

关联大系统的分散鲁棒控制

谢永芳 桂卫华 陈 宁 蒋朝辉 著



科学出版社

关联大系统的分散鲁棒控制

谢永芳 桂卫华 陈 宁 蒋朝辉 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书总结了作者及其团队 20 年来从事分散鲁棒控制领域的研究工作,内容涉及不确定性关联系统的分散鲁棒稳定化、分散鲁棒 H_∞ 控制,不确定性关联时滞大系统的分散鲁棒镇定、分散输出跟踪控制、无源化控制和时滞相关分散鲁棒 H_∞ 控制以及奇异关联系统的分散鲁棒控制等,并以电力系统的分散控制和锌湿法冶炼浸出过程分散 H_∞ 鲁棒控制为例,阐述了分散鲁棒控制的应用。书中着重阐述了如何用线性矩阵不等式方法研究这些关联系统的分散控制问题,给出了关联系统分散鲁棒控制器的存在条件、构造方法和求解算法。

本书可作为高等院校控制科学与工程学科高年级本科生和研究生学习的参考书,也可供自动化控制以及相关领域的广大工程技术人员与科研工作者自学和参考。

图书在版编目(CIP)数据

关联大系统的分散鲁棒控制 / 谢永芳等著. —北京: 科学出版社, 2016.12
ISBN 978-7-03-051301-4

I. ①关… II. ①谢… III. ①多关联系统-鲁棒控制 IV. ①TP271
②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 314832 号

责任编辑: 张海娜 纪四稳 / 责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 蓝正设计

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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2016 年 12 月第一次印刷 印张: 21 1/2

字数: 430 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

分散控制是大系统理论中的一个重要分支,是解决复杂系统和大系统控制的一种有效理论和方法。由于工况变化、外部干扰和建模误差,不确定性在实际关联系统中广泛存在。所谓分散鲁棒控制是指只利用各子系统的信息进行分散化控制,同时保证关联大系统在不确定性条件下维持稳定性和某些期望性能。关联系统的分散鲁棒控制已成为国内外研究的重要课题。

本书是作者所在团队在分散控制领域近 20 年研究工作的系统性总结,由 8 章构成。第 1 章主要介绍分散控制的概念,回顾不确定关联大系统、不确定时滞大系统以及不确定奇异大系统分散鲁棒控制的发展,给出线性矩阵不等式(LMI)的概念、Schur 补引理和有界实引理;第 2 章研究满足匹配条件和数值界两类不确定性关联大系统的鲁棒稳定化控制器设计问题和关联 Lurie 控制大系统的参数绝对稳定性问题,给出相应的状态反馈控制器设计方法;第 3 章分别讨论不确定性关联时滞大系统的时滞无关和时滞相关分散鲁棒镇定问题,给出分散鲁棒镇定判据,并推广到具有分离变量的非线性关联大系统时滞相关局部分散鲁棒镇定;第 4 章探讨关联时滞系统的分散无源化控制和输出跟踪控制问题,采用分散控制思想研究时滞线性关联大系统的无源性、控制器的存在性和具体构造方法,给出两类不确定性关联时滞线性大系统渐近跟踪给定参考输入的条件;第 5 章研究不确定性关联大系统的分散鲁棒 H_∞ 控制问题,给出分散 H_∞ 、 H_2/H_∞ 状态反馈控制器的参数化定理,提出直接 LMI 和迭代 LMI 两种控制器设计方法,阐述分散输出反馈 H_∞ 控制器参数化构造方法,研发求解分散输出反馈 H_∞ 控制器的同伦迭代 LMI 算法,阐述基于状态观测器的分散鲁棒 H_∞ 控制器设计方法;第 6 章主要研究关联系统的时滞相关分散鲁棒 H_∞ 控制问题,利用 Lyapunov-Krasovskii 泛函与时滞积分矩阵不等式给出一类线性关联系统存在分散状态反馈鲁棒 H_∞ 控制器及非脆弱 H_∞ 控制器的时滞相关的充分条件,讨论一类不确定关联非线性系统的时滞相关分散状态反馈鲁棒 H_∞ 控制器存在条件;第 7 章主要分析奇异关联系统的分散鲁棒控制问题,阐述不确定性关联奇异大系统时滞相关分散鲁棒容许控制器的设计方法、广义输出反馈分散鲁棒 H_∞ 控制器的构造与设计方法;第 8 章以电力系统的时滞相关分散励磁控制和锌湿法冶炼过程中浸出工序的分散 H_∞ 控制为例说明相关理论方法的应用。本书的第 1~3 章由谢永芳教授执笔,第 4 章和第 6 章由桂卫华教授执笔,第 5 章和第 8 章由陈宁教授执笔,第 7 章由蒋朝辉副教授执笔,

由桂卫华和谢永芳负责全书的统稿。

本书的主要结果引自作者及其所指导博士生的研究论文，并得到了国家创新群体科学基金项目“复杂有色冶金过程控制理论、技术与应用”(61621062)和国家自然科学基金面上项目“长流程生产过程多重大时滞系统特性分析和控制策略”(61074117)的资助，在此表示衷心的感谢。本书是团队长期团结合作的成果，在本书撰写过程中中南大学控制工程研究所各位老师给予了大力支持和帮助，在本书完成之际，向他们表示崇高的敬意。此外，本书还得到了武汉理工大学邓燕妮教授、中南大学刘碧玉教授以及中南大学控制工程研究所的部分在读博士生和硕士生的支持和帮助，在此深表谢意。

限于作者水平，书中不妥和疏漏之处在所难免，恳请读者和同仁不吝批评指正。

谢永芳 桂卫华 陈 宁 蒋朝辉

2016年10月1日

于中南大学控制工程研究所

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 分散控制的概念	1
1.2 不确定关联大系统分散鲁棒控制的发展	2
1.2.1 状态反馈的情形	4
1.2.2 输出反馈的情形	5
1.2.3 输出跟踪的情形	6
1.3 不确定时滞大系统分散鲁棒控制的发展	6
1.4 不确定奇异大系统分散鲁棒控制的发展	9
1.5 分散鲁棒控制的 LMI 方法	11
1.5.1 LMI 的概念	11
1.5.2 Schur 补引理和有界实引理	13
1.6 本书的内容	15
参考文献	16
第 2 章 不确定性关联系统的分散鲁棒稳定化	23
2.1 引言	23
2.2 满足匹配条件的不确定性关联大系统分散鲁棒稳定化	24
2.2.1 系统描述及引理	24
2.2.2 分散鲁棒稳定化控制器设计	25
2.2.3 仿真示例	28
2.3 数值界不确定性关联系统分散鲁棒稳定化	32
2.3.1 问题描述	32
2.3.2 分散鲁棒稳定化控制器设计	33
2.3.3 仿真示例	35
2.4 关联 Lurie 大系统的参数绝对稳定性	38
2.4.1 概述及问题描述	38
2.4.2 平衡点分析	41
2.4.3 稳定性分析	44
2.4.4 具有多胞型线性部分的 Lurie 大系统的参数稳定性条件	46

2.5 本章小结	50
参考文献	50
第3章 不确定性关联时滞大系统的分散鲁棒镇定	52
3.1 引言	52
3.2 满足匹配条件的不确定性关联时滞大系统分散鲁棒镇定	53
3.2.1 问题描述	53
3.2.2 分散鲁棒稳定化控制器设计	54
3.2.3 仿真示例	58
3.3 数值界不确定性关联时滞系统分散鲁棒镇定	63
3.3.1 分散鲁棒稳定化控制器设计	63
3.3.2 仿真示例	66
3.4 不确定性连续关联系统的时滞相关分散鲁棒镇定	67
3.4.1 问题描述与引理	67
3.4.2 标称未控系统的时滞相关稳定性条件	70
3.4.3 标称系统的时滞相关分散镇定	72
3.4.4 不确定关联系统的时滞相关分散鲁棒镇定	76
3.4.5 仿真示例	79
3.5 具有分离变量的关联非线性系统时滞相关分散鲁棒镇定	80
3.5.1 问题描述与假设	81
3.5.2 标称关联非线性系统的时滞相关分散镇定	82
3.5.3 不确定关联非线性系统的时滞相关分散鲁棒镇定	88
3.6 离散关联系统的时滞相关输出反馈分散鲁棒镇定	91
3.6.1 有关引理	91
3.6.2 不确定离散系统时滞无关输出反馈鲁棒镇定	92
3.6.3 不确定离散系统时滞相关输出反馈鲁棒镇定	95
3.6.4 离散关联系统时滞相关输出反馈分散鲁棒镇定	98
3.7 本章小结	105
参考文献	106
第4章 关联时滞系统的分散无源化控制和输出跟踪控制	107
4.1 引言	107
4.2 线性关联系统的时滞相关无源化分散控制	108
4.2.1 问题的描述与定义	108
4.2.2 时滞无关无源化分散控制器的设计	109
4.2.3 时滞相关无源化分散控制器的设计	112
4.2.4 仿真示例	118

4.3 具有分离变量的关联非线性系统时滞相关无源化分散鲁棒控制	119
4.3.1 问题描述	120
4.3.2 标称未控系统的时滞相关无源化分析	121
4.3.3 标称系统的时滞相关无源化分散控制器的设计	127
4.3.4 不确定关联系统的时滞相关无源化分散鲁棒控制器的设计	131
4.3.5 数值示例	134
4.4 不确定性时滞大系统的分散输出跟踪控制	136
4.4.1 满足匹配条件的不确定性关联时滞大系统分散鲁棒输出跟踪控制	136
4.4.2 数值界不确定性关联时滞大系统的分散鲁棒输出跟踪控制	140
4.5 本章小结	144
参考文献	145
第5章 不确定性关联大系统的分散鲁棒 H_∞ 控制	146
5.1 引言	146
5.2 数值界不确定性大系统分散 H_∞ 状态反馈控制	147
5.2.1 问题描述	147
5.2.2 分散鲁棒 H_∞ 状态反馈控制器设计	148
5.2.3 分散鲁棒 H_∞ 状态反馈控制器仿真验证	153
5.3 数值界不确定性大系统分散 H_∞ 输出反馈控制	158
5.3.1 问题描述	158
5.3.2 分散鲁棒 H_∞ 输出反馈控制器设计	159
5.3.3 仿真示例	164
5.4 数值界不确定性大系统分散 H_2/H_∞ 状态反馈控制	167
5.4.1 问题描述	167
5.4.2 分散鲁棒 H_2/H_∞ 控制器设计	169
5.4.3 仿真示例	173
5.5 不确定关联大系统鲁棒分散可靠 H_∞ 控制	176
5.5.1 问题描述	176
5.5.2 鲁棒分散可靠 H_∞ 控制器设计	178
5.6 一类状态、控制和关联均含有不确定性的的大系统分散状态反馈 H_∞ 控制	182
5.7 基于状态观测器的分散鲁棒 H_∞ 控制	185
5.7.1 问题描述	185
5.7.2 分散鲁棒 H_∞ 输出反馈镇定分析	187
5.7.3 分散鲁棒 H_∞ 输出反馈控制器的设计	190
5.8 本章小结	193

参考文献	194
第 6 章 关联系统的时滞相关分散鲁棒 H_∞ 控制	196
6.1 引言	196
6.2 线性关联系统的时滞相关分散鲁棒 H_∞ 控制	196
6.2.1 问题描述	196
6.2.2 时滞相关有界实引理	197
6.2.3 标称系统分散 H_∞ 控制器的设计	202
6.2.4 分散鲁棒 H_∞ 控制器的设计	207
6.2.5 数值示例	209
6.3 线性关联系统的时滞相关分散鲁棒 H_∞ 非脆弱控制	210
6.3.1 系统描述	211
6.3.2 时滞相关 H_∞ 性能分析	211
6.3.3 时滞相关分散 H_∞ 非脆弱控制器的设计	213
6.3.4 数值示例	217
6.4 一类非线性时滞关联系统的分散鲁棒 H_∞ 控制	218
6.4.1 问题描述	219
6.4.2 分散鲁棒 H_∞ 控制器的设计	220
6.4.3 数值示例	227
6.5 不确定关联系统的时滞相关分散 H_∞ 输出反馈控制	228
6.5.1 定常时滞大系统分散 H_∞ 输出反馈控制	228
6.5.2 时变时滞大系统时滞相关分散 H_∞ 输出反馈控制	235
6.6 本章小结	242
参考文献	243
第 7 章 奇异关联系统的分散鲁棒控制	245
7.1 奇异系统基本性质	245
7.2 奇异关联大系统时滞相关分散鲁棒容许性分析及其镇定	246
7.2.1 系统描述	247
7.2.2 标称未受控奇异关联大系统时滞相关分散容许	248
7.2.3 标称奇异关联大系统时滞相关分散容许	253
7.2.4 不确定奇异关联大系统时滞相关分散鲁棒容许	256
7.2.5 数值示例	257
7.3 基于广义输出反馈的奇异关联大系统分散鲁棒 H_∞ 控制	259
7.3.1 系统描述	260
7.3.2 标称奇异关联大系统的分散鲁棒 H_∞ 广义输出反馈控制	263
7.3.3 时变结构不确定性奇异关联大系统的分散鲁棒 H_∞ 广义输出反馈控制	273

7.3.4	数值界不确定性奇异关联大系统的分散鲁棒 H_∞ 广义输出反馈控制	277
7.3.5	仿真示例	281
7.4	基于广义输出反馈的奇异大系统时滞相关分散鲁棒镇定	286
7.4.1	系统描述	287
7.4.2	标称系统的时滞相关分散鲁棒镇定	288
7.4.3	不确定性奇异关联大系统的时滞相关分散鲁棒镇定	296
7.5	本章小结	298
	参考文献	299
第 8 章	分散鲁棒控制理论的应用	301
8.1	电力系统的分散鲁棒控制	301
8.1.1	模型描述	302
8.1.2	二机时滞电力系统的线性化和控制问题	309
8.2	锌湿法冶炼浸出过程分散 H_∞ 鲁棒控制	318
8.2.1	浸出过程的工艺分析	318
8.2.2	浸出过程数学模型的建立	321
8.2.3	浸出过程分散 H_∞ 鲁棒控制器的设计	324
8.2.4	控制系统研究	326
8.3	本章小结	330
	参考文献	330

第1章 绪 论

1.1 分散控制的概念

许多大系统分布地域广阔，集中化的控制方案往往难以有效实施，即使采用分解协调的方法减少了计算量，但从信息传输成本上考虑，对实际系统的信息结构往往有所限制，集中控制所提出的信息集中的要求也难以达到。此外，由于信息传输的滞后、可靠性等，也带来一系列信息的有效性和准确性问题。针对这种情况，在大系统的实践中出现了“分散化”(decentralization)的新概念。这里所说的分散化，是指信息分散化和控制分散化。分散化控制(decentralized control)是大系统理论中的一个重要分支，是解决复杂系统和大系统控制的一种有效理论和方法。图 1.1 比较了集中控制和分散控制在结构上的不同。

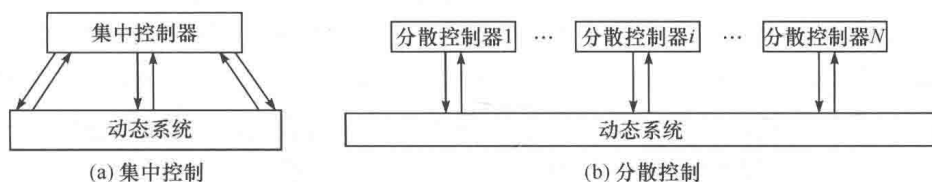


图 1.1 集中控制与分散控制

传统的反馈控制理论指出，无论是线性二次型最优控制，还是利用状态或输出反馈的极点配置，本质上都是集中型控制。其主要特征是系统的任一控制作用都要受到所有传感器输出信息的影响，如图 1.1(a)所示。这种以系统全部信息构成控制律的集中方式，对于很多实际系统，特别是对于空间上分布很广的动态大系统，是难以实现的。例如：

(1) 在电力系统中，各区域电网和不同的发配电站是由不同的区域控制器进行控制的。这些控制器根据本区域中各用户分布和用电计划按适当的规划，分散进行调度控制。各区域之间由于没有足够时间或者没有相应的设备，而不能实现信息的在线交换。

(2) 在过程控制系统中，对于运行在稳态的大型工业对象，局部跟随器的任务是把被调量调整到期望的设定点上，使系统保持稳定，并减少作用于对象的扰动的影响。对于这类系统，要得到一个集中的在线数据库，往往由于时间的限制，

在物理上难以实现,或者实现起来代价十分昂贵。即使有可能在某处收集到全部在线信息,为了减少在线计算量,提高系统故障时的可靠性,人们也宁可用分散的信息进行计算,并把控制分散化。

(3) 工业机器人等快速复杂的伺服机构要求对测量输入即刻做出反应,没有足够的时间利用全部信息进行计算。

此外,在电信网络、城市交通网、计算机通信网络、河流污染控制、多水库的洪水控制、经济系统等大系统中都可以找到许多这样的例子。对于这类实时性要求高、空间分布广的大系统,由于集中的反馈控制需要复杂的、有时是远距离的信息交换,因此难以满足可实现性、实时性、经济性、可靠性的要求。由此,自然而然地产生了信息分散化、控制分散化问题。

分散化控制的概念是在大系统的实践中新产生和发展起来的,其指导思想是利用分散的信息实现分散的控制。这不仅是控制理论发展的产物,而且是实现对大系统的在线反馈控制的现实需求。分散控制的立足点是在线反馈控制,实现的方式是信息分散化、控制分散化。在分散控制中,动态大系统被划分为许多子系统,它们分别由独立的控制器进行控制,每个控制器只观测系统的局部信息,并以此构成局部控制律。各个分散控制器在整个系统中具有平等的地位,没有上下级的从属关系,也没有一个控制器可以像协调器那样对整个大系统施加影响,因此控制是多中心的,如图 1.1(b)所示,这是分散控制区别于递阶控制的显著特点。

实现分散控制,不但减少了信息处理量,快速地实现反馈控制,提高了控制的实时性,而且在系统分布地域很广时,降低了数据通信的复杂性,提高了系统的可靠性,便于系统的实现。

由于信息分散及控制分散,在分散控制中出现了一些集中控制所没有的新问题,这主要表现在:

(1) 分散控制是在有约束的信息结构下进行的,这不同于可以利用系统全部信息的集中控制。这种“非经典的信息模式”(nonclassical information pattern)使集中控制中的某些结论不再成立。因此,在设计分散控制器时,必须考虑非经典信息模式带来的新特点。

(2) 由于控制系统是在分散情况下进行的,信息的短缺往往使集中时的最优性能指标难以达到。因此,在分散控制中,往往着眼于次优设计,或者从包含全部关联的总系统出发,按有结构约束来设计分散控制器。

1.2 不确定关联大系统分散鲁棒控制的发展

在实际系统中,由于环境条件或辨识不精确等因素,系统模型中常会有很多

不确定性。对不确定性的研究可以追溯到古典控制理论中,在古典控制理论中,系统鲁棒性的研究体现在对系统的某种性质或某个指标对参量变化的敏感程度的研究。对单变量控制系统设计时,总是设法保证系统有一定的稳定裕度,使得控制系统能在一定的建模误差和外界干扰的情况下仍能正常运行。20世纪60~70年代以来,随着计算机科学、数学的发展及工程实际对控制理论的推动,产生了基于状态空间描述的现代控制理论,它是以系统内部状态为研究对象的,而且将系统研究范围扩展到多变量系统,并能较好地解决多变量控制系统的分析和综合问题。但是,在实际工程应用中,控制对象往往存在着干扰,控制系统的元件也可能发生老化或损害等,于是鲁棒性问题开始引起控制学者的注意。现代控制理论中的LQG理论将系统的不确定性假设为一高斯白噪声过程,然而在许多实际问题中,人们仅知道噪声或干扰是属于某个集合而并不确知其统计特性,而且许多控制系统的不确定性并不满足LQG理论的苛刻假设,这就使得LQG理论无法在众多控制问题中得到应用。20世纪80年代以来,人们越来越深刻地认识到设计控制系统时,必须考虑不确定性。

分散鲁棒控制理论所要研究的问题包括分析和综合两方面。在分析方面研究的是当系统存在各种不确定性及外加干扰时,系统性能变化的分析,包括系统的动态性能和稳定性等;综合问题是指设计分散控制器,保证控制系统具有更强的鲁棒性,即当系统存在参数不确定性和未建模动态性时,闭环系统仍能保持稳定性,并保证一定的动态性能品质。

在实际控制系统中,往往存在各种不确定性,不确定性可以分为非结构不确定性和结构不确定性两大类。非结构不确定性,一般用传递函数模型来描述,主要有加法和乘法不确定性以及基于规范化互质分解描述的不确定性。含有非结构不确定性的系统,主要用频域分析法研究。

在实际控制对象中,往往是描述动态特性的方程式具有已知的形式,即模型的结构是已知的,但是方程式中具有不确定的系数,即模型参数的值是不确定的。一般地,包含在模型参数中的各种系数,由于测量误差、元器件老化或工作点变化和线性近似等,模型参数都包含不确定性。这种不确定性由于具有已知的结构,所以称为结构不确定性。

在不确定性系统的鲁棒控制中,不确定项的匹配条件^[1]扮演着重要的角色,众所周知,当匹配条件满足时,不确定性系统可稳定化。为了放松不确定项的匹配条件,人们做出了不少努力。目前不确定项的表达式主要有两类,一类是把不确定阵 Δ 表示为 $\Delta = DEF$,其中 D 、 E 为已知矩阵,矩阵 F 中的元素是Lebesgue可测的, F 满足 $FF^T < I$ ^[2];另一类是在矩阵 A 中,将其不确定项表示为 $\Delta A = \sum r_i A_i$,其中 r_i 为不确定参数,满足 $|r_i| < \bar{r}$ ^[3]。Gu等通过一个实例表明后一种表达式更具

一般性^[4]。基于以上两种不确定项的表达形式,已得到一些鲁棒反馈控制器存在的充分条件。

在实际线性大系统中,不确定项往往具有数值界表达形式^[5],可表示为 $|\Delta| < E$,即矩阵 Δ 中每个元素的绝对值小于矩阵 E 中相应元素,其中 E 为非负常数阵。不难看出这种表达形式与上述的第二类表达形式相类似。相比之下,不确定项的数值界表达形式不需要满足匹配条件,更具有一般性和实际意义。基于不确定项的数值界表达形式,可以去掉不确定项分解后所附加的一些约束条件,从而有可能得到更易于实现的分散鲁棒控制器。

1.2.1 状态反馈的情形

Yasuda 讨论了具有参数不确定性的关联系统的分散二次稳定问题^[6],说明了该问题可归于为每个子系统设计一个具有某个扰动水平的二次稳定化控制器,并可扩展到离散系统和非线性系统的情形。Gong 研究了一类不满足匹配不确定性条件的关联时变系统的分散控制问题^[7],将不确定性分为匹配和不匹配两部分,设计的分散控制策略可保证被控系统指数收敛到一个预定区域。Cheng 建立了 H_∞ 控制和关联大系统的分散控制器设计之间的密切关系^[8],提出利用局部代数 Riccati 方程的集合,设计了 H_∞ 局部控制器的综合方法,即一种迭代 Schur 算法。Wang 和 Cheng 用 Riccati 方程研究了不满足匹配条件的不确定大系统,设计了一种使闭环系统稳定的全状态观测器^[9]。Yang 和 Zhang 对含有时变有界不确定性关联大系统,提出了可分散二次稳定系统的充分条件^[10],根据不确定性的结构特征,给出分散控制器的设计方法。

刘新宇等提出了不确定线性组合系统存在分散鲁棒反馈控制器的充分条件^[5],系统中不确定项具有数值界,可不满足所谓的匹配条件,基于不确定项的数值界表达形式,针对不确定线性组合系统给出分散鲁棒控制律,其不确定项可以是时变的。此外还研究了状态、控制和关联均存在不确定性的关联大系统分散控制问题^[11],不确定性假定为结构已知和范数有界的,设计出的分散控制器能使整个闭环系统分散二次稳定。本课题组用线性矩阵不等式(LMI)方法研究了一类满足匹配条件的时变不确定性关联大系统,给出了其可分散状态反馈镇定的充分条件^[12],并将结果扩展到范数有界不确定性的情形^[13]。李忠海和张嗣瀛研究了一种分散 H_∞ 控制器设计方法^[14],将控制器的设计归结为解一组局部代数 Riccati 方程,同时将不确定项分成结构和有界两部分,设计的对应控制器也由两部分组成,以保证具有强互联不确定性的组合系统是具有干扰衰减指数的分散可稳的。徐兆棣和张嗣瀛研究了一类互联项与孤立子系统均含有范数界不确定性的非线性组合大系统的状态反馈鲁棒分散镇定问题^[15],设计出线性状态反馈鲁棒分散控制器,使闭环系统在

其平衡点处按指数渐近稳定,且鲁棒控制器具有全息结构。

1.2.2 输出反馈的情形

不确定性大系统分散输出反馈的主要分析方法是在集中不确定性系统的基础上发展而来的,其中以 Xie 等在 1992 年发表的论文^[16]最具代表性,设计方法是根据不确定性的表达形式,先考虑系统无控制输入时的系统稳定性,然后再考虑由分散输出反馈控制器与原系统构成的增广系统的鲁棒性能问题,这时不确定性系统可化成不含任何不确定性系统的增广系统,进而可用标准控制理论求解,最后归结为代数 Riccati 方程、不等式或 LMI 求解。

国外研究分散输出反馈控制问题的学者较多。Zhai 等考虑由 N 个子系统构成的不确定性大系统的分散二次稳定性问题^[17],通过引入两个参数集合,一个估计关联的强度,另一个标定子系统的系数矩阵,分散二次稳定性问题可以归结为在子系统水平上无不确定性的 H_∞ 控制问题,由代数 Riccati 方程的解可求出局部输出反馈控制器。Wang 等针对不确定性关联大系统,设计分散静态输出反馈律使闭环系统获得鲁棒稳定性和鲁棒 H_∞ 性能^[18],将该问题转化为无关联和不确定系统的标定 H_∞ 控制问题。Wang 等研究了含有三个子系统的关联系统的分散鲁棒稳定化问题,每个子系统包括非线性和/或时变不确定性和关联^[19],但三个子系统有一个没有直接控制,可以使用子系统间的关联作为桥梁来传递控制作用,使得分散控制得以实现。Chen 等研究了大系统含有时变范数界参数不确定性和外部干扰时的分散鲁棒 H_∞ 控制^[20],得到分散静态输出反馈控制器存在的充要条件,使闭环系统二次稳定,且满足 H_∞ 性能指标。Erwin 等应用 Popov 判据和拟牛顿法,研究了分散静态输出反馈的实结构奇异值控制,得到了具有固定结构的鲁棒控制器的综合方法^[21]。

国内尽管起步较晚,但也有相当多的成果。孙优贤和尚群立针对含有不确定性的线性内互联大系统,讨论通过分散状态反馈和分散动态输出反馈的鲁棒控制问题^[22],基于有界实引理分别导出了状态反馈和动态输出反馈的分散鲁棒 H_∞ 控制问题有解的充分必要条件,该条件及其问题的求解等价地转化成一个 LMI 和双线性阵不等式(BMI)的求解。王向东等讨论了一类不确定性内联大系统的二次稳定性^[23],给出了以 H_∞ 小增益条件表示的该系统二次稳定的充分必要条件,讨论了一类不确定内联系统的二次稳定性和分散反馈镇定问题,给出了用“集结”后子系统的一组 H_∞ 小增益条件表示的不确定内联系统二次稳定和可分散反馈镇定的充分条件,分散控制可通过求一组子系统阶数的 Riccati 不等式得到。用类似的方法,还讨论了不确定线性组合大系统的二次稳定性和联结稳定问题,得到了用关于低阶子系统的一组 H_∞ 模描述大系统稳定性的充分条件^[24]。王银河等研究了

一类相似组合系统的鲁棒分散输出反馈镇定问题^[25], 描述了两个控制系统间的输出反馈相似的概念, 利用这种相似结构设计出的分散输出反馈控制器可使组合系统得到鲁棒镇定。刘粉林等研究了不确定相似组合系统的鲁棒分散输出控制问题^[26], 不确定项存在于子系统内部及各子系统的互联项内, 可以是非线性或时变的, 且满足匹配条件, 所得的控制器保证受控系统按指数收敛于系统的平衡点或以平衡点为中心的最终吸引子。Scorletti 等利用系统的输入输出特性(耗散性)的概念, 将被控大系统变换成子系统之间的关联模型^[27], 对每个子系统设计了一个局部控制器, 使闭环子系统稳定, 并且满足输入输出特性, 从而保证整个大系统的稳定性和性能, 获得了基于 LMI 的分散输出反馈控制器存在的充分条件。

1.2.3 输出跟踪的情形

分散鲁棒输出跟踪是鲁棒控制中的重要问题, 它要求所设计的控制器确保系统在受到干扰的情况下, 其输出仍收敛到所给定的参考输入。Mao 等研究了一类不确定关联系统的分散鲁棒输出跟踪问题^[28], 不确定性假定为时不变, 并满足匹配条件, 通过定义每一个子系统的增广矩阵, 设计分散控制律, 使闭环系统以固定的收敛率跟踪常数输入。Ni 和 Cheng 在文献[28]的基础上, 研究了一类不确定性关联系统分散鲁棒输出跟踪问题^[29]。刘新宇等提出了不确定线性组合系统存在分散输出跟踪器的充分条件^[5], 系统中不确定项具有数值界, 可不满足所谓的匹配条件, 基于不确定项的数值界表达形式, 针对不确定线性组合系统给出分散鲁棒控制律, 系统中的不确定项是时不变的, 设计的分散跟踪器能使受控系统可渐近跟踪给定的参考输入。

本课题组应用 LMI 研究不确定性关联大系统的分散鲁棒输出跟踪控制问题^[30], 系统中不确定项具有数值界, 可不满足匹配条件, 基于不确定项的表达形式, 给出了存在分散控制鲁棒跟踪控制器的 LMI 条件, 在此基础上, 通过建立求解受 LMIs 约束的凸优化问题, 提出了具有较小反馈增益 LMI 设计方法, 使受控系统渐近跟踪给定的参考输入。陈兵等讨论了线性不确定组合系统的鲁棒分散输出渐近跟踪问题^[31], 基于 Lyapunov 方程正定解的存在性, 给出了输出反馈跟踪控制器的设计方法, 对于系统中所容许的不确定, 所设计的控制器均使系统的输出渐近跟踪所给定的参考信号, 同时系统的状态保持有界。

1.3 不确定时滞大系统分散鲁棒控制的发展

由于信息传输和测量的不灵敏性, 系统中常常会出现时滞, 具有关联滞后动态大系统鲁棒稳定化问题已为众多学者关注。通过许多学者的共同努力, 时滞

关联系统的分散鲁棒控制问题研究取得了许多研究成果。总体来看,研究工作的主体是系统的分散镇定这一基础问题,而对于其他控制目标的研究工作相对薄弱一些。

目前分散鲁棒镇定问题的研究大体上可以分为时滞线性关联系统镇定和时滞非线性关联系统镇定的研究。对于时滞线性关联系统的分散鲁棒镇定问题,由于系统结构和控制器结构都有较为统一的表达方式,以矩阵理论和方法为研究工具吸引了广大研究人员的关注。在工程应用方面,构造一个线性系统比构造非线性系统简单得多,因而也是实际工程当中应用最多的系统。在时滞线性关联系统分散鲁棒镇定方面的研究工作主要如下。

Lee 和 Radovic 研究了线性连续和离散关联时滞系统的分散镇定问题,采用局部无记忆状态反馈,没有考虑时滞对镇定的影响^[32]。Hu 也研究了这类系统的分散镇定问题,以 Riccati 方程形式给出了分散状态反馈和状态观测器存在的时滞无关充分条件,并说明文献[33]加在互联上的限制是不必要的^[34]。但是 Trinh 和 Aldeen 后来又证明了 Hu 的结果仅仅适合于输入输出的数目相等或大于状态数目的情形^[35]。Oucheriah 针对具有外部扰动、模型不确定参数的时变时滞和非线性输入的关联系统研究了其分散镇定问题,但在反馈控制器的设计中没有考虑时滞的影响^[36]。Xie 等研究了具有时滞的随机关联系统的分散鲁棒镇定问题,主要采用 LMI 方法,LMI 条件中不含有时滞信息^[37]。本项目组针对有数值界不确定线性关联时滞大系统,给出了存在时滞无关分散鲁棒控制器的 LMI 充分条件,在此基础上,通过求解凸优化问题,提出了具有较小反馈增益分散稳定化状态反馈控制律的设计方法^[38,39]。余昭旭和孙继涛针对关联矩阵的不同分解,建立了变时滞线性关联时滞大系统的分散镇定的充分条件^[40]。Xu 等针对具有未知时滞的关联系统,在一定关联分解情况下,建立了可由 LMI 表示的分散镇定条件,给出了分散局部无记忆状态反馈控制器设计方法^[41]。刘晓志等采用还原方法研究了一类具有多输入时滞及互联时滞的不确定关联系统的分散镇定问题^[42]。关新平等研究了一类离散时滞关联系统的时滞相关鲁棒分散镇定问题,通过构造性的差分格式,给出了鲁棒时滞上界的求解^[43]。

线性关联系统分散控制的研究,经历了系统从没有时滞到有时滞的过程,研究结果从时滞无关到时滞相关的过程。前者在模型上是一个进步,时滞在系统模型中,特别是关联系统模型中是必然存在的。后者是两个研究目标的相互补充,时滞无关的结果可以适应如慢变化工业过程的大滞后系统,但是在数学上难免给出的条件比较保守,时滞相关的结果能够避免保守性、能准确计算系统控制可以容许的时滞,但是对于大时滞的系统又是无能为力的。因而,在时滞无关和时滞相关的控制结论上不能简单地用数学条件的保守与否来衡量其意义。