

基于滑模技术的 鲁棒与容错控制

郝立颖 郑柏超/著

Robust and Fault Tolerant Control Based on Sliding
Mode Technology



科学出版社

基于滑模技术的鲁棒与容错控制

郝立颖 郑柏超 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要阐述基于滑模变结构控制技术的容错控制及量化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。本书主要内容如下:基于滑模状态反馈和输出反馈的不确定线性系统的容错控制;基于滑模量化状态反馈和输出反馈的不确定线性系统的容错控制;一类含输入非线性系统的量化输出反馈滑模变结构控制;一类不确定混沌系统在执行器故障和饱和情况下的同步;量化参数不匹配情形下的线性系统滑模变结构控制。

本书适合滑模变结构控制和容错控制等领域的研究人员阅读,也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及高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于滑模技术的鲁棒与容错控制/郝立颖,郑柏超著. —北京:科学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-03-051795-1

I. ①基… II. ①郝…②郑… III. ①鲁棒控制—研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 029892 号

责任编辑:张 震 姜 红 / 责任校对:李 影

责任印制:张 伟 / 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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 9 月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:228 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着现代系统的日益复杂，系统可靠性和安全性越来越受到人们的重视。然而，当执行器、传感器或系统的其他元部件发生故障时，在传统的反馈控制器作用下闭环系统通常不具有期望的性能甚至不稳定。容错控制技术是解决这一问题的有效方法之一。采用适当的容错控制技术可以使系统在某些部件发生故障的情况下，仍能保证系统稳定且使得闭环系统具有较理想的性能。另一方面，由于系统模型建立之时往往忽略了模型不确定性及外部扰动的影响，鲁棒容错控制问题也需要在控制理论研究中充分考虑，而滑模变结构控制是处理模型不确定性及外部扰动的一种很好的鲁棒技术。因此，本书在滑模变结构控制理论的框架下研究不确定线性系统的容错控制器设计问题。

本书基于滑模技术进行鲁棒控制和容错控制设计，特别是对带有量化现象的不确定线性系统理论设计中的容错控制问题展开研究。本书的主要研究结果经过严格的数学理论推导给出证明，并结合仿真算例进行验证。结合滑模技术，本书提出一套容错控制理论方法，不仅可以拓展鲁棒容错控制研究内容，而且对改进实际工程系统的可靠性和安全性具有重要意义。

作者一直从事容错控制及滑模变结构控制的研究。本书一方面是对作者近 5 年从事容错控制和滑模变结构控制研究的阶段性工作和心得体会进行总结；另一方面是对基于滑模技术的容错控制方法进行较为全面的介绍和探讨。

本书的研究工作是在作者导师杨光红教授的精心指导下完成的。杨光红教授知识渊博，科研功底深厚，为本书的写作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。

本书涉及的研究工作得到国家自然科学基金项目（项目编号：61503055；61403207；61573189；61602077）、中国博士后科学基金项目（项目编号：2015M571291；2015M580380）、辽宁省博士科研启动基金项目（项目编号：201501184）、辽宁省教育厅科学研究一般项目（项目编号：L2014277）、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）、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，衷心感谢第一作者的家人，尤其是丈夫与女儿，是他们在工作和生活上一如既往的支持、鼓励和默默奉献，才使第一作者能够顺利完

成各项科研工作和本书的撰写工作。同时，向所有关心、帮助和支持作者的各位师长、朋友和同学表示最崇高的敬意！在撰写本书的过程中，作者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，若蒙读者诸君不吝告知，将不胜感激。

作 者

2016 年 8 月 30 日于大连

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 本书的背景及意义	1
1.2 容错控制	3
1.2.1 容错控制的基本概念	3
1.2.2 容错控制的研究现状	4
1.3 滑模变结构控制	8
1.3.1 滑模变结构控制的发展历程	8
1.3.2 滑模变结构控制的基本原理	9
1.3.3 滑模变结构控制的研究现状	13
1.4 基于滑模技术的鲁棒与容错控制研究现状	15
1.4.1 基于滑模观测器的故障检测与容错控制	15
1.4.2 自适应滑模容错控制	16
1.5 存在的问题及本书主要工作	16
1.5.1 存在的问题	16
1.5.2 本书主要工作及内容概述	17
2 预备知识	19
2.1 自适应 H_∞ 性能指标定义	19
2.2 一些引理	20
2.3 本书使用的符号	21
3 基于滑模技术的不确定线性系统的容错控制	23
3.1 引言	23
3.2 基于滑模状态反馈的容错控制	24
3.2.1 问题描述	24
3.2.2 主要结果	27
3.2.3 仿真算例	36
3.3 基于滑模输出反馈的容错控制	41
3.3.1 问题描述	41

3.3.2	主要结果	43
3.3.3	仿真算例	52
3.4	本章小结	55
4	基于滑模量化状态反馈的不确定线性系统的容错控制	57
4.1	引言	57
4.2	问题描述	58
4.2.1	量化器模型	58
4.2.2	故障模型	59
4.3	主要结果	60
4.3.1	滑模面设计	60
4.3.2	滑模变结构控制器设计	62
4.4	仿真算例	72
4.5	本章小结	76
5	基于滑模量化输出反馈的不确定线性系统的容错控制	77
5.1	引言	77
5.2	问题描述	77
5.2.1	量化器模型	78
5.2.2	故障模型	79
5.2.3	基于补偿器的滑模变结构控制器	79
5.3	主要结果	80
5.3.1	滑模面设计	80
5.3.2	滑模变结构控制器设计	84
5.4	仿真算例	93
5.5	本章小结	99
6	一类含输入非线性系统的量化输出反馈滑模变结构控制	100
6.1	引言	100
6.2	问题描述	101
6.2.1	量化	103
6.2.2	动态补偿器设计	103
6.3	滑模变结构控制器设计	106
6.4	仿真算例	115

6.5 本章小结	121
7 一类不确定混沌系统在执行器故障和饱和情况下的同步	122
7.1 引言	122
7.2 问题描述	122
7.3 主要结果	127
7.3.1 滑模面设计	128
7.3.2 滑模变结构控制器设计	130
7.4 仿真算例	138
7.5 本章小结	141
8 量化参数不匹配情形下的线性系统滑模变结构控制	143
8.1 引言	143
8.2 问题描述	143
8.3 主要结果	146
8.4 仿真算例	150
8.5 本章小结	156
参考文献	157

1.1 本书的背景及意义

随着核工业、航空航天、化学工业等科技行业技术的发展,以及工业、农业等生产系统的规模和复杂性日益增长,现代控制系统的自动化程度及其复杂程度也不断提高,这些在很大程度上影响了社会生产的各个层面并极大地促进了科学技术的不断发展。但仍有不少问题值得国内外学者关注,例如,由于自身结构的复杂性和长时间大功率、高负荷的连续工作,自动设备在运行过程中,随着时间的增长和内外部各种条件的变化,执行机构、传感器及系统的内部元件都不可避免地会发生不同程度的老化、失效甚至是故障,一旦发生故障,首先使得系统的稳定性受到破坏和控制性能显著下降,进而可能导致巨大的经济损失,甚至危及人身安全。1986年1月28日美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的“挑战者”号航天飞机在进行代号“STS-51-L”的第10次太空任务时,右侧固态火箭推进器上的一个O形环失效,导致一连串的连锁反应,航天飞机在升空后72秒时爆炸解体坠毁,机内7名宇航员(包括一位女教师)全部遇难,造成直接经济损失12亿美元,航天飞机停飞3年;1998~1999年,NASA的“雅典娜”、“大力神”和“德尔它”火箭又连续发生了5次事故,直接造成30亿美元的经济损失;2003年2月1日,NASA的“哥伦比亚”号航天飞机顺利地完成了各项任务,但在返航时不幸失事解体,机上的7名机组人员全部遇难。此外,中国的西昌卫星发射中心也于1995年和1996年各发生了一次星箭俱毁的严重事故;2003年8月22日,巴西耗资650万美元的第三颗VLS系统运载火箭由于一个固体燃料推进器突然意外点火,整个火箭及发射架被毁,造成21名工作人员丧生,成为巴西航天发展史上最大的悲剧;2009年6月,法国一架空客A330客机遭遇强对流天气,导致飞机无法控制而坠毁,机上228人全部

遇难；2010年6月，韩国“罗老”号运载火箭因整流罩分离异常再次发射失败；2012年8月，俄罗斯携带两颗通信卫星上天的“质子-M”运载火箭在入轨过程中发生故障，未能将卫星送入预定轨道。除了在航空航天领域，在石油化工生产过程、煤矿开采、核电设施等工业过程控制领域，多种故障的发生均导致了人员伤亡、财产损失和生产停滞。因此，人们迫切需提高现代系统的可靠性与安全性，必须设计一种控制系统，使其在传感器失效或执行机构中断甚至被控对象出现故障时仍能保持正常的控制效果。如何提高控制系统的安全性、可靠性，已经成为控制科学领域研究的热点课题^[1]。相应地，复杂系统的容错控制(fault-tolerant control, FTC)技术就应运而生了。

此外，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^[2]，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进展和相当丰富的成果，然而，仍然存在大量亟待解决的问题，如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，特别是采用滑模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。

还有，由于控制对象的复杂程度日益增加（如精密伺服控制、工业机器人、飞行器姿态控制等），系统参数变化范围大、干扰源多、环境复杂，精确地描述系统模型是很困难的，甚至是不可能的，而系统模型的不确定程度也将影响控制系统性能的优劣。因此，在设计控制器过程中应考虑系统不确定性对闭环控制性能和稳定性的影响。而滑模变结构控制是学者 Emelyanov 等在20世纪60年代初提出^[3,4]，并由 Itkis^[5]和 Utkin^[6]在20世纪70年代总结发展起来的一种增强控制系统对不确定因素的鲁棒性的控制方法，其本质是一类特殊的非线性控制，与常规控制的根本区别在于控制的不连续性，即一种使控制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的状态被限制在某一子流形上运动，即“滑动模态”运动。由于滑动模态可以进行设计且与对象参数及扰动无关，滑模变结构控制具有鲁棒性强、响应快速、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点。近年来，滑模变结构控制的应用研究有了相当大的进展，几乎涉及所有控制领域^[7-9]，如飞机与太空飞行器的滑模变结构控制、电机与电力系统的滑模变结构控制、机器人的滑模变结构控制、智能交通系统的滑模变结构控制、混沌系统的滑模变结构

控制等。

因此,本书针对带有模型不确定性与外部扰动的线性系统,通过采用滑模技术比较深入地研究容错控制与量化控制设计问题。选题具有重要的理论意义和工程应用价值。

1.2 容错控制

1.2.1 容错控制的基本概念

容错原是计算机系统设计技术中的一个概念,指当系统遭遇内部环节的局部故障或失效后,仍然可以正常运行的特性。此概念被引入控制系统中就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^[10],将容错控制思想引入控制系统中,形成了容错控制系统(fault tolerant control system, FTCs)^[1]。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,其结构图如图1.1所示。

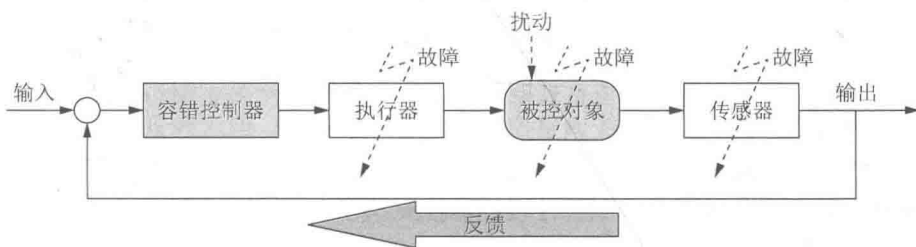


图 1.1 容错控制系统结构图

20世纪80年代以来,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^[1,11-27]。容错控制是一门应用型边缘学科,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、最优化方法等学科的知识。如今,已有很多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,并且得到了很好的应用和发展^[28-32]。另外,双倒立摆^[33]、城市交通网络^[34]、船舶运输^[35,36]及其他工业过程控制^[32,37]等领域也都成为容错控制技术应用的平台。

1.2.2 容错控制的研究现状

一个控制系统能够容错的必要条件是系统中存在冗余,即对执行器的容错需要执行驱动冗余,对传感器的容错则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(active FTC)和被动容错控制(passive FTC)^[38],这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。下面本节将对容错控制技术的现状按照上述两大类方法进行概述。

1.2.2.1 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年代发展起来的^[39],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成可靠镇定、同时镇定、完整性、可靠控制/鲁棒控制等几种类型。

1. 可靠镇定

可靠镇定是针对控制器故障的容错控制。可靠镇定的主要思想是采用两个或更多的补偿器来并行地镇定同一个被控对象。当任意一个或多个补偿器失效,而剩余的补偿器正常工作时,闭环控制系统仍然可以保持稳定。这个思想是由著名学者Siljak于1980年在文献[40]中首次提出,随后一些学者的研究^[41-43]使得可靠镇定问题基本上趋于成熟。针对单个被控对象,文献[41]已经证明了采用两个补偿器时存在可靠镇定解的充要条件是被控对象是强可镇定的(strongly stabilizable)。文献[43]进一步给出了对不是强可镇定的多变量系统采用多个动态补偿器进行可靠镇定问题的求解方法,通过采用多项式矩阵的互质分解技术,给出了可靠镇定问题解存在的充分条件。

2. 同时镇定

同时镇定是针对被控对象内部元件故障的容错控制。同时镇定的主要思想是设计一个控制器去镇定一个动态系统的多模型,即一个固定控制器分别镇定给定的多个有限维连续时间线性时不变对象。文献[44]是较早关于联立镇定问题的研究之一。随后该问题引起了许多学者的关注^[45-47]。应当指出的是,让该问题取得重要进展的是文献[45]提出的方法,其基于广义的采样数据保持函数,得到了联立镇定问题有解的充分条件和控制律的构造方法,以及实现线性二次型最优控制的充分条件和相应的控制律的构造方法。

3. 完整性

系统的完整性是指如果传感器和执行器发生中断故障,闭环系统仍能稳定。因此,完整性是针对系统传感器和执行器故障的容错控制。众所周知,传感器和执行器是控制系统最容易发生故障的部件,自从1971年学者Niederlinski提出完整性控制的概念后,完整性控制一直是被动容错控制中的热点研究问题^[48-53]。文献[48]明确给出了完整性问题的清晰的数学描述,并基于线性二次型调节器(linear quad ratic regulator, LQR)理论得到了一种对传感器或执行器失效具有完整性的充分必要条件。基于Lyapunov稳定性理论,文献[49]得到了一种能同时保证系统正常和系统故障情况下稳定的完整性控制器设计方法。文献[50]研究了关于执行器中断故障的完整性问题,推导出了求解静态反馈增益阵的一种极其简单的伪逆方法。在实现完整的同时,文献[51]给出的执行器中断故障完整性求解方法也保证系统闭环极点配置在预定区域内,但系统是高维时,解析解就不再存在。

4. 可靠控制

一个控制系统不仅能容忍系统元部件故障,还能保持闭环系统的稳定性并具有可接受的性能,则该系统被称为可靠控制系统。因此,可靠控制与前面介绍的完整性控制相比,还需要考虑控制回路失效时,能够维护系统具有可接受的性能^[25,54]。可靠控制在系统构造思路是一种与鲁棒控制技术相类似的控制,其采用固定的控制器来确保闭环系统对特定的故障具有不敏感性。需要指出的是,在所有的容错控制系统中关键因素是冗余。容错控制系统的不同之处就是冗余方式的不同。在大多数容错控制系统中主要有两种冗余方式:一种是硬件冗余,也就是传感器的备份、多控制计算机等,其仅仅依赖现有系统的冗余度去获得容忍性能退化;另一类冗余方式是解析冗余,其利用系统中不同部件在功能上的冗余性来实现。可靠控制一般基于硬件冗余的方式实现容错的目的。这类基于鲁棒控制技术的可靠控制器一旦被设计好,就保持固定,不需要任何故障信息调节控制器。其优点之一是在设计控制器的阶段已经考虑了所能发生的故障。也就是说,无论系统是

否出现故障都能保证系统稳定和满意的性能指标。由于可靠控制不需要在线的故障信息,不需要故障检测与诊断子系统,可靠控制的另一个优点是能快速容错且易于实现。由于上述的优点,可靠控制在近 20 年来一直备受人们的青睐,各种各样的研究方法不断涌现,如矩阵 Riccati 方程方法^[25,27,54,55]、参数空间设计方法^[56]、线性矩阵不等式设计方法^[57-65]等。

可靠控制已经成功应用到实际应用系统(如液位系统)^[63]中。但随着系统复杂度的增加,可能出现的故障也会迅速增加,控制器的设计过程变得越来越复杂,而且只能针对有限个故障设计的控制器也许不能保证系统的性能。所以,可以通过在线调节或重构控制器补偿故障的主动容错的控制方法成为目前研究的热点。

1.2.2.2 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成为研究的焦点。而主动容错控制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,其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、容错能力更强大的特点。目前,一部分主动容错控制需要故障诊断与分离(fault detection and isolation, FDI)子系统提供准确的故障信息,而另一部分则不需要 FDI 子系统,但也需要获知各种故障信息^[11],这种故障信息也可以说是估计信息。主动容错控制方法大体上可以分为两大类,即故障诊断与分离方法、自适应方法。其中,基于故障诊断与分离方法的主动容错控制方法又可以分为控制律重新调度和控制律重构设计两类。

1. 控制律重新调度 (redistribution)

这类主动容错方法的主要思想是根据故障诊断机构提供的故障信息,选择针对不同的故障模式已经离线设计好的相应容错控制器来补偿故障带来的影响^[37,66,67]。其特点是简单、比较实用而且快速。但其过于依赖故障诊断机构的精确性与实时性,故障诊断机构的任何误检、漏检都可能对控制系统产生巨大的影响。因此,在采用这类控制策略时,必须对被控系统的认知程度比较深。如果采用实时专家系统进行控制器的切换将会产生很好的效果。这类控制已经应用于具有多个冗余机翼的 F-16 战斗机的容错控制中^[11,41]。

2. 控制律重构设计 (reconstruction)

这类主动容错控制方法的主要思想是通过对照控制系统的结构和参数进行在线或者离线调整,使之能最佳地适应系统的当前工作状况。这是一个备受广大学

者关注的设计方法,这种设计方法大多使用基于 FDI 诊断结果的特征结构配置方法^[68-72]。文献[69]和文献[70]利用特征结构配置方法重构了容错控制器,并且为了保证故障后系统的稳定性,进行了带有参数界限的鲁棒特征结构配置。针对飞机的元部件故障,文献[73]给出了一种飞机的模型参考容错控制方法,用检测滤波器理论设计了相应的故障检测器和故障参数估计器,并进一步使用 Lyapunov 方法设计了模型参考容错控制律,保证在发生内部故障时,飞机仍能稳定运行。文献[74]设计了一个具有自修复功能的飞行控制系统,当诊断出某个机翼受损时,可以重新分配其应完成的任务到剩余执行器中,其设计特点是采用了“控制混合器的概念”。基于实时专家系统的容错监督控制方法,文献[75]实现了当系统正常运行时,采用模型参考学习自适应控制律,以提高控制精度;当检测到系统已处于不稳定边缘时,将控制律实时切换到一种简单的比例-积分 (proportion integration, PI) 控制器,仍使系统保持稳定。文献[76]提出了一种分析模型参考容错控制系统稳定性的随机微分方程方法,该方法提出由马尔可夫过程来描述随机微分方程,主要是因为随机微分方程的参数是随时间的变化而随机变化的。关于执行器中断故障的完整性问题,学者 Gao 和 Antsaklis 提出了求解静态反馈增益阵的一种简单的伪逆方法^[77],其因简洁、实时性好的优点得到了广泛应用^[78],然而,该方法并不能保证故障状态下的闭环系统是稳定的。在现有的控制律重构设计方法中,大多数考虑的执行器故障情况是要么失效、要么正常。但某些故障情况不再是简单的发生了故障或没有发生故障的二值问题,故障后系统的剩余执行驱动力重组问题应该加以考虑。

3. 自适应容错控制方法

这种方法的基本原理是利用自适应控制思想,设计自适应控制率在线估计故障,由自适应机构提供控制器所需的故障信息。这是一种隐含方式处理故障的方法。虽然需要故障的信息,但是不需要故障诊断机构提供精确的故障信息。值得注意的是,自适应机构能够对故障的发生及时反应,并相应地重组控制率,达到技术补偿故障目的。由于此类方法不存在故障诊断机构产生误检、漏检和诊断不及时而使容错失败的情况,近 25 年来备受学者关注^[26,79-98]。模型参考自适应控制^[93]基于上述思想,最先发展起来并被学者称为模型跟踪重组控制,其设计目标是不管是否发生故障,被控对象的输出始终自适应地跟踪参考模型的输出。在此基础上发展起来的多模型自适应^[97],克服线性系统的局限性,并使得人们在设计非线性控制系统时直接采用线性控制理论,在一定意义上与同时镇定相似。当系统因为故障工作点发生变化时,系统依据自适应律调整控制参数来克服故障的影响。现有的自适应方法一般分为直接自适应方法和间接自适应方法。文献[26]和文献[87]~文献[96]分别从不同的角度,用直接自适应方法进行了自适应容错控制系统的设计。文

献[80]提出了间接自适应容错控制方法并应用于 F-16 战斗机模型的容错控制。此外,文献[78]~文献[81]结合自适应容错控制系统的故障补偿能力和可靠控制系统的性能优化能力,各取其优点来实现优化自适应容错控制系统的目的。还有,文献[81]应用模糊学习模块,通过与一个 FDI 模块相结合,在线选择合适的参考模型和控制器的输出增益,进一步提高了容错控制能力,因此,该方法也可以看成是自适应重组控制与控制律重构设计的一种有机结合。在此基础上,可以考虑对故障动态剧烈变化在线快速学习和调节、模型降阶、减少可调整参数的个数等办法提高自适应容错控制的能力。

1.3 滑模变结构控制

1.3.1 滑模变结构控制的发展历程

20 世纪 60 年代,学者 Emelyanov 等提出变结构控制(variable structure control, VSC)这一概念^[3,4],以其独特的优点,为不确定性系统提供了一种很有前途的控制系统综合方法。随后,Itkis 和 Utkin 等学者总结并发展了滑模变结构控制(sliding mode control, SMC)理论,奠定了滑模变结构控制的理论基础^[5,6]。“变结构”一词意味着控制器的结构可能会发生变化。从广义上看,变结构系统主要有两类:一类是具有滑动模态的变结构系统;另一类是不具有滑动模态的变结构系统。一般变结构系统均指前者,这是由于具有滑动模态的变结构系统不仅对系统的不确定性因素具有较强的稳定鲁棒性和抗干扰性,而且可以通过滑动模态的设计获得满意的动态品质,同时控制简单、易于实现,所以基于滑动模态的变结构控制系统在国际上受到了广泛重视。本书所研究的变结构控制系统均指具有滑动模态的变结构控制系统。

变结构控制的发展过程大致可分为三个阶段。

第一阶段,1957~1962 年,此阶段的研究对象是二阶线性系统,以误差或其导数进行反馈,并假定反馈系数可以在两个可能的值当中取一个,系统的行为是在误差或其导数构成的相平面内进行研究的。这是研究的初级阶段。

第二阶段,1962~1970 年,此阶段的研究对象是高阶线性系统,但仍然限于单输入、单输出系统。研究方法采用误差及其导数的坐标空间(或称规范空间),控制由相坐标的作用构成,每个相坐标都有自己的跳变系数。倘若对象受到外部扰动的作用,在辅助装置中有输出量及其导数的局部反馈,这些反馈也带有分块定常的作用系数。通常,在规范空间中选某些平面作为主反馈和局部反馈的切换

面,或者在近似实现误差导数的滤波器的输出坐标的扩展空间中选切换面。因此,这一时期研究的是规范空间中具有标量控制和被调量的分块线性系统。

第三阶段是 1970 年以后,此阶段的研究对象是状态空间中带有非线性切换面的本质非线性系统,研究的问题发生了质的扩充,由规范空间转变到更一般的状态空间,主要结论为变结构控制对控制通道中的摄动及干扰具有不变性。正是这一极富吸引力的结论,吸引了大批海外学者的研究兴趣,取得了丰硕的理论成果^[99-102]。中国已故著名控制专家、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,提出了变结构控制的趋近率方法^[7]。

1.3.2 滑模变结构控制的基本原理

为了说明滑模变结构控制的基本原理,考虑如下二次微分方程:

$$\ddot{y}(t) = u(t) \quad (1.1)$$

并且考虑如下的控制律:

$$u(t) = -ky(t) \quad (1.2)$$

式中, k 为一个正标量。下面通过相平面法分析闭环系统的动态性能。该相平面是一个速度相对位置图。

将式 (1.2) 代入系统 (1.1) 中,并在两侧同时乘以 $\dot{y}$ 可以得到

$$\dot{y}\ddot{y} = -k\dot{y}y \quad (1.3)$$

将式 (1.3) 两边同时积分可以得到如下速度和位置的关系式:

$$\dot{y}^2 + ky^2 = c \quad (1.4)$$

式中, c 为一正积分常数。特别地,当 $k=1$ 时,式 (1.4) 代表以原点为圆心、半径为 $\sqrt{c}$ 的圆。一般情况下,式 (1.4) 代表一个依赖于初始条件的椭圆,如图 1.2 所示。从图 1.2 可以看出,控制律式 (1.2) 不能使系统 (1.1) 由初始位置向原点运动,即不能达到渐近稳定。

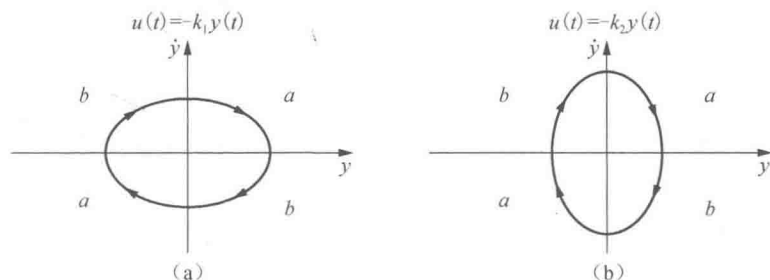


图 1.2 简谐运动的相平面图