



复杂系统自适应鲁棒控制

——基于模糊逻辑系统的分析设计

FUZA XITONG ZISHIYING LUBANG KONGZHI



王文庆 著



西北工业大学出版社

复杂系统自适应鲁棒控制

——基于模糊逻辑系统的分析设计

王文庆 著

西北工业大学出版社

【内容简介】本书是关于复杂系统分析与控制的一部专著，系统地总结了作者近年来的主要研究成果。书中针对一类具有代表性的非线性、不确定、复杂控制系统，采用 Lyapunov 方法与模糊逻辑系统相结合的手段，应用自适应控制思想，系统而全面地讨论了被控系统的状态反馈镇定、输出反馈镇定、状态观测器设计、输出跟踪控制设计，以及基于语言信息的复杂系统非精确建模与控制等问题，并采用结构化的分析设计思想，给出了被控系统的闭环控制结构图，以及设计结果验证算例（实例）的 Simulink 仿真结构图，理论分析与仿真试验紧密结合，易于在工程实际中应用。

图书在版编目（CIP）数据

复杂系统自适应鲁棒控制：基于模糊逻辑系统的分析设计/王文庆著. —西安：西北工业大学出版社，2005.10

ISBN 7-5612-2045-6

I.复… II.王… III.自适应控制：鲁棒控制 IV.TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 116420 号

出版发行：西北工业大学出版社

通信地址：西安市友谊西路 127 号 邮编：710072

电 话：029-88493844, 88491757

网 址：www.nwpu.com

印刷者：陕西丰源印务有限公司

开 本：850 mm×1 168 mm 1/32

印 张：6.5

字 数：134 千字

版 次：2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷

定 价：20.00 元



作者简介

王文庆，1964年生，1987年毕业于西安建筑科技大学，获工学学士学位；1993年在该校研究生毕业，获工学硕士学位；2003年毕业于西北工业大学系统工程专业，获工学博士学位；2004年进入西安交通大学控制科学与技术博士后流动站进行博士后研究工作。研究方向主要包括：复杂系统结构分析与控制，信息系统的分析、设计与开发等。

序

自 20 世纪 90 年代以来, 控制领域面对社会的发展及科学技术的进步, 提出了复杂系统的控制问题, 并进行了卓有成效的研究, 在许多领域取得了相当丰富的研究成果。但是, 目前在复杂系统控制的研究中, 尚没有形成完整的理论和系统的方法。复杂系统一般都具有系统结构的多层次性、子系统模型的多样性、相互关联的复杂性、目标的多重性、信息的不确定性, 以及由此决定的处理方法的多途径等特征。这些特有的复杂性, 迫使学者们更多地寻求解决问题的新方法、新途径。控制系统通常是基于系统的状态(含输出)信息精确可测进行分析设计和控制的, 但由于复杂系统本身的特点决定了它不可能得到全部的精确信息, 只能得到部分精确信息或定性的描述信息, 特别是在社会、经济和大型工业过程中, 传统的建模和控制方法无法实现对其动态行为进行分析与有效控制。在这些情况下, 寻求基于被控系统定性信息建立相应的描述性模型, 采用定性与定量相结合的方法来设计控制方案, 则是一种解决复杂系统控制问题的好思路。

在过去的 20 多年中, 模糊逻辑系统在控制领域中取得了一系列有影响的成果, 在工业领域的应用也获得迅速增长。虽然模糊控制成效显著, 但是对它的理论方面的结论, 仍然存在某些本质上的误解。比如, 模糊逻辑系统为什么会有好的控制效果, 它的固有结构究竟是什么, 等等。引起这些误解的一部分原因是模糊逻辑系统的研究经常采用仿真实验验证结论, 理论上缺少严密的数学分析过程。因此, 从根本上说, 用数学方法剖析模糊逻辑

系统的控制原理是消除那些误解的一种有效方法，同时这也有助于模糊逻辑系统理论向纵深发展。20 世纪 90 年代初，王立新首先利用严密的数学分析方法证明了一类 mamdani 型模糊逻辑系统具有万能逼近能力的结论，随后，其他一些类型的模糊逻辑系统的万能逼近性也陆续得到证明，这些结论有力地推动了模糊逻辑系统在控制领域的理论研究。

王文庆博士的工作属于利用模糊逻辑系统的万能逼近性分析和设计复杂系统控制的前沿性研究，尤其是在系统仿真分析和自适应控制的应用研究更是如此。关于复杂系统的控制设计的一个核心问题是如何处理复杂的互联项对控制效果的影响，特别是在对互联项的信息了解甚少的情況下，如何构造整个系统的稳定和跟踪控制器。王文庆博士提出的对不确定信息首先进行归一化处理，然后再利用模糊逻辑系统的逼近性和自适应思想相结合的方法，很好地处理了互联项信息的有效利用，特别是他巧妙地利用了代数分析的方法完成了相应的数学分析和证明，同时，对所涉及的控制算例建立了相应的 Simulink 仿真模型，使控制设计的抽象算法变得非常形象直观。

复杂系统的控制是控制界的一项长期研究任务，出版这方面的著作是非常有意义的。年轻的博士生和科技工作者历来都是科技队伍中最活跃和最富创造力的生力军，我们希望王文庆博士的工作能起到抛砖引玉的效果。

韩宗昭

2005 年 9 月

前 言

随着经济社会的快速发展，我们所面临的各类系统的规模越来越大，结构也越来越复杂，应用经典的控制理论来分析和设计这些复杂系统往往不能奏效。复杂系统的本质特征从定量上讲，其数学模型是高维、高阶的，具有多输入多输出，从定性上讲系统具有强非线性及结构与参数的不确定性，有复杂和多重的控制目标及性能指标，各子系统之间都存在强互联关系。为寻求解决这类规模大、复杂程度高的系统理论和方法，从 20 世纪 70 年代开始，大系统理论应运而生，人们开始探索复杂系统的控制理论与方法，使这一领域渐渐成为控制界研究的热点之一。

近 20 年来，有关这一领域的研究已经取得了许多研究成果。从这些研究成果中可以看出，复杂系统控制的难点在于有效地处理系统中的非线性、不确定性，特别是对于系统中互联不确定性的处理。已有的研究成果中大多都对不确定性做了较严格的数学假设，如“具有未知常数界”、“已知精确上界”等等，这些方法和手段以及其所得到的研究结论也各有优劣。不难看出，在这一研究领域里，目前尚无系统的理论和统一的、较为成熟的方法，特别是对于所得研究结论，在工程实用方面还有很大的差距。事实上，复杂系统的控制问题不可能存在一劳永逸的解决方案，亦不存在一般意义下的最优解，更不存在唯一的最优解。基于解析模型的控制方案，由于其设计结论直接与假设条件有关，势必导致条件敏感性；另一方面，各类非精确建模的控制方案，由于其

模型描述与实际问题存在的差别，造成“失之毫厘，差之千里”的结果也在情理之中。所以，寻求复杂系统的有效控制方案，需要综合集成定性与定量的分析思路，精确建模与非精确的技术手段，不拘泥于现有的、成熟的理论和方法。

模糊逻辑系统与模糊控制近年来发展非常迅速，由于模糊控制器具有充分利用语言信息和领域专家知识的特性，使得它在各类工农业过程控制中得到了广泛的应用；而模糊逻辑的万能逼近特性，则为各种非线性系统建模、复杂系统未知特性分析提供了理论依据。这方面的理论与方法在复杂系统鲁棒控制问题上的研究，也取得了许多有价值的成果。值得注意的是，在现有的利用模糊逻辑系统工具研究系统控制问题的研究成果中，许多成果要么是基于计算机仿真进行的，缺少必要的数学论证，要么是针对的系统模型过于简单，难于进一步推广到较复杂的系统情况。

本书内容是作者近几年来在复杂系统控制方面所做研究工作的总结，主要是作者在攻读博士学位及在博士后流动站期间完成的。全书共分8章：第1章绪论，简要介绍本书的研究背景；第2章作为基础知识，对本书使用的主要工具模糊逻辑系统进行了分析与描述；第3~6章针对较为一般的复杂系统，以控制目标及各类设计参数一致终极有界为目标，系统地进行了反馈镇定、状态观测器及跟踪控制器的分析设计，得到了一些有益的结论，并进行了仿真实验；第7章采用非精确建模的思想方法，提出应用信息库来作为描述被控系统动态行为的模型，在此基础上讨论了一类具有相似结构复杂系统的镇定控制器和跟踪控制器的设计问题，并进行了仿真实验；第8章对全书研究的内容做了简要总结。

在本书出版之际，我由衷地感谢我的博士生导师，西北工业

大学佟明安教授和西安交通大学韩崇昭教授，两位导师渊博的学识和对当代控制论的精辟分析，给了我巨大的启迪，为我成就学业指明了方向、奠定了基础。他们深刻而独特的思想方法，科学严谨的治学态度，以及对学术孜孜不倦的追求精神和宽容博大的胸怀，深深地影响着我，让我受益终身。

我真诚地感谢培养我的西北工业大学、西安交通大学及西安邮电学院的领导、老师及同仁，没有他们的大力支持与帮助就没有我今天的进步。我还要特别感谢西北工业大学王银河博士后、周宗锡博士、刘金星博士及高坚博士，与他们的交流讨论使我获益匪浅。衷心地感谢我的同学、妻子，西北工业大学赵平博士，她给予了我巨大的支持。感谢书中所引用、借鉴文献的所有专家学者。

本书只是作者在复杂系统控制领域研究的初步探索成果，加之作者水平有限，书中难免有不妥和错误之处，敬请广大同仁和读者批评指正。

王文庆

2005年9月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 复杂系统与复杂系统鲁棒控制研究概况	1
1.2 本书的主要内容及结构编排	5
第 2 章 模糊逻辑系统基础	8
2.1 模糊集合与模糊逻辑的基本概念	8
2.2 模糊逻辑系统的概念及分类	13
2.3 具有模糊产生器及模糊消除器的模糊逻辑系统的 描述与分析	17
第 3 章 复杂控制系统状态反馈镇定	28
3.1 引言	28
3.2 系统描述	29
3.3 状态反馈集中自适应鲁棒控制器设计	31
3.4 状态反馈分散自适应鲁棒控制器设计	42
3.5 一类具有相似结构的复杂系统自适应鲁棒控制器设计	53
3.6 仿真研究	62
第 4 章 复杂控制系统输出反馈分散镇定	86
4.1 引言	86
4.2 系统描述	87
4.3 输出反馈分散自适应鲁棒控制器设计	90

4.4 仿真研究	97
第 5 章 复杂控制系统自适应状态观测器设计	105
5.1 引言	105
5.2 系统描述	106
5.3 自适应状态观测器设计	109
5.4 仿真研究	118
第 6 章 复杂控制系统分散自适应跟踪控制器设计	126
6.1 引言	126
6.2 系统描述	127
6.3 分散自适应输出跟踪鲁棒控制器设计	131
6.4 仿真研究	142
第 7 章 复杂相似系统分散全息控制设计	151
7.1 引言	151
7.2 系统的相似性描述	153
7.3 匹配系数和模糊逻辑系统描述	155
7.4 稳定控制器设计	157
7.5 跟踪控制器设计	165
7.6 仿真研究	168
7.7 结论	174
第 8 章 总结与展望	175
参考文献	179

第1章 绪论

1.1 复杂系统与复杂系统鲁棒控制研究概况

1.1.1 复杂系统及其特性

随着科学技术与工农业生产的快速发展,在当今社会的各个领域,如工业、农业、能源、交通、水利、经济管理、生命科学及IT技术领域等,形成了各种类型的系统,其规模越来越大,结构越来越复杂,应用经典的控制理论来分析和设计这些庞大而复杂的大系统时,常常会遇到高阶、维数灾难等复杂问题。为寻求解决这类规模大、复杂程度高的系统的理论和方法,从20世纪70年代开始,大系统理论应用而生,人们开始探索对这类系统的控制。

这类大规模、复杂系统的各子系统之间都存在强互联关系,同时在子系统的外部还存在着不同层次的控制和管理系统,描述这类系统的数学模型都是高阶次的。研究、分析此类系统时,不能把它看成一个由简单系统组合而成的、高维数的整体进行设计,而是应将其分成多级(或多层)耦合的子系统,上级须对下级子系统间的关联进行协调,或者分散地为每个子系统设计一个考虑了与其他子系统关联的局部控制器,通过把处在同一级地位的各个子系统相互分离开来,使它们各自按着某种局部最优方式运行,而且一级系统能把这些子系统的工作协调起来,统一规划,达到

整体最优化目的。当然，对于高维问题，如果可能，首先对其进行各种形式的简化降阶是必要的，简化的关键就是要考虑和处理各子系统之间存在的关联耦合。

复杂系统的本质特征在于它的复杂性，从定量上讲数学模型是高维、高阶的，具有多输入、多输出；从定性上讲系统具有非线性、外部扰动、结构与参数的不确定性，有复杂和多重的控制目标和性能指标。具体地说，复杂系统一般具有以下特征：

(1)系统的维数很高，子系统的数目、变量的数量巨大。例如，研究一个省的经济模型就可能涉及成百上千个变量。

(2)系统具有多输入、多输出，同时存在多个不同目标，这些目标之间甚至是相互冲突的，需要用多目标准则进行决策和优化。例如，一个多级的生产计划系统，其各级子系统的目标之间就存在着相互冲突。

(3)非线性。这是复杂系统的一个重要特征，这些非线性动态行为，往往是由一定数量(或大量)非线性元件(或子系统)的组合及其相互作用而产生的，本质上不同于线性元件的组合及其相互作用。实际上，复杂系统中的非线性因素(内部及环境的)及它们之间的相互作用是形成复杂性的重要条件。例如，卫星的定位与姿态控制过程，机器人的运动控制过程等，只能采用表征大范围运动的非线性微分方程来描述。

此外，复杂系统中的分岔、混沌、奇异吸引子等动态行为，本质上也都是非线性的。

(4)不确定性。这是复杂系统中的另一个重要特征，例如复杂系统中部分子系统结构或参数的不确定性，子系统间耦合作用的不确定性及外部干扰的不确定性等。

(5)结构特殊。例如，自相似结构就是存在于许多复杂系统中的一种特殊结构，诸如社会行政管理系统、多个发电机组组成的大型电力系统、计算机互联系统等，这些系统在结构上都具有自相似性。

(6)系统地理范围上分布广。例如，河流污染的控制问题，大型的电网系统、Internet 系统等。

(7)系统的控制目标往往不可能实现最优。由于复杂系统中往往存在多个目标，且相互影响，导致控制目标只能达到“次最优”或“满意”的目的。

1.1.2 复杂系统鲁棒控制研究的概况

对于含有不确定的、非线性复杂系统的控制问题的研究，从20世纪60年代初就已开始。20世纪70年代初，大系统理论的创立，使这一领域渐渐成为控制界研究的热点。特别是近10年来，有关这一领域的研究已经取得了许多研究成果^[1-50]。参考文献[10-28]讨论了各类带有不确定、非线性、复杂控制系统的状态反馈鲁棒镇定问题；参考文献[9,28,132]引入现代微分几何理论将复杂系统进行了线性化处理，进而给出了鲁棒稳定性的若干判据；参考文献[21-24]讨论的是一类线性时变大系统，存在输入增益不确定和子系统关联不确定，并假设这些不确定具有未知常数界；参考文献[26-29]中使用LMI方法研究在系统结构、输入通道及互联项上存在不确定的一类大系统，要求不确定的界为非负元素组成的实常数阵；参考文献[40-46]研究的系统中带有时滞性，LMI方法是其主要手段，同样假设了系统中的不确定具有常数界；参考文献[47-53,71-78]则主要研究基于输出反馈的鲁棒稳定问题，

所获得的结论大多数都依赖于假设不确定性具有常数界或 Riccati 方程有解；参考文献[54,58]讨论了不确定系统的状态反馈 H_∞ 控制问题；参考文献[59-64]则使用了变结构方法来获得系统的鲁棒稳定性；参考文献[57,65-71,87]研究的是一类具有特殊结构——相似性结构——的复杂大系统的鲁棒镇定问题；参考文献[79-90]讨论的是复杂系统状态观测器的设计问题，以及基于状态观测器的鲁棒镇定问题；参考文献[113-126]主要研究的是跟踪控制问题。

从这些研究成果中可以看出，复杂系统鲁棒镇定的难点在于系统中的非线性、不确定性的处理，特别是对于系统中互联项不确定性的处理，已有的研究成果中大多都对不确定性做了较严格的数学假设，如“具有未知常数界”、“已知精确上界”、“满足匹配条件”、“广义 Riccati 方程有解”^[20-24,29,59,68,69]等等。在这些研究成果中，所得结论大多数是被控系统渐近稳定，部分结果是实用稳定。这种情况虽然在理论上较为完美，但是也不可避免地造成工程实用性差的弱点。综观已有的文献，其研究成果涉及复杂系统鲁棒控制的方方面面，包括状态（输出）反馈鲁棒控制器设计、状态观测器设计、输出跟踪设计、 H_∞ 控制、全息控制、特定条件下稳定性判据讨论等，所使用的研究方法和手段包括现代微分几何方法、线性化方法、基于 LMI 的方法、自适应控制、变结构控制、模糊控制、神经网络控制等，这些方法和手段以及其所得到的研究结论也各有优劣。不难看出，在这一研究领域里，目前尚无系统的理论和统一的、较为成熟的方法，特别是对于所得研究结论，在工程实用方面还有很大的差距。

模糊逻辑系统与模糊控制近年来发展非常迅速，这方面的理论与方法在复杂系统鲁棒控制问题上的研究，也取得了许多有价

值的成果^[1,7,8,93-110]。参考文献[90]对模糊控制系统近年来的研究进行了综述,列举了大量的文献资料,对近年来关于模糊逻辑系统的特性研究、模糊控制器设计研究、模糊控制系统稳定性分析研究等方面做了总结。由于模糊控制器具有充分利用语言信息和领域专家知识的特性,使得它在各类工农业过程控制中得到了广泛的应用;模糊逻辑的万能逼近特性,则为各种非线性系统建模、复杂系统未知特性分析提供了理论依据。值得注意的是,在现有的利用模糊逻辑系统方法研究系统控制问题的研究成果中,许多成果要么是基于计算机仿真进行的,缺少必要的数学论证,要么是针对的系统模型过于简单,难于进一步推广到较复杂的系统情况。显然,这两方面的缺陷对于深化理论分析是不利的。本书将利用模糊逻辑系统具有逼近任意不确定性的特性,结合严密的数学论证来分析研究复杂控制系统的各种控制问题。

作为预备知识,本书的第2章将详细介绍模糊逻辑系统的有关原理,以便在书中后续的控制研究中使用。

1.2 本书的主要内容及结构编排

本书利用模糊逻辑系统具有万能逼近的特性,采用经典的Lyapunov方法,分析和研究具有不确定性的复杂系统的各种控制问题。主要工作如下:

(1) 利用模糊逻辑系统分析处理复杂系统的不确定性。我们采用了先将复杂系统的不确定性进行归一化处理,然后再利用模糊逻辑系统进行逼近的思想方法,从而避免了由于过多采用模糊逻辑系统而使系统更加复杂化的弊端。

(2) 在复杂系统的不确定性具有未知上界函数的情形下, 利用采样数据和不确定性的范数结构形式构造模糊逻辑系统, 从而削弱了类似的研究成果对不确定性所做的各种苛刻的数学假设, 使研究结论更加贴近工程实用。

(3) 在控制设计中, 引入了自适应思想, 为各种不确定参数设计了参数估计自适应律, 并从严密的数学推理角度, 给出了各种估计的精度分析。由于对不确定性进行了归一化处理, 从而简化了自适应机构, 避免了控制系统的臃肿。

(4) 从严密的数学推理角度, 给出了各种估计的数学分析。全部控制设计以保证系统的状态、状态误差、跟踪误差及各参数估计一致终极有界为目标, 对所得结论都进行了计算机仿真。

(5) 为了使各部分的研究结果易于在工程实际中应用, 在每章的仿真研究中, 建立了 Simulink 仿真模型, 用非常形象直观的模块图表达了各类控制任务的控制思想和设计方法, 易于被工程设计人员所接受。

全书的内容组织如下:

第 1 章主要介绍复杂系统与复杂系统鲁棒控制研究概况, 并对本书的主要内容和结构编排加以详细说明。

第 2 章详细介绍了本书研究工作将要使用的工具——模糊逻辑系统, 为后续内容的展开奠定基础。

第 3 章主要讨论一类复杂控制系统的状态反馈鲁棒镇定问题, 在较弱的假设条件下, 利用模糊逻辑系统, 分别给出了这类系统的集中与分散鲁棒控制器设计方法, 并用算例对所提出的鲁棒控制器进行了仿真研究; 然后针对一类具有特殊结构——相似结构——的复杂系统, 应用上述思想方法设计出了具有全息特点的鲁棒控制器, 并以有源磁悬浮轴承运动系统为例, 进行了仿真