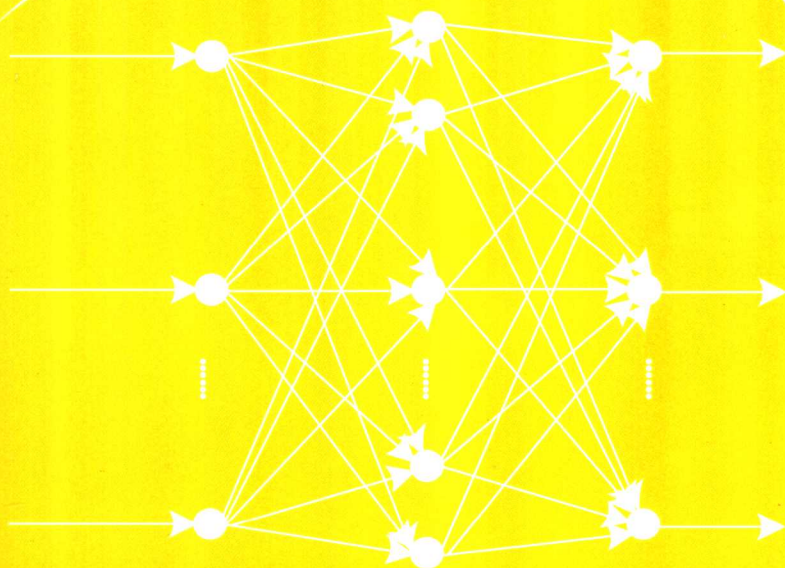



现代计算机科学技术精品教材



# 人工神经网络

## 原理及应用

朱大奇 史慧 编著

 科学出版社

# 人工神经网络原理及应用

朱大奇 史 慧 编著

科学出版社

## 内 容 简 介

本书介绍了人工神经网络的基本原理及其应用。重点阐述了9种常见神经网络的结构组成、工作原理、设计方法及应用实例。其中心内容包括前馈型BP神经网络；反馈型Hopfield神经网络和双向联想记忆BAM神经网络；局部逼近的CMAC小脑神经网络和径向基函数RBF神经网络；竞争学习的自组织SOM神经网络、对偶传播CPN神经网络、ART自适应谐振理论及量子神经网络。

本书可作为电子、自动化、仪器仪表、计算机及相关专业研究生教材，书中介绍的相关算法及应用实践，对相关理论研究者和工程技术人员也具有一定的指导意义。

### 图书在版编目(CIP)数据

人工神经网络原理及应用/朱大奇，史慧编著.

—北京：科学出版社，2006

ISBN 7-03-016570-5

I. 人… II. ①朱…②史… III. 人工神经网络 IV. TP.183

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第144552号

责任编辑：洪 英 / 责任校对：科 海

责任印刷：科 海 / 封面设计：林 陶

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>

北京科普瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006年3月第一版

开本：16开

2006年3月第一次印刷

印张：14.25

印数：1-3000

字数：347千字

定价：24.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

# 前 言

“人脑是如何工作的？”、“人类如何从现实世界获取知识和运用知识？”、“我们能否制作模仿人脑的人工神经系统？”。多少年来，人们从医学、生物学、生理学、信息学、认知学等各个角度试图认识并解答这些问题。

心理学家和认知科学家从探索人脑加工、存储和搜索信息的机制出发，试图弄清人脑功能机理，建立人类认识过程的微结构理论；生物学、医学专家试图通过人脑的生理学研究推动脑科学向定量、精确和系统化方向发展，寄希望于临床医学的新突破；信息处理与计算机科学家则试图寻求新的途径以解决目前计算机不能解决或不善解决的大量问题，构造更加逼近人脑功能的新一代计算机模型。各学科的发展和相互渗透，逐渐形成了一个新兴的多学科交叉的技术领域——人工神经网络。

作为一门新兴的信息处理科学，人工神经网络以人的大脑工作模式为基础，研究自适应、非程序的信息处理方法。这种工作机制的特点表现在通过网络中大量神经元的相互作用来体现它自身的处理功能，从模拟人脑的结构和单个神经元功能出发，达到模拟人脑处理信息的目的。

近十几年来，人工神经网络一直是科学界的研究热点，无论是理论研究还是应用实践都有大量的成果报道。国内陆续出版了一些有关人工神经网络的书籍，这对人工神经网络在我国的发展起到了很好的推动作用，它们大多是以专著或译著的形式出版，随着人工神经网络学科的发展与普及，人工神经网络已成为高等学校电类及相关专业研究生的必修课程，但目前出版的人工神经网络书籍适合作研究生教材的还较少。本书从研究生教学的实际出发，结合作者多年来在高校从事神经网络研究和教学工作的经验，重点阐述人工神经网络的基本原理和实际应用，同时兼顾近年来神经网络的新进展。在内容阐述上有以下特点：

- 通俗易懂，条理清晰，便于自学。注重物理概念内涵的阐述，尽量避免繁琐的数学推导。
- 注重理论联系实际，加强神经网络应用实例的介绍。以期读者在学习过程中得到启发，进而将神经网络模型应用到自己的研究课题之中。对选自于科技论文中的应用实例，都进行了改编、分析与说明。
- 按神经网络类型，逐个阐述其工作原理、网络特点及局限性，并提供应用实例，每章自成体系，便于取舍和教学。

全书内容共分 10 章。其中：

第 1 章为人工神经网络基础，阐述了人工神经网络的历史、研究概况及发展趋势，介绍了人工神经网络的基本模型、基本要素及其功能，包括转移（激励）函数、学习算法等。

为后续章节的学习奠定基础。

第2章介绍前馈型误差反传BP神经网络,重点阐述了BP神经网络的基本结构、标准学习算法及其局限性、改进的BP学习算法及BP神经网络的一般性设计原则。同时介绍了BP网络在各方面的应用。

第3章分别对离散型和连续型Hopfield反馈神经网络的结构、工作原理及稳定性进行了分析;最后从优化计算及联想记忆两方面介绍了Hopfield神经网络的应用。

第4章针对Hopfield神经网络自联想记忆,讨论了BAM异联想记忆神经网络,重点介绍了离散型双向联想记忆神经网络的结构、工作原理、权矩阵设计方法及稳定性。

第5章在讨论CMAC小脑神经网络基本结构及原理的基础上,从CMAC网络输出计算阶段和网络权值调整阶段两个方面,重点介绍了模糊CMAC神经网络,基于信度分配的CMAC神经网络,基于平衡学习的CMAC神经网络及基于信度分配的模糊CMAC神经网络的结构、工作原理及权值调整学习算法,并给出了具体的仿真算例。本章内容得到了江苏省自然科学基金“动态非线性系统在线故障诊断的神经网络学习算法研究”课题的资助(NO.BK2004021)。

第6章讨论径向基函数神经网络RBF的结构、工作原理,在此基础上,介绍了一种基于免疫算法的改进RBF神经网络隐层数据中心个数的确定、隐层数据中心位置的确定方法和输出权值的学习调整算法。最后讨论了RBF神经网络在热工过程辨识方面的具体应用。

第7章讨论竞争算法的学习过程,在此基础上进一步介绍SOM自组织特征映射神经网络的结构、工作原理。最后讨论了SOM神经网络在聚类分析、复合材料的损伤检测及模拟电路故障识别中的具体应用。

第8章在介绍简单CPN神经网络拓扑结构及训练算法的基础上,进一步讨论了双向CPN神经网络的结构和工作原理。最后分析了CPN神经网络在模拟电路故障识别中的具体应用。本章内容得到了教育部科学技术研究重点项目“鲁棒控制与故障检测及其集成应用”的资助(NO.105088)。

第9章分别讨论了简单的ART1型神经网络拓扑结构及训练算法、用于处理连续型模拟信号的ART2型神经网络的结构与工作原理,以及具有3R功能的综合ART系统。最后介绍了ART神经网络在图像处理及故障诊断中的具体应用。本章内容得到了总装备部国防科技预研基金“神经网络智能故障诊断专家系统”课题的资助(NO.413170203)。

第10章介绍了近些年受到广泛关注的量子神经网络的一些基础知识及研究现状。并介绍了相关的一些应用。

本书由江南大学智能控制研究所朱大奇教授和中国航天科工集团史慧研究员共同撰写。其中第1章、第2章、第3章、第4章、第5章、第7章、第8章、第10章由朱大奇教授执笔,第6章、第9章由史慧研究员执笔。全书由朱大奇教授统稿。

本书可作为电子、自动化、仪器仪表、计算机及相关专业研究生教材,书中介绍的相关算法及应用实践,对相关理论研究者和工程技术人员也具有一定的指导意义。

由于作者水平所限,时间仓促,书中难免存在不足和错误之处,敬请广大读者和专家批评指正。

编者

# 致 谢

本书由东南大学博士生导师曹进德教授和江南大学博士生导师、“太湖学者”王士同教授主审，两位专家在审阅过程中对本书提出的宝贵意见与建议使作者受益匪浅，在此深表感谢！

书中引用了一些学者的论著和研究成果，为此向他们表示深深的谢意！没有这些研究成果的加入，本书难成体系。

在本书的撰写过程中，作者的学生杨兴、易健雄、苏圣超、陈昕静、刘永安等人帮助进行了文字录入与绘图。

作者同时要感谢出版社的邹华跃老师、陈跃琴老师，没有他们的大力支持和辛勤工作，就没有本书的出版。

书中相关章节内容得到了江苏省自然科学基金（NO.BK2004021）、教育部科学技术研究重点项目（NO.105088）、总装备部国防科技预研基金（NO.413170203）及江南大学研究生精品课程项目资助。

# 目 录

<b>第 1 章 神经网络的基础知识</b> .....	<b>1</b>
1.1 神经网络发展的历史及现状.....	1
1.1.1 神经网络研究阶段的划分.....	1
1.1.2 神经网络国内外研究状况.....	7
1.1.3 神经网络的发展展望.....	7
1.2 神经网络的基本模型及其功能.....	9
1.2.1 人工神经元的模型.....	9
1.2.2 神经网络的特性.....	11
1.2.3 神经网络的基本功能.....	12
1.2.4 神经网络的应用领域.....	13
1.3 神经网络的基本要素.....	17
1.3.1 神经元功能函数.....	17
1.3.2 神经元之间的连接形式.....	19
1.3.3 神经网络的学习(训练).....	20
1.4 本章小结.....	28
1.5 思考题.....	28
1.6 参考文献.....	29
<b>第 2 章 BP 误差反传神经网络</b> .....	<b>33</b>
2.1 BP 神经网络模型及其学习算法.....	33
2.1.1 BP 网络结构.....	33
2.1.2 BP 网络学习算法.....	34
2.2 BP 神经网络设计的一般原则.....	39
2.2.1 BP 网络参数设计.....	39
2.2.2 BP 网络结构参数设计.....	42
2.3 BP 神经网络的应用.....	43
2.3.1 BP 神经网络在模拟电路故障诊断中应用.....	43
2.3.2 BP 神经网络在多传感器信息融合故障诊断中应用.....	46
2.3.3 BP 神经网络在工业生产中的应用——基于神经网络的热轧带钢热流密度预测.....	53
2.3.4 BP 神经网络在工程建设安全管理中的应用——基于神经网络的工程建设安全管理效果评价.....	56
2.4 本章小结.....	63
2.5 思考题.....	63



2.6 参考文献.....	63
<b>第3章 Hopfield 反馈神经网络.....</b>	<b>65</b>
3.1 离散型 Hopfield 神经网络.....	65
3.1.1 DHNN 结构与工作方式.....	65
3.1.2 网络的稳定性与吸引子.....	69
3.1.3 DHNN 的设计原则.....	73
3.2 连续型 Hopfield 神经网络.....	75
3.3 Hopfield 神经网络的应用.....	82
3.3.1 Hopfield 神经网络在 A/D 转换器上的应用.....	82
3.3.2 Hopfield 神经网络在字符识别上的应用.....	85
3.4 本章小结.....	90
3.5 思考题.....	90
3.6 参考文献.....	91
<b>第4章 BAM 双向联想记忆神经网络.....</b>	<b>93</b>
4.1 BAM 结构、算法及稳定性.....	93
4.1.1 BAM 结构及工作原理.....	93
4.1.2 BAM 权矩阵设计及稳定性分析.....	94
4.2 BAM 神经网络的应用.....	97
4.2.1 基于 BAM 神经网络的推理方法.....	97
4.2.2 基于 BAM 网络的控制系统故障诊断.....	103
4.3 本章小结.....	104
4.4 思考题.....	104
4.5 参考文献.....	105
<b>第5章 CMAC 小脑神经网络.....</b>	<b>106</b>
5.1 CMAC 结构及工作原理.....	106
5.1.1 CMAC 结构.....	106
5.1.2 CMAC 工作原理.....	107
5.2 CMAC 改进学习算法.....	109
5.2.1 模糊 CMAC 神经网络算法.....	109
5.2.2 基于信度分配的平衡学习 CMAC 神经网络算法.....	110
5.2.3 基于信度分配的模糊 CMAC 神经网络学习算法.....	115
5.3 CMAC 神经网络的应用——基于 CMAC 的电液负载模拟器自学习控制.....	119
5.4 本章小结.....	125
5.5 思考题.....	126
5.6 参考文献.....	126
<b>第6章 RBF 径向基函数神经网络.....</b>	<b>128</b>
6.1 RBF 结构及工作原理.....	128



6.2 RBF 学习算法.....	129
6.2.1 RBF 网络的常规学习算法.....	129
6.2.2 相关问题.....	131
6.3 改进的 RBF 学习算法.....	132
6.3.1 IRBF 神经网络分析.....	132
6.3.2 基于免疫算法的 IRBF 神经网络设计.....	133
6.4 径向基函数神经网络 RBF 的应用——利用 RBF 神经网络实现热工过程的在线辨识.....	137
6.5 本章小结.....	142
6.6 思考题.....	142
6.7 参考文献.....	142
<b>第 7 章 SOM 自组织特征映射神经网络.....</b>	<b>144</b>
7.1 竞争学习算法基础.....	144
7.1.1 自组织神经网络结构.....	144
7.1.2 自组织神经网络的原理.....	145
7.2 SOM 神经网络模型与算法.....	151
7.3 SOM 神经网络的应用.....	154
7.3.1 SOM 网络应用于字符排序.....	154
7.3.2 SOM 网络在复合材料损伤监测中的应用.....	156
7.3.3 SOM 网络在电路故障诊断中应用.....	159
7.4 本章小结.....	162
7.5 思考题.....	162
7.6 参考文献.....	163
<b>第 8 章 CPN 对偶传播神经网络.....</b>	<b>164</b>
8.1 CPN 神经网络简介.....	164
8.2 CPN 神经网络结构及原理.....	165
8.2.1 CPN 网络结构.....	165
8.2.2 简单 CPN 网络运行原理.....	166
8.2.3 改进的 CPN 网络运行原理.....	171
8.3 CPN 神经网络的应用——CPN 网络在集成电路故障模式识别中的应用.....	172
8.3.1 电路故障诊断的 CPN 神经网络信息融合方法.....	172
8.3.2 基于 CPN 神经网络信息融合的光电雷达电路故障识别.....	175
8.4 本章小结.....	177
8.5 思考题.....	177
8.6 参考文献.....	178
<b>第 9 章 ART 自适应谐振理论.....</b>	<b>179</b>
9.1 ART1 型神经网络结构及算法.....	179
9.1.1 ART1 型网络结构.....	179

9.1.2	ART1 型网络工作原理.....	181
9.2	ART2 型神经网络结构及算法.....	184
9.2.1	ART2 型网络结构.....	184
9.2.2	ART2 型神经网络的数学模型与学习算法.....	185
9.2.3	ART 综合系统.....	188
9.3	ART 神经网络的应用.....	190
9.3.1	ART 神经网络在图像识别中应用.....	190
9.3.2	ART 神经网络在故障诊断中应用.....	193
9.4	本章小结.....	197
9.5	思考题.....	198
9.6	参考文献.....	198
<b>第 10 章</b>	<b>量子神经网络.....</b>	<b>199</b>
10.1	量子神经网络的发展.....	199
10.2	量子神经网络模型.....	200
10.2.1	多层激励函数的量子神经网络.....	200
10.2.2	Qubit 神经元模型.....	201
10.2.3	多宇宙的量子神经网络模型.....	201
10.2.4	其他模型研究.....	202
10.2.5	量子神经网络的发展.....	203
10.3	量子神经网络的应用.....	204
10.3.1	基于量子双缝干涉实验的神经网络模型.....	204
10.3.2	多层激励函数的量子神经网络模型及其在故障诊断中的应用.....	209
10.4	本章小结.....	215
10.5	思考题.....	215
10.6	参考文献.....	215

# 第 1 章 人工神经网络的基础知识

人类关于认知的探索由来已久。早在公元前 400 年左右，希腊哲学家柏拉图（Plato）和亚里士多德（Aristotle）等就曾对人类认知的性质和起源进行过思考，并发表了有关记忆和思维的论述。在当时及以后很长的一段时间内，由于科学技术发展水平所限，人们对人脑的认识主要停留在观察和猜测的基础之上，缺乏有关人脑内部及其工作原理的科学依据。直到 20 世纪 40 年代，随着神经解剖学、神经生理学以及神经元的电生理过程等研究取得突破性进展，人们对人脑的结构、组成及最基本工作单元有了越来越充分的认识，在此基本认识的基础上，借助数学和物理方法从信息处理的角度对人脑神经网络进行抽象，并建立简化的模型，称为人工神经网络 ANN（Artificial Neural Network），为叙述方便，将人工神经网络直接称为神经网络（以下同）。

目前，关于神经网络的定义尚不统一，按美国神经网络学家 Hecht Nielsen 的观点，神经网络的定义是：神经网络是由多个非常简单的处理单元彼此按某种方式相互连接而形成的计算机系统，该系统靠其状态对外部输入信息的动态响应来处理信息。综合神经网络的来源、特点和各种解释，它可简单地表述为：人工神经网络是一种旨在模仿人脑结构及其功能的信息处理系统<sup>[1]</sup>。

作为一门活跃的边缘性交叉学科，神经网络的研究与应用正成为人工智能、认识科学、神经生理学、非线性动力学等相关专业的热点。近十几年来，针对神经网络的学术研究大量涌现，上百种神经网络模型被提出，其应用涉及模式识别、联想记忆、信号处理、自动控制、组合优化、故障诊断及计算机视觉等众多方面，取得了令人瞩目的进展。

## 1.1 人工神经网络发展的历史及现状

### 1.1.1 人工神经网络研究阶段的划分

纵观神经网络的发展历史，其发展过程大致可以概括为如下 3 个阶段。

#### 1. 第一阶段——启蒙时期

这是神经网络理论研究的奠基阶段。1943 年，神经生物学家 McCulloch W.S. 和青年数学家 Pitts W.A. 合作，提出了第一个人工神经元模型，并在此基础上抽象出神经元的数理模型<sup>[2]</sup>，开创了人工神经网络的研究，以 McCulloch W.S. 和 Pitts W.A. 提出人工神经元的数理模型（即神经元的阈值模型，简称 MP 模型）为标志，神经网络拉开了研究的序幕。为了模拟起连接作用的突触的可塑性，神经生物学家 Hebb 于 1949 年提出了连接权值强化的

Hebb 法则<sup>[3]</sup>。这一法则告诉人们,神经元之间突触的联系强度是可变的,这种可变性是学习和记忆的基础。Hebb 法则为构造有学习功能的神经网络模型奠定了基础。1952 年英国生物学家 Hodgkin 和 Huxley 建立了著名的长枪乌贼巨大轴索非线性动力学微分方程,即 H-H 方程。这一方程可用来描述神经膜中所发生的非线性现象,如自激震荡、混沌及多重稳定性等问题,所以有重大的理论与应用价值。1954 年,生物学家 Eccles 提出了真实突触的分流模型<sup>[4]</sup>,这一模型由于通过突触的电生理实验得到证实,因而为神经网络模拟突触的功能提供了原型和生理学的证据。1956 年, Uttley 发明了一种由处理单元组成的推理机,用以模拟行为及条件反射。20 世纪 70 年代中期他把该推理机用于自适应模式识别,并认为该模型能反映实际神经系统工作原理。

1958 年 Rosenblatt 在原有 MP 模型的基础上增加了学习机制<sup>[5]</sup>。他提出的感知器模型首次把神经网络理论付诸工程实现,他的成功之举大大激发了众多学者对神经网络的兴趣。Rosenblatt 证明了两层感知器能够对输入进行分类,他还提出了带隐层处理元件的三层感知器这一重要的研究方向。Rosenblatt 的神经网络模型包含了一些现代神经计算机的基本原理,从而形成神经网络方法和技术的重大突破。神经网络的研究迎来了第一次高潮期。

1960 年, Widrow 和 Hoff 提出了 ADALINE 网络模型<sup>[6]</sup>,这是一种连续取值的自适应线性神经网络模型,可以用于自适应系统。他们针对输入为线性可分的问题进行了研究,得出期望响应与计算响应的误差可能搜索到全局最小值;在研究神经网络中会出现的回响现象时,意大利科学家 Caianiello 在神经元模型中引入了不应期特性;为了研究思维和大脑结合的理论问题, Grossberg 从信息处理的角度,研究了自组织性、自稳定性和自调节规律<sup>[7-8]</sup>;日本科学家 Amari 注重把生物神经网络的行为与严格的数学描述相结合,在数学求解研究上得到一定成果;Willshaw 等人提出了一种称为全息音的模型<sup>[9]</sup>,为利用光学原理实现神经网络奠定了理论基础;Nilsson 对多层机即有隐层的广义认知机作了精辟的论述等<sup>[10]</sup>。上述成果足以表明神经网络研究已获得了广泛的成功。

## 2. 第二阶段——低潮时期

正当一些科学家怀着极大的热情追求神经网络那遥远但并非不可及的目标时,人工智能的创始人之一 Minsky 和 Papert 对以感知器为代表的网络系统的功能及局限性从数学上做了深入研究,于 1969 年发表了轰动一时 *Perceptrons* 一书,指出简单的线性感知器的功能是有限的,它无法解决线性不可分的两类样本的分类问题,如简单的线性感知器不可能实现“异或”的逻辑关系等。这一论断给当时人工神经网络的研究带来沉重的打击,以致美国及前苏联的一些科研机构纷纷停止对此类项目提供资助,而使得这个领域的许多学者不得不转向其他课题的研究。由此开始了神经网络发展史上长达 10 年的低潮期。

使神经网络研究处于低潮的另外一个原因是,20 世纪 70 年代以来,集成电路和微电子技术的迅猛发展使传统的 Von Neumann 计算机进入全盛时期,基于逻辑符号处理方法的人工智能得到了迅速发展并取得显著成绩,它们的问题和局限性尚未暴露,因此暂时掩盖了发展新型计算机和寻求新的神经网络的必要性和迫切性。

也许 Minsky 的评论是过于苛刻了,不过这一评论在一定程度上暴露出当时神经网络研究的局限性,因而有一定的启发性。可喜的是,仍有少数具有远见卓识的科学家持之以恒地继续这一领域的研究,在此期间还有一些科学家又投入到这一领域中,成为低潮期神经

网络研究的亮点。

1976年,美国 Grossberg 教授提出了著名的自适应共振理论 ART (Adaptive Resonance Theory),其学习过程具有自组织和自稳定的特征。其后的若干年中,他与 Carpenter 一起研究了 ART 网络<sup>[11]</sup>,并有 ART1、ART2 和 ART3 3个 ART 系统的版本,ART1 网络只能处理二元的输入,ART2 比 ART1 复杂并且能处理连续型输入。ART3 网络纳入了生物神经元的生物电-化学反应机制,其结构更接近人脑的工作过程。

1972年,有两位学者分别在欧洲和美洲异地发表了类似的神经网络开发结果。一位是芬兰的 Kohonen T. 教授,提出了自组织神经网络 SOM (Self-Organizing feature map);另一位是美国的神经生理学家和心理学家 Anderson J.,提出了一个类似的神经网络,称为“交互存储器”。后来的神经网络主要是根据 Kohonen T. 的工作来实现的<sup>[12]</sup>。SOM 网络是一类无导师学习网络,主要用于模式识别、语音识别及分类问题。它采用一种“胜者为王”的竞争学习算法,与先前提出的感知器有很大的不同,同时它的学习训练方式是无指导训练,是一种自组织网络。这种学习训练方式往往是在不知道有那些分类类型存在时,用作提取分类信息的一种训练。

低潮期的另一位重要人物是日本的福岛邦彦 (Kunihiko Fukushima)。他开发了一些神经网络结构和训练算法,其中最有名的是 1980 年发表的“新认知机”(Neocognitron)。

“新认知机”是视觉模式识别机制模型,它与生物视觉理论相结合,其目的在于综合出一种神经网络模型,使它像人类一样具有进行模式识别的能力。

在整个低潮时期,上述许多重要研究成果虽然未能得到应有的重视,但其科学价值不可磨灭,他们的工作为日后神经网络理论研究的又一次高涨打下了坚实的基础。

### 3. 第三阶段——复兴时期

这是神经网络理论研究的主要发展时期。1982年,美国国家科学院的刊物上发表了著名的 Hopfield 模型的理论<sup>[13]</sup>。Hopfield 神经网络是如下的一组非线性微分方程:

$$C_i \frac{dU_i}{dt} = \sum_{j=1}^N T_{ij} f_j[u_j] - u_i / R_i + I_i \quad i=1,2,\dots,N$$

其中,  $U_i$  是第  $i$  个神经元的膜电位;  $C$ 、 $R_i$  分别是输入电容和电阻;  $I_i$  是电路外的输入电流;  $T_{ij}$  是第  $j$  个神经元对第  $i$  个神经元的联系强度;  $f(u)$  是  $u$  的非线性函数。Hopfield 构造出 Lyapunov 函数,并证明了在  $T_{ij}=T_{ji}$  情况下,网络在平衡点附近的稳定性,还将这种模型用电子电路来实现。Hopfield 的模型不仅对人工神经网络信息存储和提取功能进行了非线性数学概括,提出了动力方程和学习方程,还对网络算法提供了重要公式和参数,使人工神经网络的构造和学习有了理论指导。在 Hopfield 模型的影响下<sup>[14]</sup>,大量学者又被激发起研究神经网络的热情,积极投身于这一学术领域中,神经网络理论研究很快便迎来了第二次高潮。

同年, Marr 开辟了视觉和神经科学研究的新篇章<sup>[15]</sup>,他对视觉信息加工和过程进行了全面、系统和深刻地描述,并与神经实现机制联系起来。1983年, Kirkpatrick 等人认识到模拟退火算法可用于 NP 完全组合优化问题的求解<sup>[16]</sup>,这种模拟高温物体退火过程来找寻

全局最优解的方法最早由 Metropolis 等人于 1953 年提出。1984 年, Hinton 与年轻学者 Sejnowski 等合作提出了大规模并行网络学习机, 并明确提出隐单元的概念, 这种学习机后来被称为 Boltzmann 机<sup>[17]</sup>。Poggio 等人以 Marr 视觉理论为基础, 提出了初级视觉的正则化方法<sup>[18-19]</sup>。我国生物物理学家汪云九提出了视觉神经元的广义 Gabor 函数模型以及有关立体视觉、纹理检测、运动方向检测、超视觉度现象等的计算模型。

1986 年, 由 Rumelhart 和 McClelland 主编的有 16 位作者参加撰写的 *Parallel Distributed Processing: Exploration in the Microstructures of Cognition* 出版<sup>[20]</sup>。在该书中, 他们建立了并行分布处理理论, 主要致力于认知的微观研究, 同时对具有非线性连续转移函数的多层前馈网络的误差反向传播算法即 BP 算法进行了详尽的分析, 解决了长期以来没有权值调整有效算法的难题。所提 BP 算法可以求解感知机所不能解决的问题, 回答了 *Perceptrons* 一书中关于神经网络局限性的问题, 从实践上证实了人工神经网络有很强的运算能力, BP 算法是目前最引人注目、应用最广泛的神经网络算法之一。该书的出版表明 PDP 理论已达到一个新水平, 在世界各地产生了广泛的影响。

在神经网络的物理实现方面, Mead 和 Conway、Mahowald 等人合作, 研制出一种动物神经系统的电子电路模拟, 即硅神经系统, 他们以人的视网膜中的锥体细胞的连接方式来连接一块 VLSI 芯片。1988 年, Chua 和 Yang 提出了细胞神经网络 (CNN) 模型<sup>[21-22]</sup>, 它是一个细胞自动机特性的大规模非线性计算机仿真系统; Kosko 建立了双向联想存储模型 (BAM)<sup>[23-24]</sup>, 它具有非监督学习能力。

20 世纪 90 年代中后期, 神经网络研究步入了一个新的发展时期, 一方面已有理论在不断深化和得到进一步推广, 另一方面, 新的理论和方法也从未停止过其不断开拓的步伐。Edelman 提出的 Darwinism 模型在 20 世纪 90 年代初产生了很大的影响, 他建立了一种神经网络系统理论, 以 Darwinism III 为例, 其组成包括输入阵列、Darwin 网络和 Nallance 网络, 而这两个网络又包含一些功能不同的子网络等; 1991 年, Haken 把协同学引入神经网络, 在他的理论框架中, 他认为, 认知过程是自发的, 并断言模式识别过程即是模式形成过程; 我国学者吴佑寿、廖晓昕、曹进德、黄德双、戴先中等在这一时期对神经网络进行了大量的研究, 1991 年吴佑寿等人提出了一种激励函数可调的神经网络模型, 试图对先验知识加以利用。1994 年, 廖晓昕关于细胞神经网络的数学理论与基础的提出, 带来了这个领域新的进展<sup>[25]</sup>。通过拓广神经网络的激活函数类, 给出了更一般的时滞细胞神经网络 (DCNN)<sup>[61]</sup>、Hopfield 神经网络 (HNN)<sup>[62]</sup>、双向联想记忆网络 (BAM) 模型, 并借助杨格 (Young) 不等式、琴生 (Jensen) 不等式和 Lyapunov 泛函方法, 通过巧妙引入参数, 分别就神经网络系统含有常滞量、变滞量的两种情况, 证明了神经网络模型的全局渐近稳定性, 得到了一系列的充分判据, 对全局稳定的神经网络的设计和应用有重要指导意义。这一时期, 另一些新的发展方向也非常引人关注。

以光学方法来实现神经网络, 即光学神经网络, 由于能充分发挥光学强大的互连能力和并行处理能力, 因而受到重视。Wunsch 在 90 OSA 年会上提出一种光电 ART, 它的主要计算强度由光学硬件完成。1995 年, Jenkins 等人研究了光学神经网络 (PNN), 建立了光学二维并行互连与电子学混合的光学神经网络系统<sup>[26]</sup>。其他还有 McAulay 等学者致力于将电子俘获材料用于光学神经网络等<sup>[27-28]</sup>。

鉴于非线性系统控制问题的复杂性,一些学者试图通过神经网络方法来解决此类问题。1990年, Narendra 和 Parthasarathy 提出了一种推广的动态神经网络系统及其连接权的学习算法<sup>[29]</sup>,增强了非线性系统控制的鲁棒性。戴先中等人提出了连续非线性系统的神经网络( $\alpha$ 阶逆系统控制方法)<sup>[30]</sup>。Miller 等人在小脑模型关节控制器(CMAC)基础上,提出的非线性系统控制方法<sup>[31]</sup>,具有局部逼近和修改权极小的特点,但存在由于采用间断超平面对非线性曲面进行逼近而有时会出现精度不够的问题。1993年, Bulsari 提出以乘积 Sigmoidal 函数作为激活函数<sup>[32]</sup>,给出了非线性系统用神经网络逼近的构造性描述等。

随着人们发现人脑中存在着混沌现象,一些科学家进而又提出了混沌神经网络理论。1991年, Aibara 等在前人推导和实验的基础上,给出一个混沌神经元模型<sup>[33]</sup>。同年, Inoue 等提出用耦合混沌振荡子作为单个神经元构造混沌神经网络模型的方法<sup>[34-35]</sup>。耦合混沌振荡子的同步和异步分别对应神经元激活和抑制两个状态。虽然混沌是由简单的确定性规则产生的,但它包含规则性和不规则性两个方面,耦合的混沌振荡子的同步来自规则性,而不规则性可产生随机搜索能力。

考虑到人的思维及表达上常具有模糊性,一些学者把神经网络的研究与模糊系统联系起来<sup>[36-37]</sup>,从而导致了模糊神经网络的产生。Hiroyuki Okada 等人把模糊神经网络模型用于金融风险评估,他们提出了由 Sigmoid 型节点和线性节点构成的模糊神经网络模型<sup>[38]</sup>,其中的模糊规则由领域专家给出。该模型具有网络结构简单、模糊规则易于理解、有学习能力及能充分利用专家知识等优点,不足之处在于该网络连接结构及其权值的确定过分依赖领域专家的知识,而专家知识的获取有时会比较困难。Cai Yaling 等人提出了由3种不同类型节点构成的模糊神经网络模型<sup>[39]</sup>,该网络具有能够对学习样本快速记忆、不需要领域专家知识指导等优点,但在学习样本较多、规则数量较大时应用不理想。模糊神经网络在工业控制、金融时间序列分析、风险评估等方面预计有较大的应用潜力。

经过多年的发展,目前已有上百种的神经网络模型被提出,表 1-1 列出了神经网络发展过程中起过重要作用的十几种著名神经网络,它也是神经网络发展史的一个缩影。

表 1-1 有重要影响的神经网络

网络名称	发明者	时间	优点	局限性	应用领域
感知器 (Perceptron)	Frank Rosenblatt (康奈尔大学)	1958	最早的神经网络,有学习能力,只能进行线性分类	不能识别复杂字符,对输入模式的大小、平移和旋转敏感	文字识别、声音识别和学习记忆等
自适应线性单元 (Adaline)	Bernard Widrow (斯坦福大学)	1960- 1962	学习能力较强,较早开始商业应用	要求输入-输出之间是线性关系	雷达天线控制、自适应回波抵消等
小脑自动机 (Cerebellatron)	Marr D. (麻省理工学院)	1969- 1982	能调和各种指令系列,按需要缓慢地插入动作	需要复杂的控制输入	控制机器人的手臂运动



(续表)

网络名称	发明者	时间	优点	局限性	应用领域
误差反传网络 BP (Back Propagation)	Werbs P. (哈佛大学) Rumelhart D. (斯坦福大学) McClelland (斯坦福大学)	1974- 1985	多层前馈网络, 采用最小均方差学习方式, 是目前应用最广泛的网络	需要大量输入-输出数据, 训练时间长, 易陷入局部极小	语音识别、过程控制、模式识别等
自适应共振理论 ART (Adaptive Resonance Theory)	Carpenter G、 Grossberg S. (波士顿大学)	1976- 1990	可以对任意多个和任意复杂的二维模式进行自组织学习	受平移、旋转和尺度的影响; 系统较复杂。	模式识别, 善于识别复杂、未知模式
盒中脑 BSB 网络 (Brain State in a Box)	James Anderson (布朗大学)	1977	具有最小均方差的单层自联想网络, 类似于双向联想记忆, 可对片断输入补全	只能作一次性决策, 无重复性共振	解释概念形成, 分类和知识处理
新认知机 (Neocognition)	Fukushima K. (日本广播协会)	1978- 1984	多层结构化字符识别网络, 与输入模式的大小、平移和旋转无关, 能识别复杂字型	需要大量加工单元和联系	手写字母识别
自组织特征映射网络 SOM (Self-Organizing feature map)	Tuevo Kohonen (芬兰赫尔辛基技术大学)	1980	对输入样本自组织聚类, 可映射样本空间的分布	模式类型数需要事先知道	语音识别、机器人控制, 图像处理等
Hopfield 网络	John Hopfield (加州理工学院)	1982	单层自联想网络, 可从缺损或有噪声输入中恢复完整信息	无学习能力, 权值要预先设定	求解 TSP 问题, 优化计算及联想记忆等
玻尔兹曼机 (Boltzmann machine); 柯西机 (Cauchy machine)	Hinton J. (多伦多大学) Sejnowski T. (霍布金斯大学)	1985- 1986	采用随机学习算法的网络, 可训练实现全局最优	玻尔兹曼机训练时间长; 柯西机在某些统计分布下产生噪声	图像、声纳和雷达等的模式识别

(续表)

网络名称	发明者	时间	优点	局限性	应用领域
双向联想记忆网 BAM (Bidirectional Associative emory)	Bart Kosko (南加州大学)	1985- 1988	双向联想式单层网 络, 有学习功能, 简 单易学	存储的密度低, 数 据必须能编码	内容寻址 的联想记 忆
双向传播网 CPN (Counter Propagation)	Robert Hecht- Nielsen (美国)	1986	一种在功能上作为统 计最优化和概率密度 函数分析的网络	需要大量处理单 元和连接, 要高度 准确	神经网络 计算机, 图 像处理和 统计分析

### 1.1.2 人工神经网络国内外研究状况

20世纪80年代, 随着神经网络在世界范围内的复苏, 国内也逐步掀起了研究热潮。1989年10月和11月分别在北京和广州召开了神经网络及其应用讨论会和第一届全国信号处理-神经网络学术会议; 1990年2月由国内8个学会, 即中国电子学会、人工智能学会、自动化学会、通信学会、物理学会、生物学会、生物物理学会和心理学会联合在北京召开“中国神经网络首届学术会议”。这次大会以“八学会联盟, 探智能奥秘”为主题, 收到了300多篇学术论文, 开创了中国人工神经网络及神经计算机方面科学研究的新纪元; 2004年10月在合肥召开的“人工神经网络学术会议”已是第14届学术年会了; 2004年8月在中国大连召开的ISNN (International Symposium on Neural Networks) 2004国际会议, 引起了国内外神经网络研究者的广泛关注, 产生了较大的影响; 另外, 国内外许多相关的学术会议都设有神经网络专题, 如国内的WCICA、CIAC、CDC、CCC、CAA及国外的ACC、CCA、IDEAC等。经过十几年的发展, 中国学术界和工程界在人工神经网络的理论研究和应用方面取得了丰硕成果, 学术论文、应用成果和研究人员逐年增加。

在国际上, 1987年, 在美国加州召开了第一届国际神经网络学术会议, 此后每年召开的国际联合神经网络大会IJCNN (International Joint Conference on Neural Networks) 成为神经网络研究者的重要学术交流平台。另外, 十几种国际著名的神经网络学术刊物相继问世, 如 *IEEE Transactions on Neural Networks*、*IEEE Transactions on Circuit and Systems*、*IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*、*Journal of Artificial Neural Networks*、*Journal of Neural Systems*、*Neural Networks*、*Neural Computation*、*Networks: Computation in Neural Systems*、*Machine Learning* 等, 至此, 神经网络理论研究在国际学术领域获得了其应有的地位。

### 1.1.3 神经网络的发展展望

经过近半个世纪的发展, 神经网络理论在模式识别、自动控制、信号处理、辅助决策、人工智能等众多研究领域取得了广泛的成功。关于学习、联想和记忆等具有智能特点过程的机理及其模拟方面的研究正受到越来越多的重视。目前神经网络研究与发展主要集中在以下几个方面<sup>[48]</sup>。