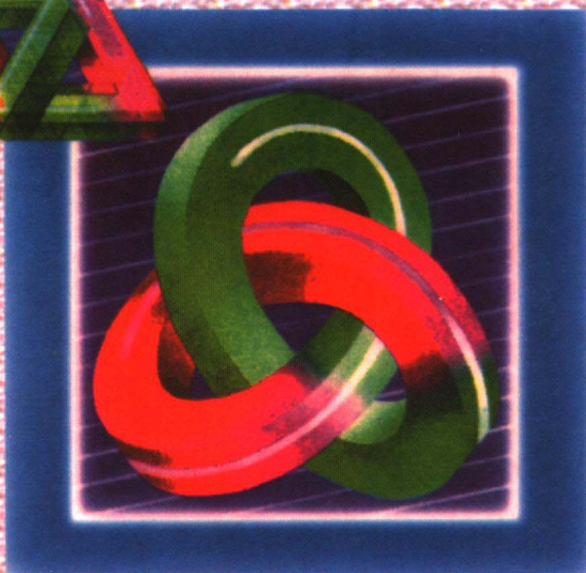


现代数学基础丛书

神经动力学模型 方法和应用

● 阮炯 顾凡及 蔡志杰 编著



科学出版社

内 容 简 介

神经网络动力学是神经网络与动力学系统交叉结合的学科。本书着重阐述神经网络动力学模型的建立和各类模型研究的问题与方法。书中还介绍了神经动力学的生物背景与相关的动力系统理论的基础,并且给出了国内外一些应用的成果介绍。

读者对象为大中专院校理工科各专业的大学生、研究生、教师及有关的科技工作者。

图书在版编目(CIP)数据

神经动力学模型方法和应用/阮炯,顾凡及,蔡志杰编著. —北京:科学出版社,2002

(现代数学基础丛书)

ISBN 7-03-008782-8

I. 神… II. ①阮…②顾…③蔡… III. 神经网络-动力学-生物模型-研究 IV. Q811.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 44338 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年4月第 一 版 开本:850×1168 1/32

2002年4月第一次印刷 印张:10 7/8

印数:1—2 000 字数:286 000

定价:28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

前 言

神经网络在最近 20 年中得到了迅速的发展，有关的论文及著作已有许多。本书并不想全面介绍神经网络，而只是想对神经网络与数学中动力学系统理论的交叉结合介绍一些我们在学习与研究中的体会。

我们力图在以下几个方面作一些尝试：(1) 将人工神经网络模型与生物神经网络模型用动力学观点统一起来，突出神经动力学的思想；(2) 把吸引子(包括收敛的、振荡的、混沌的三种类型)的研究贯穿在神经网络的理论与应用的整个过程之中；(3) 使应用数学工作者，通过本书可以了解动力系统中吸引子分析在神经网络研究中的对应问题与应用，而使从事生物、计算机、信息等学科研究的工作者，通过本书可以了解神经网络如何作为动力学系统来认识，怎样以吸引子分析的主线贯穿整个神经网络研究之中。

本书分四章。第一章讲述神经动力学的生物学基础；第二章介绍动力系统理论的基础知识；第三章是本书重点，介绍各类神经网络的动力学模型与问题，并讲述分析的方法与思想；第四章给出一些神经动力学应用的例子。

全书主要介绍国内外学者近几十年来在神经网络动力学方面的研究成果，其中包含了作者以及复旦大学神经网络研究小组同仁们的一些研究工作。

全书第一章由顾凡及执笔；第二章由阮炯执笔；第三章 §1~§6 及 §10 由阮炯执笔，§7~§9 由顾凡及执笔；第四章由蔡志杰执笔。在整个编写过程中林伟、黎丽娟两位同志帮助作者收集资料，并打印了大部分的书稿，在此特别向他们致谢。在本书的编写、出版过程中得到了科学出版社吕虹同志的大力支持与帮助，在此表示衷心感谢。

由于我们水平有限，在书中难免有错误与不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2001.12

目 录

| | |
|---|-----|
| 第一章 神经元的神经生物学背景 | 1 |
| §1.1 神经元的结构 | 1 |
| §1.2 神经元的功能特征 | 5 |
| §1.3 人工神经网络和现实性神经网络 | 9 |
| 参考文献 | 12 |
| 第二章 非线性动力学模型与问题, 分析与方法 | 13 |
| §2.1 非线性动力学模型与问题 | 13 |
| §2.2 非线性动力学分析与方法 | 54 |
| 参考文献 | 113 |
| 第三章 神经网络中的非线性动力学问题及分析 | 114 |
| §3.1 神经网络与动力系统 | 114 |
| §3.2 单个神经元的动力学模型与问题 | 119 |
| §3.3 离散的单层反馈型神经网络的动力学模型与问题 | 135 |
| §3.4 连续的反馈型神经网络动力学模型与问题 | 153 |
| §3.5 BSB 模型、BP 模型和环路 BP 模型及其它一些 离散网络模型的动力学行为 | 171 |
| §3.6 由 H-H 方程及 Chay 方程描述的神经活动中的各 类动力学行为 | 191 |
| §3.7 嗅觉神经网络 | 216 |
| §3.8 生物神经网络中的同步振荡 | 226 |
| §3.9 动态神经网络的混沌动力学性质 | 234 |
| §3.10 具有延迟的神经网络动力学系统模型和问题 | 245 |
| 参考文献 | 280 |
| 第四章 神经网络模型的应用 | 285 |
| §4.1 生物医学工程 | 285 |

| | | |
|------|------------|-----|
| §4.2 | 信号处理 | 294 |
| §4.3 | 优化问题 | 298 |
| §4.4 | 金融工程 | 309 |
| §4.5 | 分类 | 313 |
| §4.6 | 模式识别 | 328 |
| | 参考文献 | 339 |

第一章 神经元的神经生物学背景

神经细胞或者叫做神经元是神经网络的结构单元，也是它的功能单元。由于本书的主题是神经网络，因此我们是在这一层次上讨论问题，从而只把神经元作为构成神经网络的基本元件，而不把它本身也当作一个由更下一层次的元件——细胞膜上的膜电容、膜电导和各种离子通道等所构成的系统。这样，在这一章里我们只介绍神经元从信息处理的角度来看最为重要的外特征，而不去探究造成这些特性的内部机制。

§1.1 神经元的结构

尽管我们在上面声称神经元是神经系统的基本单元，但这决不意味着神经系统（即使是同一个动物中的神经系统）中的所有神经元都是一模一样的，好像由砖块构造的砖房中的砖块一样。事实上，神经系统中神经元的形态是多种多样的。粗粗分一分，在哺乳动物的脑中可区分出几何形状彼此不同的神经元多达 200 种以上，图 1.1.1 中给出的仅仅是其中的几个例子。这些细胞的形状和大小各异，反映了它们在处理信息的方式上也各有不同。应该牢记的是神经元决不仅仅是传输信息的中继站，典型的神经元总是从若干来源接受信号的，把这些信号整合起来再编码成复杂的输出信号，然后再把这一信号传输到许多别的细胞上去。

尽管神经元的这种多样性使问题复杂化，但是对许多神经元而言，我们还是可以把它们简化成由如图 1.1.2 所示的 3 个部分组成：细胞体、树突和轴突。

(1) 细胞体 神经元如同其它细胞一样有一个含有细胞核的细胞体，在其中进行复杂的代谢活动。在细胞体的膜上有许多特异化

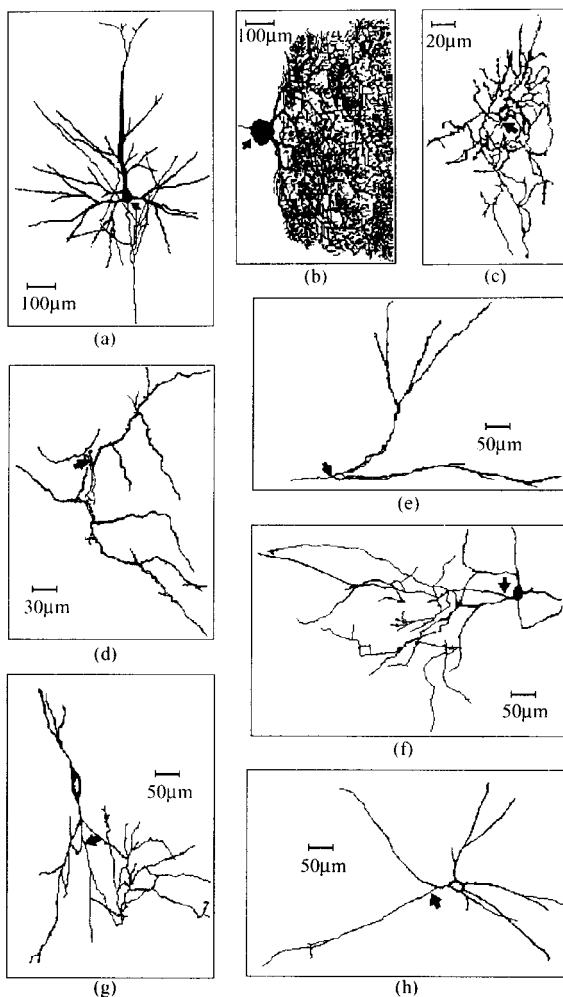
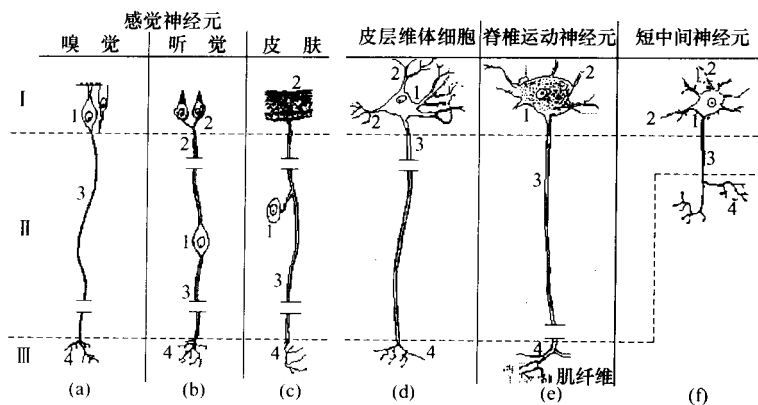


图 1.1.1 某些不同类型的神经元

(a) 大脑皮层中的锥体细胞; (b) 小脑皮层中的浦金野氏细胞; (c) 小脑皮层中的篮状细胞; (d) 桥脑中的多极细胞; (e~h) 在海马中可辨认出的 21 种细胞的四种. 细胞中轴突起始处以箭头指出. 另一些类型的神经元见图 1.1.2

(引自 Rosenzweig and Leiman, 1982)



| | 功能 | 解剖 |
|-----|-----|--------------|
| I | 输入区 | 树突, 有时也包括细胞体 |
| II | 传导区 | 轴突, 有时也包括树突 |
| III | 输出区 | 轴突末梢 |

| | |
|---|------|
| 1 | 细胞体 |
| 2 | 树突 |
| 3 | 轴突 |
| 4 | 轴突末梢 |

图 1.1.2 神经元中的各个结构和功能部分
(引自 Rosenzweig and Leiman, 1982)

的小区域, 其中一些是对特异性的化学递质起作用的受体, 另一些则从外界吸收营养或向外界排除废物. 但是从信息处理的观点来看, 细胞体和树突是专门用来接收和整合信息的, 而轴突则是用以把信息传递给其它细胞.

(2) 轴突 如图 1.1.1 和图 1.1.2 所示, 神经元在一端向外发出一个很长的突起, 其长度因细胞而异, 短的只有几微米, 长的可以达 1 米以上. 对许多神经元来说, 轴突在其离开细胞体之外形成一个锥形区域称为 **轴丘**. 除了极少的例外, 神经元都只有一个轴突, 然而从一根轴突上可以分出许多侧枝, 从而对许多其它神经元产生影响. 在轴突或其侧枝的末端常常分成许多直径很细的末梢, 它们与其它细胞的细胞体或树突形成联系.

(3) 树突 如图 1.1.1 和图 1.1.2 所示, 神经元除了在其一端向外发出轴突之外, 大多数神经元的细胞体还向其它各个方向发出许多突起, 这些突起又以非常复杂的形式分出许多分枝. 各种不同类型的神经元其主要区别就在于这些像树枝状的突起——树突形式各不相同. 这些形状复杂的树突大大扩大了神经细胞的表面积, 使它们可以接收更多来自其它神经元的输入. 现在已经知道, 像皮层锥体细胞这样的神经元, 其树突部分占到细胞总体体积的 95%.

(4) 突触 一般来说, 轴突的末梢端往往形成某种膨起, 称为**终扣**. 在终扣中有许多小泡, 其中含有一定量的化学物质——神经递质. 终扣并不和其它的神经元直接连在一起, 它终止在其它神经元的细胞体或树突的邻近, 中间隔开一个 $20 \sim 40\text{nm}$ 的空隙, 称为**突触间隙**. 在突触间隙后面的下一个神经元的细胞膜——突触后膜上具有对某些神经递质能起特异化反应的蛋白质——受体. 当前一个神经元终扣释放出某种神经递质, 通过突触间隙扩散到达另一个神经元的突触后膜时, 和相应的受体结合而打开某种离子通道. 终扣末端的细胞膜——突触前膜、突触间隙和突触后膜这三者合在一起完成信息从前一个细胞向后一个细胞的传递, 这三者的总体就称为**突触** (见图 1.1.3).

大多数突触发生在树突上. 在不少情况下, 树突上还会长出一个有小苞的圆盘状 (称为**侧棘**), 并在此处形成突触 (见图 1.1.3), 在细胞体上形成的突触只占突触总数中的一小部分.

在树突上形成的突触称为**轴突突触**, 而在细胞体上形成的突触则称为**轴体突触**. 此外, 在某些情况下, 树突和树突之间, 或者轴突和轴突之间也会形成突触.

上述突触都是通过化学递质的释放、扩散和结合来实现信息从一个神经元向下一个神经元的传递, 因此称为**化学突触**, 这种突触在高等动物的神经系统中占了绝大多数. 但也还有另一类突触称为**电突触**, 这类突触的间隙要比化学突触的小得多, 离子和小分子可直接从一个细胞流入其相邻的细胞. 离子从一个细胞通过通

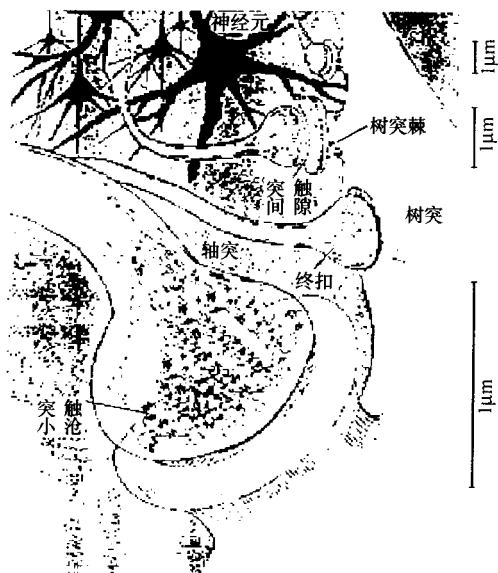


图 1.1.3 在树突表面和侧棘处形成的突触
(引自 Rosenzweig and Leiman, 1982)

道流入另一个细胞就可使一个细胞的电变化几乎即时传递到另一个细胞。在大多数情况下，离子流可以是双向的，但是某些电突触离子流只能沿单向流动，这种突触就称为 **整流突触**。

§1.2 神经元的功能特征

和神经元的结构相对应，从功能上来看神经元大致上可以分成 3 个部分：树突和细胞体上的突触是它的接收端或输入端，细胞体特别是轴丘以及紧接轴丘的一小段裸露在细胞外液中的轴突（这两者合在一起称为 **始段**）是整合来自各个突触的信息的场所，而轴突则是它的输出端。图 1.2.1 给出了神经元的这种功能分区的一个示意图。

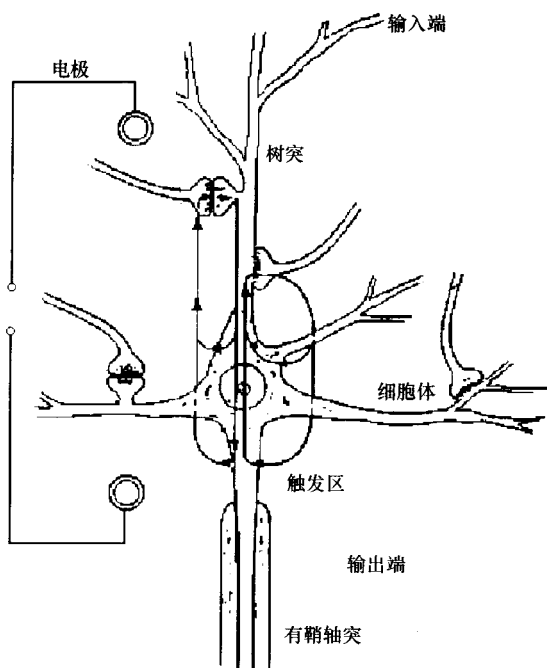


图 1.2.1 神经元的功能组织模式图

(引自 Freeman, 1992)

通常一个神经元和其它神经元要形成上千个突触联系。当突触前膜有神经冲动到达时，终扣中的突触小泡会向突触间隙中释放所含的神经递质，这些神经递质通过突触间隙扩散到突触后膜，并和其上的受体结合，而使离子通道开放，从而使某些离子流涌入后一个神经元或自其中流出。前者将使细胞膜内外的电位差减小，称为 **去极化**，其结果是神经元趋向兴奋；而后者则使这种电位差进一步增大，称为 **超极化**，其结果是神经元趋向抑制。究竟其结果属于何种情况则取决于神经递质的性质。由上所述可知突触可以分为两类：兴奋性突触和抑制性突触。由于神经递质的释放、扩散以及受体的结合导致离子通道的开放都有一个时间过程，因此从前一个神经元的神经冲动到达其神经末梢到后一个神经元的突触后

电位 (PSP) 发生变化有一段时间延迟, 称为 **突触延搁**.

根据 Kirchhoff 定律流入或流出突触的电流都必须形成一个回路, 因此当电流以某一方向流经突触时, 都要以相反方向流经始段膜, 这是由于细胞体上只有这一区域是裸露在细胞外液中, 阻抗最小, 而细胞体的其它表面都为其它神经元神经末梢的终扣以及另一种细胞——神经胶质细胞的组织所覆盖, 具有很高的阻抗. 因此虽然电流从激活的突触流经始段的过程中也会在沿路通过细胞体的膜有所分流, 但这种分流是很小的. 这样, 来自各个突触的电流在流经始段膜时就会总和起来, 称为 **空间总和**. 从功能的角度来说, 我们可以把始端段看成是将来自各个突触的信息进行整合的区域. 由于来自兴奋性突触的电流和来自抑制性突触的电流在始段处方向正好相反, 因此这种总和是代数和. 这一总电流在流经始段膜的电阻时形成某种电压降. 当这一电压降达到某种数值时就会在始段处触发一个神经冲动, 这一电压降的值称为 **阈值**. 由于神经冲动是在始段处触发产生的, 因此我们也常把始段处称为神经元的 **触发区**.

神经冲动也称为 **动作电位**. 它有一个特点, 即在正常生理状态下, 一旦膜内外的电压差达到阈值触发产生一个动作电位, 这个电位的幅度和波形都是固定不变的, 而且当它沿轴突传播时, 其波形和幅度也并不发生变化, 因此动作电位要么不被触发产生, 而一旦被触发产生其幅度和波形就是固定的. 动作电位的这一性质被称为动作电位的 **全或无定律**. 动作电位的持续时间约为 1 毫秒. 动作电位的全或无定律保证了它可以把它所携带的信息不失真地沿轴突全线进行传输.

动作电位一旦产生, 在其后一段时间内阈值上升到无穷大, 亦即在这段时间里, 不论神经元接收到多强的输入都不能再产生另一个动作电位, 这一段时间就称为 **绝对不应期**. 在经过绝对不应期之后, 阈值近似地按指数下降逐渐恢复到正常值, 亦即在这一段时间内, 只有当输入超过正常强度时才能触发起另一个动作电位, 这段时间就称为 **相对不应期**. 如果观察得很仔细的话, 还可以

发现从相对不应期过渡到正常阈值时还要经过一小段时间，在这段时间里阈值甚至低于正常值，这段时间被称为 **超常期**。

如果我们要仔细分析神经细胞膜上的电位变化过程，我们必须对膜的性质加以观察。由于细胞膜不允许离子自由通过，因此在细胞内（膜内）和细胞外（膜外）的各种离子浓度是不一样的，所以细胞膜起着某种电容的作用。当然细胞膜也并不是绝对绝缘的，即使在不被激发的状态下，它也允许有些离子通过膜形成跨膜的漏电阻。因此一般说来可以把细胞膜想象成由电阻和电容并联而成的等效电路。由于存在电容，当从某一神经纤维向某一突触传来一串神经冲动时，如果这些神经冲动之间的间隔足够短，那么当前一个脉冲在突触后膜上引起的电位变化还未全部消退之前，后一个脉冲又将在在此基础上引起新的电位变化而叠加在一起，这被称为 **时间总和**。

如果我们通过微电极向神经元注入一定强度的电流并使此电流强度保持不变而持续一段时间，同时测量神经元所发放的脉冲序列在经过一段过渡过程而最后达到稳态时的发放率（单位时间内的脉冲数），我们就可以发现这个发放率与注入电流强度之间服从一种 S 形曲线的函数关系（见图 1.2.2）。这一关系被称为神经元的 **输出函数**。

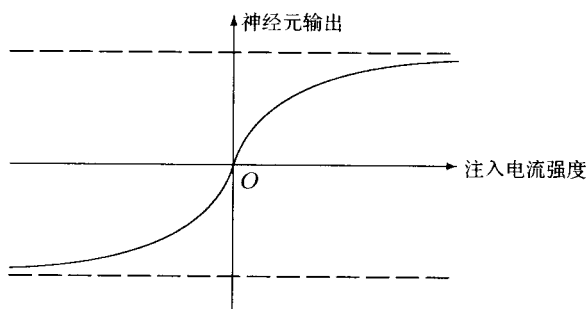


图 1.2.2 神经元的输出函数

此外，对于许多神经元来说，当它刚接收输入时，其脉冲发放

率较密, 如果输入强度维持不变, 这一发放率将会逐渐下降, 而最后稳定在某一水平, 这种现象称之为 **适应**。

最后, 我们还要指出在神经元发放一个脉冲之后, 膜电位重新恢复到原来未被激活时的水平 (静息电位), 这被称为 **复极化**, 甚或比静息电位更负的水平 (在不被激活时细胞内的电位比细胞外要负。当细胞接收兴奋性刺激时, 这一电位差减小, 亦即细胞内电位向细胞外电位靠近, 即去极化。当发生动作电位时, 其峰值甚至可使细胞内电位较膜外为正), 这被称为 **超极化**。

总结起来说, 从信息处理的观点来看, 大多数神经元主要具有下列外特性:

- (1) 突触有两类: 兴奋性突触和抑制性突触;
- (2) 存在突触延搁;
- (3) 神经细胞有 RC 性质, 并因此具有时间总和作用;
- (4) 存在空间总和作用;
- (5) 存在阈值;
- (6) 脉冲发放后发生复极化或超极化;
- (7) 发放脉冲后有一定的不应期 (绝对不应期和相对不应期);
- (8) 动作电位服从全或无定律;
- (9) 输出函数呈 S 形曲线;
- (10) 存在适应性。

§1.3 人工神经网络和现实性神经网络

数字电子计算机的发明和发展改变了整个人类社会。在不到半个世纪的时间里, 计算机已经历了从电子管到晶体管到集成电路到大规模、超大规模集成电路这样的几个飞跃。计算机的计算速度越来越快, 存储容量越来越大, 它已能实现许多以往只有人脑才能实现的功能, 从而被人们称为电脑。然而它从原理上和人脑却相差甚远。首先, 计算机是串行处理的, 而人脑是并行处理的; 其次, 计算机是按地址记忆的, 而人脑则是按内容记忆的; 再次, 计

计算机的运算单元和存储单元是明确区分开来的，而人脑则没有这种明确的区分，记忆分布在整个大脑。此外，计算机特别擅长于数学运算和逻辑运算，然而对即使是幼儿的大脑也能轻而易举地做到的从众多景物中识别某一特定目标，譬如其母亲这样简单的任务，对于计算机来说也是十分困难的。计算机需要人给它编制程序才能执行其特定的功能，而人脑则可以通过经验自觉地学会本领。为了弥补计算机的不足之处，使计算机更加智能化，人机界面对人更友善，人们正试图发展新一代的仿脑计算机。这种机器是由大量像神经元这样的元件组成的，进行并行处理，其记忆是按内容分布存储的，具有自组织和学习的能力。神经网络的兴起正是顺应了这一要求。

神经网络的基本元件是神经元，亦即具有生物神经元某些特性的元件。如同我们在本章一开始声明的那样，不把神经元本身当作一个系统来处理，亦即不考虑其内部的离子通道机制（作如上考虑的神经元模型常被称为神经元的**生物物理模型**，这种模型固然对理解神经元的内部机制是重要的，然而对于理解神经网络的功能常常是不必要的，它给在神经网络水平上研究的问题增添了非常大的而不必要的复杂性，这正如一位计算机工程师不必去管半导体物理中的细节一样），那么现有的模型通常都是从上节的 10 条性质中，抽取其中的某些性质来建立模型。从应用的角度来说，人们只要求神经网络能解决他们所希望解决的实际问题，而不去管神经系统中是否也是按同样的方法来解决，甚至其基本单元——神经元的性质也可能不完全符合生物神经元的真实情况。因此这种神经网络被称为**人工神经网络**，或是由生物神经网络中得到某些启发而建立的模型。

另一类神经网络其主要目的是试图以此作为理解生物神经信息处理的工具。因此，它首先要求其基本单元的特性不能违背生物神经元本身固有的特性，一般都是从上节的 10 条性质中选取若干条作为建立其神经元模型的前提条件；其次，由这些神经元构造的神经网络，在各神经元的联结方式上多采取某个真实生物神经回

路的内部结构方式，因此常可通过对此类神经网络的仿真来解释相应神经回路的信息处理机制。这一类神经网络常被称为 **现实性神经网络**。

根据对什么是神经元的输出变量，或者说根据对神经编码的不同看法，可以把现实性神经元模型分为两大类。一类认为神经元的输出信息是由其发放率携带的，这是一个模拟量，它和膜电流或刺激之间存在着某种单调有界不减函数的关系，我们把这一类神经元模型称为 **模拟神经元模型**。上述性质往往是此类模型中最主要的非线性性质，因此在由它构成的神经网络的动力学性质中扮演着重要的角色。另一类模型则认为神经元的输出是一串脉冲序列，不仅这串序列的发放率，亦即其在单位时间内的脉冲数，或者说是其一阶统计量携带有信息，而且在一定时间窗内这一序列的时间模式，或者说其高阶统计量也携带有信息。这类模型常被称为 **脉冲发放神经元模型** (spiking neuron model) 或 **合后发放模型** (integrate-and-fire model)。从目前的情况看，大多数的神经网络都采用模拟神经元作为其基本单元。但近年来有越来越多的人认识到发放率编码并不是普适的，在许多场合下神经元发放的脉冲序列的时间模式起着至关重要的作用，因此对脉冲方法神经元模型的研究正在增多。

我们相信，对现实性神经网络的研究将不仅有助于我们揭开脑工作原理的奥妙，而且一旦当我们真正地在这方面有所进展并将它借鉴到人工神经网络方面来，它还必将推动人们设计出更接近于人脑的智能机器来。

最后应该指出，在上几节中我们虽然论述并总结了迄今为止神经网络工作者在他们建立模型时用到的神经元信息处理的主要性质，但近几年来神经科学的飞速发展，使我们对神经元如何工作又有了不少新的认识，一些传统的观点正在被修正。Koch (1997) 在最近的一篇综述中特别提到了有关神经元如何进行计算的三方面的进展：有关树突的研究、脉冲及其发放时刻以及突触的可塑性问题。传统上一般把树突看成某种无源电缆，然而现在已经知道