

数学交叉学科与应用数学丛书

# 基于不确定规则的 模糊逻辑系统

## 导论与新方向

[美] Jerry M. Mendel 著

张奇业 谢伟献 译

Uncertain Rule-Based  
Fuzzy Logic Systems  
Introduction and New Directions



清华大学出版社

C14019121

0141.2

01

数学交叉学科与应用数学丛书

# 基于不确定规则的 模糊逻辑系统

## 导论与新方向



[美] Jerry M. Mendel 著

张奇业 谢伟献 译

Uncertain Rule-Based  
Fuzzy Logic Systems  
Introduction and New Directions

0141.2  
01

清华大学出版社  
北京



北航

C1708016

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2013-6757

Authorized translation from the English language edition, entitled UNCERTAIN RULE-BASED FUZZY LOGIC SYSTEMS, 1<sup>st</sup> ed, 0-13-040969-3 by JERRY M. MENDEL, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall PTR, copyright © 2001.

All Rights Reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by TSINGHUA UNIVERSITY PRESS Copyright © 2013.  
本书中文简体翻译版由培生教育出版集团授权给清华大学出版社出版发行。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 Pearson Education (培生教育出版集团)激光防伪标签,无标签者不得销售。  
版权所有,侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

基于不确定规则的模糊逻辑系统: 导论与新方向/(美) 孟德尔 (Mendel, J.M.) 著; 张奇业, 谢伟献译. --北京: 清华大学出版社, 2013

(数学交叉学科与应用数学丛书)

书名原文: Uncertain rule-based fuzzy logic systems: introduction and new directions

ISBN 978-7-302-34118-5

I. ①基… II. ①孟… ②张… ③谢… III. ①模糊逻辑-逻辑系统-研究 IV. ①O141.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 243989 号

责任编辑: 石磊 赵从棉

封面设计: 傅瑞学

责任校对: 刘玉霞

责任印制: 刘海龙

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈: 010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者: 北京市密东印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×230mm 印 张: 27.25 字 数: 579 千字

版 次: 2013 年 12 月第 1 版 印 次: 2013 年 12 月第 1 次印刷

印 数: 1~2500

定 价: 58.00 元

产品编号: 053331-01



这是国际上首部关于二型模糊逻辑系统 (FLS) 的著作. 作者是美国南加州大学电子工程系的 Jerry M. Mendel 教授. Mendel 教授以及他所在的工作小组可以算得上二型 FLS 的创始人, 他和他的博士生 Karnik, N. N. 在 1998 年第一届 IEEE 模糊系统会议上发表了第一篇关于二型 FLS 的文章《Introduction to Type-2 Fuzzy Logic Systems》, 经过短短三年多的时间, 二型 FLS 的理论、系统设计与算法实现已经发展得比较完善. 2001 年, Mendel 教授将他和他的博士生们的研究工作整理汇总, 撰写了这本关于二型 FLS 的首部著作, 由 Prentice Hall 公司出版发行. Mendel 教授于 1963 年在美国纽约布鲁克林理工学院获得博士学位, 1974 年到南加州大学任教至今. 作者自工作以来一直从事 (二型) 模糊逻辑系统理论及应用领域的研究, 并在该领域获得多项殊荣. 现任 IEEE 会士、IEEE 控制系统协会杰出会员、IEEE Transaction on Fuzzy Systems 副主编、IEEE 计算智能协会模糊系统技术委员会 Computing with word 专门工作组主席、IEEE 计算智能协会管理委员会委员. 除此之外, 他还撰写或编著了多部与模糊系统相关的著作.

《基于不确定规则的模糊逻辑系统: 导论与新方向》是一本针对研究生或工程人员的专业书籍, 适合于计算机、控制科学与工程、航空科学与工程、管理科学与工程、应用数学等专业的研究生作为教科书或相关专业的工程人员作为参考书来使用. 该书在简要介绍一型模糊集理论的基础上, 引出了二型模糊集的相关概念和结论, 并通过对比的方式系统地讲述了一型和二型 FLS 的结构、算法设计以及典型的案例研究, 最后还给出了二型 FLS 的 4 种特殊应用以及一些潜在的应用领域. 该书对于希望运用一型或二型 FLS 解决实际问题的人, 已经使用或希望使用基于规则的系统, 并关注如何用这种系统处理不确定性的工程师都具有很好的指导意义.

我本人于 2009 年年初开始转向模糊系统与控制方面的研究 (以前从事模糊拓扑、量化 Domain 理论的研究), 并首次接触到了二型 FLS, 从中了解到二型模糊集更适合建模现实生活中的诸多不确定性, 从而使得二型 FLS 比起一型 FLS 能更好地模拟实际系统, 有更强的鲁棒性. 这深深地吸引了我. 于是我查阅国内外关于二型 FLS 的文献, 看到国内研究二型 FLS 的学者并不多, 但国际上关于二型 FLS 的文章甚至是书籍都不少. 我思考这种现象的原因, 意识到, 可能是由于国内并没有一本关于二型 FLS 的书籍可以参阅, 且相关的中文文章很少造成的. 于是萌生了翻译 Mendel 教授撰写的首部二型 FLS 专著的念头. 2010 年 8 月, 我同 Mendel 教授沟通了这个想法, 并打算到他的工作小组访问一年.

Mendel 教授非常高兴, 并同意我于 2011 年 9 月到他那里访问. 自此之后, 在工作之余, 我开设了一个讨论班, 和学生们一起讲解此书, 并于 2011 年 9 月完成了整本书的学习. 我于 2011 年 10 月抵达南加州大学电子工程系后, 一边跟 Mendel 教授一起探讨二型 FLS 方面的最新研究, 一边翻译此书, 并向 Mendel 教授请教翻译过程中出现的问题. 需要指出的是, 原书中错误极少, 有个别打印错误我们直接在翻译中纠正了过来. 另外, 由于该书属于工程科技类书籍, 为了更好地体现作者的原意, 我们在翻译的过程中尽量遵从直译原则, 未进行过多修饰.

本书的翻译分工如下: 我负责本书主要章节的翻译、两遍校对和最后的定稿; 谢伟献老师负责附录的翻译、所有附图的处理、本书的整体排版、索引和目录的建立以及两遍校对. 另外, 在翻译的前期, 蒋正好、王晔、李齐林、魏冬梅、谢文俊、李慧敏等学生为本书的公式录入付出了辛勤劳动; 鲁红、张枫、孙泽明三名学生在使用翻译初稿的过程中提出了许多宝贵意见, 在此深表感谢. 本书在出版过程中得到清华大学出版社的大力支持, 在此要特别感谢理工分社的赵从棉编辑, 她对本书进行了细致入微的编辑; 感谢石磊主任, 在他的悉心引导下本书最终能够顺利出版; 感谢清华大学出版社的其他员工帮助校对和发行本书. 我还要衷心感谢我在美国做访问学者时的导师 Jerry M. Mendel 教授, 他在我翻译期间给了我很多理论上的指导与帮助. 最后, 我要特别感谢我的父亲, 是他不远万里从中国抵达美国帮我照看女儿, 让我有更多的时间学习和工作, 从而使我顺利地完成了翻译任务.

本书的出版得到国家“973”计划项目资助 (2012CB821200), 在此特别感谢教育部“长江学者奖励计划”获得者北京航空航天大学贾英民教授给予的大力帮助和支持.

由于现今尚没有中文版的二型模糊系统理论专著, 因此书中有些专业术语尚无统一的中文译法. 在翻译过程中, 虽然几经推敲, 但由于时间紧, 译者水平有限, 仍难免有疏漏和错误, 敬请读者不吝指正. 对于本书译稿, 若有指正或需与译者商讨, 请通过电子邮件 zhangqiye@buaa.edu.cn 或 jcbxwx@bift.edu.cn 与译者联系.

张奇业

2013 年 11 月于北京



不确定性使生活变得丰富多彩. 千百年以来, 人类已经发展了大量处理不确定性的策略, 虽从来没有确定性的结果, 但却有望使那些不确定性的不利影响达到最小. 本书讲述了在模糊逻辑 (fuzzy logic, 简记为 FL) 的框架下实现这个愿望的完整的方法. 这不是最初的 FL, 而是对 FL 的扩展与丰富, 它包含最初的 FL.

最初的 FL, 由 Lotfi Zadeh 开创, 到 2000 年已经发展超过了 35 年, 然而, 它不能处理不确定性. 这里的处理是指建模不确定性并使不确定性的影响达到最小. 最初的 FL——一型 FL——不能处理不确定性听起来是矛盾的, 因为模糊逻辑中的模糊一词有不确定性的含义. 扩展的 FL——二型 FL——能够处理不确定性, 因为它能够对不确定性进行建模, 并使不确定性的影响达到最小. 而且, 一旦所有的不确定性消失, 二型 FL 就退化为一型 FL, 这非常类似于一旦随机消失, 概率就退化为确定.

尽管一型 FL 有很多应用, 但正是它的**基于规则的系统的**应用最有力地说明了它作为强大的设计方法的重要性. 这样的基于规则的模糊逻辑系统 (fuzzy logic system, 简记为 FLS)——一型的和二型的——是本书所关心的. 我在其中展示了如何以新的方式运用 FL 以及如何有效地解决不确定性泛滥的问题.

FL 已经应用到诸多领域, 多数应用中存在不确定性 (如信号处理、数字通信、计算机和通信网络、诊断医学、运筹学、金融投资、控制等). 因此, 本书的结果可直接应用到所有这些领域. 为了说明二型 FLS 的性能优于一型 FLS, 当存在不确定性时, 我在本书中描述并提供了以下应用的结果: 时间序列预测, 用问卷调查进行知识挖掘, 直接用压缩数据对视频数据分类, 时变非线性数字通信信道的均衡, 克服时变非线性数字通信信道的同信道干扰和信号间干扰, 异步传输模式网络的连接允许控制. 这里没有包括控制的应用, 因为到目前为止二型 FL 还没有应用到它们. 因此, 本书不是关于 FL 控制的, 即使二型方法有一天可能被应用于它.

本书的结构分为四个部分: 第一部分——**预备知识**——包含 4 章, 给出了关于不确定性的背景材料、隶属函数以及贯穿整本书的两个案例研究 (时间序列预测和用问卷调查进行知识挖掘). 第二部分——**一型模糊逻辑系统**——包含 2 章, 给出了新的二型 FLS 的相应基础, 从而使得我们能够将案例研究的二型结果与一型结果进行对比. 第三部分——**二型模糊集**——包含 3 章, 每一章着重于二型模糊集的不同侧面. 第四部分——**二型模糊逻辑系统**——是本书的核心, 包含 5 章, 其中 4 章有关 FLS 的不同结构, 考虑如何在其中处理不同类型的不确定性, 另一章主要给出了二型 FLS 的 4 种特殊应用.

本书适合以下人群阅读：任何有本科学士学位，并且非常有兴趣成为计算机科学家的入；已经使用或想使用基于规则的系统，并关注如何运用这种系统处理不确定性的工程师们。我已经在书中写入了很多已经实现的例子，也在大多数章的结尾给出了练习题，以便该书能在课堂环境中使用，也能用作技术参考。

这里给出使用本书的几种特定方式：

- 对于完全不熟悉 FL，想快速入门的人，请阅读第 1 章的补充材料和第 5 章 (第 5.1~5.8 节)。
- 对于想深入了解一型基于规则的系统的人，请阅读第 1 章的补充材料和第 4~6 章。
- 对于只对二型模糊集合论感兴趣的人，请阅读第 3, 7~9 章以及附录 A 和 B。
- 对于想把基于规则的模糊逻辑系统作为一门课程的人，请使用第 1~12 章和第 13 章 (若时间允许)。具有数字通信、模式识别或通信网络背景的人应该会对第 14 章有兴趣，建议作为课程的项目。
- 对于支持 Takagi-Sugeno-Kang (简记为 TSK) 模糊系统，并想了解它的二型情形是什么样子的入，请阅读第 3, 7~9 和 13 章。
- 对于那些对时间序列预测感兴趣，并想快速了解采用基于规则的预测器对预测行为的不确定性进行建模的益处的人，请阅读第 4 章 (第 4.2 节)、第 5 章 (第 5.10 节)、第 6 章 (第 6.7 节)、第 10 章 (第 10.11 节)、第 11 章 (第 11.5 节) 和第 12 章 (第 12.5 节)。
- 对于那些对知识挖掘感兴趣，并想快速了解采用基于规则的预测器对评判的不确定性进行建模的益处的人，请阅读第 4 章 (第 4.3 节)、第 5 章 (第 5.11 节) 和第 10 章 (第 10.12 节)。

为了使人们尽可能开始运用二型 FL，我已经制作了可在网上获得的免费软件用以实现和设计一型和二型 FLS。它基于 MATLAB® (MATLAB 是 MathWorks 公司的一个注册商标)，由我以前的博士生 Nilesh Karnik 和梁启联 (Qilian Liang) 开发，可通过网站 <http://sipi.usc.edu/mendel/software> 进行下载。本书大部分章的最后是计算小节，向读者介绍一些特定的 M-文件的功能。附录 C 概括了所有的 M-文件，以便读者能够见微知著。

本书是在过去的 14 年间与我一起研究 FLS 的我的一部分博士生的研究的综合体。因此，这里我想给予他们每个人特别应得的赞扬。王立新 (Li-Xin Wang) 是我的第一个研究 FL 的无模型应用的学生。我们一起在单值一型 FLS 上的工作是第 5 章的基础。George Mouzouris 把立新的工作从单值模糊化扩展到非单值模糊化。这是我们完全在 FLS 的框架下处理其中一类不确定性 (FLS 的输入的不确定测量) 的首次尝试，是第 6 章的基础。Nilesh Karnik 提供了单值二型 FLS 的完整的基础和框架。<sup>1</sup>一些他提出的用于二型 FLS 的

<sup>1</sup>尽管 Lotfi Zadeh 在 1975 年引入了二型模糊集的概念，自那之后只有极少数量关于二型模糊集的文章被发表 (参见第 1.6 节)，没有人先于我们的工作发展二型 FLS。

新概念概括在第 1.3 节, 他的工作是第 3 章的部分内容、第 7~9 章的全部内容、第 10 章的部分内容以及附录 A 和 B 的基础。梁启联主要研究当一型模糊集的不确定性被建模为区间集时如何设计这样的系统使得二型 FLS 变得实际。他对于单值和两类非单值模糊化(一型和二型)做了这样的研究, 也发展了二型 TSK FLS。一些他提出的新概念概括在第 1.3 节, 他的工作是第 3 章和第 10 章的部分内容、第 11~13 章的全部内容以及第 14 章中的 4 个应用的基础。第 13 章是与他合作而写。

本书中所有的仿真由梁启联实现。对于他在这方面对我的帮助我表示真诚的感谢, 也感谢他和吴宏伟 (Hongwei Wu) 审阅整本书, 感谢 Katarina Vukadinovic 审阅本书第一稿的部分内容。也特别感谢 Robert John (DeMontfort University, Leicester, England) 和 George Klir (State University of New York at Binghamton)。Bob John 也研究二型模糊集及其应用, 他在我 2000 年 6 月访问并与他合作时, 对于第 3, 7, 8 章的材料扮演了“反射板”的角色。作为我们合作的结果那些章节无比的清晰。George Klir 审阅了第 2 章, 并分享了他在不确定性方面巨大的智慧, 他对于第 2.1 节的最终定稿有很大的影响。所有这些人的参与帮我完成了本书的最终稿。在内容或出版中出现的任何错误都是我的责任。

作者非常感谢从 AIAA, American Association for Advancement Science, Elsevier Science, IEEE, McGraw-Hill, Prentice-Hall 与 Springer-Verlag 出版的书籍或期刊引用的材料。对于引用的书籍或文章的完整列表, 请见“参考文献”。作者也非常感谢 Nilesh Karnik, 因为引用了我与他合作的报告材料。

我也非常感激我的编辑 Bernard Goodwin, 他总是乐于工作; 感谢我的出版编辑 Lisa Iarkowski 和 Wil Mara, 他们引导我通过了本书的最终出版; 感谢 Prentice-Hall 的其他员工帮我发行该书。

我想感谢我的妻子 Letty, 她支持我 40 多年, 在这样精彩的环境下使我撰写该书成为可能。最后, 把这本书献给我的孙女 Ashlee Cabral, 希望她有一天成为模糊逻辑的使用者。

Jerry M. Mendel

洛杉矶

2000 年 12 月

## 第一部分 预备知识

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 概论 .....                | 3  |
| 1.1 基于规则的 FLS .....           | 5  |
| 1.2 FLS 的新方向 .....            | 6  |
| 1.3 新概念及其历史背景 .....           | 7  |
| 1.4 基本设计要求 .....              | 9  |
| 1.5 不确定性的流动 .....             | 9  |
| 1.6 已有的关于二型模糊集的文献 .....       | 10 |
| 1.7 本书主要内容 .....              | 11 |
| 1.8 在基于规则的 FLS 之外的适用性 .....   | 14 |
| 1.9 计算 .....                  | 14 |
| 补充材料: 关于模糊集和模糊逻辑的简单入门知识 ..... | 15 |
| 1.10 关于模糊集的入门知识 .....         | 15 |
| 1.10.1 清晰集 .....              | 15 |
| 1.10.2 从清晰集到模糊集 .....         | 16 |
| 1.10.3 语言变量 .....             | 17 |
| 1.10.4 隶属函数 .....             | 18 |
| 1.10.5 一些术语 .....             | 19 |
| 1.10.6 清晰集的集合论运算 .....        | 20 |
| 1.10.7 模糊集的集合论运算 .....        | 21 |
| 1.10.8 同一积空间上的清晰关系与合成 .....   | 24 |
| 1.10.9 同一积空间上的模糊关系与合成 .....   | 25 |
| 1.10.10 不同积空间上的清晰关系与合成 .....  | 27 |
| 1.10.11 不同积空间上的模糊关系与合成 .....  | 30 |
| 1.10.12 限定词 .....             | 32 |
| 1.10.13 扩展原理 .....            | 33 |

|              |                          |           |
|--------------|--------------------------|-----------|
| 1.11         | 关于 FL 的入门知识 .....        | 36        |
| 1.11.1       | 清晰逻辑 .....               | 36        |
| 1.11.2       | 从清晰逻辑到 FL .....          | 40        |
| 1.12         | 注记 .....                 | 44        |
| 练习           | .....                    | 45        |
| <b>第 2 章</b> | <b>不确定性的来源.....</b>      | <b>49</b> |
| 2.1          | FLS 中的不确定性 .....         | 49        |
| 2.1.1        | 不确定性：一般性讨论 .....         | 49        |
| 2.1.2        | 不确定性：在 FLS 中 .....       | 50        |
| 2.2          | 语言对于不同的人有不同的含义 .....     | 52        |
| 练习           | .....                    | 58        |
| <b>第 3 章</b> | <b>隶属函数和不确定性.....</b>    | <b>59</b> |
| 3.1          | 引言 .....                 | 59        |
| 3.2          | 一型隶属函数 .....             | 59        |
| 3.3          | 二型隶属函数 .....             | 60        |
| 3.3.1        | 二型模糊集的概念 .....           | 60        |
| 3.3.2        | 二型模糊集的定义和相关概念 .....      | 60        |
| 3.3.3        | 更多的二型模糊集和 FOU 的例子 .....  | 66        |
| 3.3.4        | 上、下隶属函数 .....            | 68        |
| 3.3.5        | 嵌入二型集和嵌入一型集 .....        | 72        |
| 3.3.6        | 一型模糊集表示为二型模糊集 .....      | 73        |
| 3.3.7        | 二型模糊集中的 0 隶属和 1 隶属 ..... | 74        |
| 3.4          | 回到语言标签 .....             | 74        |
| 3.5          | 多元隶属函数 .....             | 76        |
| 3.5.1        | 一型隶属函数 .....             | 76        |
| 3.5.2        | 二型隶属函数 .....             | 77        |
| 3.6          | 计算 .....                 | 78        |
| 练习           | .....                    | 78        |
| <b>第 4 章</b> | <b>案例研究.....</b>         | <b>80</b> |
| 4.1          | 引言 .....                 | 80        |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 4.2 时间序列预测 .....                | 80 |
| 4.2.1 根据数据提取规则 .....            | 81 |
| 4.2.2 Mackey-Glass 混沌时间序列 ..... | 83 |
| 4.3 用问卷调查进行知识挖掘 .....           | 85 |
| 4.3.1 知识挖掘的方法 .....             | 86 |
| 4.3.2 问卷调查结果 .....              | 87 |
| 4.3.3 设计 FLA 的方法 .....          | 88 |
| 4.3.4 怎样使用 FLA .....            | 90 |
| 练习 .....                        | 92 |

## 第二部分 一型模糊逻辑系统

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第 5 章 单值一型模糊逻辑系统: 无不确定性 ..... | 95  |
| 5.1 引言 .....                  | 95  |
| 5.2 规则 .....                  | 96  |
| 5.3 模糊推理机 .....               | 98  |
| 5.4 模糊化及其对推理的影响 .....         | 100 |
| 5.4.1 模糊器 .....               | 100 |
| 5.4.2 模糊推理机 .....             | 101 |
| 5.5 解模糊化 .....                | 103 |
| 5.5.1 重心解模糊器 .....            | 104 |
| 5.5.2 和的中心解模糊器 .....          | 104 |
| 5.5.3 高度解模糊器 .....            | 105 |
| 5.5.4 改进的高度解模糊器 .....         | 106 |
| 5.5.5 集的中心解模糊器 .....          | 107 |
| 5.5.6 一个有趣的事实 .....           | 108 |
| 5.6 可能性 .....                 | 108 |
| 5.7 模糊基函数 .....               | 109 |
| 5.8 FLS 是万能逼近器 .....          | 113 |
| 5.9 设计 FLS .....              | 114 |
| 5.9.1 一步法 .....               | 117 |
| 5.9.2 最小二乘法 .....             | 118 |
| 5.9.3 反向传播 (最速下降) 法 .....     | 119 |

|        |                        |     |
|--------|------------------------|-----|
| 5.9.4  | SVD-QR 方法 .....        | 121 |
| 5.9.5  | 迭代设计方法 .....           | 123 |
| 5.10   | 案例研究：时间序列预测 .....      | 123 |
| 5.10.1 | 一步设计 .....             | 124 |
| 5.10.2 | 反向传播设计 .....           | 124 |
| 5.10.3 | 测量的变化 .....            | 127 |
| 5.11   | 案例研究：用问卷调查进行知识挖掘 ..... | 127 |
| 5.11.1 | 计算回答的平均值 .....         | 129 |
| 5.11.2 | 保留所有回答 .....           | 132 |
| 5.12   | 小结 .....               | 133 |
| 5.13   | 计算 .....               | 133 |
|        | 练习 .....               | 133 |
| 第 6 章  | 非单值一型模糊逻辑系统 .....      | 135 |
| 6.1    | 引言 .....               | 135 |
| 6.2    | 模糊化及其对推理的影响 .....      | 135 |
| 6.2.1  | 模糊器 .....              | 135 |
| 6.2.2  | 模糊推理机 .....            | 136 |
| 6.3    | 可能性 .....              | 140 |
| 6.4    | FBF .....              | 140 |
| 6.5    | 非单值 FLS 是万能逼近器 .....   | 142 |
| 6.6    | 设计非单值 FLS .....        | 143 |
| 6.6.1  | 一步法 .....              | 145 |
| 6.6.2  | 最小二乘法 .....            | 145 |
| 6.6.3  | 反向传播（最速下降）法 .....      | 145 |
| 6.6.4  | SVD-QR 方法 .....        | 146 |
| 6.6.5  | 迭代设计法 .....            | 147 |
| 6.7    | 案例研究：时间序列预测 .....      | 147 |
| 6.7.1  | 一步设计 .....             | 147 |
| 6.7.2  | 反向传播设计 .....           | 148 |
| 6.8    | 小结 .....               | 151 |
| 6.9    | 计算 .....               | 151 |
|        | 练习 .....               | 151 |

## 第三部分 二型模糊集

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第 7 章 二型模糊集的运算与性质 .....  | 155 |
| 7.1 引言 .....             | 155 |
| 7.2 扩展原理 .....           | 156 |
| 7.3 一般二型模糊集的运算 .....     | 157 |
| 7.3.1 集合论运算 .....        | 158 |
| 7.3.2 模糊数的代数运算 .....     | 162 |
| 7.4 区间二型模糊集的运算 .....     | 163 |
| 7.4.1 集合论运算 .....        | 163 |
| 7.4.2 区间模糊数的代数运算 .....   | 165 |
| 7.5 运算的概括 .....          | 166 |
| 7.6 二型模糊集的性质 .....       | 167 |
| 7.6.1 一型模糊集 .....        | 167 |
| 7.6.2 二型模糊集 .....        | 168 |
| 7.7 计算 .....             | 168 |
| 练习 .....                 | 168 |
| 第 8 章 二型关系与合成 .....      | 171 |
| 8.1 引言 .....             | 171 |
| 8.2 通常的关系 .....          | 171 |
| 8.3 同一积空间上的关系与合成 .....   | 173 |
| 8.4 不同积空间上的关系与合成 .....   | 175 |
| 8.5 一个集合与一个关系的合成 .....   | 177 |
| 8.6 模糊集的笛卡儿积 .....       | 178 |
| 8.7 蕴含 .....             | 179 |
| 练习 .....                 | 180 |
| 第 9 章 二型模糊集的重心: 降型 ..... | 181 |
| 9.1 引言 .....             | 181 |
| 9.2 关于重心的一般结果 .....      | 181 |
| 9.3 区间二型模糊集的广义重心 .....   | 187 |
| 9.4 区间二型模糊集的重心 .....     | 191 |

|       |                |     |
|-------|----------------|-----|
| 9.5   | 降型：一般结果 .....  | 193 |
| 9.5.1 | 重心降型 .....     | 194 |
| 9.5.2 | 和的中心降型 .....   | 196 |
| 9.5.3 | 高度降型 .....     | 196 |
| 9.5.4 | 改进的高度降型 .....  | 197 |
| 9.5.5 | 集的中心降型 .....   | 198 |
| 9.5.6 | 降型的计算复杂性 ..... | 200 |
| 9.5.7 | 概括的例子 .....    | 200 |
| 9.6   | 降型：区间集 .....   | 204 |
| 9.6.1 | 重心降型 .....     | 204 |
| 9.6.2 | 和的中心降型 .....   | 204 |
| 9.6.3 | 高度降型 .....     | 204 |
| 9.6.4 | 改进的高度降型 .....  | 204 |
| 9.6.5 | 集的中心降型 .....   | 204 |
| 9.6.6 | 概括的例子 .....    | 205 |
| 9.7   | 小结 .....       | 206 |
| 9.8   | 计算 .....       | 206 |
|       | 练习 .....       | 207 |

## 第四部分 二型模糊逻辑系统

|        |                   |     |
|--------|-------------------|-----|
| 第 10 章 | 单值二型模糊逻辑系统 .....  | 211 |
| 10.1   | 引言 .....          | 211 |
| 10.2   | 规则 .....          | 211 |
| 10.3   | 模糊推理机 .....       | 212 |
| 10.4   | 模糊化及其对推理的影响 ..... | 214 |
| 10.4.1 | 模糊器 .....         | 214 |
| 10.4.2 | 模糊推理机 .....       | 214 |
| 10.5   | 降型 .....          | 216 |
| 10.6   | 解模糊化 .....        | 218 |
| 10.7   | 可能性 .....         | 219 |
| 10.8   | FBF: 它的缺失 .....   | 220 |
| 10.9   | 区间二型 FLS .....    | 222 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 10.9.1 区间二型 FLS 中的上、下隶属函数 ..... | 222 |
| 10.9.2 重温模糊推理机 .....            | 223 |
| 10.9.3 重温降型和解模糊化 .....          | 226 |
| 10.9.4 重温 FBF .....             | 233 |
| 10.10 设计区间单值二型 FLS .....        | 236 |
| 10.10.1 一步法 .....               | 238 |
| 10.10.2 最小二乘法 .....             | 239 |
| 10.10.3 反向传播(最速下降)法 .....       | 240 |
| 10.10.4 SVD-QR 方法 .....         | 244 |
| 10.10.5 迭代设计方法 .....            | 245 |
| 10.11 案例研究: 时间序列预测 .....        | 246 |
| 10.12 案例研究: 用问卷调查进行知识挖掘 .....   | 247 |
| 10.13 计算 .....                  | 256 |
| 练习 .....                        | 257 |
| <br>                            |     |
| 第 11 章 一型非单值二型模糊逻辑系统 .....      | 259 |
| 11.1 引言 .....                   | 259 |
| 11.2 模糊化及其对推理的影响 .....          | 260 |
| 11.2.1 模糊器 .....                | 260 |
| 11.2.2 模糊推理机 .....              | 260 |
| 11.3 区间一型非单值二型 FLS .....        | 261 |
| 11.4 设计区间一型非单值二型 FLS .....      | 270 |
| 11.4.1 一步法 .....                | 273 |
| 11.4.2 最小二乘法 .....              | 273 |
| 11.4.3 反向传播(最速下降)法 .....        | 273 |
| 11.4.4 SVD-QR 方法 .....          | 275 |
| 11.4.5 迭代设计方法 .....             | 275 |
| 11.5 案例研究: 时间序列预测 .....         | 276 |
| 11.6 小结 .....                   | 278 |
| 11.7 计算 .....                   | 279 |
| 练习 .....                        | 279 |
| <br>                            |     |
| 第 12 章 二型非单值二型模糊逻辑系统 .....      | 280 |
| 12.1 引言 .....                   | 280 |

|               |                                      |            |
|---------------|--------------------------------------|------------|
| 12.2          | 模糊化及其对推理的影响 .....                    | 280        |
| 12.2.1        | 模糊器 .....                            | 280        |
| 12.2.2        | 模糊推理机 .....                          | 281        |
| 12.3          | 区间二型非单值二型 FLS .....                  | 282        |
| 12.4          | 设计区间二型非单值二型 FLS .....                | 294        |
| 12.4.1        | 一步法 .....                            | 297        |
| 12.4.2        | 最小二乘法 .....                          | 297        |
| 12.4.3        | 反向传播(最速下降)法 .....                    | 297        |
| 12.4.4        | SVD-QR 法 .....                       | 299        |
| 12.4.5        | 迭代设计方法 .....                         | 300        |
| 12.5          | 案例研究: 时间序列预测 .....                   | 300        |
| 12.5.1        | 6 个周期的反向传播设计 .....                   | 300        |
| 12.5.2        | 一个周期的组合反向传播与 SVD-QR 设计 .....         | 304        |
| 12.5.3        | 6 个周期迭代的组合反向传播与 SVD-QR 设计 .....      | 304        |
| 12.6          | 计算 .....                             | 307        |
|               | 练习 .....                             | 308        |
| <b>第 13 章</b> | <b>TSK 模糊逻辑系统 .....</b>              | <b>309</b> |
| 13.1          | 引言 .....                             | 309        |
| 13.2          | 一型 TSK FLS .....                     | 310        |
| 13.2.1        | 一阶一型 TSK FLS .....                   | 310        |
| 13.2.2        | 一型 TSK FLS 和 Mamdani FLS 之间的联系 ..... | 311        |
| 13.2.3        | TSK FLS 是万能逼近器 .....                 | 311        |
| 13.2.4        | 设计一型 TSK FLS .....                   | 312        |
| 13.3          | 二型 TSK FLS .....                     | 315        |
| 13.3.1        | 一阶二型 TSK FLS .....                   | 315        |
| 13.3.2        | 区间二型 TSK FLS .....                   | 316        |
| 13.3.3        | 非标准化的区间二型 TSK FLS .....              | 319        |
| 13.3.4        | TSK FLS 与 Mamdani FLS 的进一步比较 .....   | 320        |
| 13.3.5        | 用反向传播(最速下降)法设计区间二型 TSK FLS .....     | 322        |
| 13.4          | 例子: 压缩视频流量的预测 .....                  | 325        |
| 13.4.1        | MPEG 视频流量简介 .....                    | 325        |
| 13.4.2        | 预测 I 帧尺寸: 一般信息 .....                 | 327        |
| 13.4.3        | 预测 I 帧尺寸: 用相同的规则数 .....              | 329        |

|         |                                 |     |
|---------|---------------------------------|-----|
| 13.4.4  | 预测 I 帧尺寸: 用相同的设计参数 .....        | 331 |
| 13.4.5  | 结论 .....                        | 331 |
| 13.5    | 小结 .....                        | 332 |
| 13.6    | 计算 .....                        | 333 |
|         | 练习 .....                        | 333 |
| 第 14 章  | 结语 .....                        | 335 |
| 14.1    | 引言 .....                        | 335 |
| 14.2    | 二型 FLS 对比一型 FLS .....           | 336 |
| 14.3    | 二型 FLS 的适当应用 .....              | 337 |
| 14.4    | 基于规则的视频流量的分类 .....              | 337 |
| 14.4.1  | 选用的特征 .....                     | 338 |
| 14.4.2  | 特征的 FOU .....                   | 340 |
| 14.4.3  | 规则 .....                        | 340 |
| 14.4.4  | 测量的 FOU .....                   | 340 |
| 14.4.5  | FL RBC 中的设计参数 .....             | 341 |
| 14.4.6  | 一型 FL RBC 的计算公式 .....           | 341 |
| 14.4.7  | 二型 FL RBC 的计算公式 .....           | 342 |
| 14.4.8  | 规则设计参数的优化 .....                 | 344 |
| 14.4.9  | 测试 FL RBC .....                 | 344 |
| 14.4.10 | 结果和结论 .....                     | 345 |
| 14.5    | 时变非线性数字通信信道的均衡 .....            | 346 |
| 14.5.1  | 信道均衡器的预备知识 .....                | 347 |
| 14.5.2  | 为什么需要二型 FAF .....               | 350 |
| 14.5.3  | 设计 FAF .....                    | 351 |
| 14.5.4  | 仿真和结论 .....                     | 352 |
| 14.6    | 克服数字通信信道的 CCI 和 ISI .....       | 354 |
| 14.6.1  | 带有 ISI 和 CCI 的通信系统 .....        | 354 |
| 14.6.2  | 设计 FAF .....                    | 357 |
| 14.6.3  | 仿真和结论 .....                     | 358 |
| 14.7    | ATM 网络的连接允许控制 .....             | 360 |
| 14.7.1  | 使用二型 FLS 的基于问卷调查的 CAC: 概述 ..... | 362 |
| 14.7.2  | 为 CAC 提取知识 .....                | 362 |
| 14.7.3  | 选择语言标签的隶属函数 .....               | 364 |