

反馈式神经网络 智能控制

FANKUIISHI
SHENJING
WANGLUO
ZHINENG
KONGZHI

吴启迪 汪 镭 著

上海科技教育出版社

反馈式神经网络 智能控制

吴启迪 汪 镭 著

上海科技教育出版社

责任编辑 李向红 装帧设计 童郁喜

反馈式神经网络智能控制

吴启迪 汪 镭 著

世纪出版集团 出版发行
上海科技教育出版社

(上海冠生园路 393 号 邮政编码 200235)

www.ewen.cc www.sste.com

各地新华书店经销 常熟华顺印刷有限公司印刷

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 7-5428-3486-X/TP·45

开本 850×1168 1/32 印张 8 字数 172 000

印数 1-1 000 定价:24.00 元

前 言

人工神经网络这个名词,已经不算很新了。对其理论和应用领域的全球性研究热潮,自其复兴期开始,已经过了 20 多年了。在此期间,相继提出了各种神经网络模型,同时又发展了大量的智能学习算法。并且其具体应用已很快渗透到计算机图像处理、语音处理、优化计算、智能控制等相关领域,研究进展是不容忽视的。

可以说,人工神经网络的研究现在正在转入高潮期的快速稳定发展阶段。在理论研究方面,正在进一步深入,并发展新的网络数理理论;在应用研究方面,正在进一步进行其软件模拟和硬件实现研究,并迅速扩展其应用领域,以取得更广泛的成果。

连接主义的口号正是出现于人工神经网络研究的鼎盛时期。它的提倡者认为,这种模拟生物系统连接的智能处理模式能够优于其他一切原有的人工智能模式。而符号主义的研究则直接源于传统的人工智能研究领域。自 19 世纪 70 至 80 年代,人工智能的典型模式——专家系统模型得到迅速发展之后,有一些人工智能领域的研究人员甚至提出,基于符号表示和符号推理的专家系统模式能够替代一切现存的智能系统,通过符号化的处理模式达到一切智能模拟的目的,甚至能完全做到对人力的替代。这在当时,甚至现在看来,都应该是有些不切实际的。事实上,具有冷静的逻辑思维能力和辩证唯物主义观点的研究人员都知道,一切客观存在的事物都有其内在的规律和特点,也有符合其生存和运行的典型环境,用其中的一种来完全替代另一种显然是不可能的。

这里,我们姑且不论这两种研究思路各自的优劣,我们暂时只能凭自己的兴趣和努力,按照其中的一种思路,对其中的一种典型

2 前言

模型进行较为系统的研究。

多层前馈式神经网络的非线性拟合特性往往是控制及应用领域相关研究人员最为关注的特性。而我们的研究则试图突破神经网络智能控制的多层前馈模式框架,利用反馈式神经网络的优越特性,将其引入系统的参数辨识及自适应控制。在我们近年来持续进行的神经网络系统智能控制理论及应用研究中,所采用的是一种典型的单层、平面式反馈神经网络模型——Hopfield 神经网络。通过本书的总结,也许读者们可以看出,我们的研究领域不可谓广,也不可谓深,但我们的研究团体也许可算是尽力而为了。如果我们所得结果能够对相关领域的研究人员有一定参考价值的话,这将是我们的最大快乐。

在此,本书作者要特别感谢课题组的张燕、康琦等研究生,他们参与了本书具体综述材料的检索和书稿的整理校对工作;另外还要感谢上海科技教育出版社的同志们,没有他们的努力,本书是不会这么快就呈现在读者面前的。

今天是植树节,如果说该书中的思想可比为一颗不成熟的种子,由作者投入相关领域的研究土壤中的话,不知到明年春暖花开时,能否经广大读者的培育而有大树的出现?

吴启迪

作者于 2004 年 3 月 12 日

本书相关研究及出版得到国家自然科学基金项目(60104004,70271035,79970030)和上海市科委启明星计划项目(03QG14053)资助。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 人工神经网络理论的研究简史及标志性研究成果	3
1.2.1 初创期	4
1.2.2 初始兴盛期	4
1.2.3 低潮期	5
1.2.4 复兴期	5
1.2.5 高潮期	6
1.3 符号主义和连接主义	7
第 2 章 人工神经网络的统一描述及典型结构	9
2.1 人工神经元的统一描述	9
2.1.1 加权求和器	9
2.1.2 线性动态系统	10
2.1.3 非动态的非线性函数	12
2.2 人工神经网络连接权的作用	13
2.3 典型人工神经网络结构	14
2.4 静态多层前馈网络	16
2.5 动态网络	18
2.5.1 Hopfield 网络	18
2.5.2 Cohen - Grossberg 定理	20
2.6 其他神经网络结构	22
2.6.1 模拟退火和 Boltzmann 机	22

2 目录

2.6.2	横向连接	24
2.6.3	小脑模型控制器	25
2.6.4	细胞神经网络	26
第3章	人工神经网络的学习模式	27
3.1	静态神经网络的学习	27
3.1.1	非动态单层网络结构	27
3.1.2	非动态多层网络	29
3.1.2.1	反向传播算法	30
3.1.2.2	反向传播的控制理论解 释	33
3.1.2.3	用静态网络表示时域过 程	34
3.2	动态神经网络的学习	34
3.2.1	动态行为学习	35
3.2.2	给定点学习	35
3.2.3	轨迹的学习	37
3.2.3.1	时域反向传播算法	37
3.2.3.2	前向传播	40
3.2.3.3	映射学习、辨识和最优控 制	42
第4章	人工神经网络在控制领域的应用概述	45
4.1	神经网络和控制的对应关系	45
4.2	神经网络适用于控制领域的主要特征	47
4.3	人工神经网络在控制系统中的应用模式 概述	51
4.3.1	系统的模拟和辨识	51
4.3.2	充当各类控制器	52

4.4	人工神经网络在传动控制领域中的应用	
	概述	54
4.4.1	监控	54
4.4.2	故障分析与诊断	55
4.4.3	自适应控制	55
4.4.4	参数辨识和外在特性拟合	56
4.4.5	与其他智能控制方法相结合的自适应控制	57
第5章	人工神经网络在控制领域中的应用模式	59
5.1	神经网络在系统建模中的应用	59
5.2	神经网络在系统辨识中的应用	62
5.2.1	基于前馈模型的辨识	63
5.2.2	基于逆向模型的辨识	65
5.3	基于神经网络的系统控制	68
5.3.1	监督控制	68
5.3.2	直接逆模控制	69
5.3.3	模型参考控制	69
5.3.4	内模控制	70
5.3.5	预测控制	71
5.4	其他应用	72
5.4.1	系统辨识	74
5.4.2	最优决策控制	76
5.4.3	自适应线性控制	77
5.4.4	运用通用查询表的自适应控制(增强型学习控制)	78
5.4.5	增益规划	79
5.4.6	滤波及预测	79

第 6 章 基于反馈式人工神经网络的智能控制	81
6.1 研究目的	81
6.2 反馈式人工神经网络的类型综述	82
6.2.1 全反馈神经网络	82
6.2.2 部分反馈网络	84
6.2.2.1 Elman 网络	84
6.2.2.2 Jordan 网络	86
6.2.2.3 混合网络结构	87
6.2.2.4 多层反馈 RNN 网络	87
6.3 基于 Hopfield 人工神经网络的智能控制综述	89
6.4 我们的研究思路 and 主要研究结果	99
6.4.1 研究思路	99
6.4.2 主要结果	101
第 7 章 基于 Hopfield 神经网络的线性系统参数辨识方案	103
及应用研究	103
7.1 引言	103
7.2 Hopfield 人工神经网络的数学模型及其收敛	105
特性	105
7.3 基于 Hopfield 神经网络的线性系统参数辨识	108
7.4 考虑传感器特性的神经网络参数辨识方案	111
7.5 神经网络辨识方案在绕线式异步电机传动	115
系统参数辨识中的应用	115
7.5.1 交流异步电机传动系统解耦动态模型	115
的得出	115
7.5.2 用 Hopfield 神经网络进行绕线式异	117
步电机传动系统的参数辨识	117

7.6	神经网络辨识方案在直流传动系统参数辨识中的应用	126
7.7	神经网络辨识方案在鼠笼式电机传动系统参数辨识中的应用	131
第 8 章	一种能规划被控系统动态过程的 Hopfield 神经网络控制器应用研究	139
8.1	引言	139
8.2	Hopfield 神经网络控制器用于被控系统的动态过程规划	141
8.3	神经网络规划控制器在直流传动系统控制中的应用	143
8.3.1	传统的双闭环直流调速控制系统	143
8.3.2	保留电流内环的神经网络速度规划控制	144
8.4	神经网络规划控制器在交流传动系统控制中的应用	151
8.4.1	基于神经网络规划动态的交流传动系统励磁控制	152
8.4.2	基于神经网络规划动态的交流传动系统速度控制	154
8.5	具有在线参数跟踪功能的双神经网络自适应规划控制器在传动控制中的应用	159
8.6	实验方案	165
8.6.1	总体硬件框图	167
8.6.2	总体软件框图	170
第 9 章	基于 Hopfield 神经网络的模型参考自适应控制器及应用研究	173
9.1	引言	173

9.2	模型参考自适应控制的基本框架	176
9.3	用 Hopfield 神经网络实现模型参考自适应 控制	179
9.4	基于 Hopfield 神经网络的模型参考自适应 控制器在直传动系统控制中的应用	182
9.5	基于 Hopfield 神经网络的模型参考自适应 控制器在交流传动系统控制中的应用	189
9.5.1	交流传动系统的神经网络模型参 考励磁控制	189
9.5.2	交流传动系统的神经网络模型参 考速度控制	194
9.6	具有参数在线跟踪功能的双神经网络模型 参考自适应控制器在传动控制中的应用 ..	200
第 10 章	神经网络智能控制展望	207
10.1	有待研究的课题	207
10.1.1	系统理论	208
10.1.1.1	稳定性	208
10.1.1.2	持久激励和收敛性问 题	208
10.1.1.3	鲁棒性	209
10.1.2	网络理论	209
10.1.2.1	合适的应用范围	209
10.1.2.2	网络结构	209
10.1.2.3	结构学习	210
10.1.2.4	动态系统	210
10.2	Hopfield 神经网络适用于控制系统的特征 分析	210
10.2.1	在被控对象的建模和辨识方面 ..	211

10.2.2 在控制器的鲁棒性设计方面	212
10.3 今后进一步的工作	213
参考文献	217

第1章 绪论

1.1 引言

人工神经网络理论的研究是当前许多工程研究领域的热点话题,它的应用领域非常广泛,仅在与工业自动化相关的领域中,如模式识别(Narendra et al. 1990; Cooper et al. 1992)、信号处理(Tank et al. 1986)、知识工程、专家系统、优化组合、智能控制(Narendra et al. 1992)等方面,已经有许多神经网络应用成功的论文报道。另外,许多非自动化工程领域,如应用声学、气象预报、情报分类、工程力学、土木工程、建筑结构等也开始注意到了人工神经网络这一有力的工具,并已逐步应用它来解决各类工程问题(Poggio et al. 1990; Raol et al. 1996; Delgado et al. 1995; Lippman et al. 1987; Antsaklis 1995)。

没有一个在控制系统领域工作的人会意识不到关于人工神经网络专题的论文、杂志、会议和国际会议数量的增长。这清楚地表明了大量学者正在对与神经网络有关的概念发生兴趣,并希望将相关的算法用于各种应用领域。控制系统已成为一种令人关注的应用领域。

就像其他发展领域(例如自适应控制和专家系统等)一样,在研究过程中可能会出现两种极端的观点,其中的任何一种观点都会对学科发展造成阻碍。第一种这样的观点是不加考虑地接受新事物,或者新概念和新名词,并且不科学地加以应用。Hunt 等(1992)在其所发表的综述性论文中对其有十分形象的描述:

这就产生了这种形式的论文:“X 是近年来的热门话题,因此

可以替代其他所有的方法,我们将其应用于某种控制器之中,得到了X控制器,这种控制器被证明是最好的控制器,我们对其作了仿真,得到了引人注目的结果。”这里,X是自调整、专家系统、人工神经网络或任何其他热门话题。这种论文倾向于用拟人化的评论来说明成功的显著性。

当然,第二种极端的观点是将这些发展领域当作纯粹的夸张加以丢弃,不准备应用它们。

如果我们想在任何研究领域取得进展的话,这些极端的观点都必须加以避免。相反,需要用已有的成熟技术对这些新观点加以理性的评估。必须避免两种极端的态度,并需要切实地引导一条中间途径,或者说是辩证的途径,使新观点和已有的理论加以融合,这样才能得到真正的(而不是虚幻的)进展。

人工神经网络理论为什么能在如此众多的工程研究领域获得关注,并且能取得如此多的成功应用呢?尤其是,为什么自动控制研究领域对其如此关注?这就是本章的论述着力想说明的问题。作为一个合格的工程研究人员,我们尤其需要避免的是在头脑中产生下列公式:

因为“该项理论是当前的时髦话题,且论文相对较多”。

所以“我的研究中也应用该项理论”。

如果这样,我们所注意到的就仅仅是该项热门理论的名词本身,而不是该理论能获得成功应用的实质所在了。

作为智能控制领域的研究人员,作者很自然地关注到了人工神经网络的动态收敛特性及反馈特性。但是,目前流行的各种多层前馈式神经网络模型及其运算代价较高的学习算法在此领域并不具有很好的特征。随着作者研究工作的深入开展,我们的注意力就逐步集中到了具有动态反馈自收敛特性的反馈式神经网络(如Hopfield神经网络)上了。经过多年的系统研究,我们充分证明了这种神经网络在控制领域的适用特征,同时也取得了一些相

关的理论及仿真实验结果,最终导致了此书的诞生。

人工神经网络的研究最初起源于信号处理研究领域,似乎很难直接为控制领域的研究人员所用。而那些读过 Wiener 的著作《控制论》的人 would 知道,控制、信息和神经学科在控制论的范围内一度被看成是同一个主题。但从那时起,计算科学(包括人工智能)及神经生物学趋向于沿各自的不同方向发展,这就阻碍了对各方向所取得的研究成果进行交流。尤其是各方向中不同的术语和注释,现在已经成了进行有效思想交流的障碍。

我们必须致力于为正在控制系统领域工作的研究人员去除这一障碍,用控制工程师所熟悉的语言和符号来给出人工神经网络的基本思想和技术。这有两方面的好处,既能使这种技术更易被控制工程师接受,又能使控制系统的知识应用于人工神经网络领域。

本章力图从人工神经网络的研究历史出发,详细论述其适用于控制工程领域的主要特征,并针对当前自动控制系统所遇到的难点问题,说明为什么人工神经网络理论能在其中获得如此广泛的关注。

1.2 人工神经网络理论的研究简史 及标志性研究成果

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)这一名词,是相对于生物学中所说的生物神经网络系统而言的。它的提出者的目的就在于用一些简单的数学模型来对生物神经网络进行描述,并在一定的算法指导下,使其能在某种程度上模拟生物神经网络所具有的智能行为,解决用传统算法所不能胜任的智能信息处理和智能计算问题(焦李成 1990, 1993; Hunt et al. 1992)。

人工神经网络的研究始于 1943 年,至今已经历了 50 多年的漫长历程。它的研究并不是从一开始就受到广泛关注的,而是经

历了一条从兴起到萧条,又从萧条到兴盛的曲折发展道路。具体说来,大致可分为以下几个阶段。

1.2.1 初创期

由心理学家 W. S. McCulloch 和数学家 W. Pitts 于 1943 年所提出的 M-P 模型,一般被公认为是神经网络研究的开创性成果。该模型研究的是用逻辑的数学工具来把客观事件用形式神经元进行表达。该模型类似于现在的阈值单元模型,但是其连接权是不作调整的。该模型的提出不仅具有开创意义,还为以后的研究工作提供了一定的形式化依据。

该段时期的另一重要成果是由心理学家 D. O. Hebb 所提出的神经元之间突触强度的调整规则假说。他认为神经网络学习过程的变化体现为网络神经元之间突触连接权重的变化,而连接权的强度调整应正比于两个互连神经元之间激活值输出的乘积,这就是有名的 Hebb 规则。它是 Hebb 借鉴对大脑神经细胞、人类学习行为和条件反射的观察研究的成果而提出的。该规则至今仍在各种神经网络模型中起重要作用。

该段时期的神经网络理论研究是探索性的,但同时也是开创性的。许多成果至今仍对神经网络的理论研究有着重要影响。

1.2.2 初始兴盛期

该段时期的神经网络理论研究基本上确立了从系统的角度研究人工神经网络的基础。其代表性的研究成果是由 F. Rosenblatt 于 20 世纪 50 年代末所提出的感知器(Perceptron)模型。这是历史上第一个具有完整意义的神经网络模型,该模型已初步具备了并行处理、分布式存储和学习等神经网络的一些基本特征,并给出了二层感知器的收敛定理证明。

由 B. Widrow 和 M. E. Hoff 于 20 世纪 60 年代初所提出的自适应线性单元(Adaline)网络在自适应系统,如自适应滤波、预测和模式识别等的研究中得到了很好的结果。这是一种连续取值的线

性网络模型,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理论完全不同。它的提出引起了许多研究者的兴趣。在该段时期,人工神经网络的研究开始受到人们的重视,研究工作进入了初始的兴盛时期。

1.2.3 低潮期

由于以逻辑推理为基础的人工智能理论和 Von Neumann 型数字计算机正处于全盛的发展时期,掩盖了发展新型智能计算理论和新型智能技术的必要性。同时也由于处于发展初始阶段的神经网络理论还有一定的缺陷,使人工神经网络理论研究走入了一个缓慢发展的低潮阶段。其标志是著名的人工智能学者——美国麻省理工学院的 M. L. Minsky 和 S. A. Papert 所著的 *Perceptron* 一书的出版。书中研究了以 Perceptron 模型为代表的神经网络,在数学上作了深入研究,指出了其局限性,证明了单层感知器只能用于线性问题的求解,而对于即使是简单的“异或”这样的非线性问题便无能为力,并指出还不能从理论上证明将单层感知器网络扩展为多层的意义所在。实际上,该论点的缺陷在于未用辩证思维的模式来思考问题,现在我们已经知道,解决这一问题的方法很简单,只要将神经网络的层数增加即可。

但即使处于低潮期,神经网络的研究并未终止。在此期间所提出的自组织映射理论、自适应共振理论和神经认知机模型等都对以后的神经网络研究产生了重大的影响。

1.2.4 复兴期

由于神经网络研究者取得的突出成果,同时也由于传统的人工智能理论和 Von Neumann 型计算机在许多智能信息处理问题上遇到了挫折,另外由于科学技术的发展为人工神经网络的物质实现提供了基础,促使人们将人工神经网络作为未来新一代智能计算机的实现模式之一加以研究。

该阶段的标志之一是美国加州理工学院的生物物理学家 J. J.