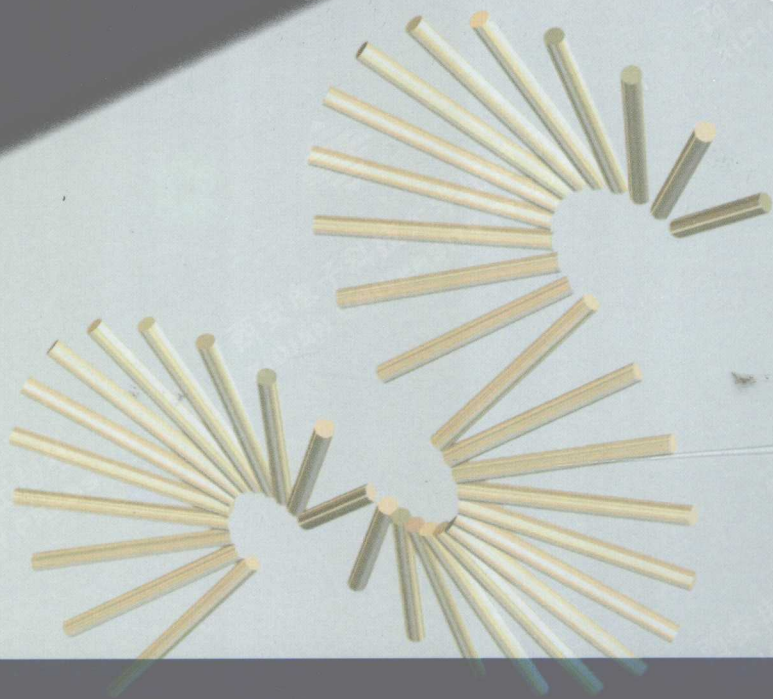




普通高等学校教材



# 神经网络控制

■ 喻宗泉 喻 晗 编著



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

普通高等学校教材

# 神经网络控制

喻宗泉 喻 晗 编著

西安电子科技大学出版社

2009

## 内 容 简 介

本书介绍了神经网络控制的基本理论与控制方法。全书共分8章,主要包括神经网络和自动控制的基础知识、神经计算基础、神经网络模型、神经控制中的系统辨识、人工神经元控制系统、神经控制系统、模糊神经控制系统和神经控制中的遗传进化训练等内容。

本书可作为高等工科院校工业自动化、计算机科学与技术、检测技术与仪器、电子信息、自动控制、电子信息工程等专业高年级学生、研究生教材或参考书,也可供专业技术人员、技术管理人员或科技人员参考。

★ 本书备有电子教案,免费为教师提供,需要者请向出版社索取。

## 图书在版编目(CIP)数据

神经网络控制/喻宗泉,喻晗编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2009.1  
普通高等学校教材

ISBN 978-7-5606-2150-0

I. 神… II. ①喻… ②喻… III. 神经网络—自动控制—高等学校—教材 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 187121 号

策 划 云立实

责任编辑 杨 璠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮件 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 17

字 数 397千字

印 数 1~4000册

定 价 24.00元

ISBN 978-7-5606-2150-0/TP·1096

**XDUP 2442001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

# 前 言

1996 年 10 月,中国神经网络委员会在成都召开了“1996 年中国神经网络学术大会”,支持并积极参与的有全国十五个一级学会的专家学者。这十五个一级学会是:

|          |         |            |
|----------|---------|------------|
| 中国电子学会   | 中国自动化学会 | 中国通信学会     |
| 中国电机学会   | 中国光学学会  | 中华医学会      |
| 中国生物物理学会 | 中国运筹学会  | 中国人工智能学会   |
| 中国计算机学会  | 中国电工学会  | 中国物理学会     |
| 中国数学学会   | 中国心理学会  | 中国生物医学工程学会 |

今天,“中国神经网络学术大会”已发展成为一年一度的重要学术会议,受到越来越多的我国一级学会及不同领域专家的关注。神经网络是当代信息科技的热点,在自身不断发展时,受到如此众多学科的青睐,不是一件偶然的事。

神经网络与不同学科结合形成交叉,是历史发展的必然。神经控制就是人工神经网络与自动控制交叉的产物,是 20 世纪 80 年代兴起的自控领域前沿学科。而模糊神经控制则是神经网络、自动控制、模糊集理论三者的结合。

神经控制有机地融合了生物神经网络的研究方法(分析法、重构法、计算机理论法)、人工神经网络的研究方法(以满意为输出准则,以学习与训练连接权值为主要内容)、现代控制理论的基本任务(最优控制、最优估计、随机最优控制、动态系统辨识、适应控制)、模糊控制(模糊化及模糊推理)和生物进化计算(遗传算法)等相关内容。神经控制运用智能控制的研究方法,为求解复杂、非线性、时变、部分未知系统的控制及其稳定性分析提供了一个全新的手段。在神经控制系统中,神经网络用作控制器、辨识器。

本书围绕神经网络的运用展开论述,共分 8 章。为了便于组织教学与自学,本书在章节上合理编排,各章节层次清晰,既有利于教学,又便于自学,习题与思考题有利于及时巩固所学内容。

本书文字流畅、通俗易懂,特别适合于自学。

本书由喻宗泉、喻晗编写,第 1、2、3 章由喻晗编写,其余由喻宗泉编写。书稿录入由丁霄霞完成,全书由喻宗泉统稿。云立实老师和杨璠老师为本书的出版作了大量工作,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中疏漏之处在所难免,诚请读者批评指正。

作 者

2009 年 1 月

# 目 录

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| 第 1 章 神经网络和自动控制的基础知识 .....                   | 1  |
| 1.1 人工神经网络的发展史 .....                         | 1  |
| 1.1.1 20 世纪 40 年代——神经元模型的诞生 .....            | 1  |
| 1.1.2 20 世纪 50 年代——从单神经元到单层网络, 形成第一次热潮 ..... | 2  |
| 1.1.3 20 世纪 60 年代——学习多样化和 AN2 的急剧冷落 .....    | 2  |
| 1.1.4 20 世纪 70 年代——在低迷中顽强地发展 .....           | 2  |
| 1.1.5 20 世纪 80 年代——AN2 研究热潮再度兴起 .....        | 3  |
| 1.1.6 20 世纪 90 年代——再现热潮, 产生许多边缘交叉学科 .....    | 3  |
| 1.1.7 进入 21 世纪——实现机器智能的道路漫长而又艰难 .....        | 4  |
| 1.2 生物神经元和人工神经元 .....                        | 5  |
| 1.2.1 生物神经元 .....                            | 5  |
| 1.2.2 人工神经元 .....                            | 9  |
| 1.3 生物神经网络和人工神经网络 .....                      | 12 |
| 1.3.1 生物神经网络 .....                           | 12 |
| 1.3.2 人工神经网络 .....                           | 14 |
| 1.4 自动控制的发展史 .....                           | 18 |
| 1.4.1 从传统控制理论到智能控制 .....                     | 18 |
| 1.4.2 智能控制的产生与基本特征 .....                     | 19 |
| 1.4.3 智能控制系统 .....                           | 21 |
| 1.5 模糊集与模糊控制概述 .....                         | 23 |
| 1.5.1 模糊集 .....                              | 23 |
| 1.5.2 模糊隶属函数 .....                           | 26 |
| 1.5.3 模糊控制 .....                             | 27 |
| 1.6 从生物神经控制到人工神经控制 .....                     | 30 |
| 1.6.1 生物神经控制的智能特征 .....                      | 30 |
| 1.6.2 人工神经控制的模拟范围 .....                      | 32 |
| 1.7 小结 .....                                 | 33 |
| 习题与思考题 .....                                 | 33 |
| 第 2 章 神经计算基础 .....                           | 34 |
| 2.1 线性空间与范数 .....                            | 34 |
| 2.1.1 矢量空间 .....                             | 34 |
| 2.1.2 范数 .....                               | 35 |
| 2.1.3 赋范线性空间 .....                           | 35 |
| 2.1.4 $L_1$ 范数和 $L_2$ 范数 .....               | 35 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 2.2 迭代算法 .....                | 35 |
| 2.2.1 迭代算法的终止准则 .....         | 35 |
| 2.2.2 梯度下降法 .....             | 36 |
| 2.2.3 最优步长选择 .....            | 37 |
| 2.3 逼近论 .....                 | 38 |
| 2.3.1 Banach 空间和逼近的定义 .....   | 38 |
| 2.3.2 $L_2$ 逼近和最优一致逼近 .....   | 38 |
| 2.3.3 离散点集上的最小二乘逼近 .....      | 39 |
| 2.4 神经网络在线迭代学习算法 .....        | 39 |
| 2.5 Z 变换 .....                | 41 |
| 2.5.1 Z 变换的定义和求取 .....        | 41 |
| 2.5.2 Z 变换的性质 .....           | 43 |
| 2.5.3 Z 反变换 .....             | 43 |
| 2.6 李雅普诺夫意义下的稳定性 .....        | 44 |
| 2.6.1 非线性时变系统的稳定性问题 .....     | 44 |
| 2.6.2 李雅普诺夫意义下的渐进稳定 .....     | 45 |
| 2.6.3 李雅普诺夫第二法 .....          | 45 |
| 2.6.4 非线性系统的稳定性分析 .....       | 47 |
| 2.7 小结 .....                  | 47 |
| 习题与思考题 .....                  | 48 |
| <b>第 3 章 神经网络模型</b> .....     | 49 |
| 3.1 人工神经网络建模 .....            | 49 |
| 3.1.1 MP 模型 .....             | 49 |
| 3.1.2 Hebb 学习法则 .....         | 50 |
| 3.2 感知器 .....                 | 53 |
| 3.2.1 单层感知器 .....             | 53 |
| 3.2.2 多层感知器 .....             | 57 |
| 3.3 BP 网络与 BP 算法 .....        | 59 |
| 3.3.1 BP 网络的基本结构 .....        | 60 |
| 3.3.2 BP 算法及步长调整 .....        | 60 |
| 3.4 自适应线性神经网络 .....           | 64 |
| 3.5 自组织竞争型神经网络 .....          | 65 |
| 3.5.1 自组织竞争型神经网络的基本结构 .....   | 65 |
| 3.5.2 自组织竞争型神经网络的学习算法 .....   | 65 |
| 3.6 小脑模型神经网络 .....            | 68 |
| 3.6.1 CMAC 的基本结构 .....        | 68 |
| 3.6.2 CMAC 的工作原理 .....        | 70 |
| 3.6.3 CMAC 的学习算法与训练 .....     | 72 |
| 3.7 递归型神经网络 .....             | 74 |
| 3.7.1 DTRNN 的网络结构 .....       | 74 |
| 3.7.2 实时递归学习算法 .....          | 76 |
| 3.8 霍普菲尔德(Hopfield)神经网络 ..... | 77 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 3.8.1 离散型 Hopfield 神经网络 .....      | 78         |
| 3.8.2 连续型 Hopfield 神经网络 .....      | 82         |
| 3.8.3 求解 TSP 问题 .....              | 85         |
| 3.9 小结 .....                       | 89         |
| 习题与思考题 .....                       | 89         |
| <b>第 4 章 神经控制中的系统辨识 .....</b>      | <b>90</b>  |
| 4.1 系统辨识基本原理 .....                 | 90         |
| 4.1.1 辨识系统的基本结构 .....              | 90         |
| 4.1.2 辨识模型 .....                   | 91         |
| 4.1.3 辨识系统的输入和输出 .....             | 92         |
| 4.2 系统辨识过程中神经网络的作用 .....           | 92         |
| 4.2.1 神经网络辨识原理 .....               | 92         |
| 4.2.2 多层前向网络的辨识能力 .....            | 94         |
| 4.2.3 辨识系统中的非线性模型 .....            | 99         |
| 4.3 非线性动态系统辨识 .....                | 100        |
| 4.3.1 非线性动态系统的神经网络辨识 .....         | 101        |
| 4.3.2 单输入单输出非线性动态系统的 BP 网络辨识 ..... | 101        |
| 4.4 多层前向网络辨识中的快速算法 .....           | 107        |
| 4.5 非线性模型的预报误差神经网络辨识 .....         | 110        |
| 4.5.1 非动态模型建模 .....                | 110        |
| 4.5.2 递推预报误差算法 .....               | 111        |
| 4.6 非线性系统逆模型的神经网络辨识 .....          | 114        |
| 4.6.1 系统分析逆过程的存在性 .....            | 115        |
| 4.6.2 非线性系统的逆模型 .....              | 116        |
| 4.6.3 基于多层感知器的逆模型辨识 .....          | 119        |
| 4.7 线性连续动态系统辨识的参数估计 .....          | 125        |
| 4.7.1 Hopfield 网络用于辨识 .....        | 126        |
| 4.7.2 Hopfield 网络辨识原理 .....        | 126        |
| 4.8 利用神经网络联想功能的辨识系统 .....          | 130        |
| 4.8.1 二阶系统的性能指标 .....              | 130        |
| 4.8.2 系统辨识器基本结构 .....              | 131        |
| 4.8.3 训练与辨识操作 .....                | 132        |
| 4.9 小结 .....                       | 133        |
| 习题与思考题 .....                       | 134        |
| <b>第 5 章 人工神经元控制系统 .....</b>       | <b>135</b> |
| 5.1 人工神经元的 PID 调节功能 .....          | 135        |
| 5.1.1 人工神经元 PID 动态结构 .....         | 135        |
| 5.1.2 人工神经元闭环系统动态结构 .....          | 136        |
| 5.2 人工神经元 PID 调节器 .....            | 136        |
| 5.2.1 比例调节元 .....                  | 136        |
| 5.2.2 积分调节元 .....                  | 137        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 5.2.3 微分调节元 .....             | 137        |
| 5.3 人工神经元闭环调节系统 .....         | 138        |
| 5.3.1 系统描述 .....              | 138        |
| 5.3.2 Lyapunov 稳定性分析 .....    | 139        |
| 5.4 人工神经元自适应控制系统 .....        | 139        |
| 5.4.1 人工神经元自适应控制系统的基本结构 ..... | 140        |
| 5.4.2 人工神经元自适应控制系统的学习算法 ..... | 140        |
| 5.5 人工神经元控制系统的稳定性 .....       | 144        |
| 5.6 小结 .....                  | 146        |
| 习题与思考题 .....                  | 146        |
| <b>第 6 章 神经控制系统</b> .....     | <b>147</b> |
| 6.1 神经控制系统概述 .....            | 147        |
| 6.1.1 神经控制系统的基本结构 .....       | 147        |
| 6.1.2 神经网络在神经控制系统中的作用 .....   | 148        |
| 6.2 神经控制器的设计方法 .....          | 148        |
| 6.2.1 模型参考自适应方法 .....         | 149        |
| 6.2.2 自校正方法 .....             | 149        |
| 6.2.3 内模方法 .....              | 150        |
| 6.2.4 常规控制方法 .....            | 150        |
| 6.2.5 神经网络智能方法 .....          | 152        |
| 6.2.6 神经网络优化设计方法 .....        | 152        |
| 6.3 神经辨识器的设计方法 .....          | 153        |
| 6.4 PID 神经控制系统 .....          | 153        |
| 6.4.1 PID 神经控制系统框图 .....      | 154        |
| 6.4.2 PID 神经调节器的参数整定 .....    | 155        |
| 6.5 模型参考自适应神经控制系统 .....       | 156        |
| 6.5.1 两种不同的自适应控制方式 .....      | 156        |
| 6.5.2 间接设计模型参考自适应神经控制系统 ..... | 157        |
| 6.5.3 直接设计模型参考自适应神经控制系统 ..... | 160        |
| 6.6 预测神经控制系统 .....            | 164        |
| 6.6.1 预测控制的基本特征 .....         | 165        |
| 6.6.2 神经网络预测算法 .....          | 166        |
| 6.6.3 单神经元预测器 .....           | 166        |
| 6.6.4 多层前向网络预测器 .....         | 168        |
| 6.6.5 辐射基函数网络预测器 .....        | 170        |
| 6.6.6 Hopfield 网络预测器 .....    | 170        |
| 6.7 自校正神经控制系统 .....           | 172        |
| 6.7.1 自校正神经控制系统的基本结构 .....    | 172        |
| 6.7.2 神经自校正控制算法 .....         | 173        |
| 6.7.3 神经网络逼近 .....            | 175        |
| 6.8 内模神经控制系统 .....            | 179        |
| 6.8.1 线性内模控制方式 .....          | 179        |

|              |                              |            |
|--------------|------------------------------|------------|
| 6.8.2        | 内模控制系统                       | 181        |
| 6.8.3        | 内模神经控制器                      | 185        |
| 6.8.4        | 神经网络内部模型                     | 187        |
| 6.9          | 小脑模型神经控制系统                   | 188        |
| 6.9.1        | CMAC 控制系统的基本结构               | 188        |
| 6.9.2        | CMAC 控制器设计                   | 192        |
| 6.9.3        | CMAC 控制系统实例                  | 197        |
| 6.10         | 小结                           | 202        |
|              | 习题与思考题                       | 202        |
| <b>第 7 章</b> | <b>模糊神经控制系统</b>              | <b>203</b> |
| 7.1          | 模糊控制与神经网络的结合                 | 203        |
| 7.1.1        | 模糊控制的时间复杂性                   | 203        |
| 7.1.2        | 神经控制的空间复杂性                   | 203        |
| 7.1.3        | 模糊神经系统的产生                    | 204        |
| 7.2          | 模糊控制和神经网络的异同点                | 204        |
| 7.2.1        | 模糊控制和神经网络的共同点                | 205        |
| 7.2.2        | 模糊控制和神经网络的不同点                | 205        |
| 7.3          | 模糊神经系统的典型结构                  | 206        |
| 7.4          | 模糊神经系统的结构分类                  | 207        |
| 7.4.1        | 松散结合                         | 208        |
| 7.4.2        | 互补结合                         | 208        |
| 7.4.3        | 主从结合                         | 208        |
| 7.4.4        | 串行结合                         | 208        |
| 7.4.5        | 网络学习结合                       | 209        |
| 7.4.6        | 模糊等价结合                       | 209        |
| 7.5          | 模糊等价结合中的模糊神经控制器              | 210        |
| 7.5.1        | 偏差 $e$ 和偏差变化率 $\Delta e$ 的获取 | 210        |
| 7.5.2        | 隶属函数的神经网络表达                  | 212        |
| 7.6          | 几种常见的模糊神经网络                  | 214        |
| 7.6.1        | 模糊联想记忆网络                     | 214        |
| 7.6.2        | 模糊认知映射网络                     | 214        |
| 7.7          | 小结                           | 215        |
|              | 习题与思考题                       | 215        |
| <b>第 8 章</b> | <b>神经控制中的遗传进化训练</b>          | <b>216</b> |
| 8.1          | 生物的遗传与进化                     | 216        |
| 8.1.1        | 生物进化论的基本观点                   | 216        |
| 8.1.2        | 进化计算                         | 217        |
| 8.2          | 遗传算法概述                       | 220        |
| 8.2.1        | 遗传算法中遇到的基本术语                 | 220        |
| 8.2.2        | 遗传算法的运算特征                    | 220        |
| 8.2.3        | 遗传算法中的概率计算公式                 | 223        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 8.3 遗传算法中的模式定理 .....         | 224 |
| 8.3.1 模式定义和模式的阶 .....        | 224 |
| 8.3.2 模式定理(Schema) .....     | 228 |
| 8.4 遗传算法中的编码操作 .....         | 234 |
| 8.4.1 遗传算法设计流程 .....         | 234 |
| 8.4.2 遗传算法中的编码规则 .....       | 234 |
| 8.4.3 一维染色体的编码方法 .....       | 234 |
| 8.4.4 二维染色体编码 .....          | 238 |
| 8.5 遗传算法中的适应度函数 .....        | 238 |
| 8.5.1 将目标函数转换成适应度函数 .....    | 239 |
| 8.5.2 标定适应度函数 .....          | 239 |
| 8.6 遗传算法与优化解 .....           | 240 |
| 8.6.1 适应度函数的确定 .....         | 240 |
| 8.6.2 线性分级策略 .....           | 240 |
| 8.6.3 算法流程 .....             | 242 |
| 8.7 遗传算法与预测控制 .....          | 242 |
| 8.8 遗传算法与神经网络 .....          | 245 |
| 8.9 神经网络的遗传进化训练 .....        | 249 |
| 8.9.1 遗传进化训练的实现方法 .....      | 249 |
| 8.9.2 BP 网络的遗传进化训练 .....     | 254 |
| 8.10 小结 .....                | 254 |
| 习题与思考题 .....                 | 255 |
| <b>附录 常用神经控制术语汉英对照</b> ..... | 256 |
| <b>参考文献</b> .....            | 260 |

## 第1章 神经网络和自动控制的基础知识

20 世纪 90 年代脑科学研究的进展表明,人类的大脑是在漫长而又激烈的自然选择和生死攸关的生存竞争中演化而来的,它是高度非线性的、远离平衡的、永远开放的自适应系统。神经控制是脑科学延伸的一个积极成果。

神经网络与自动控制是两个不同的学科,它们有各自的产生背景、研究内容、历史发展以及不同的运行规律。神经控制是两门学科结合的产物,是它们发展到一定历史阶段的必然。

本章从介绍人工神经网络的发展史和自动控制的发展史着手,叙述从生物神经网络到人工神经网络的发展、智能控制的一些基本特征。在此基础上,介绍人工神经控制的模拟范围。

### 1.1 人工神经网络的发展史

人工神经网络(Artificial Neural Network,简称 ANN 或 AN2)是由大量而又简单的神经元按某种方式连接形成的智能仿生动态网络,它是在不停顿地向生物神经网络(Biological Neural Network,简称 BNN 或 BN2)学习中开始自己学科生涯的。

BN2 作为一门科学,兴起于 19 世纪末期。1875 年意大利解剖学家 Golgi 用染色法最先识别出单个神经细胞。1889 年西班牙解剖学家 Cajal 创立神经元学说,该学说认为:神经元的形状呈两极,细胞体和树突可以接受其他神经元的冲动,轴索的功能是向远离细胞体的方向传递信号。

1943 年,法国心理学家 W. S. McCulloch 和 W. Pitts 在分析、综合神经元基本特征的基础上,提出了第一个神经元数学模型(M-P 模型),开创了人类自然科学技术史上的一门新型学科——AN2 的研究。从 1943 年到现在,半个多世纪过去了,AN2 的发展历经波折,颇具戏剧性。今天,当神经网络和神经计算机已经发展成为一门多学科领域的边缘交叉学科的时候,当传统的智能学科,如人工智能、知识工程、专家系统等也需要发展而把目光转向 AN2 的时候,如实地介绍 AN2 当前面临的难题,客观地评价 AN2 的应用成果,探讨 AN2 研究的突破口,都是极有益处的。

#### 1.1.1 20 世纪 40 年代——神经元模型的诞生

1943 年提出的 M-P 模型采用神经节概念,把神经元看做双态开关,利用布尔逻辑函数对神经过程进行数学模拟。这个模型不仅沿用到今天,而且其创建方式一直启发后人发扬并贯穿至今,直接影响了这一领域研究的全过程。

1948年, John Von Neumann(指令存储式电子计算机以他的名字冯·诺依曼命名)研究比较过人脑结构和指令存储式计算机的联系与区别, 提出以简单神经元构成自再生自动机网络。

1949年, 心理学家 D. O. Hebb 提出神经元群、突触和反响回路的概念。他根据心理学中条件反射基理, 研究 AN2 中合适的学习方式, 探讨了神经细胞间连接强度的变化规律, 概括成著名的 Hebb 学习法则: 如果两个神经元都处于兴奋激活状态, 那么彼此的突触连接权就会得到增强。40年后, 有人指出了 Hebb 法则的局限性。

### 1.1.2 20 世纪 50 年代——从单神经元到单层网络, 形成第一次热潮

1958年, F. Rosenblatt 提出具有学习能力的“感知机”模型, 完成了从单个神经元到三层神经网络的过渡。

原型感知机由感知层 S、连接层 A 和反应层 R 等三层构成, 由于从感知层 S 到连接层 A 的连接权固定, 从连接层 A 到反应层 R 的连接权具有因学习而变化的能力, 因此它实质上只是一种只有输入层和输出层的单层神经网络。这种模型以强化控制系统作为“教师”信号指导网络开展学习, 首次把理论探讨付诸工程实践, 引起人们广泛注意并广为效仿。世界上许多实验室都仿制感知机用于文字识别、声音识别、声纳信号识别及学习记忆。

### 1.1.3 20 世纪 60 年代——学习多样化和 AN2 的急剧冷落

1960年, Widrow 和 Hoff 提出自适应线性元 Adaline(adaptive linear element)网络, 这是在当时研究大脑自适应学习系统的基础上提出的单层前馈感知机模型。它使用的均方误差最小化算法与感知器的误差修正算法虽然形式上相同, 但阈值符号发生了改变, 使得两者的学习有着本质的区别: 前者的数学基础在于超平面位置调整, 后者的数学基础在于误差曲面上的梯度下降。20多年以后, 人们发现 Widrow 的这些理论成了神经学习系统的基本法则。

1961年, Caianiello 发表了关于神经网络数学的理论著作, 提出了神经元方程, 用布尔代数模拟机能的动力过程、分析并研制细胞有限自动机的理论模型。

1969年, 美国人工智能学家 M. Minsky 和 S. Papert 出版了《Perceptrons》(感知机)一书, 证明了单层神经网络甚至不能解决像“异或”这种简单运算问题, 并且不能训练已发现的许多模式。甚至还有观点认为: 把感知机扩展成多层装置是没有意义的。由于人工智能的巨大成就以及作者的权威和影响很大, 使神经网络沿感知机方向的发展急剧降温。

### 1.1.4 20 世纪 70 年代——在低迷中顽强地发展

AN2 出现低潮的原因有三个: 第一, Von Neumann 型计算机的发展处于鼎盛时期, 运算速度和存储容量日益提高, 软件需求日益增多, 人们误以为发展了计算机的硬件及软件就可以完成模拟人类的认知过程; 第二, 单层神经网络功能有限; 第三, 多层神经网络没有有效的学习算法。

在研究基金锐减、大批研究人员转向的情况下, 仍然有少数具有远见卓识的学者坚持不懈地持续研究工作。资料表明, 在这十几年内提出的各类神经网络模型与 20 世纪五六十年代相比, 种类还要繁多, 结构还要复杂, 性能还要完善。其中最主要的功能模型是联想

记忆模型、认知模型和竞争性模型,例如 Kohonen 于 1981 年提出的具有竞争机制的自组织特征映射(SOM)网络。

### 1.1.5 20 世纪 80 年代——AN2 研究热潮再度兴起

1982 年,美国加州理工学院生物物理学家 Hopfield 采用全互连型神经网络模型,应用能量函数的概念,成功地解决了数字电子计算机不善于解决的经典人工智能难题——旅行商最优路径(TSP)问题,这是 AN2 研究史上一次重大突破,引起了全世界的极大关注。各国学者纷纷跟随其后介入神经网络领域。

1983 年,Sejnowski 和 Hinton 提出了“隐单元”概念,推出大规模并行处理的 Boltzmann 机,使用多层神经网络并行分布改变各单元连接权,克服了单层网络的局限性,为神经网络进入非线性处理领域奠定了基础。随后, Fukushima 将单层感知机增加了隐层,通过抑制性反馈和兴奋性前馈作用实现自组织学习,从而使多层感知机实现了联想学习和模式分类识别。

为了给 AN2 的发展扫清障碍,彻底清除人们对多层感知机网络的疑点,1986 年, Rumelhart 和 McClelland 提出多层前馈网络的反传学习算法,简称 BP 算法,该算法从后往前修正各层之间的连接权,否定了 1969 年对多层网络的错误结论。自那以后到现在, BP 算法成为应用最广、研究最多、发展最快的算法。

1987 年 6 月 21 日至 24 日,第一届世界神经网络会议在美国 San Diego 市召开,标志着 AN2 研究已遍及全世界。从 1988 年到现在,学术活动、研究机构、专著、专刊越来越多,有敏锐洞察力的其他学科学术杂志也纷纷大量刊登 AN2 的研究文章。

### 1.1.6 20 世纪 90 年代——再现热潮,产生许多边缘交叉学科

进入 20 世纪 90 年代后,AN2 的各类模型已达几十种,与之相伴的是大量出现的边缘交叉学科。其中形成的主要学科有以下几种。

#### 1) 脑科学和神经生理科学

人们已不再满足于对曾为 AN2 做出贡献的长枪乌贼、小白鼠、海马等一类低等智能动物的研究,直接探讨人脑智能结构体系,研究如何通过自组织将神经元群体转化为高度有序的系统。尽管目前还不能充分解释大脑的学习和记忆机理,还不能完整绘制大脑思维的控制结构,但仍然在神经结构特点和信息活动特点等方面取得了积极进展。

#### 2) 计算神经科学

计算神经科学是计算机科学与神经科学结合的产物。计算神经科学立足于试验、理论和计算三大支柱,通过建立脑模型阐明神经系统信息加工原理。它的研究方法是将智能活动和行为过程中整体水平、细胞水平和分子水平进行数学概括,寻求规律和算法,用计算机或 AN2 模拟,寻求如何表达和处理神经信息及智能活动的变化规律。当前,对于学科中涉及的 PDP(并行分布处理)理论讨论得十分热烈。

#### 3) 数理科学

AN2 的学习与训练实质上是网络非线性动态特征方程的迭代求解,因此必须先行提供数学工具和物理意义。需要建立随机连接的网络状态变化变迁方程、联想存储模型容量和回忆过程的统计动态方程、自组织激励方程。此外,讨论收敛性、Lyapunov 意义上的稳

定性、局部或全部最优解等,都是至关重要的。而物理上的一些概念,如熵、混沌、最小能量函数等,也不可缺少。

#### 4) 思维科学和认知科学

思维科学和认知科学是关于人类思维规律和认知方式的科学,研究的主体是人类在抽象思维、形象思维、灵感思维和社会思维活动中,对外界信息的感悟、知觉、推理、思考、意识、心灵等一系列心理认知和语言表达。认知科学中的连接主义原理已为 AN2 学界接受并广为引用。例如,按照这一原理,神经网络中所有神经元的数字化活动形成一个巨大的状态空间,包括连接权在内的控制器作用方程都可以按照学习规则训练权重。因此,现有的神经网络模型就能够供人们选择,有针对性地而又极为方便地移植到以状态变量描述的现代控制系统中,形成名符其实的智能系统。

#### 5) 信息论和计算机科学

信息的分析、综合方法如何用在 AN2 的联想存储之中,是一个需要解决的问题。在计算机科学领域,一方面 AN2 的算法要可靠“过渡”到 Von Neumann 计算机上仿真运算,另一方面,构成模拟人类智能活动的神经计算机成为新的时尚。

### 1.1.7 进入 21 世纪——实现机器智能的道路漫长而又艰难

在今后的若干年内,AN2 从理论上、实践上和应用上呈现出如下发展趋势:

(1) 理论上重点在对模型和算法进行探讨,建立 AN2 各种不同特性的模型并分析其功能。算法的探讨包括拓扑结构、网络容量、稳定性、收敛性、复杂性、输入模式样本的致密性。现在的问题是:对各种模型及算法的构成及性能评价,缺乏评价体系,只能依靠模拟仿真结论一个一个地具体分析,没有严密、科学的一般规律和方法。

(2) 实践上重点在使用硬件制作神经网络和神经计算机,但困难重重。这迫使人们不得不在今后相当长的一段时间内利用 Von Neumann 计算机模拟,无法对比两种不同类型的计算机运行结果。

AN2 研究面临上述两个困难,制约和影响到它的应用。

(3) 应用上希望早日突破。AN2 的研究及应用已势不可挡地日益渗透到模式识别、反馈调节、智能仪表、模糊控制、信号处理、系统辨识、模糊判决、知识处理、组合优化、专家系统、过程自动化、故障诊断、自动检测等领域,并且和它们密切结合形成新的分支,如模糊神经系统、神经网络模式识别等。但是另一方面,分析和统计在这些领域内的应用论文,可以看到如下几个鲜明特点:

① 神经网络能够解决传统技能如人工智能、PID 控制等或其他方法能解决的一些问题,即对工程界而言,增加了一个仅仅有很大潜力的解决问题的方法。尽管仿真结果表明:在时域或频域的某一或某些指标性能对比上,神经网络的结果优于其他方法,但没有在一切系统行为的指标上神经网络方法全部占优势的报道。

② 迄今为止基本上没有见到只能用 AN2 解决,而不能用现有其他任何方法完成的课题,即 AN2 在工程上还没有显示出不可替代的优越性。因此人们讨论较多的问题就是 AN2 突破口在哪里?需要多长时间才能找到突破口并取得突破?

③ 越来越多的人清醒地认识到:用 AN2 实现机器智能的道路是漫长而又艰难的,急功近利是不现实的,短期内没有可能取得实质性突破。与此同时决不能放弃 AN2 研究、重

蹈 20 世纪 70 年代的覆辙。

④ AN2 中的人工神经元和诸如 Adaline 这一类单层线性网络,因其具备 PID 功能而成为反馈控制系统或智能仪表的一部分,但目前的应用基本上停留在仿真层次上。想使它们进入实用阶段,还需要解决它们之间功能原理上的沟通、连接和接口。把三层或三层以上的 AN2 用于非线性鲁棒控制或测量,探索的时间将更长。

⑤ 从 1956 年开始的人工智能研究,在 25 年内取得了骄人成绩,它所依循的传统研究方法建立在“基于符号假设”基础上,突出了输出与输入之间的逻辑关系、忽略信息传递过程中的网络结构特点,曾经很迅速出了成果。但对于复杂模式识别、景物理解、过程自动化适应性随机调节、非线性鲁棒测量中的不完整信息处理、非线性动态运行不完全知识结构的自动修复、同一语系中不同方言理解等等,常常感到吃力。如果把人工智能的成功经验用到神经网络,与神经网络相结合,发挥各自优势,取长补短,也许是通往智能系统的成功之路。

⑥ 绝大部分加盟 AN2 的论文作者原本是不同领域内的专家学者,他们力图把模拟人类高级智能行为用于本领域遇到的一些难题,把希望寄托在 AN2 上,从而踏入神经网络高新领域。今后若干年内,AN2 队伍扩大的趋势还将继续下去。这是 AN2 兴旺发达的标志之一,也是 AN2 必然成功的重要原因。比如,首届中国神经网络学术大会于 1990 年在北京召开时,联合支持的我国国家一级学会仅有 8 个;而 1996 年在成都举行的第七次中国神经网络学术大会,联合支持的我国国家一级学会就有中国自动化学会、中国电子学会等 15 个。

2006 年 8 月 5 日,第十六届中国神经网络大会(CNNC2006)暨首届中国人工免疫系统专题会议(CAISC06)在哈尔滨工程大学召开。这次大会由中国神经网络委员会、中国电子学会、IEEE Computational Intelligence Society Beijing Chapter 主办,哈尔滨工程大学承办,上海海事大学协办。该系列会议每一年举行一次,现已成为国内神经网络领域最主要的学术活动。此次会议主要是为神经网络学习及相关研究领域的学者交流最新研究成果、进行广泛的学术讨论提供便利,并且邀请国内神经网络及人工免疫系统领域的著名学者做精彩报告。

神经网络系统理论是近年来得到迅速发展的一个国际前沿研究领域,它通过对人脑的基本单元——神经元的建模和联结,来探索模拟人脑神经系统功能的模型,并研制一种具有学习、联想、记忆和模式识别等智能信息处理功能的人工系统。神经网络系统理论的发展对计算机科学、人工智能、认知科学、脑神经科学、数理科学、信息科学、微电子学、自动控制与机器人、系统工程等领域都有重要影响。

## 1.2 生物神经元和人工神经元

生物神经元是生物神经细胞的学术名称;人工神经元是生物神经元的智能仿生模型。

### 1.2.1 生物神经元

有了生物神经元,才有生物的生命。

## 1. 生物

生物是物体的一种。世间万物就其有无生命而言，可以分成生物和死物两大类。这两类物体在存在状态方面有本质的差别。从统计物理学的观点看，生的状态是一种非平衡的动态状态，死的状态是一种平衡的稳定状态。

生物为了维持自己的生命，采用了通过消耗物质和能量获取非平衡环境的耗散结构，通过不断地摄取和排泄，不停地演绎着新陈代谢，生命得以在动态非平衡中继续和延续。一旦非平衡状态被破坏，平衡稳定状态到来，生命便将终结。

生物的生命系统，是一种在严酷的生存环境下磨练出来的信息处理系统。从求生存的需要出发，这种信息处理系统被分成相互关联又相互独立的三个子系统，它们分别是脑神经系统、免疫系统和内分泌系统，如图 1-1 所示。这三个子系统对于生命来讲，是缺一不可的。

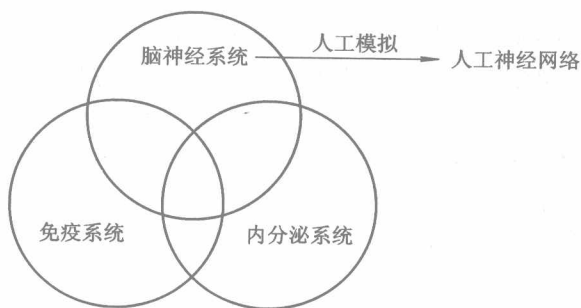


图 1-1 生物的生命系统

脑神经系统的信息处理全过程如图 1-2 所示，信息来自于外部世界，通过感觉(视觉、触觉、味觉、听觉、嗅觉)器官接收信息，并通过神经传至大脑，在大脑中经过处理加工后，再通过神经传至执行器官，执行处理的结果。

人工神经网络控制实际上是脑神经系统信息处理功能的工程实现。

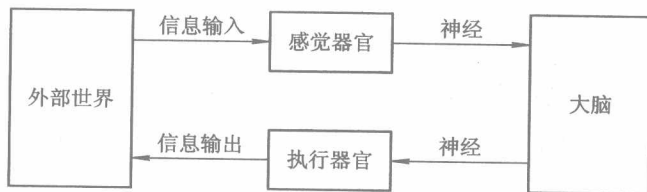


图 1-2 脑神经系统的信息处理全过程

大脑内部的模拟结构如图 1-3 所示，其基本组织是由生物神经元组合成神经网络而构成的。而神经元内又细分成离子通道和受体，它们具有蛋白质结构。

生物神经元的研究成果揭示了大脑皮层活动的物理基础。大脑皮层内存在许多界限分明、功能各异的小柱状区域，这些柱状区域内含有个数众多的皮层神经元，无论是哪种感觉器官的神经元，都有一个共同的动作特征：当感觉器官传入信息形成一定的冲动时，神经元将做出反应，产生单位放电效应，迅速把信号传递过去。柱状区域能把输入冲动进行放大、调整 and 综合，并能在较短的时间内调动相邻柱状区域的神经元，迅速做出准确的判

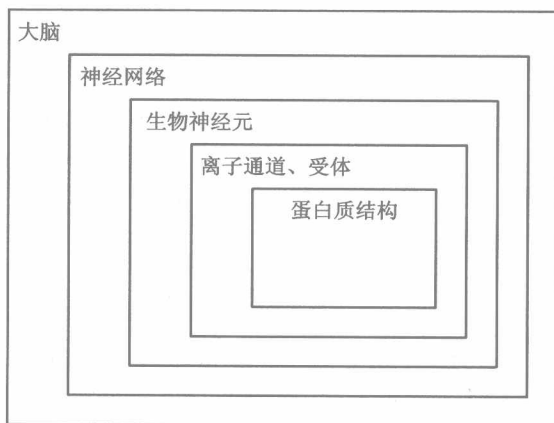


图 1-3 大脑模拟结构

断，并把判断结果发送到执行器官。

大脑皮层内约有 200 万个柱状区域，每个柱的直径约为  $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ ，高度约为  $2 \sim 3 \text{ mm}$ ，一次输入冲动所能影响的柱状能达数百万之多。

## 2. 生物神经元的基本结构

脑神经系统是由  $10^{10} \sim 10^{12}$  个神经元组成的、结构异常复杂的、永远开放的一种自适应系统。在一个三维的空间内，如此众多的神经元紧密组成一个神经网络，完成大脑独有的信息处理功能。

生物神经元是形成大脑的基本元素，如同砖瓦是构成高楼大厦的基本元素一样。房屋由砖瓦构成，但一堆砖瓦胡乱堆放在一起，并不能构成房屋，必须有设计图纸，按图施工才能形成千姿百态、形状各异的建筑。生物神经元组成生物神经网络、进而形成大脑也是如此。迄今为止，人们已经发现了视觉处理神经元群的纵列结构，而类似于记忆、思维等大脑神经网络独有的一些功能还不十分清楚，有待进一步研究。

不同的生物神经元有不同的功能，例如味觉神经元和视觉神经元的功能就不同，形成功能不同的主要原因是它们在结构上有差异。从完成功能的角度来看，不同的神经元内部有不同的结构。

另一方面，无论是哪种生物神经元，从传递、记忆信息的角度看，它们都具有着相同的结构。图 1-4 画出了生物神经元的基本组成。它由四部分组成，分别是细胞体、树突、轴突和突触。

(1) 细胞体：由细胞核、细胞质和细胞膜组成。细胞体是生物神经元的主体，是神经细胞的核心组成，是存储、加工处理信息的地方。生物神经元信息处理的奥秘在于神经膜，其基本功能是一种电气反应。

(2) 树突(树状突起)：细胞体的外围延伸呈树状突起，简称树突，是生物神经元的输入部分。树突从细胞体开始逐渐变细，各处都能与其它神经元的突触连通，从其它神经元的突触到树突，实现信息的输入。

(3) 轴突：细胞体外围的突起有多个，绝大部分突起是树突，可以接受其它神经元的信息，还有一个突起具有传递并输出信息的功能，这个突起称为轴突。