

国家自然科学基金资助项目

第2版

模糊控制原理 与应用

诸 静 等著

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

模糊控制原理与应用

(国家自然科学基金资助项目)

第 2 版

诸 静 等著



机械工业出版社

模糊控制是近代控制理论中一种基于模糊数学理论、采用语言规则与模糊推理等新技术的高级控制策略,它是当前研究热点——智能控制中的一个重要分支,发展迅速、应用广泛、实效显著、引人关注。

本书主要内容有模糊数学基础、模糊逻辑理论、模糊控制系统与模糊控制器、模糊控制器的设计与分析、模糊控制理论研究、基于多值逻辑的硬件模糊控制器、模糊集成控制器与系统、模糊控制用的通用芯片和模糊控制应用实例等。这次修订着重增加了多值逻辑理论与应用技术、模糊 Petri 网和模糊 H 网理论及嵌入式模糊 Petri 网知识表示与推理算法,以及基于多值逻辑的模糊控制器硬件实现机理、设计与性能分析等内容。原理与理论部分的论述条理清楚,通俗易懂;应用技术与实例面广量多,说明翔实;全书图文并茂,由浅入深;开卷有益,宜于自学入门。

本书可作为各高等院校相关专业的教师、研究生和高年级学生的教学与研究的参考用书;也可以作为信息学科相关领域,特别是自动化领域的高科技研究和开发部门与公司的工程技术人员、科研工作者的主要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模糊控制原理与应用/诸静等著. —2 版. —北京:
机械工业出版社, 2005.1

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-04671-4

I. 模… II. 诸… III. 模糊控制 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 119839 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:孙流芳 版式设计:霍永明 责任校对:吴美英

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 2 版·第 1 次印刷

850mm × 1168mm $1/32$ · 26.875 印张 · 718 千字

0 001—4 000 册

定价:49.00 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

第 2 版前言

自动控制理论至今已有将近一个世纪的发展历史，经历了经典控制理论和现代控制理论（包括预测控制、鲁棒控制等先进控制策略的研究）两个阶段后，正驱使人们致力于 20 世纪 70 年代开始的智能控制理论研究。它是在人工智能学科基础上，对控制理论研究深度和广度上的开拓；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发展的高速化所必然的趋势。

人工智能包括推理、学习和联想三大要素。它不是采用纯数学建模的方法，而是将相关专家的知识 and 思维、决策过程由计算机（包括软件和硬件）来模仿和实现人类智慧的学科。很多科学家认为，21 世纪生产力的飞跃寄托于人工智能技术，并认为人工智能的发展必将会给控制理论与控制工程学科带来一次新的史无前例的理论与技术上的创新。第五代计算机的研究充分体现了人类左脑的逻辑推理功能，而人工智能研究的下一步是模仿人类右脑的模糊信息处理功能。人工智能将在逻辑推理计算机、模糊计算机和神经网络计算机这三者的基础上，由两方面来实现，即：一是利用现有的计算机技术模拟人类的智能；二是利用一种全新的技术来实现信息处理的模糊化和网络化。前者是实现人工智能必需的先决条件；后者是实现人工智能的根本途径。

“模糊”是人类感知万物、获取知识、思维推理、决策实施的重要特征。“模糊”比“清晰”所拥有的信息量更大，内涵更丰富，更符合客观世界。“模糊控制理论”是由美国学者加利福尼亚大学著名教授 L.A.Zadeh 于 1965 年首先提出，至今仅有近 40 年时间。它以模糊数学为基础，用语言规则描述知识和经验的方法，并结合先进的计算机技术，由模糊推理进行判决的一种

高级控制策略。它无疑是属于智能控制范畴，而且发展至今已成为人工智能领域中的一个重要分支。其理论发展之迅速、应用领域之广泛、控制效果之显著，实为世人醒目关注。特别是近几年来，模糊控制与其他控制策略构成的集成控制，以及与神经网络相结合的模糊神经网络等迅速发展，更使诸多学者确信，它是智能控制理论中一个全新的研究方向。

模糊理论的研究最早始于模糊逻辑数学，因此，众多学者在总结研究成果的基础上，撰写了不少有关模糊数学及其应用方面的著作，这对促进模糊理论及其在各学科领域中应用研究是有贡献的。本书是从系统和控制角度全面介绍模糊数学基础理论及其发展的新理论与新动向，研究模糊控制器和模糊控制系统的设计与分析的基本理论和实现技术，以及模糊集成控制理论和应用成果。

本书是作者多年来从事研究生教学与指导硕、博士研究生学位论文研究工作所取得成果的总结；也是完成国家自然科学基金——“多变量复杂系统模糊推理和自学习模糊控制策略研究”和“多值逻辑理论研究及其新的智能表示与应用领域探索”项目，以及浙江省自然科学基金——“模糊控制理论的工业应用机理和系统集成研究”课题所取得的成果的综合，并是经过去粗存精、充实提高的著作。

本书第1版自1995年出版以来，先后已连续印刷5次，发行量已达到将近12000册。被全国各大高等院校作为研究生或大学高年级课程教材或教学参考书，也广为全国各科研院、所和高科技公司的工程技术人员作为科学研究和新产品开发的首选参考资料，得到国内众多学者与专家的认可和引用，并得到广大读者的喜欢和厚爱。为此，作者表示真诚和深切的谢意。

随着模糊控制理论研究和应用技术的发展，目前正与众多学科进行交叉和渗透，并正向着更宽广的相关学科领域延伸。据此，趁再版之际，除了对原书内容作适当充实和修改以外，着重在多值逻辑理论与应用技术、模糊 Petri 网与模糊 H 网理论和嵌

入式模糊 Petri 网知识表示与推理算法, 以及基于多值逻辑的模糊控制硬件实现机理、设计与性能分析等方面内容进行了探讨和补充, 以使再版后的本书内容能与时俱进, 更好满足读者的需求。

全书共有 10 章。第 1 章为绪论; 第 2、3 章阐述了模糊控制的数学基础与模糊逻辑基本理论, 包括集合论与模糊集合及其基本定义、定理, 模糊关系的基本性质和模糊图与模糊网络, 模糊逻辑系统中的命题、范式与函数的分析、综合和硬件实现, 以及模糊控制中的知识表示与模糊推理原理等相关知识; 第 4、5 章着重论述了模糊控制系统、模糊控制器的原理、组成、分类、设计方法与动态、静态特性分析; 第 6 章模糊控制理论研究, 主要介绍了近几年在模糊模型辨识建模、模糊函数逼近器理论与分析、模糊控制器结构、合成推理规则与分层模糊推理等方面的研究成果; 第 7 章探讨了基于多值逻辑的硬件模糊控制器的实现原理与技术, 包括查表式、在线推理式、规则匹配型和基于多元逻辑 (DYL) 的多种硬件模糊控制器及其性能分析; 第 8、9 章研究了目前众多学者所关注的模糊集成控制器与集成系统的相关理论, 包括与解耦、预测、变结构等先进控制理论相集成的模糊控制器、与神经网络相集成的模糊-神经网络控制器, 以及由模糊控制用的通用芯片和通用软件组成的支撑工具——模糊控制通用系统; 第 10 章以较大篇幅、较全面地介绍了模糊控制在各个领域内应用实例与研究成果, 包括它的工业应用和在可编程序控制器、系统故障与医疗诊断、天气预报以及图像识别等领域中的应用, 特别对在家用电器, 如电饭煲、全自动洗衣机及空调器中的应用作了详细论述。全书兼顾基本知识介绍、基本原理论述和基本应用技术探讨, 同时又适当论及当前模糊控制理论研究创新性成果和进展动向, 以满足不同读者的需求。本书第 1 版第 5 章由金耀初博士编写, 此版仅稍作修改补充; 第 6、8、10 章由诸勇博士编写, 其余为诸静教授编写。

本书的撰写与出版借重了“参考文献”目录中的大量文献资

料，并得到中国自动化学会和机械工业出版社有关同志的关照，作者特此对他们表示由衷的感谢。

由于模糊控制理论是一个新颖的领域，正在深入研究和迅速发展，许多理论尚不够完善与成熟，再加之作者水平所限，难免有错漏和不妥之处，衷心希望师友和读者批评指正，不胜感激。

作 者

2004 年 8 月于浙江大学

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

第2版前言

第1章 绪论	1
1.1 模糊控制理论研究概况	1
1.1.1 模糊控制发展史简介	1
1.1.2 模糊控制理论研究的意义与进展	2
1.1.3 模糊集成控制理论的研究	7
1.2 模糊控制应用领域与现状	13
1.2.1 历史上应用的回顾	13
1.2.2 现代应用技术的研究	15
1.3 模糊理论研究的新动向	19
1.3.1 人类友好系统的研究	19
1.3.2 软计算技术的研究	22
1.4 模糊控制研究存在的主要问题	23
1.5 自动控制理论发展简史	24
1.5.1 经典控制理论的发展与研究	25
1.5.2 现代控制理论的研究	25
1.5.3 先进控制理论的研究	27
1.5.4 智能控制理论的研究动向	31
第2章 集合与模糊数学基础	42
2.1 清晰集合	42
2.1.1 集合的基本知识	42
2.1.2 集合的运算性质	47
2.1.3 集合的笛卡儿积、映射与关系	49
2.1.4 特征函数	54
2.2 模糊集合	56

2.2.1	模糊概念与模糊集定义	56
2.2.2	模糊集合的表示方式	58
2.2.3	模糊集合中的基本定义和运算性质	60
2.2.4	α 截集和基本定理	67
2.2.5	隶属度函数的确定方法	73
2.2.6	凸模糊集与模糊数	106
2.3	模糊关系	110
2.3.1	模糊关系定义与表示方法	110
2.3.2	模糊关系性质与其合成关系	124
2.4	模糊图与模糊网络	137
2.4.1	模糊图	137
2.4.2	Petri 网与模糊 Petri 网	148
2.4.3	H 网与模糊 H 网	152
附录 2.A	几个运算性质的证明	157
附录 2.B	F 集合基本原理的证明与推广	160
附录 2.C	t 算则与 s 算则	161
第 3 章	模糊控制的基础理论	169
3.1	模糊逻辑系统	169
3.1.1	二值逻辑与多值逻辑	169
3.1.2	模糊命题与模糊逻辑	182
3.1.3	模糊逻辑函数	194
3.1.4	模糊逻辑函数的硬件实现	200
3.1.5	多值逻辑函数及其硬件实现	210
3.1.6	区间值模糊集与区间值模糊逻辑	214
3.2	模糊控制中的知识表示	219
3.2.1	模糊语言与语言变量	219
3.2.2	模糊语句	233
3.2.3	基于多值逻辑的知识表示	246
3.2.4	Petri 网的知识表示	252
3.3	模糊推理	258
3.3.1	似然推理	258
3.3.2	模糊关系方程及其求解	267
3.3.3	模糊条件语句与多重模糊条件语句	270

3.3.4	几种模糊推理方法	274
3.3.5	模糊推理的图示法	280
3.4	基于嵌入式模糊 Petri 网 (EFPN) 的知识推理	284
3.4.1	嵌入式模糊 Petri 网的定义	284
3.4.2	嵌入式模糊 Petri 网的动态特性	286
3.4.3	嵌入式模糊 Petri 网的推理算法	290
3.4.4	实例	291
附录 3.A	II 型模糊集	293
附录 3.B	模糊条件语句的几种真域模型	294
附录 3.C	多重模糊条件语句的几种表示	301
附录 3.D	一些常用的模糊蕴涵算子	302
第 4 章	模糊控制系统与模糊控制器	303
4.1	模糊控制系统	303
4.1.1	模糊控制系统的组成	305
4.1.2	模糊控制系统的原理与特点	306
4.1.3	模糊控制系统的分类	322
4.2	模糊控制器	326
4.2.1	模糊控制器的组成	326
4.2.2	模糊控制器的结构	337
4.2.3	模糊控制器模型的分类	342
4.3	一个简单的模糊控制系统实例	347
4.3.1	系统受控对象	347
4.3.2	锅炉锅筒水位模糊控制系统	348
4.3.3	燃烧系统的模糊控制	354
附录 4.A	模糊控制器的多值继电特性	356
第 5 章	模糊控制器的设计与分析	358
5.1	模糊控制器的设计	358
5.1.1	模糊控制器的设计要求	358
5.1.2	模糊控制器的结构设计	360
5.1.3	模糊规则的选择和模糊推理	364
5.1.4	解模糊化	377
5.1.5	模糊控制器论域及比例因子的确定	388
5.2	模糊控制器的静态特性分析	401

5.2.1	模糊控制规则的完备性	402
5.2.2	模糊控制规则的干涉性	403
5.2.3	模糊控制规则的相容性	406
5.2.4	模糊控制器的鲁棒性	411
5.3	模糊控制器的动态特性分析	413
5.3.1	影响模糊控制器动态特性的若干因素	413
5.3.2	模糊控制器动态特性的改善	417
5.3.3	模糊控制仿真实例	430
5.3.4	模糊控制器的动态稳定性	439
附录 5.A	有关控制规则干涉性的几个定理证明	445
第 6 章	模糊控制理论研究	447
6.1	模糊辨识建模	447
6.1.1	系统建模概述	447
6.1.2	模糊辨识建模的原理	449
6.1.3	模糊辨识建模的改进方法	461
6.1.4	多变量系统的辨识建模	466
6.2	模糊函数逼近器的理论与分析	471
6.2.1	两类基本模糊模型推理机理及其表达式	471
6.2.2	模糊函数逼近器理论	478
6.2.3	模糊函数逼近器的误差分析	481
6.2.4	模糊函数逼近器的存在条件	483
6.3	模糊控制器的结构研究	486
6.3.1	PID 模糊控制器	486
6.3.2	自调整模糊控制器	504
6.3.3	最优模糊控制器	510
6.3.4	自学习模糊控制器	519
6.4	模糊推理规则的研究	534
6.4.1	模糊推理函数	534
6.4.2	语句连接词与合成算子	544
6.4.3	合成推理	545
6.4.4	分层模糊推理	548
附录 6.A	式 (6-131) 的证明	557
附录 6.B	几个引理的证明	558

第 7 章 基于多值逻辑的硬件模糊控制器	560
7.1 查表式硬件模糊控制器	560
7.1.1 基于 J 门的查表式硬件模糊控制器	560
7.1.2 基于模糊分类器的查表式硬件模糊控制器	563
7.2 在线推理式硬件模糊控制器	565
7.2.1 采用 DYL 的推理式硬件模糊控制器	565
7.2.2 基于神经元近似推理的硬件模糊控制器	569
7.3 规则匹配型硬件模糊控制器	578
7.3.1 硬件电路	578
7.3.2 基于规则匹配的模糊控制器	581
7.4 基于 DYL 的模糊 PID 控制器	584
7.4.1 模糊 PID 控制器的硬件实现	585
7.4.2 模糊自组织 PID 控制器的硬件实现	589
第 8 章 模糊集成控制器与系统	596
8.1 模糊集成控制	596
8.1.1 模糊集成控制器	596
8.1.2 模糊集成控制系统	636
8.2 模糊-神经网络系统	652
8.2.1 神经网络在模糊控制器中的应用	652
8.2.2 采用神经网络的自组织模糊控制器	660
8.2.3 模糊-神经网络控制应用实例	666
8.2.4 几点结论	668
8.3 专家模糊控制系统	669
8.3.1 专家模糊控制系统的设计	670
8.3.2 专家模糊控制系统应用实例	673
附录 8.A 反向传播学习算法	676
第 9 章 模糊控制用的通用芯片与支持系统	677
9.1 模糊控制通用芯片	677
9.1.1 模糊样本比较器与应用系统	678
9.1.2 模糊相关器	679
9.1.3 模糊微控制器及其开发系统	680
9.1.4 神经处理器及其开发系统	680
9.2 NLX230 单片模糊微控制器	681

9.2.1	模糊微控制器逻辑设计的基本思想	682
9.2.2	距离测量原理	684
9.2.3	单块芯片简介	687
9.2.4	工作模式	691
9.2.5	应用和特点	694
9.3	ADS230 模糊微控制器的开发系统	694
9.4	模糊控制用的通用系统	695
9.4.1	模糊控制用的通用控制器	695
9.4.2	模糊控制用的通用软件	700
9.4.3	结论	702
第 10 章	模糊控制的应用	703
10.1	模糊控制的工业应用	703
10.1.1	模糊控制在交流伺服系统中的应用	703
10.1.2	自学习模糊控制器及其在液位控制中的应用	717
10.1.3	自校正模糊控制器在粮食烘干系统中的应用	724
10.1.4	模糊控制在水泥生产过程中的应用	731
10.1.5	模糊控制在工业机器人中的应用	742
10.2	模糊控制在其他领域中的应用	751
10.2.1	模糊控制在可编程序控制器中的应用	752
10.2.2	模糊模型化在抗生素发酵过程的染菌故障诊断中的应用	758
10.2.3	模糊预测及其在天气预报中的应用	764
10.2.4	模糊控制在图像识别中的应用——智能机器人行走控制	773
10.2.5	模糊控制在医疗诊断中的应用	780
10.3	模糊控制在家用电器中的应用	788
10.3.1	概况	788
10.3.2	模糊控制在电饭煲中的应用	791
10.3.3	模糊控制在全自动洗衣机中的应用	794
10.3.4	模糊控制在空调器中的应用	805
附录		810

附录 A 符号集表	810
附录 B 基本运算表	815
附录 C 基本规律表	817
附录 D 基本性质表	820
参考文献	821