

# 滑模变结构控制

——量化反馈控制方法

郑柏超 郝立颖/著

Sliding Mode Variable Structure Control:  
Quantized Feedback Control Method



科学出版社

# 滑模变结构控制

## ——量化反馈控制方法

郑柏超 郝立颖 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书主要阐述量化反馈的滑模变结构控制及容错控制设计的基本内容和方法,介绍国内外相关领域的最新研究成果。本书主要内容:线性不确定系统的鲁棒量化反馈镇定、基于滑动扇区方法的量化状态反馈变结构控制、基于切换滑模变结构控制的平面系统量化反馈镇定、线性系统的量化状态及输出反馈滑模容错控制设计。

本书可作为高等院校控制理论与控制工程及相关专业的研究生教材,也可作为从事量化控制和滑模变结构控制研究的科研人员参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

滑模变结构控制: 量化反馈控制方法/郑柏超, 郝立颖著. —北京: 科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-050306-0

I. ①滑… II. ①郑…②郝… III. ①变结构控制—反馈控制—控制方法 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 258103 号

责任编辑: 张 震 姜 红 / 责任校对: 李 影  
责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 无极书装

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 11 月 第 一 版 开本: 720×1000 1/16  
2017 年 1 月 第 二 次 印 刷 印张: 8 7/8

字数: 180 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

滑模变结构控制理论起源于 20 世纪 50 年代末, 经学术界与工程界半个多世纪的不懈努力, 已发展成为一个比较独立、完整的理论体系。特别地, 滑模变结构控制技术因对模型不确定性、外部扰动等拥有良好的鲁棒特性, 20 世纪 80 年代后期开始被广泛应用于机器人系统、飞行控制系统、电机系统及伺服系统等各类工程系统的控制中。

在当今这个网络化、数字化时代, 网络化系统因具有成本低、安装简便、易维护、灵活性强等优点, 极大地改变了传统控制系统布线成本高、不易扩展等弊端, 在航空航天、设备制造、过程控制、远程医疗、危险及特殊复杂环境等领域获得了广泛应用。特别值得关注的是, 网络的引入在给控制实现提供方便的同时, 也给控制领域带来了许多新的问题与挑战。例如, 在水下通信控制系统中, 传输介质的有限传输能力对闭环系统稳定性与性能的影响变得不再可以忽略; 又如, 在较为复杂的网络控制系统中, 往往需要通过一个共享网络将地理空间中广泛分布的网络节点上的数据进行交换, 而公共网络的有限传输能力时常会导致网络阻塞现象的发生, 从而会对在线控制产生巨大影响。信号量化是上述网络化系统控制设计需要考虑的重要方面之一。

本书针对变结构控制, 特别是滑模变结构控制理论设计中的量化问题展开研究。结合构造量化器参数的调节策略, 提出一套量化反馈变结构控制及容错控制理论。本书的主要结果均通过严格的数学理论推导给出证明, 并结合算例进行仿真验证, 是变结构控制理论在网络化时代的发展。

本书的写作是在我的博士指导教师, 东北大学信息科学与工程学院杨光红教授的悉心指导下完成的。杨光红教授知识渊博、科研功底深厚, 为本书的编写提出了许多指导性与建设性的意见, 在此向他表示深深的感谢与敬意。

本书的出版得到国家自然科学基金项目 (项目编号: 61403207、61503055、61573189)、江苏省自然科学基金项目 (项目编号: BK20131000)、中国博士后基金项目 (项目编号: 2015M580380、2015M571291)、江苏省博士后基金项目 (项目编号: 1501041B)、江苏省高校优秀科技创新团队计划基金项目——微网智能控制、东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室开放课题基金项目

(项目编号: MCCSE2016A02)、辽宁省博士启动基金(项目编号: 201501184)、辽宁省教育厅科学技术一般项目(项目编号: L2014277)、浙江海洋大学“海洋科学”省重中之重学科开放课题(项目编号: 20140103)等的资助。

在本书即将出版之际,衷心感谢我的父母、妻子与女儿一直以来的无私关爱和鼎力支持!向所有关心、帮助和支持我的各位师长、朋友和同学表示最崇高的敬意!在撰写本书的过程中,我参考了相关的书籍资料与文献,在此向这些书籍资料和文献的作者表示感谢!

由于作者水平有限,书中难免有不妥和疏漏之处,若蒙读者不吝告知,将不胜感激。

郑柏超

2016年5月20日

# 目 录

## 前言

1 绪论	1
1.1 量化控制问题	2
1.2 变结构控制问题	4
1.2.1 滑模面设计的研究	4
1.2.2 抖振问题的研究	5
1.2.3 变结构控制的工程应用	5
1.3 容错控制问题	5
1.3.1 容错控制的基本概念	5
1.3.2 容错控制研究现状及主要研究方法	6
1.4 本书的主要内容	7
2 预备知识	9
2.1 滑模变结构控制概念与性质	9
2.1.1 滑动模态	9
2.1.2 到达条件的设计	11
2.1.3 滑模变结构控制的性质	11
2.2 一些引理	12
2.3 本书中使用的符号	15
3 一类单输入线性不确定系统的鲁棒量化反馈镇定	16
3.1 引言	16
3.2 问题描述	17
3.3 鲁棒量化反馈滑模变结构控制设计	18
3.4 仿真算例	25
3.5 本章小结	30

4	基于滑动扇区方法的量化状态反馈变结构控制	31
4.1	引言	31
4.2	问题描述	31
4.2.1	PR-滑动扇区	32
4.2.2	量化参数的调节策略	33
4.3	主要结果	33
4.3.1	量化反馈变结构控制设计	33
4.3.2	鲁棒量化反馈控制器设计	38
4.4	仿真算例	46
4.5	本章小结	49
5	基于切换滑模变结构控制的平面系统量化反馈镇定	50
5.1	引言	50
5.2	问题描述	51
5.3	基于切换滑模变结构量化反馈控制设计	52
5.3.1	变量 $\sigma$ 的切换逻辑	54
5.3.2	量化参数 $\mu$ 的静态调节策略	55
5.3.3	控制器设计	57
5.4	仿真算例	59
5.5	本章小结	62
6	一类多输入线性系统量化反馈变结构控制设计	63
6.1	引言	63
6.2	问题描述	63
6.3	主要结果	65
6.3.1	滑模面设计	65
6.3.2	控制器设计	66
6.4	仿真算例	73
6.5	本章小结	76
7	线性不确定系统量化状态反馈滑模容错控制	77
7.1	引言	77
7.2	问题描述	77

7.2.1	量化器模型	78
7.2.2	故障模型	78
7.2.3	问题描述	79
7.3	主要结果	79
7.3.1	滑模面设计	79
7.3.2	滑模变结构控制器设计	81
7.4	仿真算例	91
7.5	本章小结	95
8	<b>线性不确定系统的滑模量化输出反馈容错控制</b>	<b>96</b>
8.1	引言	96
8.2	问题描述	96
8.2.1	量化器模型	97
8.2.2	故障模型	98
8.2.3	基于补偿器的滑模变结构控制器	98
8.2.4	问题描述	99
8.3	主要结果	100
8.3.1	滑模面设计	100
8.3.2	滑模变结构控制器设计	103
8.4	仿真算例	113
8.5	本章小结	118
	参考文献	119



# 1 绪论

近年来，由于大量低成本、高性能的数字计算机及数字通信设施，如通信网络等在实际工程中的广泛而深入的应用，控制系统的控制方式呈现由传统的模拟控制方式向数字控制方式转变的趋势。与传统控制方式相比，这些信息处理设施的应用给现代控制带来了无可比拟的优点，如成本低、装配简单、操作方便、安全性能高及便于远程操作等。然而，这些信息处理设施的使用也不可避免地带来了一些问题，如数字计算机本身存在字长有限等精度问题，通信网络则往往受到通信带宽、有限数据率等的困扰。因此，信号量化问题成为这些方面研究的核心问题之一。随着数字计算机与数字通信设施应用领域的不断拓宽，特别是在一些高精尖领域，如军事、医疗、航空航天等的应用，信号量化对系统性能的影响不可忽视。控制系统中信号量化问题的研究已经引起国内外众多控制领域学者与专家的关注。早在 20 世纪 50 年代，控制界就开始注意并分析量化现象导致的系统行为变化问题，如在 1956 年，Kalman 在研究采样时间系统时发现：当系统中存在量化现象时，闭环系统会呈现极限环行为或混沌现象<sup>[1]</sup>。在 20 世纪 60 年代至 80 年代前期，随着数学上随机理论的发展，控制界的学者将随机的理念引入量化问题的研究中。他们通常将量化看成一个精确的变量与一个扰动量的叠加，并将这个扰动量（量化误差）看成一个随机变量，如满足均匀分布的白噪声等<sup>[2, 3]</sup>。这一处理方式具有一定的精度，并能很好地避免将量化器当成非线性环节处理的复杂度。20 世纪 90 年代初，Delchamps 在文献[4]中研究量化控制问题时提出真正的数字量化不应仅仅看成系统测量的近似，以及在控制系统的设计过程中可以明确考虑量化的问题，即控制设计可以使用系统的量化信息等。正是这一与传统理念完全不同的处理方式，开辟了量化问题研究的新途径。随着控制界对量化现象认识的不断加强，以及更好的数学工具的使用，量化控制问题的研究呈现非常诱人的态势。自 20 世纪末至今，量化控制问题的研究取得了一系列突破性的研究成果。如著名控制理论专家、IEEE Fellow Brockett 与 Liberzon 在文献[5]中最早研究量化饱和限制的动态量化器的量化参数调节问题，给出时间切换的量化参

数的调节策略，通过调节能够实现闭环系统渐近稳定。随后，Liberzon 将结果进一步推广到连续时间非线性系统上<sup>[6]</sup>。Elia 与 Mitter 在文献[7]中针对单输入离散时间线性系统研究量化反馈二次镇定问题，指出对数量化器是拥有最小量化密度的量化器。紧随其后，澳大利亚纽卡索大学著名学者、IEEE Fellow 付敏跃教授与新加坡南洋理工大学著名学者、IEEE Fellow 谢立华教授合作将上述结论推广到多输入离散时间系统上<sup>[8]</sup>。这些成果的出现激起了控制界对量化问题研究的更大热情。这时期量化系统的研究涵盖连续时间线性系统<sup>[5]</sup>、离散时间线性系统<sup>[7-17]</sup>、非线性系统的量化控制问题<sup>[18-22]</sup>、采样时间系统<sup>[23-26]</sup>及网络控制系统<sup>[27-39]</sup>等。尽管目前量化控制问题的研究已经取得了相当丰富的成果，然而，仍然存在大量亟待解决的问题，如目前所考虑的系统模型过于简单化、理想化，大多数成果都是针对标称系统的，而少有研究带有模型不确定性系统的量化反馈控制问题，特别是采用变结构控制技术的研究成果鲜有发表。实际系统中存在着各种不确定因素，如建模误差、系统内部结构和参数的变化、外部扰动等，使得对带有模型不确定性及外部干扰的系统的量化控制研究更具实际意义。

因此，本书针对带有模型不确定性与外部扰动的系统，通过采用系统的量化信息比较深入地研究滑模变结构控制与容错控制设计问题。选题具有重要的理论意义与工程应用价值，下面对这个主题做简要综述。

## 1.1 量化控制问题

量化的过程可以认为是编码的过程，这个过程是通过量化器来实现的。量化器可以看成一种装置，能够将集合中的连续信号映射到一个子集中并取分段常值的信号。量化器也可以看成一个编码器，当模拟信号到达数字处理器时，处理器按照一定的编码模式，在保留其主要信息的前提下将其映射为有限精度的值。数字控制系统中的量化现象主要体现在两个方面：控制器本身的量化和反馈控制系统中被控对象与控制器之间连接通道中的信号量化。前者主要是由有限字长表示导致的计算误差与舍入误差，后者则主要包括模数转换（A/D）、数模转换（D/A）引起的量化，以及数字通信网络信号传输引起的量化现象等<sup>[40]</sup>。典型的量化反馈控制系统如图 1.1 所示。

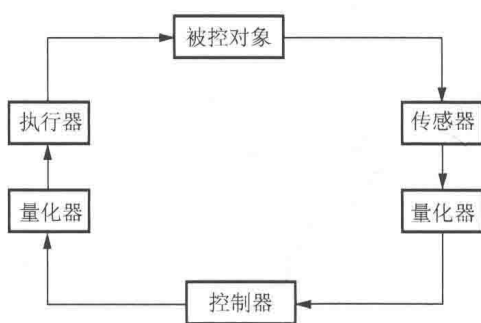


图 1.1 量化反馈控制系统结构图

数字控制系统中的量化现象主要体现在两个方面：控制器本身的量化和反馈控制系统中被控对象与控制器之间连接通道中的信号量化。前者主要是由有限字长表示导致的计算误差与舍入误差，后者则主要包括模数转换（A/D）、数模转换（D/A）引起的量化，以及数字通信网络信号传输引起的量化现象等<sup>[40]</sup>。典型的量化反馈控制系统如图 1.1 所示。

目前,对于量化控制理论的研究主要集中在以下几个方面。一是静态量化器下的控制问题<sup>[7-9, 41-45]</sup>,主要包括均匀量化器和对数量化器两种形式。均匀量化器便于工程实践但不能实现渐近稳定;对数量化器能够确保渐近稳定但难于在工程实践中实现,因为其需要无限的量化水平且量化不均匀,通常非均匀的量化方式在实践中都很难应用与实现。二是基于动态量化器的控制问题<sup>[5, 6, 46-55]</sup>,动态量化器的主要特点是其能够通过量化水平的调节增大量化器的量化范围,也能减小系统处于稳态时极限环的大小,甚至实现渐近稳定。与静态量化器相比,其控制效果更好但结构比较复杂。量化控制研究的第三个方面是最优量化器的设计问题。针对单输入单输出线性系统及多输入多输出线性系统,文献[7]与[8]分别在理论上证明了最粗糙(也称为最小量化密度)的量化器为对数量化器。特别地,文献[8]采用了扇形界方法,这一方法的优势在于能够将量化反馈控制设计问题转化为控制界熟悉的鲁棒控制问题。基于这一思想,一系列的研究成果不断发表<sup>[56-63]</sup>。此外,基于输入输出关系,文献[64]和文献[65]提出了对输出影响最小的最优量化器设计方法,其主要思想:在相同控制输入前提下,考虑输入-输出增益、误差-输出增益的定量指标,设计的量化器为对系统输出影响最小的量化器。目前,该方面的研究大多局限于离散时间标称系统且对系统附加了较强的限制条件。上述三个方面主要是针对量化器的设计问题。第四个方面是量化控制设计问题。文献[66]考虑输入量化和匹配不确定性的线性系统,对于给定的 $H_2$ 成本函数,给出状态反馈控制器设计方法,其中控制器结构包括线性部分和非线性部分:线性部分用于处理系统模型不确定性;而非线性部分用于解决匹配不确定性及输入量化带来的影响,最终获得渐近稳定。自适应控制方法在量化反馈控制设计中主要考虑线性离散时间系统与连续时间非线性系统<sup>[67, 68]</sup>。性能指标包括最小量化范围<sup>[69-72]</sup>、保成本控制<sup>[73]</sup>、 $H_\infty$ 控制<sup>[74, 75]</sup>等。此外,还有其他量化控制方向的研究成果,如编解码参数的非匹配性下的控制问题<sup>[76-78]</sup>、多智能体系统的量化控制问题<sup>[79]</sup>、量化控制中的一致性问题<sup>[80-84]</sup>等。尽管量化控制问题的研究已经取得了一些可喜的成果,目前仍然存在大量问题尚未得到很好的解决。其中,基于滑模变结构控制方法的量化反馈控制问题就是其中之一。迄今为止,基于滑模变结构控制技术的量化反馈控制设计问题的研究结果较少。较好的结果是文献[85]中针对带有匹配不确定性的单输入单输出线性系统给出的。文献[85]中采用时变滑模面设计的量化反馈变结构状态反馈控制器与输出反馈控制器仅能保证系统状态一致终极有界。如何设计不确定系统的量化反馈变结构控制策略使得系统渐近稳定是一个值得深入研究的课题,也是本书的重要内容之一。

## 1.2 变结构控制问题

变结构控制是控制系统的一种设计方法,广泛应用于线性与非线性系统问题的解决。经过半个多世纪的研究,变结构控制已成为一种非常重要的处理系统模型不确定性、复杂非线性、强耦合等的鲁棒控制技术。变结构控制的发展大致可分为如下几个阶段。第一阶段为变结构控制的初创时期,变结构控制理论的开创性工作主要是通过采用相平面法研究二阶系统来实现的,主要时间段是 1957~1962 年。1963 年至 20 世纪 70 年代中期为变结构控制发展的第二阶段,这一时期主要研究采用常微分方程表示的高阶线性系统。上述两个阶段的研究主要是由苏联的数学家与控制领域专家完成的。第三阶段一般被人们认为始于 1976 年 Itkis 出版的英文专著<sup>[86]</sup>及 Utkin 于 1977 年发表的英文综述<sup>[87]</sup>。在这一时期,变结构控制以其独特的优点与特性引起大批西方学者的研究兴趣,取得了丰硕的理论成果<sup>[88-91]</sup>。我国已故著名控制理论专家、中国科学院院士高为炳先生及其合作者在这一时期为变结构控制的发展做出了突出的贡献,如提出了变结构控制的趋近律方法。趋近律形式主要包括等速趋近律、指数趋近律、幂次趋近律及一般趋近律等<sup>[92]</sup>。随着控制界对变结构控制研究的日益深入,对滑模变结构在滑动模态阶段对参数摄动及外部扰动具有不变性的认识的加深,滑模变结构控制开始在世界范围内受到控制领域工作者的广泛关注,并作为一种系统的综合方法被推广到控制系统的各个分支中,如非线性系统、自适应系统、大系统、分布参数系统、时滞系统、随机系统、马尔科夫跳变系统等<sup>[93-102]</sup>。滑模变结构控制的基本问题体现在下面两个设计过程中:①滑动模态阶段,通过设计适当的滑模函数,使系统在滑模面上的运动具有良好的动态特性;②到达阶段,设计变结构控制律使得自状态空间任一点出发的系统状态都能够在有限时间内到达并保持在滑模面上。第一个阶段的问题通常称为存在性问题,第二个阶段问题的回答则需要通过研究滑动模态的到达条件来获得。当前变结构控制的研究主要集中在如下几个方面。

### 1.2.1 滑模面设计的研究

这方面的研究主要是提出不同的切换面、采用不同的技术进行滑模面的设计。如高阶滑模面的设计<sup>[103,104]</sup>、积分型滑模面的设计<sup>[98]</sup>、时变滑模面的设计<sup>[85,105]</sup>、终端滑模面的设计<sup>[106,107]</sup>等。不同类型的滑模面既有优点又不可避免地带有局限性。如高阶滑模面的设计的主要优点在于能够很好地避免采用传统的线性滑模面

设计的控制器导致的抖振现象,其主要不足在于滑模面本身的设计过程及控制律的构造复杂、不方便工程应用等。

### 1.2.2 抖振问题的研究

变结构控制的最大缺点在于可能导致抖振现象的发生,进而会造成对执行器硬件的损伤与破坏。这个问题伴随着变结构控制的每一个发展阶段,一直以来都困扰着变结构控制领域的专家学者。抖振问题的研究主要集中在以下两点:一是从滑模流形入手,给出一些具有避免抖振或降低抖振的滑模流形的设计方法,如高阶滑模面的设计、积分滑模面的设计、时变滑模面的设计等,此外,文献[108]~文献[110]提出的滑动扇区方法给出变结构控制的无抖振的控制器设计方法;二是变结构控制器的设计,即如何设计控制器使其在系统轨迹到达切换面附近时不会出现系统结构的突变,通常文献中大多采用连续化的方法来解决该问题,如饱和函数法、边界层方法等<sup>[111, 112]</sup>。文献[113]通过仿真比较验证了上述连续化方法在本质上是一致的。此外,通过与新兴的控制理论,如智能控制中的模糊控制、神经网络控制技术的结合进行抖振问题的研究也是很好的思路。

### 1.2.3 变结构控制的工程应用

变结构控制已经在很多工程实践中得到了应用,飞行控制、发动机控制、机器人控制、电机控制、伺服系统等是变结构控制开展较早也是比较成熟的应用领域<sup>[106, 114-118]</sup>。21世纪以来,变结构控制在一些军事领域如导弹制导等方面也得到了应用并取得了显著的效果<sup>[119]</sup>。如上所述,变结构控制历经半个多世纪的研究,取得了一系列重要的理论研究成果,并在很多工程领域中得到了很好的应用。

## 1.3 容错控制问题

### 1.3.1 容错控制的基本概念

容错原本是计算机系统设计技术中的一个概念,指系统在遭受内部环节的局部故障或失效后,仍然可以正常运行的特性。将此概念引入控制系统,产生了容错控制的概念。1971年,Niederlinski提出完整性控制(integral control)的概念<sup>[120]</sup>,将容错控制思想引入控制系统,形成了容错控制系统<sup>[121]</sup>。所谓的容错控制系统,就是在元部件(或分系统)出现故障时仍具有完成基本功能能力的系统,其科学意义就是要尽量保证动态系统在发生故障时仍然可以稳定运行,并具有可以接受

的性能指标。

近年来,国内外很多学者都在容错控制的理论研究和实践应用方面开展了卓有成效的工作,取得了大量的研究成果<sup>[121-135]</sup>。容错控制是一门应用型交叉学科,其理论基础涉及故障诊断、自适应控制、人工智能、现代控制理论、信号处理、数理统计、决策论、模式识别、最优化方法等各个学科的知识。如今,已有很多的容错控制技术被成功应用于航空航天、核电站、工业机器人及化工过程等领域的控制系统设计中,并且得到了很好的发展<sup>[136-140]</sup>。

### 1.3.2 容错控制研究现状及主要研究方法

一个控制系统能够容错的必要条件是系统中存在着冗余,即对执行器的容错需要执行驱动冗余,对传感器的容错需要存在传感测量冗余,对某元器件的容错则需要存在某元器件的功能的冗余。因此,容错控制系统设计的关键是如何预先设计并利用这些冗余来达到容忍故障的目的。容错控制的方案按不同的特征分为硬件冗余和解析冗余的容错控制;按系统分为线性系统和非线性系统的容错控制、确定系统和不确定系统的容错控制;按故障位置的不同分为执行器故障、传感器故障、控制器故障和部件故障的容错控制。其中,最为常用的是按设计方法的特点来分类,即主动容错控制和被动容错控制,如今其已成为现代容错控制研究方法分类的依据,两者各有其特点,在实际系统中都有相关的应用。下面对容错控制技术的研究现状按照上述两大类方法进行概述。

#### 1.3.2.1 被动容错控制方法

被动容错控制的设计思想是针对预知故障设计一个固定控制器来确保闭环系统对故障不敏感,同时保持系统的稳定和性能,是一种相对简单的基于鲁棒控制技术的控制器设计方法。而鲁棒控制技术是20世纪70年发展起来的<sup>[141]</sup>,其主要用来解决系统中的参数摄动问题,以保证闭环系统的稳定性并具有较好的性能。如果把系统故障归结为系统参数摄动问题,根据鲁棒控制技术就可以设计容错控制策略。基于这种思想所设计的被动容错控制器的参数一般为常数,不需要获知故障信息,也不需要在线调整控制器的结构和参数。但这种策略的容错能力是有限的,其有效性依赖于原始无故障时系统的鲁棒性。被动容错控制大致可以分为可靠镇定<sup>[142-145]</sup>、同时镇定<sup>[146-149]</sup>、完整性<sup>[150-155]</sup>、可靠控制/鲁棒控制<sup>[133,135,156-168]</sup>等几种类型。

#### 1.3.2.2 主动容错控制方法

由于被动容错控制中的硬件冗余方式在许多实际控制系统中难以实现,且容错能力有限,利用系统中不同部件在功能上的冗余性来实现故障容错的解析冗余



就成为研究的焦点。而主动容错控制就可以利用可用资源和应用硬件冗余或解析冗余实现不期望故障的容错,通过故障调节或信号重构在线调节或重构控制器以保证故障发生后系统的稳定性和性能指标。因此,主动容错控制具有灵活性更大、容错能力更强的特点。目前,一部分主动容错控制需要故障诊断与隔离子系统提供准确的故障信息,而另一部分则不需要故障诊断与隔离子系统,但也需要获知各种故障信息<sup>[122]</sup>,这种故障信息也可以说是估计信息。因此,主动容错控制方法大体上也可以分为两大类,即故障诊断与隔离方法<sup>[143,169-173]</sup>和自适应方法<sup>[174-187]</sup>。其中,基于故障诊断与隔离方法的主动容错控制方法又可细分为控制律重新调度<sup>[143,169,170]</sup>和控制律重构<sup>[170-173]</sup>两类。

有关容错控制的详细研究方法,建议读者参阅科学出版社出版的作者的另外一部专著:《基于滑模技术的鲁棒与容错控制》(郝立颖,郑柏超著)。

## 1.4 本书的主要内容

本书的主要内容是不确定系统的量化反馈滑模变结构控制设计及容错控制设计。采用系统的量化状态或量化输出信息,结合构造的量化参数的静态调节策略,本书提出一套量化反馈滑模变结构控制及容错控制方案。本书主要结果均给出了相应的仿真例子进行验证,其中部分结果应用到了飞行器系统的仿真中,表明本书中结论的可行性与优越性。本书后续部分具体安排如下。

第2章为预备知识,介绍一些滑模变结构控制的基本概念与性质,并给出本书中使用的几个引理及一些数学符号。

第3章基于滑模变结构控制策略,研究一类单输入线性不确定系统的鲁棒量化反馈镇定问题。本章假设系统的状态信号及输入信号在经数字通信通道传输之前被量化。对于采用的动态量化器,本章给出可量化参数的一个静态调节策略。通过结合量化参数的调节,设计的滑模变结构控制方案能够确保系统状态到达并保持期望的滑模面上,改进已有成果中基于复杂的时变滑模面设计控制器却仅能保证状态轨迹到达切换面附近的问题而获得实际稳定的效果。仿真算例进一步验证本章设计方法的有效性与优越性。

第4章在第3章的基础上,进一步考虑一种基于滑动扇区方法的量化状态反馈变结构控制器设计方法。首先给出一种与滑动扇区有关的量化参数调节方案;然后设计量化反馈变结构控制律保证系统轨迹由状态空间的滑动扇区外进入内扇区,实现闭环系统的二次稳定而不发生抖振现象;最后通过给出的仿真算例进一步验证所提方法的有效性。

第5章研究带有量化饱和限制的平面系统量化反馈镇定问题, 给出一个新的基于切换方法的滑模变结构量化反馈控制器设计方法。首先, 通过引入切换线  $s_1(x)=0$  与  $s_2(x)=0$ , 给出一个由扇形区域构成的平面空间的划分, 然后在每个划分区间给出量化参数的调节策略。通过结合量化参数的调节, 本章提出的滑模变结构量化反馈控制器能够保证状态轨迹到达期望的切换线  $s_0(x)=0$ , 从而实现系统的全局鲁棒镇定。这样的设计方法既充分利用了滑模变结构控制能有效地克服系统的模型不确定性及外部扰动影响的优点, 又满足了量化饱和的要求。最后通过仿真例子结果比较进一步验证本章方法的有效性与优越性。

第6章考虑一类多输入线性系统的量化反馈变结构控制设计问题。与第3章、第4章中研究相比, 研究对象从仅包含匹配不确定性的单输入线性系统推广至包括匹配/非匹配不确定性的多输入线性系统, 并考虑了量化饱和的要求。

第7章研究的对象是带有量化现象的一类线性不确定系统, 提出了基于滑模状态反馈的容错控制方案。为了补偿量化误差, 在充分考虑故障信息的情况下, 给出动态量化器量化参数的调节范围, 并设计量化参数调节策略。为了增加设计的灵活性, 本章在输入矩阵满秩分解技术的基础上引入了一个参数, 与已有结果相比, 降低了设计的保守性并扩大了应用范围。结合量化参数的静态调节策略, 本章设计的滑模变结构控制律保证了闭环系统的渐近稳定性。

第8章在第7章的基础上, 进一步将结果推广到动态输出反馈的情形中。首先在带有参数调节的矩阵满秩分解技术的基础上, 给出由输出信息和补偿器状态构造的滑模面上滑动模态稳定的一个充分条件。在充分考虑故障信息的情况下, 给出量化器的量化范围并提出量化参数调节策略, 与已有结果相比, 降低了设计的保守性。根据滑模变结构控制理论, 本章设计的滑模容错控制器可以保证闭环系统的渐近稳定性并具有  $H_\infty$  性能指标。仿真结果验证本章提出方法的优越性。



# 2

## 预备知识

本章主要介绍一些预备知识。首先给出滑模变结构控制的相关概念、基本性质，其次列出后面的章节要用到的重要引理及符号说明。

### 2.1 滑模变结构控制概念与性质

#### 2.1.1 滑动模态

在系统

$$\dot{x} = f(t, x) \quad (2.1)$$

的状态空间中，有一个切换面  $s(x) = 0$ ，其将状态空间分成两部分： $s(x) > 0$  及  $s(x) < 0$ 。在切换面上的运动点有三种情况，如图 2.1 所示。

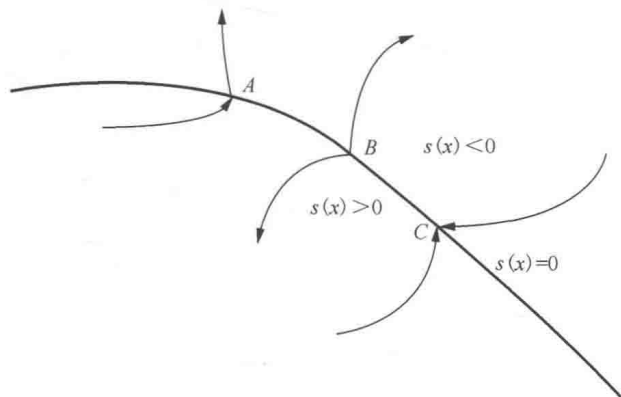


图 2.1 切换面上点的特性