



**Fuzzy Singularly Perturbed Control Theory
and Its Applications**

模糊奇异摄动控制

陈金香 于立业 著
Chen Jinxiang Yu Liye

理论及其应用

内 容 提 要

Fuzzy Singularly Perturbed Control Theory and Its Applications

模糊奇异摄动控制 理论及其应用

陈金香 于立业 著

Chen Jinxiang Yu Liye

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书结合作者的研究工作,详细介绍了模糊奇异摄动系统的概念、理论、控制方法及其在复杂系统建模与控制中的应用。主要内容包括模糊奇异摄动控制理论的提出和含义、奇异摄动系统的研究综述;非时延连续时间模糊奇异摄动系统的稳定性分析与控制;非时延离散时间模糊奇异摄动系统的稳定性分析与控制;时延连续时间模糊奇异摄动系统的稳定性分析与控制;时延离散时间模糊奇异摄动系统的稳定性分析与控制以及模糊奇异摄动建模与控制方法在复杂电路、直升机及卫星姿态控制中的应用。

本书反映了近年来奇异摄动建模与控制领域中最近研究成果,系统介绍了基于线性矩阵不等式方法的模糊奇异摄动系统稳定性分析与控制方法以及模糊奇异摄动建模与控制方法在复杂非线性多时标系统高精度控制中的应用。

本书可作为从事自动控制工作的科研人员、工程技术人员以及高等院校自动化与其他相关专业教师、高年级学生和研究生参考用书。

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

模糊奇异摄动控制理论及其应用/陈金尧,于...著. --北京:清华大学出版社,2014

ISBN 978-7-302-66407-8

I. ①模... II. ①陈... ②于... III. ①奇异摄动—模糊控制—理论研究 IV. ①P133

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第...07号



责任编辑:王一玲

封面设计:常雪影

责任校对:焦丽丽

责任印制:宋 林

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:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm

印 张:13.5

字 数:329千字

版 次:2014年6月第1版

印 次:2014年6月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00元

产品编号:054679-01



FOREWORD

多时标系统是指系统中存在慢、快模态差别而呈现多时标特性的系统,由于其病态动力学和模型高维特点,此类系统的分析与控制较之常规系统更加复杂,但实际工业工程中涌现出大量多时标系统,又使得该问题的研究具有重大的理论意义和实际应用价值。早期对多时标系统的处理方法是考虑小摄动参数的影响或忽略快变模态,达到模型降阶,然而基于此简化模型的控制方法很难获得预期的控制性能。奇异摄动技术通过慢、快两个降阶子系统逼近被控对象的动力学,在慢、快两个时间尺度设计控制器,从而被誉为处理多时标问题的有效工具,但早期的研究普遍局限于线性奇异摄动建模与控制问题。然而实际被控系统多数具有多时标和非线性特性并存特点,简化或忽略其非线性特征的线性奇异摄动技术仍然存在控制性能不高的问题。基于非线性奇异摄动模型的控制方法能够处理多时标与非线性并存问题,但现存结果对系统假设较多,很难应用于实际系统。模糊奇异摄动建模与控制方法结合模糊逻辑和奇异摄动技术,能够弥补上述方法的缺陷,极大改善控制性能,使系统控制更加有效、实用。

随着对系统控制精度的不断提高,模糊奇异摄动理论与方法受到了人们的广泛重视和研究,取得了很多研究结果和方法。另外,线性矩阵不等式及求解凸优化问题的内点法的提出,进一步推动了基于线性矩阵不等式方法的模糊奇异摄动系统的分析与控制领域的发展。

本书结合作者的多年研究工作,分别介绍了时延和非时延两种情形连续、离散时间模糊奇异摄动系统的分析与控制方法及其在复杂电路、直升机及复杂卫星姿态控制中的应用。作者努力将模糊奇异摄动系统的分析与控制的最新研究成果和方法反映在本书中,但限于篇幅,书中所包含的内容仅仅是此方向成果的很少部分。限于作者的水平,书中不妥和错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

本书的研究工作和撰写得到了国家自然科学基金(51374082)的资助,在此表示衷心感谢。

陈金香

2013年12月

北京

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 模糊奇异摄动控制理论的提出和含义	1
1.1.1 模糊奇异摄动控制理论的提出	1
1.1.2 模糊奇异摄动控制理论的含义	2
1.2 奇异摄动系统概述	2
1.2.1 线性奇异摄动系统	3
1.2.2 经典非线性奇异摄动系统	6
1.2.3 模糊奇异摄动系统	7
1.3 奇异摄动技术应用	8
1.4 本书的主要内容	9
参考文献	10
第 2 章 T-S 模糊建模与控制	18
2.1 T-S 模糊模型	18
2.1.1 非时延 T-S 模糊模型	18
2.1.2 时延 T-S 模糊模型	20
2.2 非线性系统的 T-S 模糊建模	22
2.2.1 扇区非线性方法	23
2.2.2 模糊扇区空间内局部估计方法	25
2.3 基于 T-S 模糊模型的模糊控制	26
2.3.1 基于非时延 T-S 模糊模型的模糊静态输出反馈 H_{∞} 控制	27
2.3.2 基于时延 T-S 模糊模型的模糊静态输出反馈 H_{∞} 控制	31
2.4 仿真验证	35
2.5 结语	38
第 3 章 模糊奇异摄动建模	39
3.1 模糊奇异摄动模型	39
3.1.1 非时延连续时间模糊奇异摄动模型	39
3.1.2 时延连续时间模糊奇异摄动模型	40

3.1.3	非时延离散时间模糊奇异摄动模型	40
3.1.4	时延离散时间模糊奇异摄动模型	43
3.2	多时标非线性系统模糊奇异摄动建模	45
3.2.1	扇区非线性方法	46
3.2.2	模糊扇区空间内局部估计方法	47
3.3	结语	49
	参考文献	49
第4章	非时延连续模糊奇异摄动系统 H_∞ 控制	51
4.1	状态反馈 H_∞ 控制	51
4.1.1	稳定性分析	51
4.1.2	状态反馈 H_∞ 控制	54
4.1.3	仿真验证	57
4.2	动态输出反馈 H_∞ 控制	59
4.2.1	连续模糊奇异摄动系统模型	59
4.2.2	动态输出反馈 H_∞ 控制	60
4.2.3	仿真验证	65
4.3	H_∞ 滤波	68
4.3.1	连续模糊奇异摄动系统模型	68
4.3.2	H_∞ 滤波器设计	69
4.3.3	仿真验证	74
4.4	静态输出反馈 H_∞ 控制	77
4.4.1	连续模糊奇异摄动模型	77
4.4.2	模糊静态输出反馈 H_∞ 控制器设计	78
4.4.3	仿真实例	83
4.4.4	小结	88
4.5	结语	89
	参考文献	89
第5章	时延连续模糊奇异摄动系统 H_∞ 控制	92
5.1	状态反馈 H_∞ 控制	92
5.1.1	时延连续模糊奇异摄动系统模型	92
5.1.2	状态反馈 H_∞ 控制	93
5.1.3	仿真实例	97
5.2	H_∞ 滤波	99
5.2.1	时延连续模糊奇异摄动系统模型	99
5.2.2	H_∞ 滤波器设计	100

5.2.3 仿真实例	106
5.3 结语	109
参考文献	109
第6章 标准离散模糊奇异摄动系统鲁棒控制	110
6.1 ϵ 相关模糊状态反馈鲁棒控制	110
6.1.1 标准离散模糊奇异摄动模型	110
6.1.2 模糊状态反馈控制器设计	111
6.1.3 仿真验证	112
6.1.4 小结	118
6.2 模糊静态输出反馈鲁棒控制器设计	119
6.2.1 标准离散模糊奇异摄动模型	119
6.2.2 静态输出反馈控制器设计	120
6.2.3 仿真验证	122
6.2.4 小结	124
6.3 基于不确定性标准离散模糊奇异摄动模型一的状态反馈鲁棒控制	124
6.3.1 不确定性标准离散模糊奇异摄动模型一	124
6.3.2 状态反馈控制器设计	125
6.3.3 仿真验证	127
6.3.4 小结	133
6.4 基于不确定性标准离散模糊奇异摄动模型二的状态反馈鲁棒控制	134
6.4.1 不确定性标准离散模糊奇异摄动模型二描述	134
6.4.2 状态反馈控制器设计	134
6.4.3 仿真验证	136
6.4.4 小结	139
6.5 基于不确定性标准离散模糊奇异摄动模型二的 ϵ 无关状态 反馈鲁棒控制	140
6.5.1 不确定性标准离散模糊奇异摄动模型二描述	140
6.5.2 状态反馈控制器设计	141
6.5.3 仿真验证	143
6.5.4 小结	149
6.6 基于不确定性标准离散模糊奇异摄动模型二的模糊静态 输出反馈控制	149
6.6.1 不确定性标准离散模糊奇异摄动模型二	150
6.6.2 静态输出反馈鲁棒控制器设计	150
6.6.3 仿真验证	153
6.6.4 小结	154

6.7 结语	155
参考文献	156
第7章 时延标准离散模糊奇异摄动系统鲁棒控制	157
7.1 时延标准离散模糊奇异摄动系统状态反馈鲁棒控制	157
7.1.1 时延标准离散模糊奇异摄动模型	157
7.1.2 状态反馈鲁棒控制器设计	158
7.1.3 仿真验证	161
7.1.4 小结	163
7.2 不确定性时延标准离散模糊奇异摄动系统鲁棒镇定	163
7.2.1 不确定性时延标准离散模糊奇异摄动模型	163
7.2.2 模糊状态反馈鲁棒镇定	164
7.2.3 模糊静态输出反馈鲁棒镇定	169
7.2.4 仿真验证	173
7.2.5 小结	185
7.3 结语	185
参考文献	185
第8章 模糊奇异摄动建模与控制理论的应用	188
8.1 复杂挠性卫星姿态高精度稳定控制	188
8.1.1 复杂挠性卫星非线性动力学与运动学方程	189
8.1.2 复杂挠性卫星模糊奇异摄动模型	192
8.1.3 鲁棒组合控制器设计	193
8.1.4 三轴气浮平台全物理仿真验证	194
8.1.5 小结	199
8.2 直升机系统姿态控制	201
8.2.1 直升机系统动力学模型	201
8.2.2 直升机系统不确定性时延模糊奇异摄动模型	201
8.2.3 状态反馈鲁棒控制器设计	203
8.2.4 仿真验证	205
8.2.5 小结	206
8.3 结语	207
参考文献	207

第 1 章

绪 论

1.1 模糊奇异摄动控制理论的提出和含义

1.1.1 模糊奇异摄动控制理论的提出

经典现代控制理论自 20 世纪 50 年代末诞生以来得到飞速发展,并且成功应用于航天领域及工业控制领域,但在复杂非线性多时标系统的高精度控制应用中遇到了困难。主要因为:

(1) 经典现代控制理论是一种基于精确数学模型的控制方法。因此,当对象模型不能精确地描述被控对象或在系统运行过程中,模型与实际对象产生偏离时,此方法很难保证被控系统期望的控制性能要求。

(2) 经典现代控制理论处理多时标问题的方法是在不考虑小摄动参数的影响或忽略快变模态的情况下,达到模型降阶,然而基于低阶模型的控制方法很难获得预期的控制性能。因为如果模型中考虑快变模态,将得到高维模型,从而增加控制器设计难度,甚至无法设计控制器。

针对经典现代控制理论遇到的第一个问题,文献[1]提出了 Takagi-Sugeno(简称为 T-S)模糊建模方法。其核心思想是采用若干“如果-那么规则”描述非线性对象的局部输入-输出线性关系,获得一组线性模型,然后通过对这些线性模型的非线性插值实现对非线性对象的逼近。然而,如果将 T-S 模糊建模与控制方法^[1-8]直接应用于非线性多时标系统的控制,将得到一组病态的线性矩阵不等式组,无法得到可行解。主要因为此方法无法处理多时标问题。

为了解决经典现代控制理论遇到的第二个问题,20 世纪 60 年代 Klimushev 等人提出的奇异摄动建模与控制方法——“慢快分解”思想^[9],其核心思想是首先忽略快变量以降低系统阶数,然后通过引入边界层校正项来提高近似程度,也就是说将被控系统分解为不计边界层影响且在时间尺度上变化缓慢的慢变子系统和只在边界层内起作用且变化迅速的快变子系统。针对慢、快子系统分别进行稳定性分析与控制器设计,则摄动参数必存在一个稳定上界,对于在此范围之内所有奇异摄动参数,被控系统渐近稳定。然而,早期的研究普遍局限于线性奇异摄动建模与控制问题,未考虑被

控系统的非线性特性。由于实际被控系统多数具有多时标和非线性特性并存特点,简化或忽略其非线性特征的线性奇异摄动技术仍然存在控制性能不高的问题。

为了在统一模型框架下处理问题(1)和(2),基于非线性奇异摄动模型的控制方法应运而生,如复合 Lyapunov 函数、向量 Lyapunov 函数及积分流形方法等,然而此类结果^[10-29]多数对系统的假设较多,较难应用于实际系统。

如何在统一模型框架下描述复杂非线性多时标系统的病态动力学,并减少系统假设,降低保守性成为研究热点,从而引发了模糊奇异摄动建模与控制理论的研究。该方法的核心思想是融合 T-S 模糊建模理论与奇异摄动技术,建立模糊奇异摄动模型逼近被控系统动力学,基于所建模型设计控制器,并应用线性矩阵不等式方法求解控制器增益。

近年来,模糊奇异摄动理论与方法因其能够弥补经典现代控制理论和传统非线性奇异摄动方法的不足,极大改善复杂非线性多时标系统的控制性能而备受重视。

1.1.2 模糊奇异摄动控制理论的含义

模糊奇异摄动控制理论与方法是一种融合模糊逻辑、奇异摄动技术、不确定性理论以及时延系统理论,在统一模型框架下考虑被控系统的非线性、多时标性、参数不确定性以及时延或非时延特性的建模与控制方法。

模糊奇异摄动建模理论的具体思路是:

- (1) 分析被控系统的多时标特性,将系统状态变量分解为慢、快两组状态变量;
- (2) 采用若干“如果-那么规则”描述被控对象的局部输入-输出线性关系,获得一组含有慢、快状态变量的线性奇异摄动模型,然后通过对这些线性奇异摄动模型的非线性插值实现对被控对象的逼近。
- (3) 模型中采用不确定性参数矩阵表示模型的本质不精确性和系统运行过程中有些参数性能变化引起的不确定性。
- (4) 描述系统状态变量或输入中的时延特性。

控制器设计思想是在建立被控系统的时延或非时延不确定性模糊奇异摄动模型的基础上,采用 Lyapunov 函数、矩阵谱范数和线性矩阵不等式等方法,设计鲁棒控制器。由于模糊奇异摄动模型中含有摄动小参数 ϵ ,其控制器设计方法有别于基于 T-S 模糊模型的控制器设计,需要处理小参数问题。

1.2 奇异摄动系统概述

奇异摄动理论自诞生以来在数学领域和控制领域中均取得了突破性进展,并随着控制理论的发展而不断完善。

在物理、化学、天文等自然科学,航空航天、电力电子、钢铁冶金、机器人等工程技术科学以及交通、经济等管理科学的建模过程中大量出现诸如小的时间常数、惯量、电导或电容等,会使得模型有相当高的阶数,甚至出现具有病态数值特征的微分方程。针对此类问题,早期的处理方法是忽略小量级参数,达到模型降阶,即忽略高频部分,

保留低频部分,或将小时间常数的影响看作为外部干扰处理。然而,这种简化处理方法往往使得设计效果与期望要求相距甚远^[30]。

后来,学者们将这类系统看作为含有小参数 ϵ 的微分方程问题。小参数 ϵ 可以是反映一定的物理性质的系统固有参数,也可以是人为引进参数。这类问题的解 u 除了与变量 x 有关外,还与小参数 ϵ 有关,即 $u=u(x,\epsilon)$ 。小参数有的包含在微分方程的低阶导数项中,有的包含在高阶导数项中,还有的包含在定解条件和所讨论区域的边界中。由于含 ϵ 的形式不同,相应定解问题的解 $u_\epsilon(x)$ 也具有不同性质。这类问题统称为摄动问题。若摄动问题的解 $u_\epsilon(x)$,当 $\epsilon \rightarrow 0$ 时,不存在关于变量 x 一致收敛的极限,则称为奇异摄动问题^[31]。

奇异摄动问题的类型很多,故有许多种解决各类问题的方法。奇异摄动问题作为应用数学领域的一个活跃分支,其最早的数值方法是差分方法^[32]和有限元法^[33]。然而,研究发现,在参数 ϵ 非常小的情况下,网络步长越小所获解的精度越高,但网络步长太小也易引起数值不稳定现象。另外,奇异摄动问题中出现的方程往往是非对称的,如果用通常的有限元方法求解,则不能得到正确结果。也就是说,以上常用的两种数值计算方法解决奇异摄动问题是不适用的。因此,研究人员近30年主要专注于研究适用处理奇异摄动问题的差分方法(如拟合差分法^[34]、加权差分法^[35]和非均匀网络差分法^[32])和广义 Galerkin 方法(如迎风有限元法^[36]和指数型拟合有限元法^[33]),其中,涉及到常微分方程的初值问题和边值问题以及偏微分方程的奇异摄动问题。

在控制领域,处理奇异摄动问题主要采用边界层校正法,多年来,奇异摄动理论与方法以其特殊的优点,得到了国内外学者的广泛关注,麻省理工学院、加州大学洛杉矶分校等许多国外研究机构针对机器人、过程控制系统等进行奇异摄动建模与控制研究。国际杂志 *Dynamics of Continuous, Discrete, and Impulsive Systems: An International Journal on Theory and Application* 于2001年12月发行了 *Special Issue on Singularly Perturbed Dynamic Systems in Control Technology*,著名学者 Osman Tokhi 在2000年国际杂志 *IEE Proceedings on Control Theory and Application* 专刊 *Special Section on Modeling and Control of Flexible Manipulators* 上发表论文论述了奇异摄动理论与方法在柔性机械臂建模与控制中的重要作用,2003年清华大学刘华平老师在《控制理论与应用》期刊发表论文详细介绍了奇异摄动理论与方法的研究进展^[37]。针对多摄动参数线性奇异摄动系统,2005年学者 Hiroaki Mukaidani 提出了一种有别于“慢、快分解”的纳什博弈高阶估计策略^[38],为多摄动参数奇异摄动系统的分析与控制提供了新思路。下面从线性奇异摄动系统、经典非线性奇异摄动系统和模糊奇异摄动系统三个方面介绍奇异摄动系统的发展情况。

1.2.1 线性奇异摄动系统

1. 连续时间线性奇异摄动系统

1) 非时延连续时间线性奇异摄动系统

非时延连续时间线性奇异摄动控制系统模型为

$$E_{\epsilon} \dot{x}(t) = A_{\epsilon} x(t) + B_{\epsilon} u(t) \quad (1.1)$$

其中, $x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$ 为状态向量, $x_1(t) \in R^n$ 为慢状态向量, $x_2(t) \in R^m$ 为快状态向

量, $u(t) \in R^p$ 为控制输入, ϵ 为摄动参数且 $0 < \epsilon \ll 1$, $E_{\epsilon} = \begin{bmatrix} I_{n \times n} & 0 \\ 0 & \epsilon I_{m \times m} \end{bmatrix}$, $A_{\epsilon} =$

$$\begin{bmatrix} A_{c11} & A_{c12} \\ A_{c21} & A_{c22} \end{bmatrix}, B_{\epsilon} = \begin{bmatrix} B_{c1} \\ B_{c2} \end{bmatrix}, A_{c11}, A_{c12}, A_{c21}, A_{c22}, B_{c1}, B_{c2} \text{ 为适当维数矩阵。}$$

系统式(1.1)的慢、快变分解成立的前提是 A_{c22} 为非奇异, 当 A_{c22} 为奇异阵时, 式(1.1)不能直接进行慢、快分解。当 A_{c22} 为非奇异时, 称式(1.1)为标准奇异摄动系统模型; 而当 A_{c22} 奇异时, 则称式(1.1)为非标准奇异摄动系统模型^[39]。

近年来, 连续线性奇异摄动系统得到了充分的研究, 其稳定性分析与控制研究可归纳为三种, 即慢、快子系统分解方法, 广义分解法以及整体建模与设计法。

(1) 慢、快子系统分解方法。慢、快子系统分解^[9]的前提是式(1.1)中的参数 A_{c22} 为非奇异, 因此该方法不能处理非标准连续线性奇异摄动系统。

采用基于慢、快子系统分解的稳定性分析方法分析连续线性奇异摄动系统稳定性的关键问题是如何求解 ϵ 的上界问题, 为此, 学者们提出了两种求取摄动参数稳定上界的方法, 即“频域法”^[40~42]和“时域法”^[43~47]。频域法是指将系统的状态空间模型转化为等价的频域模型, 通过检查相关条件来确定 ϵ 的上界的方法, 研究表明该方法很难推广到高维系统。较之频域方法, 时域方法的优点在于所需假设较少, 且可用于高阶系统, 如基于临界判据法求解矩阵实特征值的鲁棒性控制^[43], 融合时域和频域法的稳定性分析^[44], 输出反馈闭环稳定性和使稳定摄动参数上界达到无穷大的状态反馈控制律^[45,46], 针对带有非线性不确定性干扰情形采用两个独立的 Lyapunov 方程的稳定性分析^[47]等。但以上方法均有分析过程复杂, 计算量大的缺点。此外, 文献[48,49]分别探索了线性奇异摄动网络控制系统的镇定和容错问题, 拉开了奇异摄动系统网络控制问题研究的序幕。

在控制器设计方面, 非时延连续线性奇异摄动系统的控制器设计方法主要有 Riccati 方程法和线性矩阵不等式方法。由于目前还未出现较好的含小参数 Riccati 方程的求解方法, 传统最优控制理论很难直接应用于连续线性奇异摄动系统的最优控制问题。“两步法”^[50~51]能够解决上述问题, 但因未能实现严格分解, 慢变系统受快变模态影响而较难得到可行解。Chang 变换^[52]做到了严格的快慢分解, 获得比“两步法”更高的近似精度。从 Hamilton 矩阵块对角化角度出发的直接分解 Riccati 方程方法^[53]能够处理奇异摄动系统的二次型最优控制问题, 文献[54]将其推广到一类特殊非标准情形。为了解决 ϵ 较大时 Newton 迭代方法收敛性差的问题, 文献[55]设计了“特征向量法”, H_{∞} 控制^[56]和高精度控制器设计方法^[57]也被相继提出。然而, 由于 Riccati 方法对控制系统结构的约束较多而逐渐被基于线性矩阵不等式的控制器设计^[58~60]方法所代替。

(2) 广义分解法。“广义分解法”从广义系统角度出发, 将慢子系统描述为广义系

统,从而克服“慢、快分解法”不能处理非标准连续线性奇异摄动系统的问题。对于充分小摄动参数,广义系统最优控制器的最优指标约等于奇异摄动系统的次优控制器的性能指标^[61,62]。基于 Recursive 方法可设计高精度控制器^[63]方法,分解 Riccati 方程法也可获得摄动参数无关的 H_∞ 次优控制器存在条件^[64]。

(3) 整体建模与设计法。经典的慢、快子系统分解法无法处理非标准线性奇异摄动系统,而广义系统方法的推导过程复杂,难以用线性矩阵不等式方法求解,学者们转而研究无需分解慢、快子系统的整体建模与设计法,基于极点配置的不确定性连续奇异摄动的动态输出反馈 H_∞ 控制^[65]、具有 Markovian 跳变的线性奇异摄动系统状态反馈 H_∞ 控制^[66]等。目前,多数学者采用“整体建模与设计法”研究奇异摄动系统分析与控制问题。

2) 时延连续时间线性奇异摄动系统

具有常时延的连续时间线性奇异摄动控制系统模型为

$$E_\epsilon \dot{x}(t) = A_c x(t) + A_{c\tau} x(t - \tau) + B_c u(t) \quad (1.2)$$

具有时变时延的连续时间线性奇异摄动控制系统模型为

$$E_\epsilon \dot{x}(t) = A_c x(t) + A_{c\tau} x(t - \tau(t)) + B_c u(t) \quad (1.3)$$

其中, $x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$ 为状态向量, $x_1(t) \in R^n$ 为慢状态向量, $x_2(t) \in R^m$ 为快状态向量, $u(t) \in R^p$ 为控制输入, ϵ 为摄动参数且 $0 < \epsilon < 1$, τ 为时延常数, $\tau(t) \leq \tau_0$ 为时变时延,且 $\dot{\tau}(t) \leq \beta < 1$, τ_0 与 β 均为已知参数。

$$E_\epsilon = \begin{bmatrix} I_{n \times n} & 0 \\ 0 & \epsilon I_{m \times m} \end{bmatrix}, A_c = \begin{bmatrix} A_{c11} & A_{c12} \\ A_{c21} & A_{c22} \end{bmatrix}, B_c = \begin{bmatrix} B_{c1} \\ B_{c2} \end{bmatrix}, A_{c11}, A_{c12}, A_{c21}, A_{c22}, B_{c1}, B_{c2} \text{ 为}$$

适当维数矩阵。

式(1.2)或式(1.3)的慢、快变分解方法成立的前提是 A_{c22} 非奇异。当 A_{c22} 为奇异阵时,在式(1.2)或式(1.3)形式下就不能直接进行慢、快分解。当 A_{c22} 非奇异时,称式(1.2)或式(1.3)为标准时延连续时间线性奇异摄动系统模型;当 A_{c22} 奇异时,则称此系统为非标准时延连续时间线性奇异摄动系统。

较之非时延连续线性奇异摄动系统,时延连续线性奇异摄动系统的研究并不多见。文献[67]针对慢状态时延的奇异摄动系统,提出估计 ϵ 稳定上界的时延无关充分条件;文献[68]采用 Laplace 变换得出了多时延系统的时延相关稳定上界。在控制输入中存在时延系统的稳定性问题和 H_∞ 控制问题^[69,70]也分别被讨论,并基于线性矩阵不等式方法得到了依赖时延的稳定性条件。非标准状态时延线性奇异摄动系统的可控性问题^[71]和状态时滞情形的鲁棒 D 稳定性问题^[72]也相继被研究。

2. 离散时间线性奇异摄动系统

与连续情形不同,由于采样速率的不同,离散时间线性奇异摄动系统模型存在多种表达形式。根据采样速率的慢、快程度,非时滞离散线性奇异摄动系统可分为标准离散线性奇异摄动系统和非标准离散线性奇异摄动系统,标准和非标准离散时间线性奇异摄动系统又分别存在两种形式。

标准离散线性奇异摄动系统模型一为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{E}_\epsilon \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) \quad (1.4)$$

标准离散线性奇异摄动系统模型二为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{E}_\epsilon \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{E}_\epsilon \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) \quad (1.5)$$

其中, $\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1(k) \\ \mathbf{x}_2(k) \end{bmatrix}$ 为状态向量, $\mathbf{x}_1(k) \in R^n$ 为慢状态向量, $\mathbf{x}_2(k) \in R^m$ 为快状态向量,

$\mathbf{u}(k) \in R^p$ 为控制输入, ϵ 为摄动参数, $\mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d$ 为适当维数矩阵, $\mathbf{E}_\epsilon = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n \times n} & 0 \\ 0 & \epsilon \mathbf{I}_{m \times m} \end{bmatrix}$ 。

非标准离散线性奇异摄动系统模型一为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_1(k+1) = \mathbf{A}_{d11} \mathbf{x}_1(k) + \epsilon^{1-\theta} \mathbf{A}_{d12} \mathbf{x}_2(k) + \mathbf{B}_{d1} \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{x}_2(k+1) = \epsilon^\theta \mathbf{A}_{d21} \mathbf{x}_1(k) + \epsilon \mathbf{A}_{d22} \mathbf{x}_2(k) + \mathbf{B}_{d2} \mathbf{u}(k) \end{cases} \quad (1.6)$$

非标准离散线性奇异摄动系统模型二为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_1(k+1) = (\mathbf{I} + \epsilon \mathbf{A}_{d11}) \mathbf{x}_1(k) + \epsilon \mathbf{A}_{d12} \mathbf{x}_2(k) + \epsilon \mathbf{B}_{d1} \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{x}_2(k+1) = \mathbf{A}_{d21} \mathbf{x}_1(k) + \mathbf{A}_{d22} \mathbf{x}_2(k) + \mathbf{B}_{d2} \mathbf{u}(k) \end{cases} \quad (1.7)$$

其中, $0 < \theta \leq 1$ 。

① 稳定性分析

目前,非时延标准线性离散奇异摄动系统的研究处于初步阶段,其稳定性分析方法主要有频域法和时域法。频域法有 Nyquist 图法^[73]和 Guardian 映射多项式^[74]计算摄动参数稳定上界。时域法主要为基于临界稳定判据的摄动参数稳定上确界求解法^[75-77]。针对非标准离散奇异摄动系统,文献[78]在对策论框架下,采用 LMI 方法研究其稳定性问题,得到了两种摄动形式稳定的充要条件,并将结果推广到了 2-D 情形。

② 控制器设计

相对连续奇异摄动系统控制研究而言,离散奇异摄动系统控制问题的研究较少,基于 Lyapunov 函数的控制方法主要有:标准线性离散奇异摄动系统的调节器问题^[79]、基于 LMI 方法的鲁棒 H_∞ 状态反馈控制器设计^[80]、非标准线性离散奇异摄动系统的二次型调节^[81]以及观测器设计^[82]和保性能控制问题^[83]等。文献[78,84]在对策论框架下,利用 Delta 算子,提出了可统一处理连续与离散情形的控制器设计方法。对于摄动参数稳定上界问题,文献[85]研究了 H_∞ 控制问题,并给出求解摄动参数稳定上界的方法;文献[86]得到了状态反馈 H_∞ 控制器存在的条件,并提出摄动参数的上界可以大于 1 的新结果,从而扩大了其应用范围;文献[87]则研究了一种混合 H_2/H_∞ 次优状态反馈控制器设计问题。

1.2.2 经典非线性奇异摄动系统

由于线性奇异摄动模型无法描述被控系统的非线性特性,学者们转而研究基于经典非线性奇异摄动模型的控制问题。针对非线性奇异摄动系统的稳定性分析问题,相继提出复合 Lyapunov 函数法^[88]、基于二次型 Lyapunov 函数的复合 Lyapunov 函数法^[89]以及向量 Lyapunov 函数法^[90]等。在上述研究的基础上,进一步研究了系统

参数存在不确定性的鲁棒稳定性及状态反馈控制问题^[91]、基于 S-过程和 LMI 方法的系统受非线性时变摄动干扰下的二次可镇定性^[92]与非线性 PI 鲁棒镇定问题^[93]。基于经典非线性奇异摄动模型的早期控制方法主要为基于广义分解法的最优控制^[94]、Riccati 方程法处理 H_∞ 控制问题^[95, 96]以及基于区域极点配置的不确定性奇异摄动系统动态输出反馈 H_∞ 控制,然而上述研究对性能指标的优化只是局部的。自 80 年代中期,积分流形法^[98-100]一度成为研究非线性奇异摄动系统控制的热点,但大都集中在快执行器驱动型系统,而且对系统结构的假设较多。此外,文献[101]初步研究了非线性离散奇异摄动系统的二次型调节问题。

总之,传统建模与控制法具有对系统结构假设多、推导过程复杂以及难以实现等缺点,研究成果多数限于仿射非线性奇异摄动系统。另外,目前研究主要集中于连续时间非线性奇异摄动系统的研究,针对离散时间情形的研究较少。

1.2.3 模糊奇异摄动系统

模糊奇异摄动建模与控制法是融合模糊逻辑理论与奇异摄动技术,研究非线性奇异摄动系统的分析与控制的方法,其核心思想是针对被控对象非线性奇异摄动系统,建立含有慢、快变量的模糊奇异摄动模型,从而设计摄动参数无关或有关的控制器。目前,采用此类方法研究的非线性奇异摄动系统,统称为模糊奇异摄动系统。由于摄动参数的存在,模糊奇异摄动系统的分析与控制无法直接应用常规模糊系统理论与方法,否则将遇到摄动参数引起的数值求解中的病态问题。因此,模糊奇异摄动系统分析与控制方法成为研究热点。

1. 连续时间模糊奇异摄动系统

孙富春、刘华平等首次提出“模糊奇异摄动系统”概念,并先后研究模糊奇异摄动系统的稳定性分析与状态反馈 H_∞ 控制、静态输出反馈 H_∞ 控制^[102],基于同伦迭代 LMI 算法的 H_∞ 控制^[103]、部分状态反馈控制器设计^[104]等。然而,初值的选取直接影响迭代算法的收敛性,而目前还没有选择合适初值的方法,因此迭代 LMI 方法具有一定的保守性。文献[105, 106]提出基于极点配置的动态输出反馈 H_∞ 控制和 H_∞ 滤波的方法。文献[107, 108]分别提出直接求解 LMI 的非时延和时延模糊奇异摄动系统 H_∞ 滤波方法。文献[109, 100]研究 H_∞ 滤波和 H_∞ 控制问题,并通过广义特征值法得到摄动参数上确界。但是,设计过程中需选择 5 个权重参数,故具有一定的保守性。值得一提的是上述研究成果均与摄动参数 ϵ 无关,且同时适用于标准、非标准两种非线性奇异摄动系统。文献[111]研究了具有参数不确定性、含饱和和执行器等系统的多目标鲁棒控制问题。文献[112]考虑了多时标非线性系统在模型参数部分或完全未知情况下的跟踪控制问题,提出模糊奇异摄动系统自适应控制理论与方法,并将其用于带挠性附件航天器和柔性机械手等多时标系统。

2. 离散时间模糊奇异摄动系统

较之连续模糊奇异摄动系统,离散模糊奇异摄动系统的研究较少。针对具有快采样的非标准离散模糊奇异摄动系统的研究结果有基于迭代线性矩阵不等式方法的

稳定性分析与综合^[102],考虑系统参数不确定性的状态反馈模糊控制^[113]等。针对具有慢采样率的标准离散模糊奇异摄动系统,文献[114, 115]研究状态反馈 H_∞ 控制问题,并提出一种改善 ϵ 上界的办法,通过求解一组与无关的 LMIs,获得控制器增益。但此方法未考虑系统参数存在不确定性问题。文献[116]采用谱范数方法研究具有系统参数不确定性的 ϵ 无关状态反馈鲁棒镇定问题。较之文献[115, 116]的结果,文献[117]能够获得较大的 ϵ 上确界,而且可以适用于确定性和不确定性两种离散模糊奇异摄动系统。文献[118]采用谱范数方法研究两种形式的标准离散模糊奇异摄动系统,分别提出 ϵ 相关状态反馈控制器设计方法,得到 ϵ 的上界大于 1 的结论。

1.3 奇异摄动技术应用

随着航空航天领域、机器人领域、电力系统和过程控制等朝着高精度、高可靠性和高效率的方向发展,奇异摄动建模理论与控制方法被广泛应用于上述领域,提高其控制性能。

在航空航天领域,文献[30, 119]论述了奇异摄动技术在航空航天控制、导航制导方面的应用,如导弹加速度控制、F15 飞机飞行轨迹指令跟踪控制以及 F-8 飞机径向动力学 H_∞ 控制等。文献[120]结合奇异摄动技术与反馈线性化方法研究了滑翔制导问题。在机器人领域,文献[121]采用慢流形的方法研究移动机器人的控制问题。针对柔性机械臂研究的代表性工作包括正实控制^[122]、鲁棒控制^[123]、滑模控制^[124]以及机械臂的遥操作^[125]等。

在电力系统控制领域,奇异摄动技术被应用于功率因数转换器^[126],电力系统稳定性分析^[127],交直流混合电力系统的建模与控制^[128]及公交车供电系统动态分析^[129]等。

在过程控制领域,文献[130]研究蒸汽锅炉系统奇异摄动建模问题,文献[131]综合考虑农作物生长过程和温室动力学过程影响,采用奇异摄动方法研究温室气温最优控制,获得较好的控制性能。

在制造业,文献[132]考虑了产量计划问题,提出基于奇异摄动技术的最优控制律,抑制施加在资源容量和需求上的随机干扰。

随着各领域对复杂控制系统的高精度、高可靠性以及高效率要求的不断提升,在复杂系统分析与控制研究中,奇异摄动建模与控制技术必将发挥越来越大的作用。以下四个方向则可能成为奇异摄动控制领域未来的研究重点。

(1) 考虑被控系统的不确定性、时延、多时标及非线性并存特性,在统一模型框架下研究非线性奇异摄动系统的高精度控制问题。

(2) 随着数字式控制系统的广泛应用,离散 SPSs 的研究成为必然,而目前这方面的研究较少。

(3) 计算机技术和通信技术的飞速发展,使网络引领控制系统结构变化,通信网络代替传统控制系统的点对点结构越来越普遍。然而奇异摄动系统的网络化控制研

究尚处于初步阶段,针对奇异摄动系统的病态动力学特征,提出切实可行的网络化控制方案是今后进一步研究的重点之一。

(4) 在过程控制领域,具有奇异摄动系统特征的系统很多,而目前奇异摄动技术在该领域的应用成果并不多见。随着过程控制系统控制精度指标的不断提高,如何开发出适合过程控制系统特点的奇异摄动建模与控制技术是值得探讨的方向。

1.4 本书的主要内容

本书主要介绍模糊奇异摄动建模与控制方法,此方法主要解决具有非线性和多时标并存特性的复杂系统的高精度控制问题。本书的篇章结构如下:

第1章主要介绍模糊奇异摄动控制理论的提出及含义、奇异摄动系统理论在数学领域与控制领域中的国内外研究现状、奇异摄动技术的应用以及本书的篇章结构。

第2章主要探讨非时延和时延 Takagi-Sugeno(简记为 T-S)模糊模型描述形式、非线性系统的 T-S 模糊建模方法、基于 T-S 模糊模型的控制器设计方法,通过仿真实例说明了非线性系统的 T-S 模糊建模与控制器设计的具体过程,并给出仿真结果。

第3章详细介绍各类模糊奇异摄动模型的描述形式,如非时延连续时间模糊奇异摄动模型、时延连续时间模糊奇异摄动模型、非时延离散时间模糊奇异摄动模型、时延离散时间模糊奇异摄动模型等。探讨具有非线性与多时标并存特性系统的模糊奇异摄动建模方法,并通过柔性倒立摆系统为例说明非线性多时标系统模糊奇异摄动建模的具体过程。

第4章探讨非时延连续时间模糊奇异摄动系统的 H_∞ 控制,主要包括非时延连续时间模糊奇异摄动系统的稳定性分析与状态反馈 H_∞ 控制、动态输出反馈 H_∞ 控制、 H_∞ 滤波、静态输出反馈 H_∞ 控制,并分别通过仿真实例验证方法的有效性。

第5章探讨时延连续时间模糊奇异摄动系统的 H_∞ 控制问题,主要包括时延连续时间模糊奇异摄动系统的稳定性分析与状态反馈 H_∞ 控制、 H_∞ 滤波,并分别通过仿真实例验证方法的有效性。

第6章探讨非时延标准离散模糊奇异摄动系统的鲁棒控制问题,主要包括标准离散模糊奇异摄动系统的摄动参数有关模糊状态反馈鲁棒控制、模糊静态输出反馈鲁棒控制、基于不确定性标准离散模糊奇异摄动模型一的状态反馈鲁棒控制、基于不确定性标准离散模糊奇异摄动模型二的状态反馈鲁棒控制、基于不确定性标准离散模糊奇异摄动模型二的 ϵ 无关状态反馈鲁棒控制、基于不确定性标准离散模糊奇异摄动模型二的模糊静态输出反馈控制,并分别通过仿真实例验证方法的有效性。

第7章探讨具有状态时延特性的标准离散模糊奇异摄动系统的鲁棒控制问题,主要包括时延标准离散模糊奇异摄动系统的模糊状态反馈鲁棒控制、不确定性时延标准离散模糊奇异摄动系统的模糊状态反馈鲁棒镇定与静态输出反馈鲁棒镇定,并分别通过仿真实例验证方法的有效性。

第8章主要将模糊奇异摄动建模与控制方法分别应用于具有非线性和多时标并