

高颖慧 王平 沈振康 编著

信号处理的神经网络方法

清华大学出版社

信号处理的神经网络方法

高颖慧 王平 沈振康 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

人工神经网络的独特知识表示结构和信息处理原则使其成为智能信息处理的主要技术之一,吸引了越来越多科技工作者的研究兴趣。本书从人工神经网络在信号处理领域的应用入手,对神经网络基本结构和信号处理领域如何应用神经网络进行介绍。我们挑选 BP、RBF、SOFM、LVQ、Hopfield 这 5 种已成功应用于解决实际信号处理问题的网络结构进行详细介绍,并对如何利用它们解决信号处理问题进行分析。另外还介绍了量子比特神经网络这种新兴网络结构。

本书适合于作为研究生或高年级本科生的教材,也可以作为希望深入学习神经网络理论和应用技术的科技人员的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

信号处理的神经网络方法/高颖慧,王平,沈振康编著. —北京:清华大学出版社,2012.12

ISBN 978-7-302-30545-3

I. ①信… II. ①高… ②王… ③沈… III. ①神经网络—应用—信号处理—研究 IV. ①TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 257606 号

责任编辑:邹开颜 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:9.5 字 数:206 千字

版 次:2012 年 12 月第 1 版 印 次:2012 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:22.00 元

产品编号:038020-01

人工神经网络作为近代非线性科学和计算智能研究的主要内容之一,其重要意义已被许多科学家所承认。人工神经网络的独特知识表示结构和信息处理原则,使其成为智能信息处理的主要技术之一。信号处理指的是从信号中提取出有用信息的过程,在信息工程、自动控制、电气与电子工程等学科中占据十分重要的地位,具有十分重要的作用。随着信号处理复杂度和处理要求的不断提高,对高性能处理方法的研究需求越来越迫切。人工神经网络良好的非线性特性、自适应特性、以监督或非监督方式从环境中学习的能力及广泛的全局逼近能力,使其成为解决自适应及非线性信号处理问题的一种天然工具。其良好的容错性、强大的并行实现能力及分布式信息存储和计算能力,又使其适合于解决高复杂度、大数据量信号处理问题。人工神经网络的生命力正在于其在信号处理领域的广泛应用,故对其基本原理方法及如何利用其解决信号处理问题进行系统研究十分必要。

国内现有的神经网络方面的著作或译著,大多侧重于介绍神经网络基本原理,对如何利用神经网络解决信号处理问题不够关注,或者说对这方面的关注不够系统。国防科学技术大学 ATR 实验室第二研究室长期从事多维信号智能化信息处理及人工神经网络理论与应用方面的研究工作,先后开设了“神经网络原理和应用”及“信号处理的神经网络方法”两门研究生课程。本书是在对我们的教学研究工作进行归纳、提炼、总结及扩充的基础上出版的,以期能够对普及人工神经网络理论、丰富信号处理方法做出一点贡献,并对高校人工神经网络理论和应用方面的教学有所促进。

本书的撰写遵循结构安排与学科知识体系相一致、经典学科知识推导与新兴理论成果介绍相结合的原则,具有以下特点:

(1) 内容广泛新颖: 本书除了包含 BP 网络、RBF 网络、SOFM 网络等经典内容之外,还收入了一些经实践证明有较大现实意义的新理论,如量子比特神经网络 QuNN、RSOM 树等内容。这样既能开阅读者视野和知识面,提高其深入学习的兴趣,又能为读者提供更加广泛的解决实际问题的思路和手段。

(2) 选材详略得当: 本书在选材和内容撰写上兼顾谈深说透与点到为止的平衡。对于关键网络模型进行详细分析,而对于由关键模型衍生出来

的模型进行一般性介绍。这样既有一定的理论深度,又不使读者感到拖沓冗长;既保持一定的知识面,又不显得空洞。

(3) 结构清晰合理:清晰合理的学科知识表述体系有助于读者对各种理论、技术、方法的理解、记忆和应用。本书以模块化、层次化方式组织内容,全书按照由浅入深、先易后难安排内容,各章节按照从为何设计到如何设计再到如何应用的顺序安排内容。

(4) 理论阐述严密:对基本概念和基础理论的深入了解是真正掌握学科本身知识和确立解决问题方法的基础。为使读者能够真正利用网络模型解决实际问题,本书全面深入地介绍网络模型知识,不仅讲其然,还讲其所以然。并对以神经网络解决信号处理问题的模型、一般性原则及基本思路进行了归纳总结,这有助于评估神经网络用于信号处理的性能和稳健性。

(5) 实例分析透彻:本书提供了一些神经网络在信号处理领域的应用实例,并对它们进行了透彻分析。这有助于学生深入理解神经网络理论算法及掌握神经网络模型应用方式,为解决实际问题提供参考和帮助。

本书内容共7章。第1章为绪论,概述人工神经网络的发展历史、分类和特性等,对神经网络基本模型、算法及其在信号处理领域的应用进行概括介绍。第2章介绍如何利用BP网络解决信号处理问题,内容包括BP神经元模型、BP网络结构和学习算法、BP网络在信号处理领域的应用实例。第3章介绍如何利用RBF网络解决信号处理问题,内容包括径向基神经元模型及RBF网络基本结构,高斯RBF网络结构及学习算法,概率RBF网络结构及学习算法,RBF网络在信号处理领域的应用实例。第4章介绍如何利用竞争型网络解决信号处理问题,内容包括SOFM网络结构及学习算法,RSOM树结构及学习算法,LVQ网络结构及学习算法,SOFM网络及LVQ网络在信号处理领域的应用实例。第5章介绍神经动力学基本原理及Hopfield网络,内容包括Lyapunov动力学稳定理论,基于基尔霍夫电流定律引出的Hopfield神经元,时间连续Hopfield网络结构及稳定性分析,时间离散Hopfield网络结构及稳定性分析。第6章介绍量子比特神经网络QuNN这种新兴网络模型,内容包括量子比特与量子门,量子比特神经元模型,量子比特神经网络结构及学习算法QBP。第7章分析了人工神经网络发展的制约因素,介绍了人工神经网络理论发展趋势。

本书是在我们多年积累下来的教学讲稿的基础上整理、修改、扩充而成的,初始讲稿由我的导师沈振康教授完成,在这里对沈教授表示衷心感谢,祝他老人家身体健康、阖家幸福、万事如意!国防科技大学夏胜平副教授为本书提供了RSOM树方面的资料,在此表示深深的谢意!研究生范庆明、李东洋、戚堂家、徐保勇、王佳等对本书文稿进行了文字检查、校订,也对他们的帮助表示感谢!

本书主要是为研究生编写的,但也兼顾到了其他层面的读者,适用于不同层面从事相关研究的技术人员在工作中参考。

人工神经网络是一门植根于神经学、数学、物理学、统计学、计算机科学、工程学等学科的综合性技术,其多学科交叉特性决定了要对其理论做一个系统完整的总结是一件非常困难的事情,本书只能看作是作者朝这一方向的一种努力和尝试,书中难免存在不足,诚恳地欢迎读者批评指正。

高颖慧

2012年8月于长沙

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 人工神经网络概述	3
1.2.1 人工神经元	3
1.2.2 人工神经网络分类	5
1.2.3 前向人工神经网络	7
1.2.4 竞争型人工神经网络	13
1.2.5 递归人工神经网络	17
1.2.6 量子比特神经网络	19
1.3 人工神经网络适用于信号处理	20
1.3.1 数字信号处理问题概述	20
1.3.2 人工神经网络适用于数字信号处理	21
1.3.3 应用人工神经网络解决信号处理问题示例	21
1.4 ANN 解决信号处理问题的一般思路	24
习题	25
第 2 章 基于 BP 网络的信号处理	26
2.1 引言	26
2.2 BP 学习算法	27
2.2.1 输出层神经元权值确定	27
2.2.2 隐含层神经元权值确定	29
2.2.3 权值修正过程	31
2.2.4 BP 学习算法描述	32
2.3 BP 学习算法的局限性及改进方法	33
2.3.1 BP 学习算法的局限性	33
2.3.2 BP 学习算法的改进方法	34
2.4 构建 BP 网络的关键问题	35
2.5 BP 网络的 MATLAB 实现	37

2.6	基于 BP 网络的英文字母识别	41
2.6.1	英文字母特征提取	41
2.6.2	网络结构确定	42
2.6.3	网络训练	43
2.6.4	网络构建流程	47
2.6.5	字母识别性能分析	48
习题		52
第 3 章	基于 RBF 网络的信号处理	54
3.1	函数的内插理论	55
3.1.1	近似问题的定义	55
3.1.2	函数的内插	55
3.2	径向基神经元	58
3.3	高斯 RBF 网络	59
3.3.1	高斯 RBF 网络结构	59
3.3.2	网络学习方法	60
3.3.3	RBF 网络结构确定方法	62
3.4	概率 RBF 网络	63
3.4.1	贝叶斯决策分类方法简介	63
3.4.2	概率 RBF 网络结构	64
3.4.3	基于 EM 算法的概率 RBF 网络的学习	65
3.5	RBF 网络的 MATLAB 实现	70
3.5.1	RBF 网络创建函数	70
3.5.2	RBF 网络传递函数和转换函数	72
3.6	RBF 网络应用实例	73
3.6.1	基于 RBF 网络的插值技术	73
3.6.2	基于 RBF 网络的浅滩演变预测	78
习题		82
第 4 章	基于 SOFM 网络的信号处理	83
4.1	SOFM 网络结构	84
4.1.1	SOFM 网络基本特点	84
4.1.2	网络构成	84
4.2	SOFM 网络学习算法	85
4.2.1	两阶段权值调整	86

4.2.2 算法步骤	86
4.2.3 参数选择	87
4.2.4 算法改进	90
4.3 RSOM 树	91
4.3.1 RSOM 树原理	91
4.3.2 RSOM 树的基本训练算法	92
4.4 LVQ 网络	93
4.5 SOFM 网络的 MATLAB 实现	96
4.6 SOFM 网络应用实例	98
4.6.1 基于 SOFM 的人口分类	98
4.6.2 基于 LVQ 网络的模式识别	102
习题	104
第 5 章 神经动力学基本原理及 Hopfield 网络	106
5.1 Lyapunov 动力学稳定理论	107
5.1.1 动态系统及状态空间	107
5.1.2 系统平衡状态的稳定性	108
5.1.3 Lyapunov 稳定性定理	109
5.2 Hopfield 神经元的数学模型	110
5.3 时间连续 Hopfield 网络	111
5.3.1 数学描述	111
5.3.2 稳定性分析	114
5.4 时间离散 Hopfield 网络	116
5.4.1 时间离散 Hopfield 网络结构	116
5.4.2 稳定性分析	117
5.4.3 网络工作方式	118
5.5 Hopfield 网络的应用领域	119
5.5.1 联想记忆问题	119
5.5.2 组合优化问题	120
5.6 Hopfield 网络的 MATLAB 实现	121
5.6.1 Hopfield 网络创建函数	121
5.6.2 Hopfield 网络的设计	122
习题	126

第 6 章 量子比特神经网络	127
6.1 量子比特与量子门	128
6.1.1 量子比特	128
6.1.2 量子门	129
6.2 量子比特神经元模型	130
6.3 量子比特神经网络结构	131
6.4 QBP 算法	133
习题	134
第 7 章 结束语	135
7.1 其他人工神经网络模型	135
7.2 人工神经网络发展的制约因素	137
7.3 人工神经网络发展趋势	138
7.4 神经网络书籍与期刊	138
参考文献	140

绪论

1.1 引言

生物神经网络(biological neural network, BNN), 俗称大脑, 是人类天然的高精密的信息处理系统。大脑由约 $10^{11} \sim 10^{12}$ 个生物神经元(大脑细胞)高度互连构成, 每一个神经元约有 $10^3 \sim 10^4$ 个突触。神经元间通过突触构成拓扑结构极其复杂的网络来实现记忆和思维, 进而对人体感官所获取的信息进行处理, 为人的判断和决策奠定基础。人工神经网络(artificial neural network, ANN)是对生物神经网络的某种抽象、简化和模拟, 在功能上能够反映大脑的一些基本特征, 是由大量简单处理器连接成的大规模并行计算系统, 是以神经元间的相互作用实现信息处理的信息处理系统。ANN 与 BNN 间最重要的相似点是通过学习从环境中获取知识及通过神经元间的连接来存储知识。

人工神经网络的发展经历了几个阶段: 1943 年, 心理学家 McCulloch 和数学家 Pitts 从原理上证明了人工神经元及由其构成的人工神经网络可以进行算术和逻辑运算, 从而揭开了人工神经网络研究的序幕。1949 年, Hebb 提出了 Hebb 学习机制, 进一步促进了人工神经网络的发展。20 世纪 50 年代末到 60 年代初, 随着 Rosenblatt 提出感知器模型, 人工神经网络进入了第一个发展高潮期。然而, 随着 Minsky 和 Papert 于 1969 年著书论述人工神经网络的局限性, 人工神经网络研究进入了第一个低潮期。1972 年, Kohonen 提出了 Kohonen 神经网络, 对人工神经网络研究的复兴起到了一定的促进作用, 但直到 80 年代, 伴随计算机速度的提高及信号处理方法的增多, 人工神经网络研究才进入第二个发展高潮期。在人工神经网络研究的第二个发展高潮期内出现了一系列研究成果, 如 1982 年 Hopfield 提出了 Hopfield 神经网络, 为动态神经网络理论奠定了基础; 1986 年, Rumelhart 领导的课题组提出了多层感知器网络 MLP 及 BP 学习算法, 这是人工神经网络理论进入实用的重要基础。人工神经网络的发展历程可以用图 1.1 表示。

信号是一个随时间、空间或其他变量变化的物理量, 在自然界中随处可见。如我们听到的各种声音、看到的各种精美画面、辅助诊断的各种医学图像、金融市场的价格波动及宇宙空间的各种射线等都是信号。信号中携带有信息, 对信号进行处理可以提取出信号中携带

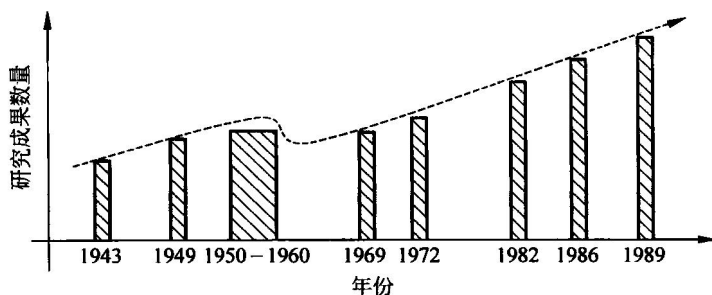


图 1.1 人工神经网络的发展历程

的有用信息。例如,通过分析医学图像,可以找到病灶,帮助医生做出正确诊断;通过分析金融市场价格波动,可以找到隐藏的经济规律,为投资理财提供参考;通过分析宇宙放射信号,可以帮助我们了解宇宙的奥秘。由于信号存在的广泛性及从信号中提取信息的重要性,信号处理在信息工程、自动控制、电气与电子工程等学科中都占据十分重要的地位,具有十分重要的作用。

随着信号处理复杂程度的不断提高和处理数据量的不断加大,对高性能信号处理方法的研究需求也越来越迫切。人工神经网络与信号处理之间关系密切,它通过对连续或离散输入状态的响应来进行信息处理。人工神经网络是以有向图为拓扑结构的动态系统,其良好的非线性特性、自适应特性、以监督或非监督方式从环境中学习的能力以及广泛的全局逼近能力,使其成为解决自适应和非线性信号处理问题的一种天然工具。而其良好的容错性、强大的并行实现能力、分布式的信息存储和计算能力,使其特别适合于解决复杂信号处理问题。人工神经网络在信号处理领域的应用十分广泛,这正是人工神经网络的生命力之所在。例如,可应用人工神经网络进行图像信号处理(包括图像压缩、图像分割、特征提取、噪声去除等)、目标检测识别和跟踪、语音识别、数据压缩等。因此,对如何利用人工神经网络解决信号处理问题进行系统深入的研究是十分必要的。

所谓“信号处理的神经网络方法”,就是站在信号处理的角度来研究人工神经网络,或者说研究如何以人工神经网络来解决信号处理问题。人工神经网络有多种构成,研究信号处理的神经网络方法需要基于特定的网络连接,并针对被研究对象的特征进行。因此,以人工神经网络来解决信号处理问题,首先需要给出描述问题的网络拓扑结构,即神经网络的连接方式和规模,然后寻求一种方法,求解网络中各个神经元之间的连接权值。基于给定的拓扑结构,得到各个神经元之间的连接权值后,就得到了针对被研究问题的神经网络模型。具体来说,研究信号处理的神经网络方法,需要关注以下几个方面的问题:

- (1) 人工神经网络基本结构、原理及其对信号处理算法和应用的影响;
- (2) 人工神经网络模型特点及其对各种信号处理问题的适用性;
- (3) 具体信号处理问题中最佳人工神经网络模型的选择问题;

(4) 以人工神经网络进行信号处理的性能评估问题。

本书综合以上4个方面来安排内容,以网络模型(如BP网络、RBF网络、SOFM网络、LVQ网络、Hopfield网络等)为基本单元来介绍人工神经网络在信号处理领域的应用,每一种网络模型主要包括以下内容。

(1) 网络模型基本原理:包括网络模型的基本结构和学习算法。

(2) 网络模型在信号处理中的应用:为了能够选出最合适的网络模型来解决信号处理问题,首先需要分析信号处理问题的形成原因;其次将信号处理问题与网络模型关联起来,包括如何从具体问题中提取出网络输入、输出及各种参数;最后设计出满足处理要求的网络,根据信号处理任务需求,研究网络模型的具体实现,如网络结构、学习算法及网络参数的选择。

1.2 人工神经网络概述

1.2.1 人工神经元

生物神经元(或神经细胞)是生物神经网络的基本组成单元,是一种可进行信息处理的特殊生物细胞,每一个神经元都包括细胞体(cell body 或 soma)、树突(dendrite)和轴突(axon)几个部分。树突是一个树状的接收纤维网络,它将许多电信号传递到细胞体。轴突是一条长纤维,它将细胞体的输出信号送到其他神经元。细胞体对许多输入信号进行整合处理。图1.2所示为典型生物神经元示意图。

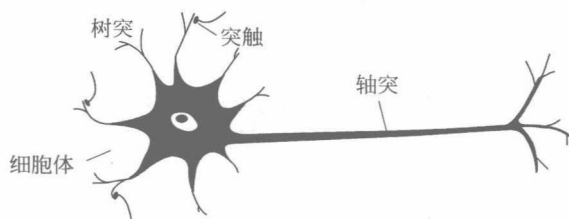


图 1.2 生物神经元

生物神经元间通过突触(synapse)相互连接。突触是轴突末端与树突进行信号传递的界面,也可以说是一个神经元的轴突与另一个神经元的树突的结合点,结合强度由复杂的化学过程决定。神经元通过突触向其他神经元发送生物信息。图1.3所示为生物神经元间通过突触互连的示意图。

与生物神经网络类似,人工神经网络的基本单元称为人工神经元。人工神经元是对生物神经元的简化和模拟。1943年,McCulloch和Pitts最早提出了一种人工神经元模型。

该模型的特点是把神经元输入信号的加权和与某一个阈值相比较,若加权和小于阈值,则该神经元的输出值为 0,否则为 1。现在常用的人工神经元模型是在 McCulloch 和 Pitts 提出的模型的基础上发展起来的,具体如图 1.4 所示。

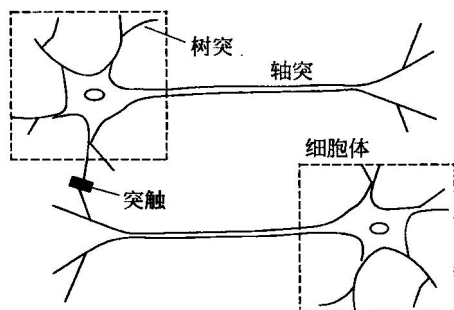


图 1.3 生物神经元间通过突触互连的示意图

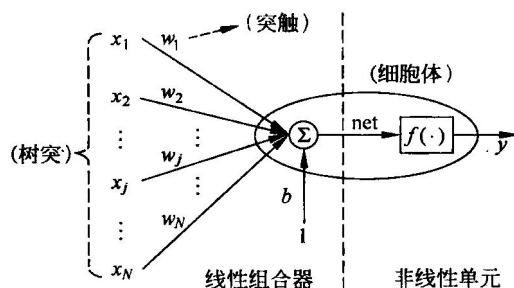


图 1.4 由生物神经元导出的人工神经元模型

其中, $(x_1, \dots, x_j, \dots, x_N)^T$ 为神经元输入信号,与生物神经元中树突相对应; $y = f(\text{net}) = f\left(\sum_{j=1}^N w_j x_j + b\right)$ 是神经元输出信号,与生物神经元中轴突相对应; $(w_1, w_2, \dots, w_N)^T$ 是神经元权值,与生物神经元中的突触相对应; $f(\cdot)$ 称为神经元传输函数,与生物神经元中细胞体的活动相对应; $\text{net} = \left(\sum_{j=1}^N w_j x_j + b\right)$ 是净输入; b 是偏置量。

由图 1.4 可以看出,人工神经元模型由一个求和函数和一个传输函数构成。传输函数是模型的重要参数,它决定了人工神经元如何对输入信号进行处理,反映了神经元的非线性特性。不同形式的传输函数对应不同的神经元非线性特性,进而导致神经网络功能的不同。常用的传输函数如表 1.1 所示。

表 1.1 常用的传输函数列表

名 称	输入/输出关系	图 标	MATLAB 函数
阈值函数	$y = \begin{cases} 0, & \text{net} < 0 \\ 1, & \text{net} \geq 0 \end{cases}$		hardlim
对称阈值函数	$y = \begin{cases} -1, & \text{net} < 0 \\ 1, & \text{net} \geq 0 \end{cases}$		hardlims
线性函数	$y = \text{net}$		purelin

续表

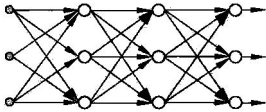
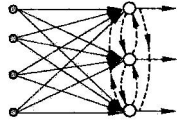
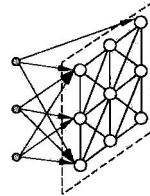
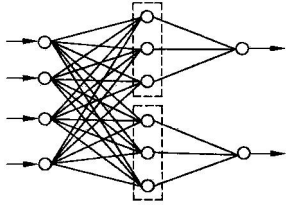
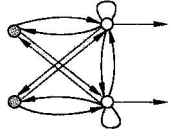
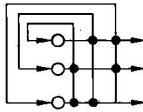
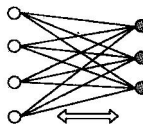
名 称	输入/输出关系	图 标	MATLAB 函数
正线性函数	$y = \begin{cases} 0, & \text{net} < 0 \\ \text{net}, & \text{net} \geq 0 \end{cases}$		poslin
饱和线性函数	$y = \begin{cases} 0, & \text{net} < 0 \\ \text{net}, & 0 \leq \text{net} \leq 1 \\ 1, & \text{net} > 1 \end{cases}$		satlin
对称饱和线性函数	$y = \begin{cases} -1, & \text{net} < -1 \\ \text{net}, & -1 \leq \text{net} \leq 1 \\ 1, & \text{net} > 1 \end{cases}$		satlins
对数 S 型函数	$y = \frac{1}{1 + e^{-\text{net}}}$		logsig
双曲正切 S 型函数	$y = \frac{e^{\text{net}} - e^{-\text{net}}}{e^{\text{net}} + e^{-\text{net}}}$		tansig
竞争函数	$y = \begin{cases} 1, & \text{net 值最大的神经元} \\ 0, & \text{其他神经元} \end{cases}$		compet

其中,由于 S 型函数严格递增,且是连续变化的单调可微分函数,具有良好的平滑特性和渐近特性,因此在人工神经网络中应用最为广泛。

1.2.2 人工神经网络分类

常用的人工神经网络模型按照不同的分类准则可以分成不同的类别。例如,按照状态可以分为静态网络和动态网络;按照训练方法可以分为有监督网络(或有教师网络)及无监督网络(或无教师网络);按照信息传递规律可以分为前向神经网络、递归/反馈神经网络、竞争型神经网络等。表 1.2 给出了基于信息传递规律的常见网络模型分类。

表 1.2 基于信息传递规律的常见网络模型分类

网络类型	网络名称	基本结构
前向神经网络	多层感知器网络 MLP	
	BP 神经网络	
	RBF 神经网络	
	量子比特神经网络	
竞争型神经网络	基本竞争型神经网络	
	SOFM 神经网络	
	LVQ 神经网络	
	ART 神经网络	
递归/反馈神经网络	Hopfield 神经网络	
	BAM 神经网络	

1.2.3 前向人工神经网络

前向人工神经网络是最常见的网络互联模式,像 MLP 网络、BP 网络、RBF 网络等都属于前向人工神经网络。前向人工神经网络中,并行操作的神经元组成的集合称为层,如图 1.5 所示。

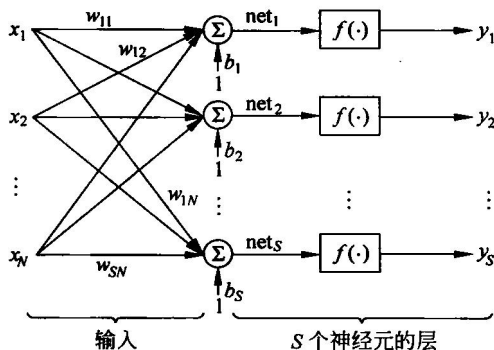


图 1.5 S 个神经元构成的神经元层

其中, N 个输入中的每一个都与所有 S 个神经元相连,所有的权值构成一个 $S \times N$ 权值矩阵 W ,具体如下式所示:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{S1} & w_{S2} & \cdots & w_{SN} \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

N 维输入向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ 通过权值矩阵 W 进入网络,得到如下式所示的输出向量 Y :

$$Y = f(WX + b) \quad (1-2)$$

前向人工神经网络具有以下特点。

(1) 层阶型网络结构。神经元分层排列,分别组成输入层、中间层(或称隐含层)和输出层,隐含层可以由若干层组成。第一层神经元与第二层所有神经元相连,第二层神经元与第三层所有神经元相连,依此类推。同一层各神经元间没有连接。

(2) 单向传播的信息流。输入信号在各层上顺序传播,每一层神经元只接受来自前一层神经元的输入,后面层对前面层没有信号反馈。

(3) 一般都为静态网络。前向网络中,神经元的输出是其输入的函数,而与其过去和将来的输出无关,因此前向网络一般都是静态神经网络。

一般遵循以下原则来设计前向网络:网络输入数与所求解问题的输入数相等;输出层神