



BEIJING GONGYE DAXUE CHUBANSHE



国家科学技术学术著作出版基金资助

神经信息处理

顾凡及 梁培基 著

北京工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

神经信息处理/顾凡及, 梁培基著. —北京:北京工业大学出版社, 2007.10

ISBN 978-7-5639-1768-6

I. 神... II. ①顾...②梁... III. 神经系统-信息处理 IV. Q189

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 074557 号

神经信息处理

顾凡及 梁培基 著

*

北京工业大学出版社出版发行

邮编: 100022 电话: (010)67392308

各地新华书店经销

徐水宏远印刷有限公司印刷

*

2007 年 10 月第 1 版 2007 年 10 月第 1 次印刷

787 mm×1 092 mm 16 开本 20 印张 408 千字

ISBN 978-7-5639-1768-6/T·299

定价: 50.00 元

神经信息处理研究 内 容 简 介

以研究脑功能为目标的神经信息处理研究,是 21 世纪的科学前沿之一。在这一领域中,神经科学和数理科学以及信息科学的融合和交叉起到了至关重要的作用。本书的两位作者是从数理科学和工程科学转入神经科学领域并在其中工作了多年的,对于如何把这两种不同的学科有机地结合起来,有着切身的体会。他们深知以数理和信息科学为背景转入神经科学领域的研究者对相关知识的需求以及面临的问题。对于这一领域的一些前沿问题也形成了自己的思考,并总结在本书中。

本书的主要读者对象是对神经科学有兴趣的数理科学和信息工程的研究者及学生。内容主要包括三部分:学习或从事有关神经信息处理研究所必须具备的神经生理学知识;运用数理科学和信息科学的思想方法解决有关神经系统的信息处理机制的范例;探讨当前有关神经信息处理研究的一些热点问题,对将来可能的发展方向 and 可能成为新热点的问题进行了展望。

希望读者在读完本书之后,能对有关神经信息处理的神经生理基础有比较深入的了解;能从前人的成功经验中吸取教益,领会如何立足于神经生物学事实的基础之上,运用数理科学和信息科学的思想、理论和方法,研究神经信息处理的机制问题,并在可能的时候把研究成果付诸实践;通过了解神经信息处理研究在当前和可预见的未来的某些热点问题,熟悉这一交叉学科的前沿动态。

作者简介



顾凡及, 1938 年生。复旦大学生命科学学院退休教授, 博士生导师。1961 年毕业于复旦大学数学系。其专长是生物控制论和计算神经科学。先后发表论文近一百篇, 并有专著和译著多种。由他主持的研究曾荣获国家教委科学技术进步奖三等奖两项。他现在是“Cognitive Neurodynamics”杂志的责任编辑, 亚太地区神经网络联合会理事会观察员, 中国神经科学学会计算神经科学和神经工程专业委员会副主任, 中国自动化学会生物控制论和医学工程专业委员会委员, 中国生物物理学会名词审定委员会委员, 上海市非线性科学研究会常务理事, 上海市欧美同学会常务理事。



梁培基, 1962 年生。毕业于上海交通大学精密仪器系(工学学士、硕士)和牛津大学生理系(生理学博士)。现任上海交大学生命学院教授, 博士生导师。目前研究领域是视网膜视觉信息处理。研究工作受到国家科技部 973 项目、国家自然科学基金委员会、国家教育部的经费支持。相关研究形成研究论文数十篇, 并有专著和译著数种。目前担任中国神经科学学会计算神经科学和神经工程专业委员会副主任, 中国生物物理学会青年工作委员会副主任, 中国自动化学会生物控制论和医学工程专业委员会委员, 《生理学报》常务编委, 《生物物理学报》编委。

序 言

神经信息处理是当代的科学前沿和热点课题之一。《神经信息处理》是一部引导相关研究人员在脑与认知科学、信息科学、计算科学之间进行交叉研究的专著。脑的复杂的认知过程包括物理过程、化学过程和计算过程。当今的神经科学家已经清楚地了解到单个神经元是如何工作,如何与紧邻的神经元通讯的。但是,对于再高一个结构和功能层次就不大清楚了,如神经元如何组成功能环路?这些环路如何编码行为?经验如何改变这些环路的活动性和连接以修饰行为?对于更高层面的认识就更加困难了,如“抉择”在脑内是怎样进行的?“价值”是怎样被评估的?探索这些问题,显然需要物理学、数学、计算科学、信息科学、系统科学、控制论等的共同参与,以便揭示脑和认知过程的基本原则。这是问题的一个方面。问题的另一个方面是正在发展的“人工智能”、“自然计算”、“进化计算”、“脑式计算”、“机器思维”、“人工生命”等都渴望从脑与认知科学领域得到启发。在两个方面的界面上需要信息交流,交流需要“语言”。《神经信息处理》一书可能提供这样的信息交流“语言”,互相理解沟通的科学“语言”。记得,20世纪80年代,在霍普菲尔德神经网络模型的带动下,掀起了人工神经网络研究的热潮。那时,我曾与一位自动化科学家交谈。我讲到神经元之间的化学突触是由递质(transmitter)来传导信息的,他却把“递质”听成了“地址”。我说得很起劲,他却越听越糊涂。这位朋友问过我:“赫布(Hebb)突触学习律(即神经元之间突触连接强度的可塑性,它和神经元的活动性有关)有没有严格的神经科学证明”?这说明,我们大家都需要一本好书,在交叉领域中,在“银河两岸”架起“金桥”。顾凡及和梁培基教授,急大家之所急,勇于挑起写这样一部著作的重担,实在是我们的幸运。这些也正是本书作者的愿望:“我们在写本书时的一个理念,就是想写出一本真正跨学科的书。希望读者读了以后,不仅得到具体的材料,而且还能领悟到跨学科研究是怎么一回事,跨学科研究是结合,而不是混合”;“交叉学科并不是不同学科的线性混合,而是它们的有机结合”;“不同的学科不仅背景知识不同,研究工具不同,甚至连思想习惯也往往是不同的。如果不了解这一点,就做不好交叉学科的研究”。

他们两位是出色的相关领域的研究者,顾教授积40年科研、教学和写作之实践,经验丰富;梁教授年富力强,正活跃在科研与教学的第一线。两位十分“体察民情”,知道我们大家需要什么;两位又是有广泛的国际交流和联系的科学家,知道前沿和热点在哪里;两位又是著作甚丰的作者,是极好的搭档,可以和谐地合作。著作者在该书强调了几个重要的观点:

“对于建模和理论工作来说,一定程度的简化是不可避免的,也是必要的。但在作这种简化的时候也千万不要忘记这种模型或理论是建立在哪些简化假设的基础之上的,而在进一步发展的时候就要突破某些假设,使之更接近于生物学真实”。

“定性的理论可以允许一些含糊之处,定量的建模和仿真则要求据以建模的所有基本事实和假设都必须是清楚的、定量的”。

“一些学者曾经乐观地认为,只要把各种各样的神经元特性都搞清楚了,那么大脑之谜也就最终得到了解决。但是以后人们发现,即使是神经元群的性质也不是组成它的那些神经元的性质之和,更不要说神经系统有那么多层次了”。

“脑系统是在许多组织层次上运作的,每个层次都有它自己的时间尺度和空间尺度”;“鉴于不同层次的时空尺度相差很大,它们之间的因果关系比起同一层次内部的因果关系来说要模糊不清得多,当不同层次相隔较远时情形更是如此,思索和描述不同层次之间的相互关系就成了科学家所面临的最困难的任务之一”。

“神经系统是一个多级系统,它有许许多多层次;神经系统又是一个高度非线性的系统,每个层次都表现出它的下一个层次所不具备的某些突现性质(emergent property)。要想完全遵照还原论的设想,用最低层次的性质去说明最高层次的性质是很困难的。中枢神经系统的某些功能是在各个单元结构之间的相互作用基础上涌现出来的集体行为,而神经系统中各个单元之间的联系也可以随环境条件而随时改变”。

《神经信息处理》一书各章节设计恰当,顾及到各个方面,有经典有热点。该书好读,每讲到一个科学发现、一个原理或一种理论时,都会讲一段科学发现的历史和故事,令人读起来很有兴味。如,在讲到学习记忆的时候,就讲述了蒙特利尔神经病学研究所的科学家米尔纳(Brenda Milner)对癫痫病人亨利在两侧颞叶内侧进行部分切除后学习记忆损伤所做的追踪研究近 50 年的故事。书中文笔流畅,严谨而亲切。我前些日子正想找有关信息和统计熵的表述,立刻从书中受到了启发。我也很荣幸地成为该书的第一个读者。

我自己知道,写东西很苦,写好书更苦。该书写得逻辑清晰,繁简恰当,图文并茂,内容精准,深浅适度。我祝愿该书能在大家的书架上站得住,成为神经信息处理研究工作者的好朋友。

中国科学院院士

中国科学院神经科学研究所研究员

中国科学院生物物理研究所研究员

郭爱克

2007 年 5 月

卷首语

2003 年秋,北京工业大学出版社的张瑚编辑邀约有关教授自选主题撰写与生命科学前沿领域有关的书。这正好是我执教的最后一年,2004 年在从教 42 年之后终于要退休了。趁脑子还没有太糊涂,身体也还行,工作几十年的印象还深,又有比较富裕的时间,把自己 40 多年来从事交叉学科——神经信息处理的甜酸苦辣总结一下,把自己从一个对神经科学一无所知的门外汉转到能在这个领域进行一些研究的科技工作者的切身感受写下来,把有关材料搜集组织起来,写成一本书,以供类似于我这样出身于非生命科学而又对脑科学非常感兴趣的后来者参考,应该是一件有意义的事,也算是对自己科学生涯的一个总结。于是就不自量力地提出要写这么一本书。由于张瑚编辑对书的质量要求很高,我觉得仅仅自己一个人的力量写不好这么一本书,于是提出和梁培基教授合作来写,承蒙梁教授不弃同意合作。这样和梁教授几经讨论,决定采取有限目标,把目标定位为主要是写给对脑科学有兴趣的数理科学和信息工程的科技工作者、研究生及高年级大学生看的有关神经信息处理的基础读物。这是因为,一来根据我们自己的经历知道确实有这么一个读者群;二来我们本来就是此类读者的过来人,自己当初就希望有这样类型的一本书,我们也自信比较了解他们的需求,这样就有可能把这本书写得比较切合他们的需要;最后,现在也还缺少这样的书。

根据上述定位,我们设想这本书的内容主要包括三部分:为了阅读有关脑信息处理的专著和原始文献所必须具备的神经生物学知识(第一章)以及研究方法(第二章);运用数理科学和信息科学的思想和方法解决有关脑内信息处理机制的成功例子(第三章);当前有关神经信息处理研究的一些热点问题(第四章),以及在不久的将来可能会成为新热点的一些问题(第五章)。我们觉得这三部分对于上述的读者群是会有用处的,有可能帮助他们比较迅速地进入角色,少走弯路。我想在下面谈谈为什么这样选材,以及在材料取舍问题上的一些考虑。

在这里首先要强调的是,交叉学科并不是不同学科的线性混合,而是它们的有机结合。不同的学科不仅背景知识不同,研究工具不同,甚至连思想习惯也往往是不同的。如果不了解这一点,就做不好交叉学科的研究。这是我 40 多年科学生涯的最深切的体会。

我本人是学数学出身的。学数学使我们在研究任何问题时都不满足于定性的叙述,而要想方设法进行定量的分析;学数学也使我们学会透过繁琐的表面现象进行抽象的本领和严格的逻辑思维;当然学数学还给我们一整套数学工具。在大

学一年级的時候，我一方面为数学严密的逻辑思维之美所震撼，另一方面又误以为学数学只要从某个公理系统出发进行逻辑推导就可以了，片面地认为一个数学系的学生可以不需要其他学科的知识。1959年冬，大学四年级一开始，领导上分配我给本系的大学生上普通物理课，于是不得不学起物理学的课程。刚开始时，学纯粹数学的思想习惯使我对学习物理学很不习惯，老想用学纯粹数学的一套方法来学物理，自然是学不好的。只是经过了一段时间之后，我才开始慢慢体会到物理学的思想方法：从事实出发，抓住主要的因素，忽略次要的因素，建立理想化的模型，然后对模型进行定量分析，再把结果和事实进行比较，以检验模型的正确与否，对于不符合之处，修正模型而开始新一轮循环。毕业以后组织上分配我到中国科技大学生物物理系从事生物控制论的教学和科研工作，并让我到中国科学院生物物理研究所郑竺英先生领导的实验室进修了四年。郑先生是我国生物物理学的奠基人贝时璋教授的嫡传弟子。她是学生物学出身的，然而她坚持学完了电视大学的高等数学课程，对于数理科学非常了解，思想十分活跃，所以她讲的话，我比较容易理解。另外，郑先生对科学的热爱，思想的敏锐、活跃，为人的谦虚、正直，对年轻人的关心都是我终身难忘的。“大师兄”汪云九先生原来学的也是数学，比我早两年入门，对于跨学科研究当时已经颇有心得，其他的师兄弟王湘生先生、陈传娟女士等来自不同的学科，包括医学、物理学、数学和生物学等，都是热爱科学、聪明勤奋的青年人。当时我们一批师兄弟都还没有成家，又正值三年困难时期前后，阶级斗争还没有到天天讲的时候，所以那时我们整天在一起讨论的就是科学问题。更有幸的是贝先生在百忙之中也常常到我们实验室来指导。贝先生广博的知识，平易近人的长者风度，尤其是他在科学上的高瞻远瞩和对新事物的敏感，都使我们折服。在当时中国的条件下，应该说这是一个极为难得的进行跨学科研究和训练的好环境。至今回想起来，这四年使我终身受用，相当于读了一个研究生，所以我至今常常把中国科学院生物物理研究所称为我的“母所”。因此在本书出版之际，我也要趁此机会向现在已经80高龄的郑竺英先生表达我最由衷的谢意。更要向年逾百岁的贝时璋教授致以最崇高的敬礼。

当我开始认真学习生物学的时候，生物系统的复杂和奥妙使我入迷。但在当时我还不习惯学习生物学的知识，我必须记住大量的事实，而不一定能讲出多少道理。我发现当时大多数生物学家的信条是只相信事实，观察和实验几乎就是当时生物学研究的一切。事实上，后来我也体会到要真正了解生物学事实，自己参加做实验，或至少去看实验，是必不可少的。对于生物学来说，“实践是检验真理的唯一标准”显得更为突出。有关生物学的一切研究都必须基于生物学事实之上，而所有的结论也都必须受到生物学事实的检验，并且要解决生物学上的问题。我开始体会到搞跨学科研究不仅需要不同学科的知识，而且还必须适应不同

学科的思想习惯。不同的学科有不同的思想习惯，这些习惯都有它们自己的合理性和优点，但在一些方面又有其局限性。我们偶尔会听到某个数学家对别人说：“给我数据，我来给你分析”。我们可以判断这位数学家非常可能以前没有进行过多少跨学科的研究，所以才会说出这样的话来。事实上，如果对研究的对象没有足够的了解，就不可能了解分析结果的意义，因此也无从判断分析是否正确。我们偶尔也还可以听到个别生物学家对建模不以为然，说这只不过是数学游戏，或者说是“paper work”。而事实上，如果没有理性的思维，光依靠感性认识就很可能陷入盲目性而不能自拔。如果每个人只坚持某一种传统学科的思想习惯，那么不同学科出身的人就很难理解对方的意思，更不要说像控制论的奠基人维纳(Wiener)^[1]所说的那样：“能在同事们还没有以完整的形式表达出自己的新想法的时候就能理解这种新想法的意义。”而这一点正是不同学科的人能进行深入合作的关键。我们在写本书时的一个理念，就是要写出一本真正跨学科的书。希望读者读了以后，不仅得到具体的材料，而且还能体会到跨学科研究是怎么一回事。就像一位前辈说过的那样：“跨学科研究是结合，而不是混合”。

接下来是不堪回首的十年动乱，把最宝贵的青春年华全都浪费了。拨乱反正以后，回到原来的研究领域，才发现真是“山中方一日，世上已千年”。20世纪五六十年代在学术界还有很多争议的生物控制论的核心部分——跨学科的神经信息处理的研究，已经成为科学前沿，从中不断发展出新的科学分支，如神经网络、人工智能、计算神经科学、神经信息学、神经工程等，受到世界科学发达国家的普遍重视。我们国家对相关课题也非常重视，常常被列为国家自然科学基金委的重点资助项目。至此，我不能不佩服贝时璋先生的战略眼光！我不想再用我碌碌余生的经历来打扰读者诸君。只是想说，感谢改革开放，给了我下半生一个好机会。

我们的这本书并不是一本神经科学的教科书，也不追求面面俱到。道林(Dowling)^[2]说过：“神经科学的教科书正在变得越来越百科全书式，而在我看来，这对于初学者以及对这个领域的基本原理感兴趣的人来说也就变得越来越少有用处。”我在阅读一些神经科学的教科书时也常常有这样的感叹，当然这也是由于我不是一位神经科学科班出身的人的缘故。根据我们编写此书的目的，我们只是汇总了从整合的角度，在离子通道以上的水平上理解神经信息处理所必需的神经科学知识，经过消化吸收之后重新加以组织。和这个目的关系不太密切的问题，甚至是神经科学中的一些极为重要的内容，例如分子神经生物学的内容和发育神经生物学的内容在本书中就全然没有涉及，而这可能是许多神经科学巨著的主要内容。即使是有关神经信息处理的内容，我们觉得道林的意见也是有道理的。阿比伯(Arbib)^[3]在1995年主编了一本有关神经信息处理的手册——《脑理论和神经网络手册》，这本书的第一版一共有1118页，重量超过了3 kg。但是亚历山大

(Aleksander)^[4]1995年在Nature上所发表的一篇书评中认为还有许多极为重要的内容没有在该书中得到反映。我们自然不会奢望本书的涵盖面会比这样一本巨著更广。我们既做不到,也不想这么做。因此我们在这方面也不得不有所取舍,除了内容的重要性这一根本考虑之外,还有一个考虑就是只讲我们自己觉得讲得清楚的问题。如果我们自己也觉得糊里糊涂,写出来又怎么能使读者读了之后能有所收获呢?例如,我们完全没有谈到痛觉、平衡觉和味觉信息处理等问题。虽然神经系统从本质来说是一种电-化学机器,化学因素在神经信息处理中也起着极为重要的作用,然而在本书中我们在这方面讲得很少。这只是由于我们自己对此也不太熟悉的缘故。尽管我们现在越来越感到化学作用在神经信息处理中的重要性,例如,神经调质对高级功能起着至关重要的作用,但是遗憾的是,我们没有能力在本书中把这个问题讲清楚。尽管这样,我们还是希望本书能够自成体系,包含读懂本书所必需需要的神经生物学知识。也希望这些知识能够使读者在读完本书之后,有了进一步在这个领域中学习或者工作的愿望,有了自学自己感兴趣的有关神经信息处理的神经生物学知识的能力。如果能做到这一点,也就可以聊以自慰了。因此,当我们觉得某个主题有必要讲时,就希望能讲到一定的深度。而不像一些科普读物,或者像某些人工神经网络的专著那样对神经系统的描写过于简化。我们不想使读者以为神经元就是一种要么兴奋要么抑制的像开关一样的东西,我们希望读者能了解神经系统本身的复杂性,从而引起他们进一步学习的兴趣。当然,我们也不可能过于深入,如果读者要真正能够就神经信息处理的某一特定课题进行研究,他或她还必须自己去补充相应的神经生物学知识,去找一些专著,甚至原始文献来读。我们在工作中也正是这么做的。我们希望当读者这么做的时候,会发现本书已经给了他们必要的基础,他们已经有这样做的能力了。在本书的最后我们也给出了一些推荐读物的书目和最重要期刊的清单,对于下定决心要在神经信息处理这一领域耕耘的读者,我们建议他们读一下这些读物。这对于想搞研究的读者会有很大的帮助。因为在国内,并不是每个单位都有充足的图书经费,可以订阅大量的国外期刊。最方便的办法就是到各大出版社的网上去查。你可以查每个出版社出版了哪些杂志,然后点击杂志的卷期号来浏览每一期的文章;你也可以给出关键词,搜索该出版社出版的杂志有哪些和该关键词有关的文章。我们还在“结语”中给出了有关计算神经科学的最主要的研究中心和研究人员的网站地址,从那里可以得到大量信息。所以千万别小看了这分网址清单,这是你取得最新、最重要的第一手资料的宝库。

要学会跨学科地研究神经系统,要学会怎么把数理科学和信息科学的知识运用到神经科学的研究上去,当然最好的方法是自己去实践。但是在一开始的时候,看看前人是怎么做的,特别是其中的一些成功的例子,是非常有好处的,可以使我们避免走弯路。因此本书的第二部分,就把重点放在一些经过时间考验的

跨学科研究的成功例子上。其中的一些经典例子尽管已经不算新了，但是它们带给我们的启发还是青春常在的。我们企图把这些例子能讲得透彻一些，使读者感悟到神经信息处理的跨学科研究就应该这么样来搞！我们也写了一些自己的研究成果，当然这些成果绝对谈不上“经典”，之所以这样做只是因为这些结果是自己研究出来的，所以能讲得最清楚。

好的例子要经得起时间的考验，反过来说就不那么新了，要从中再发掘什么研究课题可能不再那么容易。所以在本书第三部分中就来谈谈当前的一些热点问题，以及在我们看来在可预见的未来会成为热点的一些问题。当然，这样的问题既然能成为或有可能在将来成为热点问题，就一定还没有得到公认的解决，各种说法都还没有足够的时间考验。我们将把问题的由来和现状摆在读者面前，启发读者的思考和作出自己的判断。由此出发，读者再自己去搜索阅读最新的原始文献，也许会从中找到感兴趣的研究课题。由于现在的文献非常之多，而且通过上网检索都很容易，因此本书就不一一列出了。

脑是宇宙中最复杂的系统，尽管近 20 年来，在脑研究上世界各国已经投入了大量的人力和物力，也取得了很大的进展，但离开揭示大脑之谜距离还很遥远，甚至有关神经信息处理的一些基本问题，譬如说神经编码的问题，都还不清楚。我们在书中也只能根据当前的认识来讲这些问题，对于现在不清楚的问题，就老老实实在地如实讲，这和基础课的教科书是完全不同的。记得我在复旦大学为全校各系的本科生开设的“脑信息处理”的公共选修课，课后有一位好学的学生来问我各种问题，我常常回答“不知道”。有一次，这个学生就说了：“你这个老师怎么老是回答不知道！”我回答说：“这是因为确实不知道，不仅我不知道，据我所知，世界上没有人知道。也正因为大家都不知道，这门学科才会这么有趣和有潜力！”所以在本书中不仅要讲大家公认的事实，也要指出目前不清楚的地方，甚至对一些流行的观点也会提出一些质疑（往往是从不同学科的观点提出的）。因为我们觉得一旦思维陷入某种定势，以为大家都认为对的就一定是对的，那么就可能陷入盲目性而走到死胡同里去了。数理科学对生命科学的一大贡献就是强调了理性思维。然而在运用理性思维的时候一点也不能忘记生物学事实的制约！

在和数理科学及信息科学的同事交往的过程中我们发现，有些同事不去阅读有关神经科学的外文原始文献（很遗憾，现在绝大部分有用的原始文献都是外文的）的一个重要原因是这些文献中大量的陌生术语令人头疼。为了便于读者阅读外文原始文献，也是为了便于读者上网检索，本书在专门术语第一次出现时都附上了英语原文。希望读者在阅读时能注意这一点，并把它作为本书的一个有机的组成部分。

写完上面这些话，重新读一遍，自己也怀疑起来，目标是不是定得太高了，但是我们的先贤告诉我们：“法乎其上，得乎其中”。只有把目标定得高一点，才

能鞭策我们尽量把工作做得好一点。但是囿于我们的水平,缺点以至错误在所难免,希望读者不吝指正,以便在再版时加以改正。希望这本书能有机会再版,主要原因是因为神经信息处理这一领域实在发展太快,所以本书的许多内容需要不断更新。另外,资料文献读不胜读,由于受到出版期限的制约,许多重要的资料还来不及读,希望在再版时能够补充进去。当然本书能不能再版,将取决于现在这本书能不能得到读者的认可。我们热忱地期待着读者的反馈和互动。

上面所讲的一切,除了有关我个人的经历之外,绝大多数是和梁培基教授多次讨论的结果,也是我们的共识。这本书是我们通力合作的结果。书中的第四章全章,第五章中除去有关脑电的非线性动力学分析、脑机接口、类脑计算机和意识的自然科学研究四小节之外的全部,第一章中的视觉系统、躯体感觉系统、躯体运动系统、小脑和海马四节都是由梁培基教授写的。结语一节则是我们共同写的。最后由梁培基教授对全书作了统稿。我们所写的各个部分都经过彼此的审阅和修改。在编写本书的过程中,得到了郭爱克院士、李光教授、李朝义院士、阮炯教授、寿天德教授、唐孝威院士、童勤业教授、汪云九教授、杨雄里院士、张丽清教授的鼓励和帮助,金鑫同学在制作插图方面花费了大量的时间和精力,当然还有张瑚编辑为本书的出版做了大量细心的工作。在此谨向以上各位女士和先生致以最衷心的感谢。

顾凡及于复旦大学

2007 年春

参 考 文 献

- [1] WIENER N. Cybernetics——or Control and Communication in the Animal and the Machine[M]. 2nd ed. The MIT Press and John Wiley & Sons Inc, 1961.
中译本: 郝季仁 译. 控制论[M]. (第二版). 北京: 科学出版社, 1963.
- [2] DOWLING J E. Neurons and Networks——an Introduction to Neuroscience[M]. 1st ed. The Belknap Press of Harvard University Press, 1992.
- [3] ARBIB M A (ed). The Handbook of Brain Theory and Neural Networks[M]. MIT Press, 1995.
- [4] ALEKSANDER I. Fleshing out intelligent machines[J]. Nature, 1995, 376: 564.

目 录

序言	I
卷首语	1
参考文献	6
引言	1
参考文献	8
第一章 神经信息处理的神经生物学基础	9
§ 1.1 神经系统的大体结构	10
§ 1.2 神经元	25
§ 1.3 神经元的电性质	31
§ 1.4 神经递质和神经调质	40
§ 1.5 大脑皮层	42
§ 1.6 视觉系统	47
§ 1.7 听觉系统	62
§ 1.8 嗅觉系统	75
§ 1.9 躯体感觉系统	79
§ 1.10 躯体运动系统	86
§ 1.11 小脑	94
§ 1.12 海马	97
§ 1.13 学习和记忆	100
参考文献	105
第二章 神经信息处理的研究方法	108
§ 2.1 脑结构的研究方法	109
§ 2.2 脑功能的宏观研究方法	110
§ 2.3 脑功能的微观研究方法	122
§ 2.4 脑功能的介观研究方法	124
§ 2.5 建模和仿真	126
参考文献	127
第三章 神经信息处理研究中的一些经典范例	129
§ 3.1 霍奇金-赫胥黎(Hodgkin-Huxley)模型	129
§ 3.2 神经元的生物物理模型——基于膜的阻容和离子通道性质的房室模型	138
§ 3.3 神经元的简化现实性模型和霍普菲尔德(Hopfield)模型	143
§ 3.4 侧抑制网络模型	149
§ 3.5 中枢模式发生器	155
§ 3.6 神经元群体的模型	163

§ 3.7 嗅觉信息处理的神经动力学研究	167
参考文献	172
第四章 神经信息处理研究中的某些热点问题	175
§ 4.1 神经元放电活动对信息的编码	175
§ 4.2 视网膜神经节细胞的感受野模型	186
§ 4.3 神经元响应特性的反向相关估计法	192
§ 4.4 视觉系统中的增益调节	201
§ 4.5 神经元突触强度可塑性及计算逻辑	207
§ 4.6 神经元群体活动对信息的编码	212
§ 4.7 多电极同步记录及数据处理方法	220
参考文献	231
第五章 神经信息处理研究中的一些前沿问题	234
§ 5.1 脑电信号的非线性动力学分析	234
§ 5.2 脑机接口	250
§ 5.3 人工视觉	253
§ 5.4 基于大脑神经信号的运动功能康复	259
§ 5.5 类脑计算机	266
§ 5.6 特征绑定和感知过程	273
§ 5.7 意识问题的自然科学研究	280
参考文献	288
结语	294

引言

常听人说 21 世纪是脑的世纪，也常听人说 21 世纪是信息的世纪。且不管这样的说法是否确切，神经科学和信息科学作为 21 世纪的重要科学前沿，大概是很少有人否认的。不仅如此，这两个领域之间还有着密切的联系和公共的交集，这就是神经信息处理，或者说是研究大脑信息处理过程的学问。由于脑功能本质上就是进行信息处理，因此从信息处理的角度研究脑、认识脑是脑研究的十分重要的组成部分。

从总体上来说，脑是世界上最复杂、最巧妙、最高级的信息处理系统，还没有哪一种人工的信息处理系统能够和脑比肩。人们当然希望他们所创造的机器也能完成脑所能执行的复杂功能。20 世纪下半叶，人工智能和人工神经网络都曾盛极一时，人们曾经以为不需要有关脑的详尽知识，也能实现脑的种种功能。但是，在经过一段时间的蓬勃发展之后，种种尝试都遇到了难以克服的困难，人们逐渐认识到这样做即使不是不可能，也是异常困难的。因此，许许多多的数理科学和信息科学的工作者都开始对脑产生兴趣，希望从神经科学的知识中吸取营养。毕竟，大脑为人工信息处理系统提供了一些启示，告诉我们信息处理系统有可能具有什么样的能力，脑的存在已经解决了具有和脑类似功能的信息处理系统存在性的问题，就像鸟的存在告诉我们在空中飞行是可能的一样。关键是怎样来实现这种功能。显然，一个重要的途径就是向大自然学习，从神经系统的信息处理机制中寻求启示。然而要做到这一点并不容易，这不仅仅由于这些不同学科的知识基础不一样，还因为它们的表达方式不一样，甚至连它们的思想习惯也很不一样。所以对于想从神经科学中吸取营养的数理科学和信息科学工作者来说，他们决不能满足于来自一些公共媒体的科普常识，而是需要认认真真地读一点神经科学的书，并和神经科学家交往，熟悉他们的思想习惯和工作语言。

从另一方面来说，20 世纪中叶以前，对神经系统的研究基本上都是定性的观察和实验，很少有定量的理论研究。然而对脑的研究也必然要走所有自然科学的共同道路，定量化和精密化是不可避免的。这条道路先是在物理科学中取得了辉煌的成就，接下来又在化学科学中取得了胜利，脑只是由于自身的极度复杂性，才使得它在这条道路上一直进展缓慢。但是，物理科学和化学科学定量化和精密化的辉煌成就，以及脑研究所积累下来的海量数据，现在已经到了脑科学也要定量化和精密化的时候了。数理科学和信息科学的发展已经为此提供了有力的工具。

正是在这样的背景之下,神经信息处理这样一个交叉领域成了当代的科学前沿和热点。由于侧重点的不同,它可以衍化出种种不同的名称,例如计算神经科学(computational neuroscience),神经工程(neural engineering),神经信息学(neuroinformatics),神经物理学(neurophysics),神经动力学(neurodynamics),神经控制论(neurocybernetics),神经计算(neural computation),脑理论(brain theory),脑模型(brain model),等等。要把它们一一区分清楚是不可能的,也没有必要。它们的共同点就是同为研究神经信息处理的交叉领域,尽管其侧重点可能有所不同。本书就以这个共同点作为自己的内容,并且以对脑感兴趣的数理科学和信息科学工作者或学生作为读者对象。

如上所述,本书的主题是神经信息处理,也就是在神经系统中所进行的信息处理。如果把“计算”理解为信息处理的同义词,那么也可以说是“神经计算”(neural computation 或 neural computing)。然而,也有许多人把在人工神经网络中所进行的运算称为神经计算,这和本书所讲的不是一回事。另外,也有人把“计算”仅仅理解为图灵意义下的计算,并据此否定神经系统中进行着“计算”。为了避免这些无谓的争论和混淆,我们在本书中基本上不使用“神经计算”这个术语。

人们曾经长期认为脑是灵魂的栖息地,不可能用数理方法来进行研究。一直到20世纪中叶,美国的一些学者才开始尝试把数理科学的方法应用于神经系统研究,其中包括以拉谢甫斯基(Nicolas Rashevsky)为首的芝加哥学派和以维纳(Norbert Wiener)为首的奠定控制论基础的一群学者。拉谢甫斯基在1934年到芝加哥大学任教,并接受数学生物学的博士生。20世纪30年代末在哈佛医学院有一个有关科学方法的系列讨论会,维纳是其中的积极分子。他是一位数学家,讨论会的组织者罗森勃吕特(Rosenblueth)是一位生理学家。参加这个讨论会的还有其他的数学家、生理学家、物理学家、医学家和工程师。麦克卡洛(Warren McCulloch)和匹茨(Walter Pitts)在这一期间所发表的一篇论文是神经网络研究的奠基之作,也开创了把神经元作为一种计算单元的研究。匹茨是拉谢甫斯基的研究生,专攻数学生物物理,同时还学习数理逻辑。他是一位非常聪明的青年,但脾气有点古怪,由于他在考试时老是不回答问题,反而批判试题,因此始终没有拿到博士学位。麦克卡洛是一位精神病学专家。他们也是维纳的讨论会的参加者。1948年,维纳出版了他的经典著作《控制论》^[1],其中专门有一章讨论计算机和神经系统的问题。这个学派的活动对推动神经信息处理的多学科研究产生了深远的影响。计算机的主要奠基人冯·诺意曼(John von Neumann)还专门写了一本书讨论计算机和大脑的问题。但是,把数理科学应用于脑研究的做法在当时也曾经为一大批生物科学家所不理解,他们对这种努力的主要批评是这种研究把生物对象过于简化,或者说“漫画化”。例如,他们不能容忍把神经元理解为像开关一样的某种二值逻辑元件,或者把脑说成为计算机。尽管这种批评有其合理性的一面,