



航天科学与工程系列丛书

NEURAL NETWORKS CONTROL AND MATLAB SIMULATION

神经网络控制与MATLAB仿真

● 张泽旭 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



航天科学与工程系列丛书

NEURAL NETWORKS CONTROL AND MATLAB SIMULATION

神经网络控制与MATLAB仿真

张泽旭 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书共分为9章。第1章叙述了神经网络和神经网络控制的基础知识;第2章至第6章分别研究了单神经元网络、BP神经网络、RBF神经网络、CMAC神经网络、递归神经网络和它们在控制中的应用;第7章研究了神经网络的系统辨识,特别分析了对非线性系统的辨识问题,并给出相应的仿真实例;第8章研究了神经网络控制系统;第9章研究了模糊神经控制系统。

本书的所有范例采用 MATLAB 语言开发,读者可参考书中开放的源代码,对相关的内容进行对照验证,以获得更深入的理解。

本书可作为人工智能及智能控制、计算机科学与技术、自动化、飞行器设计、电子工程等专业的研究生和高年级本科生的教材和教学参考书,也可作为上述领域的科学工作者和工程技术人员从事人工神经网络及应用的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

神经网络控制与 MATLAB 仿真/张泽旭编著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社, 2011.7
ISBN 978-7-5603-3151-5

I. ①神… II. ①张… III. ①神经网络-自动控制
②神经网络-计算机仿真 IV. ①TP391.75②TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 265291 号

策划编辑 杜 燕
责任编辑 范业婷
封面设计 卞秉利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451 - 86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 东北林业大学印刷厂
开 本 787mm × 1092mm 1/16 印张 17.25 字数 392 千字
版 次 2011 年 7 月第 1 版 2011 年 7 月第 1 次印刷
书 号 978-7-5603-3151-5
定 价 38.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

1943 年,法国心理学家 W. S. McCulloch 和数学家 W. Pitts 在美国《数学生物物理学简报》上发表了题为“神经行为中内在思想的逻辑运算”的论文,文中首次提出了模拟生物神经元的人工神经元模型(M-P 模型),开创了人类自然科学技术史上的一门新学科——人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)的研究。1945 年,美国人 N. Wiener 在总结前人研究和实践的基础上,出版了《控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》,阐述了经典控制理论的一般方法,标志着经典控制理论成为一门成熟的系统科学。随着经济和技术的不断进步,人工神经网络日益渗透到模式识别、信号处理、系统辨识、专家系统、故障诊断、组合优化、自动控制等领域,当其同经典控制和现代控制理论及方法密切结合时,形成了智能控制的一个重要分支——神经网络控制。神经网络控制运用智能控制的研究方法,为求解复杂非线性动态不确定性系统的控制问题提供了一个新的途径,在神经控制系统中,神经网络可以作为辨识器或控制器。

近年来作者一直从事神经网络控制的教学和研究工作,为了促进神经控制和智能控制的进步,使广大研究生或工程技术人员更快地了解、掌握和应用这一领域的相关方法,学会用 MATLAB 语言进行神经网络控制的设计与实现编写了本书,以抛砖引玉,供广大读者学习参考。

全书共分为 9 章。第 1 章叙述了神经网络和神经网络控制的基础知识,解决了什么是神经网络,什么是神经网络控制两个最基本的问题。第 2 章至第 6 章分别研究了单神经元网络、BP 神经网络、RBF 神经网络、CMAC 神经网络、递归神经网络和它们在控制中的应用。各章自成体系,在分析各神经网络的基础上,直接给出其在控制中的实现。第 7 章研究了神经网络的系统辨识,特别分析了对非线性系统的辨识问题,并给出相应的仿真实例。第 8 章研究了神经网络控制系统,包括神经自校正控制系统,神经模型预测控制系统,神经模型参考自适应控制系统和神经 PID 多变量控制系统等,与控制系统相应的是仿真实现。第 9 章是模糊神经控制系统,在本章中,较详细地介绍了模糊集理论的基础知识,分析了模糊逻辑控制系统,在此基础上,研究了模糊神经元,模糊神经网络的结构,模糊神经网络的 BP 学习算法,并给出了模糊神经网络在 PID 控制中的仿真实现。

本书的所有范例采用 MATLAB 语言开发,读者可参考书中开放的源代码,对相关的内容进行对照验证,以获得更深入的理解。

本书可作为人工智能及智能控制、计算机科学与技术、自动化、飞行器设计、电子工程等专业的研究生和高年级本科生的教材和教学参考书,也可作为上述领域的科学工作者和工程技术人员从事人工神经网络及应用的参考用书。

特别要感谢国内外神经网络与自动控制等方面的专著、教材和许多高水平论文的作者们,他们是:海金,徐丽娜,叶世伟,史忠植,袁增任,刘金琨,李国勇,李金宗,张吉礼,蔡

自兴,张代远,李世勇,舒怀林,胡宝清等。他们的作品为本书提供了丰富的营养,作者在书中引用了他们的部分材料,并在引用的地方做了说明,读者可根据说明参考他们的研究工作,以获得更深入的理解。

特别感谢哈尔滨工业大学飞行器动力学与控制研究所的徐敏强教授对本书出版工作的大力支持,感谢我的学生张严、田百义和丁继伟等在本书的撰写和整理工作中给予的帮助。

本书的研究工作得到了“十一五”国家 863 重点项目(项目批准号:2008AA12A214)、航天创新基金(项目批准号:YY-F09017)和国防重点学科实验室基金(项目批准号:HIT.KLOF.2009070)的资助。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不当之处,恳请有关专家、同行和广大读者批评指正。

张泽旭
哈尔滨工业大学
2010.3.1

缩写和符号

缩 写

AI	artificial intelligence 人工智能
ANN	artificial neural network 人工神经网络
AR	autoregressive 自回归
BBTT	back propagation through time 通过时间的反向传播
BM	Boltzmann machine 玻耳兹曼机
BP	back propagation 反向传播
BOSS	bounded, one-sided saturation 有界, 单边饱和
CV	cross-validation 交叉确认
DSP	digital signal processor 数字信号处理
DF	difference equation 差分方程
EKF	extended Kalman filter 扩展 Kalman 滤波器
EM	expectation-maximization 期望最大化
FIR	finite-duration impulse response 有限时间冲击响应
FIS	fuzzy inference system 模糊推理系统
GEKF	global extended Kalman filter 全局扩展 Kalman 滤波器
GCV	generalized cross-validation 广义交叉确认
GHA	generalized Hebbian algorithm 广义 Hebb 算法
HMM	hidden Markov model 隐 Markov 模型
LMS	least-mean-square 最小均方
LR	likelihood ratio 似然比
LVQ	learning vector quantization 学习向量量化
LFT	Linear Fractional Transformations 线性分式变换
MIMO	multiple input-multiple output 多输入多输出
ML	maximum likelihood 最大似然
MLP	multilayer perceptron 多层感知器
MRAC	model reference adaptive control 模型参考自适应控制
NARMA	nonlinear autoregressive moving average 非线性自回归滑动平均
NARX	nonlinear autoregressive with exogenous input 具有外部输入的非线性自回归
NN	neural network 神经网络
ODE	ordinary differential equation 常微分方程

PCA	principal component analysis 主分量分析
PDF	probability density function 概率密度函数
PM	Parallel Model 并联模型
PMF	probability mass function 概率质量函数
RBF	radial basis function 径向基函数
RMLP	recurrent multilayer perceptron 递归多层感知器
RTRL	real-time recurrent learning 实时递归学习
PRBS	pseudo random binary sequence 伪随机二位式序列
SIMO	single input-multiple output 单输入多输出
SISO	single input-single output 单输入单输出
SNR	signal-to-noise ratio 信噪比
SOM	self-organizing map 自组织映射
SPM	series parallel model 串并联模型
SVD	singular value decomposition 奇异值分解
SVM	support vector machine 支持向量机
TDNN	time-delay neural network 时延神经网络
TLFN	time lagged feedforward network 时间滞后前馈网络
VLSI	very-large-scale integration 超大规模集成
XOR	exclusive OR 异或

重要的符号

$\mathbf{a}^T \mathbf{b}$	inner product of vectors $\mathbf{a}$ and $\mathbf{b}$ 向量 $\mathbf{a}$ 和 $\mathbf{b}$ 的内积
$\mathbf{a} \mathbf{b}^T$	output product of vectors $\mathbf{a}$ and $\mathbf{b}$ 向量 $\mathbf{a}$ 和 $\mathbf{b}$ 的外积
$\binom{l}{m}$	binomial coefficient 二项式系数
$A \cup B$	unions of A and B A 和 B 的并
A^c	complement of A A 的补集
b_k	bias applied to neuron k 神经元 k 的偏置
$\cos(\mathbf{a}, \mathbf{b})$	cosine of the angle between vectors $\mathbf{a}$ and $\mathbf{b}$ 向量 $\mathbf{a}$ 和 $\mathbf{b}$ 夹角的余弦
$\tilde{\mathbf{D}}$	adjoint of operator $\mathbf{D}$ 算子 $\mathbf{D}$ 的伴随
E	energy function 能量函数
E_i	energy of state i in statistical mechanics 统计力学中状态的能量
E	statistical expectation operator 统计期望算子
$F(X)$	fuzzy set of X X 上的全体模糊集
$\exp$	exponential 指数
E_{av}	average squared error or sum of squared error 平均平方误差或平方误差和
$E(n)$	instantaneous value of the sum of squared error 平方误差和的瞬时值
E_{total}	total sum of error squares 总误差平方和

F	free energy 自由能量
H	Hessian matrix Hessian 矩阵
H^{-1}	inverse of matrix H 矩阵 H 的逆
I	identity matrix 单位矩阵
J	Jacobian matrix Jacobi 矩阵
$\ker A$	kernel of A A 的核
$K^{1/2}$	square root of matrix K 矩阵 K 的平方根
$K^{T/2}$	transpose of square root of matrix K 矩阵 K 的平方根的转置
k_B	Boltzmann constant 玻耳兹曼常数
M_c	controllability matrix 可控性矩阵
M_o	observability matrix 可观察性矩阵
n	discrete time 离散时间
p_i	probability of state i in statistical mechanics 统计力学中状态的概率
p_{ij}	transition probability from state i to j 从状态 i 到 j 的转移概率
$P(X)$	power set of X X 的幂集
R	correlation matrix of an input vector 输入向量的相关矩阵
S	s-norm s-模
$\text{supp } A$	support of A A 的支集
t	continuous time 连续时间
T	t-norm t-模
tr	trace of a matrix operator 矩阵算子的迹
var	variance operator 方差算子
$V(\mathbf{x})$	Lyapunov function of state vector $\mathbf{x}$ 状态向量 $\mathbf{x}$ 的 Lyapunov 函数
v_j	induced local field or activation potential of neuron j 神经元 j 的诱导局部域或激活位势
w_{kj}	synaptic weight of synapse j belonging to neuron k 属于神经元 k 的突触 j 的突触权值
$\mathbf{w}^*$	optimum weight vector 最优权值向量
$\ \mathbf{x}\ $	Euclidean norm (length) of vector $\mathbf{x}$ 向量 $\mathbf{x}$ 的欧几里德范数(长度)
$\mathbf{x}^T$	transpose of vector $\mathbf{x}$, signified by the superscript T 向量 $\mathbf{x}$ 的转置
z^{-1}	unit delay operator 单位延迟算子
$\delta_j(n)$	local gradient of neuron j at time n 神经元 j 在时刻 n 的局部梯度
Δw	small change applied to weight w 权值 w 的微小改变
∇	gradient operator 梯度算子
∇^2	Laplacian operator Laplace 算子
$\nabla_w J$	gradient of J with respect to w J 关于 w 的梯度
$\nabla \cdot \mathbf{F}$	divergence of vector $\mathbf{F}$ 向量 $\mathbf{F}$ 的散度
η	learning-rate parameter 学习率参数

θ_k	threshold applied to neuron k (i. e. ,negative of bias b_k) 神经元 k 的阈值 (即偏置 b_k 的负值)
λ	regularization parameter 正则化参数
λ_k	k th eigenvalue of a square matrix 方阵的第 k 个特征值
$\varphi_k(x)$	nonlinear activation function of neuron k 神经元 k 的非线性激活函数
$\in$	symbol for “belong to” “属于”符号
$\cup$	symbol for “union to” “并”符号
$\cap$	symbol for “intersection to” “交”符号
$*$	symbol for convolution “卷积”符号
$+$	superscript symbol for pseudoinverse of a matrix 矩阵伪逆的上标符号

最大和最小

- 符号 $\arg \min_w f(w)$ 表示函数 $f(w)$ 关于变元向量 w 的最小值
- 符号 $\arg \max_w f(w)$ 表示函数 $f(w)$ 关于变元向量 w 的最大值

目 录

第 1 章 神经网络及神经网络控制基础	1
1.1 什么是神经网络	1
1.1.1 生物神经元	2
1.1.2 人工神经元模型	3
1.1.3 神经网络的结构	8
1.1.4 神经网络的学习	9
1.1.5 神经网络的发展历程	13
1.2 什么是神经网络控制	17
1.2.1 传统控制理论的局限性	17
1.2.2 智能控制的基本特征	18
1.2.3 神经网络控制系统的特点	20
1.2.4 神经网络控制系统的基本原理	20
1.3 神经网络在神经控制系统中的作用	21
1.4 注释与讨论	22
第 2 章 单神经元网络及其 PID 控制	28
2.1 感知器	28
2.1.1 感知器模型	28
2.1.2 感知器训练算法	29
2.1.3 感知器收敛定理	30
2.1.4 XOR 问题与多层感知器	34
2.2 自适应线性神经网络	35
2.2.1 自适应线性神经网络的结构	35
2.2.2 自适应线性神经网络的学习算法	36
2.3 无约束最优化技术	37
2.3.1 梯度下降法	38
2.3.2 Newton 法	39
2.3.3 Gauss-Newton 法	39
2.4 基于单神经元网络的 PID 控制	41
2.4.1 PID 控制原理	41
2.4.2 数字 PID 控制	43

2.4.3 单神经元自适应 PID 控制	47
2.5 注释与讨论	52
第3章 BP 神经网络及其控制应用	56
3.1 反向传播学习算法	56
3.1.1 BP 神经网络的结构	56
3.1.2 反向传播算法	57
3.1.3 BP 神经网络的学习步骤	60
3.2 关于 BP 神经网络的几点考虑	61
3.2.1 网络的训练方式	61
3.2.2 反向传播学习的停止准则	63
3.2.3 BP 神经网络中的激活函数	63
3.2.4 学习率的考虑	64
3.2.5 BP 学习算法的改进	65
3.3 BP 神经网络在 PID 控制中的应用	66
3.3.1 基于 BP 神经网络的 PID 控制器结构	66
3.3.2 在控制器中 BP 神经网络的学习	66
3.3.3 仿真实验与分析	68
3.4 注释与讨论	72
第4章 基于径向基函数网络的系统辨识	76
4.1 径向基函数网络	76
4.1.1 径向基函数网络的结构	76
4.1.2 径向基函数网络的学习算法	77
4.1.3 径向基函数网络的模式可分性	80
4.1.4 径向基函数网络对 XOR 问题的解决	81
4.1.5 与 RBF 网络有关的若干问题	82
4.2 径向基函数网络的数学基础	83
4.2.1 内插值问题	83
4.2.2 正则化网络	84
4.3 基于 RBF 网络的系统辨识	86
4.3.1 被控对象 Jacobian 信息辨识算法	86
4.3.2 仿真程序及分析	87
4.4 注释与讨论	91
第5章 CMAC 网络及其控制实现	94
5.1 CMAC 网络	94
5.1.1 CMAC 网络的结构	94

5.1.2	CMAC 网络的工作原理	96
5.1.3	CMAC 网络的学习算法	99
5.2	基于 CMAC 网络的 PID 控制算法	101
5.2.1	控制算法原理	101
5.2.2	仿真程序及分析	102
5.3	CMAC 网络在机器人手臂控制中的应用	106
5.4	注释与讨论	107
第 6 章	递归神经网络及其控制系统	109
6.1	神经动力学基础	109
6.1.1	动力学系统	109
6.1.2	状态(相)空间	110
6.1.3	稳定性的相关定义	111
6.1.4	Lyapunov 稳定性定理	113
6.2	Hopfield 神经网络	114
6.2.1	离散 Hopfield 神经网络	114
6.2.3	基于离散 Hopfield 神经网络的联想记忆	117
6.2.3	连续 Hopfield 神经网络	120
6.2.4	基于连续 Hopfield 网络的 TSP 求解	122
6.3	基于 Hopfield 网络的 PID 模型参考自适应控制	131
6.3.1	神经直接模型参考自适应控制系统	131
6.3.2	基于 Hopfield 网络的控制器优化	131
6.3.3	仿真程序与分析	133
6.4	递归神经网络	135
6.4.1	递归神经网络的体系结构	136
6.4.2	递归神经网络的学习算法	139
6.5	基于递归神经网络辨识的 PID 控制系统	141
6.5.1	基于 Elman 神经网络的系统辨识	141
6.5.2	基于 Elman 神经网络辨识的 PID 控制系统	143
6.5.3	仿真程序及分析	144
6.6	注释与讨论	149
第 7 章	基于神经网络的系统辨识	154
7.1	系统辨识基础	154
7.1.1	什么是系统辨识	154
7.1.2	系统辨识的基本方法	156
7.1.3	系统辨识的误差准则	157
7.1.4	系统辨识的输入信号	158

7.2 基于神经网络的系统辨识原理	160
7.2.1 基于神经网络的辨识结构	160
7.2.2 动态系统辨识中常用的神经网络	161
7.3 线性动态系统的神经网络辨识	163
7.3.1 离散时间系统模型	163
7.3.2 线性动态系统的神经网络辨识	166
7.3.3 线性动态系统的逆模型辨识	172
7.4 非线性动态系统神经网络的辨识	174
7.4.1 非线性动态系统模型	174
7.4.2 非线性动态系统辨识	175
7.4.3 仿真程序与分析	177
7.5 注释与讨论	182
第8章 神经网络控制系统	183
8.1 神经自校正控制系统	184
8.1.1 伴随型系统的神经 NARMA-L2 辨识	185
8.1.2 基于 NARMA-L2 辨识器的自校正控制	186
8.1.3 仿真实例分析	187
8.2 神经模型预测控制系统	189
8.2.1 神经模型预测控制的工作过程	190
8.2.2 单步预测模型的单神经元 PI 控制器	192
8.2.3 仿真实例分析	194
8.3 神经模型参考自适应控制系统	197
8.3.1 神经模型参考自适应控制结构	197
8.3.2 实例分析——机械臂控制系统	198
8.4 神经 PID 多变量控制系统	201
8.4.1 神经 PID 多变量控制原理	201
8.4.2 单神经元 PID 多变量控制	202
8.4.3 仿真程序及分析	203
8.5 注释与讨论	206
第9章 模糊神经控制系统	207
9.1 模糊集理论基础	208
9.1.1 模糊集定义	208
9.1.2 模糊集的模运算	211
9.1.3 分解定理、表现定理与扩张原理	213
9.1.4 模糊数与扩张运算	218
9.1.5 模糊关系与模糊关系的复合	221

9.1.6 模糊语言变量、模糊规则与模糊逻辑推理	224
9.2 模糊逻辑控制系统	227
9.2.1 模糊控制的基本原理	227
9.2.2 模糊控制系统的设计	233
9.3 模糊神经网络控制	240
9.3.1 模糊神经元	241
9.3.2 模糊神经网络的结构	244
9.3.3 BP 模糊神经网络	247
9.3.4 基于模糊神经网络整定的 PID 控制	250
9.4 注释与讨论	252
参考文献	256

第1章 神经网络及神经网络控制基础

1.1 什么是神经网络

当人类试图了解人脑的工作机理和思维本质,向往构造出人工智能系统来模仿人脑功能的时候,关于人工神经网络(一般称为“神经网络”)的研究工作就开始了。

人脑一出生就有着精巧的构造,并且通过对周围环境的不断学习,具有建立它自己规则的能力,随着时间的积累,逐渐形成了一部高度复杂的、非线性的和能够并行计算的智能机,或信息处理系统,它能够组织它的组成成分,即神经元,以比今天已有的最快的计算机还要快许多倍的速度进行特定的计算,如模式识别、感知和运动神经控制。

我们在这里考虑的神经网络是对人脑完成特定任务或感兴趣功能的方法进行建模的机器,网络用硅电路或者程序在数字计算机上模拟。关于神经网络的最基本的定义描述如下(Haykin,2004):

一个神经网络是一个由简单处理单元构成的规模宏大的并行分布处理器,天然具有存储经验知识和使之可用的特性。神经网络在两个方面与人脑相似:

- ① 神经网络获取的知识是从外界环境中学习得来的;
- ② 互连神经元之间的连接强度,即突触权值,用于存储获取的知识。

可以看出,神经网络具有以下两个明显的特征。

(1) 结构特征 —— 并行处理、分布式存储与容错性

人工神经网络是由大量的简单处理单元相互连接构成的高度并行的非线性系统,具有大规模并行性处理特征。虽然每个处理单元的功能十分简单,但大量简单处理单元的并行活动使网络呈现出丰富的功能,并具有较快的速度。结构上的并行性使神经网络的信息存储必然采用分布式方式,即信息不是存储在网络的某个局部,而是分布在网络所有的连接权中。神经网络内在的并行性与分布性表现在其信息的存储与处理都是在空间上分布、时间上并行的,这两个特点必然使神经网络在两个方面表现出良好的容错性:一方面由于信息的分布式存储,当网络中部分神经元损坏时不会对系统的整体性能造成影响,这一点就像人脑中每天都有神经细胞正常死亡而不会影响大脑的功能一样;另一方面当输入模糊、残缺或变形的信息时,神经网络能够通过联系恢复出完整的记忆,从而实现对不完整输入信息的正确识别,这一点就像人可以对不规则的手写字进行正确识别一样。

(2) 能力特征 —— 自学习、自组织的自适应性

自适应性是指一个系统能够改变自身的性能以适应环境变化的能力,它是神经网络的一个重要特征。自适应性包含自学习与自组织两层含义。神经网络的自学习是指当外界环境发生变化时,经过一段时间的训练或感知,能够通过自动调整网络结构参数,对给

定输入能产生期望的输出。训练是神经网络学习的途径,因此,经常将学习与训练两个词混用,神经系统能在外部刺激下按一定规则调整神经元之间的突触连接,逐渐构建起神经网络,这一构建过程称为网络的自组织。神经网络的自组织能力与自适应性相关,自适应性是通过自组织实现的。

1.1.1 生物神经元

1. 生物神经元的结构

神经生理学和神经解剖学证明了神经元是人脑组成的最基本单元,人脑神经系统约有 $10^{10} \sim 10^{12}$ 个神经元和 6 亿兆突触或连接,是一个复杂的信息并行加工处理巨系统,而且,人脑中的网络是个高效结构,脑的能量效率是每秒每个操作约 10^{-16} J,而今天所用最好计算机的相应值是每秒每个操作约 10^{-6} J。另一方面,无论是哪种生物神经元,从传递、记忆信息的角度看,它们都具有相同的结构。图 1.1 给出了一种锥形神经细胞的简化图示,它在脑皮层中很常见,和其他许多神经元一样,它由四部分组成,分别是细胞体、树突、轴突和突触。

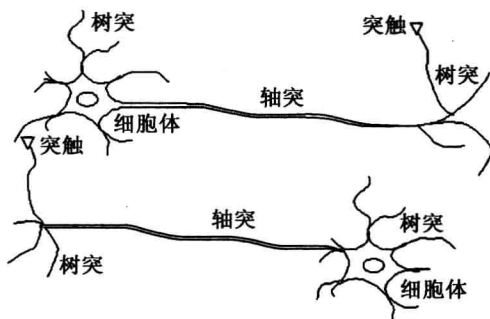


图 1.1 生物神经元简图

(1) 细胞体

细胞体由细胞核、细胞质和细胞膜组成。细胞体是生物神经元的主体,是神经细胞的核心部分,是存储、加工处理信息的地方。生物神经元信息处理的奥秘在于细胞膜,细胞膜内外有电位差,称为膜电位,膜外为正,膜内为负。

(2) 树突(树状突起)

树状突起是细胞体向外伸出的除轴突外的纤维分支,呈树状分布,简称树突,它是生物神经元的输入部分。树突从细胞体开始逐渐变细,各处都能与其他神经元的突触连接,从其他神经元的突触到树突,实现信息的输入。

(3) 轴突

轴突是由细胞体向外伸出的所有分支中最长的一条,每个生物神经元只有一个轴突,其长度可达 1 m 以上。轴突相当于生物神经元的输出电缆,它通过尾部的许多神经末梢及末梢的突触向其他生物神经元输出神经冲动。

(4) 突触

轴突的末梢形成突触,在突触将信息输送给另一个神经元。突触包括突触前、突触间

隙和突触后三个部分。突触前是第一个神经元的轴突末梢部分,突触后是指第二个神经元的受体表面,在突触间隙之间,形成突触膜电位。突触前通过化学接触或电接触,将信息传往突触后受体表面,实现神经元之间的信息传递。按动作状态划分,生物神经元的突触可呈现出兴奋性和抑制性两种状态。当突触前接收到的输入信息能使突触膜电位超越神经冲动的阈值时,这时生物神经元处于“兴奋”状态;如果突触膜电位不能超过引起神经冲动的阈值,生物神经元处于“抑制”状态。

2. 生物神经元的功能

(1) 学习和遗忘

生物神经元的学习功能表现在生物神经元能感知外界输入信息的变化。神经元和神经元之间彼此的细胞质虽然不连通,但是突触和树突之间的连接强度却可以随着外界输入信息的变化而变化,神经元之间的相互连接关系能够记录下外界输入信息的变化,表明神经元不仅能学习,而且能学会。“遗忘”事实上也是神经元适应环境、接受外界输入信息的一种“学习”,新的输入信息来了,多个神经元彼此之间的关系必将重新排定,那么原来排定的关系被冲刷,原来的信息被放弃,便产生了“遗忘”。

(2) 兴奋与抑制

生物神经元具有两种常规工作状态,即兴奋状态和抑制状态。兴奋状态出现在神经元细胞膜电位升高,且超过动作电位的阈值时,此时神经元被激励,产生神经冲动,呈现出类似于放电样的响应。神经冲动能够经突触传出,刺激与突触相连的另一神经元树突,完成信息的传递。当神经元的细胞膜电位没有达到动作电位的阈值时,神经元不会产生神经冲动,这种状态称为神经元的抑制。被抑制的神经元没有神经冲动从突触传出,也不会影响到另一神经元。“兴奋”和“抑制”与输入信息的强弱、持续时间的长短等因素直接相关。

(3) 结构的可塑性

突触传递信息的特性是可变的,随着神经冲动传递方式的变化,传递作用强弱不同,从而形成了生物神经元之间连接的柔性,这种特性称为生物神经元结构的可塑性。

(4) 时空整合性

生物神经元对于不同时间通过同一突触传入的信息,具有时间整合功能;对于同一时间通过不同突触传入的信息,具有空间整合功能。两种功能相结合,使生物神经元具有时空整合的输入信息处理功能。

(5) 脉冲与电位信号的转换

沿轴突传递的电脉冲是等幅的、离散的脉冲信号,而细胞膜的电位变化为连续的电位信号,这两种信号在突触进行变换。

1.1.2 人工神经元模型

生物神经元信息传递功能经数学抽象化后,可得到人工神经元模型。图 1.2 是人工神经元模型的方框图,它是人工神经网络的设计基础,具有三个基本要素。

(1) 突触权值

每一个突触都由其权值作为特征表征,各个神经元之间的连接强度由突触权值来表