

复杂非线性系统的模糊控制

王迎春 杨 珺 杨东升 著



科学出版社
www.sciencep.com

TP271
W430

→1

复杂非线性系统的 模糊控制

王迎春 杨 珺 杨东升 著

TP271
W430

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地研究了复杂非线性系统的模糊控制理论和相关的应用问题。全书共分为9章。第1章介绍了复杂非线性系统的模糊控制的发展状况,并分别分析了网络环境下的非线性系统的模糊控制问题、带有混沌行为的非线性系统的模糊同步控制和带有随机扰动的非线性(时滞)系统的控制问题;第2~4章详尽地研究了基于模糊模型的复杂非线性系统的网络控制问题;第5~6章分别研究了带有混沌行为的两个不同结构非线性系统的同步控制问题和带有时滞的非线性系统的模糊同步控制问题;第7~9章研究了基于模糊模型的未知随机非线性系统控制问题和含有时滞随机模糊系统的时滞依赖保成本控制问题。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及其自动化、测控技术以及自动控制等相关专业高年级本科生、研究生教材,同时也可供相关学科和工程技术人员作为参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

复杂非线性系统的模糊控制/王迎春,杨珺,杨东升著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-025761-1

I. 复… II. ①王… ②杨… ③杨… III. 非线性系统(自动化)—模糊控制 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 181066 号

责任编辑: 张海娜 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年10月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2009年10月第一次印刷 印张: 11 1/4

印数: 1—2 500 字数: 214 000

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈路通〉)

序

复杂非线性系统控制问题的研究是现代控制理论研究在深度和广度上的拓展,也是当前被控对象的高度复杂化、控制性能要求的高指标化和计算机技术网络化发展的必然趋势.

模糊控制是以模糊集合理论为基础的一种新兴的控制手段,是模糊系统理论、模糊技术与自动控制技术相结合的产物. 这门科学自诞生半个世纪以来,已经产生了许多探索性甚至是突破性的研究与应用成果,这一方法也逐步成为人们思考问题的重要方法论. 模糊控制实质上是一种非线性控制,从属于智能控制的范畴. 近二十多年来,模糊控制在理论上和技术上都有了长足的进步,成为自动控制领域中一个非常活跃而又硕果累累的分支. 模糊控制已经在工业控制领域、家用电器自动化领域和其他很多领域中得到广泛应用,解决了传统控制方法无法或者难以解决的问题,取得了令人瞩目的成果. 同时我们也应该看到,虽然模糊控制的理论和应用已经取得了很大的进展,但就目前模糊控制理论的发展来看,还有一些关键性的科学问题需要重新认识并进一步深入研究.

复杂非线性系统的模糊控制正是该研究领域中的一个有益的补充,该书作者多年来从事模糊控制的研究,取得了一些创新性的研究成果,分别针对复杂非线性系统的网络控制问题、混沌同步问题和随机控制问题采用模糊控制的方法进行了深入研究,提出了一些先进的控制思想和方法. 其研究成果分别发表在国内外较有影响力的期刊上,如*IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*、*IEEE Transactions on Industrial Informatics*、*Progress in Natural Science*、《自动化学报》、《物理学报》等. 该书能为本领域进一步深入研究提供很好的参考,是模糊控制领域不可多得的一本好书.

教育部长江学者



2009年9月11日于沈阳

前 言

自从模糊理论诞生以来,经历了近半个世纪的发展和完善,模糊控制逐步被认为是解决复杂非线性系统建模和控制问题的一种行之有效的方法.

传统控制理论在工业生产、军事科学、空间技术等领域取得了许多成功的应用.但随着科学技术和生产力的不断发展,实际的受控对象越来越复杂,表现为如下一些特征:① 复杂性:系统的结构和参数具有高维性、时变性和高度非线性,并且具有强耦合与时滞等特性;② 不确定性:系统及其外部环境具有许多未知和不确定的因素,具有较大的随机干扰;③ 信息量少:为了实现系统的精确控制,需要了解系统大量的信息,但实际中从系统对象所获得的信息量相对较少;④ 网络化的要求.因此,我们需要重新考虑研究引入新的方法来分析研究复杂系统建模、稳定性、可控性、可观性、鲁棒性等一些控制问题.可以预见将模糊控制和非线性理论相结合是解决复杂非线性系统控制问题的一种新途径.

本书从模糊控制的角度出发,采用模糊方法进行复杂非线性系统的分析和综合问题的研究.主要基于模糊模型,采用 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式(LMI)等技术,对复杂非线性系统的模糊网络控制、混沌同步控制和模糊随机控制等控制问题进行了研究,给出了一些新的研究成果.

本书首先针对目前研究的网络控制系统(多数为线性被控对象,少数涉及非线性被控对象),提出了基于模糊模型的一类非线性网络控制系统的鲁棒控制方法,采用模糊估计器来估计被控对象的状态,减小系统的采样频率,从而有效地降低了网络的通信负担,进而解决了复杂非线性系统在网络控制应用上需要解决的一些实际问题.

其次,混沌现象是非线性动力学系统所特有的一种运动形式,它广泛地存在于自然界中.近二三十年来,随着混沌理论的日渐成熟,混沌控制作为一个新的交叉研究方向应运而生,并且在最近的十多年间成为一个研究的热点.本书对不同结构的混沌非线性系统的同步控制问题和带有时滞的混沌非线性系统的同步控制问题进行了研究,是混沌非线性系统控制研究的一个延伸,也是该领域研究的深化.

最后,非线性系统的复杂性还可以体现在系统通常受到一些随机扰动或结构建模不确定等因素的影响.本书针对随机非线性系统和带有时滞的随机非线性系统分别采用模糊自适应控制方法和时滞依赖保成本控制方法进行研究,给出了一些新的研究成果.

本书提出的复杂非线性系统的模糊控制是非线性控制理论的有益的补充,是作

者多年来在模糊控制领域内取得的一些创新性的研究成果,属于当前所属研究领域的前沿问题,具有重要的理论与实际应用价值.

本书的出版得到了国家自然科学基金 (60904017, 60904046, 60804006, 60774048)、中国博士后科学基金 (20070421063)、辽宁省博士启动基金 (20011020) 以及东北大学优秀博士后基金 (20080416) 的资助,在此表示感谢.

由于作者的水平和研究范围有限,书中缺点和不足在所难免,恳请读者批评指正.

王迎春 杨珺 杨东升

2009 年 7 月于东北大学

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 模糊控制的发展及研究现状	2
1.2.1 常见的模糊推理系统	3
1.2.2 模糊控制系统的分析与设计	7
1.3 网络控制系统概述	8
1.3.1 网络控制系统中的关键问题	9
1.3.2 网络控制系统的研究现状	10
1.3.3 关于网络控制系统的几点思考	12
1.4 混沌系统及其控制概述	12
1.4.1 混沌控制的研究现状	13
1.4.2 基于 T-S 模糊模型的混沌控制	13
1.5 随机非线性控制系统概述	14
1.6 预备知识	16
1.6.1 Itô 微分公式	17
1.6.2 随机系统稳定性概念	17
1.6.3 随机 Lyapunov 稳定性	18
1.7 本书结构	20
参考文献	21
第 2 章 基于 T-S 模糊模型的非线性网络控制系统的鲁棒 H_∞ 控制	27
2.1 引言	27
2.2 系统描述	28
2.3 NCS 鲁棒 H_∞ 控制	32
2.4 仿真研究	39
2.5 小结	51
参考文献	51
第 3 章 基于模糊估计器的非线性网络控制系统的鲁棒控制	54
3.1 引言	54

3.2	FE-NCS 描述	55
3.3	基于模糊估计器的鲁棒控制器设计	61
3.4	仿真研究	67
3.5	小结	73
	参考文献	73
第 4 章	基于 FHM 的一类非线性系统的网络控制	75
4.1	引言	75
4.2	模糊双曲正切模型	76
4.3	系统描述	77
4.4	网络化双曲型控制器 NHC 设计	79
4.5	小结	83
	参考文献	83
第 5 章	基于模糊模型的混沌系统广义同步	86
5.1	引言	86
5.2	基于模糊模型的驱动和响应系统的问题描述	87
5.3	模糊同步控制器的设计	88
5.4	仿真研究	91
5.5	小结	95
	参考文献	95
第 6 章	基于模糊模型的时滞混沌系统同步	96
6.1	引言	96
6.2	问题描述	96
6.3	控制器的设计	97
6.4	仿真研究	100
6.5	小结	103
	参考文献	103
第 7 章	随机非线性系统的模糊自适应控制	105
7.1	引言	105
7.2	问题描述	105
7.3	控制器设计	119
	7.3.1 自适应控制器设计	119
	7.3.2 模糊自适应控制器设计	122
7.4	仿真研究	127
7.5	小结	129
	参考文献	130

第 8 章 基于奇异系统的不确定随机模糊时滞系统的保成本控制	132
8.1 引言	132
8.2 问题描述	133
8.3 时滞依赖模糊保成本控制器设计	135
8.4 随机模糊系统可允许的最大时滞值问题	142
8.5 仿真研究	143
8.6 小结	145
参考文献	145
第 9 章 不确定随机模糊多时滞系统的时滞依赖保成本控制	148
9.1 引言	148
9.2 问题描述	149
9.3 时滞依赖模糊保成本控制器设计	151
9.4 仿真研究	163
9.5 小结	169
参考文献	169

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

自动控制理论在经历了经典控制理论和现代控制理论两个重要阶段后, 目前正在促使人们致力于 20 世纪 70 年代末开始的智能控制的研究. 智能控制是现代控制理论在深度和广度上的拓展, 也是当前被控对象高度复杂化、控制性能要求高指标化和计算机技术网络化发展的必然要求.

随着科学技术的飞速发展, 现代工业系统具有如下特征:

- (1) 系统复杂性: 系统的结构和参数具有高维性、时变性和高度非线性;
- (2) 随机不确定性: 系统内部及其外部环境具有许多未知的和不确定的随机性因素;
- (3) 高性能要求: 由于系统复杂, 导致了控制目标的多样性和各种目标之间的矛盾, 使得在设计控制器的时候需要综合考虑各种因素;
- (4) 系统网络化: 通过局域网或 Internet 将所有控制设备互联, 进一步实现控制系统的一体化和协调化.

模糊控制理论诞生以来, 经历了近四十年的完善和发展, 逐步被认为是解决复杂非线性系统建模和控制的一种行之有效的方法. 通过模糊逻辑, 把语言信息构造到控制系统上, 从而对难以建立精确数学模型的对象, 提供了新颖的系统分析与综合的理念. 随着计算机网络的广泛使用和网络技术的不断发展, 将通信网络引入控制系统, 连接现场设备和自动化系统, 实现了现场设备控制的分布化和网络化, 同时也加强了现场控制和上层管理的联系. 这种网络化的控制模式具有信息资源共享、易于扩展、易于维护、高可靠性、灵活性及低成本化等优点. 目前许多通过网络相联接的人、机、物理过程的集成系统都属于这类基于网络控制的“新系统”. 由于将网络环节引入控制闭环, 使得对系统的分析和设计复杂化. 因此, 我们可能必须重新甚至引入新的方法去研究其稳定性、可控性、可观性及鲁棒性等. 可以预见, 如果将模糊控制技术和网络控制技术相结合, 将是解决复杂非线性系统控制问题的新途径.

混沌是确定性动力学系统中出现的一种无规则的运动, 类似随机的现象, 其最大特点是系统的长期行为对初始条件的极端敏感性. 混沌理论隶属于非线性科学, 只有非线性系统才能产生混沌运动. 众所周知, 当混沌系统的参数处于临界状态时, 参数的微小变化就可能引起混沌系统的动力特性发生质的变化, 即发生从混沌到

非混沌的转化。鉴于以上原因,如果采用常规的辨识方法来建立混沌系统的 T-S (Takagi-Sugeno) 模糊模型,那么即使逼近精度再高,意义也不是很大。只有通过机理分析的方法,建立混沌系统的精确 T-S 模糊模型,才能将基于 T-S 模糊模型的模糊控制理论有效地应用到混沌抑制或同步的研究中去。

另外,系统的不确定现象普遍存在于实际工业生产系统中,而这种系统的不确定往往表现为具有一定分布的随机行为。如通信设备中的噪声、未知的系统参数(时变的或非时变的)、排队网络中的随机访问等,都呈现出一定的随机行为。如果简单地将这些随机因素看做是一种不确定性,而采用确定性系统的控制方法,则往往导致控制方法具有很强的保守性。不考虑这些随机因素,控制结果则会变差,甚至导致系统不稳定。人们将这些随机行为建模为相应的随机过程描述的随机系统,同时采用随机系统理论进行分析和控制问题的研究。目前,随机控制问题已经得到人们的广泛关注。由于系统都是非线性的,这给问题的研究带来很大困难。尤其是那些不能被精确建模的系统,采用传统的随机控制方法很难得到令人满意的控制效果。因此,如何针对复杂的随机非线性系统设计高性能的控制器是一个重要的课题。

针对复杂非线性系统的控制问题,本书主要从模糊控制角度出发,采用模糊方法进行复杂非线性系统的分析和综合问题的研究。下面首先给出本书中用到的几种常见的模糊模型及其稳定性分析和控制器设计的方法来展现模糊控制理论的发展历程及研究现状;然后介绍网络控制系统理论、混沌控制和随机控制的发展状况;最后给出本书的主要研究内容。

1.2 模糊控制的发展及研究现状

1965 年,美国加利福尼亚大学的控制论专家及数学家 Zadeh 教授^[1]创立了模糊集的概念,建立了模糊理论的数学基础。随后,一种新型的控制理论——模糊控制理论诞生了。模糊控制理论的核心是利用模糊集合理论,把人的自然语言形成的控制策略转化为计算机能够接受的算法语言来实现过程控制。虽然它是建立在模糊集合论的基础之上,但它的控制输出仍为精确量,因此它不仅成功地实现了对复杂系统的高精度控制,而且由于其融合了人的思维方式,对那些难以用数学模型描述的对象也可进行有效控制。从 1974 年英国的工程师 Mamdani^[2]首先将模糊控制器用于蒸汽发动机的控制以来,模糊控制技术越来越受到控制领域中人们的关注和重视。目前,模糊控制技术已成功地应用到化工、医疗、冶金、装备制造、航空航天乃至民用电器等各种领域^[3]。

模糊控制的主要特点如下:

(1) 模糊控制是一种基于规则的控制,它直接采用语言型控制规则,出发点是现场操作人员的控制经验或相关专家的知识,在设计中不需要建立被控对象精确的

数学模型, 因而使得控制激励和策略易于接受与理解、设计简单以及便于应用。

(2) 从工业过程的定性认识出发, 比较容易建立语言控制规则, 因而模糊控制对那些数学模型难以获取、动态特性不易掌握或变化非常显著的对象非常适用。

(3) 基于模型的控制算法及系统设计方法, 由于出发点和性能指标的不同, 容易导致较大差异。但一个系统语言控制规则却具有相对的独立性, 利用这些控制规则的模糊连接, 容易找到折中的选择, 使控制效果优于常规控制器。

(4) 模糊控制是基于启发性的知识及语言决策规则设计的, 这有利于模拟人工控制的过程和方法, 增强控制系统的适应能力, 使之具有一定的智能水平。

(5) 模糊控制的鲁棒性强, 干扰和参数变化对控制效果的影响被大大减弱, 尤其适合于带有非线性、时变参数及纯滞后系统的控制。

1.2.1 常见的模糊推理系统

模糊逻辑系统通常由四部分组成: 模糊化、模糊规则库、模糊推理机和解模糊化。模糊推理机是信息科学中处理信息和实现机器智能的一个重要工具, 是计算机科学、控制科学和人文决策等学科的重要研究课题, 是模糊逻辑和模糊集合理论的最著名的应用之一。

模糊规则库是一系列模糊 IF-THEN 规则的集合, 是模糊推理机的核心部分。基于模糊逻辑原理, 模糊推理机把模糊规则合成为一个从输入空间的模糊子集到输出空间模糊子集的映射。模糊化把系统的实值输入转换成模糊集, 而解模糊化确定一个输出模糊子集的实值输出。从输入输出的角度来看, 模糊推理系统是一个从输入空间到输出空间的函数映射。模糊推理机制、模糊化和解模糊化分别具有多种不同的选取方法, 因此构成了各种各样的模糊推理系统, 比较常见的有以下几种。

1. 模糊关系推理系统

模糊关系推理系统是最基本意义上的模糊推理系统, 具有标准的模糊化处理、解模糊化处理和模糊推理三个基本环节。模糊 IF-THEN 规则实现从输入语言向量 $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in U \subset \mathbb{R}^n$ 到输出语言变量 $y \in V \subset \mathbb{R}$ 的映射, 第 i 条模糊 IF-THEN 规则可以写成:

$$\begin{aligned} &\text{IF } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, x_n \text{ is } A_n^i, \\ &\text{THEN } y \text{ is } B^i, \quad i = 1, 2, \dots, r \end{aligned}$$

其中, $A_1^i, A_2^i, \dots, A_n^i, B^i$ 是模糊集; r 是模糊规则的数量。

模糊推理采用不同的合成方法, 就会产生不同含义的模糊关系推理系统, 例如 Dienes-Rescher 含义、Lukasiewicz 含义、Zadeh 含义、Gödel 含义和 Mamdani 含义^[4]等。

系统输出可以表示为

$$y = x_1 \circ x_2 \circ \cdots \circ x_n \circ R$$

式中, $R \in F(x_1 \times x_2 \times \cdots \times x_m \times Y)$ 是基于参考模糊集的模糊关系, $F(\cdot)$ 代表定义在论域上的一组参考模糊集; “ $\circ$ ” 表示模糊集合的“合成”.

Pedrycz 等^[5] 研究了模糊关系的迭代算法, 并在隶属函数的构造上引入了模糊聚类方法, 结果显示算法具有很好的收敛性. 陈建勤等^[6] 在 Pedrycz 的工作基础上, 提出了在线模糊辨识方法, 能够克服由于不准确的测量数据对模糊关系产生的不良影响, 并且结合在线模糊模型辨识与基于模型的模糊控制算法, 得到了模糊自适应控制系统.

2. 模糊基函数推理系统

1992 年, Wang 和 Mendel^[7] 首次提出模糊基函数 (fuzzy basis function, FBF) 的概念, 并证明了模糊基函数的线性组合在致密集上能够以任意的精度一致地逼近任意的实连续函数. 这类模糊推理系统采用单值模糊器、乘积推理和中心平均解模糊器, 其第 i 条规则可以表示为

$$\begin{aligned} &\text{IF } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \cdots, x_m \text{ is } A_m^i, \\ &\text{THEN } y = \bar{y}^i, \quad i = 1, 2, \cdots, r \end{aligned}$$

其中, r 表示模糊规则数; $\bar{y}^i$ 是输出模糊子集的质心, 即在这一点上输出模糊子集的隶属度达到最大值.

模糊基函数推理系统可描述为如下的一系列模糊基函数的线性组合:

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^r \bar{y}^i \left(\prod_{k=1}^m \mu_{A_k^i}(x_k) \right)}{\sum_{i=1}^r \left(\prod_{k=1}^m \mu_{A_k^i}(x_k) \right)} = \sum_{i=1}^r \left(\frac{\prod_{k=1}^m \mu_{A_k^i}(x_k)}{\sum_{i=1}^r \left(\prod_{k=1}^m \mu_{A_k^i}(x_k) \right)} \bar{y}^i \right) = \sum_{i=1}^r \bar{y}^i p_i(x)$$

式中, $x = [x_1, x_2, \cdots, x_m]^T \in \mathbb{R}^m$ 是系统输入向量; $p_i(x)$ 表示模糊基函数.

模糊基函数推理系统从函数基的角度来研究模糊系统, 在理论上具有重要的研究价值. Wang 采用 Stone-Weierstrass 定理证明了具有高斯型隶属度函数形式的 FBF 模糊系统具有万能逼近性.

引理 1.1^[7] 假设输入论域 U 是 $\mathbb{R}^n$ 上的一个紧集, 则对于任意定义在 U 上的实连续函数 $g(x)$ 和任意的 $\varepsilon > 0$, 一定存在模糊系统 $f(x)$, 使下式成立:

$$\sup_{x \in U} |f(x) - g(x)| < \varepsilon$$

后来, Wang 又在此基础上将该模糊系统表示为一个前馈神经网络模型, 采用 BP 算法对其进行训练. 随后, 提出了基于 FBF 的模糊自适应控制方法. 由此掀起了模糊自适应控制和模糊神经网络研究的热潮.

3. 基于 T-S 模糊模型的模糊推理系统

一般地, 在特定的操作点附近, 非线性的过程操作总可以局部线性化, 并且局部线性化模型在操作点附近的区域也是有效的. 基于这一思想, 日本学者 Takagi 和 Sugeno^[8] 提出了著名的定量模糊建模方法. 在这种方法中, 模糊规则的前提部分可以是输入变量、输出变量和 (或) 状态变量, 而结论部分不是简单的模糊语言值, 而是输入变量和 (或) 输出变量的线性组合, 是一个降阶的线性函数. T-S 模糊模型是非线性不确定系统建模的一个重要工具, 已广泛应用于故障诊断、在线监测、决策支持和智能控制等领域.

考虑一个多输入多输出 (MIMO) 非线性系统, 其 T-S 模糊模型的第 i 条规则形式如下:

$$\begin{aligned} \text{IF } z_1(t) \text{ is } A_1^i, z_2(t) \text{ is } A_2^i, \dots, z_m(t) \text{ is } A_m^i, \\ \text{THEN } y^i = P_0^i + P_1^i z_1(t) + P_2^i z_2(t) + \dots + P_m^i z_m(t), \quad i = 1, 2, \dots, r \end{aligned}$$

其中, r 表示模糊规则总数; $z(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_m(t)]^T$ 是模糊系统前件向量; A_j^i ($j = 1, 2, \dots, m$) 表示模糊子集; P_j^i 为结论 (后件) 参数.

由于 T-S 模糊模型的结论部分是采用线性方程式描述的, 因此便于采用传统的线性系统的控制策略设计相关的控制器. 现在已经有很多学者提出各种方法来设计基于 T-S 模糊模型的控制器的对其进行稳定性分析^[9, 10]. 基本的 T-S 模糊模型的辨识步骤包括前提结构的辨识、前提参数的辨识、结论结构的辨识和结论参数的辨识等.

最初提出的 T-S 模型辨识方法涉及非线性规划问题, 实现过于复杂, 而且烦琐费时, 并不适合于复杂系统的在线应用, 随着对 T-S 模糊模型研究的不断深入, 各种新的辨识算法^[11] 与改进的 T-S 模糊模型相继被提出.

4. 基于模糊动态模型的模糊推理系统

模糊动态模型 (fuzzy dynamic model, FDM) 是由 Cao^[12] 在 1996 年提出来的, 其中第 i 条规则表达如下:

$$\begin{aligned} \text{IF } z_1(t) \text{ is } F_1^i, z_2(t) \text{ is } F_2^i, \dots, z_p(t) \text{ is } F_p^i, \\ \text{THEN } \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), \\ y(t) = C_i x(t) + D_i u(t), \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, r \end{aligned}$$

其中, r 为总的模糊规则数; F_j^i ($j = 1, 2, \dots, n$) 为模糊集合; $x(t)$ 为状态变量; $u(t)$ 为输入变量; $y(t)$ 为输出变量; $z(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_p(t)]^T$ 为系统可测变量. 系统的最终输出可通过求各个子系统的加权平均得到:

$$sx(t) = \frac{\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) [A_i x(t) + B_i u(t)]}{\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i x(t) + B_i u(t)]$$

$$y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) [C_i x(t) + D_i u(t)]}{\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [C_i x(t) + D_i u(t)]$$

式中, $\mu_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p \mu_{F_j^i}(z_j(t))$; $h_i(z(t)) = \mu_i(z(t)) / \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))$; $\mu_{F_j^i}(z_j(t))$ 是 $z_j(t)$ 关于模糊子集 F_j^i 的隶属度函数, 且 $\mu_i(z(t))$ 满足:

$$\mu_i(z(t)) \geq 0, \quad \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) > 0, \quad i = 1, 2, \dots, r$$

而且有 $h_i(z(t)) \geq 0, \quad \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1, \quad i = 1, 2, \dots, r$.

$$sx(t) = \begin{cases} \dot{x}(t), & \text{连续系统} \\ x(t+1), & \text{离散系统} \end{cases}$$

模糊动态模型可以看做是一种改进的 T-S 模糊模型. 它是由多个线性状态方程通过模糊隶属函数光滑连接成一个全局模型, 其中局部子系统可以使用线性动态微分 (或差分) 方程表示, 在设计控制器的时候可以根据现有的线性系统理论为各局部子系统分别设计使之稳定的控制器. 同时 Cao 还在文献 [13] 中给出了基于模糊动态模型的稳定的控制器的设计方法. 在辨识系统参数的时候, Cao 等使用模糊聚类的方法获取模糊规则的数目和隶属函数的特征参数, 并使用最小二乘算法辨识局部线性模型^[14]. 现在许多文献已经不区分它和 T-S 模糊模型之间的区别了, 而统一使用 T-S 模糊模型这一称谓来描述这类模型.

5. 基于模糊双曲正切模型的模糊推理系统

模糊双曲正切模型 (fuzzy hyperbolic model, FHM) 是由张化光 and 全永兵^[15] 首先提出来的. 它是一种非线性状态空间模型, 是一种全局模型. 根据此模型设计的最优控制器可以使整个系统性能指标达到最优. 与其他模糊模型相比, 它更适合于对控制对象所知有限的多变量非线性系统. 同时此模型也是一种神经网络模型, 可以通过神经网络强大的学习算法来优化模型参数.

模糊双曲正切规则基可以表示为

$$\text{IF } x_1(t) \text{ is } F_{x_1}, x_2(t) \text{ is } F_{x_2}, \dots, x_m(t) \text{ is } F_{x_m},$$

$$\text{THEN } \dot{x}_r(t) = \pm c_{x_1}^r \pm \dots \pm c_{x_m}^r, \quad r = 1, 2, \dots, n$$

其中涉及的符号定义, 将在第 4 章中详细描述.

采用单值模糊器, 乘积推理和中心平均解模糊器, 则全局 FHM 可表示为

$$\dot{x}(t) = A \tanh(Lx(t))$$

式中, L 为正定对角的矩阵.

这种模型的规则构造简单, 易于利用人的经验, 易于进行控制器设计和稳定性分析. 文献 [16] 对于这类模型的建模、万能逼近能力等方面的问题进行了详细的分析.

1.2.2 模糊控制系统的分析与设计

对早期的模糊系统稳定性很难作解析的分析, 随着 T-S 模糊模型和 FBF 模型的提出, 为模糊控制系统的分析与设计提供了系统化的框架, 给模糊控制理论及应用带来了深刻的影响.

1996 年, Wang 等^[17] 提出了并行分布补偿 (parallel distributed compensation, PDC) 方法来设计模糊控制器, 并基于线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI)^[18] 方法, 给出了模糊系统稳定的充分条件. 文献 [19] 将 LMI 技术应用于 T-S 模糊系统并给出了许多系统性能的分析与设计方案, 其基本形式如下:

$$\text{连续系统: } (A_i + B_i K_j)^T P + P(A_i + B_i K_j) > 0, \quad 0 \leq i \leq j \leq r$$

$$\text{离散系统: } (A_i + B_i K_j)^T P(A_i + B_i K_j) - P < 0, \quad 0 \leq i \leq j \leq r$$

由于线性矩阵不等式可以通过 Matlab 中的 LMI 工具箱求解, 为寻找公共的 Lyapunov 正定矩阵 P 提供了系统的方法.

如果构造模糊控制所需要的规则很多, 那么公共的 Lyapunov 矩阵就很难找到, 这就限制了该方法的实际应用. 为了减少公共 Lyapunov 函数的保守性, 分段 Lyapunov 函数方法被提出^[20]. 它的主要思想是利用前件变量来划分不同的状态空间, 在不同区域内采用不同的 Lyapunov 函数, 从而达到减少结果保守性的目的. 其中一种主要的区域划分方式为所划分的区域数等于模糊系统的规则数或者局部线性系统模型数. 文献 [20] 首先利用分段 Lyapunov 函数研究了连续模糊系统的稳定性条件, 其后许多相关文献也对此进行了研究^[21, 22]. 事实上分段 Lyapunov 函数除了函数结构复杂外, 在应用方面也有一些其他的缺点, 尤其是对于连续系统. 这是因为 Johansson 等在设计过程中考虑了能量在区域边界递减的连续性, 所以不可避免地引入了相应的边界条件.

另外, 基于非二次型 Lyapunov 函数、多 Lyapunov 函数或者模糊 Lyapunov 函数的方法也被用来分析系统的稳定性^[23~25]. 事实上在通常情况下公共 Lyapunov 函数是它们的一种特例, 因而后者具有更少的保守性. 还有一些文献从隶属度函数对系统影响的角度或者从减少 LMI 的个数的角度来研究模糊系统的稳定性, 给出保守性相对小的结果^[26, 27].

随着模糊理论的发展,人们将其他一些控制思想引入到模糊控制中,衍生出许多不同而实用的控制方法.例如,模糊预测控制、模糊自适应控制、非线性系统的模糊鲁棒控制等.预测控制是 20 世纪 70 年代直接从工业过程控制中产生的一类控制算法,将预测的思想和模糊控制相结合形成了模糊预测控制理论.文献 [28] 详细地介绍了模糊预测控制理论的基本内容.由于被控过程的非线性、高阶次、时变性以及随机干扰等因素的影响,常常造成模糊控制规则或者粗糙或者不完善,都会不同程度地影响控制效果.为了弥补这个不足,先进的模糊控制应该具有自适应性,在系统出现不确定因素时,仍使系统能够在一定范围内自我调节,具有一定的鲁棒性.文献 [29] 是一本介绍模糊自适应控制的重要专著,详细地介绍了各种模糊自适应控制方法.针对多输入多输出非线性系统.文献 [30] 采用模糊模型参考自适应控制方法,应用 Lyapunov 稳定性理论分析了整个系统的稳定性和鲁棒性.文献 [31] 针对不确定系统设计了一致最终有界的模糊自适应跟踪控制器.文献 [32] 利用小增益原理设计了模糊自适应鲁棒跟踪控制器.文献 [33] 利用 Backstepping 技术和小增益原理设计了模糊自适应 H_∞ 控制器来镇定严格反馈标准型的非线性系统.文献 [34] 基于 LMI 方法研究了模糊广义系统的稳定性分析和控制器设计问题.这些设计的本质是将现有的经典设计方法应用于模糊系统,从而在理论体系上得到完善,也为非线性系统控制提供了新的思路.

最后,需要指出的是模糊控制系统的不稳定性也应是研究的重点之一.事实上,系统的不稳定性是与系统稳定性的分析密不可分的.在大多数情况下,当不能证明系统稳定时,分析系统不稳定的原因和特性是必需而且必要的.由以上可见,模糊控制系统的稳定性分析是模糊控制理论中的重要内容,然而由于模糊控制系统结构的复杂性、控制环境的不确定性及对系统功能结构和动态行为描述的特殊方式,其稳定性分析方法也远非传统的基于精确数学模型的稳定性分析方法那样成熟和简单,其主要困难在于:① 模糊逻辑本身难以表达传统意义上的稳定性;② 非线性系统的分析设计要远比线性系统复杂得多;③ 现时还没有建立一套完整的模糊系统理论,模糊控制所具有的巨大潜力还远远没有发挥出来.因此模糊系统的稳定性分析目前还没有统一的分析和判别方法,利用传统的或已成熟的控制理论与方法研究模糊控制系统的稳定性,不失为一个有益的途径.必须看到,模糊控制的稳定性研究以及模糊控制理论的发展与非线性系统理论这一大课题的研究和发展息息相关,非线性系统理论的发展必将促进模糊控制系统理论的快速发展,而模糊系统理论的发展也将使非线性系统理论变得更加成熟和完善.

1.3 网络控制系统概述

网络控制系统 (networked control system, NCS) 是 20 世纪 90 年代兴起的