



# 不确定信息处理 理论、方法及其应用

吴青娥 / 著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 不确定信息处理理论、方法及其应用

吴青娥 著

本书的出版得到河南省信息化电器重点实验室资助

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统介绍不确定信息处理基础理论,重点阐述了几种典型的信息处理方法和技術.全书共9章.第1章是绪论;第2,3章介绍基于神经网络的模糊自动机系统、化简及实例;第4章介绍模糊自动机的融合;第5章在模糊粗糙集的基本运算基础上,提出了新的运算理论,阐述了一种新的思路和技巧;第6章给出基于模糊与统计理论的不确定信息处理算法;第7章讨论一种新的不确定推理方法并与其他不确定推理方法进行比较;第8章介绍基于拓扑知识的不完全信息处理理论及应用;第9章简单介绍模糊自动机的应用等,使得全书内容更严谨更完善.

本书可作为自动化、应用数学、运筹学、工业与系统工程、计算机科学和通信工程等专业的高年级本科生和研究生教材及教学参考书,对相关专业的科研人员和工程技术人员也有较大的参考价值.

### 图书在版编目(CIP)数据

不确定信息处理理论、方法及其应用/吴青娥著. —北京:科学出版社,2009  
ISBN 978-7-03-024323-2

I. 不… II. 吴… III. 图像信息处理 - 研究 IV. TP391

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第046650号

责任编辑:赵彦超/责任校对:钟 洋  
责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号  
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009年5月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009年5月第一次印刷 印张:12 3/4

印数:1—2 500 字数:243 000

定价:40.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

## 前 言

在信息技术飞速发展的今天,各个领域的信息与数据急剧增加,并且由于人类的参与,使得数据与信息中的不确定性更加显著,关系更加复杂.如何从大量模糊的、杂乱无章的、强干扰的数据中挖掘出潜在的、新颖的、正确的、有应用价值的知识,是一个亟待深入研究的课题.

本书提出了基于神经网络的模糊自动机系统,探讨了不确定信息处理方法和算法.本书以模糊、不完备、随机等信息处理为基本研究对象,以模糊、粗糙、神经网络、形式语言与自动机等理论为工具,以模式识别、知识发现、信息融合为目的,深入研究了基于神经网络的模糊自动机系统、不确定信息处理方法和算法.既有严格的系统理论,又有实际的应用,力求达到理论与实际、方法与应用的统一.与现有的信息处理方法相比较,不确定信息处理方法应用了模糊技术,结合了神经网络、信息融合、模式识别等的大量优化算法,提出了几种模糊自动机与信息处理的新思想、方法和算法,并讨论了这些新思想、方法和算法在解决实际问题中的应用.计算机模拟结果证实了所提算法和方法的可行性和有效性,并取得了良好的效果.这是目前识别与控制领域中有效方法之一.

本书内容包括三部分:(1)模糊、粗糙、概率及自动机理论知识;(2)模糊自动机的理论、设计、算法与应用;(3)不确定性信息处理技术.本书力求反映20世纪90年代以来国内外学术界、工程界在该研究领域取得的最新进展和主要研究成果.

每门科学都有它自身的理论基础,信息处理也不例外.信息技术变化很快,专门的技术知识今天有用,但常常在几年内就变成过时的东西,因此,本书力图兼顾基础性、系统性、实用性、新颖性,有利于提高人们思考问题和解决问题的能力,并且能够拓展人们的思维.

本书的显著特色:(1)目前虽有研究自动机的著作,但讨论的是确定自动机或形式语言,而本书将神经网络、模糊理论与自动机有机地结合,提出了基于神经网络的模糊自动机系统,解决了基于确定自动机或形式语言理论对信息处理中存在的大量模糊信号不能处理或处理效果不好的弊病;(2)不确定性信息处理系统以信息处理方法为工具,以模糊粗糙等理论为基础,在对模糊、不完备、随机等信息处理时,优于神经网络、统计法等传统的信息处理方法,因为它具有明显的优势:一方面,系统的某些参数有明显的物理意义,能更真实地反映现实世界与客观事物;另一方面,系统具有自组织学习等特点,此外,系统的信息处理速度快、储存量与通信量低,特别适合密集目标环境,特别地,基于本书所提模糊自动机理论,设计出的模糊自动机模型具有体积小、

重量轻、稳定性好的优点；(3) 本书中包含了国内外许多专家的重要思想成果，但主要内容是作者几年来的深入研究成果。

在本书完成之际，谨向培养我的母校西安交通大学以及悉心指导我的恩师李济生院士、黄永宣和王拓教授致以衷心的感谢和崇高的敬意！同时，作者在河南省信息化电器重点实验室与郑州轻工业学院工作期间得到了实验室崔光照等的支持。最后，谨以本书献给所有关心、支持和帮助过作者的人们！

由于作者知识的局限性，错误与不妥之处在所难免，热忱欢迎广大同仁批评、指正。

作 者

2008 年 10 月

## 主要符号表

$\bar{A}$	A 的闭包
$E$	数学期望
$F$	状态转移矩阵
FR	模糊粗糙
FRS	模糊粗糙集
FS	模糊集
$G$	过程噪声转移矩阵
$H$	测量矩阵
$H_0, H_1$	假设检验
$N(A, B)$	模糊粗糙集 $A$ 与 $B$ 的模糊粗糙范数
$P$	目标模型的状态误差协方差矩阵
Pr	概率
PS	概率统计
$r$	决策规则
$\bar{r}_c$	正确识别率均值
$R$	在论域上的等价关系
$R_k^{(i)}$	量测误差协方差矩阵
$R^n$	实值的 $n$ 维矢量
RS	粗糙集
$S_k$	模糊综合函数
$v$	量测噪声
$V$	量测噪声协方差矩阵
$w$	过程噪声
$W$	过程噪声协方差矩阵
$X_L$	下近似
$X_U$	上近似
$X_U \setminus A_2$	集合 $A_2$ 在 $X_U$ 中的余集
$A^c$	集合 $A$ 在全集中的余(补)集

---

$\hat{x}, \hat{X}$	目标状态估计值
$\bar{x}$	状态估计均值
$\tilde{x}$	状态估计误差
$\Omega$	全集, 即论域
$\mu$	模型概率
$\pi$	模型的状态转移概率
$\theta$	检验水平
$\delta, \xi$	阈值
$\triangleq$	定义算子
$\prime$	转置算子
$\Xi_i$	模糊分布
$\Gamma$	事件域
$\Psi$	控制矩阵

# 目 录

<b>第 1 章</b>	<b>绪论</b>	1
1.1	国内外研究现状分析与综述	1
1.1.1	模糊系统	3
1.1.2	模糊自动机发展及现状研究	4
1.1.3	粗糙集发展及现状研究	7
1.1.4	证据理论发展及现状分析	11
1.1.5	概率理论发展及现状分析	13
1.1.6	粗糙集与模糊集、证据理论、概率论的比较	14
1.2	不确定性信息处理的基础知识	15
1.2.1	模糊数学的有关概念	15
1.2.2	模糊自动机	16
1.2.3	粗糙集的有关概念	17
1.2.4	D-S 证据理论的有关概念	20
1.2.5	概率理论	21
1.3	主要内容	21
<b>第 2 章</b>	<b>模糊信号处理的模糊自动机</b>	24
2.1	模糊有限态自动机	24
2.1.1	FFA 的定义	24
2.1.2	通过处理模糊逻辑对 FFA 的一种获取	26
2.2	模糊无限态自动机的性质	32
2.2.1	引论	32
2.2.2	基本定义	33
2.2.3	获取 FIA 的反馈神经网络结构	34
2.2.4	FIA 的获取	36
2.2.5	FIA 的等价性	38
2.2.6	FIA 的收敛性与稳定性	40
2.2.7	仿真	41
2.3	模糊自动机与处理的模糊信号之间的关系	43
2.3.1	预备知识	43
2.3.2	模糊自动机与处理的模糊语言之间的关系	47
2.4	模糊自动机间的关系	50
2.5	FA 对图像处理的目标识别	53
2.5.1	问题描述	53



2.5.2	FA 对图像预处理 .....	54
2.5.3	目标图像特征提取 .....	58
2.5.4	匹配与识别 .....	61
<b>第 3 章</b>	<b>FA 的化简 .....</b>	<b>66</b>
3.1	用自组织特征映射 (SOFM) 抽取 FA 概述 .....	66
3.2	状态模糊性的 FA 转变成状态没有模糊性的 FA .....	68
3.2.1	FA 状态的模糊性及其模糊性的解决 .....	68
3.2.2	FA 转变成没有状态模糊性的 FA 实例 .....	69
3.3	FA 的化简 .....	72
<b>第 4 章</b>	<b>FA 状态融合 .....</b>	<b>74</b>
4.1	引论 .....	74
4.2	关于 FA 状态融合的神经网络 .....	74
4.3	使用贝叶斯理论的 FA 状态融合 .....	76
4.3.1	FA 状态融合的系统模型 .....	76
4.3.2	通过使用神经网络的融合算法基本步骤 .....	76
4.3.3	仿真实现及仿真结果分析 .....	81
4.4	使用模糊综合函数的 FA 状态融合 .....	84
4.4.1	融合算法基本步骤 .....	84
4.4.2	实例 .....	87
4.4.3	仿真结果分析 .....	88
<b>第 5 章</b>	<b>模糊不完备信号处理的代数理论 .....</b>	<b>90</b>
5.1	引论 .....	90
5.2	模糊粗糙集代数系统 .....	90
5.2.1	FRS 的概念 .....	91
5.2.2	FRS 的代数系统 .....	91
5.2.3	分解定理 .....	99
5.3	FRS 的新运算理论 .....	100
5.3.1	引言 .....	101
5.3.2	FRS 的新运算理论 .....	101
5.3.3	FRS 在识别和控制中的相关理论 .....	105
5.4	FRS 在图像识别中的应用 .....	107
<b>第 6 章</b>	<b>基于模糊与统计理论的不确定信息处理算法 .....</b>	<b>109</b>
6.1	引论 .....	109
6.2	对航迹识别算法的改进 .....	109
6.2.1	基于统计法的航迹识别 .....	110
6.2.2	模糊法的航迹识别 .....	113
6.2.3	识别效果的度量 .....	114
6.2.4	仿真和识别算法性能分析 .....	115

6.2.5	模糊融合算法及仿真 .....	119
6.2.6	模糊法与统计法的综合比较 .....	121
6.3	FRS 与概率统计在应用中的比较 .....	122
6.3.1	引论 .....	123
6.3.2	FRS 和 PS 的描述性比较 .....	123
6.3.3	PS 和 FR 控制算法的模型 .....	125
6.3.4	对两个控制算法的仿真和性能分析 .....	128
<b>第 7 章</b>	<b>基于图像语义识别的不确定推理方法 .....</b>	<b>132</b>
7.1	引论 .....	132
7.2	粗糙集理论的基本知识 .....	133
7.3	语义推理方法 .....	134
7.3.1	基本知识描述 .....	134
7.3.2	语义推理 .....	139
7.4	语义推理方法在图像语义识别中的应用 .....	139
7.5	语义推理方法在卫星故障诊断中的应用 .....	144
7.6	语义推理方法与其他不确定性推理方法的比较 .....	146
7.6.1	语义推理方法的优缺点 .....	146
7.6.2	语义推理方法与其他不确定性推理方法的比较 .....	147
<b>第 8 章</b>	<b>基于拓扑知识的不完全信息处理理论 .....</b>	<b>149</b>
8.1	引论 .....	149
8.2	拓扑粗空间 .....	150
8.2.1	开集与闭集 .....	150
8.2.2	拓扑粗空间 .....	155
8.2.3	同胚 .....	158
8.3	在 RS 上的拓扑性质 .....	160
8.4	等价类和开集、划分和有限开覆盖之间的关系 .....	162
8.5	拓扑粗空间及其性质的应用 .....	163
8.5.1	拓扑粗空间的应用 .....	163
8.5.2	拓扑性质的应用 .....	164
8.6	基于粗拓扑性质的星座选择 .....	166
8.6.1	引论 .....	166
8.6.2	粗拓扑性质的应用 .....	166
8.6.3	星座选择 .....	169
8.6.4	仿真和讨论 .....	173
<b>第 9 章</b>	<b>FA 应用简介 .....</b>	<b>176</b>
9.1	FA 应用简介 .....	176
9.2	有待于进一步研究的问题 .....	178
<b>参考文献</b>	.....	<b>180</b>

# 第 1 章 绪 论

不确定性信息处理是指对模糊的、不完全的、随机的、不精确的信息及其组合信息进行处理的能力. 本书就是探讨这些不确定性信息的处理方法.

工程实践中所应用的理论一般分为确定性理论和不确定性理论. 本书的研究主要是以图像识别和航迹识别中各种不确定信息的处理为应用背景的. 然而, 在模糊图像处理 and 航迹识别的实践中, 仅使用确定性理论是很难进行模糊图像识别和精确导航的, 因为这时需要合情推理和容错能力. 不确定性推理理论可以满足此要求. 关于不确定性信息处理的研究是当前人工智能领域一类重要的研究内容.

## 1.1 国内外研究现状分析与综述

要获取图像中的有用信息, 就要对图像进行特征提取. 为此, 出现了许多图像处理的算法<sup>[1-7]</sup>和图像识别方法<sup>[2,4,7,8]</sup>. 以前大部分的工作都是先找出适合这些特征的方程, 然后对其求导, 研究其导数, 相继出现了很多算法<sup>[1,2]</sup>, 如 Marr 和 Hildreth 应用高斯函数先对图像进行平滑, 然后采用拉普拉斯算子根据二阶导数过零点来检测图像边缘, 称为 LOG(Laplacian of Gaussian) 算子; 局部曲面最小二乘拟合法、多尺度方法——实现由粗到细的 (course to fine) 边缘检测过程; 自适应方法中的模拟退火 (simulated nealing) 方法; 用于经典微分算子的边缘检测有 Roberts 交叉算子、Sobel 和 Prewitt 等, 以及基于梯度信息的自适应平滑特征增强的边缘提取. 此外, 目前还有更优的算法: Canny 边缘检测、Plessey 角点检测、对减少噪声且保持图像结构、Susan 算法<sup>[3]</sup>和其他算法, 如高斯滤波、中值滤波、中程滤波、梯度逆权重法、K-近邻域法、Saint-Marc 法 (SMCM 法). 把这些算法作比较, 实验结果证明, Susan 算法对噪声滤波且保持图像结构比其他算法的滤波要好, 对一些角点的边缘亮度弱的边缘估计有小的误差. Susan 算法计算和编程具有简单、定位准确、速度快、抗噪声性能强的优点, 是目前这些特征检测首选的算法, 但也有不足之处, 如无法区分“X”型角点. 另外, 图像处理的各种算法都是对图像的局部特征信息进行提取, 缺乏对全局图像语义识别的方法和算法. 图像语义识别过程就是利用图像信息及先验的约束条件将图像像素进行智能分类的识别过程. 目前, 也出现了一些图像语义识别的方法<sup>[8-11]</sup>和使用模糊技术处理图像的方法<sup>[7,8]</sup>, 但从这些处理方法的计算量、存储量、通信量、处理速度及识别效果来看, 需要进一步完善和改进.

由于视觉任务的多样性和复杂性, 以及从图像中所获得的信息不同, 需要的约束条件也各不相同. 由于人们事先很难精确了解在成像过程中信息的损失

情况,这就给先验知识的精确数学刻画带来很大的难度.另外,由于成像中各种因素的影响,使得要识别的目标与背景之间一般都带有一定的相似性和不确定性.

另外,随着人类社会政治、经济和军事活动的发展,导航的作用扩展到了社会生活的各个方面,极大地促进了军用和民用航空事业的发展.同时给出了多种导航方法,而目前广泛使用的几种导航方法中都存在着一些各自不同的缺点,如隐蔽性好的自主式惯性导航系统(inertial navigation system, INS)的主要缺点是导航误差随时间累积;即使是对具有全球覆盖、全天候、全天时、高精度、多功能、高保密、连续、实时和用户数量不受限制的特点的GPS(global positioning system)导航系统,也并非十全十美,非自主性、易受干扰、卫星信号在有些地方受遮挡而影响定位或丢失信号,以及定位精度容易受电子欺骗等因素影响是它的主要缺点.因而需要对两个或两个以上的导航系统进行组合,取长补短,构成组合导航系统.为了使组合的潜力充分发挥出来,就需要研究组合方法和算法.后来有人利用卡尔曼滤波器的导航算法,但结果是初步的.在研究导航组合系统时,有必要采用模糊/导航器/融合/航迹关联算法,以减小计算复杂度,使组合系统处理速度较快,存储和通信量则要求较低,并且具有较好的关联效果,这将是具有良好应用前景的一类航迹关联算法.

随着现代电子战信息环境的日益恶化,利用无线电收集敌方辐射源信息,或对破坏的有用信息进行模糊信号的多维参数提取工作已变得越来越重要也越来越困难.尤其是当信号飘移不定或模糊不清处于多变状态时,采用通常的导航跟踪技术进行跟踪处理将失去作用.而目前发展的不确定性理论及由此而发展起来的各种不确定性处理技术,对处理带有模糊不确定性的事件及对不精确知识的描述与处理方面具有得天独厚的优势.

目前不确定性信息处理技术被应用于越来越多的领域,并取得了较好的效果,为人们的正确决策提供了很大的帮助,具有较为广泛的应用前景.但是,用目前单一的不确定性信息处理技术很难实现图像的全局性识别和高精度的导航定位.此外,利用图像处理技术进行导航<sup>[12,13]</sup>将会有广阔的发展前景.

目前,模糊集、粗糙集、证据理论和概率论已有大量的研究,并且已成功应用在模式识别和人工智能等领域.

为了处理不确定性信息,人们发展了各种数学理论工具和方法,例如,模糊推理理论、模糊自动机理论、粗糙集理论、概率推理理论和 Dempster-Shafer(D-S)证据推理理论等,这些理论和方法均是为了处理特定的不确定性信息而发展起来的.这里,对这些不确定性信息处理理论的国内外研究现状分析如下.

### 1.1.1 模糊系统

#### 1. 模糊系统的研究概况

众所周知,经典数学是建立在康托集合论基础上的,康托集合概念的基础是形式逻辑的三大定律:同一律、矛盾律和排中律,即所研究的对象要么属于某个集合,要么不属于某个集合.由于康托集合论是抛弃了事物的模糊性而抽象出来的,因此,用经典数学方法难以科学地解决现实世界和复杂系统中大量存在的模糊现象问题.于是,为了科学地解决客观世界中普遍存在的模糊现象,必须扩充康托集合论,模糊集概念正是在这种背景下产生的.

1965年,美国著名的控制论专家 Zadeh<sup>[14]</sup>发表了著名的开创性论文 *fuzzy sets*, 标志了模糊数学的诞生.模糊数学不是让数学变得模糊,而是用数学来描述客观世界存在的模糊现象.模糊现象与随机现象不同,随机现象研究随机事件,而随机事件的结果是“非此即彼”;模糊现象研究模糊事件,而模糊事件的结果是“亦此亦彼”,这是随机事件与模糊事件的根本区别.

模糊数学在经典数学和充满模糊性的现实世界之间架起了一座桥梁,在其交叉和边缘领域不断出现一批又一批的新成果在理论上日趋完善,出现了各式各样的模糊数学理论,如模糊分析、模糊拓扑、模糊代数、模糊图论、模糊微分方程等;在应用中取得了令人刮目的成果,研究最多的是如何用模糊数学的方法来描述专家的知识,由此产生许多应用,如模糊气象分析、模糊航天航空、模糊控制<sup>[15-21]</sup>、模糊信息检索<sup>[22]</sup>、模糊图像分割<sup>[23,24]</sup>、模糊模式识别<sup>[25-29]</sup>、人工智能<sup>[30,31]</sup>、地质地震<sup>[32-34]</sup>、医疗诊断<sup>[35]</sup>、生物进化<sup>[36-40]</sup>、车辆驾驶<sup>[25]</sup>、交通管理<sup>[41]</sup>、决策评判<sup>[42-44]</sup>、模糊数据库<sup>[45]</sup>、模糊推理<sup>[46-48]</sup>、模糊聚类分析<sup>[49]</sup>、企业管理<sup>[50]</sup>、模糊规划和模糊决策<sup>[51-53]</sup>等,其中,模糊控制更是得到了广泛的应用.1974年,英国学者 Mamdani 首先将由模糊控制语句组成的模糊控制器应用于锅炉和汽轮机的运行控制,并在实验室中获得成功<sup>[54]</sup>.

模糊数学的发展正在走一条理论—技术—产品的道路,美国、日本等已经大刀阔斧地推出一个又一个新技术,一个又一个新产品,但我们也十分欣喜地看到,我国已经跳出纯理论框架,走上了理论和实践相结合的道路,这方面,李洪兴教授<sup>[55]</sup>于2002年推出的四级倒立摆——模糊推理机已经问世,并达到世界领先水平.

模糊系统<sup>[56-58]</sup>是一种基于知识或规则的系统,其核心就是由所谓的 IF-THEN 规则所组成的知识库<sup>[20,21]</sup>.最常用的模糊系统有三种<sup>[21]</sup>: (1) 纯模糊系统; (2) Takagi-Sugeno(T-S) 模糊系统<sup>[59]</sup>; (3) 具有模糊器和解模糊器的系统.

在模糊系统中,研究最多的是模糊推理方法,而推理合成规则(CRI)方法<sup>[60-62]</sup>是模糊推理方法中最有影响的一类方法.CRI方法基于广义假言

推理规则 (GMP), 将模糊规则解释为模糊关系, 并通过把新事实与模糊关系作合成运算来得到推理结果, 实用中经常用到的一种 CRI 方法为 Mamdani 方法 [54], 李洪兴 [63,64] 指出, Mamdani 方法本质上是插值器, 并发展了这一思想; 王国俊 [65] 完全从逻辑的角度将 CRI 方法发展为基于  $R_0$  蕴涵的三 I 模糊推理方法, 三 I 算法具有较好的逻辑基础和许多 CRI 方法所不具有的良好性质. 另一种在控制中应用较多的模糊推理方法为 T-S 方法, 该方法与 Mamdani 方法的不同之处在于 T-S 方法所基于的模糊规则的后件为输入变量的线性组合. 无论是 Mamdani 方法还是 T-S 方法, 对于连续函数类都具有任意的逼近性 [66], 甚至它们还可以互相转化 [67]. 另外, 关于模糊推理的理论方面的研究工作有陈永义和陈图云的特征展开理论 [68]; 汪培庄、李洪兴的真值流推理 [69,70]; 张文修、梁怡的包含度理论 [71] 等.

模糊推理用于控制时, 常常与其他的人工智能方法相结合, 比如基于人工神经网络的神经模糊系统 [72-75]、基于遗传算法的进化模糊系统 [37-40] 等. 这些混合系统一般具有较好的自学习能力、自寻优能力和处理不精确性数据的能力, 具有广泛的应用前景.

## 2. 模糊系统的优越性

一般认为, 模糊系统具有两个最为卓越的特性: (1) 模糊系统是由一个实值向量向一个实值标量所作的多输入映射, 并且可以得到这些映射的精确公式; (2) 模糊系统是由来自于以模糊 IF-THEN 规则为形式的人类知识所组成的基于知识的系统, 从而提供了从知识库向非线性映射的转换的一套系统程序 [20].

## 3. 模糊系统存在的问题

目前模糊系统还存在着许多问题, 主要表现在以下几个方面:

- (1) 模糊控制在非线性复杂系统应用中的模糊建模;
- (2) 模糊控制规则的正确建立;
- (3) 解模糊方法的确定;
- (4) 模糊控制精度问题;
- (5) 模糊控制系统的稳定性理论探讨和一般稳定性的证明;
- (6) 自学习模糊控制策略和智能化系统结构及其实现;
- (7) 简单实用且具有模糊推理功能的模糊集成芯片和模糊控制装置以及通用模糊控制系统的开发和推广应用.

### 1.1.2 模糊自动机发展及现状研究

#### 1. 自动机

1936 年, 图灵定义了一类简单的机器——图灵机 (Turing machine), 它能够计算任何可以定义的实数, 从而把计算机理论向前推进了一大步, 奠定了

计算机科学的基础。

1938年,香农等应用布尔代数对继电器接点电路进行研究,形成了开关电路理论,为有限自动机理论的建立奠定了基础。另一方面,图灵在1937年、McCulloch和Pitts在1943年指出:在自动机这门学科中采用所谓的构造逻辑即直觉主义逻辑来进行研究最为恰当,1943年,McCulloch和Pitts在关于神经活动逻辑分析的奠基性论著<sup>[76]</sup>中,系统地提出了神经网络(nerve nets)的理论。随后,Minsky<sup>[77]</sup>和Kleene<sup>[78]</sup>丰富了神经网络理论。如果把神经网络视为一个有有限输入和有限输出的黑盒子,我们可以将神经网络当作有限自动机进行研究,这就丰富了有限自动机理论的研究方法。

50年代中期,Huffman和Moore各自独立地研究了开关网络(switch network),为有限自动机理论的形成提出了另一个源泉<sup>[79,80]</sup>。

1956年,文献[81]首先提出了有限自动机的概念,标志着自动机理论成为一门独立的学科。从此,有限自动机理论得到了深入和系统的研究。

有限自动机(finite automata)理论是自动机理论的一个分支,是从一些具体的动态离散数字系统中抽象出来的数学模型。

新技术的发展使得对有限自动机理论中某些方向的研究日趋活跃,如数字通信技术促进了有限自动机可逆性的研究。有限自动机可逆性理论是有限自动机理论的一个研究方向。1959年,Huffman<sup>[82]</sup>给出了信息无损失(information lossless)和有限阶信息无损失(information lossless of finite order)的概念,从而开始了对自动机可逆性的研究。Even<sup>[83]</sup>定义了编码图(coding graph),从图论的角度刻画了信息无损失和有限阶信息无损失的概念,为有限自动机可逆性理论提供了一种新的研究方法和研究技巧。1968年,Massey和Sain<sup>[84]</sup>提出了前馈可逆线性有限自动机的概念。陶仁驥分别在1973年<sup>[85]</sup>和1979年<sup>[86]</sup>研究了可逆线性有限自动机。文献[87,88]继续研究了有限自动机的可逆性。文献[89]研究了基于自动机的链编码生成技术。

1967年,Minsky<sup>[90]</sup>证明了“每个有限状态自动机(finite-state automaton, FSA)都和某个神经网络等价并能被其模拟”。此后,许多学者都尝试着使用不同类型的神经网络去实现各种自动机的推导。

然而,推导是一个很难的问题,即使FSA也不例外。结果,和其他许多的算法一样,设计用来推导自动机的神经网络要么对所要推导的自动机状态的个数有所限制,要么需要像限制文法类型之类的附加条件。

Vilianmn, Zipser, Cleeremans 等于1989年、Elman于1990年讨论了用来识别有限状态语言的1阶反馈神经网络的训练。但是,这些结果更倾向于使网络预知下一个字符,而不是让其接受或拒绝不同长度的字符串。1990年,Giles和Pollack设计出一个2阶反馈网络来解决从样本推导能识别它们语言的问题。Pollack于1990年使用截短的近似梯度的算法和Tomita的训练样本来训练网络而得出这样的结论:“没有推导出任何满足要求的语言”。另一方面,Giles等于1991年使用完全梯度算法推导了一种Tomita语言。自此

以后,所有参考 2 阶反馈神经网络的网络模型都隐含了 Giles 描述的网络结构. 通过使用与 Giles 的算法有某种不同的完全梯度算法, Watrons 于 1992 年推导出了几种 Tomita 语言. 同年, Giles 实验证明了一个使用实时的、前向的训练算法的 2 阶反馈神经网络通过学习能从肯定的和否定的字符串训练样本中推导出正规文法, 他们用一个启发式的方法在神经网络训练期间及其后从中抽取 FSA, 这种方法不仅可以抽出 FSA 的状态, 还能获得 FSA 本身. 这就推广了 Cleeremans 等在 1989 年所做的只能抽取 FSA 的状态的工作. 然而, 当输入字符串越来越长的时候, 稳定性问题出现了, 即当越来越长的字符串输入网络时, 隐藏神经元值所形成的簇(状态)相互渗透而最终变得不能辨别. Zheng Zeng, Rodney M Goodman 和 Padhraic Smyth 于 1993 年提出, 产生这种问题的原因是由于构造出的网络使用比拟的聚类代表状态, 而实际的自动机的状态是离散的. 与之相应的训练算法是在完全梯度基础之上修改而来的伪梯度算法. 然而, 当所要推导的自动机状态个数增大时, 这种离散网络就显得有些力不从心了.

正规文法是 Chomsky 语言阶中最简单的一类文法<sup>[91]</sup>, 而且与 FSA 有一对一的关系. 语言阶的下一级文法被称为上下文无关文法, 而与之对应的自动机是 PA (下推自动机). 由 PA 的定义, 要表现上下文无关语言就需要在 FSA 旁边添加外部的堆栈操作. 1993 年, Das, Giles 使用带有一个外部“连续的堆栈”的 3 阶反馈神经网络实现了 PA 的推导<sup>[92]</sup>. 由于上面提到的稳定性问题, 在他们的工作基础上, Zheng Zeng 于 1994 年提出了带有外部离散堆栈的离散网络结构<sup>[93]</sup>. 然而, 这两种网络都对所讨论的上下文无关文法的范围作了如下限制: 只有当前的输入字符能被推到堆栈之上; epsilon 变换集(不读入一个新的输入字符而做状态传递和堆栈动作)为空. 总而言之, 他们讨论的是确定性上下文无关文法的一个子集. 文献 [92,93] 用带有外部堆栈的离散反馈网络来推导上下文无关文法.

## 2. 模糊自动机

模糊文法在诸如 X 光线的分析<sup>[94]</sup> 和智能人一机接口的设计<sup>[95]</sup> 等应用领域中起着重要的作用, 文献 [96—99] 对使用神经网络推导模糊自动机 (fuzzy automata, FA) 作了讨论, 文献 [96] 提出的综合方法使用数传设计技术实现了状态和输出的模糊表示. 文献 [100] 通过试验证明了表示非模糊确定性有限状态自动机 (deterministic finite-state automaton, DFA) 的反馈网络能被修改得可以表示模糊有限状态自动机 (fuzzy finite-state automaton, FFA), 修改的依据是文献: [101] 提出的“任一 FFA 都可通过一定的算法转化为与之等价的 DFA”. Zadeh<sup>[102]</sup> 还提出了另一种将模糊文法转化为非模糊文法的方法. 因此, 模糊有限状态自动机的推导就转换成了传统的确定性有限状态自动机的推导. 2001 年, Blanco, Delgado, Pegalajar<sup>[103]</sup> 从一组模糊样本集中推导出了能识别它的模糊自动机. 他们设计的网络结构是在用来推导



传统自动机的 2 阶网络基础上加入一个输出层,用以计算输入样本的隶属度.然而,它所处理的只是模糊有限状态自动机的一个子集.在神经网络的训练过程中,人们提出了各种各样的网络模型及各种改进方法、优化算法.同样地,在自动机的推导过程中,人们也提出了多种神经网络模型,除去上面提到的以外,还有文献 [104—106] 给出用 2 阶反馈神经网络推导确定有限自动机与模糊有限状态自动机的结构及算法.

随着信息技术发展的需求,越来越多的学者研究 FA,在理论 [107—112] 和应用 [113,114] 上都取得了丰硕的成果.文献 [107—111] 利用神经网络推导 FA,文献 [112, 115] 研究了模糊有限状态自动机的约简问题.

### 1.1.3 粗糙集发展及现状研究

#### 1. 粗糙集的发展

##### (1) 产生背景及发展

粗糙集 (rough sets, RS) 理论由波兰数学家 Pawlak 于 1982 年提出 [116]. Pawlak 把那些无法确认的个体都归属于边界区域,而这种边界区域被定义为上近似集和下近似集之差集.粗糙集理论有确定的数学公式描述,可以计算其含糊度.该理论是一种刻画不完整性和不确定性的数学工具,能有效地分析和处理不精确、不一致、不完整等各种不完备信息,并从中发现隐含的知识,揭示潜在的规律 [117].

1991 年 Pawlak 教授出版的第一本关于粗糙集的专著 [118] 和 1992 年 Slowinski 主编的关于粗糙集应用与相关方法比较研究的论文集 [119] 的出版,推动了国际上对粗糙集理论与应用的深入研究.1992 年,在波兰 Kiekrz 召开了第一届国际粗糙集学术讨论会,主要讨论了集合近似定义的基本思想及其应用;1993 年,在加拿大 Baff 召开了第二届粗糙集和知识发现研讨会,主题是粗糙集、模糊集与知识发现;1994 年,在美国 San Jose 召开了第三届国际粗糙集与软计算研讨会,主要探讨了粗糙集与模糊逻辑、神经网络、进化理论等的融合问题;1995 年,召开的第四届模糊理论与技术国际研讨会,主要针对粗糙集与模糊集之间的关系进行了讨论,促进了粗糙集的发展;1999 年,在日本召开第七届粗糙集、模糊集、数据挖掘和粒度—软计算国际会议,主要阐述了当前粗糙集、模糊集的研究现状和发展趋势;2000 年,在加拿大召开了第二届粗糙集和计算的当前趋势学术会议.当前许多重要的国际学术会议都把粗糙集理论的研究列入主要内容之一,从而推动了 RS 理论的拓展和应用.另外,国际上还成立了 RS 学术研究会.目前,粗糙集理论已经成为人工智能领域中一个较新的研究热点,它在机器学习 [120,121]、模式识别 [122,123]、知识获取 [124,125]、决策分析 [126]、过程控制 [127,128]、专家系统 [124]、数据挖掘 [129]、股票分析 [130,131]、医疗诊断 [132,133]、故障诊断 [134,135] 等许多领域得到了广泛的应用.

在 Pawlak 粗糙集模型中,等价关系是关键概念,等价类是构成上下近似