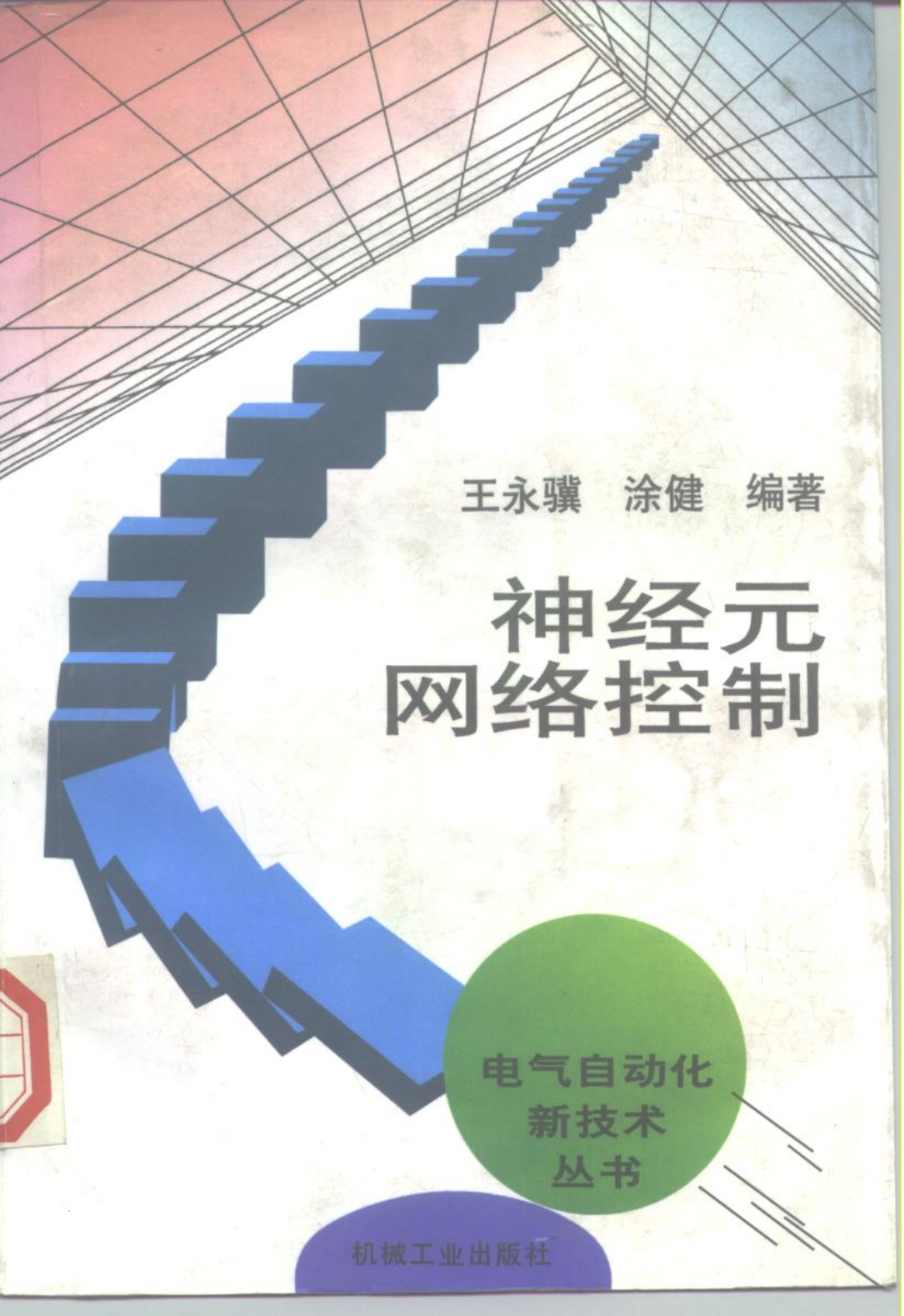




王永骥 涂健 编著

神经元 网络控制

电气自动化
新技术
丛书

机械工业出版社

电气自动化新技术丛书

神经网络控制

王永骥 涂 健 编著



机械工业出版社

本书由神经网络原理和神经网络控制两部分组成。第一部分介绍常用神经网络构成的原理及学习算法。第二部分介绍神经网络在自动控制领域中的应用,内容涉及神经网络系统辨识、神经网络控制器设计及神经网络的故障诊断与容错控制等方面。

本书可作为自动控制、计算机、通信等有关专业大学本科学生及研究生的教学参考书,也可供相关领域的工程技术人员和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

神经元网络控制/王永骥,涂健编著. -北京:机械工业出版社,1998.2

(电气自动化新教材)

ISBN 7-111-05179-2

I. 神… I. ①王… ②涂… II. 神经网络-自动控制
N. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第17656号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:孙流芳 版式设计:王颖 责任校对:熊天荣

封面设计:姚毅 责任印制:王国光

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998年2月第1版第1次印刷

850mm×1168mm¹/₃₂·13.875印张·360千字

0 001—4 000 册

定价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任委员：陈伯时

副主任委员：喻士林 夏德铃 李永东

委员：(以姓氏笔划为序)

王 炎	王文瑞	王正元
刘宗富	孙 明	孙武贞
孙流芳	过孝瑚	许宏纲
朱稚清	夏德铃	陈伯时
陈敏逊	李永东	李序葆
张 浩	张敬民	周国兴
涂 健	蒋静坪	舒迪前
喻士林	霍勇进	戴先中

《电气自动化新技术丛书》

出版基金资助单位

机械工业部天津电气传动设计研究所

深圳华能电子有限公司

北京电力电子新技术研究开发中心

天津普辰电子工程有限公司

前 言

一个时期以来,自动控制工作者面临着如下两个方面的问题:一方面是控制对象愈来愈复杂,存在着多种不确定性以及难以确切描述的非线性特性;另一方面是对控制系统的要求愈来愈高,迫切要求提高控制系统的智能化水平。由于神经网络源于对脑神经的模拟,具有很强的适应于复杂环境和多目标控制要求的自学习能力,并具有以任意精度逼近任意非线性连续函数的特性。神经网络的这些特点,正好为解决上述两方面的问题提供了一条新途径,因而它引起了广大自动控制工作者的极大关注。

神经网络的应用已渗透到自动控制领域的各个方面,包括系统辨识、非线性系统控制、智能控制、优化计算及控制系统的故障诊断与容错控制等。

神经网络为非线性系统的辨识提供了一个有力的工具。它能为非线性系统的辨识提供一种通用模式,而且神经网络本身就是辨识模型,就是实际系统的一个物理实现,可以用于在线控制。

神经网络用于自动控制系统,按它在系统中所起的作用来分有以下几种类型:第一类是在基于模型的各种控制系统中充当对象的模型;第二类是充当控制器;第三类是在控制系统中起优化计算作用;第四类是与其他控制方法(如专家系统、模糊控制)相融合,为其提供非参数化对象模型、推理模型等;第五类是构成智能控制系统,即系统能识别环境,并对各种信息进行融合,而且能根据所获得的信息以及所要达到的目标,进行分析和推理,做出决策,采取行动。

神经网络用于控制系统的故障诊断与容错控制可以有以下几种方式:一是在传统的方法中使用神经网络,例如,在解析冗余法中用神经网络作为故障诊断的状态估计器;二是用神经网络直

接构成容错控制器；三是用神经网络对故障模式进行识别。

从大量的文献报导来看，神经网络在自动控制领域的应用是成功的，有很好的应用前景。当前的问题是理论研究跟不上应用的需求，有些理论问题急待解决，例如，神经网络的结构综合问题，非线性优化问题的局部极小及收敛性问题，神经网络控制系统收敛性和稳定性分析等。解决这些问题有一定的难度，它与非线性系统理论研究的进展密切相关。

本书对神经网络控制做了较全面的介绍。全书共分 5 章。第 1 章由概论，介绍了神经网络的基本知识及发展状况。第 2 章为常用神经网络原理及学习算法，本章对当前广为应用的几种神经网络的构成原理及学习算法做了较详细的介绍。第 3 章为基于神经网络的系统辨识，主要讨论神经网络辨识模型的结构设计及辨识算法。第 4 章为神经网络控制器设计，本章对神经网络在控制系统中应用的几种类型做了较全面的介绍。第 5 章为神经网络在控制系统的故障诊断及容错控制中的应用，主要讨论神经网络故障诊断与容错控制系统的构成原理及学习算法，并介绍了一些相关知识。

本书第 1、2 章由涂健编写，第 3、4、5 章由王永骥编写。由于水平所限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

1997 年 4 月

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

前言

第 1 章 概 论	1
1.1 生物神经元及生物神经网络	1
1.1.1 生物神经元	1
1.1.2 人脑神经网络系统	3
1.1.3 人脑神经网络信息处理的特点	6
1.2 生物神经网络的模型化——人工神经网络	7
1.2.1 人工神经元模型	8
1.2.2 人工神经网络的构成	10
1.2.3 人工神经网络的学习	11
1.2.4 人工神经网络与生物神经网络的比较	13
1.3 人工神经网络的发展与现状	14
1.4 人工神经网络与自动控制	17
第 2 章 常用神经网络原理及学习算法	22
2.1 神经网络的学习方法	23
2.1.1 学习方法的类型	23
2.1.2 无监督 Hebb 学习	27
2.2 多层前向神经网络 (1)	32
2.2.1 多层前向神经网络的基本学习算法	32
2.2.2 多层前向神经网络的误差反向传播 (EBP) 算法	44
2.2.3 EBP 算法学习速率的调整	49
2.2.4 多层前向神经网络的二阶学习算法	54
2.3 多层前向神经网络 (2)	56
2.3.1 综合目标函数	56
2.3.2 多层前向神经网络基于综合目标函数的误差反向传播 (GEBP) 学习算法	60

2.3.3	基于综合目标函数的二阶学习算法	63
2.3.4	多层前向神经网络基于综合目标函数的二阶学习算法	66
2.4	径向基函数神经网络	68
2.4.1	插值问题	69
2.4.2	正规化问题	70
2.4.3	正规化问题的逼近解及 GRBF 网络	74
2.4.4	RBF 网络的学习方法	78
2.4.5	计算举例——异或 (XOR) 问题	85
2.5	Hopfield 神经网络	87
2.5.1	离散型 Hopfield 神经网络	88
2.5.2	连续型 Hopfield 神经网络	96
2.5.3	Hopfield 网络在组合优化中的应用	101
2.6	随机神经网络	105
2.6.1	SA 算法	106
2.6.2	Boltzmann 机模型及其工作规则	109
2.6.3	Boltzmann 机的学习规则	114
2.7	自组织竞争型神经网络	122
2.7.1	基本竞争型神经网络及其学习规则	123
2.7.2	抑制竞争型神经网络及其学习规则	126
2.7.3	自适应共振理论神经网络	128
2.8	自组织特征映射神经网络	135
2.8.1	SOFM 网络模型结构及学习工作规则	136
2.8.2	SOFM 算法的性质	143
2.9	对向传播神经网络	147
2.9.1	CP 网络的结构及学习工作规则	147
2.9.2	CP 网络的改进	152
	参考文献	155
第 3 章	基于神经网络的系统辨识	159
3.1	引言	159
3.1.1	系统辨识的定义	159
3.1.2	系统辨识的常用方法	161
3.2	多层前向网络的逼近能力	164
3.3	神经网络用于系统辨识的一般结构	167

3.3.1 多层前向网络的一般结构	167
3.3.2 多层动态前向网络的学习算法	167
3.3.3 对象的非线性模型	171
3.4 用神经网络组成的动态系统表示非线性系统的可能性	174
3.5 基于 BP 网络的系统辨识	177
3.5.1 BP 网络的结构设计及辨识算法	177
3.5.2 辨识算法的收敛性	179
3.5.3 应用实例	181
3.5.4 基于 RLS (递推最小二乘) 训练算法的多层 前向网络辨识	188
3.6 采用预报误差 (RPE) 法的神经网络辨识	195
3.6.1 神经网络建模的结构	196
3.6.2 神经网络的 RPE 算法	197
3.6.3 应用实例	198
3.7 基于神经网络的逆模型辨识	202
3.7.1 非线性系统的可逆性	202
3.7.2 逆系统建模方法	204
3.7.3 开关作用函数的多层感知器网络在逆模型 辨识中的应用	208
3.8 基于 Hopfield 网络的辨识	216
3.8.1 Hopfield 网络模型	217
3.8.2 辨识算法	217
3.8.3 应用实例	220
3.9 ART-2 网络在控制系统特征参数辨识中的应用	223
3.10 小结	226
参考文献	228
第 4 章 神经网络控制器设计	230
4.1 引言	230
4.2 神经网络监督学习控制器 (SNC)	234
4.2.1 神经网络监督学习控制器工作原理	234
4.2.2 应用实例	237
4.3 神经网络模型参考自适应控制 (NNMRAC)	240
4.3.1 神经网络 MRAC 的一般结构	240

4.3.2	间接神经网络 MRAC	242
4.3.3	直接神经网络 MRAC	247
4.4	神经网络自校正控制	253
4.4.1	线性化反馈控制	253
4.4.2	使用神经网络时的自校正控制	256
4.4.3	仿真实例	264
4.4.4	基于 Adaline 网的自适应控制	267
4.5	神经前向网络直接自适应控制	272
4.5.1	多层前向网络的直接自适应控制	272
4.5.2	自动调整 S 型函数形状的直接自适应控制	275
4.5.3	神经网络控制与常规自适应控制的比较	280
4.6	基于单个神经元的自适应控制	286
4.6.1	自适应神经元及其学习策略	287
4.6.2	控制器设计	288
4.6.3	学习算法的改进	291
4.6.4	神经元控制系统的闭环稳定性	292
4.6.5	应用实例	294
4.6.6	多变量系统的神经元控制	299
4.7	神经网络 PID 控制	303
4.7.1	基于多层前向网的 PID 控制	303
4.7.2	基于单个神经元的直接 PID 控制	307
4.7.3	基于多层网的近似 PID 控制	309
4.8	神经网络预测控制	310
4.8.1	神经网络预测控制的一般结构	310
4.8.2	神经网络预测器的几种方案	312
4.8.3	Hopfield 网络在预测控制中的应用	318
4.9	神经网络模糊控制	320
4.9.1	模糊控制的基本思想及控制系统的组成	320
4.9.2	神经网络与模糊控制系统	322
4.9.3	基于神经网络的模糊控制	323
4.9.4	倒立摆的神经网络模糊控制	326
4.10	基于回归神经网络的控制	329
4.10.1	对角回归神经网络	329

4.10.2 基于对角回归神经网络的控制系统	330
4.10.3 仿真结果	338
4.11 小结	340
参考文献	342
第5章 神经网络在故障诊断及容错控制中的应用	346
5.1 引言	346
5.2 控制系统故障诊断的常用方法	350
5.2.1 残差产生方法——检测观测器法	352
5.2.2 残差产生方法——广义一致矢量法	355
5.2.3 残差产生方法——基于参数估计的方法	359
5.2.4 决策方法	361
5.3 控制系统容错控制器的设计方法	367
5.3.1 控制器重构设计	367
5.3.2 同时镇定的控制器设计	374
5.3.3 完整性控制器设计	376
5.4 基于联想记忆神经网络的故障诊断	379
5.4.1 双向联想记忆网及故障诊断	379
5.4.2 递归联想记忆网及故障诊断	384
5.5 基于 BP 网络的故障诊断	386
5.5.1 BP 网络的结构设计及学习模式的选择	386
5.5.2 某化工过程的 BP 网络的故障诊断	387
5.6 基于 Hopfield 网络和 ART-1 网络的故障诊断	392
5.6.1 故障检测与隔离 (FDI) 算法流程	393
5.6.2 基于 Hopfield 网络的参数估计	394
5.6.3 过渡区识别器的设计	397
5.6.4 基于 ART-1 网络的故障分类	398
5.6.5 位置控制系统的故障检测与隔离	401
5.7 基于自适应神经元的故障诊断与容错控制	404
5.7.1 基于自适应神经元的故障诊断	405
5.7.2 容错控制器设计	406
5.8 基于神经网络的诊断与控制的一体化方法	409
5.8.1 四参数控制器	409
5.8.2 执行器故障诊断	410

5.8.3 传感器故障诊断.....	414
5.9 基于神经网络的容错解耦控制.....	416
5.9.1 基于神经网络的解耦控制方案.....	416
5.9.2 基于神经网络的容错控制策略.....	421
5.10 小结	422
参考文献	424

第 1 章 概 论

1.1 生物神经元及生物神经网络

1.1.1 生物神经元

人脑大约由 10^{12} 个神经元组成，而其中的每个神经元又与约 $10^2 \sim 10^4$ 个其他神经元相连接，如此构成一个庞大而复杂的神经网络。

神经元是大脑处理信息的基本单元，它的结构如图 1-1 所示。它是以细胞体为主体，由许多向周围延伸的不规则树枝状纤维构成的神经细胞，其形状很像一棵枯树的枝干。它主要由细胞体、树突、轴突和突触（Synapse，又称神经键）组成。

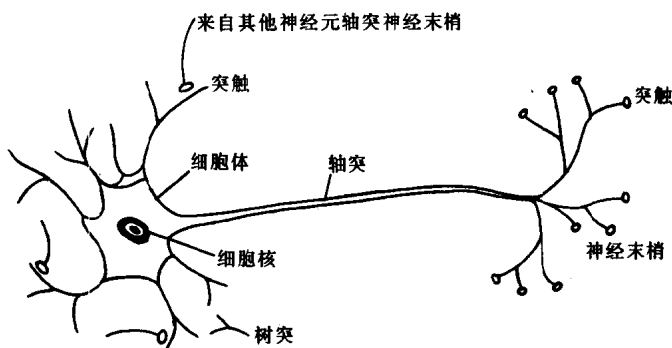


图 1-1 生物神经元示意图

细胞体由细胞核、细胞质和细胞膜组成。细胞体是神经元新陈代谢的中心，还是接受与处理信息的部件。树突是细胞体向外延伸树枝状的纤维体，它是神经元的输入通道，接受来自其他神经元的信号。轴突是细胞体向外延伸的最长、最粗的一条树枝纤

维体，即神经纤维，其长度从几个微米到1m左右。它是神经元的输出通道。轴突末端也有许多向外延伸的树枝状纤维体，称为神经末梢，它是神经元信息的输出端，用于输出神经元的动作脉冲。轴突有两种结构形式：髓鞘纤维和无髓鞘纤维，两者传递信息的速度不同，前者约为后者的10倍。一个神经元的神经末梢与另一神经元树突或细胞体的接触处称为突触，它是神经元之间传递信息的输入输出接口。每个神经元约有 $10^3 \sim 10^4$ 个突触。

从神经元各组成部分的功能来看，信息的处理与传递主要发生在突触附近。突触的结构如图1-2所示。它包含两部分：一个是突触的前部（Pre-synapse），在轴突末梢；另一个是突触的后部（Post-synapse），在树突或细胞体上。两者之间有10~50nm的间隙。突触前、后部分表面包有一层薄膜，称为神经膜，分别称为突触前膜和突触后膜。在神经膜内外之间存在电位差，称为膜电位，又叫静息电位，约为20~100mV，膜外为正，膜内为负。当神经元细胞体通过轴突传到突触前膜的脉冲幅度达到一定强度，即超过其阈值电位后，突触前膜将向突触间隙释放神经传递的化学物质（乙酰胆碱）。由于这种化学物质的扩散，使位于突触后膜的离子通道（Ion Channel）开放，产生离子流，从而在突触后膜产生正的或负的电位，称为突触后电位。突触有两种：兴奋性突触和抑制性突触。前者产生正突触后电位，后者产生负突触后电位。一个神经元的各树突和细胞体往往通过突触和大量的其他神经元相连接。这些突触后电位的变化，将对该神经元产生综合作用，即当这些突触后电位的总和超过某一阈值时，该神经元便被

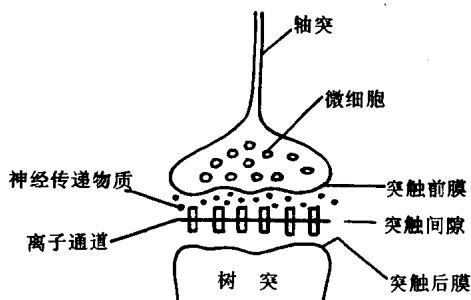


图 1-2 突触结构示意图

激活，并产生脉冲，而且产生的脉冲数与该电位总和值的大小有关。脉冲沿轴突向其他神经元传送，从而实现了神经元之间信息的传递。突触传递信息有一定的延迟时间，对于温血动物一般为 $0.3 \sim 1\text{ms}$ 。

当一个神经元突触前传来一串脉冲时，突触后电位的变化是其中诸单脉冲冲动效应的累加，即时间上的累加。而该神经元与其他很多神经元相连接的突触前同时传来的脉冲也能引起该突触后电位的变化，即空间上的累加。时间累加和空间累加都会对突触后电位产生影响。

最后，将突触传递信息的功能和特点归纳为：

(1) 信息传递有时延，一般为 $0.3 \sim 1\text{ms}$ 。

(2) 信息的综合有时间累加和空间累加。

(3) 突触有兴奋性和抑制性两种类型。

(4) 具有脉冲/电位信号转换功能。沿神经纤维传递的电脉冲为等幅（约 $60 \sim 100\text{mV}$ ）、恒宽、编码的离散信号，而细胞膜电位的变化为连续的模拟量。由此可见突触有数/模转换功能。这种转换是通过神经介质以量子化学的方式实现的。

(5) 神经纤维传导的速度，即脉冲沿神经纤维传递的速度，在 $1 \sim 150\text{m/s}$ 之间，它随纤维的粗细以及髓鞘的有无而不同。有髓鞘的粗纤维，其传递速度在 100m/s 以上；无髓鞘的细纤维，其传递速度可低至每秒数米。

(6) 存在不应期。在两个相邻脉冲之间，神经元的阈值电位突然升高，阻止下一个脉冲的通过，这段时间称为不应期，约 $3 \sim 5\text{ms}$ 。在此期间，对激励不响应，不能传递脉冲。

(7) 不可逆性，脉冲只从突触前传到突触后，不逆向传递。

(8) 可塑性，突触传递信息的强度是可变的，即具有学习功能。可塑性是学习和记忆的基础。

(9) 存在遗忘或疲劳效应。

1.1.2 人脑神经网络系统

生物神经网络是由很多神经元相互连接的，其连接的形式如