

模糊理论基础

■ 胡宝清 编著

(第二版)

· 模糊理论与工程丛书 ·



武汉大学出版社
WUHAN UNIVERSITY PRESS

国家自然科学基金资助项目(70771081)成果

国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2007CB310804)成果

模糊理论与工程丛书

模糊理论基础

胡宝清 编著

(第二版)



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

模糊理论基础/胡宝清编著. —2 版. —武汉: 武汉大学出版社, 2010. 6

模糊理论与工程丛书

ISBN 978-7-307-07676-1

I. 模… II. 胡… III. 模糊集理论 IV. O159

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 051628 号

责任编辑:李汉保

责任校对:刘 欣

版式设计:支 笛

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 湖北恒泰印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 41.75 字数: 764 千字 插页: 1

版次: 2004 年 9 月第 1 版 2010 年 6 月第 2 版

2010 年 6 月第 2 版第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-07676-1/O · 421 定价: 56.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

模糊理论与工程系列丛书编委会

名 誉 主 编	刘应明			
名 誉 副 主 编	汪培庄	王国俊	吴从炘	何新贵
	郭桂蓉	吴望名		
主 编	罗懋康			
副 主 编	胡宝清(常务)	应明生	张文修	
	郑崇友	陈国青	蔡开元	
	陈水利			
编 委	(按姓氏拼音排序)			
	陈世权	陈国权	陈仪香	陈永义
	程里春	曹炳元	董长清	方锦暄
	黄崇福	贺仲雄	哈明虎	韩立岩
	李洪兴	李庆国	李 雷	李生刚
	刘增良	史福贵	王熙照	吴孟达
	吴伟志	徐 扬	徐晓泉	徐泽水
	张德利	张德学	赵 彬	邹开其

内 容 简 介

本书系统地介绍了模糊集理论及其应用的基本原理与基本方法。全书共分 15 章,内容包括模糊集理论的三个基本概念——模糊集合、模糊关系、模糊隶属函数;模糊集理论的三大基本原理——分解定理、表现定理和扩张原理;模糊集理论的三个基本应用——模糊聚类分析、模糊模式识别和模糊综合评判;模糊集理论的三大热门专题——模糊决策理论、模糊逻辑系统、模糊测度理论。书中阐述的重要概念附有英文对照,便于读者对相关英文文献的检索;每章后附有小结,便于读者对最新研究成果的追踪;书后附有符号说明和名称索引,便于读者阅读方便;大量的参考文献便于读者进一步阅读。

本书可以作为大专院校高年级本科生、研究生的教材或教学参考书,也可以作为从事模糊集理论与应用研究的工程技术人员和广大教师的参考书。

作者简介

胡宝清,男,1962年3月出生于湖北仙桃,武汉大学数学与统计学院教授、博士生导师。1982年获得学士学位,学习基础数学。1987年获得硕士学位,主攻专业为模糊数学。2001年获得武汉大学博士学位。2003年9月至2004年3月作为访问教授前往澳大利亚西澳大学进行为期半年的访问学习。多次前往香港城市大学与香港理工大学进行合作研究。1997年后被聘为武汉大学教授,是信息与计算科学学科的学术带头人之一,兼任武汉大学数学与统计学院信息与计算科学系主任、中国系统工程学会模糊数学与模糊系统专业委员会常务理事兼教育与普及工作委员会主任、《模糊系统与数学》杂志编委、中国运筹学会模糊信息与工程分会常务理事、中国计算数学学会理事、中国人工智能学会理事等职。胡宝清教授长期从事智能计算与不确定性信息处理及其应用研究。主持国家自然科学基金项目、国家教育部骨干教师计划基金项目,参加国家973项目、国家“八五”攻关项目、国家教育部博士学科点基金项目、香港政府研究资助局项目等十多项科研项目。参加的东北电网水库调度自动化系统的合作项目达到国际先进水平,主持其中的实用化软件开发达到国际领先水平。在国内外重要学术刊物发表学术论文80余篇,其中收录于三大检索的论文22篇。

(E-mail: bqhu@whu.edu.cn)

序

1965年,美国计算机与控制论专家 L. A. Zadeh 教授发表了题为《Fuzzy Sets》的论文,从而宣告模糊数学的诞生。他提出了 Fuzzy 集概念,创造了研究模糊性或不确定性问题的理论方法,迄今已成为一个较为完善的数学分支。

四十多年来,模糊理论与技术得到了迅猛发展,国内外学者在这个领域做了大量卓有成效的工作,其中许多探索是具有突破性的。模糊理论与技术一个突出的优点就是能较好地描述与仿效人的思维方式,总结和反映人的体会与经验,对复杂事物和系统可以进行模糊度量、模糊识别、模糊推理、模糊控制与模糊决策。尤其是模糊理论与人工智能在神经网络和专家系统等方面相互结合的研究已涉及计算机、多媒体、自动控制以及信息采集与处理等一系列高新技术的开发与利用,有力地推动了应用科学、决策科学、管理科学与社会科学的进步。在图像识别、人工智能、自动控制、信息处理、经济学、心理学、社会学、生态学、语言学、管理科学、医疗诊断、哲学研究等领域中,都得到广泛应用。

国际上,自 1980 年以来,每年均有数十次大中小型国际会议,并于 1984 年 7 月成立了国际模糊系统学会(IFSA—The International Fuzzy Systems Association),办有权威性的国际性杂志《Fuzzy Sets and Systems》,其后又有国际性杂志相继创刊,如《International Journal of Fuzzy Mathematics》、《IEEE Transaction on Fuzzy Systems》、《International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems》、《Advances in Fuzzy Mathematics》、《Advances in Fuzzy Sets and Systems》、《Advances in Fuzzy Systems》等。在我国,于 1983 年成立了模糊数学学会,从 1981 年起先后办有《模糊数学》、《模糊系统与数学》、《Fuzzy Information and Engineering》杂志。

为了系统地归纳总结模糊理论与技术的学术成就,系统地向广大读者介绍模糊数学的基础理论与基本知识,进一步推动该学科的发展,我们经过多年的酝酿、策划与探索,决定组织出版“模糊理论与工程系列丛书”。这套系列丛书中的大部分书籍既可以作为理工类本科生、硕士生和博士生的教材,也可以作为高等院校教师、相关科技工作者和模糊理论爱好者的参考读本。

“模糊理论与工程系列丛书”能够顺利出版主要得益于两方面的大力支持:

其一,得益于我国模糊数学界广大专家、学者的支持。王国俊教授、吴从炘教授、应明生教授、张文修教授、罗懋康教授等,在表示支持组织出版该丛书的同时,对该丛书的理论框架、选题定位以及一些具体操作细节上提出了许多宝贵的指导性意见。特别值得提及的是,得到了刘应明院士以及广大专家、学者的大力支持,组织了以刘应明院士为名誉主编的本系列丛书编委会。组织这个编委会的目的一是对该丛书的指导思想、选题思路以及今后的趋势将经常听取编委会的意见;二是对本系列丛书中拟将出版的每一本书都要由相关编委审核把关,尔后付梓,以确保丛书质量。

其二,得益于全国优秀出版社武汉大学出版社的大力支持。武汉大学出版社社长、总编与相关编辑对本系列丛书的出版给予了大力支持,多年来他们做了许多深入细致的工作,使这套系列丛书的第一批作品得以顺利出版。

在此,丛书编委会代表本系列丛书的全体作者,对各位专家、学者以及武汉大学出版社的领导与编辑表示由衷的感谢!真诚地希望广大专家、学者对本系列丛书提出宝贵的意见,使之日臻完善;热忱地欢迎广大专家、学者积极参与本丛书的编撰工作,使之日渐丰富。组织出版这套系列丛书本身就是一项系统工程。需要各位专家、学者以及方方面面的鼎力相助。倘若这套系列丛书能对广大读者有所裨益,能在浩瀚的书海中泛起一片闪光的涟漪,作为丛书编委会,我们就喜出望外了。

模糊理论与工程系列丛书编委会

2010年2月于武汉大学

前 言

自从罗特夫·扎德(Lotfi Zadeh)博士于 1965 年在《信息与控制》杂志上发表一篇开创性论文《模糊集合》以后,模糊集理论引起了学术界的高度关注,从此模糊集理论走过了一段长长的历程。从模糊集的提出到粗糙集的引入,从模糊逻辑的发展到软计算(soft computing)的形成,模糊集理论已遍地开花。特别是模糊逻辑技术在日本的成功应用,使得美国开始重视模糊逻辑。1989 年,Frost & Sullivan 国际营销研究结构提出,鉴于模糊逻辑技术产业的年增长率高达 20%,该技术将成为 21 世纪的全球最热门的十大技术之一。全美技术信息中心(NTIS)在 1990 年和 1991 年对与美国攸关的外国技术作的意见表明模糊逻辑技术对未来将有重大的影响。模糊逻辑技术越来越成为解决当今复杂问题的一种实用手段。

迄今为止,国内外关于模糊集理论及其应用的学术专著不计其数,但这些书要么是针对某一数学理论问题,要么是针对某一应用专题;要么过于理论作抽象描述,要么过于粗略作简单介绍。由于各自的研究目的和撰写角度不同,对模糊集理论的基础,特别是应用基础,进行综合性与系统性介绍的书还不多。作者想借武汉大学出版社组织出版模糊理论与工程系列丛书之契机,向读者提供一本较完整地介绍模糊理论基础的书。

本书系统地介绍了模糊集理论及其应用的基本原理与基本方法。全书共分 14 章,内容包括模糊集理论三个基本概念——模糊集合(第 1 章)、模糊关系(第 3、7 章)、模糊隶属函数(第 1、8 章);模糊集理论的三大基本原理——分解定理、表现定理和扩张原理(第 2 章);模糊集理论的三个基本应用——模糊聚类分析(第 4 章)、模糊模式识别(第 5 章)和模糊综合评判(第 6 章);模糊集理论的三大热门专题——模糊决策理论(第 9、14 章)、模糊逻辑系统(第 10、11 章)、模糊测度理论(第 12、13 章)。

本书具有以下特点:

第一,重基础。对 Fuzzy 集理论的基础问题,特别是应用基础,进行了重点介绍。

第二,重方法。对于某些关键问题给出多种算法,并给出程序化步骤,便于

工程应用人员上机实现。

第三,重拓展。给出了 Fuzzy 集和 Fuzzy 算子的各种推广形式,为多种模型的选择提供了理论基础。三角模算子与区间值穿插全书,关于 Fuzzy 值与格值的推广也有介绍。

第四,重实用。书中重要概念附有中、英文对照,便于读者对相关英文文献的模糊检索;书中某些定义、定理和例子等标明出处,便于读者查寻其背景与详细内容;书中不同章节里再次出现的概念和方法注明出处,便于读者选择性阅读;每章后附有小节,便于读者对最新研究成果的追踪;书后附有符号说明和名称索引,便于读者阅读;书后的参考文献以字典序排列,便于读者对文献的查阅。

本书得到包括刘应明院士在内的模糊理论与工程系列丛书编委会所有成员和包括应明生教授在内的中国系统工程学会模糊数学与模糊系统专业委员会诸委员的热忱支持,给作者以极大的鼓舞。武汉大学数学与统计学院的亲切关怀,给作者以极大的鞭策。武汉大学出版社的无私帮助,给作者以莫大的安慰。丰富的文献与专著的引入,使本书生辉。在此一并致谢!

倘若该书能对那些对模糊集感到神秘而又无从下手的朋友、想从事模糊集应用研究而又苦于理论贫乏的朋友有所帮助,作者就感到欣慰了,也不会枉费初衷。由于作者才疏学浅,错误与纰漏在所难免,诚望广大读者批评斧正。

胡宝清

2004 年 5 月于武汉珞珈山

前言(第二版)

《模糊理论基础》(第一版)已出版六年了,六年来得到了广大读者的钟爱和支持,应读者要求在第一版的基础上做了全面的修改。除了修正一些错误和不妥之处以外,还进行了下列调整。

1. 去掉了第1章§1.5中关于粗糙集的内容,并将其更详细描述与可信性理论一起作为第15章——Fuzzy集理论的若干相关理论。

2. 第1章由 t -模与 t -余模满足结合律直接引出 n 维 t -模与 n 维 t -余模。增加了 t -模的生成子、 S -蕴涵算子、 Q -蕴涵算子、Fuzzy集的整数基数和标量基数、Fuzzy集的距离与Genuine集。

3. 在第2章中将区间数及其运算放在Fuzzy数之前。将第14章中关于三角Fuzzy数和对称Fuzzy数的数乘与加法运算放在一般Fuzzy数运算之后。增加了Fuzzy自然数和Fuzzy基数、扩张极大与扩张极小运算。

4. 第3章中将Fuzzy矩阵调整到Fuzzy关系的复合之前,Fuzzy关系的投影与截影单独作为一节。

5. 第4章§4.3中增加了聚类效果的检验与目标函数的改进。

6. 第5章中以单特征模式与多特征模式进行分类。

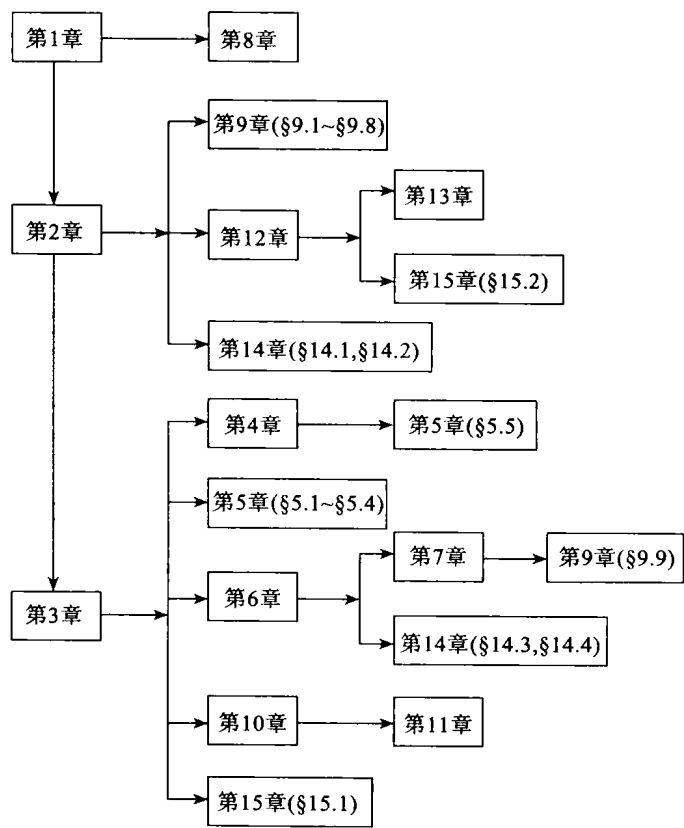
7. 第8章中增加了层次分析法。

本书第二版保持了第一版重基础、重方法、重拓展、重实用的风格与特点,增加和调整了部分内容,使该书内容更加丰满和系统。虽然如此,仍然会存在错误与纰漏,诚望广大读者继续批评斧正。

胡宝清

2010年2月于武汉珞珈山

本书阅读建议



目 录

第 1 章 Fuzzy 集合及其运算	1
§ 1.1 Fuzzy 集的定义与表示法	1
§ 1.2 Fuzzy 集的基本运算与性质	7
§ 1.3 Fuzzy 算子与 Fuzzy 集的其他运算	14
§ 1.4 Fuzzy 性的度量	36
§ 1.5 Fuzzy 集的推广	55
第 2 章 分解定理、表现定理与扩张原理	66
§ 2.1 Fuzzy 集的截集	66
§ 2.2 分解定理	71
§ 2.3 表现定理	75
§ 2.4 扩张原理	82
§ 2.5 区间数及其运算	96
§ 2.6 Fuzzy 数及其扩张运算	103
§ 2.7 Fuzzy 数的表现定理	123
§ 2.8 Fuzzy 集的模扩张运算	125
§ 2.9 分布数的扩张运算	131
第 3 章 Fuzzy 关系、Fuzzy 矩阵与 Fuzzy 图	134
§ 3.1 Fuzzy 关系的定义与性质	134
§ 3.2 Fuzzy 矩阵的概念	137
§ 3.3 Fuzzy 关系的投影与截影	140
§ 3.4 Fuzzy 关系的复合	142
§ 3.5 Fuzzy 关系的自反性	152
§ 3.6 Fuzzy 关系的对称性	155
§ 3.7 Fuzzy 关系的传递性	158
§ 3.8 Fuzzy 等价关系与 Fuzzy 相似关系	165

§ 3.9	Fuzzy 偏序关系	168
§ 3.10	区间值 Fuzzy 关系与格值 Fuzzy 关系	174
§ 3.11	Fuzzy 图	177
第 4 章	Fuzzy 聚类分析	187
§ 4.1	基于 Fuzzy 等价关系的 Fuzzy 聚类分析	187
§ 4.2	基于 Fuzzy 相似关系的最优 Fuzzy 聚类	204
§ 4.3	基于 Fuzzy 划分的 Fuzzy 聚类分析	206
§ 4.4	基于保序 Fuzzy 划分的 Fuzzy 聚类分析	216
§ 4.5	基于 Fuzzy 预序关系的 Fuzzy 聚类分析	221
第 5 章	Fuzzy 模式识别	226
§ 5.1	单特征模式的识别	226
§ 5.2	多特征模式的识别	239
§ 5.3	图像处理	244
§ 5.4	Fuzzy 方位转换技术	247
§ 5.5	Fuzzy 聚类分析与 Fuzzy 模式识别	249
第 6 章	Fuzzy 综合评判	254
§ 6.1	Fuzzy 映射	254
§ 6.2	Fuzzy 变换	255
§ 6.3	Fuzzy 综合评判模型	258
§ 6.4	多层次 Fuzzy 综合评判	267
§ 6.5	基于 Fuzzy 数的 Fuzzy 综合评判	272
第 7 章	Fuzzy 关系方程与 Fuzzy 矩阵广义逆	281
§ 7.1	Fuzzy 关系方程的性质	281
§ 7.2	区间值与格值 Fuzzy 关系方程的性质	283
§ 7.3	最大—最小型 Fuzzy 关系方程	286
§ 7.4	最大—乘积型 Fuzzy 关系方程	307
§ 7.5	Fuzzy 关系不等式	312
§ 7.6	变次 Fuzzy 相似关系方程	317
§ 7.7	Fuzzy 矩阵的广义逆	322

第 8 章 隶属函数与 Fuzzy 统计	330
§ 8.1 确定隶属函数的思路	330
§ 8.2 Fuzzy 统计	331
§ 8.3 二元对比排序	339
§ 8.4 层次分析法与因素权重 Fuzzy 集	351
§ 8.5 集值统计	359
§ 8.6 其他数学方法	360
§ 8.7 Fuzzy 分布	362
 第 9 章 Fuzzy 规划与优化	371
§ 9.1 Fuzzy 环境下的条件极值	371
§ 9.2 对称型 Fuzzy 规划	377
§ 9.3 非对称型 Fuzzy 规划	383
§ 9.4 Fuzzy 线性规划	384
§ 9.5 多目标 Fuzzy 线性规划	390
§ 9.6 区间目标非线性规划	395
§ 9.7 含 Fuzzy 系数的线性规划	402
§ 9.8 Fuzzy 动态规划	407
§ 9.9 Fuzzy 关系不等式约束下的格化线性规划	411
 第 10 章 Fuzzy 语言与 Fuzzy 逻辑	415
§ 10.1 Fuzzy 变量	415
§ 10.2 语言变量	418
§ 10.3 Fuzzy 词与 Fuzzy 算子	421
§ 10.4 Fuzzy 语言的文法	430
§ 10.5 Fuzzy 命题与 Fuzzy 逻辑公式	432
§ 10.6 Fuzzy 逻辑公式的化简	438
§ 10.7 语言值逻辑	448
 第 11 章 Fuzzy 推理与 Fuzzy 控制	452
§ 11.1 Fuzzy 判断句及其逻辑演算	452
§ 11.2 Fuzzy 推理句	453
§ 11.3 不同变元的 Fuzzy 推理句	455
§ 11.4 似然推理	458

§ 11.5	Fuzzy 条件语句	461
§ 11.6	多重 Fuzzy 条件语句	464
§ 11.7	Fuzzy 控制原理	466
第 12 章	Fuzzy 测度与 Fuzzy 积分	473
§ 12.1	Fuzzy 测度	473
§ 12.2	几种特殊的 Fuzzy 测度	475
§ 12.3	Fuzzy 积分	485
§ 12.4	Fuzzy 集的 Fuzzy 测度与 Fuzzy 积分	498
§ 12.5	区间值与 Fuzzy 值 Fuzzy 测度及其 Fuzzy 积分	505
第 13 章	可能性分布与 Fuzzy 概率	511
§ 13.1	可能性分布	511
§ 13.2	多元可能性分布	514
§ 13.3	Fuzzy 事件的概率	518
§ 13.4	事件的 Fuzzy 概率	526
§ 13.5	Fuzzy 事件的语言概率	532
第 14 章	Fuzzy 预测与 Fuzzy 决策	534
§ 14.1	Fuzzy 时间序列预测法	534
§ 14.2	Fuzzy 回归预测	538
§ 14.3	因素空间与 Fuzzy 决策	544
§ 14.4	变权分析与多因素 Fuzzy 决策	550
第 15 章	Fuzzy 集理论的若干相关理论	560
§ 15.1	粗糙集理论	560
§ 15.2	可信性理论和不确定理论	586
附录 I	符号说明	599
附录 II	名称索引	601
参考文献		607

第1章 Fuzzy 集合及其运算

19 世纪末,德国数学家 G. Cantor 首创集合论,对于数学基础的奠定有着重大贡献. 1965 年美国计算机与控制论专家 L. A. Zadeh 第一次提出了 Fuzzy 集概念,对 Cantor 集合理论作了有益的推广,迄今已形成一个较为完善的数学分支,并在许多领域中获得了卓有成效的应用,特别以模糊推理为核心的人工智能技术,在许多领域取得了明显的成果和经济效益. 本章主要介绍 Fuzzy 集的定义与运算、Fuzzy 性的度量和 Fuzzy 集的各种推广.

§ 1.1 Fuzzy 集的定义与表示法

对于一个经典集合 A , 空间中任一元素 x , 要么 $x \in A$, 要么 $x \notin A$, 二者必居其一. 这一特征可以用一个函数表示为

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$$

$\chi_A(x)$ 即为集合 A 的特征函数. 将特征函数推广到 Fuzzy 集, 在经典集合中只取 0, 1 两值推广到 Fuzzy 集中为区间 $[0, 1]$.

定义 1.1.1 设 $\tilde{A}$ 是论域 X 到 $[0, 1]$ 的一个映射, 即

$$\tilde{A}: X \rightarrow [0, 1], x \mapsto \tilde{A}(x)$$

称 $\tilde{A}$ 是 X 上的 Fuzzy 集, $\tilde{A}(x)$ 称为 Fuzzy 集 $\tilde{A}$ 的隶属函数 (membership function) (或称为 x 对 Fuzzy 集 $\tilde{A}$ 的隶属度 (degree of membership)).

Fuzzy 集的思想既简单又自然, 下面的例子可以帮助我们理解 Fuzzy 集的思想.

例 1.1.1 (Tizhoosh, 1997) 我们想定义一个“黑色”集合, 如图 1.1.1 所示. 在经典集合理论中, 我们必须确定一个阈值, 比如灰度 100. 所有灰度在 0 到 100 的是“黑色”的元素, 其他的不属于这一集合 (见图 1.1.1(a)). 但黑色是一定程度的灰色, 所以用 Fuzzy 集能更好地描述这一特征. 定义这样的集合我