

■ 当代经济前沿文库

FRONTIER SERIES IN CONTEMPORARY ECONOMICS

国家重点学科——数量经济

The Theory of Wavelet Networks and Application
in Economic Modelling

小波网络理论
及其在经济建模中的应用

张新红 著

当代经济前沿文库
FRONTIER SERIES IN CONTEMPORARY ECONOMICS

The Theory of Wavelet Networks and Application
in Economic Modelling

小波网络理论 及其在经济建模中的应用

张新红 著

FE 东北财经大学出版社
Dongbei University of Finance & Economics Press
大连

© 张新红 2008

图书在版编目 (CIP) 数据

小波网络理论及其在经济建模中的应用 / 张新红著.
大连: 东北财经大学出版社, 2008.11

(当代经济前沿文库)

ISBN 978-7-81122-530-3

I. 小… II. 张… III. 小波分析—应用—经济模型—研究 IV. F224.0

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 200275 号

东北财经大学出版社出版

(大连市黑石礁尖山街 217 号 邮政编码 116025)

总编室: (0411) 84710523

营销部: (0411) 84710711

网 址: <http://www.dufep.cn>

读者信箱: dufep@dufe.edu.cn

大连天正华延彩色印刷有限公司印刷

东北财经大学出版社发行

幅面尺寸: 148mm×210mm

字数: 220 千字

印张: 7 5/8

印数: 1—1 500 册

2008 年 11 月第 1 版

2008 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑: 孙 平

责任校对: 刘珍海

封面设计: 张智波

版式设计: 刘瑞东

ISBN 978-7-81122-530-3

定价: 26.00 元

序

21 世纪是非线性科学发展的时代。要有效地研究非线性问题，绝不能满足于把非线性问题转换为线性问题而后用线性方法加以近似地研究，必须发展新的非线性方法。为此，在经济学和管理学中，极需突破本学科的界限，从数学、生物学、心理学等自然科学引进成熟的、合适的非线性方法，来研究各种非线性问题，并在实际应用过程中加以改进或完善。

上世纪 40 年代出现的神经网络模型与 80 年代兴起的小波分析理论，以及这两者的结合所产生的小波网络，正是前述研究非线性问题所需要的极其重要的科学工具。虽然它们还处在逐步完善的过程，但是经过近二三十年的迅猛发展，它们的巨大理论价值和广泛的应用前景为越来越多的学者所公认。人工神经网络、小波分析方法、小波网络及其各种算法，尽管它们的普及会有有一个过程，然而它们在经济预警和预测、经济分析和决策中大有用武之地，是不容怀疑的。

张新红同志是一位年轻的博士，多年来一直致力于小波分析和神经网络理论以及它们在经济管理中应用的研究，尤其在小波网络的研究方面，她取得了一些可喜的研究成果。

摆在我们面前的《小波网络理论及其在经济建模中的应用》一书，是张新红同志在综合国内外文献的基础上，经过她自己悉心研究写成的。该书比较系统地研究了小波网络的非线性函数逼近性，详细地比较了小波网络与 BP（后传播算法）网络和 RBF（径向基函

数)网络的性能;从小波分解与基函数选取角度出发,建立连续参数的小波网络、正交小波网络、正交尺度小波网络和分类小波网络,并分析构造这些小波网络的理论依据;针对神经网络在经济预测领域中取得的应用成果,研究了分别用不同形式小波网络建立经济预测和决策模型的方法和步骤。

该书的出版对有志于研究小波网络系统理论和经济建模应用的学术工作者、实际工作者以及研究生都是有裨益的。作为一门反映新兴学科成就的著作,难免有一些待改进之处,希望广大读者共同来推进小波网络及其应用在我国的发展。是为序。

乌家培

2008年6月15日于北京

前言

经过半个多世纪的研究,神经网络理论已渐趋成熟,并且得到广泛的应用。它所具有的学习能力、多输入并行处理能力、非线性逼近和容错能力以及自适应能力,使其影响日益增大。但是,在神经网络的应用过程中,隐含层神经元节点的确定、参数的优化和神经网络结构的构造等缺乏有效的理论性指导方法,而这些都将直接影响神经网络的实际应用效果。

小波分析理论是近年来国际上非常热门的前沿研究领域,是继 Fourier 分析之后的一个突破性进展。小波分析比 Fourier 分析有着突出的优点,主要表现在对非平稳随机信号的处理上,小波分析具有良好的局部特性和变焦能力:无论分析低频局部信号还是高频局部信号,都能自动调节时-频窗,以适应实际分析的需要;在局部时-频分析中具有很强的灵活性,能聚焦到信号时段和频段的任意细节,被誉为时-频分析的显微镜。但是,小波分析理论的应用一般被限制在小规模范围内,其主要原因是大规模多维小波基的构造和计算的复杂性,而神经网络是处理大规模问题的一种有力工具,因此,小波分析和神经网络结合可以弥补彼此的不足,更充分地发挥各自的优点。小波神经网络(简称小波网络)将是神经网络中一个很有前途的发展方向。

本书比较系统地研究了小波网络的非线性函数逼近性,包括小波网络的全局逼近、最佳逼近和 L^2 逼近,详细地比较了小波网络与 BP 网络和 RBF 网络的性能;从小波分解及基函数选取角度建立连续参数小波网络、正交小波网络、正交尺度小波网络和分类小波网

络, 并给出构造这些小波网络的理论分析依据; 针对神经网络在经济预测领域中取得的应用成果, 研究了分别用连续参数小波网络、正交小波网络、正交尺度小波网络和分类小波网络建立经济预测和决策模型的方法和步骤。全书内容安排如下:

第 1 章主要综述了神经网络和小波分析的发展简史以及小波分析理论应用, 介绍了本书主要内容安排。

第 2 章阐述了神经网络的基本理论, 包括生物神经元模型、神经网络的基本特征和通有性质、MP 模型和学习规则、感知器模型; 讨论了常用的两种前馈网络: BP 网络和 RBF 网络的性能和存在的问题, 探讨了前向网络的激活函数形式和非线性逼近性质。

第 3 章简要地给出了小波分析的基础理论, 包括小波和连续小波变换、小波框架理论、离散小波变换、多分辨分析理论和 Mallat 快速小波变换算法, 从而给出构造小波网络的小波分析理论依据。

第 4 章系统地研究了小波网络的结构和非线性函数逼近, 给出了小波网络的全局逼近定理和收敛性定理以及定理证明过程, 详细地比较了小波网络与 BP 网络、RBF 网络的性能。

第 5 章从小波分析理论出发, 详细地研究了小波网络的各种构造方式, 给出了 SISO 和 MISO 的连续参数小波网络、正交小波网络、正交尺度小波网络、紧支正交小波网络、分类小波网络的结构形式及相应参数学习算法和小波分析理论依据。

第 6 章对所建立的小波网络在非线性经济系统预测中的应用建模过程进行详细分析, 并对我国进出口贸易额非线性时间序列、人民币汇率波动分析、宏观经济周期波动预警等经济热点问题进行了实证研究。

第 7 章将小波网络应用于经济决策中。首先, 给出用于系统评价的小波网络模型, 并对管理信息系统进行仿真评价; 其次, 根据小波网络具有模式记忆和联想的特点, 将小波网络应用于模式识别,

并对我国上市公司的财务风险识别和证券市场综合指数的“买入时机”预测等进行实际仿真分析。

第8章为展望。

多年来,作者一直从事小波分析和神经网络理论与应用的研究,取得了一些研究成果。作为国内较早出版的有关小波网络的著作,作者清醒地看到,本书离形成一套完整的理论体系还相差甚远,况且,小波分析理论的研究时间不长,还有许多待研究和完善的地方,但是作者还是鼓足勇气将其出版,真诚希望本书在大家的帮助下,不断完善和提高。

著名经济学家乌家培教授给予我热情的关怀和悉心指导,他在百忙之中详细地审阅了全书并欣然为本书作序,在此表达我对乌先生由衷的敬意和感激。感谢我的导师郑丕谔教授多年来对我从事小波网络研究给予的鼓励和指导。感谢华侨大学科研处陈鸿儒教授、商学院胡日东教授、数量经济研究院高鸿帧教授对于本书的出版给予的大力支持。

张新红

2008年6月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 神经网络理论研究的发展简史	1
1.2 小波分析理论研究的发展简史	3
1.3 小波分析理论应用概述	6
第 2 章 神经网络理论基础	9
2.1 生物神经元模型	10
2.2 神经网络的基本特征和通有性质	11
2.3 MP 模型和 Hebb 学习规则	17
2.4 感知器	19
2.5 BP 神经网络模型	20
2.6 径向基函数神经网络	30
2.7 前向网络的映射作用	34
2.8 前向神经网络的激活函数与逼近性	35
第 3 章 小波分析基础	38
3.1 从 Fourier 分析到小波分析	39
3.2 小波与连续小波变换	42
3.3 Hilbert 空间的基与框架	49
3.4 离散小波变换与小波框架	52
3.5 多分辨分析和 Mallat 小波算法	55
第 4 章 小波网络及其逼近问题	62
4.1 小波网络	63

4.2 小波网络的最佳逼近与全局逼近	67
4.3 小波网络与常规神经网络的比较	82
第 5 章 小波网络构造	85
5.1 连续参数小波网络	85
5.2 正交小波网络	96
5.3 正交尺度小波网络	109
5.4 紧支正交小波网络	113
5.5 分类小波网络	117
第 6 章 小波网络在经济预测中的应用	121
6.1 引言	121
6.2 经济预测的基本理论	123
6.3 小波网络在经济预测中的应用概述	131
6.4 经济时间序列的小波网络预测模型	135
6.5 人民币汇率波动预测模型及实际仿真	144
6.6 正交小波网络在经济时间序列预测中的应用	152
6.7 基于正交小波网络的经济周期波动预警模型	156
6.8 正交尺度小波网络在非线性经济系统预测中的应用	163
6.9 非参数估计的小波网络经济预测模型	169
第 7 章 小波网络在经济决策中的应用	174
7.1 小波网络在系统综合评价中的应用	174
7.2 基于小波网络的管理信息系统综合评价	175
7.3 基于分类小波网络的模式识别	183
7.4 基于分类小波网络模式识别的证券市场预测	191
7.5 基于小波网络的我国上市公司财务困境预警模型	198
第 8 章 展 望	218
参考文献	221

第1章 绪论

1.1 神经网络理论研究的发展简史

神经网络理论研究的重要意义已为许多科学家所承认,不少人把它看作未来智能计算机发展的一个主流方向,但从神经网络的发展历史来看,它的发展是不平衡的。早在1943年美国心理学家 McCulloch 和数学家 Pitts 合作提出了形式神经元的数学模型(MP模型),从此开创了神经科学理论研究的时代。1944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学习规则(Hebb 规则),他们的研究成果至今仍是许多神经网络模型研究的基础。作为人工智能的网络系统的研究则是20世纪50年代末60年代初开始的。1957年, Rosenblatt 首次引进了感知机(Perceptron)概念,试图模拟动物和人脑的感知和学习能力。1962年, Widrow 提出了自适应线性元件(Adaline)。1969年,美国波士顿大学教授 Grossberg 等提出了自适应共振理论(ART),具有无教师学习、识别和记忆功能。同年,人工智能的创始人之一 Minsky 和 Papert 合作出版了颇有影响的 *Perceptrons* 一书,严格论证了简单线性感知器功能的局限性,指出单层感知器只能用于线性问题的求解。由于 Minsky 在学术界的地位和影响,故其后若干年内,神经网络的研究一度处于低潮。另外,这一时期正是数字计算机发

展的全盛时期,因此使大批有才能的科学家的注意力都集中在发展数字计算机上了。但这一低潮时期,却正是神经网络基础理论研究的积蓄时期,美国和日本等国都有少数学者扎扎实实地继续着神经网络模型和学习算法的研究。1972年,芬兰学者 Kohonen 提出了自组织映射理论,这是一种无教师的聚类法。与此同时,神经心理学家 Anderson 提出了 BSB 模型;日本学者 Fukushima 提出了认知机(Neocognitron)理论;Werbos 提出了误差反传(BP)理论,Widrow 发展了 Adaline 模型;Amari 则致力于有关神经网络的数学理论的研究。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。1982年,美国加州工学院物理学家 Hopfield 提出了 HNN 模型,使神经网络的研究有了突破性进展。同年,Kohonen 发表关于使用一维或二维格网结构的自组织映射研究的文章,该文章中的思想已经成为这一领域其他创新的评估标准。1983年,Kirkpatrick、Gelatt 和 Vecchi 描述了解决组合最优化问题的被称为模拟退火的新方法。1984年,多伦多大学教授 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,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。1986年,Rumelhart、Hinton 和 Williams 提出了多层前馈网络的误差反向传播学习算法,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研究推向了高潮。1987年6月,IEEE 在圣地亚哥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,标志着神经网络研究在世界范围内形成了高潮。

目前人工神经网络已经广泛应用于模式识别、系统辨识、信号处理、自动控制、组织优化、预测估计、故障诊断以及医学、经济管理等领域。由于神经网络具有分布性存储、并行处理、容错能力强以及良好的自学习、自适应、联想等特点,近年来再度显示了它活跃的生命力。基于此,神经网络吸引了众多研究人员的兴趣,其

理论成果和应用成果层出不穷。

我国的神经网络研究始于 1988 年前后,并在基础与应用领域开展了一些工作。1989 年召开了全国第一届神经网络—信号处理会议,1990 年 12 月、1991 年 12 月分别召开了中国第一、第二届神经网络学术大会,随后几年的研究更加深入。我国的神经网络研究在国际上也已占有一定的地位,1992 年的国际神经网络学会和 IEEE 神经网络委员会的联合学术会议于 1992 年 11 月在北京召开。近年来国内许多领域的全国性学术会议、地方性学术会议和各种学术刊物上关于神经网络及应用的文章大量涌现,从事这方面研究工作的队伍日益壮大。

1.2 小波分析理论研究的发展简史

小波分析理论是 20 世纪 80 年代中期发展起来的一门新兴的数学理论和方法,其理论的重要性及应用的广泛性引起了科技界的高度重视。它被认为是数学领域和分析这一学科半个世纪以来工作的结晶,虽然它的出现时间较短,但已在众多学科和工程技术领域,如信号处理、图像处理、故障诊断、逼近论、微分方程、分形识别、计算机视觉、过程建模及非线性科学等得到成功应用,并表现出显著的优越性,正在成为从应用数学到各工程技术领域的研究热点。

小波分析理论的研究热潮虽然始于 20 世纪 80 年代中期,但对小波理论中使用的平移和伸缩思想的研究已有相当长的历史。

1910 年 Haar 通过双极函数进行伸缩操作,构造了一组完备正交基——最早的小波规范正交基,提出了小波变换的原始思想。

1936 年 Littlewood 和 Paley 对 Fourier 级数建立了二进制频率分量分组理论:对频率按 2^j 进行划分,其傅里叶变换的相位变化并不影响函数的形状和大小,称为 L-P 理论,这也是多分辨分析思想的

最初来源。

1952 年到 1962 年的 10 年间, Calderon、Zygmund、Sternhe 和 Werss 等人将 L-P 理论推广至高维, 并建立了奇异积分算子理论。

1965 年, Calderon 给出了基于积分变换的函数再生公式。

1974 年, Coifman 对一维 H^1 空间和高维 H^p 空间给出了其原子分解。

1975 年, Calderon 用他早年发现的再生公式给出了抛物型空间上 H^1 的原子分解, 这个公式后来成了许多函数分解的出发点, 它的离散形式已接近小波展开, 只是还无法得到组成一正交系的结论。

1976 年, Peetre 在用 L-P 方法给出 Besov 空间统一描述的同时, 引进 Besov 空间的一组基, 其展开系数的大小刻画了空间本身的性质。

1981 年, Stromberg 对 Haar 系进行了改进, 引进了 Sobolev 空间 H^s 的正交基, 证明了小波函数的存在性。

1982 年, Battle 在构造量子场论中使用了类似 Calderon 再生公式的展开。

值得注意的是, 1984 年法国地球物理学家 Morlet 在分析地震波的局部性质时, 发现传统的变换难以达到要求, 因此他引入小波概念于信号分析中对信号进行分解。随后, 理论物理学家 Grossman 对 Morlet 的这种信号按一个确定函数的伸缩、平移系 $\left\{ \left| a \right|^{-\frac{1}{2}} \psi \left(\frac{x-b}{a} \right) : a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \right\}$ 展开的可行性进行了研究, 这无疑为小波分析的形成开了先河。

1985 年, Meyer 证明了一维小波函数 $\psi(t)$ 的存在性, 不久, Lemarie 将这一结果推广到多元情形, 并与 Battle 分别给出了具有指数衰减特性的小波函数。

真正使小波分析成为一种体系完整的理论是在 1986 年以后。

1986年, Meyer 创造性地构造了具有一定衰减性的光滑函数 $\psi(t)$, 其二进制伸缩与平移 $\{\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2}\psi(2^j t - k): j, k \in \mathbb{Z}\}$ 构成 $L^2(\mathbb{R})$ 的规范正交基。Jaffard、Lemarie、Meyer 和 Mallat 合作, 提出了多分辨分析的基本思想。

1987年, Mallat 巧妙地将计算机视觉领域内多尺度分析的思想引入到小波分析中的小波函数构造, 从而成功地统一了在此之前的许多具体小波函数的构造方法, 并研究了小波变换的离散化形式, 提出了信号按小波分解与重构的一套完整算法, 即著名的 Mallat 算法——快速小波变换算法。

1988年, 比利时籍数学家 Daubechies 发表了长达 86 页的论文, 证明了具有有限支集正交小波基的存在性, 并构造了具有有限支集的正交小波基。随后, 他又发表了另一篇长篇论文, 详细论述了小波变换的时频局域化性能及其在信号分析中的应用, 对小波理论的研究和发展起到了积极的推进作用。至此, 小波分析的系统理论体系初步得到了建立。

1987年, 在法国马赛召开了第一届小波分析国际会议; 1990年日本京都的国际数学大会展示了小波理论的深入发展及应用领域的不断扩大; 我国于 1992年在武汉大学召开了中法首届小波分析研讨会, 使小波分析的研究及应用在国内也逐渐掀起了热潮。

近年来, 小波分析理论的研究取得了许多成果。一方面, 继续研究满足各种不同要求的小波基和相应算法, 并把其推广到 $\mathbb{R}^n$ 以外的各种空间。另一方面, 不断地将小波变换应用到纯粹数学、应用数学及其他工程技术领域等。1990年, 崔锦泰和王建忠构造了基于样条函数的所谓单正交小波函数, 并讨论了具有最佳局部化性质的多尺度分析的生成函数及相应的小波函数; Wickerhauser 等将小波变换进一步深化, 得到小波包算法; Shensa 提出一种非正交多分辨分析算法; 为了更有效地实现离散和连续小波变换, Rioul 和 Duhamel

通过比较现有的各种算法,进一步研究了 Shensa 提出的非正交多分辨分析算法,给出两种实现更为方便的快速算法; Unser 等讨论了非正交多项式样条小波变换,指出这种变换完全可逆、实现方便,且具有紧支集。张清华等于 1992 年提出了小波网络的概念,使小波分析理论的应用具体化。随着小波变换应用领域的扩大,遇到的问题也会越来越多,必将进一步促进小波分析理论的研究与发展。

小波理论发展的历史是各领域科学家与数学家共同努力的结果,已经形成完整的理论体系,但它更深远、更广泛的应用和影响还未真正到来。

1.3 小波分析理论应用概述

小波分析理论是一种时—频联合分析方法,它可以将任一信号分解成时间和频率的独立贡献,同时又不失原有信号所包含的信息。小波分析相当于一个数学显微镜,具有放大、缩小和平移等功能,能够根据信号不同的频率成分和时间采样的疏密,自适应地调节时—频窗口,同时具有时域和频域局域化性能,通过检查不同放大倍数下的变化来研究信号的动力学行为和机制。正是由于这一突出优点,短短几年内,小波分析得到了广泛的应用。可以说,小波分析的理论和应用发展交织在一起,相互促进。

首先,小波分析在数学领域本身的许多分支学科得到应用。由于小波的局域化性质,利用函数的小波变换系数的衰减率,可以分析该函数在某一点附近的正则性。基于此,小波函数可作为许多经典函数空间的无条件基,因而,通过小波变换能够实现这些空间中的函数逼近,而奇异积分算子在小波基下的表示几乎是对角化的。其他的应用还有微分方程求解、数值分析、曲线曲面的构造、分形几何及控制论等。

信号处理是小波分析最成功的应用领域,许多其他领域的应用

都来源于此。基于小波变换的信号分解与重构,等效于通过设计完全重构滤波器组,既可实际计算离散小波变换,又能导出连续小波基。基于频域方法设计的滤波器组,混叠、谱幅值畸变可以隔离开,通过设计适当的分析与综合滤波器,这些畸变可以极小化,甚至完全消除。滤波器组的时域设计理论和方法,具有设计最小延时系统的能力,而且可以达到任意小的重构误差。小波分析在信号处理中的应用还包括自适应滤波、噪声抵消、语音合成、微弱信号检测、信号增强等。

小波分析的巨大潜力已经表现在信号压缩上。小波滤波器的设计是正则的,具有更好的阻带,因而有更高的压缩率。小波变换与矢量量化、多尺度边缘检测技术等结合,将会大大改进信号压缩技术。

图像处理实质上属于多维信号处理的范畴,静止的图像是二维信号,运动的图像是三维信号。因此,小波分析在信号处理中的许多方法都可以推广和平移到图像处理中。但是,由于图像信号的特殊性,又产生了许多新的技巧和方法。小波变换在图像处理中的应用,已经扩展到图像压缩、边缘检测、CT成像、彩色复印、图像重构、机器视觉等方面,并在这些方面取得了可喜的进展。

特征提取和模式分类是模式识别的核心内容。采用小波变换这一有效的信号分析工具,可提供多方位、多层次、时频局部化的动态信息,便于构成对目标特性的全面认识。因此,小波变换可用于目标对象的特征提取,并将小波系数作为特征信息进行目标的模式分类。基于小波变换的模式识别方法已经应用于指纹识别、目标识别、语音识别等领域。

虽然小波分析理论已经在很多领域得到了应用,但小波分析自身仍存在一些不完善的地方,如多维小波构造和计算的复杂性,使得小波理论只能处理低维数问题;正交小波的构造也比较复杂,难以用显式表达等,这些限制了小波分析理论的进一步应用。