



电力新技术丛书

ELECTRIC POWER NEW TECHNOLOGY SERIES

人工神经网络原理 及其应用

陈允平 王旭蕊 韩宝亮 编著



中国电力出版社

电力新技术丛书

人工神经网络原理 及其应用

陈允平 王旭蕊 韩宝亮 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书论述人工神经网络的基本单元、网络结构、几种常用的人工神经网络的算法及其在电力系统中的应用,全书共分九章。前五章介绍人工神经网络的基本原理,对人工神经网络的生物背景、模型、算法进行了介绍,后四章介绍人工神经网络在电力系统负荷预报、稳定分析、系统辨识几个重要领域中的应用,以期抛砖引玉,使人工神经网络这一智能技术能在电力工业中获得更广泛的应用。

本书可供电力工程技术人员参考,也可作为“电气工程及其自动化”专业本科高年级学生和有关专业研究生的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

人工神经网络原理及其应用/陈允平,王旭蕊,韩宝亮编.
-北京:中国电力出版社,2002

(电力新技术丛书)

ISBN 7-5083-1025-X

I. 人… II. ①陈… ②王… ③韩… III. 人工神经网络 IV. TP183

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第026873号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

涿州涪林印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2002年8月第一版 2002年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 7.625印张 166千字

印数 0001—3000册 定价 14.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

《电力新技术丛书》出版说明

我国电力工业的发展取得了举世瞩目的成就,从1978年到1997年的19年中装机容量及发电容量连续上两个台阶(1987年装机容量达1亿kW及1995年装机容量达2亿kW),到1996年底已居于世界第2位。电力工业的领导者向我们提出了建“一流电网”的号召,针对当前两个根本性转变的关键时刻,提出要进行由计划经济体制向具有中国特色的社会主义市场经济体制转变的第二次创业。其目标就是要保持电力工业持续、快速、健康地发展和电力供给与需求的平衡,从而保证国民经济的发展和社会的进步以及人民生活水平的日益提高。为达到建成“一流电网”的目的,必须有一流的人才,用一流的技术,并且得到各行业的关心、支持和理解。本套《电力新技术丛书》即是用深入浅出的叙述方法介绍有关一流电网的新技术。希望关心这些问题的有关人员可以用较短的时间理解这些问题的概要,加深对这些问题的关注和支持。

本丛书的作者们都是从事所写专题多年的工作者,并在该专题领域有开拓性的贡献。他们出于“甘为人梯”的想法,把自己的体会及资料尽可能深入浅出地写出,希望读者能用最少的投入,掌握作者的所知所得。

本丛书包括一些具有现实意义和广阔应用前景,并在国际上或国内处于前沿地位的高新技术。例如微机继电保护、电力网中的谐波、电网调度员培训模拟(DTS)、人工神经网络原理及其应用、配电系统自动化及其发展、面向对象设计的

开放式能量管理系统、模糊数学在电力系统中的应用、电力电子学在电力系统中的应用——灵活交流输电系统、直接法稳定分析、无功补偿的矢量控制等，读者可以根据需要与可能选用。

本丛书的宗旨是用读者容易理解的体系和叙述方法，深入浅出、循序渐进地就各专题题目的引出，专题的基本原理和理论及对电力系统的影响进行简要论述，并对专题的应用领域和前景及可能产生的效益作出评述。

本丛书的读者对象为：科研、教学、生产第一线的电力工程技术人员，特别是工作五年左右的年轻工程师及大、中专院校有关专业的学生。由于科学技术的飞速发展以及我们的水平有限，丛书肯定会存在许多不足，丛书的书目和内容也应当不断发展和更新。我们热诚地希望得到社会各界和广大读者的批评指正。

王平洋 周孝信

前 言

由于计算机技术、线性科学、生物神经科学以及其他相关学科的发展,近年来人工神经网络技术无论在理论上还是在实际应用上都取得了迅速发展,受到许多行业的科研工作者和工程技术人员的关注,成为一门发展迅速的交叉学科,取得了令人瞩目的成果。

电力行业历来就是新技术、新理论大有用武之地的一个行业,人工神经网络也毫不例外地在电力系统中找到了自己的位置,已经用到了电力系统的几乎所有领域,包括电力系统计算(如短路电流计算、网损计算等),安全稳定分析,电力系统规划(如电网规划、开停机规划、电容器投切规划等)。而且人工神经网络技术与其他理论和技术互相交叉、渗透,形成更有力的技术手段,可望解决许多传统技术感到困难、甚至无能为力的问题,表现出很好的应用前景。

《人工神经网络原理及其应用》一书是想向电力系统中的工程技术人员、高等院校有关专业的研究生和大学高年级学生介绍人工神经网络及其在电力系统中的应用。考虑到已有不少介绍人工神经网络基本原理的书籍问世,因此本书只是简要地介绍了人工神经网络原理,重点介绍人工神经网络在电力系统的应用。而且希望介绍的面尽可能广一些,内容尽可能新一些。限于篇幅本书对各个具体应用不可能介绍得十分详尽,但也会使读者对于人工神经网络在电力系统中的应用有一个较全面的了解,起到抛砖引玉的作用。

鉴于人工神经网络是一门发展迅速、应用广泛的新的边

沿学科，涉及到电力系统的各个领域，较通俗、全面地介绍其原理及在电力系统的最新应用是作者们的愿望，但终因涉及面很广，几乎涉及到电力系统科学的所有领域，加之人工神经网络的理论与应用发展又极为迅速，使人目不暇接，因此，真正做到全面介绍无疑是十分困难的。虽然我们已勉力而为，但仍感力不从心，肯定会挂一漏万。如果本书能给广大读者提供一些本学科发展的基本线索，起到抛砖引玉的作用，为人工神经网络的进一步推广应用贡献微薄之力，我们则认为达到了目的，将感到欣慰。

本书由武汉大学陈允平、中国电力科学研究院王旭蕊、东北电力学院韩宝亮共同编写，由陈允平负责主编。本书付梓之际，十分感谢王平洋教授、周孝信院士的支持与指导。

由于作者们学识浅陋，不当和错误之处欢迎同仁们批评指正。

作者谨识于武汉珞珈山

目 录

《电力新技术丛书》出版说明

前言

1 绪论	1
1.1 人脑信息处理的特点	1
1.2 人工神经网络发展简史	3
1.3 人工神经网络的现状与前景	4
2 人工神经网络的基本原理与算法	6
2.1 生物神经元	6
2.2 人工神经元	7
2.3 简单神经元的学习	10
2.4 单层感知器的局限性	15
3 多层人工神经网络 (多层感知器)	17
3.1 引言	17
3.2 多层人工神经网络的学习规则	19
3.3 用多层人工神经网络解决异或问题	24
3.4 用作分类器的多层人工神经网络	26
3.5 人工神经网络的归纳能力与容错能力	31
3.6 人工神经网络学习中存在的困难及其对策	32
4 Kohonen 自组织网络	34
4.1 引言	34
4.2 Kohonen 算法	36
4.3 权重的调整	38

4.4	相邻单元	39
4.5	学习矢量的量化	42
5	Hopfield 网络	43
5.1	引言	44
5.2	模式的存储与调用	46
6	负荷预报及网损计算的人工神经网络方法	50
6.1	短期负荷预报的人工神经网络方法	50
6.1.1	引言	50
6.1.2	负荷分类与负荷特征	52
6.1.3	人工神经网络	53
6.1.4	反传算法的负荷预报	56
6.1.5	结论	65
6.2	自适应线性神经网络在负荷预报上的应用	66
6.2.1	引言	66
6.2.2	基本思路	67
6.2.3	功率谱分析和负荷的分解	68
6.2.4	自适应神经元	72
6.2.5	负荷分量的预报	75
6.2.6	模拟计算结果与结果评价	78
6.2.7	小结	81
6.3	网损计算的人工神经元方法	82
6.3.1	引言	82
6.3.2	基本方法	83
6.3.3	实际计算结果	88
7	电力系统稳定分析的人工神经网络方法	93
7.1	人工神经网络技术为基础的电力系统动态稳定 分析	94

7.1.1	引言	94
7.1.2	矩阵法的基本思想	95
7.1.3	自组织特征映射算法 (SOFM)	97
7.1.4	Kohonen 模型在电力系统动态稳定中的应用 ...	102
7.1.5	模拟结果	104
7.2	人工神经网络为基础的多机电力系统稳定器	111
7.2.1	引言	111
7.2.2	以人工神经网络为基础的 PSS	112
7.2.3	多机系统中的 ANN PSS	115
7.2.4	小结	123
7.3	调整电力系统稳定器的人工神经网络方法 ...	123
7.3.1	引言	123
7.3.2	问题的提法	125
7.3.3	人工神经网络的设计	127
7.3.4	人工神经网络在 PSS 参数调整中的应用	130
7.4	人工神经网络在同步电机动态稳定分析中的应用	136
7.4.1	问题的提出	137
7.4.2	发电机动态稳定分析的神经网络方法	140
8	电力系统辨识与测量的人工神经网络方法 ...	145
8.1	无功功率测量的人工神经网络方法	145
8.1.1	引言	145
8.1.2	电弧炉模型	146
8.1.3	问题的提法	147
8.1.4	误差反传神经网络	152
8.1.5	通过神经网络计算瞬时无功功率	153

8.1.6 结果	155
8.2 电压与电流波形实时识别的人工神经网络方法	159
8.2.1 引言	159
8.2.2 问题的提法	159
8.2.3 L 模 (切比雪夫模) 判据	161
8.2.4 最小二乘法和最小绝对值法判据	164
8.2.5 计算机模拟试验	165
8.2.6 结论	165
8.3 检测高阻故障的人工神经网络方法	169
8.3.1 引言	169
8.3.2 人工神经网络的结构、算法与数据处理	170
8.3.3 故障检测器的实现	174
8.3.4 小结	179
8.4 汽轮发电机转子匝间短路定位的模糊人工神经网络方法	179
8.4.1 引言	179
8.4.2 测量系统	180
8.4.3 模糊神经网络	182
8.4.4 现场试验	183
8.4.5 小结	186
8.5 电力系统谐波源的监控与辨识	186
8.5.1 谐波状态估计	187
8.5.2 模拟试验	188
9 人工神经网络与其他学科的联合应用	197
9.1 互联系统暂态稳定分析的人工神经网络与模式识别交互方法	197

9.1.1 以模式识别为基础的安全性转移功率极限计算	198
9.1.2 神经网络为基础的负荷预报方法说明	208
9.1.3 小结	210
9.2 配电线电容器调度的人工神经网络与动态规划 方法的联合应用	211
9.2.1 引言	211
9.2.2 用动态规划法的配电线电容器调度	213
9.2.3 用欧几里得方法和自组织神经网络方法的分块	218
9.2.4 数值结果	222
9.2.5 讨论与结论	228
后记	230
参考文献	231

1 绪 论

1.1 人脑信息处理的特点

人工神经网络 (ANN Artificial Neural Network) 是一门崭新的边沿交叉学科, 虽然它的理论研究可以追溯到 20 世纪 40 年代, 与计算机的研究几乎同时, 但是人工神经网络的研究却经历了一条曲折的道路。这种曲折的经历, 一方面是由于 ANN 是以人脑的功能为基础的, 人脑的过程十分复杂, 难于模拟; 另一方面是由于 ANN 所采用的方法与人们已经熟悉的模拟方法大相径庭。因此在对人工神经网络进行研究时需特别注意研究方法上的特殊性。

人脑是一个最复杂、最完美的信息处理系统, 但人类对于人脑的认识却十分肤浅。人们正以极大的热情去探索大脑的结构、机理。这当然涉及到生物神经科学、认知科学、人工智能科学、计算机科学、微电子学、分子生物学等众多学科。直至目前为止, 人脑还是一个神秘的必然王国。

当然, 人类对于人脑也不是一无所知的, 至少人们已经知道人脑的信息处理具有以下特点:

(1) 大规模的并行处理。人脑是由多达 10^{10} 个大脑皮层神经元组成的, 每个神经元都是一个信息处理单元, 可见这个信息处理系统规模之大。而神经元之间冲动的传递 (即信息在神经元之间的传递) 时间是以毫秒计的, 与计算机中信息的传递时间相比十分缓慢。但是人们能在 1s 内对外部复杂事

物作出反应、判断和决策，又比许多计算机的速度都快。从单个信号“单元”的处理速度很慢而大脑信息处理的整体速度却很快这个现象，我们可以得出结论：大脑的信息处理是并行的而不是串行的，即大脑是一个十分巨大、复杂、高效率的并行处理系统。

(2) 具有很强的容错能力。人脑的神经细胞时时刻刻处于有生有死的动态过程中，但神经细胞的死亡并未影响，至少不会明显地、快速地影响整个大脑的信息处理能力；相反地，计算机的元器件的局部损坏或计算机程序的微小差错都会给计算机的运行带来致命的谬误。可见人的大脑比计算机的容错能力强得多。人工神经网络也具有一定的容错能力，这点是与人脑相似而优于现代计算机的。

(3) 自适应能力很强。自适应能力也称为学习能力或自组织特性，是指大脑能通过学习和训练开发出新的功能以适应不断变化的环境，完成新的任务的功能。目前计算机的功能完全取决于程序赋予的知识和能力，不能通过学习获得新的知识与能力，真正意义上的智能活动要用程序通过目前的计算机去实现是十分困难的。人工神经网络具有初步的自适应与自组织的能力，这点是通过学习过程中调整神经元之间联系的权重来实现的。

(4) 神经网络系统是一个高度复杂的非线性动力学系统。如果说神经元的结构和功能还算简单的话，由大量神经元构成的网络系统的行为却是绚丽多彩和复杂异常的。在人工神经网络中如何把简单的人工神经元连接成复杂的、功能强大的系统，又如何去分析复杂系统的行为，是我们需着重注意的问题。

1.2 人工神经网络发展简史

人工神经网络的研究始于 20 世纪 40 年代。下面将对人工神经网络发展的历史和著名学者作一简单的介绍。

(1) 数理逻辑学家 Mc Culloch 和心理学家 W. Pitts 首先于 1943 年提出了神经元的数学模型。此模型一直沿用至今。他们是人工神经网络研究的开先河者。

(2) 计算机专家 Von Neumann 于 1948 年提出了简单神经元构成的自动机网络结构,可惜这个设想并没有变成现实。但是,他仍然是人工神经网络研究的先驱者之一。

(3) 20 世纪 50 年代末, F. Rosenblatt 设计了“感知机”,这是一种多层神经网络。首次把神经网络研究的理论成果应用到了实际中。60 年代末,由于多层神经网络尚未找到有效的计算工具,人们对神经网络的兴趣减弱。人工神经网络研究也开始了 20 年的寂静时期。

(4) 20 世纪 60 年代初期, Widrow 提出了自适应线性神经网络。这是一种连续取值的线性加权求和阈值网络,现已在电力系统和其他控制领域有了较广泛的应用。Widrow 对于神经网络的发展也作出了不少贡献。

(5) 1982 年和 1984 年,美国物理学家 Hopfield 发表了两篇关于神经网络的重要论文,引起了巨大反响。Hopfield 的贡献主要在于:在神经网络中引入了能量函数的概念,使神经网络的稳定状态有了明确的度量;用模拟电子器件构造了神经网络模型,并用于数字式计算机不易解决的问题,如“货郎担最优路线问题”,取得了成功。

(6) 1986 年, Rumelhart 和 Mc Clelland 提出了神经网络

的误差反传学习算法(BP 算法),从原则上解决了神经网络的训练方法问题。直到现在 BP 算法仍是神经网络训练与学习的主要算法。正是由于解决了训练方法问题,使得神经网络有了很强的运算能力,神经网络的应用范围大大拓宽。神经网络的研究走出了寂静时期,开始了复苏。从此,人工神经网络的研究与应用开始了蓬勃的发展。

1.3 人工神经网络的现状与前景

目前,应用人工神经网络主要是为了实现以下几方面的功能:联想记忆、识别与分类、优化计算。

目前,人工神经网络的研究主要集中在以下几个方面:

(1) 建立理论模型。从生理学、神经科学等学科对生物神经细胞和神经网络的研究成果出发,建立概念模型、知识模型、物理化学模型、数学模型等。

(2) 网络模型与算法研究。在理论模型的基础上构造具体的神经网络模型,以便实现计算机模拟和硬件制造。

(3) 应用研究。在网络模型与算法研究的基础上,利用人工神经网络组成实际的应用系统,以便实现某种实际功能。本书将主要介绍神经网络在电力系统各个领域中的应用。

到目前为止,神经网络的类型已多达数十种,已经用于各行各业。神经网络已在理论上和实用上取得了可喜的成果。就电力系统而言,神经网络已经用到了电力系统的各个领域,包括分析、规划、识别、控制等。

像专家系统等其他智能科学一样,人工神经网络科学已经取得了突破性的进展,硬件神经网络计算机已经表现出无可比拟的优越性。

人工神经网络的研究涉及到众多的学科，除了神经科学外，还需要十分广泛的数学工具，几乎涉及到应用数学的一切门类；需要广泛的自动控制理论的知识，如自适应控制、非线性控制等；需要微电子学的新成就，以便制造出功能更强的芯片，用硬件实现人工神经网络模型的功能。因此，人工神经网络的研究可谓任重而道远，尚需我们作出大量的努力。

人工神经网络热潮的兴起是 20 世纪人类科学技术全面发展的组成部分。尽管人工神经网络科学在未来的前进道路上还会有崎岖，伴随着重重困难，但是人类探索人脑奥妙、模拟人脑功能的智能科学必将日新月异，大放光彩。