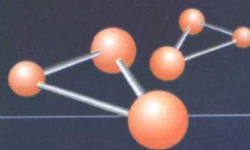


高等学校自动化专业教材



神经网络控制

徐丽娜 编著



附光盘



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校自动化专业教材

神经网络控制

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 提 要

神经网络控制已经发展成为智能控制的一个新的分支,为解决复杂的非线性、不确定及不确定系统的控制问题开辟了新途径。本书分 5 章阐述了(人工)神经网络理论基础,基于神经网络的动态系统的模型、逆模型及其辨识,神经网络控制的多种结构及其设计,遗传算法的寻优机理,遗传算法与系统辨识、与神经网络控制问题。

本书适合作为高等院工科校信息处理、自动控制、工业自动化、模式识别与智能控制等专业高年级本科生、研究生的教材或教学参考书,也适合相关专业的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

神经网络控制 / 徐丽娜编著. —北京: 电子工业出版社, 2003.2

高等学校自动化专业教材

ISBN 7-5053-8410-4

I. 神… II. 徐… III. 人工神经网络 - 智能控制 - 高等学校 - 教材 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 106150 号

责任编辑: 王传臣 特约编辑: 徐 堃

印 刷: 北京李史山胶印厂

出版发行: 电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×980 1/16 印张: 17 字数: 380 千字 附光盘 1 张

版 次: 2003 年 2 月第 1 版 2003 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 29.00 元(含光盘)

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010) 68279077

前 言

神经网络控制是 20 世纪 80 年代末期发展起来的自动控制领域的前沿学科之一。它是智能控制的一个新的分支，为解决复杂的非线性、不确定、不确定系统的控制问题开辟了新途径。

神经网络控制是（人工）神经网络理论与控制理论相结合的产物，是发展中的学科。它汇集了包括数学、生物学、神经生理学、脑科学、遗传学、人工智能、计算机科学、自动控制等学科的理论、技术、方法及研究成果。

本书被列为哈尔滨工业大学“十五”规划重点出版教材，是在 1995 年 5 月第一版的基础上，经过几年来的教学实践，经修改、扩充后形成的。

本书理论阐述由浅入深，系统性强，并注重与实践相结合，以便于读者的理解和掌握，其中有些内容是作者多年教学和科研实践的总结。

邓正隆教授参加了本书部分章节的编著工作。

几年来，在学校的支持下，我们先后完成了“神经网络控制课件”第一、二版本的研制，并在应用中获得了相当好的教学效果。此次，本书书后所附的课件是“神经网络控制课件”第三版本，它定将成为“教”或“学”很好的辅助教材。

由于作者水平所限，缺点与错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。

作 者
2002 年 10 月

目 录

第 1 章 绪言	(1)
1-1 人工神经网络的特点	(1)
1-2 神经网络控制取得的进展	(2)
1-3 神经网络控制待解决的问题	(4)
第 2 章 神经网络理论基础	(5)
2-1 引言	(5)
2-2 生物神经元与人工神经元模型	(7)
2-2-1 生物神经元	(7)
2-2-2 MP 模型	(8)
2-2-3 其他形式的作用函数	(10)
2-2-4 Hebb 学习规则	(11)
2-3 感知器	(11)
2-3-1 单层感知器	(11)
2-3-2 多层感知器	(15)
2-4 多层前馈网络与 BP 学习算法	(18)
2-4-1 网络结构	(18)
2-4-2 BP 学习算法	(18)
2-4-3 有关的几个问题	(21)
2-5 自适应线性神经元	(23)
2-6 径向基函数神经网络	(26)
2-6-1 网络输出计算	(26)
2-6-2 网络的学习算法	(27)
2-6-3 有关的几个问题	(29)
2-7 小脑模型神经网络	(33)
2-7-1 CMAC 的结构及工作原理	(33)
2-7-2 CMAC 的学习算法及分析	(35)
2-7-3 有关的几个问题	(39)
2-8 PID 神经网络	(42)
2-8-1 网络结构与输出计算	(42)
2-8-2 学习算法	(44)

2-8-3	有关的问题	(46)
2-9	全递归型神经网络	(46)
2-9-1	网络结构	(46)
2-9-2	BPTT 算法	(47)
2-9-3	RTRL 算法	(50)
2-10	局部递归型神经网络	(51)
2-10-1	内时延反馈型网络	(51)
2-10-2	外时延反馈型网络	(54)
2-11	连续型 Hopfield 网络	(55)
2-11-1	网络的描述	(55)
2-11-2	网络的稳定性	(56)
2-11-3	学习算法	(57)
2-11-4	有关的几个问题	(57)
2-12	小结	(58)
	习题	(59)
第 3 章	基于神经网络的系统辨识	(60)
3-1	引言	(60)
3-2	系统辨识的基础知识	(61)
3-2-1	系统辨识的基本原理	(61)
3-2-2	误差准则	(62)
3-2-3	辨识精度	(63)
3-2-4	辨识的主要步骤	(63)
3-3	基于神经网络的系统辨识原理	(64)
3-3-1	系统模型及逆模型的辨识	(64)
3-3-2	动态系统辨识常用的神经网络	(65)
3-3-3	两种辨识结构	(68)
3-4	线性动态系统模型与辨识	(69)
3-4-1	确定性系统模型	(69)
3-4-2	随机系统模型	(73)
3-4-3	确定性系统的神经网络辨识	(75)
3-4-4	随机系统的神经网络辨识	(78)
3-5	非线性动态系统模型与辨识	(83)
3-5-1	非线性系统模型	(83)
3-5-2	神经网络系统辨识	(84)

3-6	线性动态系统的逆模型与辨识	(98)
3-6-1	线性系统的逆模型	(98)
3-6-2	神经网络逆模型辨识	(101)
3-7	非线性动态系统逆模型与辨识	(103)
3-7-1	非线性系统的逆与可逆性	(103)
3-7-2	非线性系统逆模型	(105)
3-7-3	神经网络逆模型辨识	(107)
3-8	小结	(113)
	习题	(113)
第4章	神经网络控制	(115)
4-1	引言	(115)
4-2	神经网络控制的设计与实现	(115)
4-2-1	神经网络控制的设计	(115)
4-2-2	神经网络控制的实现	(117)
4-3	神经自校正控制	(119)
4-3-1	神经自校正控制结构	(120)
4-3-2	神经网络辨识器	(121)
4-4	神经PID控制	(124)
4-4-1	神经网络辨识器	(125)
4-4-2	神经PID控制器	(126)
4-5	神经模型参考自适应控制	(129)
4-6	神经内模控制	(132)
4-6-1	内模控制原理	(133)
4-6-2	线性内模控制设计	(135)
4-6-3	神经非线性内模控制	(139)
4-7	PID神经网络控制	(144)
4-7-1	PID神经网络单变量控制	(144)
4-7-2	PID神经网络多变量控制	(147)
4-8	小脑模型神经控制	(155)
4-8-1	CMAC直接逆运动控制	(155)
4-8-2	CMAC前馈控制	(158)
4-8-3	CMAC反馈控制	(159)
4-9	再励学习与神经控制	(160)
4-9-1	再励学习原理	(160)

4-9-2	再励学习算法	(161)
4-9-3	再励学习神经控制	(163)
4-10	小结	(164)
	习题	(165)
第5章	遗传算法与神经控制	(166)
5-1	引言	(166)
5-2	基本的遗传算法	(167)
5-2-1	生物的遗传、进化和适应性	(167)
5-2-2	基本的遗传算法概述	(167)
5-2-3	遗传操作	(170)
5-2-4	GA 的有效性	(173)
5-2-5	适应度及调整	(174)
5-2-6	有关的几个问题	(176)
5-3	模式定理	(178)
5-3-1	模式	(178)
5-3-2	基本算子对模式的影响	(179)
5-4	遗传算法的发展	(181)
5-4-1	交叉、变异概率的自适应调整	(181)
5-4-2	高级算子	(181)
5-4-3	并行 GA	(182)
5-4-4	可变长个体与 Messy GA	(183)
5-4-5	基于小生境技术的 GA	(185)
5-4-6	混合 GA	(186)
5-4-7	导入年龄结构的 GA	(187)
5-4-8	基于基因分布评价的适应度调整	(187)
5-4-9	GA 理论研究	(188)
5-5	遗传算法与函数最优化	(189)
5-6	遗传算法与系统辨识	(195)
5-7	神经网络的遗传进化训练	(203)
5-8	遗传算法与神经控制	(207)
5-9	小结	(212)
	习题	(213)
附录 A	梯度下降法	(214)
A-1	迭代算法	(214)

A-2	步长的选择	(215)
A-3	一般迭代算法	(215)
A-4	梯度下降法的不足	(216)
附录 B	赋范空间的逼近	(217)
B-1	距离空间	(217)
B-2	线性赋范空间	(218)
B-3	Banach 空间	(220)
B-4	最佳逼近	(220)
B-5	最佳逼近元的存在性和唯一性	(221)
B-6	最佳一致逼近	(221)
B-7	L_2 逼近	(222)
附录 C	无监督学习的两种动态聚类算法	(223)
C-1	聚类分析	(223)
C-2	两种动态聚类法	(224)
C-3	几点说明	(227)
附录 D	镜像映射最小二乘解法	(228)
D-1	镜像映射法	(228)
D-2	正交矩阵	(229)
D-3	镜像映射矩阵	(229)
D-4	矩阵三角化	(230)
D-5	正交矩阵的求取	(232)
附录 E	B 样条函数	(233)
E-1	样条函数	(233)
E-2	B 样条函数	(235)
E-3	函数的插值与逼近	(239)
附录 F	Lyapunov 第二方法	(240)
F-1	有关的定义	(240)
F-2	Lyapunov 第二方法	(242)
附录 G	M 序列及逆 M 序列	(243)
G-1	M 序列	(243)
G-2	逆 M 序列	(245)
附录 H	Z 变换	(248)
H-1	Z 变换的定义	(248)
H-2	Z 变换的性质	(249)

H-3 Z反变换.....	(251)
附录I 线性连续系统的Z传递函数.....	(252)
参考文献.....	(255)

第1章 绪 言

神经网络控制是 20 世纪 80 年代以来, 由于人工神经网络 (ANN, Artificial Neural Networks) 研究所取得的突破性进展, 与控制理论相结合, 而发展起来的自动控制领域的前沿学科之一。它已成为智能控制的一个新的分支, 为解决复杂的非线性、不确定、不确定系统的控制问题开辟了新途径。

1-1 人工神经网络的特点

人工神经网络 (简称神经网络, NN) 是由人工神经元 (简称神经元) 互联组成的网络, 它是从微观结构和功能上对人脑的抽象、简化, 是模拟人类智能的一条重要途径, 反映了人脑功能的若干基本特征, 如并行信息处理、学习、联想、模式分类、记忆等。

1. 神经网络对控制领域有吸引力的特征

- (1) 能逼近任意 L_2 范数上的非线性函数。
- (2) 信息的并行分布式处理与存储。
- (3) 可以多输入、多输出。
- (4) 便于用超大规模集成电路 (VLSI) 或光学集成电路系统实现, 或用现有的计算机技术实现。
- (5) 能进行学习, 以适应环境的变化。

2. 决定神经网络整体性能的三大要素

- (1) 神经元 (信息处理单元) 的特性。
- (2) 神经元之间相互连接的形式——拓扑结构。
- (3) 为适应环境而改善性能的学习规则。

1943 年建立的第一个神经元模型——MP (模拟生物神经元) 模型, 为神经网络的研究与发展奠定了基础。至今, 已建立了多种神经元与网络的模型, 取得了相当的成果, 其中一些模型被用于自动控制领域。图 1-1 示出了常用的四例。

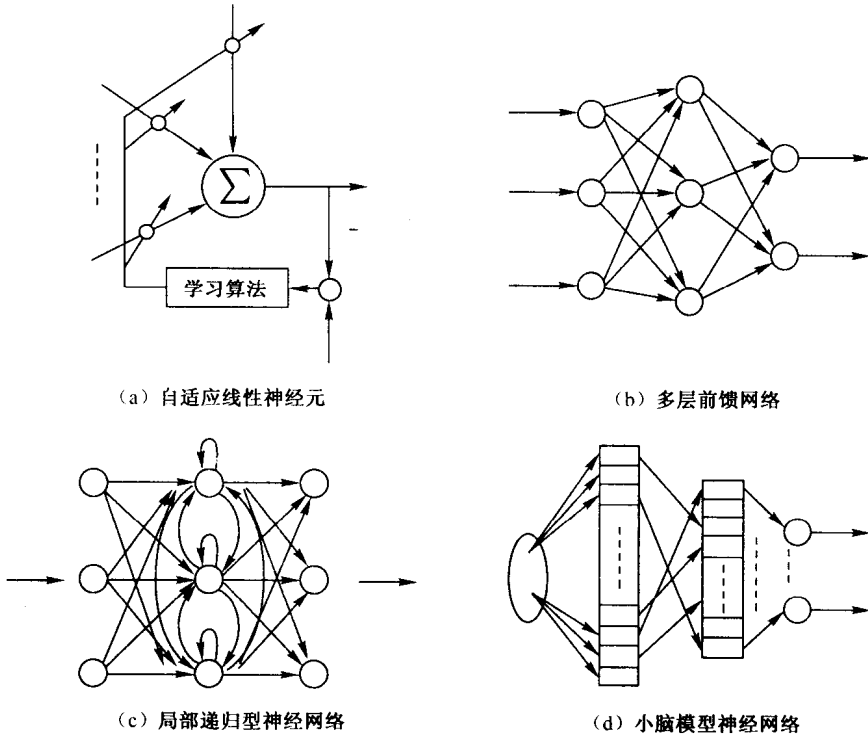


图 1-1 神经元与神经网络四例

1-2 神经网络控制取得的进展

将神经网络用于控制领域，已取得了如下几方面进展。

1. 基于神经网络的系统辨识

基于神经网络的系统辨识，就是将神经网络作为被辨识系统 P 的模型。

(1) 可在已知常规模型结构的情况下，估计模型的参数。

(2) 利用神经网络的线性、非线性特性，可建立线性、非线性系统的静态、动态、逆动态及预测模型，重点在于非线性系统的建模与辨识，如图 1-2 所示。

2. 神经网络控制器

神经网络作为实时控制系统的控制器，对于不确定、不确定系统及扰动进行有效的控制，使控制系统达到所要求的动态、静态特性。

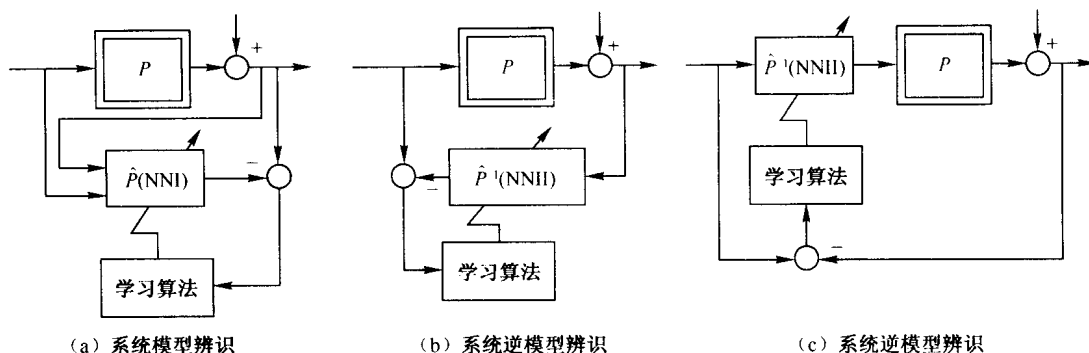


图 1-2 基于神经网络的系统辨识结构图

3. 神经网络与其他算法相结合

神经网络与专家系统、模糊逻辑、遗传算法等相结合用于控制系统，可为系统提供非参数模型、控制器模型。

4. 优化计算

在常规控制系统的设计中，常遇到求解约束优化问题，神经网络为这类问题提供了有效的途径。

5. 控制系统的故障诊断

随着对控制系统安全性、可靠性、可维护性要求的提高，对系统的故障检测与诊断问题的研究不断深入。近年来，神经网络在这方面的应用研究取得了相应的进展。

本书在阐述神经网络理论的基础上，研究上述前三个方面的问题。

由于神经网络具有模拟人的部分智能的特性，因此神经网络控制具有学习能力，对环境的变化具有自适应性，成为基本上不依赖于模型的一类控制，且主要应用神经网络的非线性特性解决非线性系统的控制问题。所以，能学习、自适应性、非线性控制是神经网络控制的特点。

神经网络控制发展的历史虽不长，但神经网络已在多种控制结构中得到应用，如 PID 控制、模型参考自适应控制、前馈反馈控制、内模控制、逆系统控制、预测控制、模糊控制等。图 1-3 示出了神经网络闭环控制结构之三例。

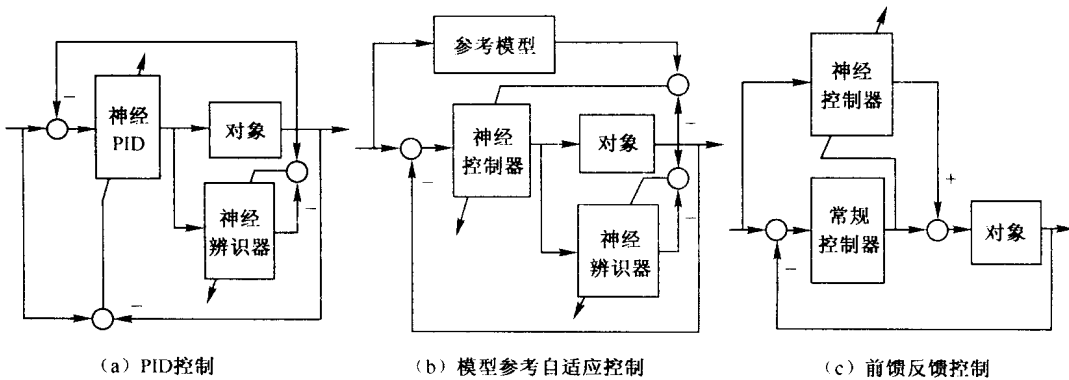


图 1-3 神经网络控制结构三例

1-3 神经网络控制待解决的问题

神经网络控制在理论与实践上，有如下问题有待于进一步研究与探讨：

- (1) 神经网络的稳定性与收敛性问题。
- (2) 在逼近非线性函数问题上，神经网络的现有理论只解决了存在性问题。
- (3) 神经网络的学习速度一般比较慢，为满足实时控制的需要，必须予以解决。
- (4) 对于控制器及辨识器，如何选择合适的神经网络模型及确定模型的结构，尚无理
论指导。

在非线性系统辨识方面，存在充分激励、过参数辨识、带噪声系统的辨识等问题。

- (5) 引入神经网络的控制系统，在稳定性和收敛性的分析方面增加了难度，研究成果较少，有待于进一步探讨。

对于上述问题，一方面，有待于神经网络研究的不断进展；另一方面，随着非线性理论及优化方法的进一步发展，并与控制相结合予以解决。

第2章 神经网络理论基础

2-1 引言

神经生理学和神经解剖学证明了人的思维是由脑完成的。神经元是组成人脑的最基本单元，能够接受并处理信息。人脑约由 $10^{11} \sim 10^{12}$ 个神经元组成，其中每个神经元约与 $10^4 \sim 10^5$ 个神经元通过突触连接，因此人脑是一个复杂的信息并行加工处理巨系统。探索脑组织的结构、工作原理及信息处理的机制，是整个人类面临的一项挑战，也是整个自然科学的前沿领域。

人脑的功能，一方面受先天因素的制约，即由遗传信息先天确定了其结构与特性；另一方面，后天因素也起重要的作用，即大脑可通过其自组织、自学习，不断适应外界环境的变化。大脑的自组织、自学习性（Self-Organization, Self-Learning）来源于神经网络结构的可塑性（Plasticity），它主要反映在神经元之间连接强度的可变性上。

人工神经网络（ANN, Artificial Neural Networks）或称连接机制（Connectionism），是从微观结构与功能上对人脑神经系统的模拟而建立起来的一类模型，具有模拟人的部分形象思维的能力，其特点主要是具有非线性特性、学习能力和自适应性，是模拟人的智能的一条重要途径。它是由简单信息处理单元（人工神经元，简称神经元）互联组成的网络，能接受并处理信息。网络的信息处理由处理单元之间的相互作用来实现，它是通过把问题表达成处理单元之间的连接权来处理的。

多年来，学者们建立了多种神经网络模型，决定其整体性能的三大要素为：

- （1）神经元（信息处理单元）的特性。
- （2）神经元之间相互连接的形式——拓扑结构。
- （3）为适应环境而改善性能的学习规则。

神经网络是人脑的某种抽象、简化和模拟，反映了人脑功能的若干基本特征：

- （1）网络的信息处理由处理单元间的相互作用来实现，并具有并行处理的特点。
- （2）知识与信息的存储，表现为处理单元之间分布式的物理联系。
- （3）网络的学习和识别，决定于处理单元连接权系的动态演化过程。
- （4）具有联想记忆（AM, Associative Memory）的特性。

神经网络是具有高度非线性的系统，具有一般非线性系统的特性。虽然单个神经元的组成和功能极其有限，但大量神经元构成的网络系统所能实现的功能是丰富多彩的。

神经网络的数理模型虽有多种，但基本运算可归结为四种：积与和、权值学习、阈值处理和非线性函数处理。

神经网络的工作方式由两个阶段组成：学习期和工作期。

(1) 学习期

学习（训练）过程是人获得知识、掌握技能的过程，学习是人的重要智能之一。

学者们建立的多种神经网络模型，模拟人的学习机理，有多种学习规则。在学习期，神经元之间的连接权值可由学习规则进行调整，搜索寻优以使准则（或称目标）函数达到最小，从而改善网络自身性能。

(2) 工作期

连接权值不变，由网络的输入得到相应的输出。

神经网络的不同分类如下：

(1) 按性能分：连续型与离散型，确定型与随机型，静态与动态网络。

(2) 按连接方式分：前馈（或称前向）型与反馈型。

(3) 按逼近特性分：全局逼近型与局部逼近型。

(4) 按学习方式分：有导师的学习（也称监督学习）、无导师的学习（也称无监督学习，或称自组织）和再励学习（也称强化学习）三种，它们都是模拟人（类）适应环境的学习过程的一种机器学习模型。因此，具有学习能力的系统称为学习系统，或称学习机，如图 2-1 所示。

① 有导师的学习（SL, Supervised Learning）：如图 2-1（a）所示，在学习过程中，网络根据实际输出与期望输出的比较进行连接权系的调整。将期望输出称为导师信号，它是评价学习标准。

② 无导师的学习（NSL, Nonsupervised Learning）：如图 2-1（b）所示，没有导师信号提供给网络，网络根据其特有的结构和学习规则进行连接权系的调整。此时，网络的学习评价标准隐含于其内部。

③ 再励学习（RL, Reinforcement Learning）：如图 2-1（c）所示，它把学习看做试探评价（奖或惩）过程，学习机选择一个动作（输出）作用于环境之后，使环境的状态改变，并产生一个再励信号 r_t （奖或惩）反馈至学习机。学习机依据再励信号与环境当前的状态选择下一动作作用于环境，选择的原則是使受到奖励的可能性增大。

从总的方面来讲，一般将神经网络分为四种类型：前馈型、反馈型、自组织型与随机型。

神经网络发展至今已有半个多世纪的历史，概括起来经历了三个阶段：20 世纪 40~60 年代的发展初期；70 年代的研究低潮期；80 年代，神经网络的理论研究取得了突破性进展。多年来，神经网络的研究虽已取得很多成果，但至今尚未建立起一套完整的理论体系。

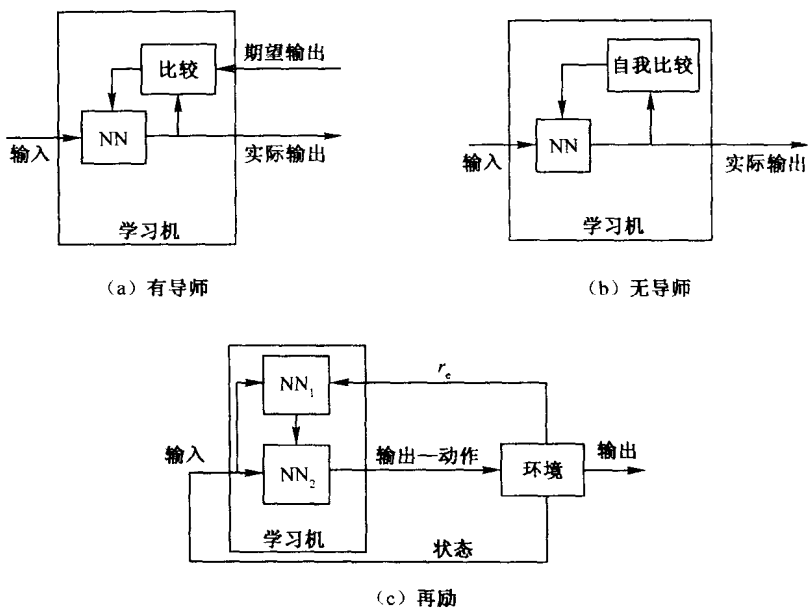


图 2-1 三种学习方式

本章的主要内容:

- (1) 介绍模拟生物神经元的人工神经元模型。
- (2) 阐述控制中常用的两类网络（前馈型与反馈型）的理论基础，包括若干种网络的拓扑结构、模型、学习算法、逼近非线性函数的能力、泛化能力、收敛性等。

2-2 生物神经元与人工神经元模型

在神经科学研究的基础上，依据生物神经元的结构和功能，模拟生物神经元的基本特征建立了多种人工神经元模型，也称形式神经元模型，简称神经元模型。本节在简介生物神经元基础上，列出了几种人工神经元模型。

2-2-1 生物神经元

生物神经元，也称神经细胞，是构成神经系统的基本功能单元。虽然神经元的形态有很大的差异，但基本结构相似。本节从信息处理和生物控制的角度，简述其结构和功能。

1. 神经元结构

神经元结构如图 2-2-1 所示。

- (1) 细胞体：由细胞核、细胞质和细胞膜等组成。