

高等学校规划教材

人工神经网络理论、 设计及应用

——人工神经细胞、人工神经网络和人工神经系统

■ 韩力群 编著



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校规划教材

人工神经网络理论、设计及应用

——人工神经细胞、人工神经网络和人工神经系统

韩力群 编著

化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

(京)新登字 039 号



图书在版编目 (CIP) 数据

人工神经网络理论、设计及应用/韩力群编著. —北京:
化学工业出版社, 2002.1
高等学校规划教材
ISBN 7-5025-3354-0

I. 人… II. 韩… III. 人工神经网络-高等学校-
教材 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 081029 号

高等学校规划教材

人工神经网络理论、设计及应用

——人工神经细胞、人工神经网络和人工神经系统

韩力群 编著

责任编辑: 唐旭华

责任校对: 李 林

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 307 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3354-0/G·907

定 价: 21.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

北京工商大学信息工程学院韩力群教授在多年教学与科研实践基础上撰写的“神经网络理论、设计及应用”一书具有以下特点。

(1) 系统性 系统地阐述了人工神经网络的基本理论、设计方法、实现技术和应用系统。

(2) 实践性 理论联系实际，特别注意方法、技术和应用实例相结合，以便读者学习如何进行分析、设计，解决实际应用问题。

(3) 新颖性 取材新颖，反映了人工神经网络的新进展，并介绍了作者具有创新性的研究成果及应用实践。

(4) 易读性 避免繁琐枯燥的数学推导和定理证明，将简明扼要的数学表达与物理内涵有机地结合起来，既保留了必要的数学推演，又加强了物理意义的论述。深入浅出，详略得当，重点突出，行文流畅。

(5) 适用性 从并行信息处理的角度阐述人工神经网络的原理与算法，所举实例来自神经网络的各种应用。前5章有小结、思考与练习题，便于读者学习和理解。作为学习一种新型信息处理方法的入门教材，适用于各专业、各行业人士学习人工神经网络。

因此，这是一本关于人工神经网络的实用的入门教科书，她的出版将为我国神经网络科学技术的教学、科研及应用作出积极的贡献。

中国人工智能学会理事长

涂序彦

2001年9月6日

前 言

人类具有高度发达的大脑，大脑是人类思维活动的物质基础，而思维是人类智能的集中体现。长期以来，人们想方设法了解人脑的工作机理和思维的本质，向往能构造出具有类人智能的人工智能系统，以模仿人脑功能，完成类似于人脑的工作。人脑的思维有逻辑思维、形象思维和灵感思维三种基本方式。逻辑思维的基础是概念、判断与推理，即将信息抽象为概念，再根据逻辑规则进行逻辑推理。由于概念可用符号表示，而逻辑推理宜按串行模式进行，这一过程可以事先写成串行的指令由机器来完成。可以认为，20世纪40年代问世的第一台电子计算机就是这样一种用机器模拟人脑逻辑思维的人工智能系统，也是人类实现这一追求的重要里程碑。

众所周知，现代计算机构成单元的速度是人脑中神经元速度的几百万倍，对于那些特征明确，推理或运算规则清楚的可编程问题，可以高速有效地求解，在数值运算和逻辑运算方面的精确与高速极大地拓展了人脑的能力，从而在信息处理和决策控制等各方面为人们提供了实现智能化和自动化的先进手段。但由于现有计算机是按照冯·诺依曼原理，基于程序存取进行工作的，历经半个多世纪的发展，其结构模式与运行机制仍然没有跳出传统的逻辑运算规则，因而在很多方面的功能还远不能达到人的智能水平。随着现代信息科学技术的飞速发展，这方面的问题日趋尖锐，促使科学和技术专家们寻找解决问题的新出路。

当人们的思路转向研究大自然造就的精妙的人脑结构模式和信息处理机制时，推动了脑科学的深入发展以及人工神经网络和脑模型的研究。随着对生物脑的深入了解，人工神经网络获得长足发展。在经历了漫长的初创期和低潮期后，人工神经网络终于以其不容忽视的潜力与活力进入了发展高潮。60多年来，它的结构与功能逐步改善，运行机制渐趋成熟，应用领域日益扩大，在解决各行各业的难题中显示出巨大的潜力，取得了丰硕的成果。

正是由于人工神经网络是一门新兴的学科，它在理论、模型、算法、应用和实现等方面都还有很多空白点需要努力探索、研究、开拓和开发。因此，许多国家的政府和企业都投入了大量的资金，组织大量的科学和技术专家对人工神经网络的广泛问题立项研究。从人工神经网络的模拟程序和专用芯片的不断推出、论文的大量发表以及各种应用的报道可以看到，在这个领域里一个百花齐放、百家争鸣的局面已经形成。我国对人工神经网络的研究起步于20世纪70年代末期，20世纪90年代以来发展迅速。目前，人工神经网络已在我国科研、生产和生活中产生了普遍而巨大的影响。

为了适应人工神经网络应用不断深化的形势，大力普及人工神经网络的学科知识，迅速培养应用人工神经网络的技术人才，国内各高校均已在研究生及本科教育阶段开设了人工神经网络课程。近6年来作者为研究生及本科高年级学生讲授“人工神经网络理论与应用”课程，并在多项研究课题中应用人工神经网络，积累了一定的教学与科研实践经验，在教材讲义的基础上撰写成书，为推动人工神经网络技术与知识的普及略尽绵薄之力。本书力图为高等院校电气信息类专业（如计算机、自动化、电气工程、电子信息、信息工程、通信等）的研究生和本科高年级学生以及各类科技人员提供一本系统介绍人工神经网络的基本理论、设计方法及实现技术的通俗易懂的适用教材，以便于读者掌握人工神经网络的基本原理和应用

技术。

为此,在本书编写中特别注意以下几点:①注重物理概念内涵的论述,尽量避免因繁琐的数学推导影响读者的学习兴趣;②加强举例与思考练习,并对选自科技论文的应用实例进行改编、分析与说明,避免将科技论文直接缩写为应用实例;③对常用网络及算法着重介绍其实用设计方法,以便读者通过学习具有独立设计人工神经网络的能力;④在内容的选择和编排上注意到读者初次接触新概念的易接受性和思维的逻辑性,力求深入浅出,通俗易懂。

本书共分10章。第1章对人脑与计算机信息处理能力与机制进行了比较,归纳了人脑生物神经网络的基本特征与功能,介绍了人工神经网络的发展简史及主要应用领域。第2章介绍了人工神经网络的基础知识,包括生物神经元信息处理机制、人工神经元模型、人工神经网络模型以及几种常用学习算法。第3章介绍常用前馈神经网络,重点论述了基于误差反向传播算法的多层前馈网络的拓扑结构、算法原理、设计方法及应用实例。第4章介绍了竞争学习的概念与原理,在此基础上论述了自组织特征映射、对偶传播以及自适应共振等多种自组织神经网络的结构、原理及算法,并重点介绍了自组织特征映射网络的设计与应用。第5章介绍了几种用于联想记忆及优化计算的反馈神经网络,包括离散型与连续型 Hopfield 网络,双向联想记忆网络以及随机神经网络 Boltzmann 机。第6章简要介绍智能控制中常用的局部逼近神经网络——小脑模型控制器。第7章和第8章分别介绍了人工神经网络的软件实现方法和硬件实现技术,其中硬件实现技术部分主要参考了文献 [19] 和 [25]。第9章介绍了人工神经网络的基本概念、体系结构、控制特性、信息模式和应用示例,作为学习人工神经网络的扩充知识。第10章为人工神经网络研究与应用展望,阐述了作者对神经网络领域发展趋势的一些肤浅看法。本书在前5章中每章后面配有思考题或练习题,附录1中给出10种网络的C语言算法源程序,附录2中给出人工神经网络领域常用术语的中英文对照表。

本书由清华大学博士生导师阎平凡教授主审,阎教授在审阅中对本书提出的宝贵意见与建议使本人受益匪浅,在此深表感谢。

作者有幸请到中国人工智能学会理事长涂序彦教授作序,对于涂先生给予的热情指导和鼓励,以及对本书所作的精辟的评述,作者表示衷心感谢。

编者

2001年9月

内 容 提 要

本书系统论述了人工神经网络的主要理论、设计基础及应用实例，旨在使读者了解神经网络的发展背景和研究对象，理解和熟悉它的基本原理和主要应用，掌握它的结构模型和基本应用设计方法，为以后深入研究和应用开发打下基础。为了便于读者理解，本书尽量避免繁琐的数学推导，加强了应用举例，并在内容的选择和编排上注意到读者初次接触新概念的易接受性和思维的逻辑性。通过对本书的学习，读者将对人工神经网络有一个基本了解，能进行初步的应用设计，为以后深入研究和应用开发打下基础。作为扩充知识，本书还介绍了人工神经网络的基本概念、体系结构、控制特性及信息模式。

作者连续6年为电气信息类专业研究生及本科高年级学生开设“人工神经网络理论与应用”课程，在三轮修改讲义和多项科研成果基础上形成此书。本书适合高校电气信息类专业研究生、本科生以及各类科技人员阅读。

TP183

4541

目 录

1 绪论	1
1.1 人工神经网络概述	1
1.1.1 人脑与计算机信息处理能力的比较	1
1.1.2 人脑与计算机信息处理机制的比较	3
1.1.3 什么是人工神经网络	3
1.2 人工神经网络发展简史	4
1.2.1 启蒙时期	5
1.2.2 低潮时期	6
1.2.3 复兴时期	8
1.2.4 新时期	9
1.2.5 国内研究概况	9
1.3 人工神经网络的基本特征与功能	11
1.3.1 神经网络的基本特征	11
1.3.2 神经网络的基本功能	11
1.4 人工神经网络的应用领域	13
1.4.1 信息领域	13
1.4.2 自动化领域	13
1.4.3 工程领域	14
1.4.4 医学领域	14
1.4.5 经济领域	15
1.5 本章小结	15
思考与练习	16
2 人工神经网络基础知识	17
2.1 人工神经网络的生物学基础	17
2.1.1 生物神经元的结构	17
2.1.2 生物神经元的信息处理机理	18
2.2 人工神经元模型	20
2.2.1 神经元的建模	20
2.2.2 神经元的数学模型	21
2.2.3 神经元的转移函数	22
2.3 人工神经网络模型	23
2.3.1 网络拓扑结构类型	23
2.3.2 网络信息流向类型	25
2.4 人工神经网络学习	25
2.4.1 Hebbian 学习规则	27

2.4.2	Perceptron (感知器) 学习规则	29
2.4.3	δ (Delta) 学习规则	29
2.4.4	Widrow-Hoff 学习规则	30
2.4.5	Correlation (相关) 学习规则	31
2.4.6	Winner-Take-All (胜者为王) 学习规则	31
2.4.7	Outstar (外星) 学习规则	31
2.5	本章小结	32
	思考与练习	33
3	前馈神经网络	34
3.1	单层感知器	34
3.1.1	感知器模型	34
3.1.2	感知器的功能	34
3.1.3	感知器的局限性	37
3.1.4	感知器的学习算法	37
3.2	多层感知器	38
3.3	自适应线性单元 (ADALINE) 简介	40
3.3.1	ADALINE 模型	41
3.3.2	ADALINE 学习算法	41
3.3.3	ADALINE 应用	42
3.4	误差反传 (BP) 算法	43
3.4.1	基于 BP 算法的多层前馈网络模型	43
3.4.2	BP 学习算法	44
3.4.3	BP 算法的程序实现	47
3.4.4	多层前馈网络的主要能力	48
3.4.5	误差曲面与 BP 算法的局限性	48
3.5	标准 BP 算法的改进	49
3.5.1	增加动量项	50
3.5.2	自适应调节学习率	50
3.5.3	引入陡度因子	50
3.6	基于 BP 算法的多层前馈网络设计基础	51
3.6.1	网络信息容量与训练样本数	51
3.6.2	训练样本集的准备	51
3.6.3	初始权值的设计	55
3.6.4	多层前馈网络结构设计	55
3.6.5	网络训练与测试	56
3.7	基于 BP 算法的多层前馈网络应用与设计实例	57
3.7.1	基于 BP 算法的多层前馈网络用于催化剂配方建模	57
3.7.2	基于 BP 算法的多层前馈网络用于汽车变速器最佳挡位判定	58
3.7.3	基于 BP 算法的多层前馈网络用于图像压缩编码	58
3.7.4	基于 BP 算法的多层前馈网络用于水库优化调度	59

3.8	本章小结	60
	思考与练习	60
4	自组织神经网络	63
4.1	竞争学习的概念与原理	63
4.1.1	基本概念	63
4.1.2	竞争学习原理	64
4.2	自组织特征映射 (SOM) 神经网络	67
4.2.1	SOM 网络的生物学基础	67
4.2.2	SOM 网络的拓扑结构与权值调整域	67
4.2.3	SOM 网络的运行原理与学习算法	68
4.3	自组织特征映射网络的设计与应用	72
4.3.1	SOM 网络的设计基础	72
4.3.2	SOM 网络的应用与设计实例	74
4.4	对偶传播 (CPN) 神经网络	76
4.4.1	网络结构与运行原理	77
4.4.2	CPN 的学习算法	77
4.4.3	改进的 CPN 网络	79
4.4.4	CPN 网络的应用	80
4.5	自适应共振理论 (ART)	80
4.5.1	ART1 型网络	81
4.5.2	ART2 型网络	87
4.6	本章小结	91
	思考与练习	92
5	反馈神经网络	94
5.1	离散型 Hopfield 神经网络 (DHNN)	94
5.1.1	网络的结构与工作方式	94
5.1.2	网络的稳定性与吸引子	95
5.1.3	网络的权值设计	100
5.1.4	网络的信息存储容量	102
5.2	连续型 Hopfield 神经网络 (CHNN)	103
5.2.1	网络的拓扑结构	103
5.2.2	能量函数与稳定性分析	104
5.3	Hopfield 网络应用与设计实例	105
5.3.1	应用 DHNN 网解决联想问题	105
5.3.2	应用 CHNN 网解决优化计算问题	105
5.4	双向联想记忆 (BAM) 神经网络	108
5.4.1	BAM 网络结构与原理	109
5.4.2	能量函数与稳定性	109
5.4.3	BAM 网络的权值设计	110
5.4.4	BAM 网络的应用	111

5.5	随机神经网络	112
5.5.1	模拟退火原理	113
5.5.2	Boltzmann 机	114
5.6	本章小结	118
	思考与练习	118
6	局部逼近神经网络	120
6.1	CMAC 网络的结构	120
6.2	CMAC 网络的工作原理	121
6.2.1	从 X 到 M 的映射	121
6.2.2	从 M 到 A 的映射	123
6.2.3	从 A 到 A_p 的映射	124
6.2.4	从 A_p 到 F 的映射	124
6.3	CMAC 网络的学习算法	125
6.4	CMAC 网络的应用	125
7	神经网络的系统设计与软件实现	127
7.1	神经网络系统总体设计	127
7.1.1	神经网络的适用范围	127
7.1.2	神经网络的设计过程与需求分析	128
7.1.3	神经网络的性能评价	129
7.1.4	输入数据的预处理	131
7.2	神经网络的软件实现	132
7.2.1	软件运行的若干问题	132
7.2.2	软件实现的若干问题	133
7.3	神经网络的高级开发环境	134
7.3.1	神经网络的开发环境及其特征	134
7.3.2	MATLAB 神经网络工具箱	135
7.3.3	其他神经网络开发环境简介	137
8	神经网络的硬件实现	139
8.1	概述	139
8.1.1	主要研究内容	139
8.1.2	目前状况	139
8.1.3	发展前景	141
8.2	神经元器件	141
8.2.1	模拟式神经元器件	141
8.2.2	数字式神经元器件	142
8.2.3	FPGA 神经元结构	143
8.3	神经网络系统结构	144
8.3.1	总线连接系统结构	144
8.3.2	Systolic 系统结构	144
8.3.3	树流水式系统结构	144

8.3.4	自组织类系统结构	145
8.4	神经网络的光学实现	146
8.4.1	光学技术与神经网络	146
8.4.2	光学逻辑器件	147
8.4.3	光神经网络的研究现状	148
9	人工神经网络	150
9.1	人工神经网络的基本概念	150
9.1.1	生物神经系统	150
9.1.2	人工神经网络	151
9.2	人工神经系统的体系结构	151
9.2.1	高级中枢神经系统	151
9.2.2	低级中枢神经系统	152
9.2.3	外周神经系统	153
9.3	人工神经系统的控制特性	154
9.3.1	神经快速、分区控制系统	154
9.3.2	体液慢速、分工控制系统	154
9.3.3	人体神经控制系统	155
9.4	人工神经网络的信息模式	156
9.4.1	“数字-模拟”混合信息模式	156
9.4.2	“串行-并行”兼容信息模式	156
9.4.3	“集中-分散”结合信息模式	157
9.5	人工神经网络的应用示例	157
9.5.1	拟人智能综合自动化系统	157
9.5.2	人工鱼的总体技术方案	157
10	回顾与展望	160
10.1	人工神经网络研究中的几个问题	160
10.2	人工神经网络研究展望	161
10.2.1	应用研究的新特点——多学科综合	161
10.2.2	实现技术研究的当务之急——神经网络的硬件实现	161
10.2.3	理论研究的新方向——从人工神经网络到人工神经网络	162
	附录 1 常用神经网络源程序	163
	附录 2 神经网络常用术语英汉对照	190
	参考文献	192

1 绪 论

1.1 人工神经网络概述

人类具有高度发达的大脑，大脑是思维活动的物质基础，而思维是人类智能的集中体现。长期以来，人们想方设法了解人脑的工作机理和思维的本质，向往能构造出具有类人智能的人工智能系统，以模仿人脑功能，完成类似于人脑的工作。钱学森先生认为，人脑的思维有逻辑思维、形象思维和灵感思维三种基本方式。逻辑思维的基础是概念、判断与推理，即将信息抽象为概念，再根据逻辑规则进行逻辑推理。由于概念可用符号表示，而逻辑推理宜按串行模式进行，这一过程可以事先写成串行的指令由机器来完成。20世纪40年代问世的第一台电子计算机就是这样一种用机器模拟人脑逻辑思维的人工智能系统，也是人类实现这一追求的重要里程碑。

现代计算机的计算构成单元的速度是人脑中神经元速度的几百万倍，对于那些特征明确，推理或运算规则清楚的可编程问题，可以高速有效地求解，其在数值运算和逻辑运算方面的精确与高速极大地拓展了人脑的能力。但是迄今为止，计算机在解决与形象思维和灵感思维相关的问题时，却显得无能为力。例如人脸识别，骑自行车，打篮球等涉及联想或经验的问题，人脑可以从体会那些只可意会、不可言传的直觉与经验，可以根据情况灵活掌握处理问题的规则，从而轻而易举地完成此类任务，而计算机在这方面则显得十分笨拙。为什么计算机在处理此类问题时表现出来的能力远不及人脑呢？通过以下的比较，不难从中得出答案。

1.1.1 人脑与计算机信息处理能力的比较

电子计算机能够迅速准确地完成各种数值运算和逻辑运算，成为现代社会不可缺少的信息处理工具，被人们誉为“电脑”。人脑本质上是一种信息加工器官，而“电脑”则是人类对自己大脑的某些功能进行模拟而设计的一种信息加工机器。比较人脑与“电脑”的信息处理能力会发现，现有“电脑”和人脑还有很大的差距。

1.1.1.1 记忆与联想能力

人脑有大约 1.4×10^{11} 个神经细胞广泛互连，因而能够存储大量的信息，并具有对信息进行筛选、回忆和巩固的联想记忆能力。人脑不仅能对已学习的知识进行记忆，而且能在外界输入的部分信息刺激下，联想到一系列相关的存储信息，从而实现不完整信息的自联想恢复，或关联信息的互联想，而这种互联想能力在人脑的创造性思维中起着非常重要的作用。

计算机从一问世起就是按冯·诺依曼（Von Neumann）方式工作的。基于冯·诺依曼的计算机是一种基于算法的程序存取式机器，它对程序指令和数据等信息的记忆由存储器完成。存储器内信息的存取采用按顺序寻址的方式。若要从大量存储数据中随机访问某一数据，必须先确定数据的存储单元地址，再取出相应数据。信息一旦存入便保持不变，因此不存在遗忘问题；在某存储单元地址存入新的信息后会覆盖原有信息，因此不可能对其进行回忆；相邻存储单元之间互不相干，“老死不相往来”，因此没有联想能力。

尽管关系数据库或联想汉卡等由软件设计实现的系统也具有一定的联想功能，但这种联想功能不是计算机的信息存储机制所固有的，其联想能力与联想范围取决于程序的查询能力，因此不可能像人脑的联想功能那样具有个性、不确定性和创造性。

1.1.1.2 学习与认知能力

人脑具有从实践中不断汲取知识、总结经验的能力。刚出生的婴儿脑中几乎是一片空白，在成长过程中通过对外界环境的感知及有意识的训练，知识和经验与日俱增，解决问题的能力越来越强。人脑这种对经验作出反映而改变行为的能力就是学习与认知能力。

计算机所完成的所有工作都是严格按照事先编制的程序进行的，因此它的功能和结果都是确定不变的。作为一种只能被动地执行确定的二值命令的机器，计算机在反复按指令执行同一程序时得到的永远是同样的结果，它不可能在不断重复的过程中总结或积累任何经验，因此不会主动提高自己解决问题的能力。

1.1.1.3 信息加工能力

在信息处理方面，人脑具有复杂的回忆、联想和想像等非逻辑加工功能，因而人的认识可以逾越现实条件下逻辑所无法越过的认识屏障，产生诸如直觉判断或灵感一类的思维活动。在信息的逻辑加工方面，人脑的功能不仅局限于计算机所擅长的数值或逻辑运算，而且可以上升到具有语言文字的符号思维和辩证思维。人脑具有的这种高层次的逻辑加工能力使人能够深入事物内部去认识事物的本质与规律。

计算机没有非逻辑加工功能，因而不会逾越有限条件下逻辑的认识屏障。计算机的逻辑加工能力也仅限于二值逻辑，因此只能在二值逻辑所能描述的范围内运用形式逻辑，而缺乏辩证逻辑能力。

1.1.1.4 信息综合能力

人脑善于对客观世界丰富多样的信息和知识进行归纳、类比和概括，综合起来解决问题。人脑的这种综合判断过程往往是一种对信息的逻辑加工和非逻辑加工相结合的过程。它不仅遵循确定性的逻辑思维原则，而且可以经验地、模糊地甚至是直觉地做出一个判断。大脑所具有的这种综合判断能力是人脑创造能力的基础。

计算机的信息综合能力取决于它所执行的程序。由于不存在能完全描述人的经验和直觉的数学模型，也不存在能完全正确模拟人脑综合判断过程的有效算法，因此计算机难以达到人脑所具有的融会贯通的信息综合能力。

1.1.1.5 信息处理速度

人脑的信息处理是建立在大规模并行处理基础上的，这种并行处理所能够实现的高度复杂的信息处理能力远非传统的以空间复杂性代替时间复杂性的多处理机并行处理系统所能达到的。人脑中的信息处理是以神经细胞为单位，而神经细胞间信息的传递速度只能达到毫秒级，显然比现代计算机中电子元件纳秒级的计算速度慢得多，因此似乎计算机的信息处理速度要远高于人脑，事实上在数值处理等只需串行算法就能解决问题的应用方面确实是如此。然而迄今为止，计算机处理文字、图像、声音等类信息的能力与速度却远远不如人脑。例如，几个月大的婴儿能从人群中一眼认出自己的母亲，而计算机解决这个问题时需要在一幅具有几十万像素点的图像逐点进行处理，并提取光谱特征进行识别。又如，一个篮球运动员可以不假思索地接住队友传给他的球，而让计算机控制机器人接球则要判断篮球每一时刻在三维空间的位置坐标、运动轨迹、运动方向及速度等等。显然，在基于形象思维、经验与直觉的判断方面，人脑只要零点几秒就可以圆满完成任务，计算机花几十分钟甚至几小时

也不一定达到人脑的水平。

1.1.2 人脑与计算机信息处理机制的比较

人脑与计算机信息处理能力特别是形象思维能力的差异来源于两者系统结构和信息处理机制的不同，主要表现在以下 4 个方面。

1.1.2.1 系统结构

人脑在漫长的进化过程中形成了规模宏大，结构精细的群体结构，即神经网络。脑科学研究结果表明，人脑的神经网络是由数百亿神经元相互连接组合而成的。每个神经元相当于一个超微型信息处理与存储机构，只能完成一种基本功能，如兴奋与抑制。而大量神经元广泛连接后形成的神经网络可进行各种极其复杂的思维活动。

计算机是一种由各种二值逻辑门电路构成的按串行方式工作的逻辑机器，它由运算器、控制器、存储器和输入/输出设备组成。其信息处理是建立在冯·诺依曼体系基础上，基于程序存取进行工作的。

1.1.2.2 信号形式

人脑中的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，这类信息处理方式不可能都用数学方法进行充分描述，因而很难用计算机进行模拟。

计算机中信息的表达采用离散的二进制数和二值逻辑形式，二值逻辑必须用确定的逻辑表达式来表示。许多逻辑关系确定的信息加工过程可以分解为若干二值逻辑表达式，由计算机来完成。然而，客观世界存在的事物关系并非都是可以分解为二值逻辑的关系，还存在着各种模糊逻辑关系和非逻辑关系。对这类信息的处理计算机是难以胜任的。

1.1.2.3 信息存储

与计算机不同的是，人脑中的信息不是集中存储于一个特定的区域，而是分布存储于整个系统中。此外，人脑中存储的信息不是相互孤立的，而是联想式的。人脑这种分布式联想式的信息存储方式使人类非常擅长于从失真和缺省的模式中恢复出正确的模式，或利用给定信息寻找期望信息。

1.1.2.4 信息处理机制

人脑中的神经网络是一种高度并行的非线性信息处理系统。其并行性不仅体现在结构上和 Information 存储上，而且体现在信息处理的运行过程中。由于人脑采用了信息存储与信息处理一体化的群体协同并行处理方式，信息的处理受原有存储信息的影响，处理后的信息又牢记在神经元中成为记忆。这种信息处理↔存储的构建模式是广泛分布在大量神经元上同时进行的，因而呈现出来的整体信息处理能力不仅能快速完成各种极复杂的信息识别和处理任务，而且能产生高度复杂而奇妙的效果。

计算机采用的是有限集中的串行信息处理机制，即所有信息处理都集中在一个或几个 CPU 中进行。CPU 通过总线同内外存储器或 I/O 接口进行顺序的“个别对话”，存取指令或数据。这种机制的时间利用率很低，在处理大量实时信息时不可避免地会遇到速度“瓶颈”。即使采用多 CPU 并行工作，也只是在一定发展水平上缓解瓶颈矛盾。

1.1.3 什么是人工神经网络

综上所述，计算机在解决具有形象思维特点的问题时难以胜任的根本原因在于，计算机与人脑采取的信息处理机制完全不同。

迄今为止的各代计算机都是基于冯·诺依曼工作原理：其信息存储与处理是分开的，即

存储器与处理器相互独立；处理的信息必须是形式化信息，即用二进制编码定义的文字、符号、数字、指令和各种规范化的数据格式、命令格式等等；而信息处理的方式必须是串行的，即 CPU 不断地重复取址、译码、执行、存储这四个步骤。这种计算机的结构和串行工作方式决定了它只擅长于数值和逻辑运算。

布满在人类大脑皮层上的神经细胞亦称为神经元。每个神经元有数以千计的通道同其他神经元广泛相互连接，形成复杂的生物神经网络。生物神经网络以神经元为基本信息处理单元，对信息进行分布式存储与加工，这种信息加工与存储相结合的群体协同工作方式使得人脑呈现出目前计算机无法模拟的神奇智能。为了进一步模拟人脑的形象思维方式，人们不得不跳出冯·诺依曼计算机的框架另辟蹊径。而从模拟人脑生物神经网络的信息存储和加工处理机制入手，设计具有人类思维特点的智能机器，无疑是最有希望的途径之一。

用计算方法对神经网络信息处理规律进行探索称为计算神经科学，该方法对于阐明人脑的工作原理具有深远意义。人脑的信息处理机制是在漫长的进化过程中形成和完善的。虽然近年来，在细胞和分子水平上对脑结构和脑功能的研究已经有了长足的发展。然而到目前为止，人类对神经系统内如何利用电信号和化学信号来处理信息只有模糊的概念。尽管如此，把分子和细胞技术所达到的微观层次与行为研究所达到的系统层次结合起来，可以形成对人脑神经网络的基本认识。在此基本认识的基础上，以数学和物理方法以及信息处理的角度对人脑神经网络进行抽象，并建立某种简化模型，就称为人工神经网络（Artificial Neural Network，缩写 ANN）。人工神经网络远不是人脑生物神经网络的真实写照，而只是对它的简化、抽象与模拟。揭示人脑的奥妙不仅需要各学科的交叉和各领域专家的协作，还需要测试手段的进一步发展。目前已提出上百种人工神经网络模型。令人欣慰的是，这些简化模型的确能反映出人脑的许多基本特性。它们在模式识别、系统辨识、信号处理、自动控制、组合优化、预测预估、故障诊断、医学与经济学等领域已成功地解决了许多现代计算机难以解决的实际问题，表现出良好的智能特性和潜在的应用前景。

目前关于人工神经网络的定义尚不统一，例如，美国神经网络学家 Hecht Nielsen 关于人工神经网络的一般定义是：“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。”美国国防高级研究计划局关于人工神经网络的解释是：“人工神经网络是一种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、连接强度以及各单元的处理方式。”综合人工神经网络的来源、特点及各种解释，可以简单表述为：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。为叙述简便，后面常将人工神经网络简称为神经网络。

1.2 人工神经网络发展简史

神经网络的研究可追溯到 19 世纪末期，其发展历史可分为四个时期。第一个时期为启蒙时期，开始于 1890 年美国著名心理学家 W. James 关于人脑结构与功能的研究，结束于 1969 年 Minsky 和 Papert 发表《感知器》(Perceptron) 一书。第二个时期为低潮时期，开始于 1969 年，结束于 1982 年 Hopfield 发表著名的文章“神经网络和物理系统”(Neural Network and Physical System)。第三个时期为复兴时期，开始于 J. J. Hopfield 的突破性研究论文，结束于 1986 年 D. E. Rumelhart 和 J. L. McClelland 领导的研究小组发表的《并行分布式处理》(Parallel Distributed Processing) 一书。第四个时期为高潮时期，以 1987 年首届国

际人工神经网络学术会议为开端，迅速在全世界范围内掀起人工神经网络的研究应用热潮，至今势头不衰。

下面按年代顺序介绍对人工神经网络研究有重大贡献的学者及其著作，以使读者在了解神经网络的发展历史时看到它与神经生理学、数学、电子学、计算机科学以及人工智能学科之间的千丝万缕的联系，同时也使读者对神经网络的某些概念有粗略的了解。

1.2.1 启蒙时期

1890年，美国心理学家 William James 发表了第一部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。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，其中一个受刺激重新激活时会将刺激传播到另一个。”这一点与联想记忆和相关学习关系最密切。另外，他曾预言神经细胞激活是细胞所有输入叠加的结果。他认为，在大脑皮层上任意点的刺激量是其他所有发射点进入该点刺激的总和。

半个世纪后，生理学家 W.S.McCulloch 和数学家 W.A.Pitts 于 1943 年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的角度出发，提出形式神经元的数学模型，称为 M-P 模型。该模型把神经细胞的动作描述为：
 ①神经元的活动表现为兴奋或抑制的二值变化；
 ②任何兴奋性突触有输入激励后，使神经元兴奋，与神经元先前的动作与状态无关；
 ③任何抑制性突触有输入激励后，使神经元抑制；
 ④突触的值不随时间改变；
 ⑤突触从感知输入到传送出一个输出脉冲的延迟时间是 0.5ms。
 尽管现在看来 M-P 模型过于简单，而且其观点也并非完全正确，但其理论贡献在于：
 ① McCulloch 和 Pitts 证明了任何有限逻辑表达式都能由 M-P 模型组成的人工神经网络来实现；
 ②他们是从 W.James 以来采用大规模并行计算结构描述神经元和网络的最早学者；
 ③他们的工作奠定了网络模型和以后开发神经网络步骤的基础。为此，M-P 模型被认为开创了神经科学理论研究的新时代。

启蒙时期的另一位重要学者是心理学家 Donal O.Hebb，他在 1949 年出版了一本名为《行为构成》(Organization of Behavior) 的书。在该书中他首先建立了人们现在称为 Hebb 算法的连接权训练算法。他也是首先提出“连接主义”(Connectionism) 这一名词的人之一，这一名词的含义为大脑的活动是靠脑细胞的组合连接实现的。Hebb 认为，如果源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。这就是最早且最著名的 Hebb 训练算法的生理学基础。Hebb 对神经网络理论作出的四点主要贡献是：
 ①指出在神经网络中，信息存储在连接权中；
 ②假设连接权的学习(训练)速率正比于神经元各活化值之积；
 ③假定连接是对称的，也就是从神经元 A 到神经元 B 的连接权与从 B 到 A 的连接权是相同的(虽然这一点在神经网络中未免过于简单化，但它往往应用到神经网络的各种实现方案中)；
 ④提出细胞连接的假设，并指出当学习训练时，连接权的强度和类型发生变化，且由这种变化建立起细胞间的连接。Hebb 提出的这四点看法，在当今的人工神经网络中至少在某种程度上都得到了实现。

1958 年计算机学家 Frank Rosenblatt 发表一篇有名的文章，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)。这或许是世界上第一个真正优秀的人工神经网络，这一神经网络是用一台 IBM704 计算机模拟实现的。从模拟结果可以看出，感知器具有通过学习改变连接权值，将类似的或不同的模式进行正确分类的能力，因此也称它为“学习的机器”。Rosenblatt 用感知器来模拟一个生物视觉模型，输入节点群由视网膜上