

小波神经网络 理论与应用

肖胜中 著



NEUPRESS

东北大学出版社

要 容 内

小波神经网络理论与应用

肖胜中 著

东北大学出版社

• 沈 阳 •

© 肖胜中 2005

图书在版编目 (CIP) 数据

小波神经网络理论与应用 / 肖胜中著. — 沈阳 : 东北大学出版社, 2006.1

ISBN 7-81102-172-2

I. 小… II. 肖… III. 时滞-小波-分析-人工神经网络-研究 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 077626 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳市政二公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 140mm × 203mm

印 张: 5.375

字 数: 103 千字

出版时间: 2006 年 1 月第 1 版

印刷时间: 2006 年 1 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘乃义 刘宗玉

责任校对: 李 莉

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

定 价: 16.00 元

内容提要

本书基于微分系统的稳定性理论, 利用 Lyapunov 函数、同胚理论、压缩映象原理、Razumikhin 定理、Brouwer 不动点原理、Growell 不等式、时滞微分不等式、向量不等式、不可约矩阵、M 矩阵、LDS 矩阵、小波函数理论等工具以及作者提出的全新的理论——双对角占优矩阵、非线性测度理论等, 对时滞小波神经网络、二阶时滞小波神经网络、受干扰的小波神经网络以及变时滞小波神经网络的平衡点的存在性、唯一性、渐近稳定性、全局指数稳定性等进行了深入的研究, 提出了一些有效的分析方法, 获得了若干有意义的、富有建设性的成果。同时, 利用小波神经网络的有关知识对广义的 Lipschitz 函数和一些非线性函数的逼近等方面进行了研究。

本书可供从事系统与控制科学、应用数学、工程科学及与之相关的工程应用领域的教学与科研人员阅读, 亦可作为相关专业的高年级大学生与研究生的参考用书。

前

言

1992年, Zhang Qinghua 和 Benvensite 提出把小波函数作为激励函数的小波神经网络理论。小波函数自身具有良好的性质, 以及小波变换能在满足框架条件时保证其反变换存在, 它在时频域内具有有限支持性并且可以根据空间位置平移和尺度伸缩构成一组正交基底, 能够在不确定性原理允许的范围内具有可调的时频分辨率。这些特性弥补了许多网络的不足, 主要表现在小波神经网络承袭了小波变换的多分辨率分析特性, 使其能够对具有局部奇异的信号进行精确的辨识, 因此由小波神经网络辨识建立的系统在线性模型上能很好地近似系统的动态特性。小波神经网络具有很强的非线性映射能力, 基于小波神经网络的控制器可以产生更为复杂与精确的控制律、达到最佳控制效果, 在控制器中引入了小波函数。由于小波函数在时频域内具有有限支持性, 它的低通滤波效果好, 因此, 基于小波神经网络的控制器抗干扰能力

更好。所以，在函数逼近和信号处理方面，小波神经网络受到了越来越多的行家的重视。

本书结合作者自己的研究工作，比较系统地介绍了小波神经网络稳定性分析的方法，并提出了全新的理论——双对角占优矩阵、非线性测度理论等，对时滞小波神经网络、二阶时滞小波神经网络、受干扰的小波神经网络以及变时滞小波神经网络的平衡点的存在性、唯一性、渐近稳定性、全局指数稳定性等进行了深入的研究，提出了一些有效的分析方法，获得了若干有意义的、富有建设性的成果。

作者试图努力将最新的研究成果反映在本书中，但限于篇幅，结果还不甚理想。由于作者水平所限，书中不妥甚至错误之处在所难免，在此恳请广大读者批评指正。

作者

2005年6月于广州

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 本书的主要工作	6
第二章 预备知识	8
第三章 时滞小波神经网络的稳定性分析	25
3.1 引 言	25
3.2 时滞小波神经网络的平衡点的存在性和唯一性	26
3.2.1 问题的描述	26
3.2.2 本章的主要结果	28
3.3 时滞小波神经网络的平衡点的全局指数稳定性	44
3.4 无时滞小波神经网络的稳定性	49
3.5 本章小结	54
第四章 二阶时滞小波神经网络的稳定性分析	56
4.1 引 言	56
4.2 问题的描述	56
4.3 本章的主要结果	60
4.4 本章小结	68
第五章 受扰小波神经网络的增益稳定性分析	69
5.1 引 言	69

5.2	网络模型及唯一平衡点的存在性	70
5.3	受扰 Hopfield 型小波神经网络的增益稳定性分析	73
5.4	本章小结	80
第六章	变时滞小波神经网络的稳定性分析	81
6.1	引言	81
6.2	问题的提出	81
6.3	变时滞小波神经网络的平衡点的存在唯一性	86
6.4	变时滞小波神经网络的平衡点的稳定性分析	88
6.5	变时滞小波神经网络的局部指数稳定性分析	105
6.6	本章小结	110
第七章	小波神经网络对广义 Lipschitz 函数的逼近性分析	112
7.1	引言	112
7.2	基本构造	112
7.3	用于广义 Lipschitz 函数类拟合的可行性	114
7.4	Thau 定理的推广和小波神经网络非线性观测器	119
7.5	观测器的实现	123
7.6	本章小结	123
第八章	小波神经网络的乏逼近性和 L^2 逼近性研究	125
8.1	引言	125
8.2	问题的提出	126
8.3	本章的主要结果	128
8.4	学习算法	137
8.5	网络参数与初值的选择策略	139
8.6	仿真结果	140

8.7 本章小结	145
结 论	146
参考文献	149

其中

第一章 绪 论

1.1 引 言

小波分析^[1~3]是傅里叶分析发展的产物,被誉为傅里叶分析划时代的进展.它弥补了傅里叶分析的缺陷,解决了傅里叶分析在很多方面难以解决的问题,其应用范围之广、实用价值之大,已为人们所关注.因此,对它的研究,无论是理论上还是应用上,都有十分重要的意义.

小波分析尽管名字并不起眼,但其理论的出现犹如洪水波涛,弥补了半个世纪以来一直在数学领域居垄断地位的传统技术——傅里叶分析中的许多缺陷.

众所周知,傅里叶分析使数学物理的分析发生了根本性的变化,它对声学、气象学、量子力学、结晶学中的一系列问题,提出了科学的分析方法.但随着理论和实践的进一步发展,其弊端也就显现出来了.

从理论上来看,它有两点明显的不足:

(1) 在 $L^2[0, 2\pi]$ 以外的空间,虽然对于这些空间中的函数 f ,其傅里叶展开式仍然成立,即

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{ikx},$$

其中

$$c_k = \int_0^{2\pi} f(x) e^{-ikx} dx$$

是 f 的傅里叶系数, 但是系数的大小并不能刻画函数所在的区间. 也就是说, $f \in L^p$ 并不等价于 $\sum |c_k|^p < \infty$, 只是从形式上成立, 并不一定收敛于 $f(x)$.

(2) 傅里叶分析不能作局部分析. 事实上, 在傅里叶变换中, $\hat{f}(\omega) d\omega$ 是 f 的关于频率 ω 的谐波分量, 它是由 f 的总体决定的, 我们无法由一段上的 $\hat{f}(\omega)$ 知道 f 在任意一点附近的形态, 这一点根源于 e^{ikx} 对 x 不是局部化的.

在应用方面, 虽然傅里叶分析能够将信号的时域特征和频域特征联系起来, 能分别从信号的时域和频域观察, 但是, 它不能将两者有机地结合起来. 这是因为信号的时域波形中没有包括任何频率信息, 而其傅里叶谱是信号的统计特性, 从其表达方式中也可以看出, 它是整个时间域内的积分, 没有局部化分析信号的功能, 完全不具备时域信息. 也就是说, 对于傅里叶谱中的某一频域, 不能从傅里叶变换中知道这个频域是在什么时候产生的. 在实际信号处理过程中, 尤其是对非平稳信号的处理, 信号在任意时刻附近的频域特征都很重要. 如柴油机缸盖表面的振动信号是由撞击或冲击产生的, 是一个瞬变信号, 单从时域或频域上来分析是不够的. 又如, 气温读数出现误差, 哪怕是某一个小时内的误差,

也必须对傅里叶分析中所有的频率重新计算振幅。更糟糕的是,如果数据有间断,傅里叶分析便要中止,必须用符合逻辑的数据将这些间断的数据补充之后方可进行傅里叶变换计算,等等。这促使我们寻求一种新的方法,把两者有机地结合起来,以弥补这个缺陷。

小波分析成功地克服了这些缺陷,主要是因为它采用了不同于傅里叶分析方法的构造块。傅里叶分析中的单元是正弦和余弦,具有唯一性,并且它总是双向波动且无间断,而小波分析中的单元是小波函数,不具有唯一性,可以根据实际问题进行选择,这个单元可以集中在短小的区间里。从集中在某个区间上的母子波开始,以单元的步长向左或向右移动母子波,并经重复因子 2 来加以扩张或压缩,建立其他的构造块。同时小波变换对不同的频域在时域上的取样步长是可以调节的:在低频时,小波变换的时间分辨率差,而频率分辨率高;在高频时,小波变换的时间分辨率较高,而频率分辨率较低,这正符合低频信号变化缓慢而高频信号变化迅速的特点。这就是小波变换优于傅里叶变换的地方。

同时,神经网络^[4]作为一门活跃的交叉性边缘学科,对它的研究与应用正成为人工智能、认知科学、神经生物学、非线性动力学、函数逼近^[5~8]、优化^[9~11]等相关专业的热点。近十年来,针对神经网络的研究大量涌现,涉及联想记忆、自学习和自组织、计算机视觉^[12~13]等众多方面,取得了许多成果。由此可见,对

神经网络理论和应用的研究具有十分重要的理论意义和现实意义，主要是因为神经网络具有以下一些特点：

(1) 具有自学习的功能。它主要是根据已有的数据，通过学习和训练，找出输入和输出之间的内在联系，寻求问题的答案，而不是依靠对问题的先验知识和规律，因而具有良好的适应性。

(2) 具有泛化功能。它能够处理那些未经处理过的数据，获得相应于这些数据的合适的解答。同样，它能够处理那些有噪声或不完全的数据，从而显示出很好的容错能力。对许多实际问题来说，泛化功能是非常有用的，因为现实世界所获得的数据常常受到噪声的污染或残缺不全。

(3) 非线性映射功能。因为现实生活中的受控对象具有非线性性、不确定性及参数的时变性等复杂因素，并且相互影响，给问题的处理带来一定的难度，神经网络为处理这些问题提供了有用的工具。

(4) 高度并行处理功能。神经网络的处理是高度并行的，用硬件实现的神经网络的处理速度越来越受到重视。并行分布处理成为研究的一个新的热点，它进一步拓展了计算概念的内涵，使神经计算、遗传算法成为一个新的研究工具。

1992年，Zhang Qinghua 和 Benvensite 提出把小波函数作为激励函数的小波神经网络理论^[5]。小波函数自身具有良好的性质，以及小波变换能在满足框架条件时

保证其反变换存在, 它在时频域内具有有限支持性, 并且可以根据空间位置平移和尺度伸缩构成一组正交基底, 它能够在不确定性原理允许的范围内具有可调的时频分辨率. 这些特性弥补了许多网络的不足, 主要表现在小波神经网络承袭了小波变换的多分辨分析特性, 使其能够对具有局部奇异的信号进行精确的辨识, 因此由小波神经网络辨识建立的系统在线性模型上能很好地近似系统的动态特性. 小波神经网络具有很强的非线性映射能力, 基于小波神经网络的控制器可以产生更为复杂与精确的控制律、达到最佳控制效果, 在控制器中引入了小波函数. 由于小波函数在时频域内具有有限支持性, 它的低通滤波效果好, 因此, 基于小波神经网络的控制器抗干扰能力更好. 因此, 在函数逼近和信号处理方面, 小波神经网络受到了越来越多的行家的重视^[6~12]. 在污水处理和水质预测方面, Hany Gerges^[13]等对污水处理过程进行模拟, 提出了基于神经网络模拟污水处理厂的新方法, 并利用污水厂的历史数据开发了几个神经网络模型, 用模型模拟水厂运行和预测出水质. 模型还用于确定在不超出“预定”出水质量标准的前提下污水厂所能承受的最大“额外”负荷. 对某些特定参数、现象进行预测, Zhu^[14]研发了一种基于时间延迟神经网络模型的在线污水水质预测系统. 先采用多层感知器网络模型对所建立的时间延迟神经网络的输入节点进行筛选, 然后得到一个输入为 10 个的模型. 网络

经训练后对污水水质的预测精度优于标准的 MLP 模型。正因为如此, 由 Zhang Qinghua 和 Benvensite 提出的小波神经网络, 其理论研究与应用的前沿问题将渗透到 21 世纪科学的挑战性问题中, 因而具有十分重要的理论意义和实际意义, 其应用前景将是十分可观的。

遗憾的是研究理论的人并不多, 而时滞 (或受扰) 小波神经网络的研究者则更少。因此, 本书将对这些理论进行研究并加以应用。

1.2 本书的主要工作

本书将主要对时滞 (或受扰) 小波神经网络的理论进行比较深入的研究。在研究中, 提出了两种全新的理论方法——非线性测度法、双对角占优矩阵法, 并结合泛函分析、矩阵分析、非线性算子理论、矩阵测度以及一些微分不等式的技巧对小波神经网络的平衡点的存在性、唯一性、有界性、全局指数稳定性进行了深入的研究, 获得了若干个有意义的结果。同时, 对受扰的小波神经网络, 进行了 L^2 增益的稳定性分析, 并在函数逼近、自适应控制等方面得到有效的应用。当然, 对小波神经网络的理论研究, 是在 Hopfield 型神经网络理论、奇异微分系统理论的基础上进行的, 同时广泛吸收了廖晓昕、焦李成、梁学斌、曹进德、徐宗本^[13~18] 等对 Hopfield 神经网络以及细胞神经网络的研究成果。

全书共分八章。

第一章是绪论. 说明国内外对该课题的研究近况以及研究的理论意义和实际应用价值.

第二章是预备知识. 概述了本书所需要的基础知识, 为后几章的研究作了较详细的铺垫.

第三章采用全新的方法, 即双对角占优矩阵法对时滞小波神经网络的基本理论进行了研究, 获得了若干个有意义的结果, 并且具有一定的应用价值和推广价值.

第四章在第三章的基础上, 应用泛函分析的知识、Lyapunov 函数和 Razumikhin 定理, 对二阶时滞小波神经网络的稳定性进行了研究, 获得了神经网络平衡点稳定与时滞相关以及与时滞无关的条件.

第五章对受扰的小波神经网络的 L^p 增益稳定性进行了分析, 得到了三个重要的定理, 在系统没有受到干扰时, 这三个定理也适用, 因此具有相当的普遍性.

第六章用非线性测度法对变时滞小波神经网络的稳定性进行了研究, 获得了若干个有意义的代数判据.

第七章研究了小波神经网络对广义的 Lipschitz 函数的逼近能力及其应用, 并把 Thau 定理进行了推广.

第八章研究了小波神经网络的乏逼近性和 L^2 逼近性.

第二章 预备知识

本章概括了全书所需要的基础知识和常用的符号.

定义 2.1^[19] 如果空间 $L^2(\mathbb{R})$ 中的一串闭子空间 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ 满足下列条件:

(1) 单调性:

$$\dots \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset \dots;$$

(2) 逼近性:

$$L^2(\mathbb{R}) \cap \bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = \{0\}, \quad \overline{\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j} = L^2(\mathbb{R});$$

(3) 伸缩性:

$$f(x) \in V_j \Leftrightarrow f(2x) \in V_{j-1};$$

(4) 平移不变性:

$$f(x) \in V_0 \Leftrightarrow f(x-k) \in V_0, \quad \forall k \in \mathbb{Z}.$$

若存在 $g \in V_0$, 使得 $\{g(x-k), k \in \mathbb{Z}\}$ 构成 V_0 的 Riesz 基, 即对于任何 $f \in V_0$, 存在唯一的序列 $\{a_k\} \in L^2$, 使得

$$f(x) = \sum a_k g(x-k)$$

成立. 反之, 对于任意序列 $\{a_k\} \in L^2$, 按上式确定一个函数 $f \in V_0$, 且存在正数 A, B , 其中 $A \leq B$, 使得

$$A \|f\|^2 \leq \sum |a_k|^2 \leq B \|f\|^2$$

对所有的 $f \in V_0$ 均成立, 那么, 我们称这一串闭子空间