

21世纪重点大学规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

马 锐 编著

人工神经网络原理



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



配电子教案

北京市高等教育精品教材立项项目
21 世纪重点大学规划教材

人工神经网络原理

马 锐 编著



机械工业出版社

本书介绍了神经网络的基本理论,系统地阐述了六种典型的人工神经网络模型,即早期的感知机神经网络、自适应线性元件神经网络、误差反向传播神经网络、Hopfield 神经网络、Boltzmann 机和自适应共振理论神经网络,以及它们的网络结构、学习算法、工作原理及应用实例,为读者深入了解和研究人工神经网络奠定了基础。

为了满足读者应用神经网络解决实际问题的需要,书中还介绍了神经网络应用开发设计的全过程,并在附录中给出了 BP 神经网络实现预测、Hopfield 神经网络实现图像自联想记忆、模拟退火算法实现 TSP 和 ART1 神经网络的源程序,供读者参考。作为扩充知识,书中也简单介绍了神经网络的实现,以及神经网络技术与传统的基于规则的专家系统和模糊系统的融合。

本书既可作为计算机科学与技术、电子、通信与自动控制等相关专业的研究生和高年级本科生的参考书,也可作为相关专业领域的科研人员和工程技术人员的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

神经网络原理/马锐编著. —北京:机械工业出版社,2010.7

(21 世纪重点大学规划教材)

ISBN 978 - 7 - 111 - 31266 - 6

I. ①人… II. ①马… III. ①人工神经元网络 - 高等学校 - 教材
IV. ①TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 132577 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:陈 皓 马 超

责任印制:李 妍

北京振兴源印务有限公司印刷

2010 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13.75 印张 · 340 千字

0001 - 3000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 31266 - 6

定价: 25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

出版说明

“211工程”是“重点大学和重点学科建设项目”的简称，是国家“九五”期间惟一的教育重点项目。

进入“211工程”的100所学校拥有全国32%的在校本科生、69%的硕士生、84%的博士生，以及87%的有博士学位的教师；覆盖了全国96%的国家重点实验室和85%的国家重点学科。相对而言，这批学校中的教授、教师有着深厚的专业知识和丰富的教学经验，其中不少教师对我国高等院校的教材建设做过很多重要的工作。为了有效地利用“211工程”这一丰富资源，实现以重点建设推动整体发展的战略构想，机械工业出版社推出了“21世纪重点大学规划教材”。

本套教材以重点大学、重点学科的精品教材建设为主要任务，组织知名教授、教师进行编写。教材适用于高等院校计算机及其相关专业，选题涉及公共基础课、硬件、软件、网络技术，内容紧密贴合高等院校相关学科的课程设备和培养目标，注重教材的科学性、实用性、通用性，在同类教材中具有一定的先进性和权威性。

为了体现建设“立体化”精品教材的宗旨，本套教材为主干课程配备了电子教案、学习指导、习题解答、课程设计、毕业设计指导等内容。

机械工业出版社

前 言

人工神经网络是一门新兴交叉学科，它从人脑的生理结构出发，探讨人类智能活动的机理，对人类智能进行模拟。随着对人脑生物神经网络的深入了解，人工神经网络的研究获得了长足发展。自 20 世纪 80 年代中后期以来，人工神经网络的研究吸引着众多不同领域的研究人员，在人工神经网络模型、网络的拓扑结构、学习算法和运行机制等方面取得了许多突破性进展。人工神经网络在组合优化、模式识别、图像处理、自动控制、机器人控制、信号处理等应用领域也获得了成功，显示出了巨大的潜力。

目前，人工神经网络的研究和应用方兴未艾，已经成为人工智能学科的一个重要研究方向和研究热点。为了适应人工神经网络的发展形势，需不断探索和研究人工神经网络的基本理论，普及人工神经网络的基础知识，培养人工神经网络应用和研究型人才。作者在多年来为研究生讲授“人工神经网络”课程讲义的基础上，结合部分相关研究成果，并参考国内外学者编著的相关书籍和文献资料撰写完成此书，力图为高等院校计算机科学与技术、电子、通信与自动控制等相关专业的研究生和高年级本科生，以及相关专业领域的科研人员和工程技术人员提供一本系统介绍人工神经网络基本理论和典型模型的教材和参考书籍。

在本书的编写过程中，注重了内容的选择和编排，围绕从理论到实践的主线，从介绍人工神经网络的基本概念、背景和历史入手，以人工神经网络模型信息处理性能的三个关键特性作为基础，以网络结构、学习算法、工作原理以及应用实例为核心详细介绍典型人工神经网络模型，以人工神经网络应用开发设计方法和实现带动理论联系实践，并通过对人工神经网络发展的简介启迪读者进行更深入的研究和应用开发。

全书共分 10 章。第 1 章介绍人工神经网络的基本概念、发展历史、特点、功能、主要研究方向和应用领域，并对人工神经网络技术和基于符号的人工智能技术及传统计算技术进行了比较；第 2 章介绍生物神经元的结构与功能，提出了人工神经元的数学模型、常用的转移函数、最早的 M-P 人工神经元模型，以及人工神经网络的互连结构和学习方式及规则；第 3 章介绍早期的感知机模型和自适应线性元件（ADALINE）的拓扑结构、处理单元模型及学习算法；第 4 章介绍采用误差反向传播学习算法的 BP 神经网络的提出、基本结构及处理单元的数学模型，以及标准 BP 学习算法的数学基础、局限性及改进和 BP 神经网络的主要能力及两个应用实例；第 5 章介绍离散型和连续型 Hopfield 神经网络的基本结构、处理单元模型、能量函数和状态，离散型 Hopfield 神经网络的运行规则、连接权值设计和信息存储容量，以及应用于联想记忆的离散型 Hopfield 神经网络和应用于优化计算的连续型 Hopfield 神经网络的两个实例；第 6 章介绍随机型神经网络及模拟退火算法，Boltzmann 机的网络结构、处理单元模型、能量函数、Boltzmann 分布、运行规则以及学习规则；第 7 章介绍自组织神经网络的提出、基本竞争学习的概念和规则，以及自适应共振理论神经网络的提出、特点和两种模型：ART1 神经网络和 ART2 神经网络；第 8 章介绍人工神经网络应用的特点、适用范围和设计开发过程，并介绍人工神经网络模型的选取、设计和实现；第 9 章介绍人工神经网络实现的发展历史、两种不同的实现方案的分类方法，以及人工神经网络的虚拟实现

和物理实现；第 10 章介绍人工神经网络与传统技术和新兴技术相结合的代表——神经网络专家系统和模糊神经网络。书中每一章均附有相应习题，并在附录中给出了人工神经网络发展过程中的主要研究工作，以及利用 BP 神经网络实现预测、利用 Hopfield 神经网络实现图像自联想记忆、模拟退火算法实现 TSP 和 ART1 神经网络的源程序，供读者参考。

本书由马锐编写。李朴之、赵彤、董建、王赢、火欣、陈涛、刘雯雯为本书做了资料收集工作，在此对他们表示感谢。

在本书的编写过程中，参考了大量的国内外文献资料，在此对文献的作者表示衷心的感谢。书中部分内容取材于作者指导的研究生的研究成果，此处一并表示感谢。

由于作者水平有限，同时人工神经网络作为多学科交叉的一门前沿学科，其内容也在不断地丰富和更新，因此书中难免存在错误、遗漏及不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 人工神经网络的概念	1
1.2 人工神经网络的发展历史	2
1.2.1 兴起时期	2
1.2.2 萧条时期	3
1.2.3 兴盛时期	5
1.2.4 高潮时期	5
1.3 人工神经网络的特点	6
1.4 人工神经网络的信息处理能力	8
1.5 人工神经网络的功能	8
1.6 人工神经网络的应用	9
1.7 人工神经网络的主要研究方向	10
1.8 人工神经网络与人工智能	11
1.9 人工神经网络与传统计算	12
1.10 本章小结	13
1.11 习题	13
第 2 章 人工神经网络基础	15
2.1 生物神经系统	15
2.1.1 生物神经元的结构	15
2.1.2 生物神经元的功能	16
2.2 人工神经元模型	17
2.2.1 人工神经元的形式化描述	17
2.2.2 转移函数	18
2.3 M-P 模型	20
2.3.1 标准 M-P 模型	21
2.3.2 延时 M-P 模型	21
2.3.3 改进的 M-P 模型	22
2.4 人工神经网络的互连结构	22
2.5 人工神经网络的学习	24
2.5.1 人工神经网络的学习方式	24
2.5.2 基本的神经网络学习规则	26
2.6 本章小结	30

2.7 习题	31
第3章 早期的自适应神经网络模型	32
3.1 感知机	32
3.1.1 感知机模型结构	32
3.1.2 感知机处理单元模型	33
3.1.3 感知机学习算法	34
3.1.4 感知机的局限性	36
3.1.5 感知机的收敛性	37
3.2 自适应线性元件	39
3.2.1 ADALINE 模型结构	39
3.2.2 ADALINE 学习算法	41
3.3 本章小结	43
3.4 习题	43
第4章 误差反向传播神经网络	45
4.1 误差反向传播神经网络的提出	45
4.2 误差反向传播神经网络结构	45
4.3 误差反向传播神经网络处理单元模型	46
4.4 误差反向传播学习算法	48
4.5 误差反向传播学习算法的数学基础	53
4.6 误差反向传播学习算法的改进	54
4.6.1 BP 算法存在的问题	54
4.6.2 累积误差校正算法	55
4.6.3 Sigmoid 函数输出限幅的 BP 算法	56
4.6.4 增加动量项的 BP 算法	56
4.6.5 学习速率自适应调整算法	57
4.7 隐含层的特征抽取作用	57
4.8 误差反向传播神经网络应用实例	58
4.8.1 BP 神经网络的主要能力	58
4.8.2 BP 神经网络在入侵检测中的应用	59
4.8.3 BP 神经网络在股票市场中的应用	62
4.9 本章小结	65
4.10 习题	66
第5章 Hopfield 神经网络	68
5.1 离散型 Hopfield 神经网络	68
5.1.1 离散型 Hopfield 神经网络结构	68
5.1.2 离散型 Hopfield 神经网络处理单元模型	69
5.1.3 离散型 Hopfield 神经网络的状态及运行规则	69
5.1.4 离散型 Hopfield 神经网络的能量函数	71
5.1.5 离散型 Hopfield 神经网络的连接权值设计	72

5.1.6	离散型 Hopfield 神经网络的信息存储容量	74
5.2	连续型 Hopfield 神经网络	75
5.2.1	连续型 Hopfield 神经网络结构	76
5.2.2	连续型 Hopfield 神经网络处理单元模型	76
5.2.3	连续型 Hopfield 神经网络的状态	77
5.2.4	连续型 Hopfield 神经网络的能量函数	78
5.3	Hopfield 神经网络应用实例	79
5.3.1	离散型 Hopfield 神经网络应用实例	79
5.3.2	连续型 Hopfield 神经网络应用实例	83
5.4	本章小结	87
5.5	习题	88
第 6 章	Boltzmann 机	90
6.1	随机型神经网络的提出	90
6.2	Boltzmann 机的网络结构	91
6.3	Boltzmann 机处理单元模型	92
6.4	Boltzmann 机的能量函数	93
6.5	Boltzmann 机的 Boltzmann 分布	94
6.6	Boltzmann 机的运行规则	95
6.6.1	模拟退火算法	95
6.6.2	网络运行规则	97
6.7	Boltzmann 机的学习规则	99
6.7.1	自联想记忆的学习规则	100
6.7.2	互联想记忆的学习规则	104
6.8	模拟退火算法应用实例	105
6.9	本章小结	107
6.10	习题	107
第 7 章	自适应共振理论神经网络	108
7.1	自组织神经网络的提出	108
7.2	竞争学习	109
7.2.1	竞争学习的概念	109
7.2.2	竞争学习规则	110
7.3	自适应共振理论神经网络的提出及特点	113
7.4	ART1 神经网络	114
7.4.1	ART1 神经网络的结构	115
7.4.2	ART1 神经网络处理单元模型	115
7.4.3	ART1 神经网络的学习规则	117
7.4.4	ART1 神经网络特性分析	121
7.4.5	ART1 神经网络应用实例	123
7.5	ART2 神经网络	124

7.5.1	ART2 神经网络的结构	124
7.5.2	ART2 神经网络处理单元模型	125
7.5.3	ART2 神经网络的学习规则	127
7.5.4	ART2 神经网络应用实例	129
7.6	本章小结	130
7.7	习题	130
第8章	人工神经网络应用的设计开发	132
8.1	人工神经网络应用的特点及适用范围	132
8.2	人工神经网络的设计开发过程	133
8.3	人工神经网络模型的选取	134
8.4	人工神经网络模型的设计	136
8.4.1	节点级设计	137
8.4.2	网络级设计	137
8.4.3	训练级设计	142
8.5	人工神经网络模型的实现	143
8.5.1	准备样本数据	143
8.5.2	选取训练样本	145
8.5.3	网络训练与测试	146
8.6	本章小结	147
8.7	习题	148
第9章	人工神经网络的实现	149
9.1	神经网络实现技术概述	149
9.1.1	神经网络实现的发展历史	149
9.1.2	神经网络实现方案的分类	150
9.2	神经网络的虚拟实现	151
9.2.1	基于传统计算机的软件模拟	151
9.2.2	神经网络并行多机系统	152
9.2.3	神经计算加速器	153
9.3	神经网络的物理实现	154
9.3.1	神经网络的 VLSI 实现	154
9.3.2	神经网络的光学实现	156
9.3.3	神经网络的分子实现	157
9.4	本章小结	157
9.5	习题	157
第10章	人工神经网络的发展	158
10.1	神经网络与专家系统	158
10.1.1	基于规则的专家系统	158
10.1.2	神经网络与专家系统的比较	159
10.1.3	神经网络专家系统	160

10.2 神经网络与模糊系统.....	163
10.2.1 模糊系统.....	163
10.2.2 神经网络与模糊系统的比较.....	164
10.2.3 模糊神经网络.....	165
10.3 本章小结.....	167
附录.....	168
附录 A 人工神经网络的主要研究工作.....	168
附录 B BP 神经网络实现太阳黑子数量预测源程序.....	171
附录 C Hopfield 神经网络实现图像自联想记忆源程序.....	184
附录 D 模拟退火算法实现 TSP 源程序.....	193
附录 E ART1 神经网络源程序.....	201
参考文献.....	209

第1章 绪 论

从亚里士多德时代开始，人们就开始从事思维机器的研究工作。1946年，第一台电子计算机的诞生标志着人们在思维机器方面的研究有了实质性的进展。但是人们不满足于计算机进行简单地计算和判断，只能解决那些特征明确、推理或运算规则清楚的可编程问题。人们希望计算机能够具有更多的智能特性以代替人们工作，从而能够解决与形象思维和灵感思维相关的问题，例如人脸识别等涉及联想或经验的问题。1956年，人工智能（Artificial Intelligence, AI）技术的出现，使人们对思维机器的研究跨进了一步。

对于人工智能的研究，有实现功能的模拟和生理结构的模拟两种方法。前者是从人的思维活动和智能行为的心理学特征出发，利用计算机系统，对人脑智能进行宏观功能的模拟，这就是建立在心理学基础之上的研究方法，即符号处理方法。而后者是从人脑的生理结构出发，探讨人类智能活动的机理，从生理结构上进行模拟，也就是用仿生学的观点，探索人脑的生理结构，把对人脑的微观结构及其智能行为的研究结合起来，这就是人工神经网络（Artificial Neural Networks, ANN）的研究方法。

自20世纪80年代中后期以来，人工神经网络的基础理论发展迅速，为进一步研究如何模拟人类智能以及了解人脑思维的奥秘开辟了一条新途径，并成为世界范围内迅速发展起来的一个前沿研究领域，其发展已经对计算机科学、人工智能和认知科学等领域产生了重要影响。从20世纪90年代开始，在一些国家掀起了人工神经网络研究和开发应用的热潮，有关人工神经网络理论的新的研究成果不断涌现。同时，神经网络算法在组合优化、模式识别、图像处理、自动控制、机器人控制和信号处理等方面都有许多应用。值得注意的是，目前，我国人工智能及其他相关学科领域的专家、学者和工程技术人员在人工神经网络理论和应用研究方面，也做出了许多可喜的成绩。

那么，什么是人工神经网络？人工神经网络理论究竟是在怎样的科学背景下产生的呢？它的发展历史、特点以及主要研究方向是什么呢？下面一一进行介绍。

1.1 人工神经网络的概念

简单地讲，人工神经网络就是基于模仿生物大脑的结构和功能，采用数学和物理方法进行研究而构成的一种信息处理系统或计算机。

人是地球上具有最高智慧的生物，而人的智能均来自于大脑，人类靠大脑进行思考、联想、记忆和推理判断，这些功能是被称做“电脑”的一般计算机都无法取代的。长期以来，很多科学家一直致力于人脑内部结构和功能的探讨研究，并试图建立模仿人类大脑的计算机。虽然直到目前为止，人们对大脑的内部工作机理还不甚清楚，但对其结构已经有所了解。

粗略地讲，大脑是由大量神经细胞或神经元组成的，每个神经元可以被看做一个小的处理单元，这些神经元按照某种方式互相连接起来，形成大脑内部的生物神经网络，这些神经元又随着所接收到的多个激励信号的综合大小而呈现兴奋或抑制状态。现在已经明确，大

脑的学习过程就是神经元之间连接强度随外部激励信息做自适应变化的过程，而大脑处理信息的结果则由神经元的状态表现出来。

显然，目前所建立的信息处理系统实际上就是模仿生物神经网络，所以称为人工神经网络。但同时也必须注意：尽管人工神经网络是对大脑结构的模仿，但这种模仿目前还处于较低的水平，它只是对生物神经网络的简化、抽象和模拟。

目前，关于人工神经网络还尚未有一个严格的、统一的定义，不同的科学家从各个不同侧面指出了人工神经网络的特点。例如，美国神经网络学家 Hecht Nielsen 关于人工神经网络的定义是：“人工神经网络是由多个非常简单的处理单元彼此按照某种方式相互连接形成的计算机系统，该系统是靠其状态对外部输入信息的动态响应来处理信息的。”美国国防部高级研究计划局关于人工神经网络的定义是：“人工神经网络是一个由许多简单的并行工作的处理单元组成的系统，其功能取决于网络的结构、连接强度以及各个单元的处理方式。”

从以上解释中可以看出，人工神经网络已经完全不同于一般的计算机。在一般计算机中，通常有一个中央处理器，它可以访问其存储器。中央处理器可以取一条指令和该指令所需要的数据，并执行该指令，最后将计算结果存入指定的存储单元中，其中的任何动作都按照确定的操作程序，并按照串行方式进行。而人工神经网络中的操作却不是串行的，也不是预先确定的，因为它根本没有确定的存储器，而是由许多互相连接的简单处理单元组成的，其中每个处理单元的功能只是计算其所有输入信号的加权和，当该和值超过一定的阈值时，输出呈现兴奋状态（高电平）；和值低于一定的阈值时，输出呈现抑制状态（低电平）。人工神经网络并不执行任何指令序列，它对并行加载的输入信号按照并行方式进行处理和响应，结果也并不保存在特定的存储单元中，但当人工神经网络达到某种平衡状态后，这个平衡状态就是所要的结果。

人工神经网络的操作通常分为两类：一类是训练学习操作；另一类是正常操作或回忆操作。执行训练学习操作时，将要教给神经网络的信息（外部输入）作为神经网络的输入和要求的输出，使网络按照某种规则（称为训练算法）调节各个处理单元之间的连接权值，直到在输入端输入给定信息，神经网络能产生给定输出为止。这时，各个连接权值已经调节好，网络训练完成。而正常操作过程，是针对已经训练好的神经网络进行的，在为训练好的神经网络输入一个信号时，就可以回忆出相应的输出结果。

1.2 人工神经网络的发展历史

从人脑的生理结构出发来研究人类的智能行为，模拟人脑信息处理的功能，即人工神经网络的研究，始于 19 世纪末期，但它的发展却经历了一条曲折的道路，分为兴起、萧条、兴盛和高潮 4 个时期。

1.2.1 兴起时期

1890 年，美国心理学家 William James 发表了一部详细论述人脑结构及功能的专著《心理学原理》（The Principles of Psychology），对相关学习、联想记忆的基本原理进行了开创性的论述。James 指出：“让我们假设所有我们的后继推理的基础遵循这样的规则：当两个基本的脑细胞曾经一起或相继被激活过，其中一个脑细胞受刺激重新激活时会将刺激传播到另

一个脑细胞。” James 提出的这一观点揭示了大脑联想记忆的特点，同时也预言了神经细胞激活是细胞所有输入叠加的结果。

1943 年，心理学家 W. S. McCulloch 和数学家 W. A. Pitts 在《数学和生物物理学会刊》(Bulletin of Mathematical Biophysics) 上发表了一篇神经网络方面的著名文章。在这篇文章中，他们在已知的神经细胞生物学基础上，从信息处理角度出发，总结了生物神经元的一些基本生理特性，提出了形式神经元的数学描述与结构方法，即 M - P 模型。M - P 模型用逻辑数学工具研究客观世界的事件在形式神经网络中的表述，尽管非常简单，但是却开创了神经网络科学理论研究的新时代。

1949 年，心理学家 D. O. Hebb 在《行为组织：神经心理学理论》(The Organization of Behavior: a Neuropsychological Theory) 一书中提出了神经元之间突触的连接强度可变的假设，建立了现在称为 Hebb 学习规则的连接权训练算法。Hebb 是首先提出“连接主义”(Connectionism) 这一名词的学者之一。他认为，大脑的活动是依靠脑细胞的组合连接实现的，如果源神经元和目的神经元均被激活并兴奋时，它们之间突触的连接强度将会增强。Hebb 学习规则为人工神经网络的学习算法奠定了基础。

1958 年，计算机学家 F. Rosenblatt 发表了一篇著名的文章，提出了具有 3 层结构的人工神经网络模型，即著名的感知机 (Perceptron) 模型。感知机模型由简单的阈值型神经元组成，通过学习改变连接权值，能够将类似的或不同的模式进行正确分类，初步具备了诸如学习性、并行处理、分布存储等神经网络的一些基本特征。Rosenblatt 提出的感知机模型在激励—响应方面是“自组织”的，为人工神经网络的发展奠定了基础。

1960 年，电机工程师 B. Widrow 和 M. Hoff 发表了在人工神经网络发展过程中极为重要的一篇文章——《自适应开关电路》(Adaptive Switching Circuits)。Widrow 和 Hoff 的重要贡献在于他们不仅设计了可以在计算机上仿真的人工神经网络，而且还用硬件电路实现了该设计，为今天用超大规模集成电路实现神经计算机奠定了基础。他们提出的自适应线性元件 (Adaptive Linear Element, ADALINE)，即自适应神经网络是能够连续取值的线性网络，主要应用于自适应系统。自适应神经网络更为巧妙的一点是采用了 Widrow - Hoff 学习训练算法，也称为最小均方差 (Least Mean Square, LMS) 算法，即数学上的梯度下降法，它根据加法器输出端的误差大小调节连接权值，使得训练期间的所有样本模式的平方和最小。

1.2.2 萧条时期

20 世纪 60 年代，人工神经网络表现出的学习能力掀起了人工神经网络研究的第一次热潮。但是随着研究工作的进一步深入，人们遇到了来自认知、应用和实现等多方面的困惑，使得一些人对人工神经网络产生了迷茫、困惑与失望，其中最为引人注目的是美国著名人工智能学者 M. Minsky 和 S. Papert。

M. Minsky 和 S. Papert 潜心研究数年，对以感知机为代表的人工神经网络的功能及其局限性从数学上进行了深入地研究，并于 1969 年出版了颇有影响的《感知机》(Perceptron) 一书，书中的结论是非常悲观的。该书指出，简单的人工神经网络只能用于线性问题求解，而求解非线性问题的人工神经网络应该具有中间层，但是在理论上还不能证明将感知机模型扩展到多层网络是有意义的。由于 Minsky 在学术界的地位和影响，其悲观的结论极大地影

响了当时的研究工作，无异于给刚刚兴起的人工神经网络研究当头一棒。此后不久，几乎所有为人工神经网络研究提供的基金都开始终止，很多专家也逐渐放弃了在该领域的研究工作。在其后的数十年中，人工神经网络的研究一直处于低潮。

虽然 Minsky 的悲观结论是导致人工神经网络研究进入低潮期的一个重要因素，但更重要的原因在于，自 20 世纪 70 年代以来，集成电路和微电子技术的迅猛发展，使传统的冯·诺依曼（von Neumann）体系结构的计算机进入了发展的全盛时期，同时，基于符号处理的人工智能技术也得到了迅猛发展并取得了显著成就。整个学术界陶醉于数字计算机的成功之中，从而掩盖了发展新型模拟计算机和神经网络技术的必要性和迫切性。

尽管当时人工神经网络的研究处于一个低潮期，研究人员大幅度减少，但难能可贵的是，仍然有不少学者在极端困难的条件下致力于人工神经网络的研究工作，并取得了一些积极的成果，为人工神经网络研究的再次兴起奠定了理论基础。

1972 年，芬兰的 T. Kohonen 教授提出了自组织映射（Self-Organizing Map, SOM）理论，并称其神经网络结构为“联想存储器”（Associative Memory）。SOM 模型是一类非常重要的采用无指导的学习方式的神经网络模型，主要应用于模式识别、语音识别和分类等领域，在尚不知道有哪些分类类型存在时，可以提取分类信息。Kohonen 提出的神经网络结构中所有的神经元节点是线性连续的，而在此之前提出的神经网络模型只支持二值离散输入。更为重要的是，Kohonen 提出的人工神经网络使用了许多邻近的、同时激活的输出节点。在这种情况下，不是由单个“优胜”神经元表示网络的输出，而是由相当数量的一组输出神经节点表示输入模式的分类，从而可以使网络更好地进行概括推论，减小了噪声的影响。

1976 年，美国波士顿大学自适应系统中心的 S. Grossberg 教授和他的夫人 G. A. Carpenter 提出了著名的自适应共振理论（Adaptive Resonance Theory, ART）模型。Grossberg 提出：若在全局神经元节点中有一个神经元节点特别兴奋，那么该节点周围的所有节点将受到抑制。Grossberg 还提出了关于短期记忆和长期记忆的机理，即短期记忆与神经元节点的激活值相关，长期记忆与连接权相关；节点的激活值与连接权都会随时间的衰减而衰减，具有“忘却”特性；节点激活值的衰减相当快（短期记忆），而连接权有较长的记忆能力，衰减较慢。在提出 ART 模型之后的若干年里，Grossberg 和 Carpenter 继续对该模型进行研究和发 展，提出了 ART1、ART2、ART3 和模糊 ART，其中 ART1 只能处理二值离散输入，而 ART2 能处理模拟输入，ART3 兼容了 ART1 和 ART2 的功能，并将两层神经网络扩展为任意多层神经网络。

在此期间，还有另外一位著名的学者是日本东京 NHK 科学研究实验室的 Fukushima。他在 1980 年研发了“新认知机”（Neocognition）。新认知机是视觉模式识别模型，与生物视觉理论相吻合，其目的在于综合出一种神经网络模型，可以让它像人类一样具有模式识别的能力。新认知机最初采用无指导的学习方式，后来开始采用有指导的学习方式，而后者更能体现该模型的模式识别特性。Fukushima 的神经认知机在样本模式变形、不完全的样本模式和受干扰的样本模式等情况下，都能够正确识别手写的 0~9 这 10 个数字，在当时是一项重大的研究成果。

在人工神经网络的低潮时期，上述研究工作虽然未能引起人们的重视，但是其价值不可磨灭。当时还有一些学者提出了连接机制（Connectionism）和并行分布处理（Parallel Distributed Processing）等概念，产生了较大的影响，为人工神经网络的进一步发展奠定了基础。

1.2.3 兴盛时期

20 世纪 70 年代后期，研究和试图模拟视觉和听觉的人工智能专家首先遇到了挫折，因为设计制造计算机的科学家们发现前面有着不可逾越的线路微型化的物理极限，人们习以为常的普通知识和经验难以“教给”计算机。这一切迫使人们去思考：冯·诺依曼体系结构的计算机究竟还能走多远，人脑的智能是否可以在计算机中重现？

1982 年，美国加州理工学院的生物物理学家 J. Hopfield 发表了一篇重要文章，标志着人工神经网络研究工作的复苏。Hopfield 教授总结和吸取了前人对人工神经网络研究的成果与经验，提出了一种新颖的人工神经网络模型——Hopfield 网络模型，并于 1984 年和 1986 年陆续发表了有关 Hopfield 神经网络应用的文章，获得了工业界和学术界的重视，有力地推动了人工神经网络的研究。Hopfield 网络模型的创新之处在于引入了物理力学分析方法，将网络作为一个动态系统并研究这种动态系统的稳定性。Hopfield 教授指出：对已知的网络状态存在一个正比于每个神经元的活动值和神经元之间的连接权的能量函数，网络活动的变化向着能量函数减小的方向进行，直到达到一个极小值，即在一定条件下网络可以达到稳定状态。Hopfield 网络模型具有联想记忆能力，引入了李雅普诺夫（Lyapunov）能量函数，阐明了神经网络与动力学之间的关系，建立了神经网络稳定性判断依据，指出了信息存储在网络中各个神经元之间的连接上。Hopfield 网络模型的另一个重要优点是与电子电路存在明显的对应关系，使得 Hopfield 神经网络易于理解并且易于用集成电路实现。1984 年，Hopfield 教授对 Hopfield 模型的电子电路实现为神经网络计算机的研究奠定了基础，同时开辟了人工神经网络用于联想记忆和优化计算的新途径，使人工神经网络的研究步入了兴盛时期。

继 Hopfield 教授发表文章之后，不少进行非线性电路研究的科学家在理论和应用方面对 Hopfield 网络模型进行了讨论和改进。1985 年，G. E. Hinton 和 T. J. Sejnowski 借助于统计物理学的概念和方法，为 Hopfield 网络模型引入随机机制，并提出了一种随机神经网络模型——玻耳兹曼（Boltzmann）机，其运行和学习过程采用模拟退火算法，有效地克服了 Hopfield 网络存在的能量局部极小值问题。

1986 年，美国的 D. E. Rumelhart 和 J. L. McClelland 及其领导的研究小组发表了《并行分布式处理》一书的前两卷。该书中提出的并行分布式处理（Parallel Distributed Processing, PDP）网络思想，对人工神经网络研究新高潮的到来起到了推波助澜的作用。书中提及了人工神经网络的 3 个主要特征：网络的拓扑结构、神经元的转移函数（亦称传输函数、传递函数或激励函数）和网络采用的学习训练方法。Rumelhart 等人最重要的贡献是提出了适用于多层神经网络模型的误差反向传播（Error Back-Propagation, BP）学习算法，能够将学习结果反馈到中间层的隐含节点中，解决了多层神经网络的学习问题。目前，该算法已经成为影响最大的一种人工神经网络学习方法。

这一时期大量而深入的开拓性工作大大拓展和完善了人工神经网络的模型和学习算法，增强了人们对人工神经网络系统特性的进一步认识，使人们对模仿脑信息处理的智能计算机的研究重新充满了希望。

1.2.4 高潮时期

近年来，随着计算机科学尤其是人工智能技术发展的需要，超大规模集成电路（Very

Large Scale Integrated circuits, VLSI) 技术、生物技术、超导技术和光学技术等迅速发展为人工神经网络提供了技术上的可能性。

自 1987 年以来,人工神经网络的理论、应用、实现以及开发工具均以令人振奋的速度快速发展,科学家们提出了许多种具备不同信息处理能力的神经网络模型,神经网络理论已经成为涉及神经生理科学、认知科学、数理科学、心理学、信息科学、计算机科学、微电子学、光学和生物电子学等多学科交叉、综合的前沿学科。神经网络的应用也已经渗透到了各个领域,并在智能控制、模式识别、计算机视觉、自适应滤波和信号处理、非线性优化、自动目标识别、连续语音识别、声纳信号处理、知识处理、传感技术与机器人和生物医学工程等方面取得了令人鼓舞的进展。与此同时,美国和日本等国在神经网络计算机的硬件实现方面也取得了一定的成绩。

世界各国积极投身于人工神经网络的研究工作,组织和实施了与此有关的重大项目,如美国的 DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) 计划,日本的 HFSP (The Human Frontier Science Program) 计划,法国的“尤里卡”计划 (Eureca Program),德国的“欧洲防御”计划 (The European Defence Project) 等。1986 年 4 月,美国物理学会在 Snowbirds 召开了国家神经网络会议;1987 年 6 月,IEEE 在美国 San Diego 召开了首届神经网络国际会议,国际神经网络学会 (International Neural Network Society, INNS) 也随之诞生,并于 1988 年起由国际神经网络学会和 IEEE 联合召开每年一次的国际学术年会,这标志着世界范围内掀起了人工神经网络研究开发的热潮;1988 年 1 月,由世界著名的 3 位神经网络学家 (美国波士顿大学的 S. Grossberg 教授、芬兰赫尔辛基技术大学的 T. Kohonen 教授、日本东京大学的甘利俊一教授) 主持的、世界上第一份神经网络杂志《神经网络》(Neural Network) 创刊;1990 年 3 月,IEEE 成立神经网络协会,神经网络会刊问世。此后,各种学术期刊的神经网络特刊层出不穷。

我国最早涉及神经网络的著作是 1980 年由涂序彦等编著的《生物控制论》一书,书中将“神经系统控制论”单独设为一章,系统地介绍了神经元和神经网络的结构、功能和模型。随着 20 世纪 80 年代人工神经网络研究的复苏,国内也掀起了人工神经网络研究的热潮。我国于 1989 年 10 月在北京召开了一个非正式的神经网络会议;1990 年 12 月在北京召开了我国首届神经网络学术大会,开创了我国人工神经网络及神经计算机方面科学研究的新纪元;1991 年在南京召开的中国神经网络学术大会上成立了中国神经网络学会。在此后近二十年的发展中,我国学术界和工程界在人工神经网络的理论研究和应用研究方面取得了丰硕的成果。目前,人工神经网络已经在我国的科研、生产和生活中产生了巨大的影响。

1.3 人工神经网络的特点

人工神经网络是基于人类大脑的结构和功能而建立起来的新型信息处理系统。尽管目前它只是大脑的低级近似,但是它的很多特点和人类的智能特点已相类似。正是由于这些特点,使得人工神经网络不同于传统的计算机算法和人工智能方法。

(1) 固有的并行结构和并行处理特性

人工神经网络与人类的大脑类似,是由大量的简单处理单元相互连接构成的高度并行的