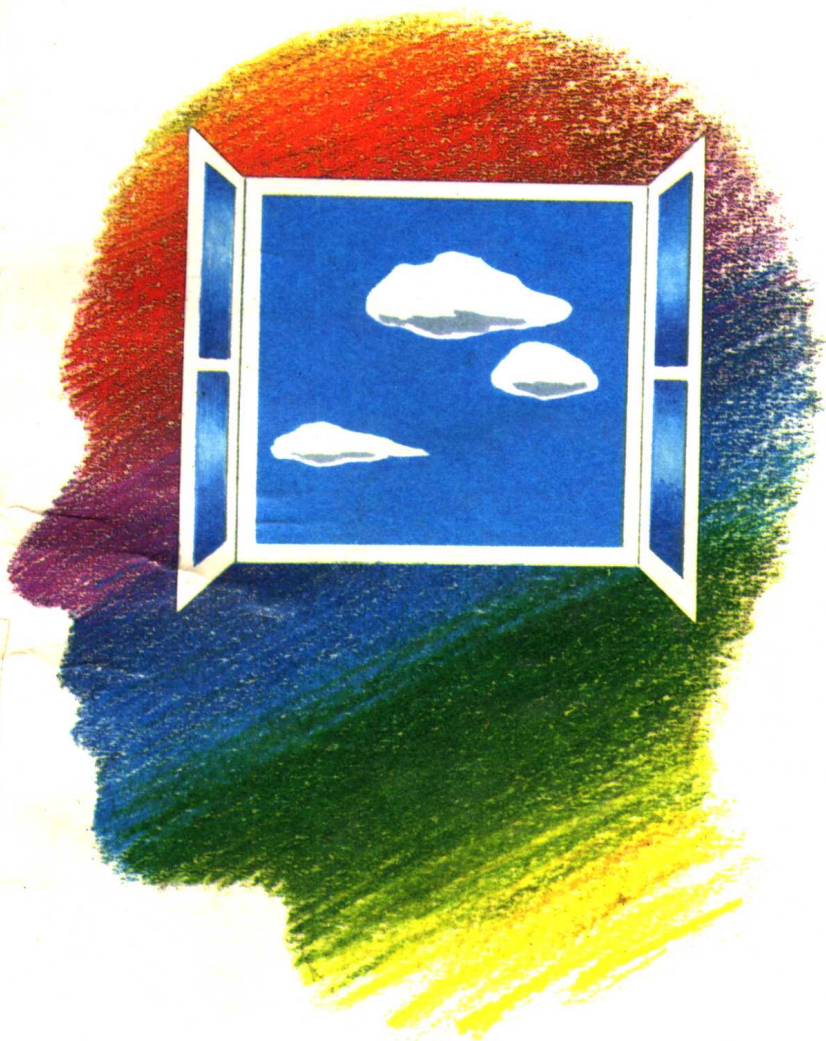


脑模拟与神经计算机

沈 政 林庶芝 著

北京大学出版社



心理学丛书

心 理 学 丛 书

脑模拟与神经计算机

沈 政 林庶芝 著

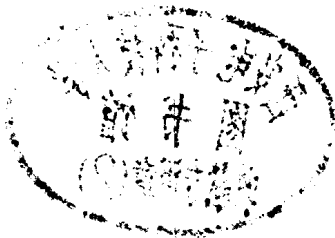
国家自然科学基金资助项目

北 京 大 学 出 版 社

内 容 提 要

本书全面介绍了神经计算机和神经网络研究的历史、现状、神经计算机类型与实现手段。在分析跨学科研究的计算神经科学方法学原则之后,阐述了系统、细胞和分子等三个水平脑模拟研究所必需的基础知识和当代研究成果。对比了机器知觉、学习和生物脑的异同,概述了视、听知觉与学习的认知科学和神经科学基本理论及其模拟研究的新进展。最后,在面孔、说话人识别和脑能量函数两章中系统阐明作者实验研究的理论观点、方法和取得的初步结果,提出与国内外同行交流与协作的问题。

本书适用于自动化科学、计算机科学、神经科学和心理科学等跨学科的研究人员、教师和研究生,可使读者得到这些领域的系统性新知识。



新登字(京)159号

心理学丛书

脑模拟与神经计算机

沈 政 林庶芝 著

责任编辑: 李宝屏

*

北京大学出版社出版发行

(北京大学校内)

国防科工委印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

850×1168 毫米 32 开本 9.5 印张 245 千字

1992 年 9 月第一版 1992 年 9 月第一次印刷

印数: 0001—2500 册

ISBN 7-301-01849-5/Q · 53

定价: 6.90 元

内 容 提 要

本书全面介绍了神经计算机和神经网络研究的历史、现状、神经计算机类型与实现手段。在分析跨学科研究的计算神经科学方法学原则之后,阐述了系统、细胞和分子等三个水平脑模拟研究所必需的基础知识和当代研究成果。对比了机器知觉、学习和生物脑的异同,概述了视、听知觉与学习的认知科学和神经科学基本理论及其模拟研究的新进展。最后,在面孔、说话人识别和脑能量函数两章中系统阐明作者实验研究的理论观点、方法和取得的初步结果,提出与国内外同行交流与协作的问题。

本书适用于自动化科学、计算机科学、神经科学和心理科学等跨学科的研究人员、教师和研究生,可使读者得到这些领域的系统性新知识。



序 言

本书是在北京大学心理学系和信息科学中心硕士研究生课程“脑与计算机”讲稿的基础上写成的。全书由六章组成，大体分为三个部分。前两章分别概括了神经计算机、神经网络和计算神经科学的研究历史、现状和存在问题。作者力图做到既反映出相关领域的背景和当代新进展，又为读者提供进行跨学科研究所需要的神经科学和心理学基础知识。第三、四章涉及人脑、电脑跨学科研究的两个专题，对比了机器、动物和人类学习与知觉过程的异同，简述了有关学科研究进展与存在问题。我们之所以选择这两个专题，是由于学习问题对神经网络理论发展是成败兴衰的关键之所在。机器知觉是北京大学视觉、听觉信息处理国家实验室英文名称 National Laboratory for Machine Perception 的中译名，这一名称标志着我们的主要研究任务。第五、六章介绍了我们已经完成的和正在进行的研究课题。面孔和说话人确认是机器和人类知觉的一种模式，我们实验室以猴和人类被试为对象正在对其脑机制从整体、细胞和分子等三个水平进行实验研究，试图从脑功能与脑能量代谢角度将其与 Hopfield 人工网络的能量函数加以对比。为此，我们已做了多年准备，取得不同行为模式中鼠脑代谢的一批数据，并形成了具有特色的方法学。这两章讨论了这种研究的理论基础、发展前景和已取得的结果。如果学科背景不同的读者能从本书受益，思考跨学科研究的结合点，并对我们的研究工作提出批评、指正或建立一种长期协作关系，将是对我们编写本书的最大鼓励。

我们的母学科和主要研究领域是生理心理学，因此这本书涉及的许多数理与技术科学问题，是我们向有关专家讨教的起步

点，恳请对书中的错误加以批评指正。

本书应献给国家自然科学基金委员会生物学部、信息科学部、北京大学视觉、听觉信息处理国家实验室、中国科技大学北京认知实验室。本书总结的研究工作是由他们资助和支持的，科大认知实验室还资助了本书的出版经费。在此向所有支持和鼓励跨学科研究的机构、领导人和专家们致谢！

作 者

于北京大学心理系生理心理学实验室

1991. 10. 31

目 录

第一章 神经计算机与神经网络	1
第一节 神经计算机的研究道路	3
一、线性单层网络的研究热潮	4
二、来自线性分割问题的打击	4
三、第二热潮序曲	7
四、PDP 热潮	9
第二节 PDP 理论的扩展与争议	12
一、PDP 基本概念及其渊源	12
二、联结性?	14
三、分布性?	16
四、非符号性和连续性	18
第三节 当代神经计算机	21
一、基本概念	21
二、现代超级数字计算机及其连接机	23
三、普及型神经计算机	28
四、专用神经计算机	30
第四节 专用神经计算机的技术实现	32
一、电子神经网络	33
二、模拟 VLSI 和神经网络	35
三、其他新技术	36
小 结	38
第二章 计算神经科学	44
第一节 计算神经科学方法学的基本原则	46
一、立足于神经科学各层次研究的最新成果	46
二、各层次的计算必须立足于行为或智能的显现特性之上	48
三、力图实现多层次模型的沟通和多学科的结合	49
四、力求多种算法相互比较	51

第二节 系统水平的脑模拟研究	54
一、行为的模拟研究	54
二、心理活动的模拟研究	61
三、脑生理功能的整体模拟	67
第三节 细胞水平的模拟研究	78
一、细胞神经生理学基础	78
二、80年代以来细胞神经生理学的某些进展	88
三、细胞水平的脑模拟研究实例	93
第四节 分子水平的脑模拟研究	99
一、分子神经生物学基础	99
二、当代分子神经生物学的某些新进展	103
三、分子水平模拟研究的实例	105
小 结	107
第三章 机器、动物和人类的学习	116
第一节 机器的学习规则	116
一、误差传播式学习	116
二、联想式学习	119
三、概率式学习	120
四、竞争式学习与神经达尔文论	123
五、基于知识的学习	127
第二节 动物和人类学习的脑机制	128
一、学习模式与学习规则	128
二、关于学习脑机制的一般问题	134
三、小脑在简单运动条件反射中的重要作用	138
四、长时程增强效应(LTP)与突触可塑性	140
五、海兔的学习行为与腺苷酸环化酶的变构作用	143
第三节 动物学习的脑模拟研究	147
一、瞬膜经典条件反射的模拟研究	147
二、躲避学习的 LI 模型	153
三、Hebb 规则的历史局限性	155
小 结	157

第四章 机器知觉及其生理与心理学基础研究	163
第一节 机器视觉	164
一、电子图像系统和专用神经计算机	165
二、图像信号处理	168
三、模式分类与景物理解	171
第二节 视觉认知理论与模拟研究	173
一、视觉认知理论	173
二、视觉认知过程的模拟研究	178
第三节 视觉信息加工的生理基础及其模拟研究	184
一、视觉信息加工的生理基础	184
二、视觉的生理模型	189
第四节 机器和人类的口头言语知觉	194
一、机器的言语知觉	195
二、听觉神经网络与口头言语识别	197
三、言语知觉的认知理论	202
四、言语知觉的生理基础	205
小 结	206
第五章 说话人和面孔认知的基础研究	213
第一节 说话人的噪声识别	214
一、听觉模型	215
二、说话人识别的声学参数和神经网络	216
三、说话人识别的生理心理学研究	218
第二节 面孔识别的多学科研究	223
一、面孔认知的基础研究	224
二、面孔认知的应用基础研究	228
三、面孔认知的实验研究	232
第三节 认知神经心理学的实验研究	239
一、视觉和空间信息处理的神经心理测验	240
二、听觉信息处理的神经心理测验	244
三、脑功能的多因素模型	245
小 结	248

第六章 人工网络的能量函数与生物脑的能量代谢	254
第一节 Hopfield 模型及其能量函数	255
一、基本理论概念	255
二、网络算法	257
三、Hopfield模型的扩展	258
第二节 生物脑的能量代谢与认知功能	260
一、脑能量代谢的特点和一般途径	261
二、二核苷酸类辅酶的能量传递作用	262
三、认知功能与脑能量代谢	264
第三节 行为模式与二核苷酸类辅酶	266
一、二核苷酸类辅酶的荧光特性及其活体测定技术的研究	267
二、作者所在实验室采用的激光-荧光活体测定技术	268
三、二核苷酸类辅酶与动物行为	272
四、低功率激光的生化与行为效应	278
第四节 分子计算机原型与蝶呤类分子	281
一、信息大分子原型	281
二、二态分子计算机原型	283
三、蝶呤类分子	286
四、电子能量直接传递与物质微结构探测	288
小 结	289

第一章 神经计算机与神经网络

1987年,首届世界神经网络会议上,著名学者 T.Kohonen 指出,人脑的功能与现代数字计算机至少有六个方面的巨大差异^[1]:

(1)生物脑或神经系统并不运用数字或逻辑回路的原则。

(2)神经元或突触都不是双稳态的记忆器件。因此自旋玻璃等模型与脑的神经网络毫不相干。

(3)脑内神经计算过程并不存在机器指令或时间控制码子。因此,不存在“脑编码”(brain codes)。

(4)脑内的神经回路并不是自动机,并不实施迭代计算过程。

(5)在脑网络内并不存在所谓解决问题的回路、抽象思维回路、组合优化回路或决策回路。

(6)即使在高层次上生物脑的信息加工本质上也不同于数字计算机。

显然,神经计算机的研究力图在生物脑与数字计算机之间架起桥梁,所谓神经计算机是一类不断吸收经验而自行扩大运算能力和解决问题能力的机器。它的结构类似生物脑(brain-like)及其相互联结的神经元,其运行原则是并行分布式的,其获取知识或存贮信息并不完全由外部编程输入,可以经自身学习或训练而自我生成。这种计算机是人工神经网络的硬件实现。它可以解决计算机科学在过去30多年所遇到的一些难题,特别是像连续语言的识别、自然语言理解、图像模式识别、景物理解、现实世界不完善知识的处理、机器人适应性运动的控制、约束系统的组合优化、特大数据库的统计分析等问题,神经计算机之所以能解决这

些难题，是由于与传统数字计算机相比有许多不同特点^[1,2]。

(1)传统计算机处理离散数字信号，以1和0二进制数字运算，具有一定的数学精度；神经计算机则处理连续模拟信号，例如从白色到黑色之间连续灰度变换的信号。

(2)传统计算机利用数字函数或逻辑函数做“全或无”的运算；神经计算机对浑沌的、不完全的或相互矛盾的数据进行权重的变换。

(3)传统计算机按固定的结构顺序处理数据，所以运算可以控制，结果可以预测；神经计算机可独立地形成处理数据的方法，常给出人们预想不到的结果。

(4)只要给以足够条件，传统计算机对某些问题总会给出精确的回答；而神经计算机不仅能完成上述任务，而且对高度复杂问题也能迅速给出逼近的答案。

(5)在较大的数据库中，传统计算机通过分类而找到精确的匹配；神经计算机在大数据库中得到十分逼近的匹配。

(6)传统计算机存贮信息并较容易地提取信息；神经计算机对信息的存贮可自动提取任一部分信息，并能得到全部有关的事实。

(7)传统计算机串行工作，而神经计算机并行分布式工作，各组成部分可同时参与运算，运算速度极快。

(8)在传统计算机中各种数据存贮在一定地址，该地址发生故障，则此数据无法提取；神经计算机信息存贮分布于全网络各单元连接的权重变换之中，故某些单元障碍并不影响信息的提取，说明它有鲁棒性。

(9)传统计算机要求准确地输入条件，才能给出精确解；神经计算机只要求部分条件，甚至对某些错误的输入，也能给出较好的答案，这便是它的容错性。

(10)传统计算机由大量集成芯片构成，特别是高存贮量的记忆芯片，集成电路密度可达 $1.25\mu\text{m}$ 水平；神经计算机的主要部

分由神经网络构成，有较大的分布密度，可达 $0.1\mu\text{m}$ 的水平。

尽管当代神经计算机与传统数字计算机相比具有这样多的特点，并可将之比作“脑样计算机”；但它与人脑相比却差得非常悬殊。首先，人脑约有 10^{12} 个神经元，密集地排列在容积不大的颅腔内，每个神经元约有 10^4 个突触与周围神经元发生联系。这种高密度广泛联系的大系统是何人工神经网络所无法比拟的。在脑这个大系统内，神经信息的传递既有二进位“全或无”调频式的神经脉冲机制，又有感受器电位、突触后电位、后超级化电位或后兴奋电位等“级量反应”的模拟机制，既有电信号表达形式，又有多种化学信号的表达形式；既有突触前神经末梢囊泡内量子释放神经递质的离散机制，又有突触后受体活性调节的模拟机制；既有二态离子通道机制，也有多态离子通道机制等。神经信息的这些多种表征和传递形式，是人工神经网络中信息表征所无法比拟的。这些内部机制的复杂性与外在显现行为(emergent behavior)之间的关系更是神秘莫测，正是这些问题的基本理论认识，才是发展和改善人工神经网络的重要基础。“考察这个领域的历史表明，在激动人心的高潮时期过后是一个相对安静的低潮时期，出现这种现象的原因之一，是缺乏实现各种新思想的技术手段，二是缺乏对神经系统的了解”^[4]。为了克服人工神经网络的历史局限性^[5]，加强计算神经科学对脑模拟的研究，已提到科学发展的日程中来。本章从历史与现实两个方面，阐明神经计算机的发展与计算神经科学之间所存在的相辅相成关系。

第一节 神经计算机的研究道路

模拟人脑的功能，发展智能化计算机，是计算科学从始至终绝大多数学者们的美好理想。回顾神经计算机的研究道路，大体可以分为四个历史时期：1943—1969年第一个热潮；1969—1982年的相对低潮；1982—1987年第二热潮序曲；1987年至今第二

热潮。

一、线性单层网络的研究热潮

本世纪 40 年代, McColl、Wiener 和 Shannon 的一批著作相继问世, 奠定了信息科学的理论基础。1943 年, W.S. McCulloch 和 W.Pitts 第一次提出神经节(neural node)的概念, 把神经元看成二态开关, 利用布尔逻辑函数对神经过程加以数学模拟^[6]。1948 年, Wiener 在其控制论的著作中^[7], 提出 伺服机反馈自稳定系统概念。1949 年心理学家 Hebb 在其专著中^[8]提出神经元群、突触和返响回路的理论概念, 成为脑模拟研究的经典理论。1958 年 Rosenblatt 提出了著名的“知觉器”的模型, 指出知觉过程具有统计分离性^[9]。他的知觉器具有强化控制系统作为“教师”, 从外部指导网络的学习功能。1961 年 Caianiello 发表了关于神经网络数学的理论著作^[10], 提出了“神经元方程”, 将神经元作为二态器件, 对其机能的动力过程利用布尔代数加以模拟, 进而分析了细胞有限自动机的理论模型。在这些数学模拟理论产生的同时, 还出现了一批用电子器件进行电子模拟的跑迷津的金属老鼠、条件概率机的龟模型, 以及会下棋的机器等等, 使脑模拟的研究领域十分繁荣, 形成模拟研究的第一个热潮。这些人工神经网络大都是单层线性网络, 具有较大的局限性。

二、来自线性分割问题的打击

1969 年美国麻省理工学院出版社出版了一本关于“Perceptrons”的著作^[11], 作者 Minsky 和 Papert 以异或问题(exclusive or problem)为例, 证明即使对该函数的线性分割这样简单的问题, 单层人工神经网络都无法解决, 从而在理论上给人工神经网络研究以沉重打击, 致使美国一些企业家和科学基金组织停止对脑模拟研究的资助, 使火热的研究工作停顿下来。这个研究领域的学者纷纷转向其他研究课题。那么, 究竟什么是线性分割

呢？现以异或函数为例加以解释。

异或函数有两个变量 x 、 y ，相当于单层网络的两个输入端，只有两者之间任一个为 1 时，输出为 1，否则均为 0，即当 x 、 y 均为 0 或均为 1 时，输出为 0。如果把这一函数在一个二维平面上表示出来（图 1-1），当 $x=0$ 、 $y=0$ 时，点 A_0 为 0；当 $x=1$ 、 $y=0$ 时，函数值为 $B_0=1$ ；当 $x=0$ 、 $y=1$ 时，函数值为 $B_1=0$ ；但是要求 $x=1$ 、 $y=1$ 时的函数值 $A_1=0$ 则无法在这个平面坐标上表达出来。如果让单层人工神经网络（知觉器）解决异或函数问题，设 x 、 y 分别是两个输入变量， w_1 、 w_2 分别是两个输入与输出之间的连接权重，则网络输出为： $xw_1 + yw_2$ 。设定网络输出阈值 $T=0.5$ ，即 $xw_1 + yw_2 > 0.5$ ，网络解为 1 的输出； $xw_1 + yw_2 < 0.5$ ，则网络给出 0 的输出。所谓线性分割，就是要求在一个二维平面上划出一根线（阈值 $T=0.5$ ），将该平面分割为两部分，线的一侧全部输出为 1，另一侧全部输出为 0，从图 1-1 可见，将 A_1 放在阈值线上半部的平面中，其值为 1，不符合异或函数的要求；将 A_1 放在阈值线以下的平面部分，虽然输出可为 0，但输入条件不能满足异或函数 $x=1$ 、 $y=1$ 的要求。

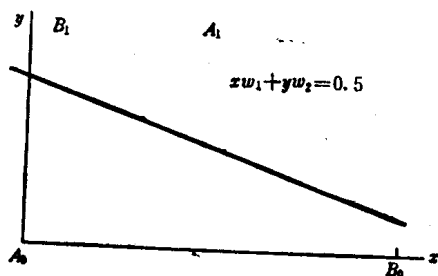


图1-1 异或函数线性分割图

因此，不可能在这个二维平面中划出满足异或函数要求的分割线。换言之，单层人工神经网络不可能解决类似异或函数的那些不存在线性分割的问题。没有线性分割解的问题非常之多，所以线性分割所限定的单层人工神经网络的应用价值就很小。

二维平面的线性分割解是一条直线，三维空间的线性分割解是一个平面，四维以上超立方体(hypercube)的线性分割解是一个超平面(hyperplane)。那么怎样确定一个函数是否存在线性分

割解呢？人工神经网络研究的第一个热潮冷落下来之后，对如何解决线性分割问题很快有了较明确的认识，但此时计算机科学界已为大步前进的人工智能研究热潮所笼罩。似乎不需要考虑脑功能的网络结构特点，只要把握住输入与输出之间的逻辑关系，就可以实现人工智能，这就是心理学界或科学界称之为黑箱子的方法学原则。

1956年，两位著名的心理学家 Simon 和 Newell，把黑箱子原则用于研究比简单运动行为更复杂的智能活动。他们把握住输入和输出之间的逻辑关系，发展问题解决的理论，并编制人类历史上第一个人工智能软件，称之为逻辑理论家(LT)，从而开辟了人工智能研究的新领域。不久，他们发现了这个软件中的严重不足之处，于是又加以修改，1972年终于形成人工智能领域中的经典著名程序“一般问题解决者”(GPS)，采用了手段-结果分析的解决问题策略，把起始状态和目的或目标状态加以比较，从中变换出一些中间状态，一步一步地从始态逼近目标状态，从而使问题得以解决。在进行分析和变换时，可以从始态向目标态进行正向分析，也可以从目标态到始态进行反向(后向)分析。总之，这个经典工作所奠定的人工智能研究路线，可直接分析人类解决问题的逻辑过程，无须考虑大脑内部发生的神经生物学过程。因而，人工智能研究把人类智能活动的物质本体——大脑置之度外。对于这个研究领域来说，人类认知活动的逻辑关系和外部规律，就将智能活动包括无遗。用人的认知规律编制计算机软件，再由计算机运行这些程序，模拟人类认知过程，这就是人工智能研究的宗旨，是认知心理学与计算机科学两个领域的交汇点。这个领域25年中所取得的辉煌成果，在1981—1982年间出版的《人工智能手册》^[12,13]中，做了较全面的总结，包括搜索、知识表达、自然语言理解、口头言语理解、AI研究的程序语言、AI在科学-医学-教育中的应用、认知模型、视觉、自动程序、自动演绎、归纳推理、学习、问题解决和组合优化等方面所取得的进展和存