



高等学校智能科学与技术专业“十三五”规划教材

人工神经网络 原理与实践

陈雯柏 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校智能科学与技术专业“十三五”规划教材

人工神经网络原理与实践

陈雯柏 编著
吴细宝 陈启丽 赵逢达 参编

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书精选了人工神经网络的经典内容,主要阐述人工神经网络的一般原理和基本思想,并在此基础上突出了人工神经网络在自动控制和模式识别中的应用。全书共十二章,第一和第二章主要介绍了人工神经网络与人工智能的关系、人工神经网络研究的基本情况与人工神经网络的基本原理等内容;第三至九章分别介绍了感知器、BP神经网络、径向基神经网络、反馈式神经网络、自组织竞争神经网络、CMAC网络与模糊神经网络等内容;第十章讨论了神经网络的优化;第十一章介绍了智能领域的研究热点——深度神经网络;第十二章简要介绍了神经网络在自动控制中的应用。

本书从创新能力较强的应用型人才培养角度出发,重视理论与实践的结合,内容力求深入浅出,兼具系统性、全面性和前沿性。

本书可作为高等院校智能科学与技术、自动化及电子信息技术等专业的本科生和硕士生教材或参考书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

人工神经网络原理与实践/陈雯柏编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.1

高等学校智能科学与技术专业“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3933-8

I. ① 人… II. ① 陈… III. ① 人工神经网络—高等学校—教材

IV. ① TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 304584 号

策划编辑 邵汉平

责任编辑 邵汉平 张弛

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 13.5

字 数 313千字

印 数 1~3000册

定 价 26.00元

ISBN 978-7-5606-3933-8/TP

XDUP 4225001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

人工神经网络是一种模仿生物神经网络的计算模型,它能够根据外界信息的变化改变内部人工神经元连接的结构并进行计算。作为一种非线性统计性数据建模工具,人工神经网络在语音识别、图像分析、智能控制等众多领域得到了广泛的应用。

人工神经网络方面的教材一般理论性较强,而 MATLAB 仿真程序设计方面的参考书对理论的介绍又相对较少。本书是在智能科学与技术专业教学实践的基础上,结合现有的教学讲义编写的,书中融入了作者多年来的教学研究与思考以及人工神经网络的最新技术发展。近年来,深度学习再掀人工神经网络的研究热潮,作者也特地将此内容引入了本书。

本书着眼于创新能力较强的应用型人才的培养,重视理论与实践的结合,精选了人工神经网络的经典内容,主要阐述人工神经网络的一般原理和基本思想,并在此基础上突出了人工神经网络在自动控制和模式识别中的应用。内容安排上注重先理论后实践。不同学校与专业的学生可根据实际情况和课时需要选学部分内容。

全书共十二章。第一章至第七章以及第九章由陈雯柏编写,第八章和第十章由吴细宝编写,第十一章由陈启丽编写,第十二章由赵逢达编写。全书由陈雯柏负责整理和统稿。

本书的出版得到了北京市属高等学校青年拔尖人才培育计划(CIT&TCD201404125)的资助。在编写过程中,作者多次得到钟义信教授、韩力群教授的指导;西安电子科技大学出版社的编辑们也为本书的出版付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,诚恳欢迎各位读者对本书提出批评指正意见,作者将不胜感激。

陈雯柏

2015年8月

目 录

第一章 绪论	1	3.1.1 单层感知器的网络结构	27
1.1 人类的智能与思维	1	3.1.2 单层感知器的功能分析	28
1.1.1 智能	1	3.2 感知器的学习算法	32
1.1.2 思维	2	3.3 感知器的局限性与改进方式	34
1.2 人工智能	3	3.4 多层感知器	35
1.2.1 人工智能的主流学派	3	3.5 感知器神经网络的 MATLAB 仿真实例	37
1.2.2 机制主义方法与人工智能统一	4	3.5.1 常用的感知器神经网络函数	37
1.2.3 人工智能的研究内容	4	3.5.2 仿真实例	39
1.3 人脑与“电脑”的信息处理机制	5	思考题	43
1.4 神经网络的研究溯源	5	第四章 BP 神经网络	44
1.5 神经网络的分类	8	4.1 BP 网络的模型	44
1.6 神经网络的特点	8	4.2 BP 网络的学习算法	45
1.7 神经网络的功能	9	4.2.1 BP 算法推导	45
1.8 神经网络的应用	10	4.2.2 BP 算法的程序实现	47
思考题	11	4.3 BP 网络的功能与数学本质	49
第二章 神经网络的基本原理	12	4.3.1 BP 神经网络的功能特点	49
2.1 生物神经网络	12	4.3.2 BP 神经网络的数学本质	50
2.1.1 生物神经元的结构	12	4.4 BP 网络的问题与改进	50
2.1.2 生物神经元的的信息处理机理	13	4.4.1 BP 神经网络存在的缺陷与原因分析	50
2.1.3 生物神经网络的结构	15	4.4.2 传统 BP 算法的改进与优化	51
2.1.4 生物神经网络的信息处理	16	4.4.3 深度神经网络	53
2.2 人工神经元的数学建模	17	4.5 BP 网络的设计	54
2.2.1 M-P 模型	17	4.5.1 输入/输出变量的确定与训练样本集的准备	54
2.2.2 常用的神经元数学模型	19	4.5.2 BP 网络结构设计	56
2.3 神经网络的结构建模	22	4.5.3 网络训练与测试	57
2.3.1 网络拓扑类型	22	4.6 BP 网络的 MATLAB 仿真实例	58
2.3.2 网络信息流向类型	23	4.6.1 BP 神经网络的 MATLAB 工具箱	58
2.3.3 神经网络结构模型的特点	24	4.6.2 BP 网络仿真实例	59
2.4 神经网络的学习	24		
思考题	26		
第三章 感知器	27		
3.1 感知器的结构与功能	27		

4.7 基于 BP 算法的一级倒立摆神经网络控制	64	第六章 反馈式神经网络	92
4.7.1 倒立摆系统	64	6.1 Elman 神经网络	92
4.7.2 仿真模型的建立	65	6.1.1 Elman 神经网络的结构	92
4.7.3 BP 神经网络控制器的设计	65	6.1.2 Elman 神经网络学习算法	93
4.7.4 神经网络控制器控制仿真实验	68	6.1.3 Elman 神经网络的应用	94
4.7.5 神经网络实物控制实验	69	6.2 离散 Hopfield 神经网络	94
思考题	70	6.2.1 离散 Hopfield 神经网络的模型	94
第五章 径向基神经网络	71	6.2.2 离散 Hopfield 神经网络的运行规则	95
5.1 径向基网络的模型	71	6.2.3 离散 Hopfield 神经网络的运行过程	95
5.1.1 正规化 RBF 网络	71	6.3 连续 Hopfield 神经网络	100
5.1.2 广义 RBF 网络	73	6.3.1 连续 Hopfield 神经网络的网络模型	100
5.1.3 RBF 网络的生理学基础	73	6.3.2 连续 Hopfield 神经网络的稳定性分析	102
5.1.4 RBF 网络的数学基础	74	6.4 Hopfield 神经网络的应用	102
5.1.5 函数逼近与模式分类问题举例	76	6.4.1 联想记忆	103
5.2 径向基网络的学习算法	79	6.4.2 优化计算	104
5.2.1 数据中心的确定	79	6.5 反馈神经网络的 MATLAB 仿真实例	104
5.2.2 扩展常数的确定	80	6.5.1 Elman 神经网络的 MATLAB 实现	104
5.2.3 输出权向量的确定	80	6.5.2 Hopfield 神经网络的 MATLAB 实现	106
5.2.4 梯度下降法同时获取数据中心、扩展系数与权向量	81	思考题	108
5.3 径向基网络的特性分析	82	第七章 自组织竞争神经网络	110
5.3.1 RBF 神经网络的特点	82	7.1 模式分类的基本概念	110
5.3.2 RBF 神经网络与 BP 神经网络的比较	82	7.1.1 分类与聚类	110
5.3.3 RBF 神经网络应用的关键问题	82	7.1.2 相似性测量	110
5.4 其他径向基网络	83	7.2 基本竞争型神经网络	111
5.4.1 广义回归神经网络	83	7.2.1 基本竞争型神经网络结构	111
5.4.2 概率神经网络	85	7.2.2 竞争学习策略	112
5.5 径向基网络的 MATLAB 仿真实例	87	7.2.3 特性分析	117
5.5.1 RBF 网络的 MATLAB 工具箱	87	7.3 自组织特征映射神经网络	117
5.5.2 仿真实例	88	7.3.1 SOM 网的拓扑结构	117
思考题	91	7.3.2 SOM 网的工作原理	117

7.3.3	SOM网的学习算法	118	等价性	146	
7.3.4	SOM网的功能应用	121	9.3	模糊系统与神经网络的融合	147
7.4	自适应共振理论(ART)神经网络	122	9.4	ANFIS	148
7.4.1	ART模型	122	9.4.1	自适应网络	149
7.4.2	ART算法原理	123	9.4.2	ANFIS的结构	149
7.5	学习向量量化(LVQ)神经网络	124	9.4.3	ANFIS的学习算法	151
7.5.1	LVQ神经网络结构	124	9.4.4	ANFIS的特点	152
7.5.2	LVQ神经网络的学习算法	124	9.5	模糊神经网络仿真实例	152
7.6	对偶网络(CPN)神经网络	125	9.5.1	MATLAB模糊逻辑工具箱	152
7.6.1	CPN神经网络结构	125	9.5.2	仿真实例	153
7.6.2	CPN神经网络的学习算法	125	9.5.3	倒立摆的模糊神经网络控制	156
7.7	自组织竞争网络的MATLAB仿真实例	126	思考题	159	
7.7.1	重要的自组织网络函数	126	第十章	神经网络的优化	160
7.7.2	自组织网络应用举例	128	10.1	神经网络的优化方法	160
思考题		132	10.1.1	网络结构的优化	160
第八章	CMAC网络	133	10.1.2	训练算法的优化	160
8.1	CMAC网络工作原理	133	10.2	基于遗传算法的神经网络优化	161
8.1.1	CMAC网络的生理学基础	133	10.2.1	遗传算法	161
8.1.2	CMAC网络的基本思想	133	10.2.2	遗传算法优化神经网络的权值训练	164
8.2	CMAC模型结构	134	10.2.3	遗传算法优化神经网络的网络结构	164
8.3	CMAC学习算法	135	10.3	基于粒子群算法的神经网络优化	165
8.4	CMAC网络的讨论	137	10.3.1	粒子群算法	165
8.4.1	CMAC网络的特点	137	10.3.2	粒子群算法优化神经网络的权值训练	167
8.4.2	CMAC与BP神经网络的比较	137	10.4	基于混沌搜索算法的神经网络优化	168
8.4.3	CMAC与RBF神经网络的比较	138	10.4.1	混沌现象	168
思考题		139	10.4.2	混沌优化算法原理	170
第九章	模糊神经网络	140	10.4.3	混沌优化算法优化神经网络的权值训练	170
9.1	模糊控制理论基础	140	思考题	170	
9.1.1	模糊集合及其运算	140	第十一章	深度神经网络	171
9.1.2	模糊关系与模糊逻辑推理	141	11.1	深度信念网络(DBNs)	171
9.1.3	模糊控制	142	11.1.1	基础知识	171
9.2	模糊系统和神经网络的联系	145	11.1.2	DBNs的结构	172
9.2.1	模糊系统和神经网络的区别	145			
9.2.2	模糊系统和神经网络的				

11.1.3	DBNs 的特点	173	思考题	189
11.1.4	DBNs 学习算法	174	第十二章 神经控制	190
11.1.5	DBNs 的应用	175	12.1 控制理论的发展	190
11.2	卷积神经网络(CNNs)	178	12.2 智能控制	191
11.2.1	基础知识	178	12.2.1 智能控制的产生	191
11.2.2	CNNs 的结构	179	12.2.2 智能控制的分类	192
11.2.3	CNNs 的特点	180	12.2.3 智能控制系统的组成	193
11.2.4	CNNs 学习算法	180	12.3 基于神经网络的辨识器	194
11.2.5	CNNs 的应用	181	12.3.1 系统辨识的基本原理	194
11.3	深度神经网络的 MATLAB 仿真		12.3.2 神经网络系统辨识典型	
	实例	182	结构	196
11.3.1	DBNs 的 MATLAB 工具箱	183	12.4 基于神经网络的控制器	198
11.3.2	DBNs 的仿真实例	183	12.4.1 神经网络控制的基本思想	198
11.3.3	CNNs 的 MATLAB		12.4.2 神经网络控制系统典型	
	工具箱	186	结构	198
11.3.4	CNNs 的仿真实例	187	思考题	203
			参考文献	204

第一章 绪 论

人体信息系统的进化表现了一个重要的科学规律：在感觉器官、神经系统、古皮层、旧皮层、行动器官成熟之后，新皮层就成为整体发展的焦点。信息技术的发展也遵循同样的规律：在传感(感觉器官功能的扩展)、通信(传导神经系统功能的扩展)、计算(古皮层、旧皮层功能的扩展)、控制(行动器官功能的扩展)充分发展起来之后，人工智能(新皮层功能的扩展)就成为信息技术发展的焦点。

人工神经网络是人工智能研究的一个分支。它是模仿生物神经网络进行分布式并行信息处理的算法模型，是近年来再度兴起的一个人工智能研究领域。

1.1 人类的智能与思维

大脑是思维活动的物质基础，思维是人类智能的集中体现。了解人脑的工作机理和思维本质、构造人工智能系统模拟人脑的功能是人们一直以来的向往与追求。

1.1.1 智能

人类从感觉到记忆再到思维这一过程称为“智慧”。智慧的结果是行为和语言，行为和语言予以表达便称为“能力”。智慧与能力合称为“智能”，将感觉、回忆、思维、语言、行为的整个过程称为智能过程。

如图 1.1 所示，智能过程是人类整个信息活动的过程。智能的特点主要体现为感知能力、记忆与思维能力、归纳与演绎能力、学习能力以及行为能力。智能过程通过五类基本技术(称为“信息技术”)来实现：

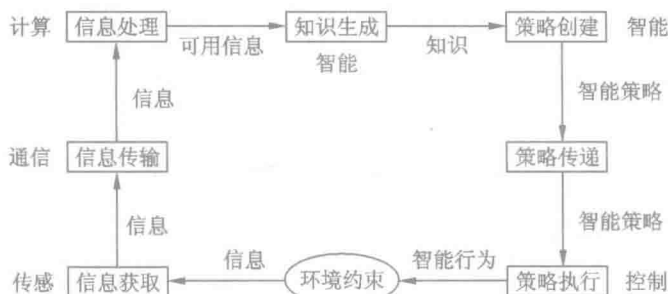


图 1.1 人类信息活动的过程

(1) 信息的感知与获取技术，即从外界获得有用的信息，主要包括传感、测量和信息检索等技术，它们是人类感觉器官功能的扩展；

(2) 信息的传输与存储技术，即交换信息与共享信息，主要包括通信和存储等技术，

它们是人类神经系统功能的扩展；

(3) 信息的处理与认知技术，即把信息提炼成为知识，主要包括计算技术和智能技术，它们是人类思维器官认知功能的扩展；

(4) 信息综合与再生技术，即把知识转变为解决问题的策略，主要包括智能决策技术，它们是人类思维器官决策功能的扩展；

(5) 信息转换与执行技术，即把智能策略转换为解决问题的智能行为，主要包括控制技术，它们是人类效应器官(行动器官)功能的扩展。

1.1.2 思维

思维是人脑对客观事物间接的反映过程，具体包括回想、联想、想象、思考和推理等。思维不是凭感觉器官对事物表象的直接认识，而是通过间接的甚至迂回的途径来反映客观事物的特点或它们之间的联系与规律，进而进行改造。因此，思维是人类认识过程的高级阶段。

1. 思维的类型

从思维规律的角度出发，思维可划分为抽象思维、形象思维和灵感思维三种类型。人的思维活动过程往往不是一种思维方式在起作用，而是两种甚至三种思维方式先后交错一同起作用。

1) 抽象思维

抽象思维又称逻辑思维，其形式包括概念、判断和推理。抽象思维是对客观现象进行间接、概括反映的过程，属于理性认识阶段。科学的、合乎逻辑的抽象思维是在社会实践的基础上形成的。人们运用分析、综合、归纳、演绎方法来形成概念并确定概念与概念之间演绎的关系、概念外延的数量属性关系、概念内涵的数量属性关系。

2) 形象思维

形象思维是用图形、行为等直观形象解决问题的思维，思维过程主要表现为类比、联想与想象等基本形式。类比是通过两个不同对象进行比较的方法进行推理，而重要的一环就是要找到合适的类比对象，这就要运用想象。联想是把某个事物与其他领域里的事物联系起来加以思考的方法。想象是对头脑中已有的表象进行加工改造而创造新形象的思维过程。因此，它可以说是一种创造性的形象思维。

3) 灵感思维

灵感又称顿悟，它是人脑的机能，是人对客观现实的反映。灵感思维是长期思考的问题受到某些事物的启发而忽然得到解决的心理过程。“灵机一动，计上心来”即是对这种灵感思维的表述，其特征是它具有突发性、偶然性、独创性和模糊性，这些特征是它区别于其他思维形式的显著标志。

2. 思维的神经基础

大脑是人类的思维器官，是最重要的智能器官，也是人类产生智能并发展的物质基础。

人类的思维过程首先是由大脑左半球进行逻辑思维，然后通过右半球进行形象思维，再通过胼胝体联系并加以协调两半球的思维活动。两半球之间联系极为密切，形象思维与抽象思维互相交织、补充和转化，达到对客观世界的更完美、更本质的认识。

灵感思维的神经基础在于脑电波。脑电波是脑中的电器性震动，它反映了脑细胞活动的节奏。在 β 波为优势脑波时，身心呈紧张状态，能量耗费加剧，以准备随时应对外在环境变化；当 α 波为优势脑波时，人的身心放松，脑部所获得的能量相对较高，潜意识大门打开，大脑思维可以抓住潜意识中所储存的主观信息，这就产生了灵感。

1.2 人工智能

人工智能是研究和开发用于模拟、延伸和扩展人类智能的理论、方法、技术及应用的科学。人工智能的创始人温斯顿(P. H. Winston)将人工智能的中心任务总结为如何使计算机去做那些过去只有靠人的智力才能做的工作。

1.2.1 人工智能的主流学派

人工智能的主流学派主要包括符号主义、连接主义和行为主义。

1. 符号主义

符号主义又称为逻辑主义、心理学派或计算机学派，其原理主要为物理符号系统假设和有限合理性原理。

符号主义认为人工智能源于数理逻辑。1956年，符号主义研究学者首先采用“人工智能”这个术语，该学派研究的代表人物有纽厄尔(Newell)、西蒙(Simon)和尼尔逊(Nilsson)等。符号主义典型的研究成果有启发式算法、专家系统、知识工程理论与技术等。专家系统的成功应用具有特别重要意义，表明人工智能走向了工程实际应用。

符号主义的特点是对人脑逻辑思维功能的“功能模拟”，它通过获取领域相关的规范知识和运用逻辑演绎的方法获得求解问题的策略，以求解逻辑思维之类的智能问题。

2. 连接主义

连接主义又称为仿生学派、生理学派，其主要原理为神经网络及神经网络间的连接机制与学习算法。

连接主义认为人工智能源于仿生学。1943年，生理学家麦卡洛克(McCulloch)和数理逻辑学家皮茨(Pitts)创立脑模型(M-P模型)，开创了用电子装置模仿人脑结构和功能的新途径。脑模型研究在20世纪70年代后期至80年代初期落入低潮，1982年，Hopfield提出用硬件模拟神经网络，使得连接主义重新抬头。1986年，鲁梅尔哈特(Rumelhart)等人提出多层网络中的反向传播算法(BP算法)，使得连接主义势头大振。

连接主义的特点是对人脑结构的“结构模拟”。它通过“信息样本的训练”获得经验知识和策略，用以解决形象思维之类的智能问题。

3. 行为主义

行为主义又称为进化主义、控制论学派，其原理为控制论以及感知-动作型控制系统。

行为主义认为人工智能源于控制论。行为主义把神经网络的工作原理与信息理论、控制理论、逻辑以及计算机联系起来。早期的研究重点是模拟人在控制过程中的智能行为和作用。

行为主义的特点是对智能系统行为的“行为模拟”，它通过建立刺激与响应之间的关系(表现为常识知识)自动产生与识别的刺激类型相关的行为响应。

1.2.2 机制主义方法与人工智能统一

人工智能研究在“三种学说”各自取得进展的同时，亦存“孰优孰劣”的争论，有时争论还非常尖锐和激烈。“条条道路通罗马”，结构、功能、行为都是窥探智能系统奥秘的重要观察窗口，但这不是最根本的入口。

北京邮电大学智能科学系钟义信教授提出了人工智能研究的“机制主义”模拟方法和“知识的生态学结构”。表 1-1 表明原来“鼎足三分”的三个主流学说(结构模拟、功能模拟和行为模拟学说)在“机制主义方法”的基础上可以实现和谐的统一。

表 1-1 机制主义方法的分类和举例

机制主义方法	信息	知识	智能	举例
A 型方法	信息	经验知识	经验智能	神经网络
B 型方法	信息	规范知识	规范智能	专家系统
C 型方法	信息	常识知识	常识智能	感知动作系统

智能生成的共性核心机制涉及信息、知识、智能三个层次的理论。在这三者之中，信息是现象，知识是本质，智能是能力。信息来自现实世界，能力作用于现实世界，知识则是信息与智能之间的桥梁与中介。

机制主义方法的实现是“信息—知识—智能转换”。一方面当知识属于经验知识的时候，机制模拟可以退化为“结构模拟”；当知识属于规范知识的时候，机制模拟可以退化为“功能模拟”；当知识属于常识知识的时候，机制模拟可以退化为“行为模拟”。

另一方面，知识是一个不断动态生长着的复杂运动过程。先天知识在各种信息的激励下，不断生长出“欠成熟”的经验知识；一部分经验知识逐渐“成熟”为规范知识，“过成熟”为常识知识。一部分常识知识又可能沉淀为下一代先天知识。如此不断生长，不断进化，便是一个“有始无终”的开放的知识生态过程。

可见，人工智能的结构模拟方法、功能模拟方法和行为模拟方法在机制模拟方法的框架内实现了和谐的统一。它们分别是机制模拟分别在经验知识、规范知识、常识知识条件下的特例。

1.2.3 人工智能的研究内容

人工智能是研究和开发用于模拟、延伸和扩展人类智能的理论、方法、技术及应用的技术科学，其主要研究内容可归纳为以下四个方面。

1. 机器感知

感知是感觉与知觉的统称，它是客观事物通过感官在人脑中的直接反映。机器感知研究如何用机器或计算机模拟、延伸和扩展人的感知或认知能力，包括机器视觉、机器听觉和机器触觉等。机器感知是通过多传感器采集，并经复杂程序处理的大规模信息处理系统。

2. 机器思维

大脑的思维活动是人类智能的源泉，没有思维就没有人类的智能。机器感知也主要是通过机器思维来实现的。机器思维是指将感知得来的机器内部和外部各种工作信息进行有

目的的处理。

3. 机器学习

学习是有特定目标的知识获取过程,是人类智能的主要标志和获得知识的基本手段,表现为新知识结构的不断建立和修改。机器学习是指计算机自动获取新的事实及新的推理算法等,是计算机具有智能的根本途径。

4. 机器行为

行为是生物适应环境变化的一种主要的手段。机器行为(Machine Behavior)研究如何用机器去模拟、延伸、扩展人的智能行为,具体包括自然语言生成、机器人行动规划、机器人协调控制等。

1.3 人脑与“电脑”的信息处理机制

人脑是在漫长进化过程中形成的大规模的、超精细的神经网络群体结构。人脑与“电脑”的计算机信息处理机制比较如表 1-2 所示。

表 1-2 人脑与计算机信息处理机制的比较

对比项目	人脑	电脑
系统结构	数百亿神经元相互连接而成。单个神经元只能完成一种基本功能,大量神经元广泛连接后形成的神经网络结构完成信息处理	由运算器、控制器、存储器和输入/输出设备组成。信息处理基于冯·诺依曼体系结构,进行程序存取
信号形式	具有模拟量和离散脉冲两种形式。模拟量信号具有模糊性特点,有利于信息的整合和非逻辑加工	信息表达基于二值逻辑形式。信息加工过程分解为若干二值逻辑表达式来完成
信息存储	信息分布式存储于整个神经网络系统中。分布联想式的信息存储利于从失真和残缺模式中恢复出正确的模式	信息存储于存储器。采用按顺序寻址的方式,处理器通过总线进行指令或数据的存取
信息处理方式	信息存储与信息处理采用一体化的并行处理方式。信息的处理受存储信息的影响,处理后的信息又留存于神经网络中成为记忆	有限集中的串行信息处理机制。基于程序存取机制,所有信息处理由 CPU 完成,处理结果存储于存储器

在处理速度方面,人脑中神经细胞间的信息传递只能达到毫秒级,而现代计算机的计算速度为纳秒级。在数值处理方面,计算机的信息处理速度要远高于人脑,但文字、图像和声音等信息的处理能力与速度却远远不如人脑。一般而言,计算机善于逻辑思维,而人脑擅长形象思维和经验与直觉的判断。

1.4 人工神经网络的研究溯源

如前所述,连接主义作为人工智能的主要研究学派,其研究特点是对人脑结构的结构模拟。1890年,美国心理学家 William James 发表的详细论述人脑结构及功能的专著《心理学原理》(Principles of Psychology)对相关学习、联想记忆的基本原理做了开创性研究。

人工神经网络目前已形成了一个多学科交叉的前沿技术领域,但其研究与发展道路是曲折的,体现了辩证唯物主义的认识规律。

1. 启蒙期(1969年以前)

从1890年 William James 研究人脑结构与功能开始,至1969年 Minsky 和 Papert 发表《感知器》(Perception)一书,这一阶段可称为人工神经网络研究的启蒙阶段。

启蒙阶段主要事件与研究成果有:

(1) James 在专著中指出:“假设我们所有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,当其中一个受到新的刺激被激活时会将这一刺激传播到另一个脑细胞。”这一点揭示了大脑联想记忆和相关学习的规律。同时,他也预言神经细胞激活是细胞所有输入叠加的结果。

(2) 1943年,生理学家 W. S. McCulloch 和数学家 W. A. Pitts 发表了一篇神经网络领域的著名文章,首先提出了 M-P 模型。该模型把神经元作为双态开关,并应用布尔逻辑的数学工具研究客观事件形式的神经网络。尽管 M-P 模型过于简单,但它奠定了网络模型和以后开发神经网络步骤的基础。通常认为,M-P 模型开创了神经网络科学理论研究的新时代。

(3) 1948年, Wiener 发表《控制论》专著,多次谈到他和 McCulloch、Pitts 与 Rosenblatt 等人在生物神经系统、信息和控制等方面的讨论、交流和合作。可以这样说, Wiener 对神经网络的研究起到了重要的推动作用。

(4) 1949年,心理学家 D. O. Hebb 出版的《行为组织:神经心理学理论》一书,提出了神经元的学习规则。Hebb 认为,大脑的活动是靠脑细胞的组合连接实现的,当源神经元和目的神经元均被激活兴奋时,它们之间突触的连接强度将会增强。目前,大部分神经网络的学习规则仍采用 Hebb 规则或它的改进型。因此可以这样说,Hebb 规则为人工神经网络的学习算法奠定了基础。

(5) 1958年,计算机学家 Frank Rosenblatt 提出了一种具有三层网络特性的神经网络结构,称为“感知器”(Perceptron)。Rosenblatt 指出感知过程具有统计分离性,可利用教师信号对感知器进行训练,从而模拟人脑感知能力和学习能力。

(6) 1960年,电机工程师 Bernard Widrow 与 Marcian E. Hoff 发表了一篇题为“自适应开关电路”(Adaptive Switching Circuits)的文章,提出了一种称为自适应线性单元的“Adaline”的模型。他们不仅设计了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他们的设计。从工程技术的角度看,这对神经网络技术发展极为重要。他们的工作为如今采用 VLSI 实现神经计算机的研究奠定了基础。

(7) 1969年, M. Minsky 和 S. Papert 发表了《感知器》一书,对感知器模型进行了深入研究,严格论证了简单线性感知器功能的局限性,并且指出多层感知器还不能找到有效的计算方法。这篇文章一度使神经网络研究陷入长达10年的低潮,几乎所有为神经网络提供的研究基金都枯竭了,很多领域的专家纷纷放弃这方面课题的研究。

2. 过渡期(1970—1986年)

Minsky 和 Papert 的悲观论点为刚燃起的人工神经网络研究之火泼了一大盆冷水。另一方面,20世纪70年代以来,传统的冯·诺依曼型计算机的迅猛发展为基于逻辑符号处理方法的人工智能提供了强大的计算支持,而它们的问题和局限性尚未暴露。这一阶段,

符号主义成为研究热点,结构模拟陷入低潮。直到1982年,加州理工学院 John Hopfield 博士提出 Hopfield 网络,才又一次掀起各学科关注神经网络的热潮。

过渡阶段的主要事件与研究成果有:

(1) 1972年,芬兰的 T. Kohonen 教授发表了一个与感知器不同的线性神经网络模型。比起非线性网络模型,它的分析要容易得多,Kohonen 称其神经网络结构为“联想存储器”(Associative Memory)。同年,美国神经生理学家和心理学家 J. Anderson 也提出了一个类似的神经网络,称为“交互存储器”(Interactive Memory)。在网络结构、学习算法和传递函数方面它与 Kohonen 技术几乎相同。

(2) 1980年,T. Kohonen 教授提出自组织映射(SOM)理论。SOM 模型是一类非常重要的无导师学习网络,主要应用于模式识别、语音识别和分类等场合。

(3) 1975年,日本东京 NHK 广播科学研究实验室的福岛邦彦(Kunihiko Fukushima) 提出一个自组织识别神经网络模型并于1980年发表“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符合,其目的在于综合出一种神经网络模型让它像人类一样具有进行模式识别的能力。

(4) 1976年,美国波士顿大学 Grossberg 教授提出了著名的自适应共振理论(Adaptive Resonance Theory)模型。其后,Grossberg 进一步提出了 ART 系统的三个版本 ART1、ART2、ART3。Grossberg 认为:若在全局神经节点中有一个神经节点特别兴奋,其周围的所有节点将受到抑制。Grossberg 对神经网络的研究起到了重要的推动作用。

(5) 1982年,美国加州工学院物理学家 Hopfield 对神经网络的动态特性进行了研究,引入了能量函数的概念,给出了网络的稳定性判据,提出了用于联想记忆和优化计算的新途径。1984年和1986年 Hopfield 连续发表了有关其网络应用的文章,获得了工程技术界的重视。例如,贝尔实验室于1986年声称利用 Hopfield 理论首先在硅片上制成硬件的神经计算机网络,并继而仿真出耳蜗与视网膜等硬件网络。不可否认,是 Hopfield 博士点燃了人工神经网络复兴的火炬。

(6) 1984年,多伦多大学教授 G. E. Hinton 等人借助统计物理学的概念和方法提出了一种随机神经网络模型——玻耳兹曼(Blotzmann)机,其学习过程采用模拟退火技术,有效地克服了 Hopfield 网络存在的能量局部极小问题。

(7) 1986年,Rumelhart 与 McClelland 发表《并行分布式处理》(Parallel Distributed Processing)一书,提出了误差反向传播神经网络,简称 BP 网络。BP 网络是一种能朝着满足给定的输入/输出关系方向进行自组织的神经网络。实际上早在1974年前后,这种网络已被哈佛大学的 P. Werbos 博士所发明,只因当时没有充分体会到它的用处而多年未受到足够重视。《并行分布式处理》一书的发表为掀起神经网络研究的新高潮起到了有力推动作用。

3. 发展新时期(1987年—)

(1) 1987年6月,首届国际神经网络学术会议在美国加州圣地亚哥召开,会上成立了国际神经网络学会(International Neural Network Society, INNS),这标志着世界范围内神经网络研究开发应用进入了一个新的高潮。

(2) 1987年8月,美国国防部预研计划管理局(DARPA)组织大规模调研论证,并于1988年11月开始一项投资数亿美元的发展神经网络及其应用研究的八年计划。此后许多

国家也制定了相应计划发展神经网络。

(3) 1990年3月, IEEE 成立神经网络协会并开始出版神经网络汇刊。

(4) 1990年2月, 中国电子学会等我国八个一级学会在北京联合召开了“中国神经网络首届学术大会”, 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。

(5) 2006年, 深度学习神经网络再掀人工神经网络研究热潮。多层神经网络容易陷入局部最优, 也很容易过拟合。这一度使得神经网络的研究再陷低潮。2006年, 多伦多大学 Geoffrey Hinton 教授与 Salakhutdinov 博士发表在美国《SCIENCE》的论文“Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks”提出了一种名为深度学习(Deep Learning)的逐层预训练神经网络学习方法, 治愈了多层神经网络的这个致命伤, 再次掀起人工神经网络研究热潮。

(6) 2012年6月, 《纽约时报》报道了斯坦福大学计算机科学家吴恩达(Andrew Ng)和谷歌公司的系统专家 Jeff Dean 共同研究深度神经网络的机器学习模型在语音识别和图像识别等领域获得的巨大成功。2012年11月, 微软公司在天津公开演示了一个全自动的同声传译系统, 其关键技术也是深度学习。2013年1月, 百度公司首席执行官李彦宏先生宣布建立深度学习研究院(Institute of Deep Learning)。2013年3月, 谷歌公司收购了由深度学习创始人 Geoffrey Hinton 创立的公司。

1.5 人工神经网络的分类

神经网络可根据不同标准来进行分类, 图 1.2 给出了按照学习类型(即无监督学习和监督学习)分类的例子, 详细内容参见后续各章及相关参考文献。



图 1.2 不同神经网络的学习类型

1.6 人工神经网络的特点

人工神经网络是基于对人脑组织结构和活动机制的初步认识提出的一种新型信息处理体系。因此也呈现出人脑的许多特征。

1. 信息存储的分布性

人工神经网络存储信息的方式与传统计算机的存储方式是不同的。一个信息不是存在一个地方,而是分布在大量神经元之间的连接关系中。

2. 信息处理的并行性

神经网络的每一个神经元都可根据接收到的信息作独立的运算和处理,然后将结果传输出去,这体现了并行处理。神经元的广泛互联与信息并行处理也必然使整个神经网络呈现出高度的非线性特点。

3. 信息处理的容错性

庞大的网络结构与分布式存储的结构特点使神经网络从以下两个方面体现出良好的容错性:

(1) 部分神经元损坏时不会对系统的整体性能造成影响。

(2) 输入模糊、残缺或变形的信息时,神经网络能通过部分信息联想恢复完整记忆。

4. 信息处理的自适应性

自适应性是指一个系统通过改变自身的性能以适应环境变化的能力。神经网络的自适应性表现在:

(1) 自学习性。当外界环境发生变化时,经过一段时间的训练或感知,神经网络能自动调整网络结构参数。

(2) 自组织(或称重构)性。神经网络能在外部刺激下按一定规则调整神经元之间的突触连接,并逐渐构建起新的神经网络。

(3) 泛化。泛化也称推广。泛化能力是指网络对以前未曾见过的输入做出反应的能力。泛化本身具有进一步学习和自调节的能力。

1.7 人工神经网络的功能

从上述基本特点可以进一步总结出人工神经网络的基本功能。

1. 非线性映射

复杂的非线性关系往往难以用传统的数理方法描述。输入/输出数据之间的映射规则可以在学习阶段自动抽取并分布存储在网络的所有连接中,这使得设计合理的神经网络能够以任意精度逼近复杂的非线性映射。这一优良性能使神经网络的应用十分广阔,例如可以作为多维非线性函数的通用数学模型。

2. 分类识别

对输入样本的模式分类实际上是在样本空间找出符合分类要求的分割区域。图像、声音和文字等实际分类问题在样本空间中的分割曲面是十分复杂的。基于强大的非线性映射能力,神经网络可以很好地解决对非线性曲面的逼近,从而具有良好的分类与识别能力。

3. 联想记忆

由于分布式信息存储和并行处理的特点,神经网络具有联想记忆的能力。联想记忆通过神经元之间的协同结构与信息处理的集体行为来实现,它有两种基本形式:自联想记忆与异联想记忆。

(1) 自联想记忆:输入某个已存储模式的残缺(不完整或被噪声所淹没)信息,系统能