

神经网络研究和未来的科学革命

NEURAL NETWORK RESEARCH AND FUTURE SCIENTIFIC REVOLUTION

郭爱克 潘 泓

神经网络研究可以追溯到四十年代信息科学的开创时期，它在走过了半个世纪的曲折发展道路之后，正迎来一个空前活跃的新的发展时期。神经网络研究已成为现代神经科学、数理科学及信息科学等综合研究领域中共有的科学前沿之一。这不仅体现了近二三十年来自然科学发展的重要特征，也体现了科学演化的必然趋势——研究非线性、探索复杂性。

神经网络系统是由大量的形式神经元联结而成的高度错综复杂的非线性系统。结点特性、联结拓扑结构及学习规律是确定一个神经网络的三要素。神经网络在功能上反映了生物神经系统的若干基本特性，但并不是脑的逼真描写，它只是脑功能的某种简化、抽象和模拟。

神经网络研究的目标是阐明脑的工作原理和研制具有某些大脑神经计算功能的人工智能系统。这两方面任何实质性的进展，不仅会迅速地增进人类对自身的认识，而且所导致的人工智能的真正进步，将会对人类在高级思维方面的垄断地位形成真正的挑战，在今后思维和文化的发展进程中，生物的进化机制将不再居于支配地位。

一、从自旋玻璃理论到霍普菲尔德神经网络看神经网络与数理科学

当今国际上神经网络研究的高潮，起源于八十年代初期霍普菲尔德 (J.J.Hopfield) 工作的激发和

推动。霍氏将神经网络的理论分析与平衡态统计力学及动力系统稳定性分析方法相结合，明确指出具有对称联结的网络其长期行为与“自旋玻璃 (spin glass) 中那种高阻挫 (frustration) 的无序磁系统平衡态特性是等价的，而在这类系统的多个亚稳态稳定的位形上可以存贮信息。他尤其阐明了怎样开发这种等价性来设计神经回路以完成联想记忆组合优化等任务。霍氏模型在神经网络理论的发展中取得了一个重要的概念性进展，并直接鼓舞了致力于凝聚态物理学 (尤其是自旋玻璃理论) 研究的一批理论物理学家问津神经网络理论研究。他们所取得的理论成果及其在神经科学、计算机科学乃至生命早期进化研究中的应用正继续呈现增长的趋势。

所谓“自旋玻璃”，是指一种非晶态磁性材料。“自旋”是指量子力学中的自旋概念，整体的磁效应即由此产生；“玻璃”则指的是自旋的取向和相互作用中的无序和阻挫特性。“自旋玻璃”动力学所呈现的复杂性就来自于自旋间的这种无序的、不调和的磁相互作用。“自旋玻璃”的数学模型现已成为计算机科学、神经科学和进化学中复杂性问题的原型。

霍普菲尔德神经网络模型与自旋玻璃模型在物理实质上的会合，深刻地揭示了神经网络计算的物理规律：神经网络的计算过程产生于它的动力学演化过程，产生于系统组态空间中的流 (flow)。网络活动的持续状态总是要收敛到对应于所存贮模式

吸引子上的。(可以是不动点、极限环、或低维混沌等吸引子)。这些吸引子同时对应着各种低能状态,这些低能状态间则存在着某种联系。这些状态可以按照它们之间的相似程度以分层的方式排列在类似于“进化树”或“逻辑树”的结构中。这种深层的物理结构可能是许多无序系统演化的共同特征。这种共同特征给予我们一种启示:人们一旦掌握了神经网络这种由简单结构和规则所构成的高度复杂的非线性系统的协同行为及集体计算功能的物理机制,就可以将它用于对其它复杂系统的计算。正是在这个深刻的意义上,神经网络以其“用吸引子计算”的实质,继冯·诺伊曼计算机之后再一次扩展了计算概念的内涵。

二、从感知机到神经网络计算机 看神经网络与信息科学

在五十、六十年代,神经网络研究曾有过自己的“黄金时代”。当时最有代表性的工作是罗森布拉特(F.Rosenblatt)提出的感知机(peceptron)。但是由于单层麦克卡洛克-匹茨(McCulloch-Pitts)元件组成的初级感知机在计算上不能普适,不可能解决奇偶性(parity)等较为复杂的高阶谓词问题。到了1969年明斯基(M.L.Minsky)和帕珀特(S.A.Papert)在《感知机》一书中对此作了深入的数学分析,正确地指出解决高阶谓词问题必定要引入隐单元(hidden units)。但是他们过早地推断多层感知机中的隐单元是不能加以训练的,故直至八十年代以前终因多层前馈网络未获得有效的学习算法,以及技术条件的限制而使神经网络研究陷入了低谷。与此同时,自五十年代以来,在线性矩阵存储的理论框架下,有关神经网络联想记忆的研究却有相当的进展。

八十年代初霍普菲尔的理论突破及霍氏网络的电路实现,标志了神经网络研究的复兴,它同样激励了计算机科学领域的新联结主义(neoconnectionism)。1983年基于柯克帕特里克(S.Kirkpatrick)等人提出以统计物理学为背景的模拟退火(simulated annealing)算法,继而由欣腾(G.E.Hinton)和谢吉诺夫斯基(T.J.Sejnowski)提出玻尔兹曼机(Boltzmann Machines),实际上构成了含有隐单元的适应性霍普菲尔德网络,它体现了“无监督机器学习”研究的一个重要进展。与此同时,鲁梅尔哈特(D.E.Rumelhart)、欣腾和威廉姆斯(R.J.Williams)按照罗森布拉特的《反向传

播误差纠正》的思想,对多层感知机的隐单元权重训练问题,提出了反向传播(back-propagation)的学习算法,从而使多层感知机成了研究适应性神经网络有监督学习的得力工具。

目前,已经发展了众多的霍普菲尔德网络、玻尔兹曼机和多层感知机的推广改进形式,并在各种工程研究与开发中得到灵活的应用。近年来,神经网络作为一种新的信息处理系统,已经在计算机视觉、语音识别与合成、模式识别、知识工程、最优化问题求解、过程模拟与控制等几个方向上引起人们的普遍重视,并已经取得相当的进展。人们已经设计研制出神经网络计算机,即可以从经验中学习,按人脑的某些方式实现信息处理、存储和再演的计算系统。在神经网络计算机中的逻辑结构是内在的,设计者根据所要处理的问题的复杂程度,预先确定某种硬线路(hard-wiring),而其余的问题则通过局部联结权重训练过程作为软线路(soft-wiring)体现在网络中。人脑中的硬线路是人类长期进化适应的产物,而人脑中的软线路则主要是个体发育的结果。在某种意义上,神经网络计算机中体现先验知识和设计意图的就是硬线路。传统的人工智能所遵循的软、硬件分离的做法,在神经网络计算机这一新的硬件基础中必须放弃。这个变化无疑使人工智能研究找到了新的生长点,也必将引发新的计算技术的革命。这方面的真正突破还有待于对自然界中最复杂、最有效的信息处理和决策系统——人类大脑奥秘的进一步揭示。

三、从神经还原论到神经集群选择 论看神经网络与神经科学

自四十年代麦克卡洛克和匹茨提出《知识的生理学理论》的研究目标以来,他们的神经还原论思想一直在神经科学的发展中占有主导地位。

近十年来,计算神经科学立足于理论、实验和计算三大支柱,通过建立简化的脑模型(即目前在联结主义模型、并行分布处理模型和神经网络的总标题下研究的一大类模型),正在把通过分子、细胞生物学技术获得的微观水平的知识和通过行为研究获得的系统水平的知识结合起来,以揭示大脑所使用的算法。

近年来,弗里曼(W.J.Freeman)在总结他多年来从事哺乳动物嗅觉皮层生理实验和理论分析的基础上提出,学习过程就是选择性地改变神经元之间的兴奋性联结的强度,并导致相应的神经细胞群

(neural cell assemblies) 的建构过程；识别过程就是对相应于所存贮模式的极限环吸引子的分叉(bifurcation)过程。与其将脑功能按冯·诺伊曼计算机提供的思路来理解，不如将脑功能看作是与环境作适应性交互作用的自组织过程。“意识”就内涵在脑系统功能与环境的相互关系中。

1987年埃德尔曼(C. Edelman)在《神经达尔文主义》(Neural Darwinism)一书中详细地阐明了他的神经集群选择论(The theory of neuronal group selection)。埃德尔曼将免疫系统中外在抗原选择生命体中先已存在的内在抗体的思想引入对脑的发育过程的认识，试图回答《神经系统是怎样由一个无组织的神经集群，发育成一个具有明确意义的结构与功能系统的。》在胚胎形成期间，众多的神经元通过其后发育过程中的竞争选择，确定了神经系统的解剖结构和突触联结的基本模式。在出生后的经验形成中，对于先在的不同神经集群的选择并不是通过改变其内部的联结方式，而是通过对突触强度或效率进行不同的修正来完成的。神经达尔文主义的核心思想是由环境选择先在的细胞集群，而不是细胞集群在环境的指令下进行自组织。但也有些学者认为，更合理的假设应该是选择过程与指令过程的结合。

理论生物学的研究指出，在整个生物进化过程中，核酸突变的无规漂移仅仅涉及到整个相空间中可以忽略的一小部分。事实上，人脑的每一个功能单元都已被优化是不可能的。因为这种优化所需要的信息量远远超出DNA的信息容量：大脑皮层中有 10^{11} 数量级的神经元和 10^{15} 数量级的突触联结。为了确定每一个突触联结，大约需要 33×10^{15} 比特的信息量。而脊椎动物在近 10^9 年的生物进化过程中，大约只积累了约几个 10^9 比特的遗传信息，这表明了大脑皮层的突触联结主要是由后天确定的。大脑皮层突触的随机联结能够构成极大量的先天固有的能量位形。生命体在后天与外部世界相互作用过程中能进行学习的可能只是与系统能量中局部极小值相仿的那些模式，而各式各样的局部极小值在数量上对多形态的外部世界是足够充分的。学习过程中神经突触的可塑性可以使这些极小值加深，同时又保存了整个能量位形的内在的树状结构。这种类似进化树的结构给人的启示是多方面的。分类性质很可能是这类系统的内在特性，概念生成、归纳乃至推理的机制很有可能在这样的背景下得以阐明。

总之，神经科学的认识路线从麦克卡洛克-匹

茨的形式神经元假设出发，历经感知机、并行分布式处理网络、真实神经元模型、神经系统的自组织过程，到神经集群选择论，走的是一条循环上升的通路。在脑理论的演化过程中，一个最为关键的问题是，大脑皮层的联结在多大范围内是由遗传信息决定的，又在多大的范围内，是通过突触学习规律由经验来确定的。很难想像，爱因斯坦或者莫扎特的大脑结构仅是从神经联结的纯随机集合中产生的。我们相信，在神经科学的激动人心的未来，这些问题将通过理论、实验和计算之间连续的动态交互研究活动而得到回答。

四、 脑理论的演化和未来的科学革命

探索脑的奥秘，揭示脑的组织和工作原理，是整个人类面临的一项挑战，是整个自然科学的一个至关重要的前沿。

“人类为了认识自然与认识自身已经走过了漫长而曲折的历程。……在清除超自然观念的科学发展的连续过程中，下一件大事就是脑。这正是深入人(类)的核心问题。因此，我们对人脑的观的根本性变化，不可能不深刻地影响到人类对自然和对世界的看法。”(D.H. Hubel语，1980)。“没什么科学研究对人的重要性超过对人自己的脑的研究，我们对宇宙的全部看法依赖于这种研究”(F. Crick语，1980)。也正如黑斯泰内(D. Hestenes)所展望的那样，脑如何工作的问题到阐明之日，将是下一场伟大的科学革命到来之时。

当前，脑研究正以空前的广度和深度在世界范围内展开。这既是一个在全方位上不断向各种现代学科交互扩展的研究领域，同时又是一个总有自学科界线的研究领域。在神经科学最为发达的国，已将二十世纪最后的一个十年——九十年代作《脑的十年》；欧洲共同体1987年开始实施《脑》计划(《BRAIN》，Basic Research in Adaptive Intelligence and Neurocomputing)；日本倡导的多国生物学合作计划也将脑功能作为两大研究目标之一；中国科学院已开始布署《神经网络和高级脑功能》《突触的细胞及分子生物学》研究。

在脑科学园地里耕耘的众多科学家有来自数学与微分动力系统的数学家；有来自基本粒子、论与凝聚态物理的物理学家；有来自神经科学、子生物学与免疫学的生物学家；有来自并行处理人工智能的计算机科学家；有来自心理学、心理

(下转第19

指导下,经营的目的性不明确,本可以获得的最大利润,也不再作艰辛的努力去赢得,甚至出现个别公司对外达成协议时,竟将普通劳务的工资降至成本以下的情况。这种赔本买卖,恐怕与上述指导方针和原则有密切关系。

我国劳务输出今后要争取有大发展,在管理体制上必须解决上述两个问题,否则难以走出困境。

第四,积极采取多种所有制形式经营劳务输出,多渠道、多种方式派出劳务人员。巴基斯坦是通过以下五种渠道出口劳务的:

1、由政府的“移民和海外就业局”和“巴基斯坦海外就业公司”与劳务进口国签订劳务合同和议定书,按合同要求,有计划地安排劳务出口。

2、对于没有签订合同的劳务进口国则可由进口国劳务机构赴巴挑选。

经由上述两种渠道出口的劳务人员约 90 多万人。

3、由私人劳务招募代理人承办劳务出口。代理人 与外国企业签订合同后,再由外国政府发给就业签证,政府即可批准出国。通过这种渠道出口劳动力 60 多万。

4、通过国外亲友介绍出国。

5、非法移民,估计至少 50 万人。

以上除第 5 个渠道不可取之外,其余途径对我国来讲均是可行的。

现在我国的劳务输出基本上完全由国家经营独揽。在劳务输出的经营上,在坚持全民所有制为主的同时,应该放宽政策,积极发展集体所有制或民间的劳务输出贸易。上海 1986 年开始搞民间劳务输

(上接第 37 页)

理学与语言学的认知科学家;还有自然哲学家等等。他们在进化、遗传、选择、发育、生化、生理、心理、物理、数学、计算、生物物理等科学基础上,在包括从分子、细胞、突触、回路、网络、系统、行为乃至认知的各个层次上开展脑研究,探索脑是怎样组织起来的,又是怎样工作的。对于脑的任何实质性的认识进步,都将依赖于他们的共同奉献。普里高津(I.Prigogine)曾说过,无论我们专心致志于哪种专业,都无法逃避这样一种感受,即我们生活在一个大转变的年代,我们必须寻找和探索新的资源,更好地了解我们的环境,(这里,我们再大胆地加上一句,即“更深刻地了解我们的

出,已输出 100 多人。我国是世界上向国外移民数量最多的国家。华侨、华商遍布世界各地。应充分利用这一有利条件。南朝鲜 1983 年取消一切限制海外就业的法规,颁布实行《扩大海外就业措施》,向电子计算机、电器制造、航空技术部门敞开海外就业大门。为了扩大海外就业,每年向 70 多个驻外使馆摊派劳务出口任务。我们应该有这种鼓励人们海外就业的勇气和魄力。

第五,做好对劳务人员的培训工作,注重开发人力资源。从世界劳务需求及我国对外劳务承包事业发展看,必须完成两个转向:由低价市场转向高价市场,由输出普通劳务为主转向输出技术劳务为主。为此,必须根据劳务市场需求,进行定向培养。例如,美国、日本是世界电子计算机发展的中心。据了解,美国近期缺少软件人员 10~15 万人。1990 年后预计缺额更达 80 万人,日本缺额也达 70 万人。再如,世界上护士短缺,科威特缺 3 000~5 000 名护士,美国缺十几万护士。类似这样情况,我们可以有计划、有目的地搞定向培养。培训班可以是国家级的,也可以是省、市、区级的,还可以由地方或公司办,甚至允许私人办就业技术训练班。外语培训也是当务之急,应置于首要地位。

总之,我国目前开展劳务输出障碍很多,待解决的问题不少,其中思想观念、政策、体制是最重要的障碍,应当引起政府的高度重视。

本文作者吴国存(Wu Guocun)系南开大学人口与发展研究所副教授。

(责任编辑 孙立明)

脑”)并与大自然建立一种较少破坏性的共存联系。在这些主要目标上发生实质性突破所需要的时间与生物及地质演化过程中的浩瀚的时间跨度是不能相提并论的。它的数量级仅以十年计,它正好涉及我们自己和下一代人的生活。站在这样一个科学巨变的突破口上,我们作为人类世代梯队中的这一代人,确实是幸运的!

本文作者郭爱克(Guo Aike)系中国科学院生物物理研究所研究员,潘泓(Pan Hong)系中国科学院生物物理研究所研究实习员。

(责任编辑 蔡德诚)