

华南理工大学科学丛书

神经网络与信号分析

余英林 李海洲 著

华南理工大学出版社

自序

从 80 年代至今在世界范围内再次出现研究人工神经网络的高潮，其显著特点之一，除了在模型算法等基本理论有深入发展之外，便是神经网络理论方法作为新一代的神经计算模型已逐渐广泛地应用于各个前沿学科领域。这点在各次神经网络的国际学术会议及神经网络应用国际学术会议上均可明显看出来。神经网络现已应用于：自动控制、生物医学、质量检测、气象预报、信息处理、军方用途、公安用途、通信网、新一代计算机、工业用途等。这些应用领域所涉及的主要问题之一便是信号分析，以上用途无不依赖于信号分析。

本书作者们所在的实验室，华南理工大学无线电与自动控制研究所的通信与电子系统、电路与系统、信号与信息处理实验室，自 80 年代末至今从事神经网络与信号分析的研究工作，从有关的神经网络模型到各种具体应用，如：神经网络在图象分析、语音分析、生物信号分析等方面的应用做了大量的工作。在国内外刊物及权威学术会议上累计发表了有关文章上百篇，其中不少被国际检索收录。

本书收入作者们的科研成果以及历次出国访问所得的最新资料。本书分两大部分共十一章，一大部分是关于与信号分析有关的人工神经网络模型及新算法，如感知器、自适应谐振理论、优化问题、神经网络与混沌、分形、自组织映射、高阶神经网络、模糊神经网络、主分量分析理论等方面。另一部分为神经网络在图象分析、语音分析、生物信号分析方面的应用。

本书中我们的科研成果是在国家自然科学基金、广东省科学

基金“攀登计划”资助下取得的。作者们在写作过程中得到徐秉铮教授指导与大力支持，蒙毛琮源教授校阅第七章原稿。在稿件的定稿过程中，实验室的李惠卿、罗莉芳、梁国英等同志帮助部分抄写与部分绘图工作。在定稿过程中，还得到博士生陆导群、叶军、刘大焱的大力协助。作者们在此表示衷心感谢！

本书第一章由韦岗（博士、教授）编著，第二章由彭磊（博士）编著，第三章由余英林（教授、博士生导师）编著，第四章由李海洲（博士、教授）编著，第五章由余英林著，第六章由邓达（博士）、余英林合著，第七章由余英林编著，第八章由余英林著，第九章由吴华盛（副教授）、宋桐青（教授）合编著，第十章由李海洲著，第十一章由李金艳（博士生）、余英林合著。

本书可供博士、硕士研究生作教材，也可供有关科研人员作参考。

作 者

1994年11月

注：本书于1992年夏动笔，1993年因故中断，1994年写作得以继续，终于能付梓。作者对出版社表示衷心感谢。

《华南理工大学科学丛书》编审委员会

主任：刘振群

副主任：刘正义

委员（以姓氏笔划为序）

刘正义 刘有延 刘振群

刘焕彬 江厚祥 张力田

沈尧天 周泽华 周绍华

林维明 徐秉铮 贾信真

韩大健

出版说明

华南理工大学，是国家教育委员会直属的一所全国重点高等学校。自1952年建校以来，尤其是改革开放十多年来，已发展成为以工为主、理工文管结合的颇具规模的多科性综合大学，为国家培养和输送了6万多名各学科、专业的高级建设人才。目前，在校任教的教授、副教授（含相当的其它高级职称人员）有1000多人。正是他们带领4500多名教职员工，沿着党的教育方针指引的道路，把学校办成既是教学中心，又是科研中心。在他们当中有相当一批是在基础理论、应用科学或工程技术领域方面探索研究几十年而取得可喜成果，为繁荣发展我国科学和教育事业作出重要贡献并在国内外享有声誉的著名教授、专家、学者。我们编辑出版《华南理工大学科学丛书》的宗旨是：选择华南理工大学任职的教授、专家、学者科学研究中在某学科或领域处于科学前沿或取得突破性成果的科学论著，按统一的规格要求汇编成丛书，陆续出版面世，以集中反映华南理工大学代表性的科研成果及其在有关学科领域中的地位和特色，为科研成果的积累、传播、交流及转化为生产力方面提供必要的条件。

《华南理工大学科学丛书》列选资格由本丛书编审委员会审定，并由华南理工大学拨出专项基金资助出版。选编的原则是：

一、列入本丛书的作者（或第一作者），必须是在华南理工大学担任现职的教师或在学的研究生。除博士点或博士后流动站的导师外，其他教师或研究生的著作必须有两名以上同行专家提出评论意见推荐。

二、凡申请列入本丛书的著作，均应是反映华南理工大学某学科领域的优势、特色和科学水平的，在国内或国内外处于先进水平或领先地位的学术专著；对科学研究成果卓著、学术界知名度大且年事已高的老教授，有选择地适当安排出版其科学论文集。

三、列入本丛书的著作均应使用中华人民共和国法定计量单位（或国际单位制）和有关的新标准（1990年前发表的著作附新制与旧制对照表）；在引用他人著作或观点时，应注明出处和列出参考文献。

四、作者已在国外发表的论著，选用时保留发表时的文种，并注明发表的时间、地点和刊物名称。

出版高层次的科学丛书，我们还是初次尝试，由于缺乏经验，如出现缺点和错误，欢迎读者批评指正。

华南理工大学出版社

目 录

1 前馈型多层网络	1
1.1 引言	1
1.2 感知器	4
1.2.1 概述	4
1.2.2 单层感知器的表征能力与线性可分性	6
1.3 多层感知器	8
1.3.1 多层感知器的结构	8
1.3.2 多层感知器的分类能力	8
1.3.3 多层感知器的映射能力	13
1.4 多层感知器的学习算法	18
1.4.1 感知器的学习算法	18
1.4.2 多层感知器的误差反传学习算法	20
1.4.3 多层感知器的快速收敛学习算法	27
参考文献	34
2 自组织映射理论	36
2.1 人脑的信息拓扑映射特性	37
2.2 Kohonen 自组织特征映射算法	41
2.2.1 网络的基本结构	41
2.2.2 Kohonen 自组织映射算法	43
2.2.3 几个例子	47
2.3 自组织映射拓扑有序理论	53
2.4 应用举例	60
2.4.1 例子——货郎担问题的解决	61

2.4.2	例子二——数据压缩问题	64
2.4.3	例子三——语音、图象识别	69
2.5	汉语语音的神经网络自组织映射	71
2.5.1	语音信号预处理	72
2.5.2	语音参数特征空间与神经网络	74
2.5.3	神经网络音素映象	78
2.5.4	实时识别系统的建立	88
2.5.5	神经网络语音模式与语音信号的状态	89
2.5.6	神经网络实时汉语语音识别	96
	参考文献	98
3	自适应谐振理论	100
3.1	概述	100
3.2	基本工作原理与 ART-1 算法	101
3.2.1	概述	101
3.2.2	门控 G_1 及 G_2 的工作规则	103
3.2.3	输入/比较层工作规则	103
3.2.4	识别层工作规则	108
3.2.5	关于权向量的讨论	110
3.2.6	ART 的特点	111
3.3	ART 系统的深层机理	112
3.3.1	输入/比较层与识别层神经元激活信号变化规律	113
3.3.2	加权系数的变化规律	115
3.3.3	Weber 规律与联想衰减规律	116
3.3.4	模板 T 的变化规律	117
3.3.5	“三分之二”规律的要求	118
3.4	ART 系统的学习机理	121
3.4.1	直接访问识别层神经元问题	122
3.4.2	搜索过程	126

3.4.3	学习的自稳定	129
3.5	ART-2 结构及原理	136
3.5.1	概述	136
3.5.2	ART-2 系统分析	138
3.6	ART-3 结构及原理	146
3.6.1	ART 同形级联结构体系	147
3.6.2	ART-3 基本结构	148
3.7	模糊 ART 原理	155
3.7.1	模糊 ART 的特点	155
3.7.2	模糊 ART 工作分析	157
3.7.3	参数对模糊 ART 工作的影响	159
	参考文献	162
4	神经网络在优化问题中的应用	163
4.1	优化问题的数学描述	163
4.1.1	线性规划 (LP)	163
4.1.2	二次规划 (QP)	167
4.1.3	线性补偿问题 (LCP)	169
4.2	神经网络应用于 LP 问题	173
4.2.1	不等式条件的 LP	174
4.2.2	标准形式 LP 问题	179
4.2.3	有界设计变量的 LP	184
4.2.4	解原始和对偶 LP 问题的算法	188
4.2.5	运输问题	189
4.3	神经网络应用于凸二次规划问题	192
4.3.1	等式条件 QP 问题	193
4.3.2	不等式条件 QP 问题	195
4.3.3	混和条件 QP 问题	199
4.4	神经网络应用于线性补偿问题	200

参考文献	210
5 神经网络与混沌、分形	212
5.1 概述	212
5.2 神经网络非线性动力学行为简述	212
5.3 迭代函数系统	217
5.4 压缩映射及吸引子	221
5.5 混沌神经网络模型	224
5.6 自组织映射混沌神经网络模型	229
5.6.1 Hopf 分岔标准方程	229
5.6.2 用于模式识别的实际模型	233
5.6.3 一种混沌耦合神经网络模型	236
5.7 神经网络的分形性	238
5.7.1 分形的基本性质	238
5.7.2 分维数	240
5.7.3 一种信息分形神经网络及其应用	243
参考文献	250
6 非监督 Hebbian 学习网络	252
6.1 引言	252
6.2 主分量与 Oja 算法分析	254
6.2.1 主分量提取: 从 Hebb 规则到 Oja 规则	254
6.2.2 Oja 算法分析	256
6.3 多主分量分析算法	259
6.3.1 算法推广的基础	259
6.3.2 广义 Hebbian 算法 (GHA)	261
6.3.3 局部侧联网络	262
6.3.4 局部 PCA 算法收敛性的一般性分析	267
6.3.5 PCA 网络算法的信息量分析	269
6.4 其他学习算法	272

6.4.1	其他权重约束的学习规则	272
6.4.2	竞争性 Hebbian 学习算法	272
6.4.3	非对称 PCA (APCA) 算法	273
6.5	PCA 算法的应用	276
6.5.1	旋转校正	277
6.5.2	图象压缩与图象分析	277
6.5.3	视觉“感受场”	280
6.5.4	“子空洞”模式识别	280
6.6	结语	281
	参考文献	282
7	模糊神经网络原理	285
7.1	引言	285
7.2	模糊神经网络模型	287
7.3	动态神经单元 (DNU) 模型	290
7.3.1	DNU 的工作原理	290
7.3.2	DNP 的工作原理	294
7.4	模糊自组织神经网络	296
7.4.1	模糊 Kohonen 自组织网	297
7.4.2	自适应模糊类聚 (AFLC)	298
7.4.3	综合自适应模糊类聚模型 (IAFC)	301
7.5	神经网络实现模糊推理	303
7.5.1	模糊推理的背景知识简介	303
7.5.2	实现模糊推理的神经网络模型	311
	参考文献	314
8	神经网络在图象分析中的应用	315
8.1	引言	315
8.2	图象恢复的人工神经网络模型	315
8.3	联想记忆模型用于字符识别	322

8.3.1	联想记忆网及全息联想记忆网原理简介	322
8.3.2	字符识别系统	324
8.4	神经网络、分形变换与子波变换用于图象压缩	334
8.4.1	用 PCA 网实现图象压缩	334
8.4.2	用子波变换实现图象压缩	336
8.4.3	分形变换图象压缩	342
8.5	神经网络用于图象模式识别	355
8.5.1	线性判别函数的实现	355
8.5.2	用自组织映射网及最大输出网实现非监督模式的分类	358
8.5.3	联想记忆网实现模式识别	359
8.5.4	其他类型神经网的模型用于模式识别	360
8.6	神经网络用于图象压缩及向量量化	361
	参考文献	364
9	神经网络在生物医学信号分析中的应用	365
9.1	自发脑电信号的处理	365
9.1.1	概述	365
9.1.2	混沌动力学	366
9.1.3	脑电信号提取的方法	369
9.1.4	脑电图有效段的选择	370
9.1.5	相关维数	370
9.1.6	结束语	376
9.2	心电图数据压缩的新方法	377
9.2.1	神经网络心电图数据压缩的原理	377
9.2.2	心电图数据压缩的新方法	378
9.3	动态系统建模方法及其应用	383
9.3.1	RBF 网络辨识原理	383
9.3.2	血糖代谢系统 RBF 网络模型的辨识	386

9.4	人工神经网络在医学模式识别与诊断中的应用	388
9.4.1	概述	388
9.4.2	算法讨论	390
9.4.3	心电的自动识别	390
9.5	基于神经网络的模糊控制及其应用	394
	参考文献	399
10	神经网络在语音识别的应用	400
10.1	引言	400
10.2	语音静态模型	401
10.2.1	语音状态转移模型	402
10.2.2	失真测度	404
10.2.3	语音识别	407
10.3	判别性语音模型	413
10.3.1	判别性训练方法	413
10.3.2	最小分类误差的多层前向网络	417
10.3.3	语音识别实验	420
	参考文献	422
11	高阶神经网络的理论及其应用	424
11.1	引言	424
11.2	高阶神经网络对连续函数的逼近能力	426
11.2.1	引言	426
11.2.2	三层高阶前馈网络结构	426
11.2.3	三层高阶前馈网络的逼近原理	428
11.2.4	高阶前馈网络的 BP 算法及改进算法	431
11.2.5	一阶网与高阶网的性能比较	436
11.3	二阶 Hopfield 网的存储能力	438
11.3.1	引言	438
11.3.2	研究二阶 Hopfield 网的预备知识	438

11.3.3	网络描述及其容量的等价形式	441
11.3.4	原理与证明	442
11.4	高阶神经网络的应用	449
11.4.1	二层高阶神经网络对任意布尔函数的实现	449
11.4.2	二阶 Hopfield 网络在模式识别和优化计算方面的应用	455
11.4.3	怎样用高阶神经网络求解一类正定矩阵的特征矢量	457
参考文献		459

1 前馈型多层网络

1.1 引言

前馈多层神经网络是人工神经网络中重要的一类。这种网络具有任意复杂的模式分类能力和良好的多维函数映射能力，特别是由于其有效的训练算法，因而得到了广泛的应用。

要了解多层神经网络，首先得从其最基本的单元——感知器说起。

人们对于感知器的研究始于本世纪 40 年代。起初进行这项研究的目的是为了模仿生物神经元及其组织系统，从而进一步实现人脑的各种功能。早期的研究者们提出了一些简单的硬件及软件模型来模拟人脑神经元的功能，并将其应用到某些问题的解决之中。其中，较为著名的有 Mc Culloch (1943 年) 及 Pitts (1947 年) 等人的研究成果。他们提出了一种由简单神经元构成的神经网络，并将其应用于模式识别的问题。

他们提出的神经元模型为一加权求和器及门限比较器组合，如图 1.1.1 所示。这个模型是以后各种模型的雏型。图 1.1.1 所示的神经元通常又称为感知器。

图 1.1.1 所示的感知器模型，具有多个输入，而输出值只有一个。各个输入分量经不同的权值加权求和，然后此求和值再与一个门限值进行比较，当此求和值超过该门限时，输出取为 1，反之取为 0。因此，在此模型之中，无论此模型的输入是连续值，

还是离散值，其输出总是离散的。

显然，图 1.1.1 所示的模型稍加修改便可推广成连续输出的情形。

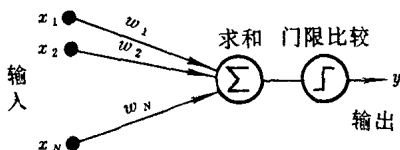


图 1.1.1 简单神经元的数学模型

门限比较器的特性可用下式来表达：

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t \leq u \\ 1 & t > u \end{cases} \quad (1.1.1)$$

其中， u 为比较门限， t 为输入。

若希望神经元的输出可连续取值，则可将 $f(t)$ 修改为：

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t \leq u \\ \frac{t-u}{v-u} & u < t \leq v \\ 1 & t > v \end{cases} \quad (1.1.2)$$

或更一般地，取所谓的 Sigmoid 函数：

$$f(t) = \frac{1}{1 + e^{-t}} \quad -\infty < t < \infty \quad (1.1.3)$$

图 1.1.1 所示的神经元可以复合构成一个多输入——多输出的神经元，如图 1.1.2 所示。更进一步，还可以组合构成多输入/多层次/多输出系统，如图 1.1.3 所示。通常，人们称具有图 1.1.3 所示结构的网络为多层感知器。

从上述神经网络的构成可知，图 1.1.1 所示的神经元（感知器）是基础，因此，在神经网络的研究初期，人们的重点是研究

感知器。早期关于感知器的研究结果，并未引起人们足够的关注。直到 60 年代开始，这项研究才开始引起人们的兴趣与重视。这在很大程度上，应归功于 Rosenblatt。他在 1962 年证明了一个著名的定理，即：当感知器的层数足够多时，它可以有任意复杂的表征能力。这点，在以后还会详细讨论。这个定理的证明，再加上 Widrow 等人同期所作的一系列关于感知器功能的肯定性论证，向人们展示了多层感知器的巨大潜力，从而出现了历史上第一次神经网络研究的高潮。

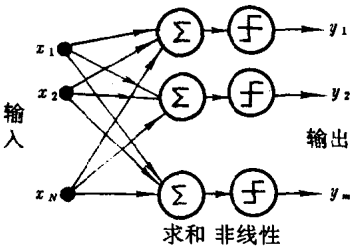


图 1.1.2 多输入/多输出神经元模型

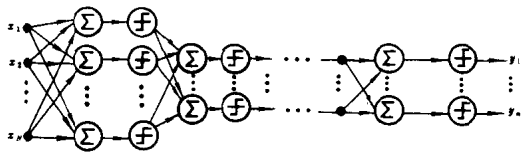


图 1.1.3 多输入/多层次/多输出神经元系统

然而，好景不长，当时由于还没有找到训练多层感知器的有效方法，因而，在应用上，还多是采用单层感知器。Minsky 1963 年提出了一个重要的结论，即：单层感知器的表征能力非常有限，只能表征线性可分问题。这一结论使当时以单层感知器为主体的