



神经网络与模糊控制

张乃尧 阎平凡 编著



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

TP18
Z.20

414594

《自动化技术丛书》

神经网络与模糊控制

张乃尧 周平凡 编著



00414594

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

DX09/06
内 容 简 介

神经网络与模糊控制是两种重要的智能控制技术,它们都能模拟人的智能行为,解决不确定、非线性、复杂的自动化问题,具有非常广阔的应用前景。本书以智能控制的观点,对神经网络与模糊控制进行了综合论述,并分析比较了它们的共性、特性、适用范围和相互结合的途径,以使读者更全面地了解智能控制领域的最新研究成果。本书选材精炼,论述简明,介绍和分析了大量的应用实例,包括字符识别、股票预测、旅行商最优路径规划、石灰窑炉辨识、pH 值控制、化工反应器故障诊断、机械手、倒立摆、倒车等,便于读者了解各种技术的应用对象、应用方法以及应用效果。

本书可作为工科有关专业研究生和本科生、电大和业大学生以及工程技术人员的教材或自学读物。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

神经网络与模糊控制/张乃尧,阎平凡编著. —北京:清华大学出版社,1998

(自动化技术丛书)

ISBN 7-302-02962-8

I. 神… II. ①张… ②阎… III. ①神经网络-人工智能 ②模糊控制 IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 12121 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:清华园胶印厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 17 字数: 402 千字

版 次: 1998 年 10 月第 1 版 1998 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-02962-8/TP·1567

印 数: 0001~3000

定 价: 19.50 元

《自动化技术丛书》

出版说明

实施科教兴国战略,促进科技、教育与经济建设紧密结合已成为我国发展经济的重要方针。为了贯彻这一方针,我国的传统产业正面临新技术改造,产业结构正在进行调整,高新技术产业也在加快发展。其中,自动化技术发挥着十分重要的作用。为了普及新的技术,对工程技术人员以及科研人员进行继续教育及技术培训已成为一个重要的课题,编写普及自动化技术的高质量、高水平的技术书籍已成为一个紧迫的任务。为了适应这一客观需求,我们在清华大学科研与教学实践的基础上,组织编撰了一套反映当前最新技术水平的,对工程实践有较强指导意义的图书。主要读者对象为具有大专以上文化水平的工程技术人员。

该丛书选题范围包括传感技术与工业仪表,工业计算机控制,计算机集成制造系统(CIMS),人工智能和电子技术在自动化领域中的应用等方面,适于广大工程技术人员作继续教育与技术培训的教材,也可供相关专业的大学生与研究生参考。

编写与出版这套丛书是一次新的尝试,我们热忱欢迎选用本丛书的广大读者提出批评和建议。

《自动化技术丛书》编委会

1996年5月

《自动化技术丛书》编委会

主 编：李衍达

编 委：（按姓氏笔画为序）

王家桢 王桂增 杨家本 吴秋峰 张兆琪

张贤达 唐光荣 解学书 熊光楞

前 言

随着计算机及计算机网络的飞速发展和广泛应用,人们希望用计算机帮助人甚至代替人来完成更多更复杂的脑力劳动,以提高自动化水平和工作效率,这促使自动控制与人工智能两个学科交叉融合,形成了智能控制与智能化(简称为智能控制)这一新的学科。智能控制是以计算机为工具,模拟人的智能行为,研究解决信号处理、模式识别、系统辨识、故障诊断、预报、控制、指挥、优化、决策、对策等复杂任务如何实现自动化的科学技术,具有非常广阔的应用前景,是当代国际高科技竞争的重要领域之一。

神经网络与模糊控制是当前两种主要的智能控制技术,它们都能模拟人的智能行为,不需要精确的数学模型,能够解决传统自动化技术无法解决的许多复杂的、不确定性的、非线性的自动化问题,而且易于用硬件或软件来实现。神经网络与模糊控制又具有各自的特点,神经网络是模拟人脑的结构以及对信息的记忆和处理功能,擅长从输入输出数据中学习有用的知识;模糊控制则是模拟人的思维和语言中对模糊信息的表达和处理方式,擅长利用人的经验性知识。由于神经网络与模糊控制既有共性又有互补性,二者的结合引起了国内外学者的极大兴趣,成为当今智能控制领域的研究热点。本书试图从智能控制的观点将二者统一起来加以介绍,并分析比较它们的共性、特性、适用对象和相互结合的途径,以便读者更全面地了解智能控制的最新成果。

为了满足广大读者的需要,本书力求做到内容新、少而精。我们从浩如烟海的国内外文献中提炼出最主要的理论及应用成果,加以系统组织,着重讲清基本概念、基本原理和基本方法,同时介绍和分析了大量的应用实例,其中不少是作者的研究成果,以便读者了解各种技术的应用对象、应用方法和应用效果。各章还附有练习题,以便于教学或自学使用。

全书分为两大部分,第一部分是神经网络,包括第1章~第11章,第二部分是模糊控制,包括第12章~第15章。第1章是对神经网络的概述。第2章讲述多层前向网络及径向基函数网络。第3章研究多层前向网络BP学习算法的统计特性、推广能力以及样本复杂性问题,在此基础上进一步讨论了网络结构设计中的主要问题。第4章介绍反馈网络和联想存储器。第5章讨论神经网络用于优化计算。第6章是关于自组织网络,重点讲述了常用的自组织特征映射和主成份分析网络。由于在预测和控制中涉及到动态系统,第7章专门讲述了一些可描述动态系统的神经网络。第8章讨论全局优化问题,介绍了模拟生物进化的遗传算法及其应用。第9章介绍神经网络用于非线性系统辨识的方法及在石灰窑炉中的应用。第10章介绍神经网络用于非线性系统控制的几种方案,对内模控制和模型预报控制方案用实例作了详细说明。第11章介绍CMAC网络和如何用CMAC网络解决机械手的坐标变换和伺服控制问题。作为学习模糊控制的基础,第12章简要地讲述了模糊数学的基本概念、运算法则和定理。第13章详细介绍了模糊控制的原理、种类和设计方

法,并研究了模糊控制器的结构分析和基于 T-S 模型的系统化设计方法,这些都是最新的理论研究成果。第 14 章分析了神经网络与模糊系统的特点,介绍了模糊神经网络在化工生产过程故障诊断中的应用。第 15 章以倒立摆、倒车等典型例子介绍了基于神经网络的模糊自适应控制方法。

本书第 1~8 章以及第 11 章的 11.2 节由阎平凡编写,第 9~15 章由张乃尧编写。清华大学出版社为本书的编辑出版做了大量的工作,在此表示衷心的感谢。

由于作者学识和时间所限,书中难免有错漏不足之处,欢迎读者批评指正。

作 者

1998 年 2 月于清华大学

目 录

第 1 章 绪论	1	4.1 离散的 Hopfield 网络	44
1.1 神经网络的发展和应用	1	4.2 联想存储器及其学习	47
1.2 人工神经元模型	2	4.3 相关学习算法	48
1.3 用有向图表示神经网络	4	4.4 联想存储器的容量问题	49
1.4 网络结构及工作方式	5	4.5 伪逆法	51
1.5 神经网络的学习方法	6	4.6 线性规划方法	51
1.5.1 学习方式	6	4.7 多余吸引子问题	52
1.5.2 学习算法(学习规则)	6	4.8 应用举例	53
1.5.3 学习与自适应	8	4.9 双向联想存储器	56
习题	8	习题	57
参考文献	9	参考文献	58
第 2 章 前馈网络	10	第 5 章 神经网络用于优化计算	59
2.1 线性阈值单元	10	5.1 概述	59
2.2 感知器学习算法	11	5.2 连续 Hopfield 网络用于求解 TSP	61
2.3 多层前馈网络及其函数逼近能力	11	5.3 离散 Hopfield 网络用于求解 TSP	63
2.4 反向传播学习算法	12	5.4 神经网络用于求解货流问题	64
2.5 改进 BP 算法收敛速度的一些措施	17	5.5 在通信网络中的应用举例	67
2.6 径向基函数网络	18	习题	68
2.7 应用举例	23	参考文献	69
习题	28	第 6 章 自组织网络	70
参考文献	29	6.1 主成份分析	70
第 3 章 学习理论与网络结构选择	31	6.2 自组织特征映射	71
3.1 基本概念	31	6.3 向量量化	74
3.2 推广问题	32	6.4 广义学习向量量化算法	75
3.3 学习过程的统计性质	33	6.5 应用举例——指纹识别	77
3.4 函数逼近问题	34	习题	80
3.5 关于网络规模选择中的几个问题	36	参考文献	80
3.6 例题	37	第 7 章 动态信号与系统的处理	81
习题	42	7.1 引言	81
参考文献	43	7.2 带延时单元的网络	81
第 4 章 反馈网络与联想存储器	44		

7.3	时空神经元模型	84	10.2.1	监督控制	119
7.4	部分反馈网络	85	10.2.2	直接逆控制	120
7.5	学习问题	86	10.2.3	内模控制	120
7.6	应用举例	86	10.2.4	模型预报控制	121
习题		93	10.2.5	模型参考控制	122
参考文献		93	10.2.6	再励学习控制	122
第8章	全局优化	95	10.2.7	自学习控制与自适应控制	123
8.1	引言	95	10.3	内模控制及其在石灰窑炉中的应用	123
8.2	随机梯度法	95	10.3.1	内模控制系统的分析与设计	123
8.3	模拟退火算法	95	10.3.2	基于神经网络的内模控制	127
8.4	遗传算法	96	10.3.3	石灰窑炉的内模控制	129
8.5	遗传算法机理的分析	98	10.4	模型预报控制及其在 pH 值控制中的应用	132
8.6	讨论	99	10.4.1	模型预报控制的基本原理	132
8.7	应用举例	100	10.4.2	动态矩阵控制(DMC)	135
习题		104	10.4.3	pH 值的神经网络模型预报控制	137
参考文献		105	习题		142
第9章	神经网络用于非线性系统辨识	106	参考文献		143
9.1	概述	106	第11章	神经网络用于机器人控制	144
9.2	基于 NARMA 模型的辨识方法	107	11.1	机器人的控制问题	144
9.2.1	问题描述	107	11.2	CMAC 网络	145
9.2.2	NARMA 模型的参数辨识	108	11.2.1	模型结构	145
9.2.3	系统辨识的并联模式与串-并联模式	109	11.2.2	工作原理	147
9.2.4	系统辨识的仿真实验	110	11.2.3	学习算法	150
9.3	通用辨识模型和动态 BP 算法	111	11.3	用 CMAC 网络解决机械手的逆运动学问题	151
9.3.1	通用辨识模型	111	11.3.1	三关节机械手在二维平面的运动	151
9.3.2	动态 BP 算法	112	11.3.2	解决方案	152
9.4	石灰窑炉的神经网络模型	114	11.3.3	机械手的正模型 NN ₁	153
9.4.1	石灰窑炉的生产过程	114	11.3.4	机械手的逆模型 NN ₂	154
9.4.2	石灰窑的数学模型	115	11.3.5	仿真实验	155
9.4.3	石灰窑的神经网络模型	116			
习题		118			
参考文献		118			
第10章	神经网络用于非线性控制	119			
10.1	概述	119			
10.2	控制方案	119			

11.4 用CMAC网络解决机械手的逆动力学问题	158	13.4 模糊控制器的种类和设计参数 ...	194
11.4.1 二关节机械手的伺服控制	158	13.4.1 D-FC和C-FC	194
11.4.2 控制方案	158	13.4.2 PD,PI,PID型的模糊控制器	194
11.4.3 仿真实验结果	159	13.4.3 控制规则的三种类型 ...	195
11.4.4 CMAC设计参数对控制性能的影响	160	13.4.4 模糊控制器的主要设计因素	196
11.4.5 控制系统的鲁棒性和自适应能力	162	13.4.5 模糊控制的特点和理论研究问题	198
11.4.6 CMAC网络的优缺点	164	13.5 典型模糊控制器的结构分析	199
习题	164	13.5.1 概述	199
参考文献	165	13.5.2 典型模糊控制器及其设计参数	199
第12章 模糊数学基础	166	13.5.3 典型模糊控制器的结构特性	201
12.1 概述	166	13.5.4 对模糊控制器的几点认识	207
12.2 模糊集合	167	13.6 模糊控制系统的稳定性分析和设计方法	207
12.2.1 模糊集合的定义	167	13.6.1 模糊系统的T-S模型	207
12.2.2 模糊集合的表示法	168	13.6.2 模糊方块图	209
12.2.3 常用的隶属函数	169	13.6.3 稳定性分析	212
12.2.4 模糊集合的基本运算 ...	169	13.6.4 设计方法	214
12.2.5 分解定理	172	习题	215
12.2.6 扩张定理	173	参考文献	216
12.3 模糊关系	174	第14章 模糊神经网络用于非线性系统建模和故障诊断	217
12.3.1 模糊关系的定义	174	14.1 模糊系统与神经网络	217
12.3.2 模糊关系的运算	175	14.2 模糊系统的函数逼近能力	218
12.3.3 模糊关系的性质	176	14.2.1 模糊基函数	218
12.4 模糊推理	177	14.2.2 模糊系统的通用逼近性	219
12.4.1 广义前向推理和广义反向推理	177	14.3 用神经网络来构造模糊系统	221
12.4.2 模糊命题	178	14.4 用模糊神经网络辨识非线性系统	227
12.4.3 模糊蕴含	179	14.4.1 实验对象	227
12.4.4 模糊推理	181	14.4.2 结构辨识	227
习题	181	14.4.3 参数辨识	230
参考文献	183	14.5 CSTR控制系统的在线故障诊断 ...	232
第13章 模糊控制理论	184		
13.1 模糊控制器的基本结构	184		
13.2 D-FC的工作原理	186		
13.3 C-FC的工作原理	189		

14.5.1 CSTR 控制系统简介	232	15.3.1 基于模糊神经网络的 MRAC 方案	242
14.5.2 故障诊断的方案	233	15.3.2 模糊神经网络结构	243
14.5.3 故障诊断实验结果	234	15.3.3 模糊神经网络的 学习方法	244
习题	235	15.3.4 自适应学习率	246
参考文献	235	15.3.5 非线性对象的模糊自适 应控制实验	247
第 15 章 基于神经网络的模糊自 适应控制	236	15.4 采用再励学习的模糊自适应控制	252
15.1 概述	236	15.4.1 GARIC 的系统结构	252
15.2 用 DCL 算法从数据中提取 模糊规则	237	15.4.2 GARIC 的工作原理	253
15.2.1 倒车实验	237	15.4.3 GARIC 的学习方法	256
15.2.2 倒车的模糊控制	237	15.4.4 倒立摆的自适应控 制实验	257
15.2.3 DCL 学习算法	239	习题	261
15.2.4 从输入输出数据中提取 模糊规则	240	参考文献	361
15.3 基于模糊神经网络的模型参考自 适应控制	242		

第 1 章 绪 论

1.1 神经网络的发展和应用

现代的计算机有很强的计算和信息处理能力,但是它解决像模式识别、感知、评判和决策等复杂问题的能力却远不如人,特别是它只能按人事先编好的程序机械地执行,缺乏向环境学习适应环境的能力。早在本世纪初,人们就已知道人脑的工作方式与现在的计算机不同,人脑是由极大量的基本单元(称之为神经元)经过复杂的互相连接而成的一种高度复杂、非线性、并行处理的信息处理系统。单个神经元的反应速度是在毫秒级,比起计算机的基本单元——逻辑门(反应时间在 10^{-9} s 量级)慢 5~6 个数量级。由于人脑的神经元数量巨大(约为 10^{10} 个),每个神经元可与几千个其它神经元连接(总连接数约为 6×10^{13}),对有些问题的处理速度反而比计算机快得多。它的能耗约为每一运算 10^{-16} J/s(计算机为每一运算 10^{-6} J/s),由此可见其性能要比现代计算机高得多。

因此,人们自然会想到,大脑的组织结构和运行机制必有其绝妙的特点,从模仿人脑智能的角度出发,来探寻新的信息表示、存储和处理方式,设计全新的计算处理结构模型,构造一种更接近人类智能的信息处理系统来解决传统的冯·诺依曼计算机难以解决的问题,必将大大促进科学进步,并会在人类生活的各个领域引起巨大的变化,这就促使人们研究人工神经网络(Artificial Neural Networks,以下简称为 NN)系统。简言之,所谓 NN 就是为模仿人脑工作方式而设计的一种机器,它可用电子或光电元件实现,也可用软件在常规计算机上仿真。或者说 NN 是一种具有大量连接的并行分布式处理器,它具有通过学习获取知识并解决问题的能力,且知识是分布储存在连接权(对应于生物神经元的突触)中,而不是像常规计算机那样按地址存在特定的存储单元中。

尽管目前人们对大脑神经网络的结构、运行机制,甚至单个神经细胞的工作原理了解还很肤浅,但是基于生物神经系统的分布式存储、并行处理、自适应学习这些现象,已经构造出具有有一些低级智慧的人工神经网络系统。当然这种人工神经网络只是对大脑的粗略而简单的模仿,无论在功能上,还是在规模上都比真正的神经网络差得很远,但它在一些科学研究和实际工程领域中已显示了很大的威力。从 80 年代初神经网络的研究再次复苏并形成热点以来,发展非常迅速,在理论上,对它的计算能力、对任意连续映射的逼近能力、学习理论及动态网络的稳定性分析等都取得了丰硕的成果。在应用上已迅速扩展到许多重要领域,以下根据文献的介绍,列出一些主要的应用领域^{[1][2]}。

1. 模式识别与图象处理

印刷体和手写体字符识别,语音识别,签字识别,指纹识别,人脸识别,癌细胞检测,心电图和脑电图分类, RNA 和 DNA 识别,油气贮藏勘测,加速器事故检测,目标检测与识

别, 图象压缩, 图象复原等。

2. 控制与优化

化工过程控制, 机械手运动控制, 电弧炉电极控制, 半导体生产中掺杂控制, 石油精炼和食品工业中优化控制, VLSI(超大规模集成电路)布线设计等。

3. 预测与管理

股票市场预测, 有价证券管理, 借贷风险分析, 信用卡管理, 机票管理。

4. 通信

自适应均衡, 回波抵消, 路由选择, ATM 网络中的呼叫接纳识别及控制等。

其它应用如导航, 光学望远镜聚焦, 运载体轨迹控制, 电机故障检测以及多媒体技术^[3]等。

1.2 人工神经元模型

图 1.1 表示做为 NN 基本单元的神经元模型, 它有三个基本要素:

(1) 一组连接权(对应于生物神经元的突触), 连接强度由各连接上的权值表示, 权值为正表示激励, 为负表示抑制。

(2) 一个求和单元, 用于求取各输入信息的加权和(线性组合)。

(3) 一个非线性激励函数, 起非线性映射作用并限制神经元输出幅度在一定的范围之内(一般限制在 $[0, 1]$ 或 $[-1, +1]$ 之间)。

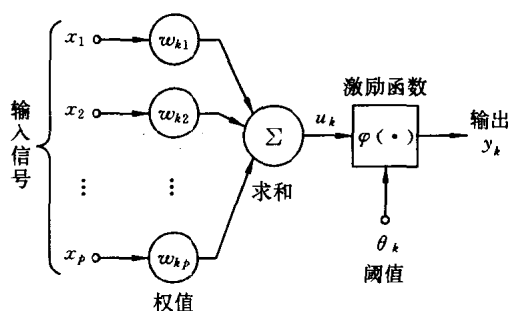


图 1.1 神经元模型

此外还有一个阈值 θ_k (或偏置 $b_k = -\theta_k$)。以上作用可以用数学式表达为

$$u_k = \sum_{j=1}^p w_{kj} x_j$$

$$v_k = u_k - \theta_k$$

$$y_k = \varphi(v_k)$$

式中 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ 为输入信号, $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kp}$ 为神经元 k 之权值, u_k 为线性组合结果, θ_k 为阈值。 $\varphi(\cdot)$ 为激励函数, y_k 为神经元 k 的输出。

可以把输入的维数增加一维, 从而把阈值 θ_k 包括进去, 如

$$v_k = \sum_{j=0}^p w_{kj} x_j$$

$$y_k = \varphi(v_k)$$

此处增加了新的连接,其输入为 $x_0 = -1(+1)$, 权值为: $w_{k0} = \theta_k(b_k)$, 如图 1.2(a), (b)所示。

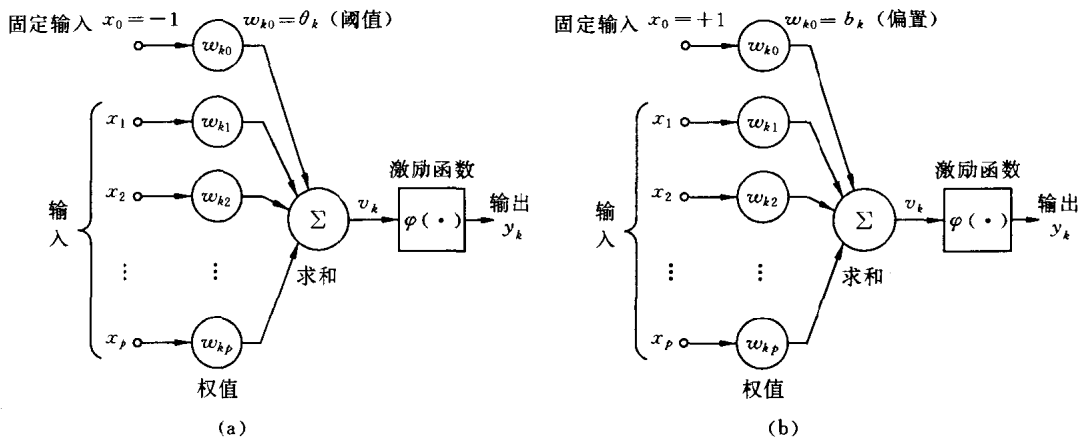


图 1.2 输入扩维后的两种神经元模型

激励函数 $\varphi(\cdot)$ 可以有如下几种形式：

(1) 阈值函数(图 1.3(a))

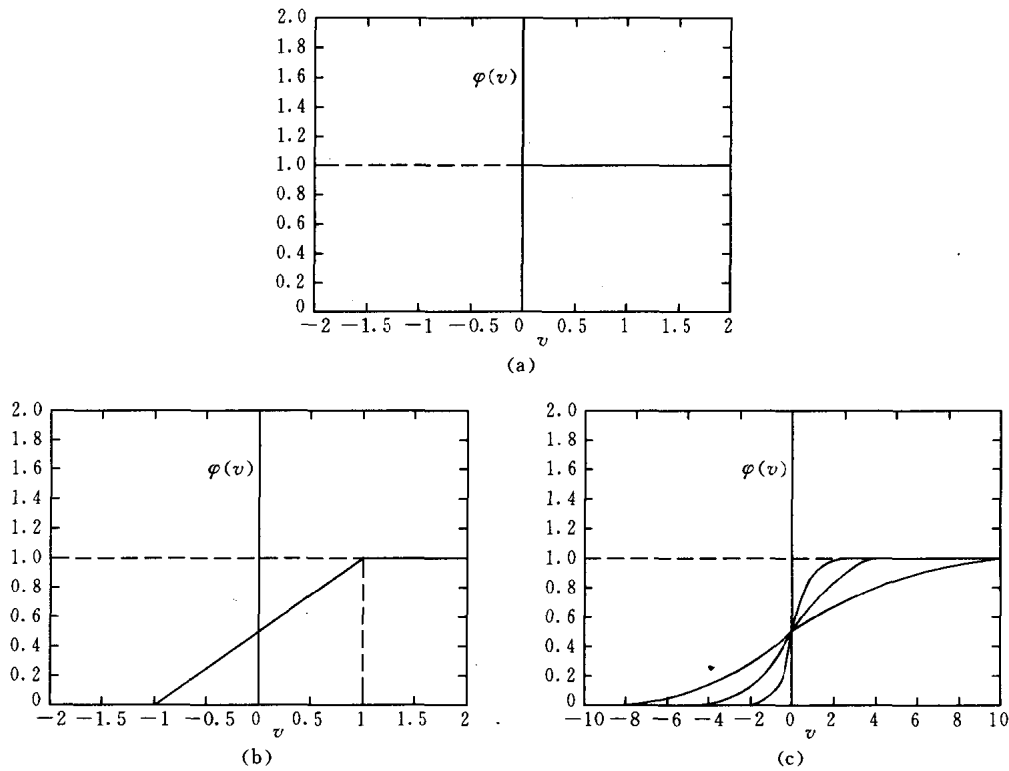


图 1.3 激励函数

(a) 阈值函数； (b) 分段线性函数； (c) Sigmoid 函数

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1, & v \geq 0 \\ 0, & v < 0 \end{cases}$$

常称此种神经元为 M-P 模型。

(2) 分段线性函数(图 1.3(b))

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1, & v \geq 1 \\ v, & -1 < v < 1 \\ 0, & v \leq -1 \end{cases}$$

它类似于一个带限幅的线性放大器,当工作于线性区时,它的放大倍数为 1。

(3) Sigmoid 函数(图 1.3(c))

具有平滑和渐近性,并保持单调性,最常用的函数形式为

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha v)}$$

参数 α 可控制其斜率。另一种常用的是双曲正切函数:

$$\varphi(v) = \tanh\left(\frac{v}{2}\right) = \frac{1 - \exp(-v)}{1 + \exp(-v)}$$

1.3 用有向图表示神经网络

如果把上一节的神经元模型用信号流图(Signal Flow Graph)表示,则可更清楚地显示其作用的过程。

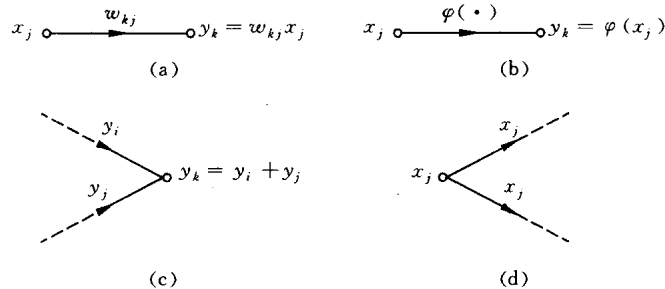


图 1.4 构造信号流图的基本单元

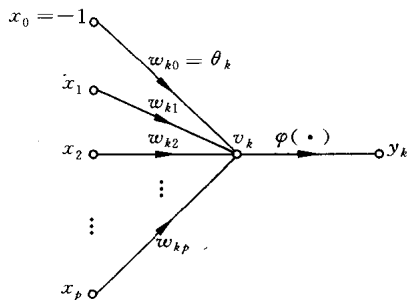


图 1.5 神经元的信号流图

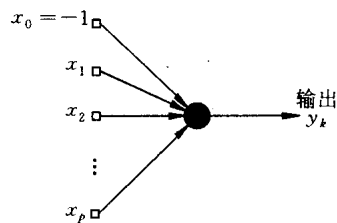


图 1.6 神经元

信号流图是由一些带方向的连接线和节点组成的,信号按连接线沿箭头方向流动。有两种连接线:突触连接(图 1.4(a))和函数连接(图 1.4(b))。节点也有两种:求和节点(图 1.4(c))和分送节点(图 1.4(d))。因此,可把神经元理解为一个带有突触连接或函数连接的节点组成的有向图,图 1.5 表示出了神经元内部的信号流动,也可以用同样的方法表示整个神经网络,当只研究各神经元之间的信号流动时,可把内部的信号流图省去,如图 1.6。

1.4 网络结构及工作方式

除单元特性外,网络的拓扑结构也是 NN 的一个重要特征,从连接方式看 NN 主要有两种。

1. 前馈型网络

各神经元接受前一层的输入,并输出给下一层,没有反馈(图 1.7)。节点分为两类,即输入单元和计算单元,每一计算单元可有任意多个输入,但只有一个输出(它可耦合到任意多个其它节点做为其输入)。前馈网络可分为不同的层,第 i 层的输入只与第 $i-1$ 层输出相连,输入和输出节点与外界相连,而其它中间层则称为隐层。

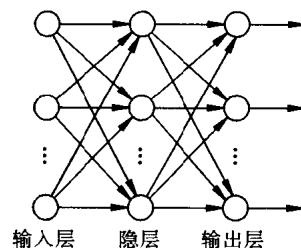


图 1.7 具有一个隐层的前馈网络

2. 反馈型网络

所有节点都是计算单元,同时也可接受输入,并向外界输出。它可画成一个无向图(图 1.8(a)),其中每个连接线都是双向的,也可画成图 1.8(b)形式,若总单元数为 n ,则每一节点有 $n-1$ 个输入和 1 个输出。

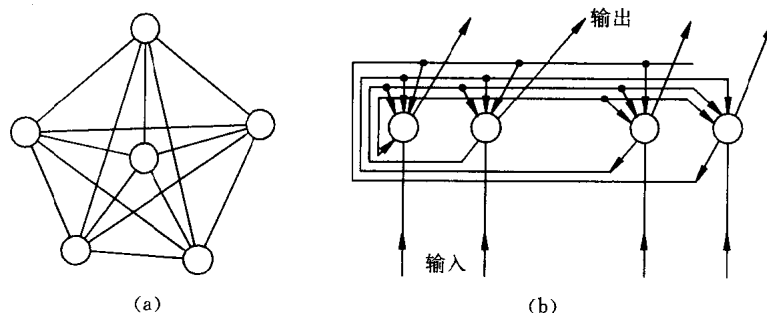


图 1.8 单层全连接反馈网络

NN 的工作过程主要分为两个阶段,一个阶段是学习期,此时各计算单元状态不变,各连线上的权值通过学习来修改。第二阶段是工作期,此时连接权固定,计算单元状态变化,以达到某种稳定状态。

从作用效果看,前馈网络主要是函数映射,可用于模式识别和函数逼近。按对能量函

数的所有极小点的利用情况,可将反馈网络分为两类:一类是能量函数的所有极小点都起作用,主要用做各种联想存储器;另一类只利用全局极小点,它主要用于求解优化问题。

1.5 神经网络的学习方法

1.5.1 学习方式

通过向环境学习获取知识并改进自身性能是NN的一个重要特点。在一般情况下,性能的改善是按某种预定的度量通过调节自身参数(如权值)随时间逐步达到的。学习方式(按环境提供信息量的多少)有三种:

1. 监督学习(有教师学习)

如图 1.9 所示,这种学习方式需要外界存在一个“教师”,他可对给定一组输入提供应有的输出结果(正确答案),这组已知的输入-输出数据称为训练样本集,学习系统(NN)可根据已知输出与实际输出之间的差值(误差信号)来调节系统参数。

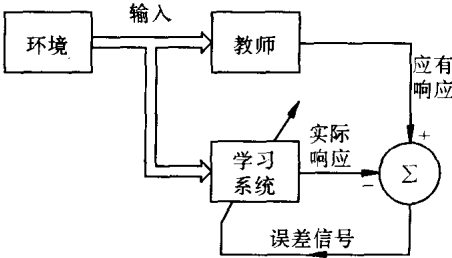


图 1.9 监督学习框图

2. 非监督学习(无教师学习)

如图 1.10 所示,非监督学习时不存在外部教师,学习系统完全按照环境提供数据的某些统计规律来调节自身参数或结构(这是一种自组织过程),以表示出外部输入的某种固有特性(如聚类或某种统计上的分布特征)。



图 1.10 非监督学习框图

3. 再励学习(强化学习)

如图 1.11 所示,这种学习介于上述两种情况之间,外部环境对系统输出结果只给出评价信息(奖或惩)而不是给出正确答案。学习系统通过强化那些受奖的动作来改善自身的性能。

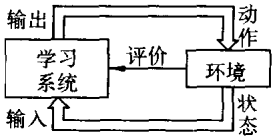


图 1.11 再励学习框图

1.5.2 学习算法(学习规则)

1. 误差纠正学习

令 $y_k(n)$ 为输入 $x_k(n)$ 时,神经元 k 在 n 时刻的实际输出, $d_k(n)$ 表示应有的输出(可由