

生物神经网络与人工神经网络

Biological Neuronic Network and Artificial Neuronetwork

陈惟昌

(中日友好医院临床医学研究所, 教授)

神经网络包括两个主要方面, 即人工神经网络(Artificial Neuronetwork, AN²)和由真正的生物神经元组成的网络(Biological Neuronic Network, BN²)。早在 1906 年, 卡杰尔(Cajal)在其创立的“神经元学说”中就已奠定了生物神经网络的理论基础。近 10 年来, 在人工神经网络——神经计算机研究的推动下, 生物神经网络的研究, 也受到广泛的重视。日本“人类前沿科学计划”和伦敦智囊团会议都提到, 应用信息科学、计算机科学等最新的科学理论、方法和技术阐明大脑信息加工原理, 是当前和今后生物功能研究的焦点之一。但目前人们对生物神经网络信息的存储、编码与加工机理知之甚少。我们认为: 大脑神经网络信息存储与编码机理的阐明, 可能成为继神经元学说、神经离子通道理论之后, 神经科学的又一个新突破。当前生命科学研究的的发展趋势正向着最基本的分子生物学和最复杂的脑功能活动机理的两极方向发展。正如核苷酸三联密码是分子生物学的基础那样, 攻克大脑“思维之谜”的关键是弄清大脑信息存储载体和大脑信息编码方式这两个最基本的问题, 使脑信息加工的研究建立在客观定量的基础上。

人工神经网络的启示

1943 年, 麦卡洛(McCulloch)及皮茨(Pitts)根据神经元的突触迭加与兴奋阈值两个基本特点, 第一次提出人工神经元的数学模型, 即 MP 模型:

$$y = \text{sgn}(\sum_i W_i x_i - \theta)$$

当输入神经元的兴奋状态 x_i 与突触权重 W_i 乘积的总和 $\sum W_i x_i$ 大于神经元 y 的阈值 θ 时, y 即兴奋, 否则静息。在 MP 模型中, 没有考虑突触权重是可变的, 因而其机能有限。

1949 年赫布(Hebb)首先提出突触的学习定律:

$$\Delta W_{ij} = \eta a_i a_j$$

该定律表明, 如神经元 i 与神经元 j 同时兴奋, 即 $a_i > 0$ 及 $a_j > 0$, 则二者的突触连系权重 W_{ij} 将增大, $\Delta W_{ij} > 0$ 。

赫布的光辉预见, 直到 1973 年布利斯(Bliss)才在高等动物的记忆中枢——海马(Hippocampus)的神经元实验中得到证实。布利斯先以强直刺激使突触后神经元处于兴奋状态, 再给以条件刺激, 结合几次之后, 可使条件性突触后电位幅度增加并维持较长时间, 证实了突触连系强度的可变性。

1982 年, 美国物理学家霍普菲尔德(Hopfield)在神经网络研究方面取得了突破性进展, 引起了计算机学家、信息学家和人工智能学家的高度重视。他的数学模型和 MP 模型类似:

$$V_i = \text{sgn}[\sum_{j \neq i} T_{ij} V_j + I_i - \theta_i]$$

神经元 i 的输出状态 V_i , 由其突触总输入 $\sum_{j \neq i} T_{ij} V_j$, 外部输入 I_i 和阈值 θ_i 决定。霍氏的神经网络引入了广泛的复杂回路, 见图 1, 这在 MP 模型中是无法处理的; 其次, 式中突触连系强度 T_{ij} 是可变的。最主要的是霍氏引入了能量函数 E , 根据 Issing 的自旋玻璃理论, 证实了系统的稳定性。霍氏指出, 系统存在有多个局域的极小值, 不同的记忆事件即存储于能量极小值的区域内。在回忆过程中, 提示信息的输入, 可自动进入相应的极小值, 从而将记忆内容读出。他还指出, 神经网络方程可以用运算放大器电路网络来实现, 从而奠定了神经计算机的理论基础。几年来, 人工神经网络取得了巨大的进展。1985 年阿克利(Ackley)与欣顿(Hinton)等提出一种 Boltzman 机算法, 运用退火技术, 可使网络

从局部极小值跳出, 趋向于全局稳定点。1986年拉梅尔哈特 (Rumelhart) 等提出多层神经网络的反向传递学习算法, 使网络学习误差达到最小, 解决了许多具体的难题, 从而使神经网络得到更广泛的应用。科霍南 (Kohonen) 提出自组织和联想记忆模型来模拟神经系统的学习记忆和联想输出。李逸群 (Y.C.Lee) 等发展了霍氏的二阶神经网络, 提出高阶神经网络。

高阶非线性联结的神经网络扩大了存储容量, 可完成复杂的任务, 除能进行联想与记忆之外, 还可以进行互联想记忆和多级联想记忆的功能。

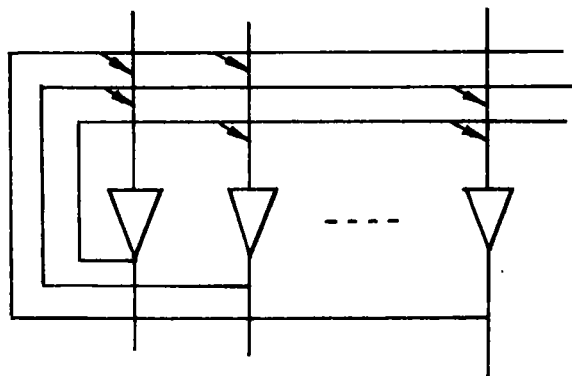


图1 霍普菲尔德神经网络

神经网络计算机和目前的冯诺依曼 (Von Neumann) 式计算机不同, 它是由大规模的人工神经元以突触互相广泛连结组成的复杂网络。由于采用大规模并行处理, 因而具有很高的运算速度, 并具有高度的容错性, 即使部分神经元损坏, 也不致影响整个神经网络的正常工作。特别是通过学习, 可以动态调整神经元突触的连系强度, 以实现联想记忆和决策推理等高级智能活动。这是信息科学领域的一门高科技, 神经计算机的信息处理方式比目前的电子计算机更接近大脑的工作特征。

生物神经元网络的特征

人工神经网络研究的飞速发展, 给生物神经网络的研究工作带来了新的冲击和希望。由于生物神经元网络的极端复杂性, 目前尚缺乏有效的研究方法。神经科学家希望从人工神经网络研究中得到启发, 设计新的实验, 开拓研究生物神经网络信息加工规律的新途径。生物神经网络和人工神经网络相比, 在原理上有许多相似点, 但从组成结构方面却有本质的差别。首先, 人工神经网络属第一类导体, 其载流子为电子, 所以其传导与加工信息的速度很快; 而生物神经网络为第二类导体, 其生物电流的载流子为离子, 故其传导与运算速度要慢得多。但是从结构层次的复杂性作比较, 生物神经网络是具有丰富内源信息的、多层次的化学成分与电过程耦合的

复杂系统。目前的人工神经网络, 应用微电子元件, 只能模拟生物神经网络特性的很小一部分, 离脑的工作原理和人类智能还有很大的距离。神经元的主要功能是在各种刺激的作用下能产生短暂的电兴奋过程, 并可沿一定方向进行传导与扩散。这种电兴奋是由于离子通道的开放和关闭, 引起离子暂态通透性变化的结果。离子通道的活化方式可分为电压活化 (压控) 和化学活化 (化控) 两大类。特定的化学分子作用于化控通道, 二者结合使通道激活而开放。如乙酰胆碱受体通道、氨基酸受体通道等。离子通道是神经元的分子触发元件, 是生物微电子电路的最基本元件。另外在神经元的表面还有其他一些种类的受体分子, 能与特异的化学分子结合, 通过第二信使系统 (CAMP 系统和磷酸二酯酶系统) 触发一系列生物化学反应, 改变神经元的机能状态和基因表达。所以生物神经网络不仅传递电位编码的信息, 也传递和处理化学分子编码信息, 其复杂性比人工神经网络要大得多。有关这方面的数理模式与动态过程分析的工作, 还很不成熟。

生物神经网络另一个特点是结构层次比人工神经网络更为复杂。人脑约由 $10^{10} \sim 10^{11}$ 个神经元组成, 并有相应数量的神经胶质细胞与神经元互相交织在一起。每个神经元平均有 $10^3 \sim 10^4$ 个突触, 人脑突触的总数可达到 $10^{13} \sim 10^{15}$ 个。每一突触的离子通道数约为 $10^2 \sim 10^3$ 个。神经递质与离子通道的相互作用, 不同离子通道之间的相互作用, 不同种类神经递质的相互影响, 神经调质 (Neuromodulators) 对神经递质释放的调节作用, 在分子层次上组成了十分复杂的相互作用网络, 这是比神经元和突触层次更基本也更复杂的层次。此外, 在同一个神经元上, 不同化学性质的突触, 按一定功能进行有序的排列。例如, 在海马梭锥神经元顶树突的上部, 接受来自内嗅区皮质的传入突触, 其神经递质为谷氨酸; 树突中部接受来自隔核的传入突触, 神经递质为乙酰胆碱; 树突基部传入突触为来自海马内部神经元的返回侧支, 神经递质为谷氨酸; 神经元胞质接受抑制神经元的突触, 递质为 GABA。不同通道, 不同神经递质受体在神经元上呈选择性分布及其密度不同, 形成化学编码, 将影响神经元生理功能的多样性与复杂性。神经元除了通过突触相互作用, 相互连结组成神经网络之外, 在某些具有记忆功能的脑区, 如海马, 还有一些特殊的突触结构, 称为苔状纤维突触集群, 即由几个和十几个突触组合在一起, 形成突触与突触的相互作用结构, 类似于人工神经网络的高阶网络。由此可见, 在层次结构上, 生物神经网络的确比由微电子器件组成的人工神经网络要复杂得多。

生物神经网络的第三个特点是具有极其丰富

的内源性遗传信息。人脑的生长发育,各种神经元的复杂而精密的定位和连系,都是由遗传基因决定的。除了结构信息之外,神经系统的机能活动也和基因表达密切相关。有人估计,大脑神经元表达的信使 RNA (mRNA) 有 3 万种,几乎占人染色体全部结构基因总数 (10^5) 的 $1/3$ 。这些 mRNA 可以指导合成各种各类的活性功能蛋白,使神经递质的含量和各种受体、通道的数目产生变化,从而改变突触的连系权重;有些 mRNA 还可以指导合成各种神经营养物质,如神经生长因子 (NGF)、SBF 等,特异地促进某些神经元轴索的生长和突触的生成,形成新的突触连系。目前还有人设想,外界传入信息,可以通过第二信使系统转移至基因,使信息能保持更长的时间。由此可见生物神经网络机能活动的神经分子生物学基础和基因调控机制,将是研究脑功能活动原理的重要方面。

生物神经网络的信息存储与编码

大脑神经网络中信息存储与编码的机理,是目前各方面的科学家都十分感兴趣的问题。学习是对外界信息的获取,而记忆是将通过学习取得的信息进行编码与存储,将输入的时间序列信息转换成空间的有序信息,并将其保留较长的时间。在回忆过程中,根据特定的提示信息,对已存入的信息进行重现与恢复,即将保留在生物神经网络中的空间有序信息再转换成一系列的时间序列信息,通过输出单元模块,将对应的信息读出。

记忆的研究牵涉到神经生物学,实验心理学,计算机科学和人工智能等许多学科领域。由于记忆的过程十分复杂,所以有关记忆的最基本的问题,例如:记忆过程中信息的载体,编码与存储机制,记忆的神经结构基础,记忆的存入与提取的机理,记忆的巩固与遗忘过程等关键性问题,都有待进一步深入的研究。

有关人类记忆的研究已有 100 多年的历史。1885 年埃宾豪斯 (Ebbinghaus) 定量研究记忆遗忘的速率,结果表明,早期记忆的遗忘速率很快,但随着时间的推移,遗忘的速率则愈来愈慢,大致呈“L”形曲线。里博特 (Ribot) 将经历时间长而遗忘速率慢这一现象称为“回归法则”。有人提出记忆呈指数衰减的理论,但未能阐明上述现象。我们认为记忆量除随着时间而衰减之外,还应附加上一个记忆的“再生”机制,对记忆起巩固作用,从而使过去的记忆比新近的记忆更难遗忘。根据我们对记忆遗忘的资料进行分析,应用 BMDP 程序中的非线性回归程序对数据进行拟合,推导出记忆遗忘的动力学方程为:

$$\frac{db}{dt} = -mb(b_0 - b)/b_0 t$$

式中 b 为记忆量, b_0 为初始记忆量, m 为无量纲参数。下表为理论计算值与实际观测值的对照。

埃宾豪斯实验数据和理论计算值对比:

时间 t (分钟)	20	64	526	1440	2880	8640	44640
记忆保持量 b	58.2	44.2	35.8	33.7	27.8	25.4	21.1
理论计算值 b'	53.7	47.8	37.4	33.0	29.8	25.4	19.6

默多克 (Murdock) 将人的记忆过程分为三部分。即 (1) 感觉瞬时存储 (sensory intermediate store), 其形成部位可能在大脑感觉皮质,一般只保留 0.25 秒,以后即迅速消失,并经常刷新与变换,以保持和外界信息的输入同步。(2) 短程记忆 (short term memory), 其保留时间一般在 15 秒左右,而且容量有限,大约可保留 7 个记忆单元 (chunks)。(3) 长程记忆 (long term memory), 保留时间由数分钟到数十年,其强度可因干扰作用和消退作用而逐渐减弱,即记忆的遗忘。

大脑作为信息的存储器,必需具备以下条件: (1) 有信息的载体; (2) 载体必须具有能明确区分的、相对稳定的编码势态; (3) 有信息的写入装置; (4) 有信息的读出装置; (5) 存储器在空间上呈现有序的结构排列。就记忆 (亦即信息存储) 机能而言,涉及整个大脑皮质。但在大脑皮质的不同部位,由于神经网络在结构上有较大的差异,因而功能亦有所不同。大脑皮质可分为新皮质与旧皮质两大部分。新皮质神经网络结构比较复杂,神经元种类较多,有许多垂直走行的攀缘纤维 (climbing fibers), 细胞按机能呈垂直的柱状分布,组成功能柱。新皮质主要从事信息的接收与加工,同时进行较精细的定位分类记忆。海马属于旧皮质,其结构和新皮质不同,神经网络相对简单,完全没有攀缘纤维,细胞呈平面分层结构排列,但有很丰富的横行侧支,形成复杂的神经回路网络。从结构上看和霍普菲尔德的神经网络十分相似,见图 2。

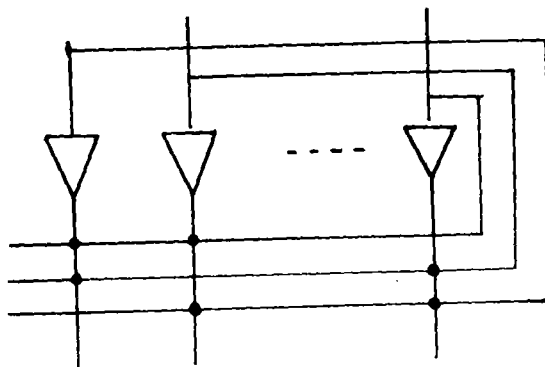


图2 海马神经元网络

我们曾对海马的神经网络结构,进行了定量

的分析。表明海马具有信息存储器的结构特点：海马的点阵式神经网络与突触连结作为信息的载体；海马神经元兴奋与抑制状态的时间序列和突触连系强度的变化可对信息存储与输入、输出进行编码；来自内嗅区的穿通纤维是信息的输入总线，从海马神经网络发出的投射到丘脑下部乳头体的纤维束，称为穹窿，是信息的输出总线。海马的棱锥神经元的主干树突呈规则的六角形点阵排列，具有信息存储器的结构特点。在 1mm^2 面积上，每行平均有 150 个棱锥神经元，共有 200 行，其平面集成度为 3×10^4 个神经元 / mm^2 。以家兔的海马为例，共有 7.36×10^6 个棱锥神经元，而输出数据总线穹窿只有 8.4×10^4 根纤维，只占棱锥细胞总数的 1.1%，将近 99% 的神经元的轴索都在海马神经网络内形成返回侧支，组成复杂的神经网络回路。海马的神经元可区分为兴奋性的棱锥神经元和抑制性神经元（篮细胞）两大类。篮细胞的总数为 2.49×10^5 个。兴奋性神经元与抑制性神经元之比约为 30:1。我们认为：抑制性神经元对神经元的脉冲系列起抑制与分隔作用，对神经脉冲系列的编码有重要意义。由此推断海马神经网络信息编码的字长可能为 30 位，此值与目前通用的计算机 32 位字长，十分接近。在海马 CA_3 区主干树突的基部，有许多特殊的苔状纤维突触集群，这是大脑其他部位所没有的独特结构。每一个苔状纤维的突触集群以一个大的突触体为核心，包绕 4~5 个神经元的树突棘形成一个复杂的镶嵌式的突触复合体。每一个突触复合体可具有十多个的轴棘突触。突触体内多个突触的相互作用，形成高阶的神经网络，以实现更加复杂的联想记忆功能，见图 3。

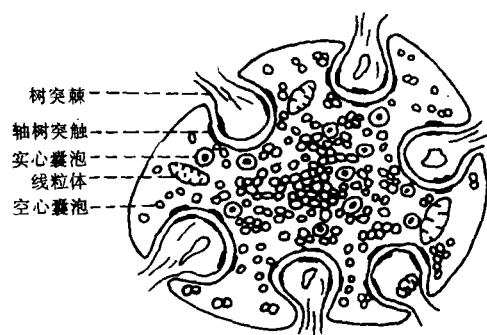


图3 海马苔状纤维突触集群

突触体内还有丰富而密集的突触小泡，其中绝大部分为透明的圆球形囊泡，还有少量散在的实心囊泡。一般认为，透明囊泡内含谷氨酸神经递质，谷氨酸自囊泡释放后与突触后膜的 NMDA 受体结合，产生兴奋性突触后电位 (EPSP)，当条件刺激与非条件刺激结合几次之后，EPSP 波幅增大并可维持较长的时间，称为长程增强效应 (LTP)。而实心囊泡释放神经调

质可以调节神经递质的释放，对突触电位起调节作用。

根据上述对海马神经网络的分析，我们认为，苔状纤维突触集群是海马神经网络信息存储的载体。其信息编码可分为两个层次，即神经元层次和突触层次。神经元的兴奋和静息是一个快的过程，以毫秒为单位，快变编码用于信息的写入和读出。一组输入或输出的编码代表一个特定的事件，如果 I/O 模块（核团）的神经元数为 N，离散时间的编码长度为 L，则此 I/O 码可用一个 $N \times L$ 状态矩阵表示。突触层次的变化是一慢变过程，外界一个特定事件以 $N \times L$ 编码矩阵输入主海马神经网络，即调整了突触连系强度的分布格局，使有些突触连系强度增强，有些则减弱，形成特定的突触连系强度模式，其变化时程以秒为单位。记忆的信息即存储于突触连系强度分布格局之中，并通过神经递质释放量的变化，受体合成的增多，以及形成一些新的突触等，使增强的突触连系维持更长的时间。特别是苔状纤维突触集群，将数个神经元的 10 多个突触组合在一起，使编码的复杂性大大增加，从而增大了信息存储容量。苔状纤维突触集群综合来自不同部位的信息，构成联想记忆的格局，这些格局形成外部世界事件在神经网络内部的表现形式，即客观世界在脑中的映象。

根据霍氏理论，由突触连系强度可以计算出能量分布函数，不同记忆事件存储于能量的极小值区域内。在回忆过程中，提示信息的输入，可自动进入相应的极小值，从而将记忆内容读出。

为了验证生物神经网络的编码方式，可以采用海马脑切片或海马神经元定位培养组成的接触式网络，用点阵式多路微电极按一定时空编码刺激对神经网络进行学习训练，记录其稳定的特征输出。如果对不同编码样本能具有某种分类的特征输出，则可以初步判定生物神经网络的编码特征。但在生物神经网络中，不可能全部测量每个突触的连系强度。只能用间接的方法证明在学习和记忆过程中突触连系强度增强，突触小泡增多，有人还观察到突触后膜增厚。如能证实受体数目增多，则可对突触连系强度变化的结构基础进行确切的判定。由于突触连系强度的变化，不仅与其受体的相互作用有关，同时也受神经调质作用的影响。少量神经调质的释放，可以促使神经递质的释放量大大增加，对突触连系强度的变化起放大与调节作用。此外，钙离子通道的开放，使细胞内钙离子的数目增加，不仅可以促进神经递质的释放，而且可以引发一系列的生化反应，促进蛋白质的合成和基因的表达。化学层次的信息和编码，目前我们几乎一无所知。神经网络

(下转第 61 页)

心、印度、新加坡、科威特也先后建起了具有相当水平的“科技中心”。由于新技术的普及，现在进入博物馆的除了石刀、纺车这些古老的文物外，还有激光器、机器人和航天飞机等尖端科技新产品。现代企业为了塑造它在社会上的良好形象，提高声誉，也纷纷举办有关博物馆，作为“企业文化”的重要内容之一。如德国奔驰汽车博物馆、荷兰飞利浦科技发展馆、日本东海村核电博物馆等即为明显的例证。我国也在太原新建了中国煤炭博物馆，在杭州新建了中国茶叶博物馆、中国丝绸博物馆和胡庆余堂中药博物馆。

4. 由于电脑和声像等新技术引入了各类博物馆的陈列展览，博物馆的教育与娱乐功能大大加强了。连古老的英国自然历史博物馆在生态学和生命科学方面也运用了电子设备，将静态陈列变为动态陈列，使观众可以深入角色，亲自体验。现代博物馆，特别是科学技术类的博物馆，已与图书馆、实验室鼎足而立，成为辅助学校教育和进行社会终身教育的课堂。

5. 第三世界一些国家，随着政治上的独立和经济上的开发，为了对广大国民进行爱国主义教育和科学文化知识普及，都先后兴建了具有民族特色和传统风格的博物馆：如肯尼亚国家博物馆、尼泊尔国家博物馆、加尔各答国家博物馆，还有新西兰坎特伯雷博物馆、阿根廷拉普拉塔自然历史博物馆、中国人民抗日战争纪念馆等。加纳的西非历史博物馆、坦桑尼亚的“囚奴堡”博物馆，今天都成了揭露西方殖民主义者贩卖黑奴罪行的耻辱柱。此外，苏联也很重视发展博物馆事业，对人民进行革命传统教育，如列宁格勒、伏尔加格勒和基辅等大城市都建立了规模雄伟的卫国战争纪念馆。

6. 有些著名企业、机关、研究所等，也运用陈列展览这种“博物馆语言”，作为开拓公共关系的手段，也被列入了博物馆之林。如美国肯尼迪航天中心、纽约证券交易所、华盛顿五角大楼、伦敦索思比拍卖行、荷兰鲜花市场、巴黎菜市场 and 苏格兰白马威士忌酒厂等，被作为“活的博物馆”，成了“缪斯女神”的新姐妹*。

三

《世界博物馆大观》一书内容丰富、视野广阔，体现了现代博物馆学的新概念和新理论。

《世界博物馆大观》文笔优美，有些篇章无异是科文并茂的散文。特别是每个博物馆介绍的正文前面，均有“言简意赅”的提要，画龙点睛，各显特色。如达·芬奇科技博物馆的提要：“你知道文艺复兴时代伟大的艺术家达·芬奇还是一位知识领域很宽广的科学家吗？米兰的这座科技博物馆，向人们展示了这位巨匠的另一面天才。”弗洛伊德故居的提要：“这位举世闻名的精神分析学家，虽然曾受到社会冷遇，甚至非议，但他一直在这幢房屋里，每天看病和写作，一直坚持了47年的性生理学的研究工作，终于对世界产生了重大的影响。”爱迪生故居的提要是：“人们参观了这位伟大的发明家故居，就会相信他所说的‘天才是百分之一的灵感加上百分之九十九的血汗’确是一句至理名言。”

这部书本身可说就是一座生动的百科知识博物馆。阅读它既是学习，也是享受。特此撰文，郑重向读者推荐。

* 西方认为博物馆起源于埃及亚历山大城的缪斯庙。

(上接第44页)

络组成单元——神经元在化学成份方面也是最复杂的。神经元的mRNA可有3万种，但每种mRNA的拷贝数却很少。上万种mRNA可以合成种类繁多的微量的活性功能蛋白或多肽，其中包括受体蛋白、离子通道、神经调质等与神经机能密切关系的物质。因此一组多因素的学习、记忆、信息存储编码机制，包括下面多层次的动力学过程：从输入刺激的神经脉冲时空编码，到各类神经递质与神经调质的释放，不同神经递质与各种受体的结合，不同离子通道的开放或关闭，兴奋性与抑制性突触后电位的产生及其相互作用，神经元突触连系强度的变化，第二信使系统激发的一系列生物化学反应，不同基因表达强度的改变，受体蛋白合成数量的变化，新突触的形成或一些突触的消失，以及整个神经网络格局

的变化等，对这一系列涉及生物物理与生物化学的动力学过程，都需要进行深入的研究，才能逐步揭示脑功能的活动原理。

总而言之，对生物神经网络，可以吸取目前人工神经网络研究中的新思路，新方法，新理论和新技术，结合生物神经网络原型的特点，开拓新的研究思路，建立新的研究方法，把实验观察和计算机仿真模拟结合起来研究，逐步深入了解脑工作原理的奥秘。另一方面，人工神经网络亦可从生物神经网络极端复杂的内涵中，吸取多层次，多因素的复杂系统调控机理，以得到启发，设计出新的算法与新的智能信息处理机器，使神经计算机更接近人脑的工作特征，推动人工智能与信息科学的发展。

(责任编辑 朱世南)