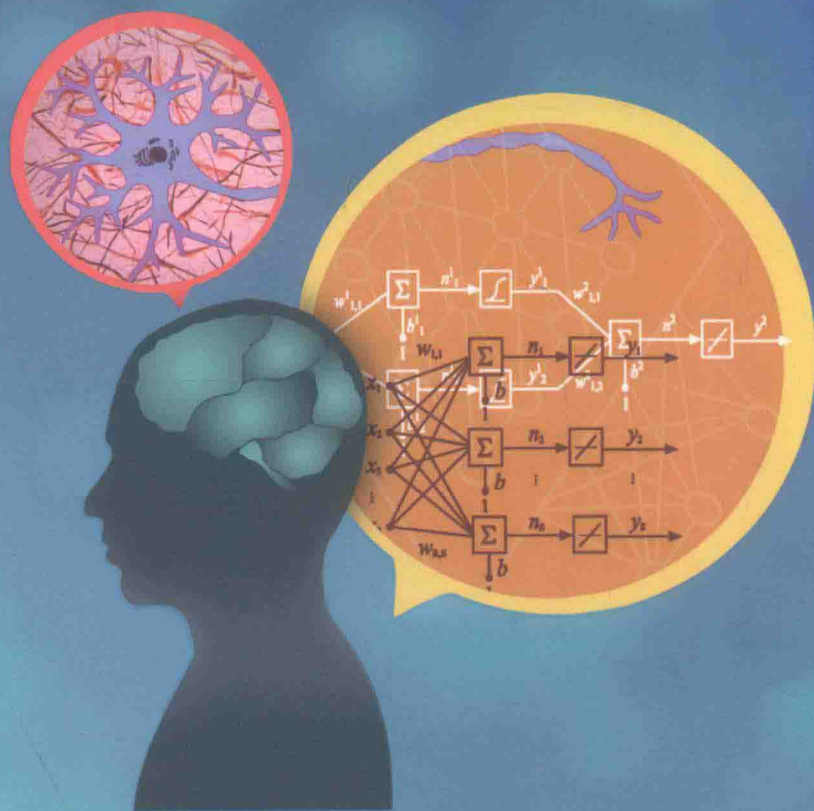


» 人工智能教育丛书

高等学校新工科人工智能科学与技术专业规划教材



# 人工神经网络

## 理论及应用

文常保 茹 锋 / 编著



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

人工智能教育丛书

高等学校新工科人工智能科学与技术专业规划教材

# 人工神经网络理论及应用

文常保 茹锋 编著

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要介绍生物神经网络理论基础、人工神经网络概述、人工神经网络数理基础、感知器、BP神经网络、RBF神经网络、ADALINE神经网络、Hopfield神经网络、深度卷积神经网络、生成式对抗网络、Elman神经网络、AdaBoost神经网络、SOFM神经网络、基于Simulink的人工神经网络建模、基于GUI的人工神经网络设计等基本内容,这些内容是进一步掌握人工神经网络发展、理论、实践及应用的基础。

本书可作为相关专业的本科学生和研究生教材,也可作为人工神经网络理论、实践及应用的工程技术人员的自学和参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

人工神经网络理论及应用/文常保,茹锋编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2019.3

ISBN 978-7-5606-5253-5

I. ①人… II. ①文… ②茹… III. ①人工神经网络 IV. ①TP183

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第039691号

策划编辑 万晶晶

责任编辑 万晶晶

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2019年3月第1版 2019年3月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 15

字 数 350千字

印 数 1~3000册

定 价 39.00元

ISBN 978-7-5606-5253-5/TP

**XDUP 5555001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

# 前 言

作为人工智能的关键技术，人工神经网络已经成为新一轮科技革命和产业变革的重要驱动力量，也成为世界各国争相发展的战略技术之一。人工神经网络具有多学科综合、高度复杂的特征。

本书从系统到相对独立，在内容的选取和编排上力求重点突出、难点分散、深入浅出、通俗易懂，简化了深奥的理论论述，在对基本理论算法讲解的基础上，注重对算法迭代过程、实践应用和实现技术的引入，并在人工神经网络理论篇章节之后，加入了 Simulink 的人工神经网络建模与基于 GUI 的人工神经网络软件系统设计的内容，弥补了重理论轻实践和无法进行应用教学的缺憾。

本书分为三篇，共 15 章。

第一篇为神经网络基础篇(第 1~3 章)，主要内容包括生物神经网络理论基础、人工神经网络概述、人工神经网络数理基础，从生物神经网络角度出发介绍了神经元的结构、生物电活动，在细胞层面解释了神经网络进行信息传递和信息存储的机理，并对人工神经网络理论在各个阶段的发展、特点、应用，以及人工神经网络算法中运用到的导数、微分、梯度等重要数理知识进行了概述。

第二篇为人工神经网络理论篇(第 4~13 章)，主要内容包括感知器、BP 神经网络、RBF 神经网络、ADALINE 神经网络、Hopfield 神经网络、深度卷积神经网络、生成式对抗网络、Elman 神经网络、AdaBoost 神经网络、SOFM 神经网络。为了加强理论学习的深度，本篇在阐述理论算法时通过逐次迭代展开推导，而且在每种理论算法后面都给出了应用及实践案例。多年的课堂教学实践证明这种学习方式对于理解和掌握算法机理是非常有效的。

第三篇为人工神经网络实践及应用篇(第 14~15 章)，主要内容包括基于 Simulink 的人工神经网络建模和基于 GUI 的人工神经网络设计。这些内容是进一步理解和掌握人工神经网络理论、实践和应用的基础。

本书由文常保、茹锋教授负责编写和统稿。参与本书编写、绘图、程序调试的人员还有王蒙、宿建斌、丁琦、高南、马文博、刘鹏里和戚一婷等。

本书在编写过程中参阅了许多资料和文献，在此对这些参考资料、文献及报道的作者一并致以诚挚的谢意。对于共享资料没有标明出处，以及对某些资料进行加工、修改后引用到本书的，我们在此郑重声明，其著作权属于原作者。

由于作者水平有限，书中难免存在一些不足、不妥之处，恳请有关专家和广大读者批评指正。

编 者

2019 年 1 月 1 日

# 目 录

## 第一篇 人工神经网络基础篇

第 1 章 生物神经网络理论基础 .....	3
1.1 生物神经元的结构和功能 .....	3
1.2 神经系统的电活动 .....	4
1.3 人脑的信息存储 .....	6
1.4 人脑与电脑 .....	8
习题 .....	10
参考文献 .....	11
第 2 章 人工神经网络概述 .....	12
2.1 人工神经网络发展历程 .....	12
2.2 人工神经网络特点 .....	18
2.3 人工神经网络应用 .....	19
习题 .....	23
参考文献 .....	24
第 3 章 人工神经网络数理基础 .....	25
3.1 神经元模型 .....	25
3.2 导数 .....	29
3.3 微分 .....	30
3.3.1 定义 .....	30
3.3.2 定理与性质 .....	30
3.4 积分 .....	30
3.4.1 定义 .....	30
3.4.2 定积分定理与性质 .....	31
3.5 梯度 .....	31
3.6 行列式 .....	32
3.7 矩阵 .....	32
3.7.1 概念 .....	32
3.7.2 矩阵的运算 .....	33
3.7.3 矩阵运算性质 .....	33
3.8 向量 .....	34
3.8.1 定义 .....	34
3.8.2 向量的运算和向量内积的准则 .....	34
3.8.3 线性表示与线性相关 .....	34
3.9 特征值与特征向量 .....	34
3.10 随机事件与概率 .....	35

3.11 范数 .....	36
3.11.1 定义 .....	36
3.11.2 向量的范数 .....	36
3.11.3 矩阵的范数 .....	36
习题 .....	37
参考文献 .....	37

## 第二篇 人工神经网络理论篇

<b>第4章 感知器</b> .....	41
4.1 概述 .....	41
4.2 感知器的结构和原理 .....	42
4.2.1 感知器的结构 .....	42
4.2.2 感知器的原理 .....	42
4.2.3 感知器的学习策略 .....	44
4.3 单层感知器 .....	44
4.3.1 单层感知器模型 .....	44
4.3.2 单层感知器的功能 .....	46
4.3.3 单层感知器的学习算法 .....	47
4.3.4 单层感知器的局限性 .....	49
4.4 多层感知器 .....	50
4.4.1 多层感知器的结构和特点 .....	50
4.4.2 多层感知器的功能 .....	51
4.4.3 多层感知器的学习算法 .....	53
4.5 应用案例 .....	54
习题 .....	58
参考文献 .....	59
<b>第5章 BP神经网络</b> .....	60
5.1 概述 .....	60
5.2 BP神经网络结构 .....	61
5.3 BP神经网络算法 .....	62
5.3.1 算法原理 .....	62
5.3.2 反向传播实例 .....	66
5.4 BP算法的不足与改进 .....	68
5.4.1 BP算法的不足 .....	68
5.4.2 BP算法的改进 .....	70
5.5 应用案例 .....	72
习题 .....	78
参考文献 .....	79
<b>第6章 RBF神经网络</b> .....	80
6.1 概述 .....	80
6.2 RBF神经网络结构和原理 .....	81
6.3 RBF神经网络算法 .....	82
6.4 RBF神经网络的相关问题 .....	84

6.5 应用案例 .....	85
习题 .....	87
参考文献 .....	88
<b>第 7 章 ADALINE 神经网络</b> .....	<b>89</b>
7.1 概述 .....	89
7.2 ADALINE 结构和原理 .....	89
7.2.1 单层 ADALINE 模型 .....	89
7.2.2 算法原理 .....	90
7.2.3 多层 ADALINE 模型 .....	92
7.3 应用案例 .....	94
习题 .....	98
参考文献 .....	98
<b>第 8 章 Hopfield 神经网络</b> .....	<b>99</b>
8.1 概述 .....	99
8.2 离散 Hopfield 神经网络 .....	99
8.2.1 网络结构 .....	99
8.2.2 工作方式 .....	100
8.2.3 网络的稳定性 .....	101
8.2.4 网络算法 .....	102
8.3 连续 Hopfield 神经网络 .....	104
8.3.1 网络结构 .....	104
8.3.2 网络的稳定性 .....	106
8.4 应用案例 .....	106
习题 .....	112
参考文献 .....	112
<b>第 9 章 深度卷积神经网络</b> .....	<b>113</b>
9.1 概述 .....	113
9.2 深度卷积神经网络的结构和原理 .....	113
9.2.1 深度卷积神经网络的结构 .....	113
9.2.2 深度卷积神经网络的原理 .....	115
9.3 几种基本的深度卷积神经网络 .....	116
9.3.1 AlexNet .....	116
9.3.2 VGGNet .....	117
9.3.3 ResNet .....	118
9.4 应用案例 .....	119
9.4.1 几种深度学习应用框架 .....	119
9.4.2 基于 AlexNet 的图像识别 .....	120
习题 .....	123
参考文献 .....	123
<b>第 10 章 生成式对抗网络</b> .....	<b>124</b>
10.1 概述 .....	124
10.2 生成式对抗网络的结构 .....	125

10.3	生成式对抗网络算法 .....	126
10.4	改进的生成式对抗网络 .....	128
10.5	应用案例 .....	130
	习题 .....	133
	参考文献 .....	133
<b>第 11 章</b>	<b>Elman 神经网络</b> .....	<b>134</b>
11.1	概述 .....	134
11.2	Elman 神经网络结构和原理 .....	134
11.3	Elman 神经网络的学习算法 .....	136
11.4	Elman 神经网络稳定性分析 .....	137
11.5	应用案例 .....	139
	习题 .....	143
	参考文献 .....	143
<b>第 12 章</b>	<b>AdaBoost 神经网络</b> .....	<b>144</b>
12.1	概述 .....	144
12.2	AdaBoost 网络结构和算法 .....	144
12.3	AdaBoost 算法中的影响因素 .....	147
12.3.1	AdaBoost 算法的训练误差分析 .....	147
12.3.2	AdaBoost 分类问题中的损失函数 .....	148
12.3.3	AdaBoost 算法的正则化 .....	149
12.4	应用案例 .....	150
	习题 .....	155
	参考文献 .....	156
<b>第 13 章</b>	<b>SOFM 神经网络</b> .....	<b>157</b>
13.1	概述 .....	157
13.2	SOFM 神经网络的结构 .....	157
13.3	SOFM 神经网络的原理和学习算法 .....	158
13.3.1	SOFM 神经网络的原理 .....	158
13.3.2	SOFM 神经网络的学习算法 .....	160
13.4	应用案例 .....	161
	习题 .....	166
	参考文献 .....	166

### 第三篇 人工神经网络实践及应用篇

<b>第 14 章</b>	<b>基于 Simulink 的人工神经网络建模</b> .....	<b>169</b>
14.1	概述 .....	169
14.2	Simulink 启动和神经网络模块库 .....	169
14.2.1	Simulink 的启动 .....	169
14.2.2	Simulink 神经网络模块库 .....	171
14.3	模型的设置和操作 .....	175
14.3.1	模块的操作 .....	175
14.3.2	信号线的操作 .....	176



14.3.3	仿真参数的设置 .....	176
14.3.4	常用模块的设置 .....	177
14.4	单神经元建模 .....	180
14.5	函数逼近的 Simulink 仿真模型 .....	183
14.5.1	参数未改变的模型及仿真 .....	183
14.5.2	改变参数的模型及仿真 .....	185
14.6	应用案例 .....	189
	习题 .....	193
	参考文献 .....	193
<b>第 15 章</b>	<b>基于 GUI 的人工神经网络设计 .....</b>	<b>194</b>
15.1	概述 .....	194
15.2	软件架构设计 .....	194
15.3	创建工程 .....	195
15.3.1	FIG 文件编辑器 .....	197
15.3.2	M 文件编辑器 .....	198
15.4	主页面设计 .....	199
15.5	交互式参数设置 .....	202
15.6	软件主要功能设计 .....	204
15.6.1	检测识别 .....	205
15.6.2	处理建议 .....	214
15.7	辅助功能 .....	217
15.8	帮助文件制作 .....	219
	习题 .....	221
	参考文献 .....	222
<b>附录 A</b>	<b>GUI 对象的常用属性 .....</b>	<b>223</b>
<b>附录 B</b>	<b>特殊字符格式说明 .....</b>	<b>226</b>
<b>附录 C</b>	<b>软件代码 .....</b>	<b>227</b>

# 第一篇

## 人工神经网络基础篇

- 第 1 章 生物神经网络理论基础
- 第 2 章 人工神经网络概述
- 第 3 章 人工神经网络数理基础



## 第 1 章 生物神经网络理论基础

生物神经科学的崛起对于人类认识和改造世界都具有重大的意义。人脑是神经系统的重要组成部分,其包含了超过 860 亿个神经元的细胞集合体,是人类的中央信息处理机构,它不断地接收、分析、存储信息并作出相应的决策与判断。人工神经网络是从信息处理角度对人脑神经元进行抽象,建立其行为机制模型,并按照不同的连接方式组成不同的网络结构,进而模拟神经元网络动作行为的一门科学技术。它涉及了生物学、数学、电子、信息科学等众多学科和领域,另外,目前大部分人工神经网络研究是基于数学算法和生物神经网络二者相结合来实现创新的,因此学习和掌握生物神经网络的组织结构和运行机理对于后续研究工作具有十分重要的意义。本章将简要介绍生物神经元的结构以及发生在神经元上的生物电活动,并在细胞层面解释神经网络进行信息传递和信息存储的机理,最后探讨了人工脑和生物脑的区别和联系。

### 1.1 生物神经元的结构和功能

人类之所以拥有着地球上其他物种所不具备的高级智慧,是因为人类拥有高度复杂的大脑,而大脑主要由神经元构成。因此,要认识大脑的工作方式,首先需要了解组成神经系统的生物神经元的结构和功能。

神经元和胶质细胞是构成神经系统的两大部分。神经元具有感受刺激和传导兴奋的作用,是神经系统的基本结构和功能单位。譬如,人类中枢神经系统含有约 1000 亿个神经元,仅大脑皮层中就有大约 140 亿个,这些神经元负责接收外界刺激,并进行信息的加工、传递和处理。在中枢神经系统中胶质细胞的数量大约为神经元的 10 倍,虽然数量庞大,但并不负责信息的接收和处理,只是负责协助神经元的活动。尽管胶质细胞在神经系统中扮演着“助理”的角色,却可以提升神经细胞动作电位的传播速度,而且为神经元提供营养并维持适宜的局部环境。

1873 年,意大利科学家 Camillo Golgi 创立铬酸盐-硝酸银染色法之后,人们第一次真正认识到了神经元的特殊结构,并且奠定了现代神经学的基础。他随后发表了《中枢神经系统的微细解剖》,并为此获得了 1906 年诺贝尔生理学 and 医学奖。19 世纪末期,德国神经科学家 Franz Nissl 发明了“尼氏染色法”,他通过碱性染料对神经元中的尼氏小体进行染色,将神经组织中的神经元从其他胶质细胞中区分开来。该方法的出现使观察神经元的分布和数目成为可能,目前仍在生物、神经学等领域广泛使用。

神经元是一种高度极化的细胞,主要由胞体和突起两部分组成,突起是神经元细胞膜特化的结构,按照结构不同又可分为轴突和树突,如图 1-1 所示。胞体主要负责神经元的代谢和营养,其内部含有细胞核和细胞器。细胞核是遗传物质储存和复制的场所,同时负

责控制细胞的代谢活动；细胞器包括高尔基体、线粒体、尼氏小体和细胞骨架结构等，它们分工明确、相互配合，从而执行细胞生命活动的多种生物学功能。树突是胞体的延伸，从胞体发出的树突可以是一根，也可以是多根，分支较为复杂，且形态上由近及远逐渐变细，它的主要功能是接收其他神经元传递过来的信息。轴突通常自胞体发出，其起始部位呈圆锥形，称为轴丘；轴突的分支较少，长短差别大，最长甚至可以达到1 m以上，其直径较树突小，但全长直径平均，偶尔长有侧枝。轴突表面的细胞膜称为轴膜，内含的细胞质称为轴质。轴突的主要功能是在轴膜上传导神经冲动。

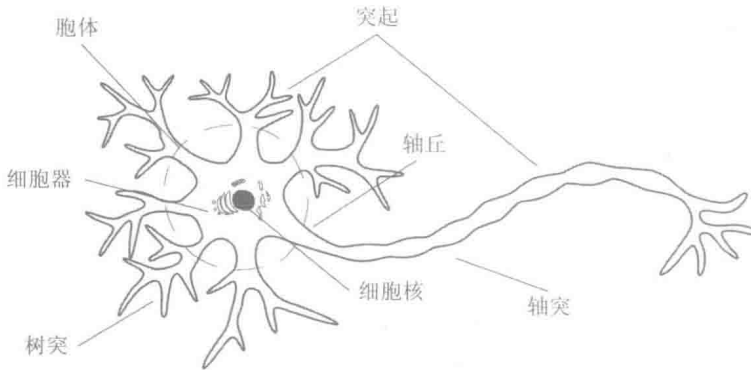


图 1-1 神经元结构

生物神经元按照功能可以分为感觉神经元、运动神经元和中间神经元三类，如表 1-1 所示。感觉神经元从外周接收信号并将信号传递到大脑中，使人产生相应的感觉；运动神经元将大脑产生的信息和指令传输到肌肉或者腺体，使人作出相应的反应；中间神经元在传入和传出过程中起联系作用，可以将信息从大脑传递到较远的身体部位，也可以在局部回路中进行信息的传递。人类神经系统中 99% 的神经元都是中间神经元，它们构成了相当复杂的中枢神经系统。

表 1-1 生物神经元的分类及功能

名称	别称	位置	功能
感觉神经元	传入神经元	胞体分布在脑、脊神经节内；末梢分布在皮肤和肌肉中	从外周接收信号，并将信号传递到大脑
运动神经元	传出神经元	脑、脊髓和自主神经节内	将大脑产生的信息和指令传递到肌肉或腺体
中间神经元	联络神经元	整个神经系统	在传入和传出神经元之间起联系作用

## 1.2 神经系统的电活动

信息传递的本质是神经细胞间膜电信号的传递。信息以电信号的形式编码在神经元的细胞膜上，没有受刺激的神经元细胞膜处于静息状态，当它受到一定形式的刺激后，就会产生各种形态不一的超极化或去极化电信号。其中，超极化过程指电位偏离静息状态呈负

向；去极化过程是指电位偏离静息状态呈正向。一切电信号的产生与分布在细胞膜上的离子通道紧密相关，离子通道是一种允许离子选择性通透的跨膜蛋白，神经系统的信息传递正是通过这种跨膜离子流所产生的膜电位变化来进行的。若要进行归类，则细胞膜电位可以分为静息膜电位、动作电位和局部分级电位三种电位类型。

静息膜电位是神经元在静息状态下，细胞膜形成的内负外正的稳定电位，它是由三种静息状态下开放的离子通道  $K^+$ 、 $Cl^-$ 、 $Na^+$  决定的。细胞膜两侧的离子浓度在不同离子泵的作用下维持不对称分布。离子泵是膜运输蛋白之一，它能够驱使离子逆浓度梯度穿过细胞膜。虽然每种离子都有顺浓度梯度运动的趋势，但是当化学势能和电势能达到平衡时，就不再产生离子的跨膜流动了，因此静息膜电位实质上是这三种离子的综合平衡电位。

动作电位是神经元受到刺激后，在静息膜电位基础上发生的尖峰状电位变化，它是神经系统信息传递的基本语言。神经系统对外界信息的编码，除了部分神经元，如视网膜光感受器细胞采用局部分级电位以外，多数神经元都将信息存储在动作电位中。

给一个神经元注入一个由小到大的正向电流，可以观察到局部膜的去极化反应，这就是局部分级电位。当电流增大超过一定阈值后，就产生了动作电位。动作电位的特点是快速、可逆转、可传播。它包括去极化、复极化和超极化三个过程，如图 1-2 所示。

(1) 去极化过程。去极化过程是由于大量的  $Na^+$  通道开放，引起  $Na^+$  大量快速内流所导致的，此时细胞膜电位正向偏离静息膜电位迅速上升。

(2) 复极化过程。复极化过程是大量  $K^+$  通道开放，引起  $K^+$  快速外流的结果，但由于  $K^+$  通道对膜的去极化反应较  $Na^+$  通道慢，导致  $K^+$  的膜电导增加反过来又促进了这一过程，因此电压正偏达到峰值后很快下降呈尖峰状。

(3) 超极化过程。超极化过程是指随着  $Na^+$  通道的关闭和  $K^+$  膜电导增加过程，所导致的内部电位向更负的方向发展，外部电位向更正的方向发展，从而使得细胞膜内外电位差短时间负向增大的一种现象。

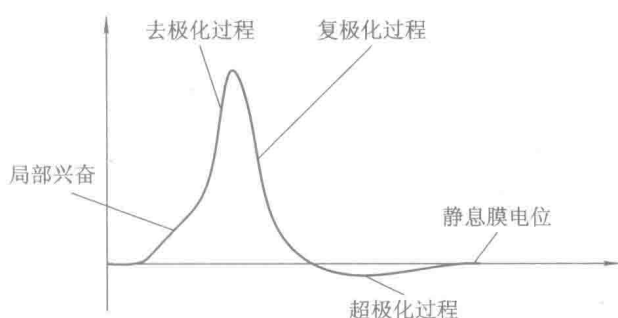


图 1-2 动作电位

细胞膜电位的改变伴随着突触活动，突触活动在神经系统的信息传递和调节中占主要地位，它是维持神经系统功能的基础。人脑的皮层中包含大约 60 万亿个神经突触，突触是神经元之间在功能上发生联系的部位，它由突触前膜、突触间隙和突触后膜三部分构成，其中突触前膜和突触后膜可以来自于同一神经元，也可以来自于不同神经元。

突触进行信息传递的方式包括电突触传递和化学突触传递两种，如图 1-3 所示。在电突触传递过程中，前神经元和后神经元之间经缝隙连接进行化学物质传递，缝隙通常很

小, 仅 2~3 nm。前后膜之间阻抗很低, 膜上有允许带电离子和局部电流通过的蛋白通道, 传递方式是直接扩散, 并且在神经元之间形成双向传播的突触联系, 它遍布整个神经系统, 具有双向性和快速性。化学突触传递以神经递质作为媒介, 形成复杂的单向突触联系, 突触前神经元首先将受体接收的化学信号转换为电信号, 接着将电信号通过电位传递到轴突末端, 转化为突触囊泡的分泌反应, 然后通过轴突末端突触囊泡的胞吐作用释放神经递质到突触间隙中, 突触后神经元利用其树突细胞膜表面的受体来接收该信息输入。因此, 突触前神经元的细胞膜电信号可以由神经递质的介导转变为突触后神经元的膜电信号, 也可以通过电生理的方法记录和分析突触进行信息传递的过程。

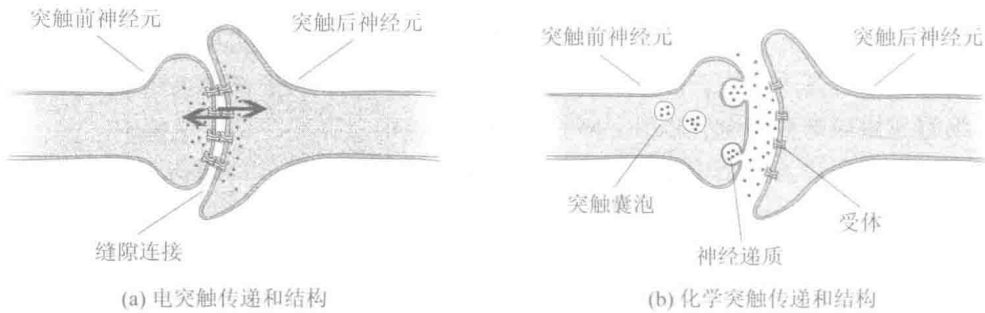


图 1-3 突触传递和结构

信息以电信号的形式编码在神经元的细胞膜上, 神经系统通过动作电位的发放使信息得以传递。研究人员发现, 神经元信息编码与动作电位的放电频率、放电活动的精确时间以及相关神经元的群体活动时间、空间特性都有所关联。虽然, 人类已经对神经元细胞膜电位分布、放电机制、离子通道还有突触活动过程有了非常深入的了解, 但对于神经元细胞编码和放电序列携带信息的具体形式依然没有完整的认识。神经元放电过程中产生的关于时间的电压波形具有不规则性, 透过不规则的表面, 实质上其中包含了大量的信息。

1952 年 MacKay 和 McCulloch 二人最先开展了将信息理论应用于神经系统的工作。他们对动作电位进行测量得到关于时间排布的电位信号波形, 并以一定时间间隔划分, 得到一串由每个时间间隔对应的动作电位值, 称为动作电位串。在每个时间间隔内, 放电活动以一定的概率发生, 若发生则用数字“1”表示, 若不发生则用数字“0”表示, 结果使该动作电位串转换成了一串二进制编码。根据这种假设, 可以推测: 如果神经元细胞膜上的电位变化携带了信息, 那么给神经元施加不同的刺激, 得到的编码会随着所施加刺激的变化而变化; 相反地, 如果给神经元反复施加相同的刺激, 得到的编码也将会相同。美国普林斯顿大学的 Strong 和 Koberle 等人在 1996 年发表的论文“Entropy and Information in Neural Spike Trains”中指出, 神经元受到相同的刺激后, 每次产生的动作电位串得到的编码具有一定程度上的相似性, 但总是有所不同, 这种现象表明该动作电位携带的信息中混杂着噪声。因此, 可以猜想动作电位串携带的有用信息应该等于总信息量与噪声量的差值。

### 1.3 人脑的信息存储

人脑的信息存储就是人们常说的“记忆”, 此时大脑仿佛是一台录像机, 人类的眼睛就

像摄像头，大脑时刻都在记录着我们眼前所看到的景物。但是，录像跟人类记忆之间又存在着很大的区别。首先，物理上的录像自存储之日起除非发生数据损坏，否则就是不变的，但记忆有可能“记错”，它就像隐藏在脑海中的一块块拼图，当人们开始回忆某次事件时，就把对应的拼图找到开始拼接，其中经常伴随着拼图拼错或是丢失的情形。其次，物理录像机数据存储的地点是确定的，即它的硬盘或是外部的存储卡。专业技术人员甚至能够确定这些存储设备内部存有指定文件的详细地址，但是人脑存储数据的地方或者准确部位无法确定，没有人能够告诉你是哪几条神经元存放着你某天、某时刻的记忆。造成这种区别的最大原因就是人脑的神经网络具有可塑性，而电脑并不具备这个特性。

人脑信息存储的机理与生物神经网络的可塑性有关。

从宏观角度来看，可塑性就如同手指压一下橡皮泥，上面就会留下一个痕迹的特性。大脑在这个特性的驱使下会产生短期、中期和长期记忆。短期记忆就是大脑即时的生理生化反应；中期记忆和长期记忆是因大脑细胞结构发生改变从而建立的固定联系。同时，经过不断重复和训练，短期记忆会转变为中期记忆，中期记忆会向长期记忆发展。还有一种情况是，当人处于急剧的情感、情绪波动或刺激时，大脑内部生理化学反应加速，导致神经网络结构发生变化，会即刻产生令人终生难忘的记忆。

从微观角度来看，大脑具有可塑性是由于突触具有可塑性。突触的可塑性分为短时程可塑性和长时程可塑性。短时程可塑性可在数毫秒或数分钟内出现；长时程可塑性则可以维持数天或更长。研究表明，短时程可塑性与突触前膜变化有关，长时程可塑性与突触后膜的改变有关，这被认为是大脑短期记忆和中长期记忆的生理基础。

突触的可塑性表现在该突触的传递强度上。突触传递的强弱不是一成不变的，它会表现出不断变化的传递效能。突触传递强度的改变可能由突触前神经元的变化引起，这些变化包括活性区的个数、突触囊泡内化学物质的含量以及化学物质释放的概率。当然，突触传递强度的改变也可能由突触后神经元的变化引起，突触前神经元释放的化学物质通过突触间隙到达突触后神经元，可以影响突触后膜的活动和结构，包括突触后膜受体或通道数量的增减、支架蛋白和信号分子的活动变化等。

突触前神经元释放的化学物质包括神经递质和神经调质。神经递质是突触进行信息传递时充当媒介的化学物质，它的作用时间很快，通常会小于 1 ms，它直接影响突触后膜的离子通道并改变膜对离子的通透性，产生对突触后膜电位抑制或兴奋的效果。神经调质是神经元释放的一些由 2~40 个氨基酸组成的大分子，它的作用时间较长，可以持续几分钟甚至几小时，但通常会有几秒的潜伏期，它作用于突触后膜和细胞内与酶有关联的特定受体蛋白上，能够改变或引起突触后神经元的生化反应。换句话说，神经调质本身不具备传递信息的作用，它不会直接引起突触后神经元的兴奋或抑制等效应，但是它可以间接地调节神经递质在突触前神经元的释放及突触后神经元对递质的反应。有学者认为，人类大脑的记忆、学习等长期变化很可能是基于神经调质的作用。德国科学家 Haken 在其著作《Principles of Brain Functioning》中提到，一小群神经调质神经元可以影响大范围的脑区，并引起其功能性质的长期变化，这些化学物质起到了类似“控制参数”的作用，因此十分重要。

突触后神经元可以接收来自多个不同突触前神经元的信息输入，由于某种神经递质是否起作用、起什么作用主要由突触后膜的受体性质来决定，因此，其传递强度取决于突触后细胞膜的形态、受体的组成和数量，并且同一个后神经元，不同突触间的结构和分子也



存在不同。也就是说，整个突触后结构是一个变化的活跃的组合体，突触后膜的受体及通道等结构可以受到调节而产生变化，突触前神经递质和神经调质的释放过程也能够影响突触后膜的功能结构，进而会改变突触传递的强度。

在探索人脑的记忆产生过程中，无数科学家和研究人员前赴后继，创立了许多学说，但是人脑的记忆机理至今仍存在着很多谜团：记忆究竟是什么？人类有“灵魂”吗？我们的自由意志从何而来？

1994年，英国物理学家和生物化学家 Crick 在《The Astonishing Hypothesis》中试图解释这些问题，他认为意识是由大脑中神经细胞和其他胶质细胞活动产生的，不仅仅在细胞层面，也包括构成它们的原子、分子和离子，这些基本粒子的性质也对人类精神世界的构成具有一定的作用。截至目前，人类依然在锲而不舍地探索从原子、分子、离子到神经细胞是根据什么机制、如何运行并构成人类丰富思想世界的。相信探寻神经网络的努力只要能持续下去，最终就一定能够找到人类想要的答案。

## 1.4 人脑与电脑

世界上第一台电子计算机 ABC (Atanasoff - Berry Computer) 由爱荷华州立大学的 Atanasoff 和他的研究生 Berry 二人于 1942 年共同设计制造并测试成功，它运用二进制算法，仅可用于求解线性方程组问题，不可编程。世界上第二台电子计算机 ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Calcula) 诞生于 1946 年，它以电子管为元器件，每秒能进行 5000 次加法运算、400 次乘法运算，还能够进行平方、立方、正余弦等更复杂的运算，这个发明是一个划时代的创举。由于计算机能够解决计算和逻辑操作问题，与人类大脑的作用有些相似，因此人们又称计算机为“电脑”。

电脑经历了几代的发展，由最初的电子管计算机、晶体管计算机，到集成电路计算机，直至现如今正在高速发展的大规模集成电路计算机，其存储、基本指令和线路间相互作用的设计、理论思想都源自于冯·诺依曼 (John von Neumann, 1903—1957)。他当年参与了 ENIAC 的研制，并发现 ENIAC 存在一些不足之处，经过对这台计算机深入的思考和总结，他与研究小组发表了曾轰动一时的存储程序通用电子计算机方案 EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer)，这份报告正式提出了沿用至今的冯·诺依曼结构，它抛弃十进制，采用了二进制算法，并对计算机中许多关键性问题的解决做出了重要贡献，对后来的计算机设计和影响深远。

电脑之所以采用二进制算法，是因为构成电脑逻辑运算部分的集成电路主要组成单位为 MOS 管，它具有开启和关闭两种工作状态，即 0 和 1。人脑中神经组织进行信息处理的单元是神经元，从神经元的活动方式来看，它与 0、1 二值器件相去甚远。

人脑和电脑不仅在基本构成方面存在根本区别，而且在信息存储和处理方式上也有巨大的不同。首先，冯·诺依曼体系中电脑的控制单元、存储器和运算器是独立存在的，数据在存储器中按照地址进行存储，数据存储和运算互不相关，仅通过编程发出指令来使这几个部分进行相互沟通。这样的体系过度依赖人为指令，无法产生内部的联想，而且当程序发生错乱或者元件仅仅出现局部微小损伤时都可能导致整个系统崩溃。人脑虽然具有类似电脑控制器、存储器和运算器的功能，却无法将它们独立地划分开，它通过突触传递强度