

# 非线性系统的 鲁棒控制及应用

吴忠强 著

电气自动化  
新技术丛书



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



电气自动化新技术丛书

# 非线性系统的鲁棒控制及应用

吴忠强 著



机械工业出版社

本书是关于非线性系统模糊鲁棒控制方面的一部专著。全书共分9章。第1章为绪论。第2章为预备知识。第3章研究了非线性系统稳定模糊控制器设计问题。第4章研究了非线性系统的两种变结构控制方案。第5章研究了非线性系统基于T-S模型的鲁棒控制问题。第6章研究了非线性系统自适应鲁棒稳定控制与跟踪控制问题。第7章研究了基于T-S模型的混沌系统控制、同步及保密通信问题。第8章研究了非线性时滞系统的稳定模糊控制问题。第9章介绍了模糊动态模型在实际系统中的应用。

本书适合控制等相关专业研究生和高年级本科生作为参考书，也可供有关专业的科技人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

非线性系统的鲁棒控制及应用/吴忠强著. —北京: 机械工业出版社, 2005.1

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-15641-2

I. 非… II. 吴… III. 非线性系统(自动化) - 鲁棒控制  
IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 119837 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 张俊红 版式设计: 霍永明 责任校对: 魏俊云

封面设计: 姚毅 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm × 1168mm  $\frac{1}{32}$  · 8.25 印张 · 220 千字

0001—3000 册

定价: 26.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

# 《电气自动化新技术丛书》

## 序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希望广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

## 第4届《电气自动化新技术丛书》

### 编辑委员会成员

主任：王 炎

副主任：王兆安 王志良 赵相宾 牛新国

委员：王正元 王永骥 王兆安 王 旭

王志良 王 炎 牛新国 尹力明

刘宗富 许宏纲 孙流芳 阮 毅

李永东 李崇坚 陈伯时 陈敏逊

陈维均 周国兴 赵光宙 赵 杰

赵相宾 张 浩 张敬明 郑颖楠

涂 健 徐殿国 黄席樾 彭鸿才

霍勇进 戴先中

秘 书：刘凤英

## 第4届《电气自动化新技术丛书》

### 编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来,在学会领导和广大作者、读者的支持下,至今已出版发行丛书38种33万余册,受到广大读者的欢迎,对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了很大作用。

许多读者来信,表示这套丛书对他们的工作帮助很大,希望我们再接再厉,不断推出介绍电气传动自动化新技术的丛书。因此,本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题,继续组织编写出版,同时对受读者欢迎的已出版的丛书,根据技术的发展,我们将组织一些作者进行修订再版,以满足广大读者的需要。

我们诚恳地希望广大读者来函,提出您的宝贵意见和建议,以使本丛书搞得更好。

在本丛书出版期间,为加快与支持丛书出版,成立了丛书出版基金,得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位的支持,在此我们对所有资助单位再次表示感谢。

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会

2002年10月12日

## 前 言

非线性控制系统的发展几乎是与线性控制系统平行的，显然这是由于非线性系统本身所包含的现象十分丰富，迄今对它的了解还不够。例如线性系统的稳定性只有稳定、渐近稳定和不稳定，而对非线性系统原点稳定性的描述需要很多种类型。至于系统本身的稳定性，由于孤立平衡点可以任意多，就更复杂了。此外是数学分析工具问题，对线性系统已有完善的数学工具；但对非线性系统，发展合适的数学工具是一个相当困难的问题。Taylor级数线性化的方法对有些情况是完全不能适用的，其他方法也都有相当大的局限性。因此需要建立一些非线性方法，可惜一般非线性方法尚难于想象。

由于模糊控制技术具有控制器设计简便、适用于许多非线性系统和鲁棒性强等特点，20世纪80年代以来，在理论和工程实践方面获得了很大的发展。模糊控制器不如常规的控制器的控制那样，采用微分方程、传递函数或状态方程等精确的数学描述，而是通过定义模糊变量、模糊集合及相应的隶属度函数，采用一组模糊条件句来描述输入与输出之间的映射关系。这种用模糊条件句来表示的输入输出关系称为模糊模型，也称语言模型。模糊系统本质上是非线性的，缺乏像常规控制系统中使用的稳定性分析工具。而模糊控制器设计又包含了许多人为因素，对其进行稳定性分析显得更加重要。基于语言模型的稳定性分析，特别是日本学者 Takagi 和 Sugeno 提出的 T-S 模型给模糊控制理论研究及应用带来了深刻的影响，使模糊系统稳定性分析上升到新的理论高度，也为非线性系统控制开辟了新途径，其稳定性定义和条件都是在 Lyapunov 稳定性框架中的。

本专著的内容是作者近年来所取得的科研成果及对国内外最新研究成果的归纳和总结, 本书针对具有高度非线性、多变量、时滞和不确定性的复杂非线性系统, 围绕确保模糊系统稳定性的根本问题展开, 将模糊控制和先进的鲁棒控制方法相结合, 实现对复杂非线性系统的模糊控制, 汲取现存各方案的优点、屏弃其缺点, 提出了系统化设计方法, 为模糊控制系统应用于工程实际非线性系统打下了坚实的基础。全书共分 9 章。第 1 章为绪论。第 2 章为预备知识。第 3 章研究了非线性系统稳定模糊控制器设计问题。第 4 章研究了非线性系统的两种变结构控制方案。第 5 章研究了非线性系统基于 T-S 模型的鲁棒控制问题。第 6 章研究了非线性系统自适应鲁棒稳定控制与跟踪控制问题。第 7 章研究了基于 T-S 模型的混沌系统控制、同步及保密通信问题。第 8 章研究了非线性时滞系统的稳定模糊控制问题。第 9 章介绍了模糊动态模型在实际系统中的应用。

由于作者水平和所做工作的局限性, 书中难免有疏漏和不足之处, 希望读者提出宝贵意见。

作 者

2004 年 10 月



# 目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话  
前言

第1章 绪论 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 模糊控制存在的问题 .....	3
1.3 模糊-神经和软计算 .....	6
1.3.1 软计算 .....	6
1.3.2 模糊逻辑与神经网络的融合 .....	8
1.3.3 基于遗传算法的模糊系统设计 .....	9
1.4 模糊控制系统的稳定性分析与综合研究现状 .....	10
1.4.1 混合模糊系统稳定性分析常用方法 .....	11
1.4.2 语言型模糊系统的稳定性分析方法 .....	12
1.4.3 T-S 模糊系统的稳定性分析 .....	14
1.5 本书的安排 .....	23
第2章 预备知识 .....	26
2.1 Mamdani 模糊模型 .....	26
2.2 Sugeno 模糊模型 .....	30
2.3 Tsukamoto 模糊模型 .....	32
2.4 非线性系统的 T-S 模糊建模 .....	33
2.4.1 T-S 模糊模型结构 .....	34
2.4.2 T-S 模糊模型求取 .....	35
2.4.3 建模实例 .....	36
2.5 本章小结 .....	38

第 3 章 非线性系统稳定模糊控制器设计 .....	39
3.1 采用 CDF 法的模糊控制器设计 .....	39
3.1.1 一般情况 .....	39
3.1.2 特殊情况 .....	41
3.1.3 非线性质量弹簧阻尼系统的控制 .....	42
3.2 离散模糊系统的控制器与观测器设计 .....	46
3.2.1 状态反馈模糊控制器的设计 .....	46
3.2.2 模糊观测器的设计 .....	48
3.2.3 算例 .....	49
3.3 本章小结 .....	52
第 4 章 非线性系统的两种变结构控制方案 .....	54
4.1 非线性系统变结构控制方案一 .....	54
4.1.1 系统的 T-S 模型描述 .....	54
4.1.2 滑模控制器设计 .....	56
4.1.3 倒立摆系统的控制研究 .....	58
4.2 非线性系统变结构控制方案二 .....	61
4.2.1 滑动模态控制器设计 .....	62
4.2.2 倒立摆系统的控制研究 .....	65
4.3 本章小结 .....	68
第 5 章 非线性系统基于 T-S 模型的鲁棒控制 .....	69
5.1 非线性系统的一种鲁棒控制方案 .....	69
5.1.1 系统 T-S 模型描述 .....	69
5.1.2 鲁棒控制器设计 .....	70
5.1.3 仿真及实验研究 .....	71
5.2 基于 T-S 模型的鲁棒 $H_{\infty}$ 控制 .....	77
5.2.1 系统 T-S 模型描述 .....	77
5.2.2 鲁棒 $H_{\infty}$ 控制器设计 .....	78
5.3 采用并行分配补偿法的 $H_{\infty}$ 控制器设计 .....	82
5.4 倒立摆系统的控制研究 .....	85
5.5 本章小结 .....	88

第 6 章 非线性系统的自适应鲁棒稳定控制与跟踪控制 .....	89
6.1 非线性系统的参数自适应变结构控制 .....	89
6.1.1 参数自适应变结构控制器设计 .....	89
6.1.2 倒立摆系统的控制研究 .....	91
6.2 非线性系统的自适应鲁棒跟踪控制 .....	92
6.2.1 自适应跟踪控制器设计 .....	93
6.2.2 倒立摆系统的控制研究 .....	95
6.3 本章小结 .....	96
第 7 章 基于 T-S 模型的混沌系统控制、同步及保密通信 ..	97
7.1 基于 T-S 模型的 Chua 混沌系统同步 .....	97
7.1.1 混沌系统的模糊同步控制器设计 .....	97
7.1.2 Chua 混沌系统同步研究 .....	99
7.2 混沌系统的模糊保性能控制 .....	103
7.2.1 问题的描述 .....	103
7.2.2 保性能控制 .....	105
7.2.3 永磁同步电动机混沌系统的 T-S 建模与控制 .....	108
7.3 基于 T-S 模型的混沌系统保密通信 .....	113
7.3.1 Lorenz 混沌系统的建模 .....	114
7.3.2 模糊混沌通信 .....	115
7.3.3 仿真研究 .....	118
7.3.4 安全性能分析 .....	120
7.4 基于遗传算法的混沌系统模糊控制 .....	120
7.4.1 问题的描述 .....	120
7.4.2 控制器的设计 .....	121
7.4.3 Henon 混沌系统控制研究 .....	123
7.5 本章小结 .....	126
第 8 章 非线性时滞系统的稳定模糊控制 .....	127
8.1 非线性时滞系统的指数稳定 $H_\infty$ 控制 .....	127
8.1.1 模糊时滞模型 .....	128
8.1.2 稳定性分析 .....	129

8.1.3	连续搅拌釜式反应器控制研究	134
8.2	非线性时滞系统稳定模糊控制—分段 Lyapunov 函数法	139
8.2.1	系统的 T-S 模型描述	140
8.2.2	控制器设计	141
8.2.3	仿真研究	143
8.3	不确定连续非线性时滞系统的保性能控制	146
8.3.1	不确定连续模糊时滞模型	147
8.3.2	保性能控制	149
8.3.3	仿真研究	153
8.4	不确定离散非线性时滞系统的保性能控制	156
8.4.1	问题的描述	156
8.4.2	保性能控制律存在的条件	159
8.4.3	保性能控制律的设计	160
8.4.4	示例	161
8.5	不确定非线性时滞系统的时滞依赖保性能控制	164
8.5.1	不确定非线性时滞系统的 T-S 模糊模型	164
8.5.2	主要结果	168
8.5.3	保性能控制律的设计	170
8.5.4	数值算例	174
8.6	具有输入与状态时滞的不确定非线性系统的稳定控制	174
8.6.1	具有输入与状态时滞非线性系统的 T-S 模糊模型	175
8.6.2	稳定性分析	176
8.6.3	仿真研究	179
8.7	不确定非线性中立型时滞系统的保性能控制	182
8.7.1	不确定非线性中立型时滞系统的 T-S 模糊模型	182
8.7.2	保性能控制律的设计	185
8.7.3	仿真示例	193
8.8	本章小结	195
第 9 章	模糊动态模型的应用	197
9.1	多层燃烧炉的模糊建模与控制	197
9.1.1	模糊建模	197
9.1.2	基于模型的模糊控制器设计	200

9.1.3 多层燃烧炉的模糊控制·····	204
9.2 拖车系统的稳定模糊控制器设计·····	212
9.2.1 拖车系统的模糊建模·····	212
9.2.2 基于并行分配补偿法的模糊控制器设计·····	215
9.2.3 稳定性分析·····	215
9.2.4 仿真与实验结果·····	217
9.3 欠驱动机械手的适时轨迹跟踪控制——T-S 模糊方法·····	223
9.3.1 T-S 模糊控制算法·····	223
9.3.2 实验研究·····	225
附录·····	232
附录 A 模糊建模·····	232
附录 B 反馈增益·····	233
附录 C 稳定控制·····	233
附录 D 系统参数·····	234
结束语·····	237
参考文献·····	239

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引言

在一般人的印象中，经典数学应该是精确的，严格地说不应该是模糊的。但模糊现象又的确客观存在于人类思维、社会现象和自然现象中。早在 20 世纪 20 年代，就已经有学者开始思考和研究如何描述客观世界中普遍存在的模糊现象。著名的哲学家和数学家 B. Russell 在 1923 年就写出了有关“含模糊性”的论文。他认为所有的自然语言均是模糊的，比如“年轻的”和“年老的”就都不是很清晰的或准确的，它们没有明确的内涵和外延，这些概念实际上是模糊的。可是，在特定的环境中，人们用这些概念来描述某个具体对象时却又能让人们心领神会，很少引起误解和歧义。

事隔 10 余年后，英国学者 M. Black 在 1937 年也曾对“含模糊性”的问题进行过深入研究，并提出了“轮廓一致”的新概念，这完全可以看作是后来的“隶属度函数”这一重要概念的思想萌芽。应该说他已经走到了真理的边缘，可谓模糊集合论的鼻祖。可惜，他在描述某一概念的“真实接近程度”时，错用了“用法的接近程度”，最终与真理擦肩而过，失之交臂。

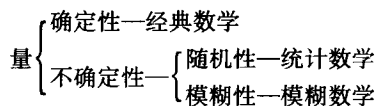
与 B. Russell 同时代的逻辑学家和哲学家 J. Lukasiewicz 发现经典的二值逻辑只是理想世界的模型，而不是现实世界的模型，因为它在对待诸如“某人个子比较高”这一客观命题时不知所措。他在 1920 年创立了多值逻辑，为建立正式的模糊模型走出了关键的第一步。但是，多值逻辑本质上仍是精确逻辑，它只是二值逻辑的简单推广。

美国加州大学的 L.A.Zadeh 博士在 1965 年发表了 Fuzzy Set 论文<sup>[1]</sup>中首次提出了表达事物模糊性的重要概念——隶属度函数，从而突破了 19 世纪末德国数学家 G. Cantor 创立的经典集合论的局限性。借助于隶属度函数可以表达一个模糊概念从“完全不属于”到“完全属于”的过渡，才能对所有的模糊概念进行定量表示。隶属度函数的提出奠定了模糊理论的数学基础。这样，像“冷”和“热”这些在常规经典集合中无法解决的模糊概念就可以在模糊集合中得到有效表达。

1966 年，P.N.Marinos 发表了模糊逻辑的研究报告，这一报告真正标志着模糊逻辑的诞生。模糊逻辑和经典的二值逻辑不同，模糊逻辑是一种连续逻辑。一个模糊命题是一个可以确定隶属度的句子，它的真值可取  $[0, 1]$  区间中的任何数。很明显，模糊逻辑是二值逻辑的扩展，而二值逻辑只是模糊逻辑的特殊情况。模糊逻辑有着更加普遍的实际意义，它否定了二值逻辑简单的肯定或否定，把客观世界看成是具有连续灰度等级变化的，它允许一个命题亦此亦彼，存在着部分肯定和部分否定，只不过隶属程度不同而已，这就为计算机模仿人的思维方式来处理普遍存在的语言信息提供了可能，因而具有划时代的现实意义。

模糊逻辑是在多值逻辑的基础上发展起来的，但两者又有本质区别。多值逻辑首先突破了真值的两极性，承认了真值具有中介过渡性，认为事物在形态和类属方面并非是非此即彼，是可能此亦可能彼，或者可能非此也可能非彼。但是，多值逻辑通过穷举中介的方法表示过渡性，把所有中介看成是彼此独立、界限分明的对象，真值是精确的。因此，多值逻辑本质上是一种精确逻辑，只不过是二值逻辑的简单推广。而模糊逻辑不仅承认真值的中间过渡性，还认为事物在形态和类属方面具有亦此亦彼性、模棱两可性，或者说是模糊性，相邻之间是相互交叉和渗透的，其真值也是模糊的。

模糊数学产生以后，客观事物的确定性和不确定性在量方面的表现，可做如下划分：



随机性和模糊性尽管都是对事物不确定性的描述，但两者是有区别的。概率论研究随机现象，所研究的对象本身有着明确的含义，只是由于条件不充分，使得在条件与结果之间出现决定性的因果关系，这种在事件的出现与否上表现出的不确定性称为随机性。在  $[0, 1]$  上取值的概率分布函数描述了这种随机性。模糊数学是研究和处理模糊现象的，所研究的事物概念本身是模糊的，即一个对象是否符合这个概念难以确定，这种由于概念的外延模糊而造成的不确定性称为模糊性。在  $[0, 1]$  上取值的隶属度函数就描述了这种模糊性。

模糊数学一经出现就表现出其强大的生命力和渗透力，20世纪70年代以后，在广泛的领域得到了很快的发展。

## 1.2 模糊控制存在的问题

模糊控制利用模糊集合理论将专家知识和操作人员经验形成的语言规则直接转化为控制策略（通常是模糊规则查询表），其设计不依赖于对象的精确数学模型，而是利用其语言知识模型进行设计和修正控制算法，适合于对复杂系统（具有高度非线性、时变、不确定、强耦合等特性）进行有效的控制。但模糊控制理论还没有像现代控制理论那样完善和系统化，难以对稳定性和鲁棒性等系统的动态性质进行严格的理论分析，也缺少系统化的设计方法，尤其是将模糊控制应用到复杂多变量系统时，完备的模糊规则库其规则数随传感器变量数成指数增长，其一致性和完整性难以保证，达到不可处理的程度。另外，整个过程中掺杂着相当程度的人的主观因素，影响模糊控制系统性能。而且基于语言变量设计的模糊控制器，它首先表现为一种局部行为，通过某种组合（模糊推理）产生全局行为。有许多例子表明，一组稳定的局部控制行为通过某种组合将导致不稳定的全局控制律。因此，



进一步研究和完善模糊控制器的分析和设计理论，尤其是模糊控制器的系统化设计和稳定性分析，是十分必要的。

在模糊控制领域，目前存在的主要问题可概括如下：

1. 模糊控制规则的获取 包括模糊子集数与规则数的选择、变量空间的模糊划分、隶属度函数的选择等。

(1) 在模糊建模和控制中，模糊子集数与规则数的多少意味着模糊系统分析和设计的复杂程度，这种复杂性包括算法复杂性和空间复杂性，也影响模糊系统的计算量和存储量。一般而言，模糊子集数与规则数多，建模精确，控制性能好，所带来的问题是分析和设计困难，计算量和存储量也大；相反，模糊子集数与规则数少，建模精度差，控制效果差，而分析和设计控制系统比较容易，计算量和存储量也小。这些参数可以看成是模糊系统的结构参数，人们总是在复杂性和精确性之间寻找折中，然而这种选择通常是因人而异的，是十分主观的。如何做到客观化和标准化仍然需要做深入的研究。

(2) 变量空间的模糊划分，过去往往采用均匀划分。这对于线性系统而言，不产生严重问题，仅影响控制性能，因为线性系统的局部稳定性和全局稳定性是一致的；但对于非线性系统，这种均匀划分显然是不合理的，需要在模糊建模中采用模糊聚类方法。

(3) 隶属度函数的选择既要考虑分辨率，又要考虑测得的数据中的噪声影响。如果选择高分辨率，则带来的结果是噪声影响也大；反之，噪声影响小。但是分辨率的高低在某种程度上反映了控制器的性能，如何恰当地选择隶属度函数仍然是个问题。

模糊规则的语言表达是模糊系统的核心。在这个意义上，语言表达包含了模糊系统设计的绝大部分信息，其他的参数是为了信息的有效利用和表达。模糊系统可以利用的信息有两种：语言和数据信息，人们从模糊控制器的结构本身入手，提出自适应模糊控制和神经模糊控制等，克服了以往单纯利用语言信息的缺点。这也正是模糊控制器结构的研究问题。