现代工业企业自动化丛书

模糊控制理论与应用技术

汤兵勇　路林吉　王文杰　编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书从现代工业企业实际应用角度出发，较系统地探讨并介绍了模糊控制的主要理论方法与应用技术，内容包括：模糊数学基础知识、基于模糊推理的模糊控制器、基于 T-S 模型的模糊控制、基于模糊数的模糊自适应控制、工业企业生产过程模糊控制、工业企业模糊产品设计以及工业企业模糊管理与控制等，其中大部分是近些年的最新研究成果。本书注重理论联系实际，兼顾学术性与实用性，内容丰富，通俗易懂，具有较大的理论意义和使用价值。

本书可供工业企业研究开发人员、工程技术人员和经营管理人员等阅读使用，并可作为高等院校自动化、计算机、信息管理及其他相关工程专业的研究生和本科高年级学生的教材或参考书。

版权所有，翻印必究。
本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签，无标签者不得销售。

书　名：模糊控制理论与应用技术
作　者：汤兵勇　路林吉　王文杰　编著
出版者：清华大学出版社（北京清华大学学研大厦，邮编 100084）
http：// www. tup. tsinghua. edu. cn
印刷者：北京国马印刷厂
发行者：新华书店总店北京发行所
开　本：787×1092 1/16　**印张**：12　**字数**：285 千字
版　次：2002 年 9 月第 1 版　2002 年 9 月 第 1 次印刷
书　号：ISBN 7-302-05375-8/TP・3161
印　数：0001～4000
定　价：16.80 元

《现代工业企业自动化丛书》编委会

名誉主任： 张钟俊

顾　　问： 吴钦炜

主　　任： 白英彩

副 主 任： 邵世煌　王行愚　吴启迪　孙廷才

编　　委：（按姓氏笔划）

于海川　王行愚　白英彩　孙振飞　孙廷才

江志道　刘元元　邵世煌　吴启迪　张兆琪

杨德礼　周德泽　柴天佑　虞孟起　魏庆福

序

当今世界先进工业国家正处于由“工业经济”模式向“信息经济”模式转变的时期，其中技术进步因素起着极为重要的作用，它在经济增长中占 70%～80%。“以高新技术为核心，以信息电子化为手段，提高工业产品附加值”已经成为现代工业企业自动化重要的发展目标。从我国经济发展史来看，其工业经济增长主要是依靠投入大量资金和劳动力来实现的，尚未充分发挥技术进步在工业经济增长中的“二次效益倍增器”的作用。“如何加快发展电子信息技术、调整产业结构，适应世界经济发展需求”是当前我国工业企业自动化界研究的重要课题之一。

工业自动化是一门应用学科，它主要包括单机系统自动化、工业生产过程自动化和工业系统管理自动化等三个方面。企业自动化包括企业生产管理信息电子化、信息处理的自动化以及网络化。现代工业企业自动化涉及到自动化技术、计算机技术、通信技术、先进制造技术和管理学等诸多学科，它需要各学科的专家和工程技术人员通力合作，从而形成“多专业知识与技术集成”的现代工业自动化发展思路。目前工业企业自动化系统主要呈现开放性、集散性、智能性和信息电子化与网络化的特点。在现代工业企业自动化中，计算机控制技术充当了极为重要的角色，它是计算机技术和控制理论有机的结合。自动控制理论的发展是伴随着被控制对象的复杂性、不确定性等因素的研究成果而发展的，它由经典控制理论（频域方法）和现代控制理论（时域方法）发展到第三代控制理论——智能控制理论。计算机控制系统分为数据采集与处理系统、计算机在线操作指导控制系统、直接数字控制系统、监督控制系统、分级控制系统和集散控制系统以及分布式智能控制系统。从当前计算机技术和自动控制技术发展状况来看，高性能工业控制机系统、智能控制系统和基于网络系统的虚拟企业自动化系统将是未来工业企业自动化的重要发展方向。

从系统工程的角度来看，工业自动化技术研究与应用过程分为三个阶段：自动化技术研究阶段、科研成果向实用转化阶段和产品应用阶段。经过我国科技工作者半个世纪卓有成效的研究，在自动化技术研究与应用方面取得可喜的成绩，并给我国的工业自动化事业带来了深刻影响和变革，产生了巨大的社会和经济效益，其中有的技术已经接近或达到世界先进水平，但从应用以及成果向产品的转化的总体发展角度来看，仍存在着一些问题，仍需花大力气进一步探索和研究。例如，我国在工控机及其配套设备的生产方面尚需进一步构成规模经济；建立并发展企业网络及其协议和数据库集成技术，为全面实现我国“金企工程”提供技术和手段；开发系列的工控机软件包、实时操作系统，以提高工控机系统的总体水平；充分运用以工控机为核心的电子信息技术来改造我国各类传统工业的工装设备及产品；在我国的部分现代企业中大力倡导推行 MIS，MRP-Ⅱ 和 CIMS/CIPS 以及信息网络系统，以提高企业管理水平和竞争能力等。在 20 世纪 40 年代，计算机刚问世不久，它的应用除在军事、政要部门之外，主要是在各传统工业领域的应用。在 60 年代～70 年代，各国的工业计算机应用极为普遍，促进了其工业企业自动化高速发展，而我国的工业企业自动化非但没有大踏步前进，反而停滞不前。到了 90 年代这个问题就显得十分严重了，因此我们必须“补上

这一课”。我们编写了《现代工业企业自动化丛书》(以下简称《丛书》,目前暂定 42 册,并根据实际需要不断增加新的书目),该《丛书》内容既包括工业生产过程自动化,又包括现代企业管理自动化技术,如基于总线工控机系统、工程数据库、CIMS/CIPS 以及企业网络技术等。其编写原则为:“理论与实践密切结合,为实现工业企业自动化提供典型示范系统。”编委会特邀请了国内在该领域有扎实理论基础和富有实践经验的专家分别承担各分册的编审任务,以期在向读者展示国内外相关技术的最新成果和发展动态的同时,提供解决现代企业自动化的思路、方法、技术和设备等。

该《丛书》以工程技术人员为主要读者对象。我们相信该《丛书》的出版必将在推动我国工业企业自动化应用的普及和发展进程中起到积极的作用,为进一步提高我国工业企业自动化水平做出贡献。

清华大学出版社颇具魄力和眼光,高瞻远瞩,及时提出策划组织这套《丛书》的任务,他们为编好《丛书》做了认真、细致的准备工作,并为该丛书的出版提供了许多有利的条件,在此深表谢意。同时对于参加各分册编审任务的专家、学者所付出的艰辛劳动表示衷心感谢。编审《丛书》的任务十分繁杂而艰巨,加之时间仓促,书中出现疏漏、欠妥之处也是难免的,希望广大读者不吝赐教,以使我们逐步完善这个《丛书》系列。

中国科学院院士、上海交通大学教授

张钟俊

1995 年 5 月

前　言

众所周知，经典控制论在解决线性定常系统的控制问题上是很有效的，而现代控制论在军事科学与空间飞行等领域也得到了十分成功的运用。然而在工业生产中，却有相当数量的复杂过程仍以人工操作和人工控制为主，如大滞后、非线性等复杂工业对象，以及那些难以获得数学模型或模型非常粗糙的工业系统等。在实际工程中，当采用经典控制论或现代控制论来设计控制系统时，总会遇到一些不明确的或者模糊的问题。这些模糊性问题主要来自：(1) 建立被控对象数学模型时存在模糊性；(2) 设计指标函数时存在模糊性。

为了解决这些模糊性问题，传统的控制理论提出了许多对策。其中比较典型的有鲁棒控制、自适应控制、高增益反馈控制等方式以及相关的绝对稳定度、灵敏度、稳定裕度等概念。但是这些控制方式的共同特点是必须建立被控对象的数学模型，而对于许多复杂系统却难以建立满足控制要求的数学模型；另外有些自动控制系统由于模型本身不够准确，其控制效果还不如手工操作好。

1965 年，美国控制专家查德(L. A. Zadeh)创立了模糊控制集合理论，为描述、研究和处理模糊性现象提供了新的数学工具。模糊集合理论发展迅速，并在许多领域获得了应用，其中在自动控制中的应用尤为引人注目。近些年的实践表明，对于上述难以实现自动控制的复杂生产过程，采用模糊控制理论与计算机来实现自动控制，效果往往十分理想。自 1974 年英国的 E. H. Mamdani 把模糊语言逻辑用于控制并获成功之后，模糊控制理论不仅在工业生产过程中获得了广泛应用，而且已扩展到其他许多领域(包括工业企业管理领域)，应用模糊控制的家电产品正在大量问世。由于模糊控制主要是模仿人的控制经验，而不是依赖于控制对象的模型，因此模糊控制实现了人的某些智能，是一种典型的智能控制，代表了新时代极有生命力的智能自动化发展方向。目前，在世界范围内已掀起了一股模糊控制技术热潮，有些专家将模糊控制技术称之为“21 世纪的核心技术”，其产业化步伐正在迅速加快。

本书从工业企业实际应用出发，较系统地介绍了模糊控制理论的基本理论方法与应用技术。首先介绍研究模糊控制必需的数学工具——模糊数学基础知识；然后分别讨论三种不同类型的模糊控制方式的基本理论方法，即基于模糊推理的模糊控制器、基于 T-S 模型的模糊控制和基于模糊数的模糊自适应控制；再从三个不同侧面探讨模糊控制在工业企业相关领域中的应用技术，其中包括：工业企业生产过程模糊控制技术、工业企业模糊产品设计技术以及工业企业模糊管理控制技术。本书在参考国内外模糊控制领域的重要文献基础上，针对工业企业应用需要，适当选择其主要内容加以系统总结和整理，其中部分内容是作者近些年的研究成果。本书兼顾学术性与通俗性，注重理论联系实际，叙述时力求深入浅出，简单易懂，着重理论方法的基本思路与步骤，略去了较为繁琐的数学理论证明和推导，并用大量的实际应用案例加以说明，便于广大读者阅读。对于模糊控制近年来在理论上的新发展(例如解析模糊控制理论、模糊语词计算等)以及与其他学科领域或新方法的交叉新成果(如模糊神经网络控制、模糊专家系统控制、模糊鲁棒控制等)，由于篇幅有限，本书暂不涉及，有兴趣的读者可参阅有关文献。

本书由汤兵勇负责整体策划和最后统稿，并撰写第 1,3,4,8 章；路林吉撰写第 6,7 章；王文杰撰写第 2,5 章。本书在编写过程中曾得到控制理论与控制工程界、模糊数学界许多专家学者，以及各工业部门的管理干部和企业家们的大力支持和热情帮助；另外，钟麦英、张美芬、雷加能、谢丽霞、熊金安、唐坤等为本书的文稿整理做了大量的工作，在此一并表示感谢。由于作者水平有限，书中必有不当之处，还望读者批评指正。

作　者

2001 年 3 月

目　　录

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　模糊控制简介 …… 1

1.1.1　模糊控制的研究对象 …… 1

1.1.2　模糊控制是模仿人的控制 …… 2

1.1.3　模糊控制研究的数学工具——模糊集合与模糊数学 …… 2

1.2　模糊控制的发展与应用概况 …… 3

1.2.1　模糊控制的产生及其与传统控制的差异 …… 3

1.2.2　模糊控制的几个典型应用案例 …… 4

1.3　本书结构与内容安排 …… 5

参考文献 …… 6

第 2 章　模糊数学基础知识 …… 7

2.1　普通集合 …… 7

2.1.1　一般概念 …… 7

2.1.2　集合的运算 …… 8

2.1.3　集合运算的性质 …… 9

2.1.4　幂集、笛卡儿积集 …… 10

2.1.5　关系 …… 10

2.2　模糊集 …… 14

2.2.1　基本定义与表示方法 …… 14

2.2.2　模糊集的运算 …… 15

2.2.3　λ-截集 …… 16

2.2.4　模糊集的数量指标 …… 17

2.3　分解定理和扩张原理 …… 21

2.3.1　分解定理 …… 21

2.3.2　扩张原理 …… 22

2.4　模糊数 …… 22

2.4.1　凸模糊集与区间数 …… 23

2.4.2　模糊数的定义及性质 …… 24

2.4.3　模糊数的算术运算 …… 24

2.4.4　模糊正整数 …… 26

2.4.5　模糊数的通常运算 …… 27

2.4.6　L-R 型模糊数 …… 28

2.5　模糊关系、模糊矩阵和模糊变换 …… 30

2.5.1　模糊关系 …… 30

2.5.2 模糊矩阵 …… 30
2.5.3 模糊关系的合成 …… 31
2.5.4 模糊变换 …… 32
2.6 模糊逻辑与近似推理 …… 32
2.6.1 模糊语言变量 …… 32
2.6.2 模糊蕴含关系 …… 33
2.6.3 近似推理 …… 35
参考文献 …… 36

第 3 章 基于模糊推理的模糊控制器 …… 37
3.1 模糊推理 …… 37
3.1.1 模糊推理的基本方法 …… 37
3.1.2 模糊推理的性质 …… 38
3.1.3 模糊控制中常见的模糊推理类型 …… 40
3.2 模糊控制器原理 …… 41
3.2.1 基本结构与组成 …… 41
3.2.2 模糊化运算 …… 43
3.2.3 数据库 …… 44
3.2.4 模糊控制规则库 …… 45
3.2.5 清晰化计算 …… 47
3.2.6 论域为离散时的模糊控制器 …… 49
3.3 自适应模糊控制器 …… 50
3.3.1 直接自适应模糊控制器 …… 50
3.3.2 间接自适应模糊控制器 …… 54
参考文献 …… 58

第 4 章 基于 T-S 模型的模糊控制 …… 59
4.1 模糊规则的形式和推理算法 …… 59
4.1.1 规则的形式 …… 59
4.1.2 推理的算法 …… 59
4.1.3 推理的性质 …… 61
4.2 T-S 模型的参数辨识算法 …… 62
4.2.1 结论参数的辨识 …… 63
4.2.2 前提参数的辨识 …… 64
4.3 T-S 模型的结构辨识算法 …… 68
4.3.1 前提变量的选择 …… 69
4.3.2 前提结构的辨识 …… 73
4.3.3 结论结构的辨识 …… 74
4.4 T-S 模型应用实例 …… 75
4.4.1 水净化过程问题 …… 75

4.4.2 控制规则的导出 …… 75
4.4.3 模糊控制的结果 …… 77
4.5 基于 T-S 模型的稳定性分析与设计 …… 77
4.5.1 离散系统 T-S 模型 …… 77
4.5.2 T-S 模糊模型结构图的化简 …… 78
4.5.3 基于 T-S 模型的稳定性分析 …… 80
4.5.4 基于 T-S 模型的模糊控制器设计 …… 81
4.6 基于 T-S 模型的自适应控制算法 …… 83
4.6.1 模型转换与参数辨识 …… 83
4.6.2 一般情形的自适应控制 …… 84
4.6.3 给定前提条件情形的自适应控制 …… 84
4.6.4 仿真实例 …… 85
参考文献 …… 86

第 5 章 基于模糊数的模糊自适应控制 …… 87
5.1 带有模糊输入的自适应控制 …… 87
5.1.1 模糊输入的定量化描述 …… 87
5.1.2 带有模糊输入的系统模型辨识 …… 87
5.1.3 系统自适应预测与控制 …… 89
5.1.4 应用实例 …… 90
5.2 基于模糊参数辨识的自适应控制 …… 93
5.2.1 一类模糊系统模型基本结构 …… 93
5.2.2 模糊参数辨识 …… 94
5.2.3 模糊自适应控制 …… 96
5.2.4 应用实例 …… 96
5.3 基于 L-R 模糊数的自适应控制 …… 99
5.3.1 基于 L-R 模糊数的模糊状态方程 …… 99
5.3.2 模糊状态方程的参数辨识 …… 101
5.3.3 与参数估计对偶的模糊自适应控制 …… 102
参考文献 …… 103

第 6 章 工业企业生产过程模糊控制 …… 105
6.1 T-S 模糊推理方法在氧化铝熟料烧成回转窑自动控制中的应用 …… 105
6.1.1 引言 …… 105
6.1.2 工程背景 …… 105
6.1.3 T-S 模糊控制器的设计 …… 105
6.1.4 工程应用 …… 106
6.2 模糊控制在聚丙烯反应釜温度控制中的应用 …… 107
6.2.1 引言 …… 107
6.2.2 聚合反应过程分析 …… 107

6.2.3 控制方案的提出 …… 108
6.2.4 模糊控制器的设计 …… 109
6.2.5 控制效果分析 …… 110
6.3 油压升降机的模糊控制 …… 110
6.3.1 引言 …… 110
6.3.2 手动控制方式 …… 110
6.3.3 模糊控制方式 …… 111
6.3.4 模糊控制加压力反馈控制系统 …… 113
6.4 模糊控制在电弧炼钢中的应用 …… 114
6.4.1 引言 …… 114
6.4.2 系统构成及原理 …… 114
6.4.3 带修正因子的模糊控制算法 …… 115
6.5 模糊距离传感器的设计与实现 …… 116
6.5.1 引言 …… 116
6.5.2 模糊距离传感器的概念、特点和设计方法 …… 116
6.5.3 单片机模糊距离传感器的实现 …… 117
6.6 具有智能积分作用的模糊控制器 …… 119
6.6.1 引言 …… 119
6.6.2 设计思想 …… 119
6.6.3 应用对象 …… 120
6.6.4 调节器算法设计 …… 121
6.6.5 应用结果 …… 122
参考文献 …… 123
第 7 章 工业企业模糊产品设计 …… 124
7.1 全自动洗衣机的模糊控制 …… 124
7.1.1 引言 …… 124
7.1.2 对洗衣机洗涤性能的影响因素 …… 124
7.1.3 传感检测方法 …… 125
7.1.4 模糊控制器的设计 …… 127
7.1.5 小结 …… 129
7.2 电饭锅的模糊控制 …… 129
7.2.1 电饭锅炊饭过程分析 …… 129
7.2.2 模糊推理规则 …… 130
7.2.3 小结 …… 132
7.3 空调的变频模糊控制 …… 132
7.3.1 引言 …… 132
7.3.2 变频模糊控制空调器的基本概念和技术关键 …… 133
7.3.3 目标产品的选择 …… 133
7.3.4 整机基本技术参数与解决技术关键的方案 …… 134

7.3.5 小结…… 140
7.4 电冰箱的模糊控制 …… 140
7.4.1 引言…… 140
7.4.2 控制系统概述…… 140
7.4.3 温度的模糊控制…… 141
7.4.4 除霜的模糊控制…… 144
7.4.5 小结…… 145
7.5 微波炉的模糊控制 …… 145
7.5.1 引言…… 145
7.5.2 微波炉的模糊控制技术…… 145
7.5.3 控制系统的设计…… 147
7.5.4 仿真结果…… 148
参考文献…… 149

第 8 章 工业企业模糊管理与控制…… 150
8.1 工业企业经济活动管理与控制 …… 150
8.1.1 工业企业经济活动及其管理…… 150
8.1.2 工业企业经济活动的控制机构…… 150
8.1.3 工业企业经济活动的控制方式…… 151
8.1.4 工业企业经济活动控制的基本程序…… 152
8.2 工业企业模糊综合评价 …… 153
8.2.1 模糊综合评价方法简介…… 153
8.2.2 工业企业人力资源管理的模糊综合评价…… 153
8.2.3 小企业生存基础的模糊状态综合评价…… 156
8.3 工业企业模糊聚类分析 …… 160
8.3.1 模糊聚类分析方法简介…… 160
8.3.2 企业环境单元污染状况的模糊聚类分析…… 160
8.3.3 企业零售连锁店合理调整的模糊聚类分析…… 162
8.4 工业企业模糊模式识别 …… 164
8.4.1 模糊模式识别方法简介…… 164
8.4.2 油田管线腐蚀更新模糊模式识别…… 165
8.4.3 企业市场竞争性定位模糊模式识别…… 167
8.5 工业企业模糊市场预测与控制 …… 170
8.5.1 基于模糊推理的模糊市场营销控制…… 170
8.5.2 基于 L-R 模糊数的模糊市场协调预测 …… 171
参考文献…… 174

第1章 绪 论

1.1 模糊控制简介

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量以及模糊逻辑推理为基础的一种计算机控制方法[1]。从控制器的智能性来看，模糊控制属于智能控制的范畴。

智能控制是人工智能、控制理论和管理科学相结合的产物[2]。它依靠知识模型，把人类社会数以千万计的技术和非技术的人类行为和经验，归纳为若干系统化的规则(或规律)，实现对系统的“拟人智能”控制[3]。

模糊控制是智能控制的主要方法之一，它的知识模型是由一组模糊推理产生的规则(主要是由模糊控制规则和表示对象特性的语言规则)构成的，它的人机对话能力较强，能够方便地将专家的经验与思考加入到知识模型中。

1.1.1 模糊控制的研究对象

模糊控制作为智能控制的一种类型，是控制理论发展的高级阶段产物，它主要用来解决那些用传统方法难以解决的复杂系统的控制问题。具体地说，其研究对象具备以下一些智能控制对象的特点：

1. 模型不确定性

传统的控制是基于模型的控制，这里的模型包括控制对象和干扰模型。对于传统控制通常认为模型已知或者经过辨识可以得到。而模糊控制的对象通常存在严重的不确定性。这里所说的模型不确定性包含两层意思：一是模型未知或知之甚少；二是模型的结构和参数可能在很大范围内变化。无论哪种情况，传统方法都难以对它们进行控制，而这正是模糊控制所要解决的问题。

2. 非线性

在传统的控制理论中，线性系统理论比较成熟。对于具有非线性特性的控制对象，虽然也有一些非线性控制的方法，但总的来说，非线性控制理论还很不成熟，而且方法也比较复杂。采用模糊控制的方法往往可以较好地解决非线性系统的控制问题。

3. 复杂的任务要求

在传统的控制系统中，控制的任务或者是要求输出量为定值(调节系统)，或者是要求输出量跟随期望的运动轨迹(跟踪系统)，要求比较单一。对于模糊控制系统，任务的要求往往比较复杂。例如，在智能机器人系统中，它要求系统对一个复杂的任务具有自行规划和决策的能力，有自动躲避障碍并且运动到期望目标位置的能力。再如，在复杂的工业过程控制系统中，它除了要求对各被控物理量实现定值调节外，还要求能实现整个系统的自动启停、故

障的自动诊断以及紧急情况的自动处理等功能。

1.1.2 模糊控制是模仿人的控制

由人作为控制器的控制系统是典型的智能控制系统，其中包含了人的高级智能活动。模糊控制在一定程度上模仿了人的控制，它不需要有准确的控制对象模型，因此它是一种智能控制方法。

例如，一个操作员通过观察仪表显示对过程进行控制，仪表显示反映了过程的输出量。操作员通过仪表观察到输出量发生变化时，便根据所积累的知识和操作经验做出决策，并采取相应的控制动作。这是一个从过程变化到控制行动的映射。这个映射是通过操作员的决策来实现的，这个决策过程并不是通过精确的定量计算，而是依靠定性或模糊的知识来实现的。例如，若控制的过程是水箱中的水温，检测仪表给出的是精确值，比如 80℃，操作员将这个精确值转化为头脑中的概念量，比方说“温度偏高”。他将这个概念与头脑中已有的控制经验和模式相匹配，得到“温度偏高应该加入较多冷却水”的推断，进而需将“加入较多冷却水”这个模糊概念给出定量解释。例如，加入冷却水的流量应为 $10m^3/h$，然后按此定量值控制执行装置，从而完成整个控制过程的一个循环。这里操作员并不是按照某种控制算法进行了精确的计算，而是采用了一种模糊的控制方法，其中包含了他的智能行为。

模糊控制即是模仿上述操作员的控制过程，其中包含了操作员的控制经验和知识。因而从这个意义上说，模糊控制也是一种智能控制。模糊控制方法既可用于简单的控制对象，也可用于复杂的过程。

1.1.3 模糊控制研究的数学工具——模糊集合与模糊数学

在上面所举的操作员进行温度控制的例子中，“温度偏高”中的“偏高”、“加入较多冷却水”中的“较多”等都是一些模糊的概念，而利用这些概念最终却能实现稳定的控制。如何描述这些模糊的概念，并对它们进行分析、推理，正是模糊集合与模糊数学[4]所要解决的问题。

模糊集合理论的产生和发展到现在只不过 30 多年的历史，但它已经逐步渗入到自然科学和社会科学的各个领域，并且取得了引人注目的成果。笼统地说，模糊集合是一种特别定义的集合，它可用来描述模糊现象。有关模糊集合、模糊逻辑等的数学理论，被称为模糊数学。

模糊性是一种不确定性，但它不同于随机性，所以模糊理论不同于概率论。模糊性通常是指对概念的定义以及语言意义理解上的不确定性。例如，“老人”、“温度高”、“数量大”等所含的不确定性即为模糊性。可见，模糊性主要是人为的主观理解上的不确定性，而随机性则主要反映的是客观上自然的不确定性，或者是事件发生的偶然性。偶然性与模糊性具有本质上的不同，它们是不同情况下的不确定性。例如，“明天有雨”的不确定性，是由今天的预测产生的，时间过去了，到明天就变成确定的了。再有“掷一下骰子是 4 点”的不确定性是由于掷骰子之前推测产生的，实际做一下掷骰子实验，它就是确定的事件了。但是“老人”、“气温高”等的不确定性，即使时间过去了，即使做了实验，它仍然是不确定的，这是由语言意义模糊性的本质所确定的。

模糊集合是一种特别定义的集合，它与普通集合既有联系又有区别。对于普通集合来说，任何一个元素要么属于该集合，要么不属于，非此即彼，界限分明，决不模棱两可。而对

于模糊集合来说，一个元素可以是既属于又不属于，亦此亦彼，界限模糊。例如，一个人到苹果园去摘苹果，如果规定比 2 两重的苹果算作“大”苹果，则这是普通集合的概念。因此，若摘到一个 2.5 两重的苹果，可以毫不犹豫地说这是一个“大”苹果；若摘到一个 1.9 两重的苹果，也可以毫不犹豫地说它不是“大”苹果。这就是关于“大”的两值逻辑，是用精确的量作为边界来划分属于还是不属于该集合。如果规定差不多比 2 两重的苹果为“大”苹果，这是一个模糊集合的概念。这时若摘到一个 2.5 两重的苹果，可以不假思索地算作“大”苹果。那么对于 1.9 两重的苹果呢，这就需要人为地决定了。你可以说它不够 “大”，但若这个苹果园中“大”苹果不够多的话，将它勉强算作“大”苹果也不为过。这就是关于“大”的逻辑值逻辑，是用人为的量作为边界来划分属于还是不属于该集合。

从上述例子可以看到，模糊性是人们在社会交往和生产实践中经常使用的，它提供了定性与定量、主观与客观、模糊与清晰之间的一个人为折衷。它既不同于确定性，也不同于偶然性和随机性。概率论是研究随机现象的，模糊数学则是研究模糊现象的，两者都属于不确定性数学。应当特别注意的一点是，不可认为模糊数学是模糊的概念，它是完完全全精确的，它是借助定量的方法研究模糊现象的工具。

1.2 模糊控制的发展与应用概况

美国控制理论专家查德(L. A. Zadeh)教授于 1965 年首先提出了模糊集合的概念，开创了模糊数学及其应用的新纪元。模糊控制是模糊集合理论应用的一个重要方面。1974 年英国教授曼丹尼(E. H. Mamdani)首先将模糊集合理论应用于加热器的控制，其后产生了许多应用的例子。其中比较典型的有：热交换过程的控制、暖水工厂的控制、污水处理过程控制、交通路口控制、水泥窑控制、飞船飞行控制、机器人控制、模型小车的停靠和转弯控制、汽车速度控制、水质净化控制、电梯控制以及电流和反应堆的控制，并且生产出了专用的模糊芯片和模糊计算机。在模糊控制的应用方面，日本走在了前列。日本在国内建立了专门的模糊控制研究所，日本仙台的一条地铁的控制系统采用了模糊控制的方法取得了很好的效果。日本还率先将模糊控制应用到日用家电产品的控制，如照相机、吸尘器、洗衣机等，模糊控制的应用在日本已经相当普及。

1.2.1 模糊控制的产生及其与传统控制的差异

1973 年，L. A. Zadeh 继续丰富和发展了模糊集合论，提出了一种把逻辑规则的语言转化成相关控制量的思想，从而为模糊控制的形成奠定了理论基础[3]。他同时指出：模糊控制方法与通常分析系统所用的定量方法在本质上是不同的，它有 3 个主要特点：

(1) 用语言变量代替数学变量或两者结合应用；

(2) 用模糊条件语句来刻画变量间的函数关系；

(3) 用模糊算法来刻画复杂关系。

现有的控制理论可以用来处理许多控制问题。例如，利用卡尔曼滤波器可以对有噪声的系统进行状态估计；极大值原理可以用来解决某些最优控制的问题；分离原理为随机系统的控制提供了便利的方法；极点配置技术可以用来处理线性多变量系统的稳定性等问题；预测控制理论可对大滞后过程进行有效的控制。尽管这些理论在处理实际问题时都获得了不同程度的成功，但是它们都有一个基本的要求，就是必须知道被控对象的数学模型。然而在

实际中常出现这样的复杂情况：许多工业被控对象由于具有非线性、时变性、变结构、多层次、多干扰因素以及各种不确定性，难以建立精确的数学模型。即使对一些复杂对象能够建立数学模型，模型也往往过于复杂，既不利于设计也难以实现有效控制。这时前面提到的方法就无法解决这些对象的控制问题。虽然常规自适应控制技术可以解决一些问题，但其能力也是有限的。

在实际工作中，操作者却往往可以对这些难以建立数学模型的被控对象进行有效的控制。操作者对被控对象进行的控制主要是通过不断学习，积累操作经验来实现的。这些经验包括操作者对被控对象特性的了解、在各种情况下的控制策略以及性能指标判据。作为经验，这些信息通常是以自然语言的形式表达出来，它们的特点是定性的描述，所以具有不确定性和不精确性。这种特性使得人们无法用现有的定量控制理论对这些信息进行处理，但是人们却能根据这些信息建立一组行之有效的控制规则，来对被控对象进行控制。这是一组用语言信息表达的具有模糊性的控制规则。显然在这种情况下，需要一种能处理具有模糊性的语言信息的技术，它能根据语言信息构成一个能给出有效控制方法的控制器。

模糊集合理论就是具有处理语言信息能力的工具。模糊控制器就是人们根据模糊集合理论设计的、能够模仿操作人员手动控制作用的控制器，它不要求已知受控对象的数学模型。但是，需要强调指出：模糊控制器不要求受控对象的数学模型，并不等于在对受控对象先验知识一无所知的情况下就可设计一个具有良好控制效果的模糊控制器。恰好相反，它仍然要求对受控对象的特性有充分的了解，只不过它们是以知识模型（由人们对受控过程认识的模糊信息的归纳和操作经验的总结而形成的模型）而不是以数学模型的形式表达出来的。

1.2.2 模糊控制的几个典型应用案例

1. Sugoeno 的模糊小车

M. Sugoeno 设计了一个模型小车的模糊控制[4]。这是模糊控制应用的一个非常令人感兴趣的例子。利用模糊控制的方法可使该小车沿着预先设定的弯曲轨道停靠到车库指定位置。模糊控制的规则是通过向有经验的驾驶员学习而获得的。

2. 模糊自动火车运行系统

这是日本日立公司开发的系统。自 1987 年 2 月以来，该系统已成功地在日本仙台的城市地铁系统应用。在该系统中，目标评估模糊控制器对每一条可能的控制命令加以执行。该模糊系统包含两种规则库，一种是关于恒速控制，它要求火车启动后维持恒速前进；另一种是火车自动停站的控制，它调节火车的速度以准确地停靠在车站的指定位置。这些规则是基于对运行的安全性、乘坐的舒适性、停靠的准确性、能耗及运行时间等综合性能的评价。每 100ms 控制一次。运行结果表明，该模糊控制系统在乘坐的舒适性、停靠的准确性、能耗、运行时间及鲁棒性等方面均优于常规的 PID 控制。

3. 模糊自动集装箱吊车操纵系统

在该系统中，主要的性能指标为安全性、停放精度、集装箱摆动及吊运时间等。其中包含了两个主要的操作：台车操作和线绳操作。每一操作包含两个功能级：决策级和动作级。该模糊自动操作系统在日本的北九州港进行了实地实验。实验结果表明，由一个不熟

练的操作员来操纵该模糊系统，其货物处理能力为每小时 30 个集装箱，其操作性能、安全性、精确度等均可与非常有经验的操作员相媲美。

4. 模糊逻辑芯片和模糊计算机

第一个模糊逻辑芯片是 1985 年由 AT&T 贝尔实验室的 Togai 和 Watanabe 设计的。该模糊推理芯片可以并行地处理 16 条规则。它由四部分组成：规则集存储器、推理处理单元、控制器和输入输出电路。规则集存储器是用静态随机存储器实现的，因而可动态地改变规则集。该芯片在 16MHz 的时钟下的执行速度可达 250k FLOPS。现在正在开发基于该芯片的模糊逻辑加速器(FLA)。1989 年 3 月，美国北卡罗来纳微电子中心的 Watanabe 设计制造了世界上最快的模糊逻辑芯片，该芯片包含有 688000 个晶体管，速度达到 580k FLOPS。

日本的 Yamaskawa 设计了一个模糊计算机的雏形。该模糊计算机由一个模糊存储器、一个推理机、一个 MAX 块、一个清晰化块以及一个控制单元组成。模糊存储器存储语言模糊信息，由推理机实现 MAX 和 MIN 操作。该模糊计算机能以高达 10M FLOPS 的速度处理模糊信息，它朝着真正的工业应用以及常用知识处理方向迈出了十分重要的一步。

1.3 本书结构与内容安排

本书从现代工业企业实际应用角度出发，较系统地讨论介绍了模糊控制理论与应用技术。首先介绍了模糊控制研究用数学工具——模糊数学基础知识，然后分别讨论 3 种不同类型的模糊控制的基本理论，即基于模糊推理的模糊控制器、基于 T-S 模型的模糊控制和基于模糊数的模糊自适应控制；最后从三个不同侧面介绍了模糊控制在现代工业企业中的应用技术，即工业企业生产过程模糊控制应用技术与案例、工业企业模糊产品设计案例分析以及工业企业模糊管理与控制应用方法与案例。

全书内容结构安排如图 1.1 所示。

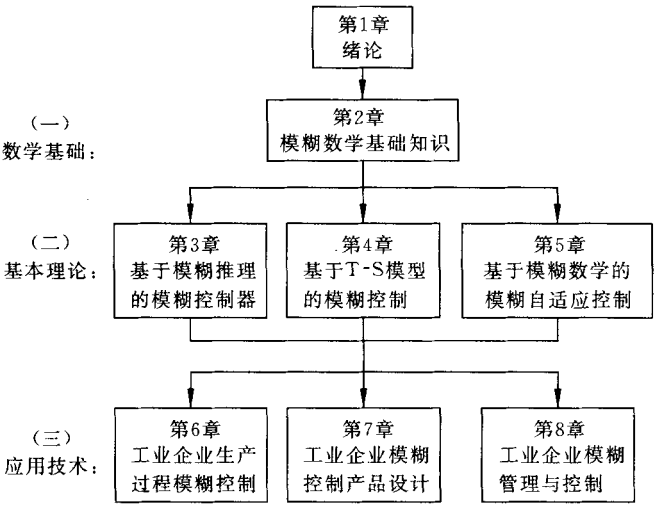


图 1.1 本书内容结构图