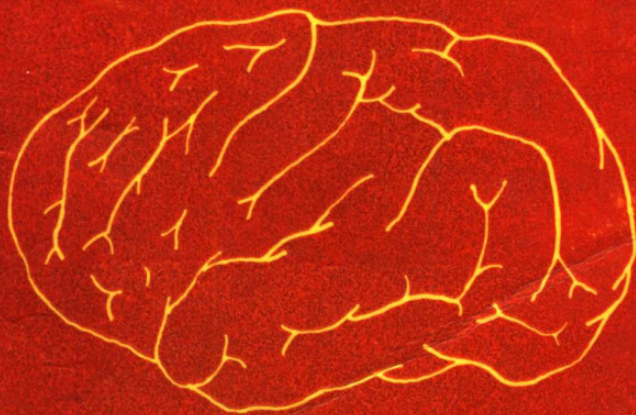


# 人工神经网络

● 杨行峻

● 郑君里

RENGONG SHENJING WANGLUO



高等教育出版社

# 人工神经网络

杨行峻 郑君里

高等教育出版社

(京) 112号

## 内 容 简 介

本书是为适应80年代中期兴起的高科技交叉学科人工神经网络的发展而撰写的研究生教材。

全书以人工神经网络在电路与系统、信号处理、通信等学科的应用为背景,介绍人工神经网络的构成原理、实现方法和研究方向。全书共八章:一、绪论,二、前向多层人工神经网络,三、Hopfield人工神经网络,四、按照自适应谐振理论构成的自组织神经网络,五、自组织特征映射与联想记忆,六、波尔兹曼机,七、用统计方法研究Hopfield神经网络的记忆容量,八、人工神经网络的实现。每章末附有详细的参考文献,书末附有索引。本书是作者在为研究生讲授“人工神经网络”课程讲义的基础上,综合吸收国内外最新有关资料,并结合自己近年来的研究成果写成的。全书取材恰当,注重实例分析,论述严谨,文字流畅,深入浅出,可作为相应学科的硕士、博士生教材,也可供有关科研人员自学和参考。

责任编辑 楼史进

## 人工神经网络

杨行峻 邵君里

高等教育出版社出版发行  
各地新华书店经销  
河北省香河县印刷厂印装

开本850×1168 1/32 印张13 字数33000  
1992年9月第1版 1992年9月第1次印刷

印数 0 001—2 360

ISBN7-04-003949-4/TM·207

定价 8.15 元

## 前 言

本书是为电路与系统、信号处理和通信等学科相应专业的硕士、博士研究生学习“人工神经网络”课程而编写的教材，也可供科学研究人员在开展这一新领域的工作时自学或参考。80年代中期，人工神经网络的研究热潮在世界各地兴起。我们注意到这是一个极其重要的研究方向，在我国开展这一领域的研究工作势在必行。我校一些研究生在论文工作中涉及到与此领域有关的问题，他们对此也产生了强烈的兴趣。在研究生教学改革与课程更新新的挑战面前，迫切需要早日开设人工神经网络课程。在此背景下，1989年春季学期，我们为清华大学电类各系及其它兄弟系有关专业的硕士、博士研究生开出了人工神经网络课程，此后，陆续讲授三届。在授课过程中遇到的最大困难是这方面的文献资料相当分散，国内外都缺乏适当的教材或专著。三年来的教学实践和一些研究工作的开展，为我们克服这一困难创造了条件。随着教学内容的相对稳定，并考虑到兄弟院校和社会上的强烈需求，我们将此课程的讲稿整理、扩充，写成本书。

“人工神经网络”是用非常大量的简单计算-处理单元（即神经元）构成的非线性系统，它具有学习能力、记忆能力、计算能力以及各种智能处理功能，它在不同程度和层次上模仿人脑神经系统的信息处理、存储及检索功能。利用它完成各项信号处理或人工智能任务时在许多方面可以胜过普通的 Von Neumann 计算机。

人工神经网络是一门新兴的交叉科学。不同领域的科学家对此有着不同的理解，不同的研究内容并且采取不同的研究方法。对于从事电路与系统、信号处理、通信等领域的研究人员，侧重于利用人工神经网络来解决各项特定的智能处理任务，诸如识

别、分类、联想、优化、推理以及发现规律等等。本书的研究内容局限于此。

由于人工神经网络的研究正处于迅速发展阶段，在研究思路、数学方法、处理对象以及结构和硬件构成等方面存在着种种差异很大的学说和流派，相应的文献与资料数量迅速增加。因此，要将这一领域的主要研究内容和方法扼要、完整地整理出来呈现给读者，必然有很大困难。按照我们的管窥之见，有选择地介绍三种重要的研究途径。第一种是按照物理模型构成的神经网络，其中包括采用非概率神经元模型的 Hopfield 神经网络和采用概率神经元模型的波尔兹曼机神经网络。第二种是以自适应信号处理理论为基础发展起来的，其中最著名的就是前向多层神经网络及其逆推 (BP) 学习算法。第三种是按照自组织原则构成的神经网络，其中有代表性的是自适应谐振理论 (ART) 神经网络和 T. Kohonen 提出的自组织特征映射神经网络。这三种途径各有其优缺点。从算法的系统性及完整性看，第一、二种优于第三种。而从模仿人的认知过程和智能处理功能看，后者又优于前者。从立即导向一种实用系统而言，第二种相对困难较少。

本书就是围绕这三种途径组织的。此外，还详细讨论了人工神经网络实现的可能性以及目前广泛采用的各种实现方法，其中包括硬件制作、利用 Von Neumann 计算机模拟和“虚拟”的硬件实现方法。在理论方面，我们力图做到由浅入深，循序渐进。在实践方面则注重给出典型的应用实例和分析模拟或实验结果。书中的许多内容涉及近年来期刊与会议的文献，为便于读者深入研究，我们尽可能注明出处。在那里，还可找到由于篇幅所限或我们暂难理解而未能写入本书的某些较深入的内容。必须指出，除本书已涉及的一些内容之外，有必要提醒读者关注下列研究课题，它们正在日益引起人们的重视：

- 在人工神经网络研究中采用模糊算法，构成模糊人工神经网络。

- 用混沌 (chaos) 理论研究人工神经网络。
- 加强与其它有关学科的交叉, 特别是心理学、神经生理学、生物化学与生物物理学、认知科学、计算复杂性理论以及人工智能科学等等。
- 人工神经网络的可编程问题。
- 利用分子器件实现人工神经网络。

我们期望, 本书能够帮助读者较快地进入人工神经网络研究领域。然而, 还需指出, 当前人工神经网络的研究遇到两方面的困难。从研究方法来看, 目前尚未形成系统、完整的理论体系, 缺乏宏观的理论指导。另一方面, 为使人工神经网络付诸实用, 迫切需要硬件制作技术有重大突破, 为达此目的, 还有大量而艰巨的工作需要完成。

当前, 在人工神经网络研究领域中所采用的符号尚无统一规定, 国内和国外都没有制定这方面的标准。本书中的符号力求与目前大多数文献的习惯一致, 并尽可能做到全书统一。对于某些描述神经网络的电路模型往往难以将神经网络的惯用符号与电路符号标准统一, 在不能兼顾两方面的要求时, 遵从前者的习惯。

本书第一、三、八章由郑君里执笔, 第二、四、五、六、七章由杨行峻执笔。全书承北京理工大学柯有安教授审阅, 提出许多宝贵意见, 我们在此表示衷心的感谢。

在本书即将付梓之际, 传来了我们的老师常邈教授病逝的消息, 这使我们非常悲痛。他始终关怀本书的编写并给予很多指导和帮助, 我们在此难以用文字表达深切的缅怀与哀思。

吴佑寿教授、陆大维教授和冯重熙教授鼓励和支持我们的工作, 朱雪龙教授和我们一起授课、制订讲课提纲并为本书的编写提供了许多重要资料, 肖达川教授、江缉光教授、边肇祺教授、阎平凡教授、李衍达教授都曾给予我们热情的帮助, 在此一并致谢。此外, 还要感谢我们的众多学生, 在讲课、讨论过程的相互切磋之中或在指导他们的研究工作时, 我们都得到过许多重要的启示

和幫助。

最后，恩請讀者對本書不足之處批評指正。

鄭君里 楊行峻

1991年8月於清華大學電子工程系

(原無線電電子學系)

别、分类、联想、优化、推理以及发现规律等等。本书的研究内容局限于此。

由于人工神经网络的研究正处于迅速发展阶段，在研究思路、数学方法、处理对象以及结构和硬件构成等方面存在着种种差异很大的学说和流派，相应的文献与资料数量迅速增加。因此，要将这一领域的主要研究内容和方法扼要、完整地整理出来呈现给读者，必然有很大困难。按照我们的管窥之见，有选择地介绍三种重要的研究途径。第一种是按照物理模型构成的神经网络，其中包括采用非概率神经元模型的 Hopfield 神经网络和采用概率神经元模型的波尔兹曼机神经网络。第二种是以自适应信号处理理论为基础发展起来的，其中最著名的就是前向多层神经网络及其逆推 (BP) 学习算法。第三种是按照自组织原则构成的神经网络，其中有代表性的是自适应谐振理论 (ART) 神经网络和 T. Kohonen 提出的自组织特征映射神经网络。这三种途径各有其优缺点。从算法的系统性及完整性看，第一、二种优于第三种。而从模仿人的认知过程和智能处理功能看，后者又优于前者。从立即导向一种实用系统而言，第二种相对困难较少。

本书就是围绕这三种途径组织的。此外，还详细讨论了人工神经网络实现的可能性以及目前广泛采用的各种实现方法，其中包括硬件制作、利用 Von Neumann 计算机模拟和“虚拟”的硬件实现方法。在理论方面，我们力图做到由浅入深，循序渐进。在实践方面则注重给出典型的应用实例和分析模拟或实验结果。书中的许多内容涉及近年来期刊与会议的文献，为便于读者深入研究，我们尽可能注明出处。在那里，还可找到由于篇幅所限或我们暂难理解而未能写入本书的某些较深入的内容。必须指出，除本书已涉及的一些内容之外，有必要提醒读者关注下列研究课题，它们正在日益引起人们的重视：

- 在人工神经网络研究中采用模糊算法，构成模糊人工神经网络。



# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 从人脑神经元到人工神经元 .....	4
1.3 人工神经网络研究的发展简史 .....	7
1.4 人工神经网络构成的基本原理 .....	10
1.5 人工神经网络的基本功能 .....	20
1.6 人工神经网络的研究内容及其前景 .....	23
参考文献.....	25
<b>第二章 前向多层人工神经网络</b> .....	26
2.1 概述 .....	26
2.2 采用硬限幅函数时单个神经元的分类功能 .....	31
2.3 采用线性函数时单个神经元的最小二乘 (LMS) 分类学习算法 .....	36
2.4 采用硬限幅函数的前向多层神经网络和采用线性函数的 前向多层神经网络 .....	46
2.5 采用S形函数的前向多层神经网络及其逆推学习算法 .....	54
2.6 按照逆推学习算法进行训练时的模拟试验实例 .....	63
2.7 前向多层神经网络的实际应用 .....	70
2.8 结束语 .....	86
参考文献.....	89
<b>第三章 Hopfield 人工神经网络</b> .....	91
3.1 概述 .....	91
3.2 Hopfield 人工神经网络电路模型及其能量函数.....	92
3.3 Hopfield 人工神经网络用于求解 TSP .....	98
3.4 对 Hopfield 求解 TSP 工作的评价 .....	106
3.5 Tank 与 Hopfield 人工神经网络 A/D 变换器 .....	110
3.6 Hopfield 人工神经网络用于求解线性规划问题 .....	115
3.7 Hopfield 人工神经网络用于求解货流问题 .....	119

3.8	Hopfield 人工神经网络用于联想记忆 .....	125
3.9	稳定性与吸引子 .....	129
3.10	异联想记忆(双向联想记忆) .....	141
3.11	用高阶关联神经元函数构成的 Hopfield 网络 .....	146
3.12	结束语 .....	150
	参考文献 .....	151
<b>第四章</b>	<b>按照自适应谐振理论 (ART) 构成的</b>	
	<b>自组织神经网络 .....</b>	<b>153</b>
4.1	概述 .....	153
4.2	竞争学习机制和自稳学习机制 .....	155
4.3	ART-1 神经网络 .....	162
4.4	ART-2 神经网络 .....	168
4.5	ART 神经网络的识别、补充和撤销功能及其在图形识别、 语音识别及语音生成中的应用 .....	184
4.6	ART-3 神经网络 .....	206
4.7	结束语 .....	222
	参考文献 .....	223
<b>第五章</b>	<b>自组织特征映射与联想记忆 .....</b>	<b>225</b>
5.1	概述 .....	225
5.2	单神经元的自组织特征映射学习算法 .....	239
5.3	具有确定“侧反馈”特性时多神经元阵列的 自组织特征映射 .....	249
5.4	自组织学习能够产生有序特征映射的证明 .....	266
5.5	自组织特征映射人工神经网络与模式识别和 矢量量化 (VQ) 的联系 .....	277
5.6	应用举例——神经网络语音打字机 .....	280
5.7	结束语 .....	286
	参考文献 .....	287
<b>第六章</b>	<b>波尔兹曼机 (BM) .....</b>	<b>289</b>
6.1	概述 .....	289
6.2	波尔兹曼机的基本原理; 搜索机制及模拟退火的应用 .....	292
6.3	BM 神经网络的学习算法 .....	299

6.4	波尔兹曼机的模拟实验研究 .....	310
6.5	部分损伤对 BM 神经网络的影响及再学习 .....	319
6.6	BM 神经网络应用举例——在语音识别中的应用 .....	326
6.7	结束语 .....	334
	参考文献 .....	335
<b>第七章</b>	<b>用统计方法研究 Hopfield 神经网络的记忆容量 .....</b>	<b>336</b>
7.1	概述 .....	336
7.2	Hopfield 神经网络的一些基本定义和算法 .....	337
7.3	容量计算的准备定理 .....	340
7.4	Hopfield 神经网络在同步情况下的运行错误概率 .....	344
7.5	Hopfield 神经网络在同步运行情况下的容量 .....	348
7.6	Hopfield 神经网络在非同步运行情况下的容量 .....	353
7.7	结束语 .....	358
	参考文献 .....	359
<b>第八章</b>	<b>人工神经网络的实现 .....</b>	<b>361</b>
8.1	概述 .....	361
8.2	模拟 VLSI 人工神经网络电路 .....	364
8.3	利用数字系统实现人工神经网络的一般方法 .....	375
8.4	利用 Transputer 实现人工神经网络 .....	378
8.5	利用 Systolic 阵列实现人工神经网络 .....	383
8.6	利用光学器件实现人工神经网络 .....	389
8.7	结束语 .....	393
	参考文献 .....	396
<b>索引</b>	<b>.....</b>	<b>399</b>

# 第一章 绪 论

## 1.1 引 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、哲学、信息与计算机科学、认知学等各个角度试图认识并解答这些问题。在寻求这些答案的研究过程中,近年来逐渐形成了一个新兴的多学科交叉技术领域,人们称之为“神经网络”。神经网络的研究涉及众多学科领域,这些学科相互结合、相互渗透和相互推动。而不同领域的科学家又从各自学科的兴趣与特色出发,提出不同的问题,从不同的角度着手研究。

心理学家和认知科学家研究神经网络的目的在于探索人脑加工、储存和搜索信息的机制,弄清人脑功能的机理,建立人类认知过程的微结构理论。

生物学、医学、脑科学专家试图通过神经网络的研究推动脑科学向定量、精确和理论的系统化发展,或许也寄希望于临床医学的新突破。

信息处理与计算机科学家研究这一问题的目的在于寻求新的途径以解决目前计算机不能解决或不善于解决的大量问题,构作更加逼近人脑功能的新一代计算机模型。以此为背景,人们常常在“神经网络”名词之前冠以“人工”两字,于是出现了“人工神经网络”(artificial neural network)研究领域。

人工神经网络是由大量简单的基本元件——神经元(neuron)相互连接而成的自适应非线性动态系统。每个神经元的结构和功

能比较简单，而大量神经元组合产生的系统行为却非常复杂。系统模型可用软件描述（数学方程、算法、程序），而最终目标是以硬件实现（用半导体器件、光学器件或分子器件）。

人工神经网络反映了人脑功能的若干基本特性，但是并非生物系统的逼真描述，只是某种模仿、简化和抽象。

虽然，人工神经网络应属神经网络研究的一个重要组成部分，而习惯上这两个名词通用。也可称它们为“（人工）神经元网络（或系统）”。

与目前广泛应用的数字计算机相比较，人工神经网络在构成原理和功能特点等方面更加接近人脑，它不是按给定的程序一步一步地执行运算，而是能够自身适应环境、总结规律、完成某种运算、识别或过程控制。因而，有人称前者为指令程序式计算机或算法计算机；而后者为非程序化的自适应信息处理机或非算法计算机。前者是串行处理的离散系统；后者是并行分布处理（parallel distributed processing简称为PDP）系统，而且往往是连续与离散（模拟与数字）混合系统。通常，前者以其发明者命名，称为冯·诺依曼（Von Neumann）机；而称后者为神经网络计算机（Neurocomputer）或第六代计算机。这些名称目前尚无严格的统一规定。此外，也有人认为人工神经网络属于联接机（connection machine）或自动机网络（automata network）类型的计算系统。

人工神经网络的应用主要在以下三个方面：信号处理与模式识别（如手写体字符识别）；知识处理工程或专家系统（如医疗诊断或市场估计）；运动过程控制（如机器人的手眼协调自适应控制）。这些应用实例的共同特点是：难以用算法来描述待处理的问题，存在大量的范例可供学习。实际上，自然界提供给我们的信息处理问题可分为两大类型：结构性问题和非结构性问题。前者如数字计算或方程求解，这正是冯·诺依曼计算机善于解决的问题。后者如语言或图形识别，人们无法把自己的认识翻译成

严密的机器指令，因而难以用冯·诺依曼机获得满意的效果。神经网络计算机在处理非结构性问题方面显示了突出的优点。算法计算机和非算法计算机有着各自的长处和适当的应用领域，目前两者还不能相互取代。正是由于在信息处理的若干应用领域中利用冯·诺依曼计算机遇到不少困难，而人工神经网络为解决这些问题提供了一条具有潜力的新途径，因而引起人们的巨大兴趣。

自80年代中期以来，世界上许多国家都掀起了神经网络的研究热潮。1985年开始，专门研究神经网络的学术会议规模逐步扩大，1987年在美国召开了第一届神经网络国际会议，并发起成立国际神经网络学会 (INNS)。1989年在华盛顿召开第三届 IEEE 国际神经网络会议，与会者近千人，倡导这次会议的有 IEEE 的 11 个学会 (占 IEEE 学会总数的  $1/3$ )。各国政府为神经网络研究投入的资金和人力迅速增长。出版了几种专门的学术刊物。相应的协会、研究中心和风险公司纷纷成立，某些公司的研究成果有商品广告报导。

当前，人工神经网络的研究内容十分广泛，如各种网络模型的构造，它们的原理性能分析，在各个领域的应用实例，硬件实现或应用软件开发等等。虽然，前已述及在利用神经网络求解问题时不依赖于算法程序，而神经网络的结构模型仍可利用算法描述，网络结构的研究工作仍借助冯·诺依曼机进行，这是目前人工神经网络研究的重要特点。这样做，虽不能完全显示神经网络的优点，但在论证网络结构原理、性能方面却比较方便，而且可以直接提供某些应用。形成这种局面的原因之一是人工神经网络的硬件实现遇到不少困难。做为一种过渡，可以对一般的冯·诺依曼机接入一些附属的加速板或利用一些并行处理技术使其更适于神经网络的运算，便于直接付诸应用。这是目前人工神经网络研究的一个重要内容，也是商品竞争的主要方面。

## 1.2 从人脑神经元到人工神经元

人工神经元的研究源于脑神经元学说。19世纪末，在生物、生理学领域，Waldeger 等人创建了神经元学说。人们开始认识到，复杂的神经系统是由数目繁多的神经元组合而成。大脑皮层神经元的数目在  $10^{10} \sim 10^{11}$  量级，每立方毫米内约有数万个。神经元的类型有多种，它的基本结构如图 1-1 所示。

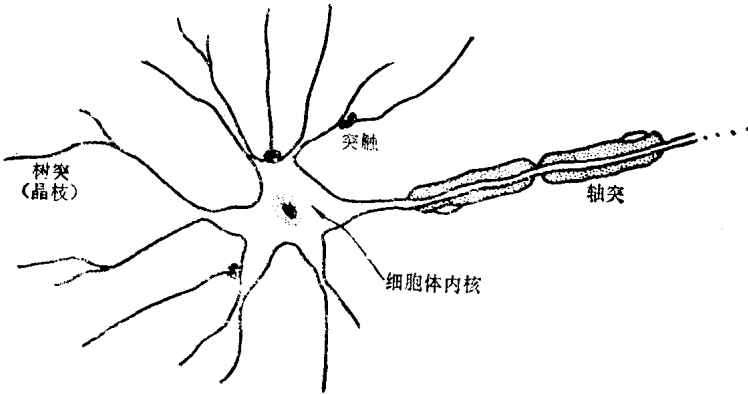


图 1-1 神经元结构示意图

神经元由细胞体及其发出的许多突起构成。细胞体内有细胞核，突起的作用是传递信息。作为引入输入信号的若干个突起称为“树突”或“晶枝” (dendrite)，而作为输出端的突起只有一个称为“轴突” (axon)。

树突是细胞体的延伸部，它由细胞体发出后逐渐变细，全长各部位都可与其它神经元的轴突末梢相互连系，形成所谓“突触” (synapse)。在突触处两神经元并未连通，它只是发生信息传递功能的结合部。联系界面之间隙约为  $(15 \sim 50) \times 10^{-9} \text{m}$ 。突触可分为兴奋性与抑制性两种类型，它相应于神经元之间耦合的极性。每个神经元的突触数目不等，最高可达  $10^5$  个。各神经元之间的连接强度和极性有所不同，并且都可调整，基于这一

特性，人脑具有存储信息的功能。

对于这样一种多输入、单输出的基本单元可以进一步从生物化学、电生物学、数学等方面给出描述其功能的模型。从信息处理观点考察，为神经元构造了各种形式的数学模型。下面初步介绍经典的 McCulloch-Pitts 模型。图

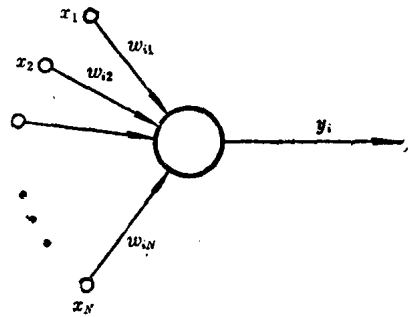


图 1-2 McCulloch-Pitts 模型示意结构

1-2 给出这种模型的示意结构。对于第  $i$  个神经元，接受多个其它神经元的输入信号  $x_j$ 。各突触强度以实系数  $w_{ij}$  表示，这是第  $j$  个神经元对第  $i$  个神经元作用的加权值。利用某种运算把输入信号的作用结合起来，给出它们的总效果，称为“净输入”，以  $Net_i$  或  $I_i$  表示。净输入表达式有多种类型，其中最简单的一种形式是线性加权求和，即  $Net_i = \sum w_{ij}x_j$ 。此作用引起神经元  $i$  的状态变化，而神经元  $i$  的输出  $y_i$  是其当前状态的函数。

McCulloch-Pitts 模型的数学表达式为

$$y_i = \text{sgn} \left( \sum_j w_{ij} x_j - \theta_i \right) \quad (1-1)$$

式中， $\theta_i$  为阈值， $\text{sgn}$  是符号函数，当净输入超过阈值时， $y_i$  取 +1 输出，反之为 -1 输出。如果考虑输出与输入的延时作用，表达式可修正为

$$y_i(t+1) = \text{sgn} \left[ \sum_j w_{ij} x_j(t) - \theta_i \right] \quad (1-2)$$

关于各种类型神经元模型的介绍将在 1.4 节和以后各章陆续介绍。

利用大量神经元相互连接组成人工神经网络将显示出人脑的



若干特征。下面将通过人工神经网络与人脑以及冯·诺依曼计算机的对比来说明人工神经网络的特点。

### (1) 大规模并行处理

人脑神经元之间传递脉冲信号的速度远低于冯·诺依曼计算机的工作速度，前者为毫秒量级，后者的时钟频率通常可达  $10^7$  Hz 或更高的速率。但是，由于人脑是一个大规模并行与串行组合处理系统，因而，在许多问题上可以作出快速判断、决策和处理，其速度可以远高于串行结构的冯·诺依曼机。人工神经网络的基本结构模仿人脑，具有并行处理的特征，可以大大提高工作速度。

### (2) 分布式存储

人脑存储信息的特点是利用突触效能的变化来调整存储内容，也即信息储存在神经元之间连接强度的分布上，存储区与运算区合为一体。虽然人脑每日有大量神经细胞死亡，但不影响大脑的功能，局部损伤可能引起功能衰退，但不会突然丧失功能。

冯·诺依曼机具有相互独立的存储器和运算器，知识存储与数据运算互不相关，只有通过人的编程给出指令使之沟通，这种沟通不能超越程序编辑者的预想。元件的局部损伤或程序中的微小错误都可能引起严重的失常。

### (3) 自适应(学习)过程

人类大脑有很强的自适应与自组织特性。后天的学习与训练可以开发许多各具特色的活动功能。如盲人的听觉和触觉非常灵敏，聋哑人善于运用手势，训练有素的运动员可以表现出非凡的运动技巧等等。

冯·诺依曼机强调程序编写，系统的功能取决于程序给出的知识和能力。显然，对于上述智能活动要通过总结编制程序将十分困难。

人工神经网络也具有初步的自适应与自组织能力。在学习或训练过程中改变突触权重  $w_{ij}$  值，以适应周围环境的要求。同一