

非线性广义系统的 鲁棒控制与状态估计

陆国平 周 磊 何永昌 肖小庆 著



科学出版社

非线性广义系统的 鲁棒控制与状态估计

陆国平 周 磊 著
何永昌 肖小庆

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统和全面地总结了作者近十年来在非线性广义系统的鲁棒稳定性、鲁棒镇定和状态估计方面的研究成果。主要内容包括双线性广义系统的全局镇定、利普希茨非线性广义系统的鲁棒二次稳定性和观测器设计、具有输入饱和的广义系统的反馈镇定、输出调节和集不变性分析、信道传输容量有限条件下广义网络系统的检测与镇定、具有马尔可夫数据包丢失的广义网络系统控制器设计、广义奇异摄动系统的鲁棒稳定性和滤波。

本书可作为高等学校自动化、系统工程、信息与计算科学、机械工程与自动化、通信工程、运筹学与控制论、计算机应用技术等相关专业的高年级本科生、研究生的教材和教学参考书,也可供从事相关专业教学和科研工作的高校教师、科技工作者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

非线性广义系统的鲁棒控制与状态估计/陆国平等著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-032265-4

I. ①非… II. ①陆… III. ①非线性-广义系统理论-鲁棒控制 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011) 第 179856 号

责任编辑:匡敏 余江 于红/责任校对:陈玉凤

责任印制:张克忠/封面设计:迷底书装

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2011 年 9 月第一次印刷 印张:15

印数:1—2 000

字数:300 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

广义系统是一类更一般并有着广泛应用背景的动力系统,它是描述与刻画实际系统的有利工具.许多实际的系统模型都需要用广义系统来描述,例如电力系统、经济系统、机器人系统、电子网络和宇航系统、大规模互联系统等.因此,广义系统比正常系统更具有广泛意义,其研究具有重要的理论和应用价值.由于广义系统比正常系统在结构上更复杂而富于新颖性,因此在理论研究上更加困难而具有挑战性.

目前,广义系统的研究已成为控制界的一个热点,广义系统理论的研究已取得了极大的进展,基于状态空间描述的正常系统的许多研究结果都被成功地推广到广义系统中,进一步丰富和完善了广义系统乃至整个线性系统理论.然而,我们注意到现有的许多研究成果主要是建立在线性广义系统的基础上,而关于非线性广义系统的鲁棒镇定与状态估计的研究成果还比较少.

近年来,在国家自然科学基金(60474076, 6087401, 61004027)和江苏省自然科学基金(BK2010275)等项目的资助下,我们研究团队开展了非线性广义系统的鲁棒控制与状态估计方面的研究,在双线性广义系统、利普希茨非线性广义系统,具有驱动器饱和、信道传输容量有限以及小摄动参数条件下,广义系统的状态估计和反馈控制等方面取得了系列成果.本书系统地总结了作者近年来在广义系统方面的最新研究成果,其中关于非线性广义系统解的存在性、信道传输容量有限条件下广义系统的检测与镇定、广义系统饱和控制的低增益设计方法以及广义奇异摄动系统鲁棒稳定性等问题的研究成果具有一定的原创性.

本书的部分研究工作得到了美国纽约大学姜钟平教授、香港城市大学冯刚教授、美国弗吉尼亚大学林宗利教授、南京理工大学徐胜元教授、哈尔滨工业大学高会军教授、东北大学张庆灵教授等的指导和帮助;在本书的编写过程中,得到了南通大学和江苏信息职业技术学院的大力支持.在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正.

陆国平

2011年6月于南通

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书的主要内容	7
1.4 符号约定	9
参考文献	9
第 2 章 双线性广义系统的全局镇定	15
2.1 引言	15
2.2 双线性广义连续系统的全局镇定	15
2.3 双线性广义离散系统的全局镇定	35
2.4 时滞双线性广义系统的全局镇定	43
2.5 小结	49
参考文献	50
第 3 章 利普希茨非线性广义系统的鲁棒稳定性	52
3.1 引言	52
3.2 连续时间利普希茨非线性广义系统的广义二次稳定性	52
3.3 离散时间利普希茨非线性广义系统解的存在性及其稳定性	61
3.4 离散时间利普希茨非线性时滞广义系统的广义二次镇定	68
3.5 小结	85
参考文献	85
第 4 章 利普希茨非线性广义系统的观测器设计	87
4.1 引言	87
4.2 利普希茨非线性连续广义系统观测器的设计	87
4.3 利普希茨非线性广义马尔可夫跳变系统观测器的设计	97
4.4 小结	110
参考文献	111
第 5 章 具有输入饱和的广义系统的反馈镇定	113
5.1 引言	113
5.2 含参数广义 Riccati 方程	114

5.3 具有输入饱和的广义系统的半全局反馈镇定	117
5.4 具有输入饱和的广义系统的全局反馈镇定	119
5.5 具有外界扰动和输入饱和的广义系统的同时镇定	120
5.6 数值例子	124
5.7 小结	128
参考文献	128
第 6 章 具有输入饱和的广义系统的输出调节	130
6.1 引言	130
6.2 具有输入饱和的广义系统的半全局输出调节	132
6.3 数值例子	135
6.4 小结	137
参考文献	137
第 7 章 具有驱动饱和的利普希茨广义系统的集不变性分析	138
7.1 引言	138
7.2 系统描述和预备引理	139
7.3 闭环系统稳定性和集不变性分析	140
7.4 状态反馈控制器设计和吸引域估计	143
7.5 具有驱动器饱和以及故障的鲁棒容错控制	144
7.6 数值例子	145
7.7 小结	148
参考文献	148
第 8 章 信道传输容量有限条件下广义网络系统的检测与镇定	150
8.1 引言	150
8.2 信道传输容量有限条件下广义离散网络系统的检测与镇定	151
8.3 信道传输容量有限条件下具有数据包丢失的广义离散网络系统的 检测与镇定	158
8.4 信道传输容量有限条件下具有数据包丢失的广义连续网络系统的 检测	164
8.5 信道传输容量有限条件下连续时间利普希茨非线性广义系统的 检测	171
8.6 小结	183
参考文献	183
第 9 章 具有马尔可夫数据包丢失的广义网络系统控制器设计	185
9.1 引言	185
9.2 控制器-执行器时延可测情形	185

9.3 控制器—执行器时延不可测情形	197
9.4 小结	202
参考文献	202
第 10 章 广义奇异摄动系统的鲁棒稳定性	204
10.1 引言	204
10.2 广义奇异摄动连续系统的鲁棒稳定性	204
10.3 广义奇异摄动离散系统的鲁棒稳定性	215
10.4 数值例子	219
10.5 小结	221
参考文献	221
第 11 章 广义奇异摄动系统的 H_∞ 滤波	223
11.1 引言	223
11.2 问题描述	223
11.3 H_∞ 性能分析	224
11.4 H_∞ 滤波器设计	227
11.5 数值例子	230
11.6 小结	231
参考文献	231

第1章 概 述

1.1 引 言

系统模型的状态空间描述法是自动控制理论研究中一种比较完善的描述方法,通常以微分方程或差分方程的形式对系统的模型进行描述. 该类描述方法的一种特殊形式为

$$\begin{aligned} E(t, x)\delta x(t) &= f(t, x(t), u(t)), \\ y(t) &= g(t, x(t), u(t)). \end{aligned} \quad (1.1)$$

其中, $x(t)$ 为系统的状态变量, 对于连续系统和离散系统, $\delta x(t)$ 分别表示微分运算 $\dot{x}(t)$ 和向前差分运算 $x(t+1)$; $u(t)$ 和 $y(t)$ 分别为系统的输入和输出; 矩阵 $E(t, x) \in \mathbf{R}^{n \times n}$. 式 (1.1) 描述了一类由若干个子系统相互关联而组成的整体系统模型, 矩阵 $E(t, x)$ 表示子系统间的关联规则. 当 $E(t, x)$ 非奇异时, 构成系统 (1.1) 的所有子系统均由微分方程 (差分方程) 来描述, 此时系统 (1.1) 为通常的状态变量所描述的系统; 当 $E(t, x)$ 为奇异矩阵, 即 $\text{rank}(E(t, x)) = r < n$ 时, 构成系统 (1.1) 的子系统同时由微分方程 (差分方程) 和代数方程来描述, 而且在大多数情况下, 代数约束是无法消除的, 或者消除代数约束将导致系统关键信息的丢失. 对于此类系统, 不同领域的学者有不同的称法. 例如, 在控制和数学研究领域称其为奇异系统 (singular systems) 或广义状态空间系统 (generalized state-space systems), 在工程和经济系统研究中称其为描述系统 (descriptor systems), 在数值分析中称其为微分代数系统 (differential-algebraic systems), 在电路系统研究中常称其为半状态系统 (semi-state systems).

当 $E(t, x)$ 为奇异时不变矩阵时, 系统 (1.1) 可写为

$$\begin{aligned} E\delta x(t) &= f(t, x(t), u(t)), \\ y(t) &= g(t, x(t), u(t)). \end{aligned} \quad (1.2)$$

特别地, 线性时不变广义系统通常表示为

$$\begin{aligned} E\delta x &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t). \end{aligned} \quad (1.3)$$

其中, A, B, C 和 D 均为适维常数矩阵; E 为奇异矩阵.

广义系统是一类比较广泛的系统, 是描述与刻画实际系统的有利工具. 自 1974 年由 Rosenbrock 提出以来^[1], 广义系统已广泛应用于飞行器模型、化学过程、电路

系统、经济系统、大规模互联系统以及电力系统等的数学建模. 目前, 广义系统的研究已成为控制界的一个热点, 并且有了丰富的研究结果. 另外, 广义系统也是研究正常系统的一种非常有效的处理方法, 如时滞系统的广义系统变换方法^[2, 3].

与正常系统相比, 广义系统不仅具有形式上的差别, 更重要的是具有如下的本质特性. 对线性时不变广义系统 (1.3) 来讲, 主要具有以下特性^[4]:

(1) 线性定常广义系统的解中不仅有指数项, 而且一般还有脉冲项及输入的导数项; 在离散情形下, 广义系统通常不具有因果性, 即广义离散系统的解不仅需要现在和过去的输入, 还依赖于未来的输入;

(2) 广义系统具有层次性, 一层为由微分方程或差分方程描述的动态特性, 另一层为由代数方程描述的静态特性, 而正常系统没有静态特性;

(3) 广义系统的传递函数阵通常包含多项式矩阵, 并具有无穷远极点;

(4) 正常系统的动态阶为 n , 而广义系统的动态阶为 $\text{rank}(E)$;

(5) 在系统结构参数扰动下, 广义系统通常不再具有结构稳定性.

因此, 广义系统在结构上比正常系统更加复杂, 广义系统特别是非线性广义系统在研究上更加困难, 也更富有挑战性.

1.2 国内外研究现状

到目前为止, 广义系统理论的研究已取得了极大的进展, 基于状态空间描述的正常系统的许多研究结果都被成功地推广到广义系统中, 已经建立了广义系统控制以及状态估计的基本理论, 进一步丰富和完善了广义系统乃至整个线性系统理论.

由于广义系统的本质特性, 在研究广义系统的反馈镇定和状态估计问题时, 不仅要考虑闭环系统的稳定性, 还要考虑其正则性以及脉冲模的消除. 所以, 对广义系统来讲, 其系统控制和状态估计问题要比正常系统复杂得多. 文献 [5] 研究了带有结构参数扰动的线性连续时间奇异系统的鲁棒稳定性. 其中, 扰动是一个时不变结构不确定矩阵, 这些矩阵是模有界的. 文献 [6] 考虑相同系统的鲁棒稳定性, 给出的判定准则较文献 [5] 具有更低的保守性. 在讨论线性广义系统的稳定性以及镇定问题时, 文献 [7] 提出了“广义二次稳定”和“广义二次可镇定”的概念, 其实质就是构造一合适的广义二次李雅普诺夫 (Lyapunov) 函数, 当此函数满足一定条件时就能保证广义系统稳定, 正则且无脉冲, 由此建立了线性广义系统稳定性分析和反馈镇定的矩阵不等式方法. 近年来, 矩阵不等式方法已广泛地应用于线性广义系统诸多控制问题的研究, 如广义连续系统镇定^[8, 9]、广义离散系统镇定^[10, 11]、鲁棒镇定^[11]、 H_∞ 控制^[12, 13]、滑模控制^[14] 等.

广义系统是正常系统的自然推广, 它可以看成是由动态子系统和代数约束子系统两部分组成的一类复杂系统. 对于线性广义系统, 主要考虑的是系统的正则性以

及脉冲模的消除问题,这是因为线性广义系统的解存在且唯一的条件是系统满足正则性.但对于非线性广义系统来讲,即使其线性部分是正则的且初始条件是相容的,其解也未必存在.非线性广义系统的控制不仅要保证闭环系统正则无脉冲以及渐近稳定性,更重要的是需要首先保证系统解是存在性唯一的.因此,一般非线性广义系统的研究更具有挑战性.

在假设系统解存在唯一的基础上,正常非线性系统的许多结果都相继推广到非线性广义系统中,如李雅普诺夫稳定性^[15]、最优控制问题^[13, 16, 17]等.在非线性的稳定性方面, Wu 于 1994 年建立了非线性广义系统的李雅普诺夫方法^[15].该方法将正常非线性系统李雅普诺夫稳定性理论成功地推广到非线性广义系统中,建立了非线性广义系统的李雅普诺夫稳定性、一致渐近稳定性的判定准则,并以此研究了系统的状态反馈镇定问题.当系统具有未知的扰动界时,文献 [18] 设计了自适应鲁棒控制律在保证闭环系统一致有界的同时也使得闭环系统的解在有限的时间内到达任意给定的区域.

为了得到系统解的存在性,文献 [19] 提出了非线性广义系统是指标 1(index one) 的概念,其实质是要求非线性函数在原点的雅可比矩阵是非奇异的,从而根据隐函数定理^[20]得到系统的解是局部存在的.假设非线性满足线性增长的条件并且关于快子状态增长率严格小于 1,文献 [21] 利用压缩映射原理得到了一类具有非线性扰动的广义系统全局解的存在性,建立了系统的界实引理,给出了保证系统无脉冲、渐近稳定且满足给定的 H_∞ 性能指标的鲁棒状态反馈和输出反馈控制器设计方法.但需要指出的是,在考虑非线性广义系统控制问题时,多数研究结果都是建立在假设系统解存在或者非线性函数满足一定的约束条件的基础上,尚未建立保证系统解存在和正则、无脉冲且渐近稳定同时成立的统一条件.

双线性系统是关于系统状态和控制输入分别都是线性的一类特殊的非线性系统.许多实际系统都可以建模成双线性系统模型,如生物种群模型、核裂变模型、电力系统模型等^[22].因此,研究双线性系统具有非常重要的理论和实际意义.在过去的几十年里双线性正常系统一直是国内外学者研究的热点问题之一,参见文献 [22~25].广义双线性系统作为一类特殊的非线性广义系统虽然已经有了一些基本的研究结果^[26~28],然而,如何设计广义双线性系统的状态反馈控制律使得相应的闭环系统解存在唯一且全局渐近稳定等一些具有挑战性的问题尚待解决.

另外,饱和非线性广泛存在于各类实际控制系统中,它的存在会降低系统的性能,在极端情况下可能会导致系统的不稳定.因此,输入饱和和受限问题越来越引起广泛关注.目前在控制系统的设计中主要有两类处理饱和的方法.一是“直接设计方法”,即考虑执行器/传感器饱和,直接进行控制律设计使得闭环稳定.比较有代表性的直接设计方法是 Lin 提出的低增益 (low-gain) 反馈方法^[29].但是,低增益反馈法导致饱和系统的收敛速度十分缓慢.为此,文献 [30] 提出了低-高增益反馈

的方法,该方法后来被用于处理多种控制问题,如全局镇定^[31]、输入解耦^[32]、输出调节^[33]等.对于输入饱和和受限的广义系统的研究,文献[34]首次提出了集不变性的概念并给出了相应的充分条件.该结果后来被推广到具有输入饱和的广义系统的 L_2 和 L_∞ 性能分析问题^[35].但是,由于事先很难确定饱和幅度以及饱和的非线性特性,因而直接设计方法在工程应用中有一定的困难.

另一类设计方法为“抗饱和(anti-windup)补偿器方法”.其设计思路是首先忽略执行器/传感器饱和,设计满足给定性能指标的控制器的,然后设计一抗饱和和补偿器以减弱饱和和非线性对系统性能的影响.此方法的特点是,当未发生饱和时,补偿器将不起作用,此时系统的设计性能不受饱和的影响.也就是说,抗饱和补偿器仅在发生饱和时产生作用,以保证系统在发生饱和时的稳定性和性能.最近,文献[36]系统地总结了近年来补偿器设计方法的研究成果,并在全局和半局部的框架下分别给出了抗饱和和补偿器综合的线性矩阵不等式方法.

近几十年来,状态估计或观测器设计已经被广泛用于控制和信号处理.该问题既有理论意义,在工程领域中也有许多实际应用,如电网分析、电力系统、经济系统、化学过程控制等(参见文献[37~40]及相关文献).近年来还发展了许多广义线性系统的状态估计的方法(参见文献[41~49]),如文献[50]通过非奇异变换将广义系统转换成等价的标准状态空间系统,用通常的方法设计了基于正常离散系统状态的观测器,进而得到广义离散系统的输入解耦观测器;文献[51]利用线性矩阵不等式方法考虑了含未知输入的时滞离散广义系统的观测器设计问题.

在非线性广义系统观测器设计方面也涌现了许多有意义的研究结果(参见文献[41, 42, 48, 49]).在讨论非线性广义系统的观测器问题时,文献[52]利用二次李雅普诺夫函数和 Riccati 方程方法给出了一类含未知输入的离散非线性广义系统的非线性观测器设计问题.利用线性矩阵不等式方法,文献[53]考虑了含未知输入的非线性广义系统全阶观测器设计问题.文献[44, 45]利用广义 Sylvester 方程方法给出了线性广义系统全阶和降阶观测器设计.通过坐标变换文献[41]得到了一般的非线性广义系统的局部渐近观测器,此外,还利用广义 Sylvester 方程提出了降阶观测器设计方法.设计程序虽然简单,但其条件依赖于坐标变换矩阵的选择(参见文献[41]中定理 3 的主要结果),通常情况下很难满足.在系统具有未知输入和故障时,文献[48]利用将系统分解为动态子系统和静态子系统的方法给出了一类连续非线性广义系统的全阶观测器设计.文献[49]通过将广义系统改写成受限流形上等价的显式系统和标准状态空间技巧,用拟线性形式研究了连续非线性广义系统的观测器问题并构造了全阶状态观测器.

滤波问题一直是线性系统状态估计研究的主要问题之一.在众多滤波研究结果中, Kalman 滤波问题要求外界干扰为高斯白噪声且具有已知的统计性质.而不同于 Kalman 滤波, H_∞ 滤波仅假设外界干扰的能量有界,其主要目标是设计一个信

号估计器使得输入噪声和估计误差的能量比值总是限制在某一给定的范围之内. 研究结果表明, H_∞ 滤波对未建模不确定性具有一定的鲁棒性. 线性系统的 H_∞ 滤波从 20 世纪 80 年代开始引起学者的广泛关注, 目前已形成多种方法, 如代数 Riccati 方程方法、线性矩阵不等式 (LMI) 方法等.

目前关于广义系统的 H_∞ 滤波已经有了一些重要的结果, 如文献 [54] 和 [55] 分别研究了广义系统的全阶和降阶 H_∞ 滤波问题, 利用线性矩阵不等式方法给出了滤波器存在的充要条件, 而滤波器的设计被转化为一个凸优化问题. 利用正常系统变换的方法, 文献 [56] 讨论了具有范数有界的不确定离散广义系统的鲁棒 H_∞ 滤波问题, 给出了当相应的线性矩阵不等式解存在时的滤波器的设计方法. 文献 [57] 考虑的是具有离散和分布时滞连续不确定广义系统的鲁棒 H_∞ 滤波问题, 同样是借助于线性矩阵不等式方法, 给出了滤波器存在的充要条件. 文献 [4] 系统地总结了近年来广义系统的鲁棒控制和滤波问题的研究成果.

广义系统的状态估计和反馈控制的研究虽然已得到极大的发展并在多个方面取得突破性的进展, 但是, 迄今为止有关广义系统的结论大多是在假设信号传输为无限精度的情况下获得的. 即假设观测器的输入和系统的测量输出完全相同, 控制器的输出和系统的控制输入完全相同. 然而, 在一些实际控制问题, 如网络控制系统中, 由于被控对象、观测器以及控制器分别分布在不同的地点, 测量信号和控制信号需要通过信道容量有限的通信网络进行传输, 从而信号传输的精度是有限的. 因此, 基于无限传输精度基础上所得的结果不适用于某些实际的控制问题. 所以, 为了广义系统理论能够在工程实践中得以有效的应用, 同时也为了进一步完善广义系统理论, 研究信道传输容量有限条件下广义系统的检测与镇定问题就显得十分必要.

事实上, 信道传输容量有限条件下正常系统的检测和控制问题已经是当前网络控制研究的一个热点问题[58], 基于网络的系统控制理论和应用研究取得了飞速的发展, 已在电力系统、大型工业过程控制系统以及航天航空系统等领域获得了广泛的应用[40]. 在网络控制系统中, 如何在信道传输容量有限条件下进行信息的量化、编码和解码已成为网络控制研究中需要解决的关键问题. 目前, 信道传输容量有限条件下信息的量化主要有以下两类方法.

(1) 无记忆量化方法, 也称为静态量化. 给定一个线性时不变被控系统, Delchamps 从定性而非定量的角度出发, 将信号的量化看做原始信号的具有有限量信息的估计, 证明了任何线性时不变控制律都不能保证闭环系统的渐近稳定性[59]. Ishii 等[60] 针对对象为线性时不变系统, 设计了两个量化器, 建立了量化器模型. 文献 [61] 研究了带有量化反馈的离散时间单输入, 单输出线性时不变系统的二次镇定问题, 提出了对数量化器模型, 给出了最粗糙的量化精度与反馈系统稳定性之间的关系. Fu 和 Xie 在文献 [62] 中从传统鲁棒控制理论角度出发, 建立了对数量化器的反馈系统稳定性的等价表示, 并研究了对数量化反馈系统的性能. 最近的一些研究对

文献 [62] 的结果进行了改进和推广, 如文献 [63] 的依赖于量化器参数的李雅普诺夫函数的稳定性分析, 基于自适应控制方法的对数量化器^[64, 65], 基于绝对稳定性的 Tsytkin 李雅普诺夫函数方法的量化反馈系统稳定性分析^[66]、保成本控制^[67]等. 上述量化器的共同特点是具有时不变特性, 并且具有无限 (可数多个) 的量化水平.

(2) 综合考虑系统状态与量化反馈控制器而得到的动态和时变的量化器, 称为动态量化^[68~72]. 其中, 比较有代表性的工作如基于 “zoom out” 和 “zoom in” 思想的一致动态量化器^[70] 以及基于动态比例调整增益的有限水平对数量化器^[68, 69]. 动态量化反馈的优点是可以动态地刻画量化水平, 使得吸引域增大和状态极限环减小, 但目前大部分动态量化反馈由于缺乏有效的控制策略致使系统状态响应较差并且很难应用于实际问题^[62].

此外, 许多实际系统都会因系统元件的故障、参数的变化、各子系统间关联的改变、环境条件的突变、非线性系统操作点的突然改变等使得系统结构发生随机突变现象. 这种随机变化通常遵循马尔可夫 (Markov) 过程的变化规律, 因此可以利用马尔可夫跳变系统来进行具有此类特性系统的建模. 近年来, 马尔可夫跳变系统的稳定性、镇定性及滤波问题已经得到广泛研究 (参见文献 [48, 73~78]). 然而, 对于非线性广义马尔可夫系统状态估计问题的研究结果还比较少.

另外, 在一些工程问题的建模过程中经常会出现诸如小的时间常数、惯量、电导或电容等小摄动参数, 使得系统具有相当高的阶数并产生病态的数值特征. 分析奇异摄动系统稳定性的主要方法之一为快慢分解方法. 该方法由 Klimushev 在文献 [79] 中提出, 其主要结论是如果快、慢子系统均是稳定的, 则摄动参数必存在一个稳定上界, 当摄动参数在此范围内时, 奇异摄动系统都是稳定的. 快慢分解方法将奇异摄动系统的稳定性转化为讨论快、慢子系统的稳定性, 从而避免了由于摄动参数引起的病态问题. 但如何计算摄动参数的稳定上界是该方法的关键问题, 经典的方法有频域法^[80]、广义 Nyquist 图法^[81]、广义特征值方法^[82, 83] 等.

在奇异摄动系统的绝大部分研究中都假设原摄动系统为正常的线性系统或非线性系统, 文献 [84] 指出在奇异摄动系统中可能存在多个摄动参数, 而且原摄动系统可能为广义系统. 因此, 实际的广义系统也会含有小的摄动参数. 目前, 已经有学者开始这方面的研究并取得了一些研究成果. 此类系统在文献中也被称为奇异摄动微分-代数系统 (singularly perturbed systems of differential-algebraic equations)^[85] 或复杂奇异摄动系统 (complex singularly perturbed systems)^[86]. 具体来讲, 文献 [85] 考虑了该类系统的渐近稳定性和稳定半径, 基于系统参数矩阵代数结构的分析, 得到了摄动参数充分小时系统渐近稳定的充分条件以及稳定半径关于摄动参数的渐近表达式. 文献 [86] 研究了一类具有时滞的广义奇异摄动系统的鲁棒 D -稳定问题, 给出了系统正则、无脉冲且鲁棒 D -稳定的充分条件.

应该注意到, 系统的不确定性广泛地存在于实际的控制问题中. 因此, 鲁棒稳

定性是系统分析和设计中的一个基本要求. 不确定奇异摄动系统的鲁棒稳定性和鲁棒镇定问题已成为近年来的研究热点并已取得一定的进展, 如文献 [87~91] 研究了基于匹配不确定性的奇异摄动系统的鲁棒稳定性问题, 文献 [92, 93] 分别研究了基于非线性扰动的奇异摄动系统的鲁棒稳定和鲁棒镇定. 而关于具有时变非线性扰动的广义奇异系统的鲁棒稳定性尚未有研究结果报道.

以上简述了近年来有关广义系统的控制和状态估计方面的主要研究成果. 针对现有研究的不足之处, 本书将在以后章节中总结作者近年来在非线性广义系统方面的研究成果, 介绍双线性广义系统、利普希茨 (Lipschitz) 非线性广义系统以及在具有驱动器饱和、信道传输容量有限及小摄动参数条件下广义系统的状态估计和反馈控制等方面的内容.

1.3 本书的主要内容

本书介绍作者近年来在非线性广义系统的鲁棒控制与状态估计方面的研究成果, 具体内容安排如下.

第 1 章介绍本书研究工作的背景. 首先介绍广义系统的结构特征和应用背景, 然后介绍广义系统的鲁棒控制与状态估计问题的研究现状, 最后简要介绍本书的研究内容与所做的主要工作.

第 2 章介绍连续双线性广义系统的全局镇定问题. 利用李雅普诺夫理论和 LaSalle 不变原理构造状态反馈控制器得到闭环系统的解存在唯一且全局渐近稳定的充分条件. 利用 LaSalle 原理及隐函数定理解决时延双线性广义系统全局渐近镇定问题, 同时给出饱和状态反馈镇定控制器的设计方法.

第 3 章介绍在连续时间和离散时间两种情形下, 带有时变非线性扰动的广义系统解的存在唯一性及广义二次稳定性问题. 首先利用 S-procedure 引理得到连续时间情形下时变非线性扰动的广义系统解存在唯一的充分条件; 接着根据线性矩阵不等式技巧及凸优化方法得到系统广义二次稳定的充要条件. 其次由不动点定理得到离散时间情形下利普希茨广义系统的解存在唯一及指数稳定的充分条件. 最后利用 S-procedure 引理和线性矩阵不等式方法得到离散时间情形下时延非线性扰动广义系统广义二次稳定及广义二次镇定的充要条件, 所给出的条件均独立于系统矩阵的分解.

第 4 章介绍一类利普希茨广义系统的全阶降阶观测器设计问题. 两种类型的观测器设计可由统一的线性矩阵不等式结构进行描述. 观测器形式简单且容易计算. 接着介绍带有非线性扰动的连续时间广义马尔可夫跳变系统的观测器设计问题. 利用线性矩阵不等式技巧给出全阶和降阶观测器存在的充分条件, 所设计的全阶和降阶观测器使得估计误差在均方意义下全局指数稳定.

第 5 章介绍具有输入饱和的线性广义系统的反馈镇定以及同时反馈镇定问题. 首先研究含参数广义 Riccati 方程的解存在的充分和必要条件, 给出其解关于参数的渐近性质. 基于该渐近性质构造具有输入饱和的线性广义系统的低增益状态反馈控制律, 使得闭环系统是半全局渐近稳定的, 利用增益调节技巧得到系统全局渐近镇定反馈控制律. 同时, 当系统具有外界扰动时, 分别给出系统半全局和全局渐近镇定反馈控制律的设计.

第 6 章介绍具有输入饱和的广义系统的半全局输出调节问题. 利用含参数广义 Riccati 方程解的渐近性, 在未进行系统分解的基础上, 设计了基于状态反馈控制律以解决具有输入饱和的广义系统的半全局输出调节问题.

第 7 章介绍具有驱动器饱和的非线性广义系统集吸引不变性问题. 建立非线性广义系统饱和容许的反馈控制方法, 得到闭环系统解存在唯一且集吸引不变的充分条件. 将最大的吸引不变集和相应的状态反馈控制器转化为求解线性矩阵不等式优化问题.

第 8 章分别介绍信道传输容量有限条件下连续时间和离散时间广义系统的检测和镇定问题. 观测信号以及控制信号经过编码后通过信道容量有限的网络进行传输, 观测器和控制器只能接收到仅有有限位字节的编码信号. 利用一致量化方法和引入补偿项的技巧, 给出信道传输容量有限条件下广义系统的编码-解码-观测器以及编码-解码-控制器的设计, 并进一步给出具有数据包丢失的广义系统可检测和可镇定的充分条件.

第 9 章介绍控制器-执行器时延可测和控制器-执行器时延不可测两种情形下, 带有随机网络诱导时滞的离散时间广义网络控制系统的状态反馈控制器设计问题. 将传感器到控制器及控制器到执行器的时延建模成两个不同的马尔可夫链. 利用增广状态空间方法, 将闭环系统表示成具有两个模态的马尔可夫跳变广义线性系统, 得到闭环系统随机稳定的充要条件. 进一步地, 得到基于控制器设计的严格的线性矩阵不等式方法, 此方法不涉及系统分解.

第 10 章介绍连续时间和离散时间两种情形下广义奇异摄动系统的鲁棒稳定性问题. 所考虑的广义奇异摄动系统同时具有时变的非线性扰动和小摄动参数. 利用不动点定理和矩阵不等式技巧分别得到系统解存在唯一且全局鲁棒指数稳定的不依赖于摄动参数的统一条件, 从而避免数值计算的病态问题. 数值例子说明所得结果的有效性.

第 11 章介绍广义奇异摄动系统的 H_∞ 滤波问题, 即基于系统的可测量输出, 设计不依赖于摄动参数的广义系统形式的滤波器, 使得滤波误差系统容许且满足给定的 H_∞ 性能指标. 利用广义连续系统的界实引理和线性变换技巧得到 H_∞ 滤波器设计不依赖于摄动参数的线性矩阵不等式方法, 从而避免数值计算的病态问题.

1.4 符号约定

$\mathbf{R}^n, \mathbf{Z}^+$	n 维实向量空间, 正整数集;
$I_m(I)$	m 维 (适维) 单位矩阵;
$\ x\ $	x 的欧氏范数, 即 $\sqrt{x^T x}$;
$\ x\ _\infty$	x 的最大模范数, 即 $\max\{ x_i , 1 \leq i \leq n\}$;
W^T	矩阵 W 的转置;
W^{-1}	矩阵 W 的逆;
$\text{tr}(W)$	矩阵 W 的迹;
$\text{rank}(W)$	矩阵 W 的秩;
$W > 0 (W \geq 0)$	矩阵 W 对称正定的 (半正定的);
$W_1 > W_2 (W_1 \geq W_2)$	矩阵 W_1, W_2 对称且 $W_1 - W_2 > 0 (W_1 - W_2 \geq 0)$;
$\lambda_{\max}(W)$	矩阵 W 的最大特征值;
$\lambda_{\min}(W)$	矩阵 W 的最小特征值;
$\ W\ $	矩阵 W 的谱范数, 即 $\sqrt{W^T W}$;
$\text{He}(W)$	矩阵 W 是方阵且 $\text{He}(W) = W + W^T$;
$\text{diag}(\dots)$	分块对角矩阵;
*	对称分块矩阵中的对称分块.

参 考 文 献

- [1] Rosenbrock H H. Structural properties of linear dynamical systems. International Journal of Control, 1974, 20(2): 191–202.
- [2] Fridman E, Shaked U. An improved stabilization method for linear time-delay systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47: 1931–1937.
- [3] Fridman E, Shaked U. Delay-dependent stability and H_∞ control: constant and time-varying delays. International Journal of Control, 2003, 76: 48–60.
- [4] Xu S Y, Lam J. Robust control and filtering of singular systems. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- [5] Fang C H, Chang F R. Analysis of stability robustness for generalized state-space systems with structured perturbations. Systems & Control Letters, 1993, 21: 109–114.
- [6] Chou J H, Liao W H. Stability robustness of continuous-time perturbed descriptor systems. IEEE Transactions on Circuits System I, 1999, 46: 1153–1155.
- [7] 徐胜元. 广义不确定系统的鲁棒控制. 南京理工大学博士学位论文, 1999.

- [8] Xia Y, Shi P, Liu G P, et al. Robust mixed H_2/H_∞ state-feedback control for continuous-time descriptor systems with parameter uncertainties. *Circuits Systems and Signal Processing*, 2005, 24: 431–443.
- [9] Xia Y, Boukas K, Shi P, et al. Stability and stabilization of continuous-time singular hybrid systems. *Automatica*, 2009, 45: 1504–1509.
- [10] Xia Y, Zhang J H, Boukas E, et al. Control for discrete singular hybrid systems. *Automatica*, 2008, 44(10): 2635–2641.
- [11] Xu S, Yang C, Niu Y, et al. Robust stabilization for uncertain discrete singular systems. *Automatica*, 2001, 37: 769–774.
- [12] Masubuchia I, Kamitaneb Y, Oharac A, et al. H_∞ control for descriptor systems: A matrix inequalities approach. *Automatica*, 1997, 33: 669–673.
- [13] Xu S, Yang C. H_∞ state feedback control for discrete singular systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45: 1405–1409.
- [14] Wu L, Ho D W C. Sliding mode control of singular stochastic hybrid systems. *Automatica*, 2010, 46(4): 779–783.
- [15] Wu H S, Mizukami K. Stability and robust stabilization of nonlinear descriptor systems with uncertainties//*Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, FL, USA 1994, 3: 2772–2777.
- [16] Jonckheere E. Variational calculus for descriptor problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1988, 33: 491–495.
- [17] Glad T, Sjoerg J. Hamilton-Jacobi equations for nonlinear descriptor systems// *Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis, Minnesota, USA, 2006: 1027–1031.*
- [18] Xin J, Xu Q W, Jia T H, et al. Adaptive robust control schemes for a class of nonlinear uncertain descriptor systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2000, 47: 957–962.
- [19] Wang H S, Yung C F, Chang F R. H_∞ control for nonlinear descriptor systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47: 1919–1925.
- [20] Dolezal V, Shankar S. A local implicit function theorem and application to systems of differential equations. *Theory of Computing Systems*, 1985, 18: 251–256.
- [21] Guo L, Malabre M. Robust H_∞ control for descriptor systems with non-linear uncertainties. *International Journal of Control*, 2003, 76(12): 1254–1262.
- [22] Mohler R R. *Nonlinear systems: Application to Bilinear Control*. EngLewisood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
- [23] Chen M S. Exponential stabilization of a constrained bilinear system. *Automatica*, 1998, 34(8): 989–992.
- [24] Chen M S, Tsao S T. Exponential stabilization of a class of unstable bilinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(5): 989–992.