

人工神经网络原理

● 曹焕光 编 著



REN GONG ZHI NENG REN GONG ZHI NENG

科学出版社

人工神经元网络原理

曹 焕 光 编 著

气象出版社

(京)新登字046号

内 容 简 介

人工神经网络是近几年来重新崛起的综合研究领域的一门前沿学科。它的研究与应用使得人工智能和脑神经模型的中间领域出现了曙光,将会带来一场新的信息革命,并对计算机科学、思维科学、脑神经科学、数理科学以及电子学等学科都会有重要的影响。本书系统地论述了神经网络的基本理论、方法、应用及有关的最新研究成果。主要内容包括神经网络处理信息的基本原理,前馈和反馈神经网络模型,联想记忆和自组织神经网络模型以及神经网络计算机的实现与应用等;书末还附有两个典型的应用程序。

本书可作为有关专业的本科高年级学生和硕士研究生的教材,也可作为从事人工智能、认知科学、脑神经科学、自动控制、计算机科学和微电子技术等领域的科技人员的参考书。

人工神经网络原理

曹 焕 光 编 著
责任编辑 黄丽荣

气 象 出 版 社 出 版

(北京西郊白石桥路46号)

山西教育印刷厂印刷

气 象 出 版 社 出 版 发 行

※ ※ ※

开本: 787×1092 1/32 印张: 9.25 字数 200 千字

1992 年 5 月第一版 1992 年 5 月 第一次印刷

印数: 1—3000

ISBN 7-5029-1051-4/TP.0037

定价: 5.00元

序 言

神经网络的研究从40年代初到现在已走过了半个世纪的曲折历程。近几年来,由于神经科学和计算机科学的快速发展,使研究人类智力、行为活动以及实现其模型的兴趣剧增,并开始把它应用于信息处理的各个领域。人工神经网络就是试图以模仿人脑神经系统的组织方式来构成新型的信息处理系统。从而,迎来了神经网络研究的空前活跃的发展时期,成为现代脑神经科学、数理科学、信息科学及电子科学等综合研究领域的共同的前沿研究课题之一。当前国内外的研究成果表明,在网络结构、学习算法、技术实现以及网络的具体应用等方面都取得了许多成果。可以说,在理论上和实践上都取得了新的突破,引起了人们的普遍关注。

人工神经网络是一种大脑工作模式(Brain Style),也就是所谓的用并行分布模式来取代符号主义的计算机模式(Computer Style)。这种工作机制的主要优点不是通过预先编写的软件把先验的知识“表示”出来,而是通过网络中神经元的群体活动模式来表现认识过程的。这种本质上分布并行的处理方式,具有高速度、高可靠性等优点。

人工神经网络或神经网络计算机是一门交叉学科,它涉及脑神经科学、认知科学、计算机科学、物理学、数学及电子学等领域。它所研究的内容大致可概括为神经生理学的研究,神经网络的动态行为,神经网络计算机以及神经网络的应用等。

作者在美国学习期间曾致力于神经网络的研究工作。一九八九年回国后,选读了大量有关著作,进行了一些有益的实验,

取得了可喜的成果，并在此基础上编著了此书。作者考虑到我国当前神经网络研究的实际情况，在本书中尽量避免涉及高深的数学理论和生物学知识，由浅入深地系统地论述了人工神经网络的基本理论、模型、算法及其应用。对于从事神经网络研究的科技工作者、本科高年级学生和研究生以及从事认知科学、人工智能、电子学等学科研究的读者都是颇为有益的。希望本书在国内神经网络学科的研究、发展与应用中起到一定的作用。愿读者与作者共勉，为我国神经网络的研究做出更多的贡献。

刘开瑛 谨识

一九九一年七月

前 言

第一台计算机的问世，标志着由机器代替人脑部分思维活动的开端。此后几十年，计算机本身经历了几次更新换代，速度和容量增加了千万倍，体积缩小了千万倍，计算机的应用范围也扩大到社会生活与生产的各个领域，由数值计算、数据处理发展到知识工程、机器人。这些成果使计算机越来越成为“拓延”人脑功能和帮助人脑思维的有效工具。但是，因为当时人类关于人脑的结构和活动机制知之甚少，所以研究和应用一直被冯·诺依曼体系结构束缚着，人类智能的模拟也仅限于在宏观功能一级上。进入80年代，神经生理学、生物物理学、生物化学等学科的科学家人对人脑结构和活动机制的研究有了新的突破，提出了很多模型和理论，如神经网络模型，连接机制理论等。另一方面，微电子技术飞速发展，推进了神经网络计算机的研究与实践，并推出了一系列产品，如TRW公司的Mark III等。1987年6月，1500多名学者汇聚美国加州，举行了第一届神经网络国际会议，成立了国际神经网络学会，成为神经网络研究发展的里程碑。自古以来人类就用仿生的方法制造了数以万计的为人类服务的工具，然而只有到了今天人类才开始对自身进行仿真。从生物到人，到人类最复杂的部分——大脑，现在人们要仿真这个最完美、最复杂、最不好理解的部分。当然这也是仿真过程中最困难的部分。

人脑比电脑更聪明，这是不言而喻的。人在自然情景中识别各种物体并指明它们之间的关系，在理解语言时从记忆中检

索相关的信息，以及在其它识别任务中，人脑显然比电脑高明得多；在经过学习后完成某项任务时也比电脑好得多。尽管使用正确的计算机程序能够获得人类进行信息处理的灵活性和适应能力，高级计算机语言和强有力的算法仍在发展，人工智能在理解和识别问题上已有很大的突破，而且无疑将来还有更大的突破。但它仍是从外部功能上模拟人脑的形式思维，其实现方法仍然是基于算法，而没有突破冯·诺依曼的结构格式，仍然不是人脑工作的方式，不能象人脑那样进行复杂的更高级的更大量的形象思维、创造性思维和灵感思维。同时，我们也不能认为软件可以解决人脑所能解决的全部问题。人之所以比当代计算机更聪明，那是因为大脑具有一个并行分布的计算结构。这种结构更适合于处理那些人所擅长（如视觉、听觉等）的自然信息处理任务。越来越多的科学工作者逐渐认识到基于符号逻辑推理观点的人工智能理论的局限性，人们不得不重新思考人工智能是否可以完全由逻辑推理规则来描述。于是，人们把更大的注意力集中在人工神经网络的研究上。

神经网络的研究涉及众多的学科和专业，现在许多学科都将其视为前沿课题，如数学、物理学、计算机科学、心理学、认知科学、神经生理学、哲学等等。神经网络为这些学科提出的许多新问题，将推动这些学科理论的发展，架起各种学科之间的桥梁。对神经网络的研究，使得人们对思维和智能获得进一步的了解和认识，并开辟了另一条模拟人类智能的道路。我们看到，以逻辑和语言为基础的人工智能只能模拟人类智能的一部分，对人工智能中遇到的最困难的一些问题有可能通过神经网络来解决，它可以模拟人的部分形象思维（直感思维）。但也应该注意到，企图用神经网络方法去替代所有传统的人工

智能方法亦是行不通的。把两者结合起来解决问题则更类似于人解决问题的方法。由于人在解决问题时既采用逻辑思维，也采用形象思维，因此，两者结合是模拟智能研究的必然之路。

近年来神经网络的研究引起了国内外的广泛关注。人们期望通过对神经网络的研究，人类能够对自身有所认识，能够更清楚地了解人类智能的奥秘，并推动人工智能研究的发展。可以说，也许没有哪门学科会象神经网络对人类自身的发展产生那样大的影响。

经过长期的大量研究工作，人们提出了许多神经网络模型，取得了一些理论和实际应用方面的成果，但距建立一个完整的神经网络理论体系还相差甚远。正如其它交叉学科在它们的酝酿萌芽阶段一样，它的某些基本概念尚缺乏明确的内涵，甚至某些术语还相当混乱。虽然我国在该领域的研究起步较晚，但已有相当多的高校和研究机构投入了这项研究，并取得了一些成果。编写本书的目的也正是为适应我国当前神经网络研究的实际情况，由浅入深地介绍该领域的一些主要理论、模型和实际应用。作者希望本书能对开始从事神经网络研究的人员有所帮助，对从事人工智能的研究工作者也许会有所启迪。由于水平所限，错误之处在所难免，作者诚恳地希望大家提出宝贵的修改意见。

本书的第一章主要介绍神经元网络的研究简史，神经网络的一些基本概念、基本特性及其与“电脑”的差别，还讨论该领域当前的研究课题。第二章论述神经网络处理信息的原理，包括向量及矩阵运算与层次网络结构的关系，神经网络的结构和自学习的原理。第三、四两章对几种重要的和有代表性的神经网络模型分别作了介绍和分析，并给出了它们的具体实现算

法。第五章介绍神经网络计算机的概念与实现方法，以及几种典型的产品和应用实例。最后，在本书末列出了两个典型网络模型的程序清单，读者可利用这些程序进行实验，加深对模型的理解，或者进一步开发自己的实用系统。

山西大学刘开瑛教授和清华大学石纯一教授对本书的编写给予了热情的关怀和指导，并详细审阅了全书。机电部33研究所王秉荣高级工程师以及我的其他同事们在本书的编写过程中给予了热情帮助。借此机会表达我对他们的衷心感谢。

编 著 者

一九九一年五月

目 录

序言

前言

第一章 绪 论 (1)

1.1 神经网络研究简史 (1)

1.2 生物神经元模型 (4)

1.2.1 生物神经元的结构 (4)

1.2.2 神经元的功能 (6)

1.2.3 神经元的M-P模型 (8)

1.3 神经网络的基本特性 (11)

1.3.1 数字计算机的局限性 (11)

1.3.2 神经网络的基本特性 (15)

1.3.3 计算机、人脑与神经网络 (18)

1.4 神经网络的研究课题及其方法 (24)

1.4.1 研究课题 (24)

1.4.2 研究方法 (25)

1.5 神经网络的应用领域 (27)

第二章 神经网络处理信息的基本原理 (29)

2.1 向量、矩阵与网络的基本概念 (29)

2.1.1 向量内积与神经元 (29)

2.1.2 矩阵运算与层次结构网络 (30)

2.2 神经元的理论模型及非线性系统 (34)

2.3 神经网络结构 (38)

2.3.1 结构特点 (38)

2.3.2	神经网络模型	(39)
2.3.3	神经网络分类	(40)
2.3.4	神经元网络模拟	(43)
2.4	神经网络中的自学习过程	(45)
2.4.1	学习的一般概念	(45)
2.4.2	通过样本进行学习	(46)
2.5	Hebb 学习规则	(50)
2.5.1	Hebb定律	(50)
2.5.2	Hebb学习规则	(50)
2.6	神经网络处理信息的能力	(52)
2.6.1	可完成的信息处理任务	(52)
2.6.2	记忆能力、计算能力与学习性能	(53)
第三章 前馈和反馈神经网络模型		(57)
3.1	前馈和反馈神经网络的一般概念	(57)
3.2	感知器	(60)
3.2.1	感知器原型及线性可分性	(60)
3.2.2	XOR 问题求解	(62)
3.2.3	感知器学习规则	(64)
3.3	误差反向传播神经网络	(67)
3.3.1	B-P网络的基本思想	(67)
3.3.2	B-P网络的算法	(77)
3.3.3	参数 η 和 α 的选择及其它问题	(79)
3.4	Hopfield 神经网络	(82)
3.4.1	Hopfield 模型	(82)
3.4.2	Hopfield 网络的实现	(85)
3.4.3	Hopfield 模型的应用及 Boltzmann机	(87)

3.5	Hamming神经网络	(91)
3.6	小结	(95)
第四章 联想记忆和自组织神经网络模型		(97)
4.1	联想记忆	(97)
4.1.1	联想记忆的一般概念	(97)
4.1.2	矩阵联想记忆	(102)
4.1.3	双向联想记忆	(106)
4.1.4	Hopfield 网络实现联想记忆	(111)
4.2	自适应共振理论模型	(113)
4.3	自组织特征映射模型	(116)
第五章 神经网络计算机及其应用		(122)
5.1	神经网络计算机	(122)
5.1.1	神经网络计算机的分类	(122)
5.1.2	神经网络计算机的实现途径	(123)
5.1.3	设计中应考虑的一些问题	(126)
5.2	虚拟神经网络计算机	(130)
5.3	Transputer 与神经网络计算机	(136)
5.4	神经网络计算机的应用	(138)
5.4.1	应用领域	(138)
5.4.2	学习朗读的NETtalk神经网络	(141)
5.4.3	神经网络优化计算	(143)
5.4.4	神经网络专家系统	(146)
参考文献		(150)
附录 A 词汇表		(159)
附录 B 误差反向传播网络(有指导的学习)程序		(162)

B. 1	引言		(162)
B. 2	程序		(162)
B. 3	例子		(185)
附录 C	无指导的学习程序		(190)
C. 1	引言		(190)
C. 2	程序		(190)
C. 3	例子		(199)

第一章 绪 论

人工神经网络ANN(Artificial Neural Networks)、连接机制、神经计算机和并行分布处理PDP(Parallel Distributed Processing)等是人们常用的同义词。最近几年来, 它已成为国内外的一个热门研究课题。它具有模拟人类部分形象思维的能力, 是模拟人工智能的一条重要途经。对传统的符号逻辑为基础的人工智能研究中所遇到的一些困难问题, 采用ANN结构来解决, 已取得了可喜的进展。本章主要讨论ANN的研究简史, 生物神经元模型, 神经网络与数字计算机和人脑的比较, ANN的研究课题、研究方法及其适用的领域。

1.1 神经元网络研究简史

神经网络研究开始于1943年心理学家McCulloch和数学家Pitts提出的神经元的数学模型。1944年, Hebb提出了改变神经元连接强度的Hebb规则, 至今仍在各种神经网络模型中起着重要的作用。而作为人工智能的网络系统的研究则是50年代末60年代初开始的。1957年Rosenblatt首次引进了感知器(Perceptron)概念, 它由阈值型神经元组成, 试图模拟动物和人脑的感知和学习能力, 并构造出有三层结构的感知机。1962年Widrow提出了自适应线性元件(Adaline), 它是连续取值的线性网络, 主要用于自适应系统。其后若干年内, 这一研究方向处于低潮, 主要的原因在于: 传统的 Von Neumann型数字计算机正处在发展的全盛时期, 人工智能得到迅速发

展并取得了显著的成就，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人工智能技术的必要性和迫切性。直到80年代初，人们把精力集中于设法提高现有的以串行执行预存程序指令便能构造出具有人类大脑神经功能的智能计算机，即第五代计算机。这种努力并没有达到人们预想的目标。尽管目前巨型计算机运行速度可高达每秒几百亿次，但是它们在模拟人脑进行判断和识别时，却显得相当笨拙或无能为力。例如，人可以在一瞬间从人群中认出自己的熟人，可以在车辆往来频繁的马路上即时做出正确穿越的决策，而对于现在执行预先编好程序的冯·诺依曼计算机来说是根本无法做到的。

1982年，美国生物物理学家Hopfield用他所构造的模仿人类思维的神经网络模型，借助于计算能量函数，成功地解决了TSP（即旅行商问题）计算难题，引起了人们震惊，并掀起了用神经网络原理来构造智能机的热潮。

80年代，人们对脑的研究取得了重大进展。通过分子生物学方法弄清了脑的微观机制；对大脑的神经元突触所具有的可塑性有了了解；并从工程的角度提出了脑的计算理论。因此，人工神经网络的研究出现了一个新局面：

1. 在70年代以来神经网络模型方面取得成果的基础上，Hopfield提出大脑的并行信息处理和学习的动力学理论，此后，许多学者探讨神经网络并行信息处理的可能性。通过并行处理解决了诸如巡回推销员这类最优化问题，为证明并行计算的实用性作出了贡献。

2. 人工智能的研究虽取得了许多成果，但也存在着一些难点。于是，人们便希望仿照脑的工作，以并行、学习方

式为基础，探索新的信息处理方式。

3. 人们开始研究人的认识功能的认知科学，对迄今为止只依靠符号操作的人工智能研究方法作了回顾，并研究以许多因素相互作用为基础的并行信息处理。于是，出现了连接主义(Connectilism)，研究多因素同时并行相互作用模型的动力学、自学习和自组织原理，研究人的认知机制，建造新原理的信息处理系统。人们研究并行分布处理模型，并把它同神经网络模型相结合。

4. 电子元件技术发展迅速，不仅可提供廉价的处理器和存储器，而且能够把许多处理器和存储器结合成并行计算机。但是，现有的算法、符号处理等并不能发挥并行处理的长处，因此，并行计算机软件要学习脑的工作方式，而神经计算机正是这样做的。

近几年来，神经网络理论引起了美国、欧洲与日本等国科学家的极大兴趣，新的研究小组、实验室和公司等纷纷建立。世界各国也正在组织和实施与此有关的重大研究项目，如美国的DARP计划，日本的WFSP计划，法国的“尤里卡”计划，德国的“欧洲防御”计划等。1986年4月美国物理学会在Snowbirds召开了国际神经网络会议；1987年6月IEEE在San Diego召开了神经网络国际会议，国际神经网络学会也随之诞生；1988年元月“神经网络”杂志创刊；1988年起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；IEEE成立了由其下属十个学会组成的神经网络委员会；1990年3月IEEE神经网络会刊问世，各种期刊的神经网络特刊层出不穷。人们普遍认为，这一领域的发展将会带来重大的科学研究成果和应用前景；而更有人把它称之为一种新的主义——连接

主义，一种能解决诸如知识表达、推理学习、联想记忆等问题的统一模型，它将预示着一个新型工业的诞生。神经网络的全面研究涉及到计算机科学、控制论、信息科学、微电子学、心理学、认知科学、物理学与数学等学科。神经网络的问世标志着认知科学、计算机科学及人工智能的发展又处于一个新的转折点，它的应用和发展有可能为新一代计算机和人工智能开辟一条崭新的途径。

1.2 生物神经元模型

1.2.1 生物神经元的结构

研究成果表明，大脑的基本构件是神经元。从生物控制与信息处理的角度看，神经元的结构如图1.1所示，其特性如下：

1. 细胞体(Cell Body) 由细胞核、细胞质与细胞膜等组成，细胞体相当于一个初等处理器。

2. 轴突(Axon) 由细胞体向外伸出的最长的一条分支，称为轴突，即神经纤维。它有两种结构形式：髓鞘纤维和无髓鞘纤维。轴突相当于细胞的输出电缆，其端部的许多神经末梢为信号输出端子，用于传出神经冲动、兴奋或抑制信号，经过动态加权求和变换后，再通过轴突传递到神经末梢并发送给其它神经元。

3. 树突(也称枝晶, Dendrites) 细胞体向外伸出的其它许多较短的树状分支，称为树突。它相当于细胞的输入端，接受来自四面八方的传入神经冲动，兴奋或抑制信号。

4. 突触(Synaptic) 细胞与细胞之间(即神经元之间)通