

人工神经元网络及其应用

袁曾任 编著

清华大学出版社

183

清华大学出版社



中国计算机学会
学术著作丛书

人工神经元网络及其应用

袁曾任 编著

清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



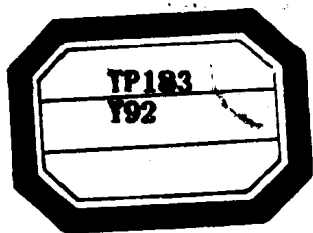
TP183

Y92

444843

人工神经元网络及其应用

袁曾任 编著



00444843

10

清华大学出版社
广西科学技术出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书是从工程应用出发,按照理论指导应用,应用推动理论发展的思想编写的。内容选择了四类常用的和基本的人工神经网络模型,即前馈型、反馈型、自组织和仿脑模型联接控制器(简称CMAC),还介绍了比较新并有发展前途的模糊人工神经网络,独立成章地详细阐述了各种模型中常用的学习规则,每种模型都围绕结构、基本原理、学习算法、设计和实现以及应用的次序来阐述。重点介绍了在控制、专家系统和预报领域的应用,还列举了各类模型的许多具有特点的例子。书中部分内容是几年来作者和所指导的学生们的研究成果的总结,已编制成程序,可供选用。

本书选材精、内容新、阐述系统、力争深入浅出和突出应用,可作为相应学科的研究生和高年级大学生的教材和教学参考书,也可供科研人员和工程技术人员自学和参考。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

人工神经网络及其应用/袁曾任编著. —北京:清华大学出版社,1999

ISBN 7-302-03580-6

I. 人… II. 袁… III. 人工神经网络-概论 IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 19536 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

广西科学技术出版社

印刷者:清华大学印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 24 字数: 568 千字 彩插页: 2

版 次: 1999 年 10 月第 1 版 1999 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-03580-6/TP·1973

印 数: 0001~4000

定 价: 29.80 元

清华大学出版社 广西科学技术出版社
计算机学术著作出版基金

评 审 委 员 会

主 任 委 员 张效祥

副主任委员 汪成为 唐泽圣

委 员 王鼎兴 杨芙清 李三立 施伯乐 徐家福
夏培肃 董韫美

序 言

计算机是当代发展最为迅猛的科学技术,其应用几乎已深入到人类社会活动和生活的一切领域,大大提高了社会生产力,引起了经济结构、社会结构和生活方式的深刻变化和变革,是最为活跃的生产力之一。计算机本身在国际范围内已成为年产值达2500亿美元的巨大产业,国际竞争异常剧烈,预计到本世纪末将发展为世界第一大产业。计算机科技具有极大的综合性质,与众多科学技术相交叉而反过来又渗入更多的科学技术,促进它们的发展。计算机科技内容十分丰富,学科分支生长尤为迅速,日新月异,层出不穷。因此在我国计算机科技尚比较落后的情况下,加强计算机科技的传播实为当务之急。

中国计算机学会一直把出版图书刊物作为学术活动的重要内容之一。我国计算机专家学者通过科学实践,做出了大量成果,积累了丰富经验与学识。他们有撰写著作的很大积极性,但相当时期以来计算机学术著作由于印数不多,出版往往遇到不少困难,专业性越强越有深度的著作,出版难度越大。最近清华大学出版社与广西科学技术出版社为促进我国计算机科学技术及产业的发展,推动计算机科技著作的出版工作,特设立“计算机学术著作出版基金”,以支持我国计算机科技工作者撰写高水平的学术著作,并将资助出版的著作列为中国计算机学会的学术著作丛书。我们十分重视这件事,并已把它列为学会本届理事会的工作要点之一。我们希望这一系列丛书能对传播学术成果、交流学术思想、促进科技转化为生产力起到良好作用,能对我国计算机科技发展具有有益的导向意义,也希望我国广大学会会员和计算机科技工作者,包括海外工作和学习的神州学人们能积极投稿,出好这一系列丛书。

中国计算机学会

1992年4月20日

出版说明

近年来,随着微电子和计算机技术渗透到各个技术领域,人类正在步入一个技术迅猛发展的新时期。这个新时期的主要标志是计算机和信息处理的广泛应用。计算机在改造传统产业,实现管理自动化,促进新兴产业的发展等方面都起着重要作用,它在现代化建设中的战略地位愈来愈明显。计算机科学与其他学科的交叉又产生了许多新学科,推动着科学技术向更广阔的领域发展,正在对人类社会产生深远的影响。

科学技术是第一生产力。计算机科学技术是我国高科技领域的一个重要方面。为了推动我国计算机科学及产业的发展,促进学术交流,使科研成果尽快转化为生产力,清华大学出版社与广西科学技术出版社联合设立了“计算机学术著作基金”,旨在支持和鼓励科技人员,撰写高水平的学术著作,以反映和推广我国在这一领域的最新成果。

计算机学术著作出版基金资助出版的著作范围包括:有重要理论价值或重要应用价值的学术专著;计算机学科前沿探索的论著;推动计算机技术及产业发展的专著;与计算机有关的交叉学科的论著;有较大应用价值的工具书;世界名著的优秀翻译作品。凡经作者本人申请,计算机学术著作出版基金评审委员会评审通过的著作,将由该基金资助出版,出版社将努力做好出版工作。

基金还支持两社列选的国家高科技重点图书和国家教委重点图书规划中计算机学科领域的学术著作的出版。为了做好选题工作,出版社特邀请“中国计算机学会”、“中国中文信息学会”帮助做好组织有关学术著作丛书的列选工作。

热诚希望得到广大计算机界同仁的支持和帮助。

清华大学出版社

计算机学术著作出版基金办公室
广西科学技术出版社

1992年4月

前 言

人为万物之灵,根本在大脑,大脑同时是“生物的”、“精神的”和“物理的”。头脑是宇宙中具有最精巧的结构、最奥妙的运行机制、最完善的功能、最快的判断和决策速度以及大容量的记忆实体。科学家们的长期目标就是要揭开人脑工作机制的奥秘,目的在于制造出模拟人的智能的机器,从而改善人们的物质和文化生活。从工程应用角度来看,制造出接近人脑功能的机器,以解决实际问题。目前人们对自身的脑神经结构、机制和功能有了不少的了解,但远远没有认识清楚。这仍然是长期的和艰巨的任务,有待于各个领域的科学家齐心协力,持之以恒,努力拼搏,方能达到目标。

现在的人工神经网络模型只是生物神经系统的一种高度简化后的近似。它是用大量的简单神经元广泛互连成的一种计算结构,属于自适应非线性动力学系统,它具有学习、记忆、计算和各种智能处理功能。它在不同程度和层次上模仿人脑神经系统的结构及信息处理、存储和检索等功能。

人工神经网络是一门新兴交叉科学。自从 20 世纪 80 年代中、后期掀起了一次研究人工神经网络的新高潮以来,引起了许多领域科学家的高度重视,积极开展了大量研究工作,取得了不少突破性进展。工程界对人工神经网络及其应用也表示了极大的关注和热情,希望它能在用传统理论和方法难以解决的问题方面,发挥很大的作用,取得比较显著的进展。目前人工神经网络已进入相对平稳发展时期,理论工作方面处于攻坚战。在应用方面,正向着广度和深度方向深入发展,从而在某些方面和某种程度上推动了理论和方法向前发展。人工神经网络在理论、模型、算法、应用和实现方面还有许多有待探索、研究和开发的工作。为了适应这种形势,作者根据几年来自己以及指导研究生、毕业班大学生从事这个领域的研究和教学工作的体会和取得的研究成果,并参考了国内外学者编著的有关书籍和文献资料编著了这本书,力图在推广人工神经网络及其应用的知识和实践,以及介绍这个领域的最新发展与成果方面尽微薄之力。

本书力图从工程应用的角度专门对人工神经网络及其在控制、人工智能中的专家系统和预报方面的应用作比较系统的阐述。人工神经网络模型种类繁多,有代表性的就有几十种。我们仅从网络的构成原理(前馈型、反馈型物理模型和自组织原则)和比较实用而有发展前途的角度选择了四类五种模型,对每种类型,按照结构、基本原理、算法、设计和应用的层次加以介绍。

本书有以下特点:

(1) 着重从工程应用出发,贯穿了理论指导应用和应用推动理论发展的思想。在理论阐述方面,力图深入浅出,循序渐进。在应用方面选择控制、专家系统和预报等领域中的典型应用实例和实验结果。

(2) 内容比较新颖和阐述比较系统。书中的许多内容已涉及到 1995 年初期刊与文献资料以及作者和研究生及高年级学生的研究结果。纵向方面对每种模型都是比较系统地

由结构到应用来介绍,从横向方面又独立成章地介绍了各种类型中应用到的学习规则。

(3) 书中部分内容是作者、研究生和高年级大学生多年来研究工作的总结,已编制成程序,可以应用。

本书可作为人工智能及智能控制、信息科学与技术(包括计算机科学与技术、自动化、电子工程)等专业的研究生和高年级本科生的教材和教学参考书,也可作为上述领域的科学工作者和工程技术人员从事人工神经网络及其应用的自学参考书。

人工神经网络及其应用是多学科交叉的前沿科学。它的理论高深,难度大,涉及面广,发展迅速,因此内容多和新。鉴于编著者水平所限和时间仓促,书中不妥和错误之处,恳请广大读者批评指正,以期今后改进。

书中的素材除取之于作者和所指导的研究生和大学生的研究成果外,其他一部分内容取之于公开和未公开发表的书籍、杂志、会议录以及技术报告等文献资料,在这里谨向这些作者和我的学生表示衷心感谢。

由于受作者水平所限,书中不可避免地存在一些不足和错误之处,诚恳地欢迎广大读者批评指正。

袁曾任

1996年3月于清华大学

目 录

前言	V
第 1 章 绪论.....	1
1.1 人工神经网络的基本概念和特征	1
1.2 人工神经网络研究的发展简史	4
1.3 我国人工神经网络研究的情况.....	13
1.4 人工神经网络构成的基本原理和功能.....	14
1.5 人工神经网络的分类、工作过程和模型	18
1.6 人工神经网络计算和传统计算的比较.....	25
1.7 研究人工神经网络的意义.....	26
1.8 人工神经网络在控制领域中的应用.....	27
第 2 章 神经网络的学习规则和最简单的感知器	30
2.1 神经网络常用的十种学习规则.....	30
2.2 最简单的感知器、学习算法及其局限性	44
第 3 章 多层前馈型神经网络	49
3.1 线性不可分的模式分类.....	49
3.2 多层感知器的 Delta 学习规则	57
3.3 广义的 Delta 学习规则	62
第 4 章 误差反传训练算法及其改进和应用	66
4.1 误差反传训练算法.....	66
4.2 BP 算法的若干改进	78
4.3 隐含层数和层内单元(节点)数的确定	118
4.4 基于 BP 算法的 ANN 网络在控制领域中的应用	131
第 5 章 反馈式神经网络.....	274
5.1 Hopfield 神经网络	275
5.2 双向异联想记忆网络	292
5.3 汉明(Hamming)网络	296

第 6 章 自组织神经网络	299
6.1 竞争学习	300
6.2 基于自适应谐振理论(ART)构成的自组织神经网络	305
6.3 自组织特征映射神经网络	319
第 7 章 CMAC 网络	330
7.1 CMAC 模型的结构	330
7.2 CMAC 网络工作原理的简单分析	332
7.3 CMAC 网络的学习算法	337
7.4 CMAC 网在控制中的应用	338
第 8 章 人工神经网络与模糊系统	346
8.1 两者的结合是发展的必然	346
8.2 两者结合的基本方式	349
8.3 两者结合的应用举例	350
全书参考文献	358

第 1 章 绪 论

1.1 人工神经网络的基本概念和特征

人的大脑是自然界所造就的最高级产物。人的思维是由人脑来完成的,思维是人类智能的集中体现。人的思维主要可概括为逻辑思维(包括联想)和形象思维两种。过去以规则为基础的知识系统可被认为是致力于模拟人的逻辑思维,而人工神经网络则可被认为是探索人的形象思维,前者由左脑主管,后者则是由右脑主管。人的智能是多种多样的和分层的。人的行为有时是单种智能,有时是多种智能综合应用的结果。根据 19 世纪末创建的神经元学说,使人们认识到人脑是由大约 10^{11} 数量的神经元和 $10^{14} \sim 10^{15}$ 个突触组成的巨系统。

人工神经网络是生理学上的真实人脑神经网络的结构和功能,以及若干基本特性的某种理论抽象、简化和模拟而构成的一种信息处理系统。从系统观点看,人工神经网络是由大量神经元通过极其丰富和完善的联接而构成的自适应非线性动态系统。由于神经元之间有着不同的连接方式,所以组成不同结构形态的神经网络系统是可能的。

许多科学家长期以来从事认识人自身特别是人脑的工作,有了不小的进展,但还远远没有认识清楚,尽管如此,人们还是借鉴了对人脑的结构和功能的一些了解,去设计和建造具有一定智能的机器,使之具有像人那样的信息处理能力,尽可能多地去做人所能做的各种事情。随着人脑工作机制的奥秘不断揭开,将会帮助人们尽早制造出具有更高智能的机器。

现在已形成从符号的和联接的两大方面来研究人类的智能,正像明斯基在 1990 年的文章中指出“这两个方面都是同一个事业的一部分”。尽管 1990 年又出现了从行为方面来研究人类的智能,作者认为毫不例外地也是同一个事业的一部分,因为人工智能既应该包括基于思维的研究内容,也应该包括基于行为的研究内容,此外,还应该研究思维与行为的交互关系。目前,对人类智能的研究,需要多层次、多途径而且将现有方法结合在一起,取长补短,这样,方能更好和更高程度地模拟人类的智能。正像明斯基 1990 年文章的编者按所说“明斯基不打算去寻找一条笔直的路,他相信用多种多样的部件来建造系统的时候已经来到,这些部件中有的联接主义的,有的是符号的,每个部件都有它存在的不同理由”。

人的智能来自于大脑,大脑是由大量的神经细胞或神经元组成的。每个神经元可以看作是一个小的处理单元,这些神经元按照某种方式互相连接起来,构成了大脑内部的生理神经网络,他们中各神经元之间连接的强弱,按照外部的激励信号作自适应变化,而每个神经元又随着接收到的多个激励信号的综合大小呈现兴奋或抑制状态。据现在的了解,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,大脑处理信息的结果确由神经元的状态表现出来。显然,神经元是信息处理系统的最小单元。虽

然神经元的类型有很多种,但其基本结构相似,如图 1.1 所示。

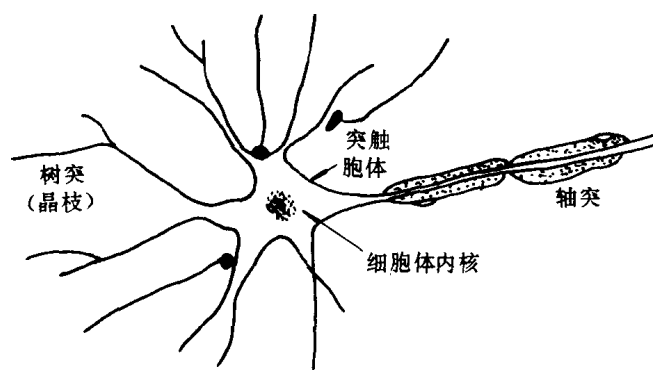


图 1.1 神经元结构示意图

神经元(即神经细胞)是由细胞体、树突、轴突和突触四部分组成。每个细胞体都有一个细胞核在进行着呼吸和新陈代谢等许多生化过程。整个细胞的外部叫做细胞膜。从细胞体向外伸出许多树突和一条长的轴突,树突和轴突分别负责传入和传出兴奋或抑制信息到细胞体。神经元的树突较短,分支很多,是信息的输入端。轴突较长,是信息的输出端。突触是一个神经元与另一个神经元相联系的特殊结构部位,突触包括突触前(成分)、突触间隙和突触后(成分)三个部分。突触前(成分)是第一个神经元的轴突末梢部分。突触后(成分)是指第二个神经元的受体表面。突触前(成分)通过化学接触或者电接触,将信息传往突触后受体表面,实现神经元的信息传输。树突和轴突一一对接,从而靠突触把众多的神经元连成一个神经元网络。神经元群或者神经网络系统对外界有兴奋和抑制两种反应,兴奋指的是相对静止变为相对活动,抑制是指由相对活动变为相对静止。神经元之间信息的传递形式有正负两种连接。正连接呈相互激发;负连接呈相互抑制。各神经元之间的连接强度和极性可以有所不同,并且都可进行调整,因此人脑才可以有存储信息的功能。

简化的神经元数学模型

人工神经元的结构模型如图 1.2 所示。

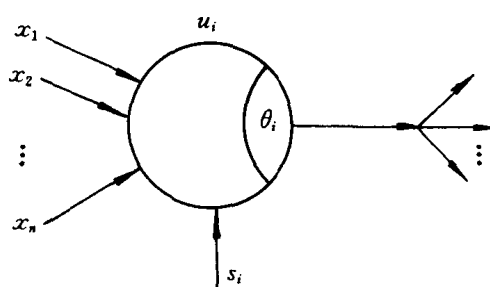


图 1.2 神经元的结构模型

其中 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为输入信号, u_i 为神经元内部状态, θ_i 为阈值, w_{ij} 为 u_i 到 u_j 连接的权值, s_i 表示外部输入信号(在某些情况下,它可以控制神经元 u_i , 使 u_i 可以保持在某一状态),

$f(\cdot)$ 为激发函数, y_i 为输出, 上述模型可以描述为:

$$\sigma_i = \sum_j w_{ij}x_j + s_i - \theta_i \quad (1.1)$$

$$u_i = g(\sigma_i) \quad (1.2)$$

$$y_i = h(u_i) = f(\sigma_i) = f\left(\sum_j w_{ij}x_j + s_i - \theta_i\right) \quad (1.3)$$

其中 $f = h \times g \quad (1.4)$

当神经元没有内部状态时, 可令 $y_i = u_i$, $f(\cdot) = g(\cdot)$ 。通常的情况是没有 s_i 的。此时, 每一个神经元的输入接受前一级神经元的输出, 因此, 对神经元 i 的总作用 σ_i 为所有输入的加权和减去阈值(若无阈值就不减了), 此作用引起神经元 i 的状态变化, 而神经元 i 的输出 y_i 为其当前状态 σ_i 的函数。

上面都是针对稳定状态来说的, 如果考虑到反映时间, 那么必须用微分方程来表示神经元的状态变化, 在最简单的情况下, 以下的式子成立

$$\tau \frac{d\sigma_i}{dt} + \sigma_i = \sum_j w_{ij}x_j(t) - \theta_i \quad (1.5)$$

$$y_i(t) = f(\sigma_i(t)) \quad (1.6)$$

注意到在最简单的情况下, 神经元的状态与输入成比例, 而且向某一个初态衰减。

神经元的数学模型有很多种, 这里就不一一介绍了。

由大量神经元相互连接组成人工神经网络将显示出人脑的某些基本特征。

(1) 分布存储和容错性 一个信息不是存储在一个地方, 而是按内容而分布在整个网络上, 网络某一处不是只存储一个外部信息, 而每个神经元存储多种信息的部分内容。网络的每部分对信息的存储有等势作用。这种分布式存储方法是存储区与运算区合为一体的。在神经网络中, 要获得存储的知识则采用“联想”的办法, 即当一个神经网络输入一个激励时, 它要在已存的知识中寻找与该输入匹配最好的存储知识为其解。当然在信息输出时, 也还要经过一种处理, 而不是直接从记忆中取出。这种存储方式的优点在于若部分信息不完全, 就是说或者丢失或者损坏甚至有错误的信息, 它仍能恢复出原来正确的完整的信息, 系统仍能运行。这就是网络具有容错性和联想记忆功能, 自然呈现出较强的鲁棒性。人的大脑的容错性是它的一种重要的智慧形式。

(2) 大规模并行处理 人工神经网络在结构上是并行的, 而且网络的各个单元可以同时进行类似的处理过程, 因此, 网络中的信息处理是在大量单元中平行而又有层次地进行, 运算速度高, 大大超过传统的序列式运算的数字机。虽然每个神经元的信息传递(神经脉冲)速度是以毫秒计算的, 比普通序列式计算机要慢很多, 但是人通常能在 1 秒内即可作出对外界事物的判断和决策, 这就是能神奇地完成所谓“百步”决策。这按照现有传统的计算机及人工智能技术目前还是做不到的。

(3) 自学习、自组织和自适应性 学习和适应要求在时间过程中系统内部结构和联系方式有改变, 神经网络是一种变结构系统, 恰好能完成对环境的适应和对外界事物的学习能力。神经元之间的连接有多种多样, 各元之间连接强度具有一定的可塑性, 相当于突触传递信息能力的变化, 这样, 网络可以通过学习和训练进行自组织以适应不同信息处理的要求。

(4) 神经网络是大量神经元的集体行为,并不是各单元行为的简单的相加,而表现出一般复杂非线性动态系统的特性。如不可预测性、不可逆性、有各种类型的吸引子(信息正是“存储”在定点吸引子上)和出现混沌现象等。

(5) 神经元可以处理一些环境信息十分复杂、知识背景不清楚和推理规则不明确的问题。例如语音识别和手写体识别,医学诊断以及市场估计等,都是具有复杂非线性和不确定性对象的控制。在那里,信源提供的模式丰富多采,有的互相间存在矛盾,而判定决策原则又无条理可循,通过神经网络学习(按照学习法则),从典型事例中学会处理具体事例,给出比较满意的解答。

1.2 人工神经网络研究的发展简史

人工神经网络的研究已有近半个世纪的历史,但它的发展并不是一帆风顺的,而是经过两起一落中间呈现马鞍形的过程。以时间的顺序和著名人物或者某方面的突出研究成果为线索,简要地介绍其发展史。它的研究大体上可分为四个阶段。

1. 早期阶段

人工神经网络的研究可以追溯到 1800 年 Frued 的前精神分析学时期,他已经做了一些初步工作。1913 年人工神经系统的第一个实践是由 Russell 描述的水力装置。1943 年美国心理学家 Warren S McCulloch 与数学家 Walter H Pitts 合作,用逻辑的数学工具研究客观事件在形式神经网络中的表述,从此开创了对神经网络的理论研究。他们在分析、总结神经元基本特性的基础上,首先提出了神经元的数学模型简称为 MP 模型。形式神经元的活动满足“全有”或者“全无”方式,只有在一定数量输入作用下,超过某一个阈值,神经元才兴奋;又规定了神经元之间的联系方式只有兴奋性和抑制性突触联系两种,抑制性突触起“否决权”作用。MP 模型的结构是固定的,由一些形式神经元按一定方式连接起来的网络,可以用逻辑演算的方法,了解输入事件在网络中的处理过程和网络中各单元的动态变化过程。从脑科学研究来看,MP 模型不愧为第一个用数理语言描述脑的信息处理过程的模型。后来 MP 模型经过数学家的精心整理和抽象,最终发展成一种有限自动机理论,再一次展现了 MP 模型的价值。此模型沿用至今,直接影响着这一领域研究的进展。

1949 年心理学家 D.O. Hebb 提出了关于神经网络学习机理的“突触修正假设”,即突触联系效率可变的假设。Hebb 学习规则开始是作为假设提出来的,其正确性在 30 年后才得到证实。这种假设就是调整权重 w_{ij} 的原则,若第 i 个神经元与第 j 个神经元同时处于兴奋状态,那么它们之间的连接强度应当加强。具体说,如果突触有一个正的前突触电位和正的后突触电位,突触传导(连接强度)得到增加。相反,如果前突触电位为负(正)和后突触电位是正(负),那么突触传导得到减少。现在多数学习机仍遵循这一规律。

1957 年 F. Rosenblatt 首次提出并设计制作了著名的感知器(Perceptron)。第一次从理论研究转入工程实现阶段,掀起了研究人工神经网络的高潮。感知器是一种多层的神经网络。它是由阈值性神经元组成,实质上是一个连续可调的 MP 神经网络。从具体的结构看,感知器由四层组成,第一层视网膜层接受来自外界输入,投射到第二层,它又以随机方式联系到第三层,最后层为反应层。他在 IBM 704 计算机上进行了模拟,从模拟结果

看,感知器有能力通过调整权的学习达到正确分类的结果。它是一种学习和自组织的心理学模型,其中的学习律是突触的强化律。当时,世界上不少实验室仿效感知器,设计出各式各样的电子装置。

1962年 Bernard Widrow 和 Marcian Hoff 提出了自适应线性元件网络,简称为 Adaline(Adaptive linear element)。它是一种连续取值的线性加权求和阈值网络。它也可以看成为感知器的变形,它实质上是一个两层前馈感知机型网络。它成功地应用于自适应信号处理和雷达天线控制等连续可调过程。

在 1951 年夏,Marvin Minsky 和 Dean Edmonds 合作创建了学习机。还受 McCulloch 和 Pitts 工作的启发,他们设计了一个有 40 个神经元以及突触的机器,按照成功地实现特定的作业(Hebbian Learning),调节它们的传导。这个机器是用电子管、马达和离合器建造起来的,而它成功地模拟了老鼠走迷宫方式搜寻食物的行为。1954 年 Minsky 探索神经系统怎样可以学习和其他思想,最终都写入他的博士论文中。Minsky 和 Papert 经过多年对以感知器为代表的简单网络系统的功能及其局限性从数学上作了深入分析和研究,在 1969 年发表了专著,名为《“感知器”(Perceptron)》。在肯定感知器的研究价值以及它们有许多引起人们注意的特征之后,指出线性感知器功能是有限的。具体说,简单的神经网络只能进行线性分类和求解一阶谓词问题,而不能进行非线性分类和解决比较复杂的高阶谓词问题(如 XOR,对称性判别和宇称问题等)。他们还指出,与高阶谓词问题相应的应该是具有隐含单元(节点)的多层神经元网络。在当时的技术条件下,他们认为在加入隐含单元后,想找到一个多层网络的有效的学习算法是极其困难的。抱了悲观的态度。该书在学术界产生正反两方面的影响,它的副作用在于促使 20 世纪 60 年代中人们对神经网络研究的热情骤然下降,迅速转入低潮。1981 年,Minsky 自己也承认当时的论点对这一研究方向伤害过大。作者认为,低潮的出现除上述原因外,还和当时的社会、技术和物质条件有关。例如串行计算机正处于迅速发展时期,早期的以符号逻辑处理方法的人工智能研究也取得了很大的成就,从而掩盖了发展新型计算机和人工智能的新途径的必要性和迫切性。当时的微电子技术和工艺水平还没有达到可以制作在规模上能与真实的神经系统相比拟的神经网络。用电子管或晶体管为基本元件,体积大、价格贵,无法实现大规模的神经网络的研究,更难制作可以实际应用的装置,自然难于得到产业界的响应和支持。

2. 70 年代(过渡期)

值得庆幸的是,进入 20 世纪 70 年代后,虽然神经网络研究相对仍处于低潮时期,但是仍有不少科学家在极其困难的条件下坚持不懈地努力奋斗,主要是提出了各种不同的网络模型,开展了人工神经网络的理论研究和增加网络的功能和各种学习算法的研究等,为今后研究神经网络理论、数学模型和体系结构等方面打下了坚实的基础。

美国麻省理工学院 AI 实验室的 Dave Marr,对视觉信息加工过程首次提出了一个完整的理论框架,他认为研究视觉问题需要从理论、算法和硬件实现三个不同层次去理解。视觉的这种信息加工过程需要经过初级到高级的三步处理。Marr 从数学上对视觉的初级加工阶段和视觉各功能模块进行了描写。对视觉这种复杂的感知过程建立起理论结构,从而可把数理工具引进来形成视觉的计算理论。从神经科学和心理学中发展出计算神经科学和计算心理学分支。Marr 的同事 T. Poggio 和学生在深入研究 Marr 理论框架的基础

上,提出了初级视觉正则化理论,在计算理论与实现机制之间架起了桥梁,推动了视觉的研究进程。目前,离模拟人的视觉差距还很大,还很困难,有待于探寻新理论和新算法。

Stephen Grossberg 是所有研究人工神经系统人员中最有影响者,他周到、广泛地研究了心理学(思维)和生物学(脑)的处理,以及人类信息处理的现象,把思维及脑紧密结合在一起,成为统一的理论。他多年潜心于研究用数学描述人的心理和认知活动,企图在这两方面建立统一的数学理论。自适应谐振理论就是由这一理论的核心部分渐渐发展而形成的。先后发表了包括二进制输入的 ART1 和连续信号输入的 ART2,1990 年又发表了在神经元的运行模型中纳入了人工神经元生物电——化学反应机制的 ART3 模型。他创立并领导了美国波士顿大学的自适应系统中心,他们研究了人类信息处理的所有方面,涉及到人工神经元系统的所有领域。Grossberg 是一位多产和高产的学者,他已有 5 本著作。他的早期工作可以从 1982a 的 *Studies of Mind and Brain* 中找到。他的后期工作可以从 1986b 的 *The Adaptive Brain I and II* 中看到。ART3 的工作可以在 1990 年 *Neural Networks* 的 Vol. 3 中看到。他还在 1988 年著有 *Neural Network and Natural Intelligence* 一书。关于马达控制方面的工作,在 1989 年由他和合作者 Kuperstein 合著的 *Neural Dynamics of Adaptive Sensory-Motor Control: Ballistic Eye Movement* 书中发表。1983 年 Hecht-Nielsen 和 1986 年 Hestenes 的文章对 Grossberg 的工作做了极好的介绍。

日本学者 Shun-Ichi Amari(甘利俊一)致力于神经网络有关数学理论的研究。自从 1960 年后,他已经将生物神经网络和严格的数学专门知识结合起来。他在 1967 年对 Credit Assignment Problem(信贷分配问题)给出数学上的解答。1971 年—1974 年发表多篇文章,是针对随机连接的人工神经网络动力学的处理及其严格的数学基础。1977 年他和 Arbib 合作发表过竞争学习的文章。在 1972 年、1977 年和 1982 年先后发表过关于联想记忆的数学分析。他的突出结果是 1971 年的对称连接人工神经系统的稳定性研究,和 1979 年 Amari 与 Kishimoto 合作发表的在不对称连接人工神经网络中回忆瞬时模式序列的稳定性研究。在 1982 年和 1983 年还发表了在人工神经网络中模式结构的动力学。

1970 年和 1973 年 Kunihiko Fukushima 研究了视觉系统的空间和时空的人工神经网络模型以及脑的空间和时空的人工神经网络模型。提出了神经认知网络理论。Fukushima 网络包括人工神经认知机和基于人工神经认知机的有选择注意力的识别两个模型。

1971 年芬兰的 Tuevo Kohonen 开始从事随机连接变化表的研究工作。从 1972 年他很快集中到联想记忆(相关矩阵)方面。1973 年 Kohonen 和 Ruohonen 宣称线性联想记忆(对于良好的性能要求线性无关向量)到存储,不是线性无关的向量寻找最优映射的联想记忆(OLAM)。这种 OLAM 不仅作为存储媒介而且它也能作为一种新型滤波器,提供了给定输入向量到所有已存储向量的一维一维的比较。1981 年、1982 年和 1984 年他的研究导致竞争学习系统的应用发展成为人工神经元系统(ANS)变化表——称作为学习向量量化(LVQ),它自动地(无指导的学习)确定来自于 n 维中足够大的一组数据点中 k 个最好的参考向量。他称这种 ANS 为自组织特征映射。他的自组织特征映射的算法与人脑中

的自组织特性相类似。他认为一个神经网络接受外界输入模式时,将会分为不同域,各个区域对输入模式具有不同的响应特征,这个过程是自动完成的。这种算法是无导师的一种学习方法,输出可以看成是输入样本特征的一种表达,它的输入可以是连续值,对噪声有较大的抗干扰性,但对较少的输入样本,结果可能要依赖于输入顺序。自组织特征映射的早期成就是精确地组织声音成为 Phonotopic(声音专题)映射和马达命令成为马达控制映射。最近,Kohonen 已经应用 LVQ 到语音识别、模式识别和图象识别。Kohonen 的工作已经集中到联想记忆的三个专题——系统理论方法、相联存储器(内容可寻址)和自组织及联想记忆。

1968 年 James Anderson 从具有基于神经元的突触的激活的联想记忆模型的 ANS 模型开始工作。Anderson 模型在输入向量和输出向量的点积上采用线性阈值函数,称这些点积的每一个为迹(trace),通过对于所有模式的所有迹加在一起,线性联想记忆(LAM)就被组成。1973 年和 1977 年又把 LAM 应用到诸如识别、重构和任意可视模式的联想这样的问题上。1968 年和 1970 年 Anderson 还用 LAM 解释激活和突触连接或者记忆矩阵之间的可能的联想。1977 年 Anderson, Silvestein 等人,在 LAM 工作上又有了重要进展,通过加正水平反馈,使用误差修正学习和用斜坡函数代替线性阈值函数,建立起称为 BSB(Brain-state-in-a-box)新模型。这种 BSB ANS 在 n 维立体的角上存储信息。通过输入在立体里面的点并允许 ANS 平衡立体的角,实现回忆。在 20 世纪 80 年代中 BSB ANS 已经被用来解释概念形成、分类和知识处理。

1979 年日本 NHK 的福岛邦彦(Fukushima K)提出了认知机模型,后来又提出了改进型新认知机(Neocognitron)模型。他采用了所谓“择优修正法”的突触修正假设,其基本思想是“在某一个神经元兴奋时,在与其相连的各个神经元中找出兴奋性最大的那个神经元,并给出它们之间的突触连接强度以一个正的修正量。

1979 年日本东京大学的中野馨提出了有名的联想记忆模型,即所谓联想机(Associatron),它能实现从残余信息(模式)到完整信息(模式)的恢复过程。

3. 80 年代的新高潮

这次高潮的到来有科学背景的支撑和被社会生产力及科技竞争的迫切要求所推动,总之,有其必然性。科学背景指的是进入 20 世纪 70 年代后,科学上不断取得了新的重大成果,Prigogine 提出了非平衡系统的自组织理论(耗散结构理论)而获得了诺贝尔奖金。Haken 研究了大量元件联合行动而产生有序的宏观表现,从而创立了协同学。数理科学家研究非线性系统发现诸如“混沌”态的动力学性质。这些工作都对研究复杂系统有指导意义。具体些说,就是通过元件之间的相互作用,系统结构由无序到有序,系统功能由简单到复杂,类似于生物系统的进化和自组织过程以及认知系统的学习过程。与此同时,由于神经科学和脑科学研究方面的新进展,例如在感觉系统特别是视觉研究中发现的侧抑制原理、感受野的概念、皮层的功能柱结构以及信息的平行处理和层次加工的观点,被证明是神经系统处理信息的普遍原则,这些原则对用机器来模拟人的智能,提出了重要的启示。

神经网络研究第二次高潮到来的标志和揭开神经网络计算机研制的序幕的是美国加州工学院物理学家 John Hopfield 于 1982 年和 1984 年在美国科学院院刊上发表的两篇