

何玉彬
李新忠 著

SHEN JING WANG LUO KONG ZHI JI SHU

神经网络 控制技术 及其应用

JJ QI YING YONG

79
4



科学出版社

神经网络控制技术 及其应用

何玉彬 李新忠 著

科学出版社

2000

内 容 简 介

本书系统地介绍了神经网络控制的理论、方法及其在非线性系统建模和控制中的应用。内容主要包括两部分：一是神经网络控制技术的基本理论研究，提出了多种颇具特色而又行之有效的神经网络控制方法及其实现技术；二是从工程角度出发，介绍了神经网络控制系统的设计方法，给出了几个成功的神经网络控制技术的工程应用实例，并探讨了神经网络控制领域尚待解决的问题。

本书主要基于作者近年来的研究成果，并引用了国内外最新的文献资料，理论联系实际，突出工程特色。

本书可供高等院校、科研机构等从事自动控制、工业自动化、机械电子工程、人工智能和计算机应用等专业的师生和研究人员及相关领域的工程技术人员参阅使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

神经网络控制技术及其应用/何玉彬, 李新忠著. -北京: 科学出版社, 2000

ISBN 7-03-007982-5

I. 神… II. ①何…②李… III. 人工-神经网络-智能控制
IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 05393 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2000 年 11 月第一次印刷 印张: 14 1/4

印数: 1—4 000

字数: 317 000

定价: 20.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

序

让机器“听”懂人类语言，“看”清文字图像，“会”讲话是人类一直努力的目标，智能计算与识别则是力图实现人类智能，包括视觉、听觉、触觉等感觉能力和多媒体信息的非线性智能化处理。这也是跨世纪的信息科学与高技术的基本支撑点。由于它在国防与民用各个领域的巨大应用前景，因而受到世界各国的高度重视。

生命科学与工程科学的相互交叉、相互渗透和相互促进是近代科学技术发展的显著特点之一，而计算智能（包括神经网络、模糊逻辑和进化计算等）的迅速发展也体现了科学发展的这一特征和趋势。

从远古时代单细胞开始，历经环境变迁的磨难，生命经过了从低级到高级、从简单到复杂的演化之路，不但延续下来而且产生了人类这种有思想、有智能的高级生命体。人类找到了生命的最佳结构与形式，它不仅仅可以被动地适应环境，更主要的是它能够通过学习、模仿与创造，不断提高自己适应环境的能力。

自从 20 世纪后半叶以来，人类正在将其模仿的范围延伸到人类自身。神经网络是人类对其大脑信息处理机制的模拟，模糊系统是人类对其思维方式的类比。除了向自身结构学习以外，人类还可以向其自身的进化这一更为宏观的过程学习，以增强自己解决问题的能力，其代表性的方向就是进化计算。

人类之所以能够向其自身的进化学习以增强求解问题的能力，是因为自然进化过程本质上就是一个学习与优化的过程。这一优化过程的目的是使生命体达到适应环境的最佳结构与效果。

进化计算是一类模拟生物进化过程与机制求解问题的自组织、自适应人工智能技术。它起源于 20 世纪 60 年代由 J. Holland 对机器学习问题所发展的遗传算法 (Genetic Algorithms)、I. Recenbergl 和 H. P. Schwefel 用于数值优化问题的进化策略 (Evolution Strategies) 及 L. J. Fogel 对优化模拟系统所提出的进化规划 (Evolutionary Programming)。

这类技术 (算法) 的核心思想源于这样的基本认识：生物进化过程 (从简单到复杂，从低级到高级) 本身是一个自然的、并行发生的、稳健的优化过程。这一优化过程的目标是对环境的自适应性，生物种群通过“优胜劣汰”及遗传变异来达到进化 (优化) 的目的。依据达尔文的自然选择与孟德尔的遗传变异理论，生物的进化是通过繁殖、变异、竞争和选择这四种基本形式实现的，因而如果把待解决的问题理解为对某个目标函数的全局优化，则进化计算即是建立在模拟上述生物进化过程基础上的随机搜索优化技术。根据这一观点，遗传算法、进化策略与进化规则等均可理解为进化计算的不同执行策略，而它们分别从基因的层次和种群的层次实现对生物进化的模拟。

由于具有鲜明的生物背景和适用于任意函数类等特点，进化计算自 60 年代中期以来引起众多领域工作者的普遍关注，并被广泛应用于机器学习、人工神经网络训练、程序自动生成、专家系统的知识库维护等一系列超大规模、高度非线性、不连续、多峰函数的优化。

经过近几十年的努力,神经网络、模糊逻辑、进化计算、混沌与量子计算、自适应、自组织、混合系统等已成为计算智能这门新兴交叉学科的基本内容,它的理论与应用研究也达到了前所未有的广度和深度,并显示出巨大的发展潜力和应用前景。继20世纪90年代初美国和欧洲分别提出各自的“脑的十年计划”之后,1996年日本科学技术厅在总结它和通产省等1986年所提出的“人类前沿科学计划”十年实践结果的基础上,提出了“脑科学时代——脑科学研究推进计划”,并投入巨资,从而正式提出了“了解脑、保护脑、创造脑”的计划,并指出“了解脑就是了解人类本身”。如果说美国“脑的十年计划”重点是“保护脑”,而欧洲“脑的十年计划”则兼顾“保护脑”和“了解脑”两个方面,那么日本的计划则第一次把“创造脑”提到了与“保护脑、了解脑”并重的地位,这也是研发智能机的基础和必由之路。

神经网络控制的基本思想是从仿生学的角度,模拟人脑神经系统的运作方式,使机器具有人脑那样的感知、学习和推理能力。其实维纳早在《Cybernetics》一书中,就揭示了机器和生物系统所共同遵守的信息与控制规律,为人工神经网络的应用提供了理论依据。对控制科学而言,神经网络有如下一些特点:

- (1) 神经网络是本质的非线性系统,能够充分逼近任意复杂的非线性关系。
- (2) 具有高度的自适应和自组织性,能够学习和适应严重不确定性系统的动态特性。
- (3) 系统信息等势分布存贮在网络的各神经元及其连接权中,故有很强的鲁棒性和容错能力。
- (4) 信息的并行处理方式使得快速进行大量运算成为可能。

因此,神经网络在解决高度非线性和严重不确定性系统的控制方面有巨大潜力。目前,在神经网络控制领域已有成功的应用实例,它也成为智能控制发展的重要方向之一。

何玉彬、李新忠博士在多年研究工作的基础上,结合国内外这一领域的最新进展,撰写了《神经网络控制技术及其应用》一书。与国内外同类著作相比,本书着眼工程应用,将神经网络与电液伺服控制技术结合起来研究,不仅系统性好,而且将理论与实践有机地融合在一起,具有很好的可读性和适用性,加之作者写作认真,态度严肃,文笔流畅,使本书适于作大专院校高年级学生、研究生有关课程的教材,同时适于相关领域广大科技工作者参考。我相信,此书的出版将会对智能控制的发展及推广应用起到积极的推动作用。

焦李成

前 言

神经网络技术是 20 世纪末迅速发展起来的一门高技术。由于神经网络具有良好的非线性映射能力、自学习适应能力和并行信息处理能力,为解决未知不确定非线性系统的建模和控制问题提供了一条新的思路,因而吸引了国内外众多的学者和工程技术人员从事神经网络控制的研究,并取得了丰硕成果,提出了许多成功的理论和方法,使神经网络控制逐步发展成为智能控制的一个重要分支。

虽然在科学技术高度发达的今天,人类实践活动已拓展到许多空间和领域,但面对现代高度复杂的被控系统,现有的技术手段和方法无时不受到严峻的挑战。这迫使人们更加不可忽视人类大脑的高超控制作用。迄今为止,世界上最有成效的控制器还是人类自身。人脑所具有的学习、适应、模糊和并行信息处理以及直觉推理等多种智能是目前其他一切技术手段所难达到的。因此,研究人脑神经系统的运行机制,模拟人脑思维功能,通过新的方法和途径,实现对传统方法难以控制的复杂不确定性系统的控制,是控制理论发展的必然趋势。

神经网络控制的基本思想就是从仿生学角度,模拟人脑神经系统的运作方式,使机器具有人脑那样的感知、学习和推理能力。它将控制系统看成是由输入到输出的一个映射,利用神经网络的学习能力和适应能力实现系统的映射特性,从而完成对系统的建模和控制。它使模型和控制的观念更加一般化。理论上讲,基于神经网络的控制系统具有一定的学习能力,能够更好地适应环境和系统特性的变化,非常适合于复杂系统的建模和控制。特别是当系统存在不确定性因素时,更体现了神经网络方法的优越性。然而由于种种原因,目前神经网络控制大多停留于数学仿真或实验室研究阶段,而较少用于实际系统的控制。本书从工程角度出发,提出了多种有效的神经网络控制结构及其工程实现方法,并将其用于解决高精度电液伺服系统的控制问题。本书强调的重点是:(1)如何利用神经网络的学习能力,解决实际系统中的非线性和不确定性问题,使控制系统设计具有更强的适应性和鲁棒性;(2)如何实现神经网络在工程控制中的应用,并通过具体实例来说明神经网络方法能使系统性能得到明显改善。本书的撰写力求达到以下两个目的:对研究人员,提供神经网络控制领域的最新研究成果和未来有待解决的问题;对工程技术人员,通过几个工程应用实例来说明神经网络控制系统的设计方法及其实现途径。

由于神经网络控制是一个正在发展的领域,目前仍未建立一套较为完整的理论体系,理论和应用中还存在一些有待研究的问题,加之神经网络控制技术涉及的知识面宽,交叉学科多,应用领域广,神经网络的研究又日新月异,许多新的复杂现象不断地被人们认识和发现,因此本书的内容难以全面跟踪这一领域的进展情况,仅基于作者近年来的研究成果,根据作者的认识和体会,论述了运用神经网络技术实现对未知不确定非线性系统控制的一般理论和方法,以便为广大读者在从事神经网络控制研究和系统设计时提供一些有益的思路,期望起到抛砖引玉的作用。

本书内容主要包括两个部分：第一部分为理论和方法研究；第二部分为应用和实现研究。其中：

第一章简要介绍了神经网络控制技术的发展与现状，讨论了神经网络用于系统建模和控制的一般方法和结构。

第二章论述了神经网络控制技术的基本理论，给出了控制用神经元模型和常用神经网络结构，讨论了神经网络的逼近能力，分析了BP算法存在的缺陷，并提出了两种新的神经网络训练方法。

第三章讨论了利用神经网络进行复杂系统建模和辨识的可行性，给出了几种非线性系统辨识模型及神经网络实现方法，提出了神经网络在线自适应跟踪辨识方法。

第四章至第七章研究了未知不确定非线性系统的神经网络控制方法，包括：神经网络并行自学习鲁棒自适应跟踪控制、模型参考神经网络直接自适应控制、神经网络在线自学习模糊自适应控制及基于神经网络辨识的在线迭代学习控制等。证明了由神经网络控制器构成的闭环系统在工程意义上是全局稳定的，并通过仿真和实验证明了所提出的方法的有效性和实用价值。

第八章至第十一章给出了四种神经网络控制的应用实例，包括：电液伺服板簧试验系统的神经网络控制、不对称缸电液伺服系统的神经网络补偿非线性控制、液压系统压力脉动神经网络主动控制及大型结构试验系统的神经网络控制等。实验和应用结果表明，提出的控制系统具有良好的控制品质，使原有系统的性能得到了明显的改善。

第十二章给出了本书的一般性结论，并讨论了未来神经网络控制领域的研究课题。

本书的大部分工作是作者在西安交通大学攻读博士学位期间完成的。在此，作者首先要感谢导师闫桂荣教授、徐健学教授及何钺教授，同时要感谢西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室的徐立勤、张芝栋等同志，没有他们的支持、鼓励和帮助，本书将不会问世。本书的工作得到了国家自然科学基金和西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室开放基金的资助。本书第十章引用了邢科礼博士的部分研究成果，作者在此对邢博士表示衷心的感谢。

西安电子科技大学焦李成教授对本书进行了详细的审阅，提出了许多宝贵的意见和建议，并为本书作了序。作者借此机会对焦先生表示衷心的感谢和由衷的敬意。

在本书的写作过程中，作者还曾与王跃刚副教授、牟建华博士、施光林博士、汤志勇博士、刘艳秋硕士等进行过许多有益的讨论。作者也借此机会向他们表示感谢。

另外，作者还要感谢科学出版社的王淑兰副编审及有关人员对本书的出版给予的大力支持和付出的辛勤劳动。

由于本书内容涉及学科前沿，推陈出新快，加上作者学识、水平有限，难免存在错误和不足之处，殷切期望广大读者和同行给予批评指正。

作者

1999年5月

目 录

第一篇 理论与方法

第一章 绪 论	(1)
1.1 控制理论的发展与面临的挑战	(1)
1.2 神经网络技术的发展与现状	(3)
1.3 神经网络与系统建模和控制	(5)
1.3.1 神经网络建模	(6)
1.3.2 神经网络控制	(8)
1.3.3 当前神经网络控制的研究课题	(12)
1.3.4 神经网络与模糊控制的结合	(13)
1.4 电液伺服控制技术的发展与现状	(14)
1.5 本书的内容及章节安排	(16)
第二章 神经网络控制技术基础	(18)
2.1 控制用神经元模型	(18)
2.2 神经网络模型及其学习算法	(20)
2.2.1 MFNN 模型与 BP 算法	(20)
2.2.2 DRNN 模型与动态 BP 算法	(22)
2.2.3 复合输入 DRNN 模型及其训练	(24)
2.2.4 CMAC 网络模型	(25)
2.2.5 B 样条神经网络模型	(27)
2.3 神经网络的逼近能力分析	(29)
2.4 神经网络的训练与 BP 算法存在的缺陷	(31)
2.4.1 神经网络的训练	(31)
2.4.2 BP 算法存在的缺陷	(33)
2.5 增广 LPIDBP 学习算法	(34)
2.5.1 LPIDBP 学习算法的推导	(34)
2.5.2 仿真研究	(37)
2.6 全局寻优自适应快速 BP 学习算法	(39)
2.6.1 GCAQBP 学习算法的推导	(39)
2.6.2 GCAQBP 学习算法性能分析	(41)
2.7 本章小结	(42)
第三章 非线性系统的神经网络辨识	(44)
3.1 系统辨识的基本概念	(44)
3.2 非线性系统神经网络辨识的可行性	(45)
3.2.1 非线性系统辨识模型	(45)

3.2.2 非线性系统辨识模型的神经网络实现	(45)
3.3 非线性系统的神经网络辨识方法	(48)
3.3.1 概述	(48)
3.3.2 非线性静态系统的神经网络辨识	(50)
3.3.3 非线性动态系统的神经网络辨识	(54)
3.4 神经网络在线自适应跟踪辨识	(58)
3.4.1 辨识结构及方法	(58)
3.4.2 电液伺服系统仿真研究	(60)
3.5 本章小结	(62)
第四章 神经网络并行自学习鲁棒自适应跟踪控制	(63)
4.1 引言	(63)
4.2 跟踪控制问题描述	(64)
4.3 神经网络并行自学习鲁棒自适应跟踪控制器设计	(64)
4.3.1 控制器结构及工作原理	(64)
4.3.2 自适应神经网络模型 (ANNM) 及其训练	(66)
4.3.3 神经网络控制器 (NNC) 及其训练	(68)
4.3.4 运行监控器	(70)
4.3.5 鲁棒控制器 (RC)	(70)
4.3.6 NNPSLRATC 的算法实现及其特点	(71)
4.4 神经网络并行自学习鲁棒自适应控制系统的稳定性	(73)
4.4.1 并行自学习系统的反馈稳定性	(73)
4.4.2 鲁棒自适应跟踪系统的稳定性	(74)
4.5 仿真研究	(76)
4.5.1 控制对象	(76)
4.5.2 仿真结果	(77)
4.6 实验研究	(79)
4.6.1 控制对象	(79)
4.6.2 控制结果	(81)
4.7 本章小结	(82)
第五章 模型参考神经网络直接自适应控制	(83)
5.1 引言	(83)
5.2 广义 PID 神经网络直接自适应控制器设计	(85)
5.2.1 控制器结构及控制算法	(85)
5.2.2 仿真研究	(88)
5.3 模型参考混合神经网络直接自适应控制器设计	(92)
5.3.1 控制器结构及控制算法	(92)
5.3.2 仿真研究	(95)
5.4 本章小结	(96)

第六章 神经网络在线自学习模糊自适应控制	(98)
6.1 引言	(98)
6.2 神经网络在线自学习模糊自适应控制器设计	(99)
6.2.1 控制器结构及工作原理	(99)
6.2.2 神经网络控制器 (NNC) 及其训练	(99)
6.3 神经网络控制系统的能控性和稳定性分析	(103)
6.4 实验研究	(105)
6.4.1 控制对象及控制系统设计	(105)
6.4.2 实验结果	(106)
6.5 本章小结	(107)
第七章 基于神经网络辨识模型的在线迭代学习控制	(109)
7.1 引言	(109)
7.2 基于神经网络辨识的模型参考递推控制原理	(110)
7.3 神经网络在线迭代学习控制算法	(113)
7.3.1 迭代学习控制原理	(113)
7.3.2 神经网络在线迭代学习控制算法及收敛性分析	(114)
7.4 仿真研究	(116)
7.5 本章小结	(121)

第二篇 应用与实现

第八章 电液伺服板簧试验系统的神经网络自适应控制	(122)
8.1 引言	(122)
8.2 电液伺服板簧试验系统的数学描述	(123)
8.3 基于范数空间的稳定性分析	(125)
8.3.1 基本理论	(126)
8.3.2 位置闭环系统稳定性分析	(128)
8.3.3 力闭环系统稳定性分析	(131)
8.4 电液伺服板簧试验系统特性研究	(133)
8.4.1 静态特性试验	(133)
8.4.2 位置控制特性试验	(134)
8.4.3 力控制特性试验	(136)
8.5 神经网络自适应控制试验研究	(137)
8.5.1 位置伺服系统的神经网络控制	(137)
8.5.2 力伺服系统的神经网络控制	(140)
8.6 本章小结	(143)
第九章 不对称缸电液伺服系统神经网络补偿非线性控制	(144)
9.1 引言	(144)
9.2 基本理论	(145)
9.3 非线性系统反馈线性化设计	(147)

9.3.1	一般方法	(147)
9.3.2	非线性系统反馈线性化控制	(149)
9.4	不对称缸电液伺服系统反馈线性化跟踪控制	(150)
9.4.1	系统分析与设计	(150)
9.4.2	仿真研究	(152)
9.5	神经网络参数在线自适应补偿控制	(156)
9.5.1	电液伺服系统不确定参数神经网络在线补偿方法	(156)
9.5.2	仿真结果	(158)
9.6	本章小结	(159)
第十章	液压系统压力脉动神经网络自适应主动控制	(160)
10.1	引言	(160)
10.2	液压系统压力脉动主动控制原理	(161)
10.2.1	脉动波相消性干涉的原理和实现条件	(161)
10.2.2	液压系统压力脉动主动控制原理	(162)
10.3	自适应压力脉动主动控制系统模型	(164)
10.4	基于 B 样条神经网络的自适应压力脉动主动控制系统	(166)
10.5	液压系统压力脉动主动控制仿真研究	(168)
10.5.1	仿真系统设计	(168)
10.5.2	主通道模型为线性模型的仿真结果	(169)
10.5.3	主通道模型为非线性模型的仿真结果	(170)
10.6	试验研究	(172)
10.6.1	试验装置简介	(172)
10.6.2	试验结果及分析	(173)
10.7	本章小结	(175)
第十一章	大型智能电液伺服结构试验系统	(176)
11.1	工程背景	(176)
11.2	大型结构试验系统概述	(177)
11.3	电液伺服结构试验系统的研究现状与发展要求	(179)
11.4	大型智能电液伺服结构试验系统设计	(180)
11.4.1	神经网络智能伺服加载控制系统	(180)
11.4.2	数据采集与分析系统	(184)
11.4.3	电液执行机构	(187)
11.4.4	主要技术指标	(189)
11.5	实验研究	(189)
11.5.1	静力与协调加载试验	(189)
11.5.2	疲劳加载试验	(191)
11.6	应用实例	(194)
11.6.1	试验对象及要求	(194)
11.6.2	加载及测试系统设计	(195)

11.6.3 加载控制结果	(197)
11.7 本章小结	(199)
第十二章 结束语	(200)
12.1 一般性结论	(200)
12.2 未来的研究课题	(202)
参考文献	(205)

第一篇 理论与方法

第一章 绪 论

1.1 控制理论的发展与面临的挑战

控制理论与相对论、量子理论一起被认为是 20 世纪上半叶科学发展的三大飞跃,它是应社会发展的需要,在解决重大工程技术问题以及军事问题的实践中产生和发展起来的一门新兴学科,同时又受到人类社会已有的技术手段和知识水平的制约。经过几十年的发展,控制理论的应用和影响已经深入到社会生活的各个方面,使人类大大突破了自身能力的限制。在当今社会,可以说没有控制系统,就没有生产制造,就没有宇宙飞船甚至现代化的家用电器——简言之,就没有技术。控制系统就是使机器按期望目标运转的系统,一般需要通过反馈来进行行为调整和性能修正,因而也可以说,反馈的思想是控制理论的基石^[1]。

控制理论的发展大体上经历了经典控制理论、现代控制理论以及 20 世纪 70 年代后期提出和发展起来的非线性智能控制理论三个发展阶段。从时间上看,非线性智能控制理论体系的形成虽然较晚,但是个别思想和概念的提出却很早就有了。经典控制理论主要处理单变量常系数线性系统的控制问题,其典型特征是用传递函数来描述系统,在频域内进行分析和综合,完成镇定任务,采用的手段有 Routh-Hurwitz 稳定性判据、Nyquist 稳定性分析、Bode 图、稳定性裕量求解及串联、并联校正等,线性叠加原理是广泛而适用的。第二阶段是现代控制理论,更确切的说应当是多变量线性控制理论,它是对经典控制理论的精确化、数学化和理论化。现代控制理论利用状态空间建模理论,克服了经典控制理论仅能分析 SISO 系统的局限性,采用的分析手段是能控性/能观性理论、极大值原理、Lyapunov 稳定性理论、反馈镇定等。这些构成了现代控制理论的基础,并使控制由一门工程设计方法上升为一门新的科学^[2]。同时,为满足从理论到应用、在高水平上解决实际工程控制问题的需要,还发展了自适应控制、辨识与估计理论、卡尔曼滤波、鲁棒控制等学科分支。

经典控制理论和现代控制理论研究的是线性时不变系统的控制问题。然而,自然界和现实生活中的所有系统其实都是非线性的。非线性是一切动力学复杂性之源,正是由于非线性的作用,才孕育出大自然的万千气象、人类社会的风云变幻和人类思维的错综差异。非线性是绝对的、全局的;线性是相对的、近似的、局部的。我们平常认为的线性系统,实际上是对非线性系统的一种理想化或近似的描述^[3~6]。随着科学技术的不断发展,人们对控制系统品质的要求日益提高,对实际过程的分析日益精密,从而系统非线性特征的影响也就愈发突出了。与线性系统相比,非线性系统的显著特点是存在多平衡点、极限环、分歧与混沌等现象^[7~9],其运动行为与其初始状态、系统参数及输入量之间存在

着复杂的非线性关系,因此线性叠加原理将不再适用。

非线性是绝对的,因而为实现对系统的有效控制,就不能回避其中的非线性问题或者简单地进行线性化,而必须很好地加以处理和利用,以期改善系统的控制性能。然而,传统的理论和方法在解决这些问题时,已显得难以奏效。

应用需求是推动学科进步的最有效的手段。为解决上述问题,同时满足处理不断复杂的对象、完成不断复杂的设计、以及在不确定环境中实现对不确定过程的控制的需要,必须建立新的概念、模型,探索新的方法。非线性控制理论和智能控制理论就是在这一背景下逐步发展起来的,从而使自动控制理论进入了第三个发展阶段。

如果说古典控制理论、现代控制理论是对实际非线性系统的近似化、确定化处理,基于平衡点附近的控制行为,那么非线性控制理论则是在考查了比线性系统更“真实地”接近实际系统的数学模型的基础上进行的控制行为,它更注重处理系统的非线性、不确定性及参数突变等特性对控制性能的影响,系统的控制律是状态变量的非线性函数。

随着工程研究的深入,控制理论所面临的问题日益复杂多变,主要表现于控制对象、控制任务及控制目标的日益复杂化,系统的数学模型难以建立,这时智能控制则体现了较大的优势。通过对人脑思维方式的研究发现,人具备高度的概括、抽象、自学习、自我解答等能力。例如人骑自行车,要用机理模型来描述这一行为难度极大,而实际上我们也不必去分析人车一体化方程及其平衡条件,只要从反复的跌倒中爬起来继续训练就能学会骑车。智能控制就是以无模型为特征的更接近于人脑思维方式的一种控制理论,它是以知识信息为基础进行学习和推理,用启发式方法来引导求解过程,是含有复杂性、不确定性和模糊性且一般不存在已知算法的非传统数学公式化过程^[10~12]。智能控制设计通常以定性和定量结合的方法进行系统分析与综合,其主要优点是控制器的设计摆脱了系统模型的束缚,算法简单、鲁棒性强。采用这种智能方式可以简化设计过程,使人们从严格枯燥的数学推导中解脱出来,由必然王国向理想王国迈进。

目前,智能控制已形成多种方法,其中较具典型的有:专家控制、模糊控制和神经网络控制等^[13],并以它们为代表,经过短短一二十年的发展,给整个控制理论带来了无限生机与活力。

专家控制是一种基于知识的控制方法,它作为人工智能在控制领域的较早尝试,在解决某些复杂系统的控制问题上取得了令人满意的效果。但是这种基于知识的专家系统在知识获取、知识表达和推理方式上存在着固有的缺陷,如知识的来源主要靠专家经验、知识“瓶颈”、知识“组合爆炸”等,这使得专家控制方法在工程应用上受到限制。

模糊控制和神经网络方法在一定程度上避开了这个问题,而且它们表达信息和推理的方式更合乎人的思维特点。因而,模糊控制和神经网络控制更为许多控制领域的专家所重视。

自1965年美国加州大学自动控制专家 L. A. Zadeh 创立模糊集合理论以来,模糊理论的研究取得了许多重要的成果;特别是1974年英国的 Mamdani 首次用模糊逻辑及模糊推理成功地实现了对蒸汽机的自动控制,宣告了模糊控制历史的开始。自此,模糊逻辑控制的研究和应用得到了极大的发展^[14~17],并逐渐成为智能控制的一个重要分支。

模糊控制是利用模糊逻辑能用自然语言描述人的经验这一得天独厚的长处,将系统信息经过模糊化处理,通过模糊关系的推理合成,产生相应的模糊决策。在应用中,模糊

控制是以人对被控系统的控制经验来设计控制器的,故特别适用于那些难以建模或无法建模的被控对象。典型的模糊控制系统是由三模块结构构成的:模糊化、模糊规则合成推理和模糊判决。其核心是以自然语言表示的控制规则,易为人们所接受,且构造容易,鲁棒性强。

模糊系统设计中往往包含相当多的经验成分,这使得模糊控制系统性能的优劣在很大程度上取决于设计者的经验与实际情况的符合程度。由于经验是因人而异的,故模糊控制规则的优化是个重要问题,目前尚无一套完整的好办法来解决。以至于在一些模糊规则中,有时会产生控制的空挡。模糊控制过程是一种先对变量论域离散、量化,再实施推理、决策的过程。由于对语言变量值的分档不可能太细,从而造成模糊控制的精度较差。此外,模糊控制器对系统的一些参数不敏感,表明它具有良好的鲁棒性,但由于知识获取困难,使得模糊控制的适应能力有限。文献[17]将反向传播学习算法引入模糊逻辑系统中,从而实现了从观测的输入-输出数据中归纳出模糊规则,形成了稳定自适应模糊系统的概念,并提出了一套一般性的设计方法,使模糊系统的性能得到了明显的改善。为模糊控制在工程中的应用奠定了新的理论基础。

神经网络在控制领域受到重视主要归功于它的非线性映射能力、自学习适应能力、联想记忆能力、并行信息处理方式及其优良的容错性能^[18]。这些特点使得神经网络非常适合于复杂系统的建模与控制,特别是当系统存在不确定性因素时,更体现了神经网络方法的优越性。它使模型与控制的概念更加一般化。

1.2 神经网络技术的发展与现状

自从 McCulloch 和 Pitts 提出 MP 神经元模型以来,神经网络的研究已有 50 多年的历史,走过了一条曲折而不平衡的发展道路,几经兴衰。如今,神经网络研究又异军突起,进入一个新的发展时期,其应用研究几乎覆盖了所有的领域。

1943 年,心理学家 McCulloch 和数学家 Pitts 合作,提出了第一个神经模型(MP)^[19],从此开创了神经科学理论研究的时代。1949 年,心理学家 Hebb 通过对大脑神经细胞学习和条件反射的观察研究,提出了改变神经元连接强度的 Hebb 规则^[20],至今仍在神经网络模型中发挥着重要作用。作为人工智能的神经网络系统的研究则是从 20 世纪 50 年代末 60 年代初开始的。1957 年, Rosenblatt 提出了感知器(Perceptron)模型,试图模拟动物和人脑的感知和学习能力,并提出了引入隐层处理元件的三层感知器的概念^[21]。虽然他未能解决三层感知器的训练算法问题,但为一大类神经网络模型的研究提供了重要的方向。1960 年, Widrow 和 Hoff 提出了自适应线性元件(Adaline)模型及一种有效的学习方法 Widrow-Hoff 学习规则^[22]。从而在 60 年代,掀起了神经网络研究的第一次热潮。

由于神经网络的工作方式与当时占主导地位的以顺序离散符号推理为基本特征的人工智能(AI)大相径庭,因而引起了不少人的兴趣,同时在学术上也引起了很大争议。另外,随着研究的深入,人们在应用和实现方面也遇到了一时难以解决的难题。人工智能的创始人之一 Minsky 和 Papert 潜心数年,从数学上对以感知器为代表的网络系统的功能和局限性进行了深入的研究,并于 1969 年出版了颇具影响的《Perceptron》一书^[23],得出了悲观的结论。由于 Minsky 在学术界的地位,他的这些观点使许多神经网络研究者丧

失了信心。另一方面,当时数字计算机的发展正处于鼎盛时期,基于数字计算机的人工智能得到了迅速发展并取得了显著成就。整个学术界陶醉于数字计算机的成功之中,从而掩盖了发展新型模拟计算机和人工智能技术的必要性和迫切性,使神经网络的研究走向低潮。

难能可贵的是,在此期间,仍有不少学者在极端困难的条件下致力于神经网络的研究。1969年, Grossberg 等提出了自适应共振理论(ART)^[24]; 1972年 Kohonen 提出了自组织映射理论^[25,26]。与此同时,神经心理学家 Anderson 提出了 BSB 模型^[27]; 日本学者 Fukushima 提出了认知机(Necognitron)理论^[28~30]; Werbos 提出了误差反传(BP)理论^[31], Widrow 发展了 Adaline 模型^[32]; Amari 则致力于有关神经网络的数学理论的研究^[33]。这些开创性的研究作为神经网络的进一步发展奠定了理论基础。

70年代后期,研究并试图模拟视、听觉的人工智能专家发现,尽管计算机在大型复杂计算方面显示出巨大威力,但却很难“学会”人们习以为常的知识和经验。此外,工程实践中的问题变得越来越复杂而难以处理,如知识的组合爆炸、信息的模糊性、计算的非线性等。这些都迫使人们思考:智能问题是否完全可以由人工智能中的逻辑推理规则来描述?人脑的智能是否可以在机器中重现?

1982年,美国加州工学院物理学家 Hopfield 提出了 HNN 模型^[34],使神经网络的研究有了突破性进展。他通过引入“能量函数”的概念,给出了网络的稳定性判据;此外, HNN 的电子电路实现为神经计算机研究奠定了基础^[35,36],同时开拓了神经网络用于联想记忆和优化计算的新途径^[37],引起了工程技术界的普遍关注,从而掀起了神经网络研究的又一热潮。接着, Feldman 和 Ballard 提出了连接网络模型^[38],指出了传统的人工智能“计算”与生物“计算”的不同点,并给出了并行分布计算的处理原则; Hinton 和 Sejnowskii 借助统计物理学的概念和方法,提出了 Boltzmann 机神经网络模型^[39,40],并采用模拟退火技术进行网络的训练,保证了整个网络系统处于全局稳定点。

如果说 Hopfield 点燃了神经网络复兴的火种,那么 Rumelhart 和 McClelland 以及他们领导的 PDP 小组则将这燎原之火燃烧得更加耀眼夺目。他们致力于认知微观结构的探索,提出了 PDP 理论^[41],同时发展了多层网络的 BP 学习算法,不仅为解决多层网络的学习问题开辟了一条成功之路,而且客观上将神经网络的研究推向了高潮。这一时期,随着大量开拓性研究工作的深入开展,数百种网络结构、学习算法应运而生^[42,43],硬件实现的研究工作也在积极开展^[18],神经网络理论的应用研究已经渗透到各个领域,并在智能控制、模式识别、自适应滤波和信号处理、非线性优化、传感技术和机器人、生物医学工程等方面取得了令人鼓舞的进展^[43~48]。这些成就加强了人们对神经网络系统的进一步认识,引起了世界许多国家的科学家、研究机构及企业界人士的关注,也促成了不同学科的科学工作者联合起来,从事神经网络理论、技术开发及应用与实现的研究。国际学术交流日趋频繁,1987年6月 IEEE 在 San Diego 召开了第一届神经网络国际会议,国际神经网络学会随之成立;1988年《神经网络》杂志创刊;1990年 IEEE 神经网络会刊问世;此外,各种学术刊物的神经网络特刊、专辑不断涌现,研究成果层出不穷。

我国的神经网络研究起步较晚,始于80年代末,主要在应用领域开展了一些基础性工作。在国际神经网络热潮的带动下,研究工作受到很大重视。1989年召开了全国第一届神经网络-信号处理会议;1990年召开了第一届神经网络学术大会。从此研究日趋热

烈,各种学术刊物和学术会议上关于神经网络及应用的文章大量涌现,研究队伍日益壮大,并逐渐在国际上占有一定的地位,1992年国际神经网络学会和IEEE联合学术会议在北京召开即为例证。

由此可见,进入90年代以来,神经网络的研究进入了一个空前高涨的时期。多数研究集中在网络结构、学习算法和实际应用三个方面^[46~48]。例如对静态网络,提出了许多网络模型,如BP网络、正交函数网络、径向基函数RBF网络、样条函数网络^[49]、子波函数网络^[50]等模型。从应用角度看,它们各有千秋。BP网络有很强的生物背景,虽与函数逼近理论略有差异,但是其卓越的输入输出映射特性在多变量函数逼近方面具有很强的优势。BP网络是目前应用最为广泛的一种网络模型,在理论上它是一种全局网络,要求使用全局信息,由于受到算法的制约,实际上只能得到局部解。径向基函数RBF网络既有生物背景,又与函数逼近理论相吻合,同样也适应于多变量函数逼近,只要中心选择得当,即可获得最优解。当然,其中的关键和难点也正是中心点集的选取。正交多项式函数网络有比较完整的理论基础,但用于多变量函数逼近时网络神经元个数膨胀较快。样条函数网络在学习时只需要局部信息,因而在学习算法的并行性、收敛速度等方面有一定的优势,但其定义域中对子域网的划分非常复杂,因而增加了使用的难度。此外,实时控制要求网络结构简单,计算收敛快。在这一点上动态网络的优势较大。比较典型的动态网络有Hopfield网络、ART网络和动态递归网络等。动态网络虽然只是单层神经元网络,但由于其内部的反馈作用,可望用较小的网络结构来实现系统的复杂的行为,所以比较适合非线性动态系统的辨识与控制^[51~54]。

应用神经网络时,人们总期望它有非常快的全局收敛特性、大范围的映射泛化能力和较少的实现代价。然而,目前神经网络的并行计算能力都是通过计算机虚拟实现的,大多数情况下仍是一种串行工作模式(相对实时控制任务)。因此,在解决上述问题方面,由于受到当前硬件发展的限制,人们仍将主要精力集中在神经网络结构和快速学习算法的研究上^[55]。

尽管近几年来,神经网络理论及应用研究都取得了可喜的进展,但应看到,人们对生物神经系统的研究与了解还很不够,提出的神经网络模型,无论从结构还是规模上,都是对真实神经网络的一种简化和近似。神经网络的理论仍有许多缺陷,尚待进一步发展与完善。因此,要使神经网络走出实验室,真正用于工程实践中,在诸多领域还有许多工作要做。

1.3 神经网络与系统建模和控制

80年代初,神经网络研究的复兴,也带来了神经网络控制研究的迅速发展。尤其是从1986年Rumelhart的突破性研究以来,在控制领域,将神经网络与传统控制技术相结合也取得了许多令人鼓舞的结果^[56~65]。研究方法不断涌现,理论探索和工程应用并驾齐驱,同时也引起了人们对神经网络控制的鲁棒性和稳定性的极大关注^[66~68]。在这个过程中,Hunt^[56],Narendra^[59]和Kosko^[58]等人在神经网络控制方面做了大量开拓性的工作。这些先驱者们的工作给神经网络控制理论的发展与应用奠定了坚实的基础,具有重要的里程碑的意义。