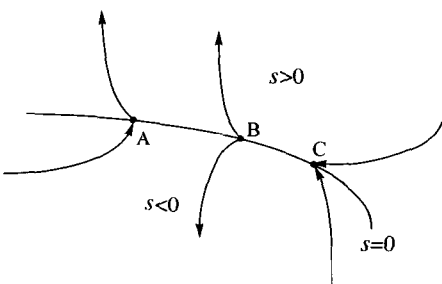


图 1-1 切换面上三种点的特性

考虑一般的情况,在系统

$$\dot{x} = f(x) \quad x \in \mathbf{R}^n \quad (1.1)$$

的状态空间中,有一个切换面 $s(x) = s(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$,它将状态空间分成上下两部分 $s > 0$ 及 $s < 0$ 。在切换面上的运动点有三种情况,如图 1-1 所示。

通常点——系统运动点运动到切换面 $s = 0$ 附近时,穿越此点而过(点 A);

起始点——系统运动点到达切换面 $s = 0$ 附

近时,从切换面的两边离开该点(点 B);

终止点——系统运动点到达切换面 $s=0$ 附近时,从切换面的两边趋向于该点(点 C)。

在滑模变结构中,通常点与起始点无多大意义,而终止点却有特殊的含义。因为如果在切换面上某一区域内所有的运动点都是终止点,则一旦运动点趋近于该区域,就会被“吸引”到该区域内运动。此时,称在切换面 $s=0$ 上所有的运动点都是终止点的区域为“滑动模态”区,或简称为“滑模”区。系统在滑模区中的运动就叫做“滑模运动”。

按照滑动模态区上的运动点都必须满足终止点这一要求,当运动点到达切换面 $s(x)=0$ 附近时,必有

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} \leq 0 \quad \text{及} \quad \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s} \geq 0 \quad (1.2)$$

或者

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} \leq 0 \leq \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s} \quad (1.3)$$

式(1.3)也可写成

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \dot{s} \leq 0 \quad (1.4)$$

此不等式对系统提出了一个形如

$$v(x_1, x_2, \dots, x_n) = [s(x_1, x_2, \dots, x_n)]^2 \quad (1.5)$$

的李雅普诺夫(Lyapunov)函数的必要条件。由于在切换面邻域内函数式(1.5)是正定的,而按照式(1.4), s^2 的导数是负半定的,也就是说在 $s=0$ 附近 v 是一个非增函数,因此,如果满足条件式(1.4),则式(1.5)是系统的一个条件李雅普诺夫函数。系统本身也就稳定于条件 $s=0$ 。

(2) 滑模变结构控制的定义

滑模变结构控制的基本问题如下:

设有一控制系统

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad x \in \mathbf{R}^n, u \in \mathbf{R}^m, t \in \mathbf{R} \quad (1.6)$$

需要确定切换函数

$$s(x), \quad s \in \mathbf{R}^m \quad (1.7)$$

求解控制函数

$$u = \begin{cases} u^+(x) & s(x) > 0 \\ u^-(x) & s(x) < 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

其中, $u^+(x) \neq u^-(x)$, 使得

- ① 滑动模态存在, 即式(1.8)成立;
- ② 满足可达性条件, 在切换面 $s(x)=0$ 以外的运动点都将于有限的时间内到达切换面;
- ③ 保证滑模运动的稳定性;
- ④ 达到控制系统的动态品质要求。

上面的前三点是滑模变结构控制的三个基本问题, 只有满足了这三个条件的控制才叫滑模变结构控制。

1.4 滑模变结构控制理论的研究方向

1.4.1 滑模变结构控制系统的抖振问题

从理论角度上讲,在一定意义上,由于滑动模态可以按需要设计,而且系统的滑模运动与控制对象的参数变化和系统的外界干扰无关,因此滑模变结构控制系统的鲁棒性要比一般常规的连续系统强。然而,滑模变结构控制在本质上的不连续开关特性将会引起系统的抖振。

对于一个理想的滑模变结构控制系统,假设“结构”切换的过程具有理想开关特性(即无时间和空间滞后),系统状态测量精确无误,控制量不受限制,则滑动模态总是降维的光滑运动而且渐近稳定于原点,不会出现抖振。但是对于一个现实的滑模变结构控制系统,这些假设是不可能完全成立的。特别是对于离散系统的滑模变结构控制系统,都将会在光滑的滑模面上叠加一个锯齿形的轨迹。于是,在实际系统中,抖振是必定存在的,而且若消除了抖振,也就消除了变结构控制的抗扰动和抗扰动的能力,因此,消除抖振是不可能的,只能在一定程度上削弱它。抖振问题成为变结构控制在实际系统中应用的突出障碍。

抖振产生的主要原因有:

(1) 时间滞后开关

在切换面附近,由于开关的时间滞后,控制作用对状态的准确变化被延迟一定的时间;又因为控制量的幅度是随着状态量的幅度逐渐减少的,所以表现为在光滑的滑模面上叠加一个衰减的三角波。

(2) 空间滞后开关

开关的空间滞后相当于在状态空间中存在一个状态量变化的“死区”。因此,其结果是在光滑的滑模面上叠加了一个等幅波形。

(3) 系统惯性的影响

由于任何物理系统的能量不可能无限大,因而系统的控制力也不能无限大,这就使系统的加速度有限;另外,系统惯性总是存在的,所以使得控制切换伴有滞后,这种滞后与时间滞后效果相同。

(4) 离散系统本身造成的抖振

离散系统的滑动模态是一种“准滑动模态”,它的切换动作不是正好发生在切换面上,而是发生在以原点为顶点的一个锥形体的表面上。因此有衰减的抖振,而且锥形体越大,抖振幅度越大。该锥形体的大小与采样周期有关。

总之,抖振产生的原因在于:当系统的轨迹到达切换面时,其速度是有限大,惯性使运动点穿越切换面,从而最终形成抖振,叠加在理想的滑动模态上。对于实际的计算机采样系统而言,计算机的高速逻辑转换以及高精度的数值运算使得切换开关本身的时间及空间滞后影响几乎不存在,因此,开关的切换动作所造成的控制的不连续性是抖振发生的根本原因。

在实际系统中,由于时间滞后开关、空间滞后开关、系统惯性、系统延迟及测量误差等因