

MATLAB仿真与应用系列丛书

本书提供源代码下载

# MATLAB

## 神经网络仿真与应用

张德丰 编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

MATLAB 仿真与应用系列丛书

# MATLAB 神经网络 仿真与应用

张德丰 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书共分为 10 章。主要内容包括人工神经网络的分类、MATLAB 神经网络工具箱的对象与属性、神经网络工具箱函数的分析及实例、感知器、线性神经网络、BP 网络、径向基网络、GMDH 网络、自组织竞争型神经网络、自组织特征映射神经网络、自适应共振理论模型、对向传播网络、Elman 神经网络、Hopfield 网络、联想记忆、BSB 模型及其应用、图形用户接口、Simulink 仿真、自定义神经网络、神经网络在工程中的应用等内容。

本书可作为高等院校计算机、电子工程、控制工程、信息与通信科学、数学、机械工程和生物医学工程等专业学生的参考教材,对从事上述领域工作的广大科技人员具有重要的参考价值,对学习神经网络及其仿真技术的读者来说,也是一本极为有用的入门指导书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

MATLAB 神经网络仿真与应用 / 张德丰编著.—北京:电子工业出版社,2009.6  
(MATLAB 仿真与应用系列丛书)

ISBN 978-7-121-08923-7

I. M... II. 张... III. 计算机辅助计算—软件包, Matlab—应用—神经网络—计算机仿真 IV. TP391.75 TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 082101 号

策划编辑:陈韦凯

责任编辑:张帆

印刷:北京市天竺颖华印刷厂

装订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:22 字数:592 千字

印次:2009 年 6 月第 1 次印刷

印数:4 000 册 定价:39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

# 丛书编委会

**主任：**张德丰

**副主任：**周 品 胡丽华

**委员：**（按姓氏字母的先后顺序排列）

蔡结衡 陈运英 邓恒奋 卢焕斌 栾颖 林振满

刘志为 王孟群 王旭宝 伍志聪 张坚 张水兰



# 丛书序言

MATLAB 一词是 Matrix Laboratory (矩阵实验室) 的缩写。20 世纪 70 年代后期, 时任美国新墨西哥大学计算机科学系主任的 Cleve Moler 教授为减轻学生编程负担, 为学生设计了一组调用 LINPACK 和 EISPACK 库程序的“通俗易懂”的接口, 此即用 Fortran 编写的萌芽状态的 MATLAB。此后, MATLAB 软件的功能便不断得到丰富和发展。

在欧美大学里, 诸如应用代数、数理统计、自动控制、数字信号处理、模拟与数字通信、时间序列分析、动态系统仿真等课程的教科书把 MATLAB 作为一项重要学习内容。这几乎成了 20 世纪 90 年代以后教科书与旧版书籍的区别性标志。

在国际学术界, MATLAB 已经被确认为准确、可靠的科学计算标准软件。MATLAB 将数值分析、矩阵运算、信号处理、图形功能和系统仿真融为一体, 使用户在易学易用的环境中求解问题, 如同书写数学公式一样, 避免了传统的复杂专业编程。

本套丛书是编委会经过对多所高等院校和知名企业进行调研, 在与各高校教师和数十位不同领域工程师广泛交流的基础上编写的。编委会成员都是来自计算机教学的一线教师和就职于各知名企业的工程师, 具有非常丰富的教学和实践经验。

本套丛书是以 MATLAB R 2008 为平台来讲解各学科知识的, 它也适合其他 MATLAB 版本, 具有如下主要特点:

(1) 突出技术, 全面针对实际应用。在选材上, 根据实际应用的需要, 坚决舍弃现在用不上、将来也用不上的内容。在保证学科体系完整的基础上不过度强调理论的深度和难度, 注重应用型人才的专业技术和工程实用技术的培养。此系列丛书从内容上讲, 跨度较大, 从 MATLAB 在基础层面的应用到专业工具箱的高层次的应用, 这样不仅满足不同领域和不同层次读者的需要, 还使读者可以根据自己的水平自主选用。

(2) 本套丛书采用“任务驱动”的编写方式, 采取“提出问题——介绍解决问题的方法——归纳总结, 培养寻找答案的思维方法”的模式。以实际问题引导出相关的原理和概念, 在讲述实例的过程中将知识点融入, 通过分析归纳, 介绍解决工程实际问题的思想和方法, 最后进行概括总结, 使书中内容层次清晰, 脉络分明, 可读性和操作性强。同时引入案例学习和启发式学习方法, 便于激发学习兴趣。

(3) 内容安排上力求由浅入深, 循序渐进; 表述清晰, 通俗易懂; 讲求效率, 内容经过多次提炼和升华, 突出规律和学习技巧, 是思维化的直接体现。

(4) 充分体现案例学习模式。在本系列丛中读者会发现, 凡是讲解一个问题都以一个案例为主线进行阐述, 这是本系列丛书作者多年来在教学第一线的经验总结。案例学习引人入胜, 易理解, 易掌握, 能使读者举一反三, 技术掌握扎实。

我们力争使这套丛书在可读性、指导性和实用性上达到最优; 但肯会有不尽人意之处, 诚挚接受广大读者的批评、指正。同时也希望与读者在本套丛书的学习、应用上相互交流, 来信可发往 [zhangdf@foshan.net](mailto:zhangdf@foshan.net)。

编委会  
2009年3月

# 前 言

MATLAB 是 MathWorks 公司推出的一套高性能的数值计算和可视化软件，它的推出得到了各个领域专家学者的广泛关注，其强大的扩展功能为用户提供了强有力的支持；它集数学运算、图形绘制、语言设计和神经网络等 30 多个工具箱于一体，具有极高的编程效率。

快速发展的 MATLAB 软件为神经网络理论的实现提供了一种便利的仿真手段。MATLAB 神经网络工具箱的出现，更加拓宽了神经网络的应用空间。神经网络工具箱将很多原本需要手动计算的工作交给计算机，一方面提高了工作效率；另一方面，还提高了计算的准确度和精度，减轻了工程人员的负担。

本书使用 MATLAB 神经网络工具箱作为开发平台，以神经网络理论为基础，利用 MATLAB 脚本语言构造出典型神经网络的激活函数，如线性、竞争性和饱和线性等激活函数，使设计者对所选定网络输出的计算变成对激活函数的调用。另外，根据各种典型的修正网络权值的规则，再加上网络的训练过程，利用 MATLAB 编写出各种网络设计和训练的子程序，网络设计人员可以根据自己的需要去调用工具箱中有关的设计和训练程序，将自己从烦琐的编程中解脱出来，集中精力解决其他问题，从而提高了工作效率。

最新版本的神经网络工具箱几乎涵盖了所有的神经网络的基本常用模型，如感知器和 BP 网络等。对于各种不同的网络模型，神经网络工具箱集成了多种学习算法，为用户提供了极大的方便。另外，该工具箱中还包含了大量的演示实例，有助于初学者加深理解。

1982 年，Hopfield 用能量函数的思想形成了一种新的计算方法，该计算方法由含有对称突触连接的反馈网络执行。而且他还将该反馈网络同用于统计物理的 Ising 模型相类推，这种类推为大量的物理学理论和许多的物理学家进入神经网络领域铺平了道路。Hopfield 阐明了 NN 与动力学的关系，并用非线性动力学的方法来研究这种 NN 的特性，建立了 NN 稳定性判据，并指出信息存储在网络中 NN 之间的连接上，形成了 Hopfield 网络。这是 NN 研究的突破性进展。

此后，神经网络领域的研究有了新发展，在 20 世纪的最后 10 年，产生了大量关于神经网络的论文，并在许多领域应用了神经网络技术，新的理论和实践工作层出不穷，20 世纪 90 年代初，Vapnik 和合作者发明了一类计算功能强大的导师学习网络，用于解决模式识别、回归及密度估测问题，这种网络被称为支持向量机 (Support Vector Machines, SVM)，以有限样本学习理论的结论为基础。支持向量机的新特征在于 Vapnik-Chervonenkis (VC) 维特征蕴含在向量机的设计中，VC 维数为衡量神经网络样本学习能力提供了一种有效的量度。总之，以 Hopfield 教授 1982 年发表的论文为标志，掀起了神经网络的研究热潮。

本书共分 10 章。其中第 1 章是神经网络的绪论，介绍了神经网络的发展历程、神经网络模型、人工神经网络的分类等内容；第 2 章是 MATLAB 语言及神经元，介绍了 MATLAB 的语言特点、MATLAB 神经网络工具箱、MATLAB 神经网络工具箱的对象与属性等内容；第 3 章是神经网络工具箱函数的分析及实例，介绍了神经网络的应用函数、神经网络的输入函数及其导函数等内容；第 4 章是前向型神经网络及 MATLAB 应用举例，介绍了感知器、线性神经网

络、BP 网络、径向基网络、GMDH 网络等内容；第 5 章是自组织神经网络及 MATLAB 程序，介绍了自组织竞争型神经网络、自组织特征映射神经网络、自适应共振理论模型、对向传播网络等内容；第 6 章是反馈神经网络及其应用，介绍了 Elman 神经网络及 MATLAB 程序、Hopfield 网络及 MATLAB 程序等内容；第 7 章是图形用户接口，介绍了图形用户界面、图形用户应用、数据的存储和读取等内容；第 8 章是 Simulink，介绍了 Simulink 交互式仿真集成环境、Simulink 的基本模块、Simulink 的命令行仿真技术、Simulink 应用实例等内容；第 9 章是自定义神经网络，介绍了自定义神经网络、自定义神经网络的初始化、训练与仿真等内容；第 10 章是神经网络的应用，介绍了线性神经网络在线性预测中的应用、神经模糊控制在洗衣机中的应用、模糊神经网络在配送中心选址中的应用等内容。

本书可作为高等院校计算机、电子工程、控制工程、信息与通信科学、数学、机械工程和生物医学工程等专业学生的参考教材，对从事上述领域工作的广大科技人员具有重要的参考价值，对学习神经网络及其仿真技术的读者来说，也是一本极为有用的入门指导书。

由于时间仓促、作者水平和经验有限，书中错漏之处在所难免，敬请读者指正。

编 著 者  
2009 年 3 月

# 目 录

<b>第 1 章 神经网络绪论</b> .....	1
1.1 人工神经网络的介绍.....	1
1.2 神经网络的发展历程.....	1
1.2.1 神经网络的起始.....	1
1.2.2 神经网络的萧条.....	2
1.2.3 神经网络兴盛.....	4
1.3 神经网络模型.....	6
1.3.1 生物神经元模块.....	6
1.3.2 人工神经元模型.....	7
1.4 人工神经网络的分类.....	11
1.5 神经网络的学习方式.....	12
1.6 神经网络的特点及优点.....	15
1.6.1 神经网络特点.....	15
1.6.2 神经网络的优点.....	16
1.7 神经网络的结构.....	17
1.8 人工神经网络与人工智能.....	19
1.8.1 人工智能的概述.....	19
1.8.2 人工神经网络的应用.....	20
1.8.3 人工神经网络与人工智能相比较.....	21
<b>第 2 章 MATLAB 语言及神经元</b> .....	23
2.1 MATLAB 简介.....	23
2.2 MATLAB 的语言特点.....	25
2.3 MATLAB 7.2 的新特点.....	26
2.4 MATLAB 神经网络工具箱.....	27
2.4.1 MATLAB 6.x 神经网络工具箱.....	27
2.4.2 MATLAB 7.x 神经网络工具箱.....	28
2.5 MATLAB 神经网络工具箱的对象与属性.....	30
2.5.1 网络对象属性.....	32
2.5.2 子对象属性.....	43
<b>第 3 章 神经网络工具箱函数的分析及实例</b> .....	57
3.1 神经网络的构建函数.....	57
3.2 神经网络的应用函数.....	69
3.3 权值和阈值初始化函数.....	74
3.4 训练和自适应调整函数.....	76
3.5 神经网络的学习函数.....	90
3.6 神经网络的输入函数及其导函数.....	99
3.6.1 输入函数.....	100

3.6.2	输入函数的导函数.....	101
3.7	神经网络的性能函数及其导函数.....	101
3.7.1	性能函数.....	102
3.7.2	性能函数的导函数.....	104
3.8	传递函数及其导函数.....	106
3.8.1	传递函数.....	107
3.8.2	传递函数的导函数.....	113
3.9	距离函数.....	117
3.10	权值函数及其导函数.....	119
3.10.1	权值函数.....	119
3.10.2	权值函数的导函数.....	121
3.11	结构函数.....	121
3.12	分析函数.....	123
3.13	转换函数.....	124
3.14	绘图函数.....	129
3.15	数据预处理和后处理函数.....	136
<b>第4章</b>	<b>前向型神经网络及 MATLAB 应用举例.....</b>	<b>143</b>
4.1	感知器.....	143
4.1.1	单层感知器模型.....	143
4.1.2	单层感知器的学习算法.....	144
4.1.3	感知器的局限性.....	147
4.1.4	单层感知器神经网络的 MATLAB 仿真.....	148
4.1.5	多层感知器神经网络及其 MATLAB 仿真.....	152
4.1.6	用于线性分类问题的进一步讨论.....	155
4.2	线性神经网络.....	157
4.2.1	线性神经网络结构.....	157
4.2.2	线性神经网络设计.....	158
4.2.3	自适应滤波线性神经网络.....	160
4.2.4	线性神经网络的局限性.....	162
4.2.5	线性神经网络的 MATLAB 应用举例.....	162
4.3	BP 网络.....	167
4.3.1	BP 神经元及其模型.....	167
4.3.2	BP 网络的学习.....	168
4.3.3	BP 网络的局限性.....	175
4.3.4	BP 网络的 MATLAB 程序应用举例.....	176
4.4	径向基网络.....	182
4.4.1	径向基函数网络模型.....	182
4.4.2	径向基函数网络的构建.....	184
4.4.3	RBF 网络应用实例.....	185
4.4.4	RBF 网络的非线性滤波.....	187

4.5	GMDH 网络 .....	188
4.5.1	GMDH 网络理论 .....	189
4.5.2	GMDH 网络的训练 .....	189
4.5.3	基于 GMDH 网络的预测 .....	190
<b>第 5 章</b>	<b>自组织神经网络及 MATLAB 程序 .....</b>	<b>193</b>
5.1	自组织竞争型神经网络 .....	193
5.1.1	竞争型神经网络模型 .....	193
5.1.2	竞争型神经网络的学习 .....	194
5.1.3	竞争型神经网络存在的问题 .....	195
5.1.4	竞争型神经网络的 MATLAB 程序 .....	195
5.2	自组织特征映射神经网络 .....	198
5.2.1	特征映射网络的模型 .....	199
5.2.2	特征映射网络的学习 .....	200
5.2.3	基于特征映射网络的人口分类 .....	200
5.3	自适应共振理论 .....	204
5.3.1	自适应共振理论模型 .....	204
5.3.2	自适应共振理论的学习 .....	204
5.3.3	自适应共振理论的 MATLAB 程序 .....	206
5.4	学习矢量量化神经网络 .....	208
5.4.1	学习矢量量化的神经网络模型 .....	208
5.4.2	学习矢量量化神经网络的学习 .....	209
5.4.3	LVQ1 学习算法的改进 .....	210
5.4.4	LVQ 神经网络的 MATLAB 程序 .....	211
5.5	对向传播网络 .....	214
5.5.1	对向传播网络简介 .....	214
5.5.2	对向传播网络的 MATLAB 程序 .....	216
<b>第 6 章</b>	<b>反馈神经网络及其应用 .....</b>	<b>223</b>
6.1	反馈神经网络的基本概念 .....	223
6.2	Elman 神经网络及 MATLAB 程序 .....	225
6.2.1	Elman 神经网络 .....	225
6.2.2	Elman 神经网络的 MATLAB 程序 .....	226
6.3	Hopfield 网络及 MATLAB 程序 .....	229
6.3.1	Hopfield 网络介绍 .....	229
6.3.2	Hopfield 网络的学习 .....	230
6.3.3	Hopfield 网络的几个重要结论 .....	230
6.3.4	Hopfield 网络的 MATLAB 程序 .....	230
6.3.5	Hopfield 网络基于数学识别 .....	232
6.4	联想记忆 .....	233
6.4.1	联想记忆的基本概念 .....	233
6.4.2	Hopfield 联想记忆网络 .....	234



6.4.3	联想记忆网络的运行步骤.....	236
6.4.4	联想记忆网络的改进.....	238
6.4.5	Hopfield 神经网络应用于联想记忆的 MATLAB 程序.....	239
6.5	回归 BP 网络及 MATLAB 应用.....	241
6.5.1	回归 BP 网络概述.....	242
6.5.2	回归 BP 网络在房价的应用.....	243
6.6	BSB 模型及其应用.....	243
6.6.1	BSB 神经网络介绍.....	244
6.6.2	BSB 的应用.....	244
<b>第 7 章</b>	<b>图形用户接口.....</b>	<b>247</b>
7.1	图形用户界面介绍.....	247
7.2	图形用户应用示例.....	248
7.3	数据操作.....	251
7.3.1	数据从工作空间导入到 GUI.....	251
7.3.2	数据从 GUI 导出到工作空间.....	251
7.3.3	数据的存储和读取.....	252
7.3.4	数据的删除.....	253
<b>第 8 章</b>	<b>Simulink.....</b>	<b>255</b>
8.1	Simulink 概述.....	255
8.2	Simulink 启动以及建立文件.....	256
8.2.1	Simulink 启动.....	256
8.2.2	MDL 文件的建立.....	257
8.2.3	Simulink 库文件的建立.....	260
8.3	Simulink 交互式仿真集成环境.....	262
8.3.1	Simulink 仿真.....	262
8.3.2	Simulink 模型属性设置.....	264
8.4	Simulink 的模块.....	264
8.4.1	连续模块库.....	264
8.4.2	离散模块库.....	265
8.4.3	非线性模块库.....	267
8.4.4	信号和系统模块库.....	268
8.4.5	数学模块库.....	269
8.4.6	输出模块库.....	270
8.4.7	输入源模块库.....	271
8.5	Simulink 的命令行仿真技术.....	272
8.5.1	命令行创建 Simulink 仿真模型.....	272
8.5.2	用 Simulink 命令行进行仿真.....	275
8.5.3	命令行仿真实例.....	279
8.6	Simulink 应用实例.....	281

<b>第 9 章 自定义神经网络</b> .....	<b>285</b>
9.1 自定义神经网络.....	285
9.1.1 自定义神经网络的创建.....	285
9.1.2 自定义神经网络的初始化、训练与仿真.....	295
9.2 自定义函数 .....	297
9.2.1 初始化函数.....	298
9.2.2 学习函数.....	300
9.2.3 仿真函数.....	305
9.2.4 自组织函数.....	315
<b>第 10 章 神经网络的应用</b> .....	<b>319</b>
10.1 线性神经网络在线性预测中的应用.....	319
10.2 神经模糊控制在洗衣机中的应用.....	321
10.2.1 洗衣机的模糊控制.....	321
10.2.2 洗衣机的神经网络模糊控制器的设计 .....	322
10.3 模糊神经网络在配送中心选址中的应用.....	326
10.3.1 问题概述.....	326
10.3.2 设计 .....	326
10.4 Elman 神经网络在信号检测中的应用.....	329
10.5 神经网络在噪声抵消系统中的应用.....	332
10.5.1 自适应噪声抵消原理.....	332
10.5.2 噪声抵消系统的 MATLAB 仿真 .....	334
<b>参考文献</b> .....	<b>337</b>

# 第 1 章 神经网络绪论

## 1.1 人工神经网络的介绍

在你阅读本书时，你正在用到一个复杂的生物神经网络，大约有 $10^{11}$ 个相互连接的神经元帮助你进行阅读、呼吸、思考，完成各种动作，部分神经网络的结构和功能是与生具有的，比如支配呼吸、哭、吮吸等本能动作的功能；而大多数的功能则需要通过后天的学习才能获得。

虽然人们还并不完全清楚生物神经网络是如何进行工作的，但幻想构造一些“人工神经元”，进而将它们以某种方式连接起来，可以模拟“人脑”的某些功能。

## 1.2 神经网络的发展历程

人工神经网络这项研究始于 20 世纪 40 年代，它的发展经历了起始、萧条和兴盛三个阶段。

### 1.2.1 神经网络的起始

1943 年，精神病学家和神经解剖学家 McCulloch 与数学家 Pitts 在数学生物物理学会期刊《Bulletin of Mathematical Biophysics》上发表文章，总结了生物神经元的一些基本生理特征，提出了形式神经元的数学描述与结构，即 MP 模型。McCulloch 和 Pitts 描述了一个逻辑微积分的神经网络，这个网络由神经生理学和数学逻辑学组成，他们定义的神元元的正规模型被认为遵循着“全或无”法则。McCulloch 和 Pitts 证明：原则上，在拥有了数量众多的简单单元和适当的神经元连接且运行同步的情况下，所构建的网络能计算任何可计算的函数。MP 的提出兴起了 NN 研究，同时产生了人工智能（Artificial Intelligence, AI）这一学科。

1948 年，Wiener 所著的著名的《Cybernetics》一书出版，提出了控制、通信和统计信号处理的重要概念，在学科之间抓住了统计方法的物理意义。

1949 年，生理学家 D.O.Hebb 出版了《The Organization of Behavior》一书。该书第一次鲜明地提出了改变神经元连接强度的 Hebb 规则，特别是 Hebb 提出脑中互连信息随着感官学习任务的不同而不断变化，这种变化产生了神经集合。他认为学习过程是在突触（Synapse）上发生的，突触的连接强度随其前后神经元的活动而变化。根据这一假设提出的学习规则为神经网络的学习算法奠定了基础，使神经网络的研究进入了一个重要的发展阶段。

1952 年，Ashby 所著的《Design for a Brain: The Origins of Adaptive Behavior》一书出版。书中论述了“自适应行为不是天生的，而是学习的结果”这一基本概念，而且通过对动物行为（系统）的学习会有更好的改变，书中还强调了类似机器的生物动态和相关的稳定性概念。

1954 年，Minsky 在 Princeton 大学撰写了一篇题为《Theory of Neural-Analog Reinforcement Systems and Its Application to the Brain-Model Problem》的神经网络博士论文。1961 年，Minsky 写了一篇关于早期人工智能的优秀论文，题为《Steps Toward Artificial Intelligence》，论文的后

半部包含了当今神经网络的大部分内容;1976年,Minsky出版了《Computation:Finite and Infinite Machines》一书,该书清晰地扩展了McCulloch和Pitts 1943年的成果,并将其归入自动机和计算理论中。

1954年,通信理论的先驱和全息照相术的发明者Gabor提出了非线性自适应滤波思想,他希望与合作者一起发明一种机器,通过将一个随机过程的样本输入机器中,连同目标函数,实现机器学习。

Von Neumann是20世纪前半叶科学领域中最伟大的人物之一,数学计算机的基础设计就是以他的名字命名的。早在1949年,Von Neumann在Illinois大学四次讲座的第二次讲座中,阐述了McCulloch、Pitts证实的神经网络理论特点。1955年,他应邀去Yale大学进行Silliman讲座,直至1956年(他死于1957年)。他未完成的Silliman讲座的手稿于1958年作为一本书出版,书名为《The Computer and the Brain》,此书由于涉及了Von Neumann生前所做的工作和他注意的人脑与计算机的巨大差异,因而备受关注。此外,1956年Von Neumann用约简的思想解决了一个在神经网络中特别令人关注的问题,这就是如何用认为是不可靠的神经元来设计一个可靠的网络的问题。

1957年,Rosenblatt提出了感知器(Perceptron)的概念。1958年Rosenblatt基于对感知器的研究,提出了解决模式识别问题的新监督学习方法,并证明了所谓的感知器收敛定理,首次把神经网络的研究付诸工程实践。这是一种学习和自组织的心理学模型,它基本上符合神经生理学的理论,模型的学习环境是有噪声的,网络构造中存在随机连接,这是符合动物学习的自然环境的。这种类型的机器显然有可能应用于模式识别(Pattern Recognition)、联想记忆(Associative Memory)等方面。

1960年,Widrow和Hoff引入了最小均方差(Least Mean-Square, LMS)算法,并用它系统地阐明了自适应线性元件(Adaptive Linear Element)。感知器和自适应线性元件之间的差异在于训练过程,最早出现的包含多适应元件的可训练分层神经网络是多学习机结构,这种结构由Widrow和他的学生在1962年提出。

1965年,Nilsson所著的《Learning Machines》一书出版,至今这本书仍然是关于超平面中线性模型的佳作。

1967年,Amari用推测梯度方式进行自适应模式分类。

在感知器盛行的20世纪60年代,人们对神经网络的研究过于乐观,认为只要将这种NN互连成一个网络,就可以解决人脑思维的模拟问题。因此,当时有上百家实验室纷纷投入这项研究,美国军方也投入了巨额资金,当时NN在声呐信号识别等领域的应用取得了一定的成绩。

1969年,Minsky和Papert所著的《Perceptron》一书出版,该书从数学角度证明了关于单层感知器的计算具有根本的局限性,指出感知器的处理能力有限,甚至连异或这样的问题也不能解决,并在多层感知器的总结一章中,论述了单层感知器的所有局限性在多层感知器中是不可能被全部克服的。当时人工智能的以功能模拟为目标的另一分支出现了转机,产生了以知识信息处理为基础的知识工程(Knowledge Engineering),给人工智能从实验室走向实用带来了希望。同时,随着微电子技术的进步,以及传统的Von Neumann型数学计算机的发展,使整个学术界陶醉于数学计算机的成功之中,从而使NN的研究进入了萧条时期。

### 1.2.2 神经网络的萧条

根据Cowan 1990年提出的观点,有三个原因导致了神经网络研究的十多年停滞。原因之

一是技术上的——没有个人计算机和 workstation 进行实验,如 Gabor 发展了他的非线性学习滤波器,却花费了额外的六年时间建造了含有类推装置的滤波器;原因之二一半是心理上的,即 Minsky 和 Papert 对感知器的悲观结论,一半是资金上的,即没有代理商资助;原因之三是神经网络和晶格旋转之间的类推还未成熟,直至 1975 年才由 Sherrington 和 Kirkpartrick 创建出旋转镜片模型。

这些因素导致了 20 世纪 70 年代对神经网络的研究陷入了低谷,此时许多研究人员放弃了除心理学和神经学之外的其他领域的研究。

难能可贵的是,在此期间,仍有不少学者在极端艰难的条件下,保持对神经网络的信奉,致力于这一研究。

1972 年 Teuvo Kohonen 和 James Anderson 各自独立发展了用于记忆的新神经网络。Amari 独立提出了一个神经元的附加模型,并将其应用于研究随机连接类似于神经元元件的动态行为之中。Wilson 和 Cowan 从含有兴奋和抑制神经元空间局部化模型的动态行为中获取非线性微分方程组。

1976 年 Willshaw 和 Malsburg 发表了第一篇受人脑拓扑次序映射启发,构筑自组织映射的论文。

1977 年 Anderson、Silverstein、Ritz 和 Jones 提出了黑箱脑状态 (Brain-State-in-a-Box, BSB) 模型,其中包括含有非线性动力的一个简单联想网络。

1980 年 Grosserg 在早期对竞争学习研究的基础上,创立了自组织新理论,被称为自适应谐振理论 (Adaptive Resonance Theory, ART),该理论包括自下而上的认知层和自上而下的生成层,若输入模式与学习反馈模式相匹配,则产生称为“自适应谐振”的动力状态(即神经网络的扩大与延长),其前向/后向投影原理已经被其他学者应用于不同方面,并使其得到了发展。

由于新思想的缺乏和用于实验的高性能计算机的短缺,导致了 20 世纪 60 年代后期神经网络研究的停滞不前,到了 20 世纪 80 年代,上述难关均被攻克,神经网络有了迅猛发展,功能日渐强大的个人计算机和 workstation 开始被广泛应用,此时也产生了神经网络研究的新观念。

使神经网络重新焕发生机的原因,主要有两个,第一个是利用统计机制解释循环网络的运行过程,这种机制可用于联想记忆,此观念是由物理学家 John Hopfield 在他的核心论文中提出的。

20 世纪 80 年代的第二个核心发展是用于训练多层感知器的反向传播算法,此算法同时被几个学者所发现,其中影响最大并广泛传播的是由 David Rumelhart 和 James McClelland 提出的算法,该算法是对 20 世纪 60 年代 Minsky 和 Papert 的批判的一个有力回答。

另外,20 世纪 70 年代后期出现以下情况:

(1) 研究视、听觉的人工智能专家认为计算机一般不能从现实世界的实例与现象中获取并总结出知识,也就是说计算机不具备学习能力。于是人们开始意识到了 Von Neumann 体系结构的局限性,转而研究数据流机和并行计算机体系结构。

(2) 日本的第五代计算机计划远未达到预想水平,使人们觉得有必要弄清楚人们习以为常的认知功能是如何进行的,这些认知功能包括视听觉感知、学习记忆、运行控制等,从而使人们认识到必须开拓新的思路,探索新的实现途径——与人脑的生理组织更为接近的 NN 模型自然成为理想的候选模型。

(3) 在人类智能行为研究方面,神经生理学家、心理学家和计算机科学家相互结合,认为人脑是一个功能十分强大、结构异常复杂的信息系统,但其基本仍是神经元及其之间的连接。

(4) NN 的研究依靠众多学科的共同发展,是多学科的综合产物。而当时许多学科都有了相应的发展,如普里高津(Prigogine)提出了非平稳系统的自组织理论,获诺贝尔奖;哈肯(Haken)研究了大量单元集团运动而产生的宏观效果;非线性系统“混沌”态的提出及其研究,等等。这些都是研究如何通过单元之间的相互连接作用建立复杂系统,类似于生物系统的自组织行为。

(5) 脑科学与神经科学的研究成果,迅速反映到神经网络的改进上,例如视觉研究中发现的侧抑制原理、感受野的概念,听觉通道上神经元的自组织排列等。生物的 NN 研究成果对 ANN 的研究起了重要的推动作用。

所有这些重新引起了人们对 ANN 的研究兴趣。

### 1.2.3 神经网络兴盛

学术界公认,标志 NN 研究高潮的又一次到来是美国加州理工学院生物物理学家 J.Hopfield 教授于 1982 年和 1984 年发表在美国科学院院刊上的两篇文章以及 1986 年 Rumelhart 与 McClelland 的著作。

1982 年, Hopfield 用能量函数的思想形成了一种新的计算方法,该计算方法由含有对称突触连接的反馈网络执行,而且他还将该反馈网络同用于统计物理的 Ising 模型相类推,这种类推为大量的物理学理论和许多的物理学家进入神经网络领域铺平了道路。Hopfield 阐明了 NN 与动力学的关系,并用非线性动力学的方法来研究这种 NN 的特性,建立了 NN 稳定性判据,并指出信息存储在网络中 NN 之间的连接上,形成了 Hopfield 网络。这是 NN 研究的突破性进展。

1982 年,另一个重要的发展是 Kohonen 的关于自组织图的论文发表,其中用到了一个一维或二维的晶体结构,这种模型已成为衡量在此领域中有价值创新的基准。

1983 年, Kirkpatrick、Gelatt 和 Vecchi 提出了模拟退火(Simulated Annealing, SA)的新方法,该方法以统计理论为基础,用于解决组合最优问题。

1983 年, Barto、Sutton 和 Anderson 发表了关于强化学习(Reinforcement Learning, RL)的论文,虽然他们不是第一个提出强化学习思想的人(如 Minsky 在 1954 年的博士论文中就有提及),但这篇论文将强化学习应用于实际,验证了其应用有可行性,对强化学习的发展及应用产生了重要的影响。

1984 年, Hopfield 设计与研制了他所提出的神经网络模型的电路,指出神经元可以用运算放大器来实现,所有神经元的连接可用电子线路来模拟。同时,他们进行了神经网络应用研究,成功地解决了旅行商(TSP)计算难题(优化问题),使神经网络的研究步入了兴盛时期。

1984 年, Braitenberg 出版了《Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology》一书,此书中引用面向对象技术和自组织原理,通过对假定的基本机制的合成,而不是自顶向下的分析,使得对复杂过程的理解达到最好效果。Braitenberg 通过对各种具有简单内部结构的机器的描述证明了这一重要法则。Braitenberg 直接和间接地研究动物大脑超过 20 年,在这方面的研究启发其发现机器特性及其行为。

1985 年, Ackley、Hinton 和 Sejnowski 以模拟退火思想为基础,对 Hopfield 模型引入了随机机制,提出了 Boltzmann 机,第一次成功实现了多层神经网络的功能,打破了人们心理上的局限,证明了 Minsky 和 Papert 1969 年的推测根据是不正确的。

1986 年, Rumelhart、Hinton 和 Williams 发展了反向传播算法(Back-Propagation algorithm,



BP)。同年, Rumelhart 和 McClelland 编写的名为《Parallel Distributed Processing: Explorations in the Mirostructures of Cognition》的书出版, 此书的出版对反向传播算法的应用产生了重要影响。反向传播算法已成为大多数多层感知器训练所采用的流行学习算法。该算法解决了多层 NN 的学习问题, 证明了多层神经网络的计算能力并不像 Minsky 等人所预料的那样弱, 相反它可以完成许多学习任务, 解决许多实际问题。

1988 年, Linsker 在感知器网络上提出了一种新的自组织理论, 该理论用于保持输入行为模式的最大信息, 并受突触连接和活动范围的限制, 在 Shanno 信息论的基础上, 形成了最大互信息理论。Linsker 的论文重新点燃了基于神经网络的信息应用理论的光芒, 尤其对 Bell 和 Sejnowski 提出的盲源分离问题 (Blind Source Separation Problem) 的信息应用理论产生了影响, 同时激起许多学者去探索用其他信息理论模型去解决各自广泛领域中的问题, 这种方法称为盲反卷积 (Blind Deconvolution)。

1988 年, Broomhead 和 Lowe 用径向基函数 (Radial Basis Functions, RBF) 提出了分层反馈网络设计的方法。Broomhead 和 Lowe 的论文将神经网络的设计与数值分析的重要领域和线性适应滤波挂钩, 产生了大量的研究成果, 为多层感知器的研究提供了又一方法和途径。1990 年, Poggio 和 Girosi 应用 Tikhonov 规则理论进一步丰富了径向基理论。

1989 年, Mead 的《Analog VLSI and Neural System》一书出版, 这本书将生物神经和集成电路结合在一起, 给出了硅视网膜和硅耳蜗。

此后, 神经网络领域的研究有了新发展, 在 20 世纪的最后 10 年, 产生了大量关于神经网络的论文, 并在许多领域应用了神经网络技术, 新的理论和实践工作层出不穷, 20 世纪 90 年代初, Vapnik 和合作者发明了一类计算功能强大的导师学习网络, 用于解决模式识别、回归及密度估测问题, 这种网络被称为支持向量机 (Support Vector Machines, SVM), 以有限样本学习理论的结论为基础。支持向量机的新特征在于 Vapnik-Chervonenkis (VC) 维特征蕴含在向量机的设计中, VC 维数为衡量神经网络样本的学习能力提供了一种有效的量度。

总之, 以 Hopfield 教授 1982 年发表的论文为标志, 掀起了神经网络的研究热潮。1987 年 6 月, 在美国加州举行了第一届 NN 国际会议, 有 1000 多名学者参加, 并成立了国际 NN 学会, 以后每年召开两次国际联合 NN 大会 (IJCNN), 其他国际学术会议也都列有 NN 主题。较有影响的国际学术刊物有:《IEEE Transaction on Neural NetWork》和《Neural Network》。美国 IBM、AT&T、贝尔实验室、神经计算机公司、各高校、美国政府制定了“神经、信息、行为科学 (NIBS)”计划, 投资 5.5 亿美元作为第六代计算机的基础研究; 美国科学基金会 (NSF)、海军研究局 (ONR) 和空军科学研究部 (AFOSR) 三家投资 1000 万美元; 美国国防部 DARRA 认为“NN 是解决机器智能的唯一希望”, “这是一项比原子弹工程更重要的技术”, 并投资 4 亿美元。主要研究目标为: 目标识别与跟踪、连续语音识别、声呐信号辨识。

日本的富士通、日本电气、日立、三菱、东芝等公司也急起直追。1988 年日本提出了所谓的人类尖端科学计划 (Human Frontier Science Program), 即第六代计算机研究计划。法国提出了“尤里卡”计划, 还有德国的“欧洲防御”和前苏联的“高技术发展”等。

我国于 1989 年在北京召开了一个非正式的 NN 会议; 1990 年 12 月在北京召开了中国 NN 大会; 1991 年在南京成立了中国 NN 学会, 由国内 15 个一级学会共同发起“携手探智能, 联盟攻大关”的“863”高技术研究计划; 自然科学基金、国防科技预研基金也都列入了 NN 研究内容。