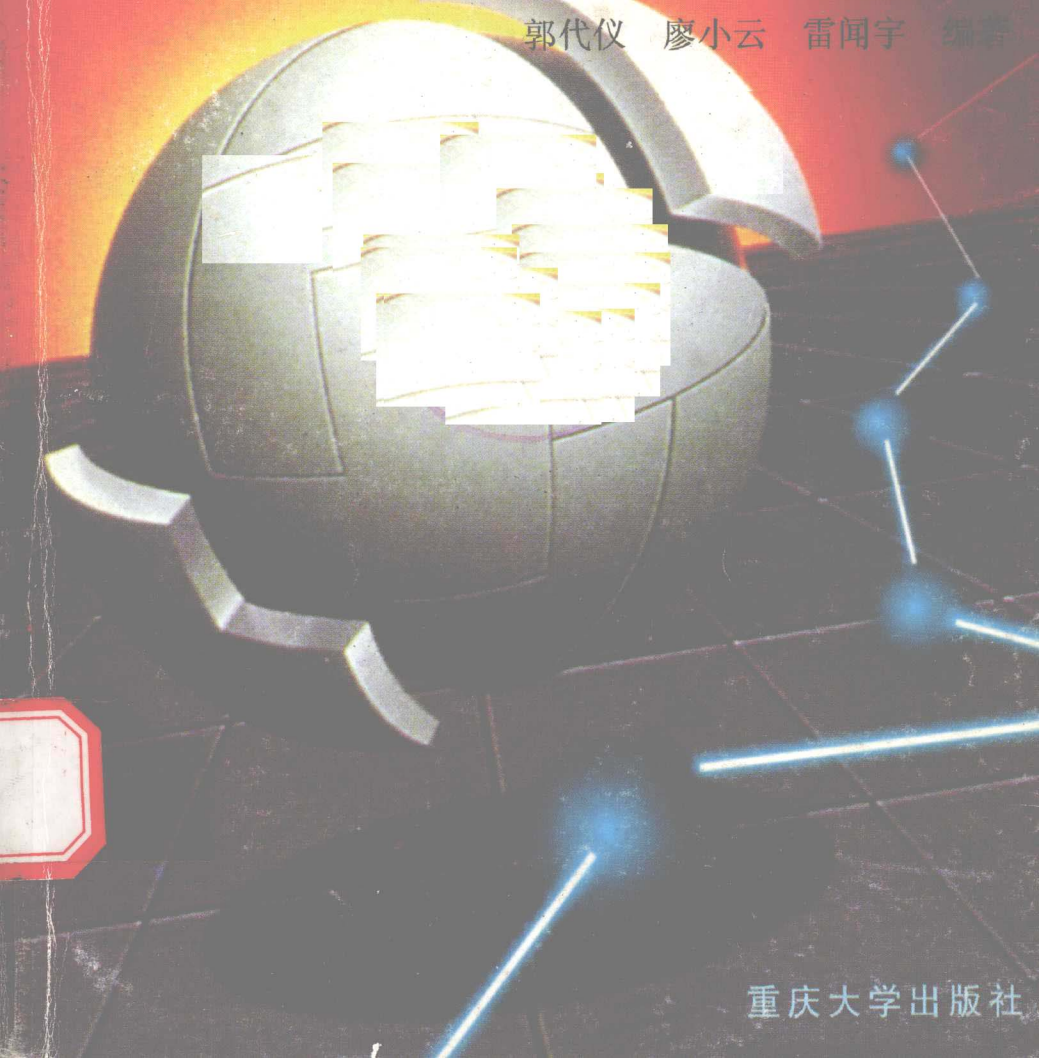


# 神经网络 及其在 机械工程中的应用

郭代仪 廖小云 雷闻宇 编著



重庆大学出版社

# 神经网络及其在机械中的应用



郭代仪 廖小云 雷闻宇 编著

重庆大学出版社

## 内 容 提 要

本书介绍了神经网络的基本理论、方法和实现技术,及其在机械工程中的应用。主要内容包括:神经网络研究内容与现状、神经网络常用模型、系统模拟实现与开发技术、神经推理、神经信息融合、神经计算、神经控制等,并结合工程实例,论述了神经网络在专家系统、故障诊断、优化设计、机械控制等方面的应用方法和实用技术。

本书可作为机械专业高年级本科生、研究生以及计算机、自动化等专业学生的教材或教学参考书,也可供从事神经网络研究和应用的广大科技工作者和工程技术人员参考。

## 神经网络及其在机械工程中的应用

郭代仪 廖小云 雷闻宇 编著

责任编辑 梁 涛

\*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆通信学院印刷厂印刷

\*

开本:850×1168 1/32 印张:4.375 字数:118千

1998年5月第1版 1998年5月第1次印刷

印数:1—1500

ISBN 7-5624-1695-8/TP·166 定价:6.00元

## 前言

近十几年来,有关神经网络的研究和应用空前活跃,受到了学术界、工程界及政府机构的高度重视。一方面是神经网络使人们对人脑的信息存储、信息处理机制的理论研究走向实际工程应用,另一方面在于神经网络将给计算机科学带来新的革命,克服传统的 Von. Neumann 机体系结构向并行分布式“神经计算机”发展。目前,神经网络的理论研究硕果累累,各种不同模型相继提出,应用研究更是遍及各门学科领域,特别是在自动控制、模式识别、图像处理、专家系统、信号处理、机械工程等领域获得了广泛应用,极大地丰富了神经网络的研究内容,推进了神经网络的发展。虽然目前由于技术和经济方面等的原因,神经网络的硬件实现很困难,对它的研究和应用只能在传统的数字计算机上模拟进行,神经计算机的优越特性不能充分反映出来,但是目前所取得的一系列研究和应用成果,足以表明神经网络十分诱人的发展前景。

神经网络的发展已使之成为一个多学科综合交叉领域。在自动控制方面,神经网络由于具有分布式并行处理信息、联想与容错、高度非线性动力特性等特点,若能与模糊理论结合,形成模糊神经控制,将会解决一大批工业过程控制问题。它是模糊控制的一个重要的发展方向,目前在机器人控制方面已有一些研究报道;在图像处理方面,神经网络应用于研究图像并行处理算法、图像压缩编码技术等,大大提高了处理速度和处理质量,已发展为一个专门的神经视觉处理学科方向。此外,神经网络用于声纳检测、语音识别等也有许多研究成果。一些综合性的神经网络研究所建立起来了,各种有关神经网络的著作、学术刊物相继问世,研究气氛非常活跃。

在机械工程领域里,神经网络的应用研究也受到了广泛重视,特别是在智能制造工程中,大量的问题值得研究和探索。目前神

神经网络的应用主要集中在机电控制、设备故障诊断、智能设计与制造、结构优化设计等方面。然而,就机械工程中的大量研究文献来看,神经网络模型主要用多层前向 BP 网络,一些复杂的更高级的神经网络模型很少用,像 Hopfield 网络、Kohonen 自组织网络等。大部分研究仅限于实验,离工程实际应用还存在相当大的差距。有关神经网络在机械工程中的应用研究报道散见于大量的刊物、文献之中,目前还未见到一本关于神经网络在机械工程中应用的著作;有鉴于此,结合我们的研究、实践,感到有必要根据机械工程自身的特点编写一本神经网络应用的书籍,以推进神经网络在机械工程中的应用。

本书由郭代仪、廖小云、雷闻宇合作编写,力求简明扼要地反映近年来神经网络在机械工程中应用研究的最新动态。全书共分八章,第一章主要介绍神经网络的特点和功能,并回顾神经网络的研究发展历史;第二章论述神经网络的有关概念,介绍神经网络的类型和学习规则;第三章介绍常用的几种神经网络模型(BP 网络、Hopfield 网络、Kohonen 网络及模糊神经网络等)的结构和功能;第四章从硬件实现和软件模拟两方面介绍神经网络的实现和应用开发技术;第五章到第八章分别结合工程研究实例介绍神经网络在机械工程中的应用方法和技术。其中,第五章探讨神经推理技术及其在智能 CAD 专家系统中的应用;第六章从神经信息融合角度介绍神经网络在设备故障诊断中的应用;第七章介绍神经优化计算原理及在机械结构优化设计中的应用;第八章介绍神经智能控制方法及其在制造过程控制中的应用。

本书在编写时,参阅摘引了许多先行者的著作和论文,在此谨表谢意。重庆大学自动化系邓仁明教授对全书进行了仔细审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,在此也一并感谢。由于神经网络发展迅速,研究内容十分丰富,编写时难于顾及全面,同时加上作者水平有限,书中难免有许多错误和不妥之处,谨请读者批评指正。

作者

1997年12月

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 前 言                         | 1  |
| 第一章 概论                      | 1  |
| § 1.1 引言                    | 1  |
| § 1.2 神经网络的特点和功能            | 2  |
| § 1.3 人工神经网络研究发展简史          | 6  |
| § 1.4 神经网络研究内容和应用前景         | 8  |
| 第二章 神经网络的基本概念               | 10 |
| § 2.1 神经元模型                 | 10 |
| § 2.2 神经网络的主要类型             | 13 |
| § 2.3 神经网络的学习规则             | 16 |
| § 2.4 神经网络系统的稳定性            | 18 |
| 第三章 神经网络基本模型                | 20 |
| § 3.1 多层前向 BP 网络            | 20 |
| § 3.1.1 BP 网络的结构            | 20 |
| § 3.1.2 BP 网络的学习算法          | 21 |
| § 3.2 Hopfield 网络           | 24 |
| § 3.2.1 Hopfield 网络的结构      | 24 |
| § 3.2.2 离散 Hopfield 网络及稳定性  | 25 |
| § 3.2.3 连续型 Hopfield 网络及稳定性 | 26 |
| § 3.3 随机型 BM 网络             | 28 |
| § 3.3.1 BM 网络的功能结构          | 28 |
| § 3.3.2 BM 网络的运行机理和学习算法     | 29 |
| § 3.4 Kohonen 自组织特征映射网络     | 31 |
| § 3.5 模糊神经网络                | 33 |
| § 3.5.1 几种基本模糊神经元           | 33 |

|            |                               |           |
|------------|-------------------------------|-----------|
| § 3.5.2    | 模糊神经网络模型 .....                | 35        |
| <b>第四章</b> | <b>神经网络系统的模拟实现和开发技术 .....</b> | <b>39</b> |
| § 4.1      | 神经网络计算机的体系结构 .....            | 39        |
| § 4.2      | 直接基于硬件的神经网络计算机实现 .....        | 41        |
| § 4.3      | 神经网络的软件实现方法 .....             | 47        |
| <b>第五章</b> | <b>神经网络专家系统构造方法及应用 .....</b>  | <b>69</b> |
| § 5.1      | 专家系统的发展与现状 .....              | 69        |
| § 5.2      | 神经网络专家系统基本原理和结构 .....         | 71        |
| § 5.2.1    | 神经网络专家系统的基本原理 .....           | 71        |
| § 5.2.2    | 神经网络专家系统的基本结构 .....           | 72        |
| § 5.3      | 知识的神经网络表示、获取及推理 .....         | 73        |
| § 5.3.1    | 知识表示的神经网络方法 .....             | 73        |
| § 5.3.2    | 神经网络系统的知识获取 .....             | 74        |
| § 5.3.3    | 神经网络系统的并行推理机制 .....           | 75        |
| § 5.4      | 神经网络专家系统混合构建模型及应用 .....       | 77        |
| § 5.4.1    | 神经网络专家系统构建模型 .....            | 77        |
| § 5.4.2    | 神经网络专家系统应用实例 .....            | 80        |
| <b>第六章</b> | <b>设备故障诊断的神经网络方法与应用 .....</b> | <b>82</b> |
| § 6.1      | 设备故障诊断技术的发展现状和趋势 .....        | 82        |
| § 6.2      | 基于神经网络的设备故障诊断模型 .....         | 85        |
| § 6.2.1    | 基于神经网络的设备故障诊断数学描述 .....       | 86        |
| § 6.2.2    | 基于前馈网络的故障诊断模型 .....           | 87        |
| § 6.2.3    | 双向联想神经网络的故障诊断模型 .....         | 88        |
| § 6.3      | 设备故障诊断神经网络系统建造过程和方法 .....     | 90        |
| <b>第七章</b> | <b>神经优化计算原理及应用 .....</b>      | <b>94</b> |
| § 7.1      | 神经优化计算的基本原理及过程 .....          | 94        |
| § 7.2      | 几种优化问题的 Hopfield 网络实现 .....   | 96        |
| § 7.2.1    | 线性规划问题的神经优化计算 .....           | 96        |
| § 7.2.2    | 一般二次神经优化方法 .....              | 99        |
| § 7.2.3    | 非线性优化问题的神经计算 .....            | 101       |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| § 7.2.4 组合优化的神经网络计算 .....             | 104        |
| § 7.3 神经网络优化计算的工程应用 .....             | 107        |
| § 7.3.1 机械结构分析与优化的神经网络法 .....         | 107        |
| § 7.3.2 生产线作业调度问题的神经网络法 .....         | 110        |
| <b>第八章 神经网络智能控制方法及其应用</b> .....       | <b>113</b> |
| § 8.1 引言 .....                        | 113        |
| § 8.2 基于神经网络的智能控制系统模型 .....           | 114        |
| § 8.3 基于 Hopfield 网络模糊实时控制系统的设计 ..... | 117        |
| § 8.4 神经网络用于工况监测与控制 .....             | 120        |
| § 8.4.1 制造过程在线控制的特点 .....             | 120        |
| § 8.4.2 基于神经网络的钻头磨损监控 .....           | 121        |
| § 8.4.3 基于人工神经网络的砂轮监控 .....           | 123        |
| § 8.4.4 用神经网络控制复杂曲面加工 .....           | 124        |
| <b>参考文献</b> .....                     | <b>127</b> |

# 第一章 概 论

## § 1.1 引 言

“人脑是如何工作的”，“人类如何从现实世界获取知识和运用知识”，“我们能否制作模仿人脑的人工神经系统”……对这一系列问题的探索，人们从医学、生理学、哲学、信息与计算机科学、认知学等各个学科领域的研究过程中，逐步发展成为一个新兴的多学科交叉的技术学科，称之为“神经网络”。对人脑功能的机理（包括信息加工、储存和搜索机制）的探索，脑科学的量化、精确化、系统化的发展，促使人们寻求新的途径，以解决目前计算机不能解决或不善于解决的大量问题，构造接近于或近似于人脑功能的新一代计算机模型，即“人工神经网络”。

人工神经网络是由大量简单的基本元件——神经元相互连接而成的自适应非线性动态系统。每个神经元的结构和功能比较简单，而大量神经元组合产生的系统行为却非常复杂。系统模型可用软件描述（数学方程、算法、程序），而最终是以硬件实现（用半导体器件、光学器件或分子器件）。

人工神经网络反映了人脑功能的若干基本特征，但是并非生物系统的逼真描述，只是某种模仿、美化和抽象。可见，人工神经网络的研究，应是神经网络研究的一个方面，但是在应用领域，常常不将它们互相区分。

与目前广泛应用的数字计算机——Von. Neumann 机相比较，人工神经网络在构成原理和功能特点等方面，更加接近人脑，它不是按给定的程序一步一步地执行运算，而是能够自身适应环

境,总结规律,完成某种运算、识别或过程控制,从而构成新一代非 Von. Neumann 计算机。

人工神经网络的应用主要在以下三个方面:信号处理与模式识别、知识处理工程与专家系统、过程控制。这些应用的共同特点是:难以用算法来描述处理的问题,存在大量的范例可供学习。实际上,自然界提供给我们的信息处理问题分为两大类型:结构性问题和非结构性问题,前者是 Von. Neumann 机善于解决的问题,后者用神经网络处理则显示突出的优点,引起了人们的巨大兴趣。

自 80 年代中期以来,世界上许多国家都掀起了神经网络研究的热潮。1985 年开始,神经网络国际学术交流会每两年召开一次,各国政府为神经网络研究投入了大量的资金和人力,出版了几种专门的学术刊物,一些协会、研究机构和风险公司纷纷成立。

当前,人工神经网络的研究内容十分广泛,如各种网络模型的构造、原理性能分析、在各个领域的应用范例、硬件实现或应用软件开发等。但是,用硬件实现神经网络的研究遇到不少困难,大量研究工作仍借助 Von. Neumann 机进行,这是目前人工神经网络研究和应用的特点。

## § 1.2 神经网络的特点和功能

人脑皮层神经元的数目在  $10^{10} \sim 10^{11}$  量级,每立方毫米内约有万个。神经元的类型有多种,它的基本结构如图 1.1 所示。

神经元由细胞体及其发出的许多突起构成,细胞体内有细胞核,突起的作用是传递信息,输入信号的若干个突起称为“树突”或“晶枝”,而作为输出端的突起只有一个,称为“轴突”,神经元的树突细末梢相互联系,形成“突触”,在突触处两神经元并未连通,它只是发生信息传递功能的作用面。突触可分为兴奋性和抑制性两类,它相应于神经元之间耦合的极性,各种神经元之间的连接强度和极性有所不同,并且可调整,基于这种特性,人脑具有存储信息的功能。

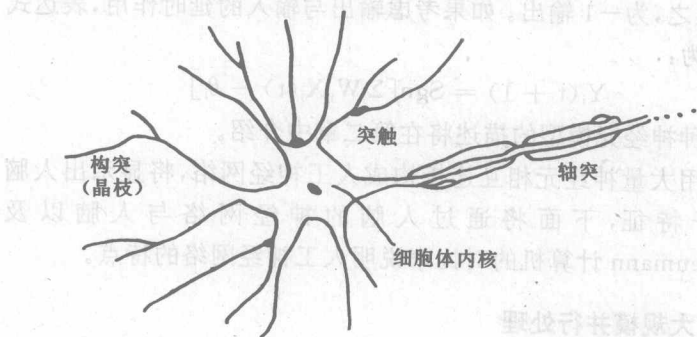


图 1.1 神经元结构示意图

对于这样一种多输入、单输出的基本单元可以进一步从生物化学、电生物学、数学等方面给出描述其功能的模型。从信息处理观点出发，为神经元构造了各种形式的数学模型。下面简要介绍经典的 McCulloch-Pitts 模型，图 1.2 给出该模型的示意结构。

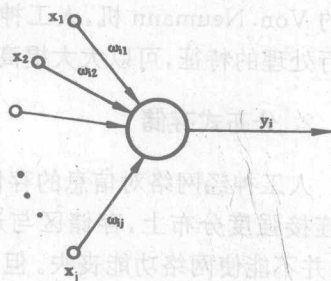


图 1.2 McCulloch-Pitts 模型结构

对于第  $i$  个神经元，接受多个其它神经元的输入信号  $X_j$ ，各突触强度以实权数  $W_{ij}$  表示，这是第  $j$  个神经元对第  $i$  个神经元作用的加权值，利用某种运算把输入信号的作用结合起来，给出它们的总效果，称为“净输入”，以  $Net_i$  或  $I_i$  表示。净输入表达式有多种类型，其中最简单的一种形式是线性加权求和，即  $Net_i = \sum W_{ij} X_j$ 。此作用引起神经元  $i$  的状态变化，而神经元  $i$  的输出  $Y_i$  是其当前状态的函数。

McCulloch-Pitts 模型的数学表达式为

$$Y_i = \text{Sgn}(\sum_j W_{ij} X_j - \theta_i)$$

式中  $\theta_i$  为阈值, Sgn 是符号函数。当净输入超过阈值时,  $Y_i$  取 +1 输出; 反之, 为 -1 输出。如果考虑输出与输入的延时作用, 表达式可修正为:

$$Y_i(t+1) = \text{Sgn}[\sum_j W_{ij} X_j(t) - \theta_i]$$

关于各种神经元模型的描述将在第二章中介绍。

利用大量神经元相互连接构成人工神经网络, 将显示出人脑的若干特征, 下面将通过人脑的神经网络与人脑以及 Von. Neumann 计算机的对比来说明人工神经网络的特点。

### 1. 大规模并行处理

人脑神经元之间传递脉冲信号的速度远低于 Von. Neumann 机的工作速度, 由于人脑是一个大规模并行与串行组合处理系统, 在许多问题上可作出快速判断、决策和处理, 其速度远高于串行结构的 Von. Neumann 机, 人工神经网络的基本结构模仿人脑, 具有并行处理的特征, 可以大大提高工作速度。

### 2. 分布式存储

人工神经网络对信息的存储是表现在网络中各种神经元之间的连接强度分布上, 存储区与运算区合为一体, 局部的损伤和破坏, 并不能使网络功能丧失。但 Von. Neumann 机具有独立的存储器和运算器, 知识存储与数据运算互不相关, 信息的沟通依赖于编程者的指令。元件的局部损伤或程序中的微小错误都可能引起严重失常。

### 3. 自适应学习

人脑有很强的自适应学习和自组织特征, 后天的学习与训练, 可以开发许多各具特色的活动功能。Von. Neumann 机强调程序编写, 系统功能取决于程序给出的知识和能力, 对智能活动要编制相应的程序则十分困难。

人工神经网络是模拟人脑的人工系统, 也具有初步的自适应与

自组织能力,在学习或训练过程中,改变突触权重  $W_{ij}$  值,以适应周围环境的要求,同一网络因学习方式及内容不同可有不同的功能,人工神经网络具有学习功能,可以发展知识,以至超过设计者原有的知识水平。它的学习或训练有两种方式,一种是有导师的学习,另一种是无导师学习,具体内容将在 § 2.3 中给予详细介绍。

人工神经网络具有上述种种特征,人们利用这些特征,通过构造各类网络,以实现某种特定的目的。一般来说,人工神经网络实现的功能主要有:

### 1. 联想记忆 (associative memory, 简称 AM)

假设有  $M$  个样本矢量  $X(s)$ , 其中  $S=0, 1, 2, 3, \dots, M-1$ 。若输入  $X'=X(s_1)+\Delta$ ,  $X(s_1)$  表示第  $s_1$  个样本,  $\Delta$  是由于噪声、干扰或图形缺损等因素引起的偏差,要求输出  $Y=X(s_1)$ , 也即去除偏差使信号按样本复原。系统具有的这种功能称之为“联想记忆”, 联想记忆可划分为“自联想”(Auto-AM)与“异联想”(Hetero-AM)两种类型。自联想功能如上所述,异联想功能涉及两组样本,若样本  $X(s)$  与样本  $Z(s)$  一一对应,当具有偏差的输入信号为  $X'=X(s_1)+\Delta$  时,输出  $Y=Z(s)$ , 此功能称为异联想。

### 2. 分类 (Classifier)

假定系统输入  $X$  有  $M$  类样本, 样本元素为  $N$ , 输出  $Y_k$  相应于  $M$  类样本之一,  $k=0, 1, 2, \dots, M-1$ 。  $X$  与  $Y$  的关系如图 1.3 所示。

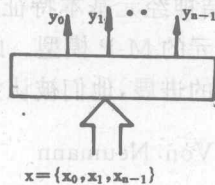


图 1.3 分类器

对于  $X \in R_j$ , 则

$$\begin{aligned} Y_k &= 1 & k &= j \\ &= 0 & k &\neq j \end{aligned}$$

此关系式表明,当输入样本与标准样本匹配即可归类,系统完成分类功能。

### 3. 优化计算或优化决策

将优化约束信息(与目标函数有关)存储于神经网络的连接矩阵  $W$  之中,网络的工作状态以动态系统方程式描述。设置一组随机数据作为起始条件,当系统的状态趋于稳定时,网络方程之解作为输出,即优化结果。

在机械工程方面的应用,就是利用上述人工神经网络可实现的功能,分别用于故障诊断、过程控制、优化设计等。

## § 1.3 人工神经网络研究发展的简史

人工神经网络早期的研究工作应追述到本世纪 40 年代,下面以时间为顺序,以著名人物或某一方面突出的研究成果为线索,简要介绍其发展历史。

### 1. McCulloch 和 Pitts

1943 年,心理学家 W. McCulloch 和数理逻辑学家 Pitts 在分析、总结神经元基本特征的基础上,首先提出神经元的数学模型,即神经元的 M-P 模型。此模型沿用至今,并且直接影响着这一领域研究的进展,他们被认为是人工神经网络研究的先驱。

### 2. Von. Neumann

John Von. Neumann 领导的设计小组于 1945 年试制成功能存储程序的电子计算机,1948 年,他研究并提出了以简单神经元构成的自再生自动机网络结构,但他未深入下去,而是继续投入指令存储式计算机技术研究,取得巨大贡献。Von. Neumann 也是人工神经网络研究的先驱之一。

### 3. 感知机

50 年代末期, F. Rosenblat 首次把人工神经网络研究从理论探讨付诸工程实践, 设计制作了“感知机”(perceptron)模型, 它是一种多层的神经网络, 是一种很有用的网络模型。但当时数字计算机处于全盛发展时期, 对它的重视不够, 甚至于怀疑神经网络的功能和作用, 以至于 60 年代末期对神经网络研究兴趣处于低潮。

### 4. Widrow

60 年代末期, Widrow 提出了自适应线性元件网络, 称为 Adaline (adaptive line element)。它是一种连续取值的线性加权技术和阈值网络, 后来发展成非线性多层自适应网络。

### 5. Hopfield

美国物理学家 Hopfield 于 1982 年和 1984 年在美国科学院院刊上发表了两篇关于神经网络研究的论文, 引起了巨大反响, 再次掀起了 80 年代中期人工神经网络的研究热潮。他根据网络的非线性微分方程, 引用能量函数, 使神经网络的平衡稳定状态有了明确的判定方法, 并用模拟电路的基本元件构成人工神经网络的硬件原理模型, 同时将此用于求解数字机不善于解决的典型问题, 如“旅行商最优路径”(TSP)问题, 取得令人满意结果。这些工作, 使人们重新认识到神经网络的威力以及工程实际的可行性。

### 6. 多层网络反向传播算法

1986 年, Rumelhart 和 McClelland 提出了多层网络的“逆推”或称“反传”(back propagation)学习算法, 称为 BP 算法。该算法从后向前修正多层之间的连接权重, 可以求解感知机所不能求解的问题, 从实践上证实了人工神经网络具有很强的运算能力, 从而否定了人们的错误看法, 打消了人们的疑虑。BP 算法是目前最为引人注目的、应用最广泛的神经网络算法之一。

除此之外,不少学者也为神经网络的发展作出了重要贡献,如 Hinton 等人的波耳兹曼机(Boltzmann machine)、Grossberg 等的自适应谐振理论(ART),以及 Kohonen 的自组织特征映射模型。这些工作至今仍是人们研究的热点。

## 7. 硬件制作与应用

人工神经网络的硬件实现非常困难,但人们仍在不断地研究,试图取得突破。实现的途径可以借助半导体器件、光学元件或分子器件。目前,大量的工作集中于 VLSI 制作,用 CMOS 工艺、数模混合系统或全数字系统实现。虽然在单片上可集成数百个神经元没有困难,但与神经网络的实际应用要求还有很大差距。在 Von . Neumann 机中,接入神经网络加速板的研究获得广泛应用,它不但为研究工作提供了方便,而且便于各种算法早日得到工程检验和应用。目前这方面的开发空前活跃。具体内容将在第四章中作介绍。

## § 1.4 神经网络的研究内容和应用前景

神经网络的研究内容十分广泛,反映出多学科综合交叉技术领域的特点。目前,主要的研究工作集中在如下几个方面:

1)生物原形研究:主要从生物科学方面研究神经细胞、神经网络、神经系统的生物原形结构及其功能机理。

2)理论模型:根据生物原形的研究,建立神经元、神经网络的理论模型,用于神经网络功能和结构分析,可以是定性的、定量的,静态的、动态的,微观的、宏观的。

3)技术模型研究:在理论模型研究的基础上,构造具体的神经网络模型,以实现计算机模拟或硬件制作,包括网络学习算法的研究。

4)应用系统与具体实现研究:在技术模型研究的基础上,利用人工神经网络组成实际的应用系统,如各种信号处理、模式识别、构造专家系统、非线性系统建模与分析等。

人工神经网络的研究内容目前大量的工作在于技术模型的研究与实际应用系统两方面,包括各种适用网络模型的构造和大量有效的算法等。

迄今为止,在人工神经网络研究领域中,有代表性的网络模型已达数十种,而学习算法的类型更难以统计其数。但归纳起来,主要有三类:其一是物理模型,如 Hopfield 网络和 Boltzmann 机;其二是前向网络模型;第三是自组织模型,如 ART 和 Kohonen 自组织特征模型等。

人工神经网络的研究涉及相当广泛的应用数学工具,包括线性代数、集合论、微分与差分方程、状态空间、数值分析,以及非线性动态系统稳定性理论、概率统计、随机过程、优化理论、非线性规划、自适应控制和信息论等。从研究方法上,目前还未形成统一、完整的理论体系,各种网络模型和算法大量依赖于具体系统,还依赖于计算机模拟的实验结果。此外,硬件制作方面未取得明显的突破。虽然如此,神经网络的大量应用成果,显示出它无比广阔的应用前景,特别是神经网络和传统人工智能技术的有机结合更显示强大的处理功能,在当前的智能工程研究领域空前发展。

在机械工程领域,与其他应用领域一样,也是神经网络的用武之地。目前,在机械工程的各个方面,利用神经网络获得大量的成果,显示出十分诱人的应用前景。但总的来说,神经网络在机械工程领域中的开发和应用,仍处于初步阶段,主要表现是:(1)网络模型研究和应用单一化。目前在应用中,用得最广泛、最有效的是 BP 网络,而 Hopfield 网络等应用较少。(2)研究深度上不够,应用还停留在某些经验关系的拟合上,未发挥网络的根本特性,而且局部性强,难以从整体上推广。(3)离工业实际应用距离还远,大部分工作还处于实验阶段,除工况监测、故障诊断等方面外,神经网络的工程应用效益未得到很好体现。因此,在今后的研究中,应充分注意非 BP 网络模型的研究和应用、制造过程实时控制、各网络模型综合和相关软硬件的开发和实现。总之,随着人工神经网络的研究和应用进展,人工神经网络在机械工程中的应用将越来越广泛、深入。