



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电子信息与电气学科规划教材·智能科学与技术

神经网络控制

(第三版)

徐丽娜 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



含光盘1张



普通高等学校“十一五”国家级规划教材
 电子信息与电气学科规划教材·智能科学与技术

神经网络控制

(第三版)

徐丽娜 编著

[47]

[48]

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

神经网络控制已发展成为“智能控制”的一个新的分支,属先进控制技术,为解决复杂的非线性、不确定、不确定系统的控制问题,开辟了一条新的途径。

本书分五章阐述了(人工)神经网络理论基础,基于神经网络的动态系统模型、逆模型及其辨识问题,神经网络控制的多种结构及其设计问题,遗传算法的寻优机理,遗传算法与系统辨识、遗传算法与神经控制问题。

本书适合作为高等工科院校自动控制、信息处理、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,也适用于从事以上专业的工程技术人员阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

神经网络控制

(第三集)

图书在版编目(CIP)数据

神经网络控制/徐丽娜编著.—3版.—北京:电子工业出版社,2009.7

电子信息与电气学科规划教材.智能科学与技术

ISBN 978-7-121-08772-1

I. 神… II. 徐… 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(2009)第 069246 号

责任编辑:陈晓莉 特约编辑:李双庆 杨晓红

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:12.75 字数:326 千字

印 次:2009 年 7 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:28.00 元(含光盘 1 张)

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,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

第三版前言

“神经网络控制”属于先进控制技术。它是 20 世纪 80 年代末发展起来的自动控制领域新兴的前沿学科之一。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,开辟了一条新的途径。

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,且是正在发展中的学科,它汇集了多学科的研究成果,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、技术和方法。

本书列为“普通高等学校‘十一五’国家级规划教材”,是在 1999 年 5 月第一版、2003 年 2 月第二版的基础上,经历了几年来的教学实践,在吸纳多方的建议经修改、扩充后,写成的第三版。

本书理论阐述由浅入深,剪系统性强,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。

与书一起出版的光盘含三部分内容:

(1) 神经网络控制课件。该课件也是在前版的基础上,经教学实践、修改、扩充的结果,它是“教”与“学”的辅助教材。

(2) “神经网络控制课件”用户指南。

(3) nncp:MATLAB 程序它是该版新增的内容,详见第 1 章 1-5 节的说明。

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

2009 年 6 月

目 录

第 1 章 绪言	1
1-1 神经网络的特点	1
1-2 神经网络在控制领域取得的进展	1
1-3 神经网络控制系统概述	3
1-3-1 神经网络控制系统的组成	3
1-3-2 实时控制	5
1-3-3 智能控制的分支	5
1-4 神经网络控制待解决的问题	6
1-5 关于“例”与“MATLAB 程序”	6
第 2 章 神经网络理论基础	7
2-1 引言	7
2-2 生物神经元与人工神经元模型	9
2-2-1 生物神经元	9
2-2-2 MP 模型	10
2-2-3 多种作用函数	11
2-2-4 Hebb 学习规则	12
2-3 感知器	12
2-3-1 单层感知器	12
2-3-2 多层感知器	16
2-4 线性神经网络	18
2-4-1 自适应线性神经元	18
2-4-2 线性神经网络	19
2-5 多层前馈网络与 BP 学习算法	20
2-5-1 网络结构	20
2-5-2 BP 学习算法	20
2-5-3 有关的几个问题	22
2-6 径向基函数神经网络	25
2-6-1 网络输出计算	26
2-6-2 网络的学习算法	26
2-6-3 有关的几个问题	27
2-6-4 MATLAB 高斯 RBF 网络构建法	29
2-7 小脑模型神经网络	30
2-7-1 CMAC 的结构及工作原理	30
2-7-2 CMAC 的学习算法及分析	31
2-7-3 有关的几个问题	34

2-8	PID 神经网络	38
2-8-1	网络结构与输出计算	38
2-8-2	学习算法	39
2-8-3	有关的两个问题	40
2-9	局部递归型神经网络	40
2-9-1	内时延反馈型网络	41
2-9-2	外时延反馈型网络	43
2-10	连续型 Hopfield 网络	43
2-10-1	网络的描述	43
2-10-2	网络的稳定性	44
2-10-3	学习算法	45
2-10-4	有关的几个问题	45
2-11	应用 Simulink 设计神经网络	46
2-12	应用 GUI 设计神经网络	48
2-13	小结	49
	习题	49
第 3 章	基于神经网络的系统辨识	51
3-1	引言	51
3-2	系统辨识的基础知识	51
3-2-1	系统辨识的基本原理	51
3-2-2	误差准则	53
3-2-3	辨识精度	53
3-2-4	辨识的主要步骤	54
3-3	基于神经网络的系统辨识原理	54
3-3-1	系统模型及逆模型的辨识	55
3-3-2	动态系统辨识常用的神经网络	55
3-3-3	两种辨识结构	58
3-4	线性动态系统模型与辨识	58
3-4-1	确定性系统模型	58
3-4-2	随机系统模型	61
3-4-3	确定性系统的神经网络辨识	63
3-4-4	随机系统的神经网络辨识	66
3-4-5	基于连续 Hopfield 网络的线性系统辨识	68
3-5	非线性动态系统模型与辨识	72
3-5-1	非线性系统模型	72
3-5-2	神经网络系统辨识	73
3-6	线性动态系统的逆模型与辨识	77
3-6-1	线性系统的逆模型	77
3-6-2	神经网络逆模型辨识	79
3-7	非线性动态系统逆模型与辨识	82

3-7-1	非线性系统的逆与可逆性	82
3-7-2	非线性系统逆模型	83
3-7-3	神经网络逆模型辨识	84
3-8	小结	87
	习题	88
第4章 神经网络控制		89
4-1	引言	89
4-2	神经网络控制的设计与实现	89
4-2-1	神经网络控制系统的离散化	89
4-2-2	神经网络控制的设计	91
4-2-3	神经网络控制的实现	92
4-3	基于连续 Hopfield 网络的 PID 控制	92
4-3-1	基于 CHNN 的 PID 控制结构	92
4-3-2	基于 CHNN 的 PID 控制器参数优化计算	93
4-3-3	PID 控制算法	94
4-4	神经自校正控制	97
4-4-1	神经自校正控制结构	98
4-4-2	神经网络辨识器	99
4-5	神经 PID 控制	101
4-5-1	神经网络辨识器	102
4-5-2	神经 PID 控制器	103
4-6	神经内模控制	104
4-6-1	内模控制原理	104
4-6-2	线性内模控制设计	106
4-6-3	神经非线性内模控制	110
4-7	PID 神经网络控制	112
4-7-1	PID 神经网络单变量控制	112
4-7-2	PID 神经网络多变量控制	113
4-8	小脑模型神经控制	118
4-8-1	CMAC 直接逆运动控制	118
4-8-2	CMAC 前馈控制	120
4-8-3	CMAC 反馈控制	121
4-9	神经控制三例	121
4-9-1	神经控制器	121
4-9-2	非线性动态系统	122
4-9-3	神经控制三例	123
4-10	再励学习与神经控制	125
4-10-1	再励学习原理	126
4-10-2	再励学习算法	126
4-10-3	再励学习神经控制	127

38	4-11 小结	129
68	习题	129
	第 5 章 遗传算法与神经控制	130
78	5-1 引言	130
88	5-2 基本的遗传算法	131
98	5-2-1 生物的遗传、进化和适应性	131
98	5-2-2 基本的遗传算法	131
98	5-2-3 遗传操作	133
98	5-2-4 GA 的有效性	136
10	5-2-5 适应度及调整	137
10	5-2-6 有关的几个问题	139
10	5-3 模式定理	140
10	5-3-1 模式	140
10	5-3-2 基本算子对模式的影响	140
10	5-4 遗传算法的发展	142
10	5-4-1 交叉、变异概率的自适应调整	142
10	5-4-2 高级算子	142
10	5-4-3 并行 GA	143
10	5-4-4 可变长个体与 Messy GA	144
10	5-4-5 基于小生境技术的 GA	145
10	5-4-6 混合 GA	146
10	5-4-7 GA 理论研究	146
10	5-5 遗传算法与函数最优化	147
10	5-6 遗传算法与系统辨识	150
10	5-7 遗传算法与 PID 控制	155
10	5-7-1 线性离散系统的 PID 参数整定	155
10	5-7-2 线性连续系统的 PID 参数整定	156
10	5-8 神经网络的遗传进化训练	159
10	5-9 遗传算法与神经控制	161
10	5-10 小结	165
10	习题	166
	附录 A 最优化算法	167
10	A-1 最优化问题	167
10	A-2 梯度下降法	169
	附录 B 赋范空间的逼近	170
10	B-1 距离空间	170
10	B-2 线性赋泛空间	171
10	B-3 Banach 空间	172
10	B-4 最佳逼近	172
10	B-5 最佳逼近元的存在性和唯一性	173

B-6	最佳一致逼近	173
B-7	L_2 逼近	174
附录 C	无监督学习的两种动态聚类算法	175
C-1	聚类分析	175
C-2	两种动态聚类法	176
C-3	几点说明	178
附录 D	B 样条函数	179
D-1	样条函数	179
D-2	B 样条函数	180
D-3	函数的插值与逼近	183
附录 E	Lyapunov 第二方法	184
E-1	有关的定义	184
E-2	Lyapunov 第二方法	185
附录 F	M 序列及逆 M 序列	187
F-1	M 序列	187
F-2	逆 M 序列	189
参考文献	191

第1章 绪 言

神经网络控制属先进控制技术,是用计算机做数字控制器和(或)辨识器实现的一类算法。它是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)互连组成的网络,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,取得了相当成果,其中一些模型被用于自动控制领域。图1-1-1示出了常用的四例。

1-2 神经网络在控制领域取得的进展

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 \hat{P} (NNI)、逆模型

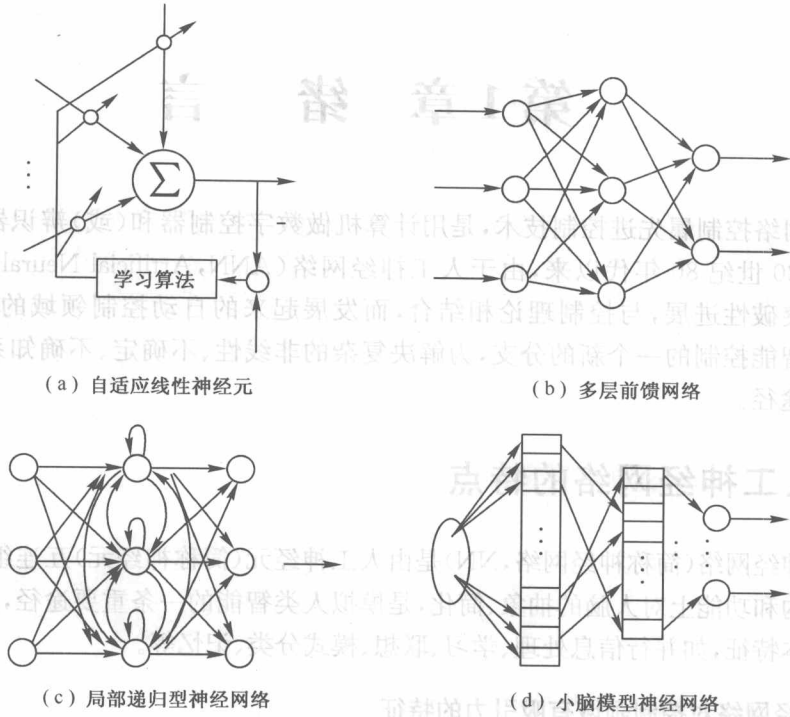


图 1-1-1 神经元与神经网络四例

\hat{P}^{-1} (NNII)。

(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 1-2-1 所示。

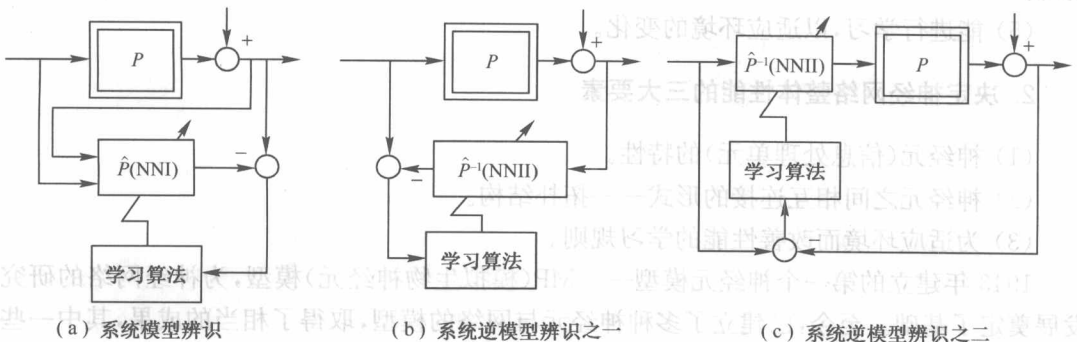


图 1-2-1 基于神经网络的系统辨识结构图

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、不确知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。

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、小波理论等相结合用于控制系统,可为系统提

供参数和非参数模型、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,研究上述前四个方面的问题,第三方面仅讨论遗传算法与神经控制的结合。

1-3 神经网络控制系统概述

神经网络控制(简称神经控制)就是将(人工)神经网络在相应的控制结构中做控制器与(或)辨识器,主要是为了解决复杂的非线性、不确定、不确知系统,在不确定、不确知环境中的控制问题,使控制系统稳定、鲁棒性(指在不确定因素存在情况下,系统保持其原有性质的能力)好,具有要求的动态、静态(或称稳态)性能。

神经网络控制系统是闭环负反馈控制系统,如图 1-3-1 所示,控制器与(或)辨识器是用数字计算机由程序实现的,因此,也是计算机控制系统。

1-3-1 神经网络控制系统的组成

神经控制系统与任何计算机控制系统相同,由硬件与软件两部分组成。

1. 硬件部分

神经控制系统的硬件主要由如下几部分组成,以单输入/单输出(SISO)系统为例,如图 1-3-1 所示。

(1) 连续被控对象(或过程):含驱动装置或称执行机构。工作于连续状态,输入/输出是连续量。

(2) 神经控制器:工作于离散状态,输入/输出是数字量,由数字计算机实现神经控制和(或)系统辨识功能。

(3) 模拟输入通道:由采样开关、A/D 转换器两个环节组成,完成由模拟量到数字量的转换。

(4) 模拟输出通道:由 D/A 转换器、保持器两个环节组成,完成由数字量到模拟量的转换。

(5) 实时时钟:产生脉冲序列,定时控制采样开关的闭合,控制 D/A 转换器的输出。

(6) 传感器:检测控制系统的输出。

2. 软件部分

控制软件流程如图 1-3-2,计算机通过软件实现所设计的算法,软件主要由主程序和控制

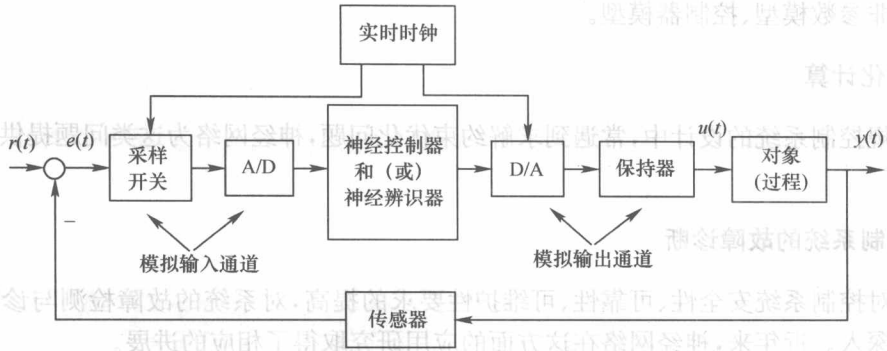


图 1-3-1 神经控制系统硬件框图

子程序组成:

(1) 主程序之功能是进行系统初始化设置。

(2) 控制子程序:主要是实现神经控制算法,若设计了既有控制器又有辨识器的控制结构,则,还要实现神经辨识算法。

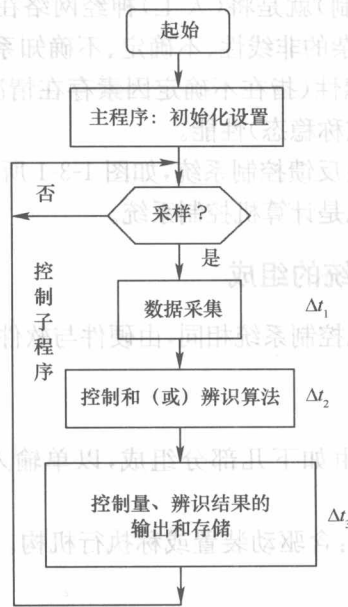


图 1-3-2 神经控制软件流程

对于多输入/多输出神经控制,可配置多路模拟输入/输出通道,由一台数字机进行分时控制,如图 1-3-3 所示。

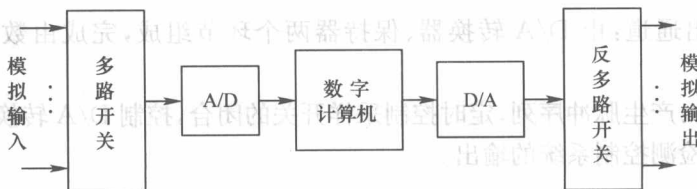


图 1-3-3 多路模拟输入/输出通道示意图

1-3-2 实时控制

神经控制必须实现实时控制(Real-Time Control),也就是控制器和(或)辨识器要在一个采样周期 T 时间内完成一个控制步的操作,因为操作是由程序实现,程序是由若干条指令组合而成,任何一条指令的运行都是需要时间的。

单输入/单输出(SISO)系统,如图 1-3-2,完成一个控制步的操作:

(1) 数据采集:采集一个输入通道的数据,需经信号采样,A/D 转换后,数字量输入至计算机中,设需要时间 Δt_1 ;

(2) 按照所设计的控制规律和(或)辨识算法,由程序求得控制量和(或)辨识量,设需时 Δt_2 ;

(3) 控制量的输出和存储,和(或)辨识量的输出,设需时 Δt_3 。

SISO 系统实现实时控制的条件为

$$T \geq \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 \quad (1-3-1)$$

多输入 / 多输出(MIMO) 系统,实现实时控制的条件为

$$T \geq \sum_{i=1}^n (\Delta t_{i1} + \Delta t_{i2} + \Delta t_{i3}) \quad (1-3-2)$$

式中, n : n 输入 n 输出(MIMO) 系统。

1-3-3 智能控制的分支

由于(人工)神经网络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,具有模拟人的部分智能的特性,主要是具有非线性特性、学习能力和自适应性,使神经控制能对变化的环境(包括:外加扰动、量测噪声、被控对象的时变特性三方面)具有自适应性,且成为基本上不依赖于模型的一类控制,因此,神经控制已成为“智能控制”的一个新的分支。

神经控制属于先进控制技术。

G. N. Saridis 对学习系统的定义:一个系统,如果能对一个过程或其环境的未知特征所固有的信息进行学习,并将得到的经验用于进一步的估计、分类、决策或控制,从而使系统的性能得到改善,则称其为学习系统。

在控制领域,将具有学习能力的控制系统称为学习控制系统,属于智能控制系统。神经控制是有学习能力的,属于学习控制,也属智能控制。

神经网络控制发展的历史虽不长,但是,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 1-3-4 示出了神经网络闭环控制结构之三例。

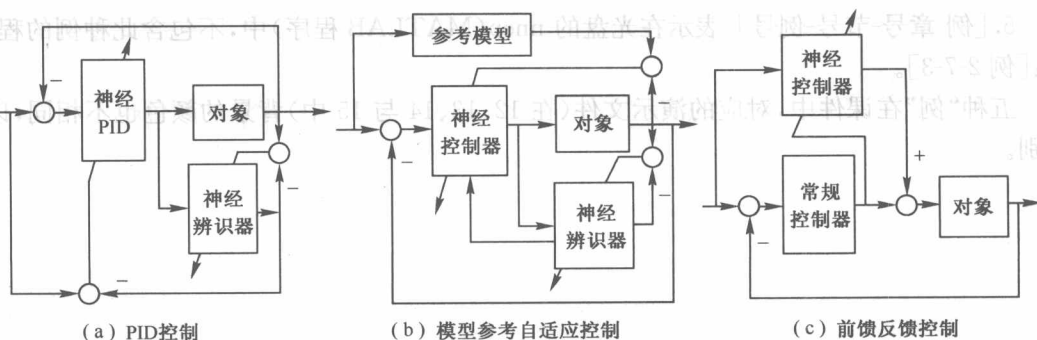


图 1-3-4 神经网络控制结构三例

神经控制中,作为控制器与(或)辨识器的神经网络,除了本书介绍的之外,还有模糊神经网络、小波神经网络,也都是为了解决复杂的非线性、不确定、不确定系统的控制问题的。

1-4 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統,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步;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。

1-5 关于“例”与“MATLAB 程序”

本书第 2 章至第 5 章大多数章节均配以“例”,“例”的编辑有以下五种情况。

- 1. [例 章号-节号-例号 M]:表示在光盘的 nncp(MATLAB 程序)中,有以“m”为“头”命名的程序,其扩展名为“.m”,它们是以 MATLAB 命令行编写的一种程序。如:[例 2-2-1M],对应的程序为 m221.m。
- 2. [例 章号-节号-例号 S]:表示在光盘的 nncp(MATLAB 程序)中,有以“s”为“头”命名的程序,其扩展名为“.mdl”,是应用 Simulink 中的模块(典型环节)编写的一类可视化程序,详见第 2 章 2-11 节。如:[例 4-6-2S],对应的程序为 s462.mdl。
- 3. [例 章号-节号-例号 MS]:表示在光盘的 nncp(MATLAB 程序)中,有以“ms”为“头”命名的程序,其扩展名为“.m”,是应用函数 gensim(),将在 MATLAB 工作空间中设计的网络生成相应的 Simulink 模型网络,详见 2-11 节。如:[例 2-11-1MS],对应的程序为 ms2bl.m。
- 4. [例 章号-节号-例号 G]:表示应用 GUI 设计神经网络,详见 2-12 节。如:[例 2-12-1G]。
- 5. [例 章号-节号-例号]:表示在光盘的 nncp(MATLAB 程序)中,不包含此种例的程序。如:[例 2-7-3]。

五种“例”在课件中,对应的演示文件(在 12、13、14 与 15 中)背景的颜色也不相同,以示区别。



图 1-8-1 神经网络控制系统的 Simulink 模型

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,能够接收并处理信息。人脑大约由 $10^{11} \sim 10^{12}$ 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)互连组成的网络,能接收并处理信息。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。

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 2-1-1 所示。

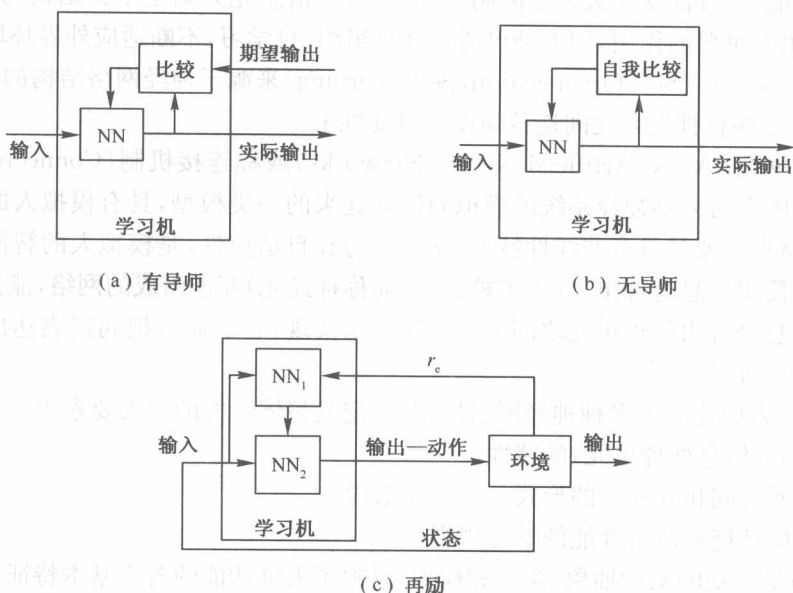


图 2-1-1 三种学习方式

① 有导师的学习(SL, Supervised Learning):如图 2-1-1(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,它是评价学习的标准。

② 无导师的学习(Nonsupervised Learning, NSL):如图 2-1-1(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,这是一种自组织过程。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 2-1-1(c)所示,它把学习看作试探评价(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_c (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,选择的原则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