

新一代信息科学与技术丛书

混沌神经信息处理 理论与应用

张毅锋

卢宏涛 编著

裴文江



高等教育出版社

东南大学科技出版基金资助

新一代信息科学与技术丛书

混沌神经信息处理理论与应用

张毅锋 卢宏涛 裴文江 编著

HUNDUN SHENJING XINXI CHULI LILUN YU YINGYONG

高等教育出版社·北京

内容简介

本书全面系统地阐述了混沌神经信息处理理论及其应用。本书共8章,主要包括混沌动力学基础理论、神经网络理论及混沌神经网络模型、混沌及混沌神经网络控制、混沌及混沌神经网络同步、混沌神经网络动力学特性、混沌神经网络在联想记忆中的应用、混沌神经网络在优化计算中的应用和混沌神经网络在生物医学中的应用。将非线性动力学理论、信息论、控制理论、优化理论、通信理论、神经网络理论和神经科学等学科知识融为一体。

本书涉及目前国内外混沌神经信息处理理论、方法及其应用最新研究成果。包括作者长期从事混沌神经网络理论及其应用所取得的科研成果,同时参考了国内外最新科研成果。全书取材新颖、内容丰富、深入浅出、理论联系实际、系统性强、概念清楚。本书可作为信息与通信、自动控制、生物医学工程等专业的研究生教材和主要参考书,也可供广大科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

混沌神经信息处理理论与应用 / 张毅锋, 卢宏涛, 裴文江编著. -- 北京: 高等教育出版社, 2014. 9

(新一代信息科学与技术丛书)

ISBN 978-7-04-040607-8

I. ①混… II. ①张… ②卢… ③裴… III. ①神经系统 - 信息处理 IV. ①Q189

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 151893 号

策划编辑 刘英
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 刘英
责任校对 张小镛

封面设计 张楠
责任印制 田甜

版式设计 王艳红

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 三河市吉祥印务有限公司
开 本 787mm × 960mm 1/16
印 张 19
字 数 350 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2014 年 9 月第 1 版
印 次 2014 年 9 月第 1 次印刷
定 价 59.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 40607-00

谨以此书献给敬爱的导师何振亚先生

前 言

20 世纪 80 年代中期以来，世界上许多国家掀起了神经网络的研究热潮。这里神经网络指人工神经网络 (artificial neural networks)，它是相对于生物神经网络而言的。神经网络是高度非线性动力学系统，具有大规模并行处理能力、信息存储能力、容错能力以及自组织和自适应能力。研究神经网络的目的在于探索人脑加工、存储和传递信息的机制，弄清人脑功能的机理，在此基础上，寻求新的途径以解决目前计算机不能解决或不善于解决的一大类问题，构造以非线性大规模并行分布处理为主流的神经计算机。同时科学家希望以人工神经网络的研究成果来进行生物神经系统疾病的预防和治疗。

大量生物实验表明，神经网络与混沌密切相关。混沌是近年来国际上的另一研究热点。理论和实验的成果大量涌现。混沌是一种普遍的非线性现象，其行为貌似随机，但存在精致的内在规律性，是目前非线性科学的研究主体之一。如今神经网络非线性动力学理论与混沌理论、耗散结构理论、协同学、自组织理论、生物形态学、孤立子理论的结合不仅可以模拟和解释人脑处理、传递信息的一些机制，还可以解释生物进化、生物神经系统病变、社会学、生物形态学、化学反应动力学等领域的某些现象。

本书的三位作者均曾师从国家攀登计划重大项目首席科学家、国际电气电子工程师协会终身院士 (IEEE life Fellow)、东南大学信号与信息处理国家重点学科创始人和学术带头人何振亚先生，并且先后参加了与混沌神经信息处理相关的国家攀登计划重大项目和国家自然科学基金重点项目的研究。本书是在总结国内外混沌神经信息处理理论与应用的最新成果，以及作者和东南大学神经信息处理研究团队多年来所取得的研究成果基础上撰写而成。本书包括绪论和 8 章内容。绪论部分介绍混沌神经信息处理发展现状、主要研究内容和应用。在混沌神经信息处理基本知识和理论部分，书中讨论了非线性混沌的基础知识和基础理论 (第 1 章) 和神经网络理论及混沌神经网络模型 (第 2 章)。在混沌神经网络控制、同步及保密通信应用方面，讨论了混沌系统控制中最常用的几种方法并引申到混沌神经网络的控制 (第 3 章)，接着讨论了混沌系统的同步及保密通信方案的设计，并进一步引申到超混沌同步、广义函数投影同

步及保密通信应用和输出或状态耦合的混沌神经网络的同步讨论（第4章）。为引入混沌神经信息处理理论及应用，在第5章介绍了混沌神经网络的动力学特性。对 Hopfield 神经网络和细胞神经网络这两类常见的神经网络模型稳定性行为进行分析和证明，包括连续与离散的、对称与非对称的和有或无延时的模型进行了动力学行为的分析。对 Aihara 混沌神经网络和全局耦合混沌神经网络动力学特性进行了讨论，并对具有混沌模拟退火机制的暂态混沌神经网络的全局搜索能力进行了分析和研究。第5章的最后，介绍了我们提出的单细胞时延分段线性细胞神经网络动力学特性，包括局部稳定性分析。本书的最后部分是混沌神经信息处理应用，深入叙述了混沌神经网络在联想记忆中的应用（第6章）、优化计算中的应用（第7章）和生物医学中的应用（第8章）。

本书第3.9节、4.3节、4.6节、4.7节、4.9节、5.2节、5.4节和5.8节由卢宏涛著，3.5节和8.3节由裴文江著，其他章节由张毅锋编著。10年前，导师何振亚先生就有将东南大学神经信息处理研究团队多年来所取得的研究成果总结成书的设想，谨以此书献给我们的导师、尊敬的何振亚先生。

本书的出版得到东南大学科技出版基金的资助。本书作者的相关研究工作经历近20年，得到国家攀登计划重大关键项目、国家自然科学基金重点项目和国家自然科学基金面上项目的基金资助。在此一并表示感谢。

本书在完成过程中得到了东南大学科研院、东南大学信息科学与工程学院相关领导及老师的帮助，同时也得到家人的鼓励和支持，在此衷心地向他们表示感谢。

混沌神经信息处理理论与应用仍在持续而迅速地发展，不断出现新的研究成果。由于作者水平有限，时间仓促，在撰写过程中难免出现不准确或疏漏的地方，敬请读者批评指正。

作 者

2014年4月

目 录

绪 论	1
0.1 混沌、神经网络和混沌神经信息处理的发展	1
0.2 混沌神经信息处理的研究内容	3
0.2.1 混沌神经网络模型	4
0.2.2 混沌神经网络的控制	5
0.2.3 混沌神经网络的同步	5
0.2.4 混沌神经网络动力学特性	6
0.3 混沌神经信息处理的应用	7
0.3.1 混沌神经网络在同步通信中的应用	7
0.3.2 混沌神经网络在联想记忆中的应用	7
0.3.3 混沌神经网络在优化计算中的应用	7
0.3.4 混沌神经网络在生物学中的应用	8
0.3.5 混沌神经网络在预测和模式识别等方面的应用	8
0.4 混沌智能信息处理技术的展望	9
0.5 本书的主要内容	10
参考文献	13
第 1 章 混沌动力学基础理论	15
1.1 混沌研究历史	15
1.2 非线性动力学系统	16
1.2.1 动力学系统基本概念	16
1.2.2 稳态解行为和极限集	17
1.3 混沌的主要特征及测定	19
1.3.1 混沌的几种数学定义	19
1.3.2 混沌的主要特征	21
1.3.3 李雅普诺夫指数	22
1.3.4 信息熵	23
1.3.5 吸引子的维数	23
1.4 分岔理论	24
1.5 几种典型的混沌研究方法	25

1.5.1	直接观测法	25
1.5.2	频闪采样法	25
1.5.3	庞加莱截面法	26
1.5.4	相空间重构法	26
1.5.5	功率谱密度分析法	27
1.6	几个典型的混沌模型	27
1.6.1	离散混沌模型	27
1.6.2	连续混沌模型	29
1.6.3	超混沌模型	31
1.7	本章小结	32
	参考文献	33
第2章	神经网络理论及混沌神经网络模型	36
2.1	神经网络简介	36
2.1.1	神经网络发展回顾	36
2.1.2	神经网络基本模型	38
2.2	混沌神经网络模型	45
2.2.1	Aihara 混沌神经网络模型	46
2.2.2	全局耦合映像混沌神经元模型	47
2.2.3	对称映像全局耦合混沌神经网络	51
2.2.4	双向耦合映像网络模型	53
2.2.5	Inoue 混沌神经网络模型	57
2.2.6	反应-扩散细胞神经网络	58
2.3	本章小结	64
	参考文献	64
第3章	混沌及混沌神经网络控制	69
3.1	引言	69
3.2	参数微扰法	70
3.3	外力反馈控制法	71
3.4	延迟反馈控制法	73
3.5	自适应延迟反馈控制法	73
3.5.1	自适应时间延迟即目标轨道的设计	74
3.5.2	自适应时间延迟反馈控制混沌	75
3.6	线性反馈控制法	77
3.7	用脉冲控制法抑制非自治细胞神经网络中的混沌	78
3.7.1	非自治细胞神经网络中的混沌和分岔	78
3.7.2	脉冲控制法	79
3.7.3	数值实验	81
3.8	正比于系统变量的脉冲反馈法	83

3.8.1 控制算法的基本思想	83
3.8.2 Henon 映射模型的控制	84
3.8.3 仿真实验结果	85
3.9 外加周期驱动信号控制法	86
3.10 耦合映像格子时空混沌的控制	89
3.11 混沌神经网络的钉扎控制	92
3.12 混沌神经网络的延时反馈控制	95
3.13 本章小结	97
参考文献	98
第 4 章 混沌及混沌神经网络同步	101
4.1 引言	101
4.1.1 混沌同步的定义及同步类型	101
4.1.2 存在驱动 - 响应关系的混沌同步原理	103
4.1.3 基于混沌同步的保密通信方案	104
4.2 细胞神经网络同步及保密通信方案	105
4.2.1 扩展频谱保密通信方案	106
4.2.2 数值仿真实验	107
4.2.3 分析小结	110
4.3 基于系统分离的混沌同步	112
4.4 混沌系统的同步观测器设计	118
4.4.1 非线性状态观测器	119
4.4.2 混沌系统的同步观测器设计	120
4.5 时间离散驱动同步观测器	125
4.5.1 离散驱动同步观测器的稳定性判据	125
4.5.2 仿真实验结果	127
4.6 超混沌系统的广义函数投影时滞同步	130
4.6.1 超混沌系统投影同步研究现状	130
4.6.2 参数不确定的自适应广义函数投影时滞同步	131
4.7 广义函数投影同步的超混沌保密通信	135
4.7.1 自适应广义函数投影同步和参数调制的保密通信	136
4.7.2 耦合广义函数投影同步和混沌遮掩的保密通信	138
4.8 线性耦合神经网络的同步	141
4.8.1 网络模型	141
4.8.2 仿真实验	142
4.9 输出或状态耦合的混沌神经网络同步	144
4.9.1 混沌神经网络同步研究现状	144
4.9.2 混沌神经网络同步的定义	144
4.9.3 全局指数同步的几个主要定理	145

4.10 本章小结	147
参考文献	148
第5章 混沌神经网络动力学特性	152
5.1 递归神经网络的稳定性	152
5.1.1 平衡状态的稳定性	153
5.1.2 递归网络的渐近稳定性分析	154
5.1.3 离散对称递归网络的渐近稳定性分析	155
5.1.4 连续非对称递归网络的渐近稳定性分析	157
5.2 一类时延神经网络的稳定性	157
5.2.1 引言	157
5.2.2 模型描述	159
5.2.3 全局稳定性条件	160
5.3 无时延细胞神经网络的无条件稳定性	164
5.4 有时延细胞神经网络的无条件稳定性	167
5.5 Aihara 混沌神经网络动力学特性	169
5.5.1 混沌神经网络模型	169
5.5.2 混沌神经网络时空动力学行为	172
5.6 全局耦合混沌神经网络动力学特性	173
5.6.1 引言	173
5.6.2 耦合映像神经网络模型的引入	174
5.6.3 耦合映像神经网络动力学特性	176
5.7 暂态混沌神经网络的全局搜索能力	178
5.8 时延细胞神经网络动力学特性	181
5.8.1 时延细胞神经网络模型	181
5.8.2 局部稳定性分析	182
5.8.3 分岔和复杂的动力学特性	183
5.8.4 混沌存在的条件	185
5.9 本章小结	185
参考文献	186
第6章 混沌神经网络在联想记忆中的应用	189
6.1 引言	189
6.1.1 混沌在信息处理中的作用	189
6.1.2 联想记忆基本原理	190
6.1.3 联想记忆动力学特性	191
6.2 联想记忆混沌神经元模型	192
6.2.1 Aihara 混沌联想神经网络	193
6.2.2 全局耦合映像混沌联想神经网络	195
6.2.3 基于类 Hebb 学习的多值模式联想记忆	196

6.2.4	Inoue 混沌联想神经网络	200
6.3	联想记忆混沌神经网络稳定性分析	202
6.4	改进的联想记忆混沌神经网络	204
6.4.1	网络的建立	204
6.4.2	网络联想记忆仿真试验	205
6.4.3	随机模拟方法对记忆存储容量的统计	206
6.4.4	性能分析	208
6.5	参数控制的联想记忆混沌神经网络	209
6.6	混沌系统在信息存储中的应用	215
6.6.1	分段线性一维混沌映射在信息存取中的应用	215
6.6.2	混沌控制法	219
6.7	本章小结	222
	参考文献	222
第 7 章	混沌神经网络在优化计算中的应用	225
7.1	混沌模拟退火思想的出现	225
7.2	混沌神经网络优化问题求解的统一框架	226
7.2.1	Hopfield 神经网络和能量函数修正	226
7.2.2	Chen 和 Aihara 模型	227
7.2.3	Wang 和 Smith 模型	228
7.2.4	具有混沌噪声的模型	228
7.3	暂态混沌神经网络动力学特性及优化应用	229
7.3.1	混沌神经网络模型	229
7.3.2	暂态混沌神经网络模型 TCNN	230
7.3.3	单一神经元的暂态混沌动力学行为	230
7.3.4	TCNN 求解旅行商问题	232
7.3.5	TCNN 求解 CDMA 多用户检测	234
7.3.6	TCNN 求解 OFDMA 系统中子载波和功率联合优化	235
7.4	自组织 TCNN 及在信道分配问题中的应用	237
7.4.1	神经网络求解信道分配问题	237
7.4.2	信道分配问题数学定义	239
7.4.3	TCNN 求解信道分配问题	241
7.4.4	自组织机制的应用	242
7.4.5	自组织 TCNN 算法	246
7.4.6	仿真实验	246
7.5	时变增益 TCNN 在方向估计中的应用	248
7.5.1	时变增益暂态混沌神经网络	248
7.5.2	空间信号源方向估计问题	250
7.5.3	方向估计的暂态混沌神经网络实现	250

7.5.4 仿真结果	252
7.6 Inoue 混沌神经网络模型及优化应用	252
7.7 本章小结	254
参考文献	255
第8章 混沌神经网络在生物学中的应用	258
8.1 神经元生理基础及脑电混沌态	258
8.1.1 神经元及其生理基础	258
8.1.2 脑电混沌态及其与思维关系	259
8.2 神经元中混沌与 H-H 神经网络模型	259
8.3 心脏节律中的混沌现象	263
8.3.1 心脏节律模型	263
8.3.2 发现心脏节律中混沌	264
8.3.3 复杂性测度及其在心律变异分析中的应用	271
8.4 细胞神经网络生物现象的生成	273
8.4.1 一维细胞神经网络传输波前端及其中断现象	274
8.4.2 脉冲控制法产生的生物电信号	277
8.5 胃电信号电生理学机制、模型及混沌特性	279
8.5.1 胃电图电生理机理	279
8.5.2 胃电活动电生理模型及时空混沌特性	281
8.6 本章小结	287
参考文献	287

绪 论

0.1 混沌、神经网络和混沌神经信息处理的发展

混沌是非线性动力学系统所特有的一种运动形式，是指非线性系统的一种非稳态、非周期、类似于随机运动的复杂动力学行为。它广泛地存在于自然界，诸如物理、化学、生物学、地质学，以及技术科学、社会科学等各种科学领域。20 世纪 60 年代开始，美国气象学家 Lorenz 在研究气候变化的过程中取得了很大成功^[1]。之后 50 年混沌学又得到进一步发展，可以说混沌是近年来国际上的一个研究热点，其理论和应用的成果大量涌现。

大致在同一时期，智能信息处理理论与技术也得到相应发展，尤其是 20 世纪 80 年代以来。一般来说，智能信息处理可以划分两大类，一类为基于传统计算机的智能信息处理，另一类为基于神经计算的智能信息处理。前一类智能信息处理系统包括智能仪器、自动跟踪、自动控制制导或自动故障诊断系统等。20 世纪 80 年代，人工智能理论的发展为这一类传统计算机的智能信息处理技术的发展，起到了重要的推动作用。目前，这类智能信息处理系统仍在继续向高技术发展，但其发展速度已不太适应社会信息数量增长和知识膨胀的需求，这促使人们寻求新的智能信息处理途径。

20 世纪 80 年代中期以来，世界上许多国家都掀起了神经网络的研究热潮。这里神经网络指人工神经网络 (artificial neural networks)，它是相对于生物神经网络而言的。人工神经网络以连接机制为基础，由大量简单的处理单元——神经元 (neuron) 以某种拓扑结构方式相互连接而成的非线性动力学系统。单个神经元的结构和功能比较简单，而大量神经元耦合产生的神经网络却具有非常丰富的复杂动力学行为，如稳定或不稳定的平衡点 (equilibrium)、稳定或不稳定的周期解、拟周期解 (quasi-periodic solution)、混沌 (chaos)、超混沌 (hyper chaos) 等。研究神经网络的目的在于探索人脑加工、存储和传递信息的机制，弄清人脑功能的机理，在此基础上寻求新的途径以解决目前计

计算机不能解决或不善于解决的一大类问题，构造以非线性大规模并行分布处理为主流的神经计算机。科学家们也希望以神经网络的研究成果来进行生物神经系统疾病的预防和治疗。

人工神经网络是一个综合性的交叉学科，来自神经生理学、计算机科学、数理科学、认知科学、信息科学、医学和生物学等领域的科学家从不同的角度对它进行了研究和探讨。神经网络的计算能力有以下两个特点：① 大规模并行分布式结构；② 神经网络学习能力及由此而来的泛化能力。泛化是指神经网络对不在训练集中的数据可以产生合理的输出。

神经网络具有更加接近人脑的信息处理方式，它具有以下性质和能力^[2]：

(1) 非线性性，一个非线性神经元互联而成的神经网络自身是非线性的。

(2) 输入输出映射，基于有监督学习或有师学习，利用训练样本对神经网络的权值进行修改，每个样本有一个唯一的输入信号和相应的期望响应组成。

(3) 自适应性，神经网络具有一个自身权值调整以适应外界变化的能力。

(4) 具有较好的容错性，即在部分输入权系数被破坏的情况下，甚至包含了错误输入条件下，网络也能正常工作。

(5) 超大规模 (Very Large Scale Integrated, VLSI) 技术的实现，神经网络大规模并行性使得神经网络很适合用 VLSI 技术实现。

(6) 神经生物类比，神经网络模型是由人脑的类别引发的，可将人工神经网络看做一个解释神经生物现象的研究工具。

人工神经网络的非线性性质非常重要，可以加以利用建立无线通信信道均衡器，达到通信过程中降低能耗的作用，当然建立的过程中需要大量的学习过程^[3]。目前人类对真实神经系统的了解十分有限，人工神经网络模型实际上是对人脑神经系统的极端简化，其完善和发展之路漫长而艰巨。大脑中存在混沌现象得到广泛的认可，很多生理实验证实了这一点^[4]。因此，混沌动力学为人们研究神经网络和利用神经网络进行信息处理提供了新的契机，用混沌动力学启发神经网络的研究或基于混沌的智能信息处理成为科研人员新的研究课题。

神经网络虽然是以非线性处理为基础的，但目前所研究的只是含较少神经元的小规模神经网络非线性系统的最简单特征。真正能模拟人脑信息处理机制的神经网络是一巨型非线性动力学系统，它的丰富的复杂动力学行为目前我们认识得还很不充分，有许多复杂现象还未认识到，很多重大的、根本性的问题，有些是空白，有些只有一个开端。对中等规模神经网络（一般包含几百到几千个神经元）的时空动力学特性的研究，已经发现一些有意义的时空混沌 (spatial-temporal chaos) 动力学现象。

神经网络非线性动力学理论与混沌理论、耗散结构理论、协同学、自组织理论、生物形态学、孤立子理论的结合不仅可以模拟和解释人脑处理、传递信息的一些机制，还可以解释生物进化、生物神经系统病变、社会学、生物形态学、化学反应动力学等领域的某些现象。目前，神经网络在与其他学科相互交叉和融合进行智能计算来处理信息是其主要的研究方向^[5]，其中，基于生物神经元实验结果观察的具有混沌特性的神经网络模型的建立和经典的递归Hopfield神经网络混沌动力学特性的引入是混沌神经网络模型建立的研究方向。模拟退火机制的引入是优化计算中避免陷入局部极小点的有效方法，而混沌模拟退火机制的引入，由于其搜索空间限制在整个空间中具有分形结构的极小区域中，与随机特性的模拟退火机制相比，优化计算效率更高。因此，基于混沌模拟退火机制的优化计算是混沌神经网络应用研究的方向之一。此外，混沌神经信息处理在联想记忆方面的应用研究也是研究的方向之一，联想记忆是人脑的固有特征，具有联想记忆的混沌神经网络更具有人脑的特点。可以预期，混沌神经信息处理可以得到广泛的应用。

0.2 混沌神经信息处理的研究内容

从混沌学发展历史上看，混沌研究起源于数学和物理，然后发展到工程领域，接着进入信息和社会科学。近几年来，混沌系统在商业和工业的应用不断增长。一个重要原因是计算机硬件技术的发展和存储能力的提高。当前，人们正利用混沌动力学中“简单的方程可以产生复杂的动力学行为”这一重要特征，来实现具有适应性的智能信息处理功能。何谓智能信息处理？一般来说，智能信息处理至少应包括以下一些高级功能：

- 与人脑一样地记忆和处理信息；
- 具有巨大的计算能力；
- 具有广泛的适应性；
- 可利用学习结果（知识、经验等）进行处理。

随着神经科学的发展，人们对脑神经系统所实现的信息处理的机理逐步深入理解，并采用各种手段和方式分析和实现脑神经系统的信息处理行为。在这种趋势中，人工神经网络模型和学习算法的研究独具魅力，原先靠生理心理实验难以分析的信息处理行为，采用神经网络理论和技术使之成为可能。人工神经网络是对真实脑神经系统构造和功能予以极端简化的模型，其主要特征是，大规模的并行处理、分布式的信息存储、良好的自适应性、自组织性、很强的学习功能以及联想功能和容错功能。对其研究有助于探明大脑的信息处理方

式，建立脑的模型，并从应用的角度寻求其工程实现的方法。

当多种边缘学科发展起来之后，人们往往会注意研究各学科之间的联系，找出其共同的本质。同样，对神经网络理论和混沌理论的研究也是如此。事实上，人们在脑电图中发现了混沌现象的存在，证明混沌是神经系统的正常特征。神经网络和混沌显然各自具有不同的特点，但从本质上，它们之间具有共同的特性，即系统的非线性。把神经网络和混沌结合起来，研究混沌神经网络在信息处理中的应用，已经被视为一代信息处理技术的关键。

从 20 世纪 90 年代起，混沌和神经网络相互融合的研究发展很快。其主要研究目标是弄清大脑的混沌现象，建立含有混沌动力学的神经网络模型，并用于信息处理中，提高信息处理的效率和柔性，进一步拓宽混沌神经网络应用范围。

由此可见，研究神经网络的动态特性尤其是混沌复杂性具有重大的理论和实用价值。本书从信息科学的角度出发，研究神经网络的机理和特征，探索混沌动力学与神经网络信息处理之间的相互交叉和融合，在对这两方面的理论进行深入研究的基础上，对两者结合方面即混沌神经网络的理论进行了研究，并对其在信息处理等方面的应用做了一些探索性工作。

0.2.1 混沌神经网络模型

早期的研究是基于生物学实验中生物神经元的混沌响应建立混沌神经元模型，典型的是南云 - 佐藤模型的建立及其改进^[6,7]。在混沌神经元模型基础上建立混沌神经网络模型，典型的是 Aihara 混沌神经网络模型^[8]，Aihara 模型是根据墨鱼巨大神经元轴突电生理实验，在 Hodgkin - Huxley 方程和南云 - 佐藤模型基础上提出的。基于生物学实验中生物神经元实验结果，分析研究并建立混沌神经元模型及混沌神经网络模型是有关混沌神经网络模型研究的内容之一。还有，每个神经元满足可产生混沌映射的映像如 Logistic 映像，神经元之间通过一定的连接会产生时空复杂性，如同人脑中的非线性信息处理过程。连接方式不同如全局的、局部的和双向不对称的；还有每个神经元选取不同的混沌映射，如用反对称的立方映射代替 Logistic 映射等方面的考虑，可以建立不同的混沌神经网络模型。此外，就是基于人工神经网络中经典模型，如 Hopfield 模型和细胞神经网络模型发展而来具有混沌态的神经网络模型的研究。而对于 Hopfield 神经网络如何构成混沌神经网络的研究，既可以从“内部”参数控制，又可以从“外部”混沌噪声产生来研究。而“内部”参数控制，既可以从反馈控制角度，又可以从 Hopfield 神经网络离散化过程中改变时

间步长去进行研究。

0.2.2 混沌神经网络的控制

混沌控制主要有两个方面，一是抑制混沌，即消除混沌的危害；二是引导混沌，即如何引导对系统有利的混沌。对于抑制混沌而言，又可分为两类，一类是根据实际需要，将混沌吸引子的某不稳定周期轨道（unstable periodic orbits, UPO）进行稳定化控制，即对给定的某一混沌吸引子，只对系统做小的扰动就可以获得某个预期的周期轨道。这种控制不改变系统原有的周期轨道。另外一类是通过控制或者驱动，只求将混沌抑制掉，得到的周期轨道不一定是系统原有的轨道。混沌控制的最早研究工作，即1990年美国学者 Ott 等提出的参数微扰控制方法（即 OGY 方法）^[9]，就属于前者。他们的研究成果使人们认识到，原本对初值极为敏感的、长期无法预测的“随机性”生成的混沌系统，可以通过有效方法加以控制。这一突破性研究进展使混沌的应用迅速发展，并展示很广的应用前景。OGY 方法只适用于离散动力学系统及可用庞加莱映射刻画连续动力学系统，且大多情况下只能控制低周期轨道。由于 OGY 方法的不足和实际控制的需要，许多学者发展了一系列的混沌控制方法。具有代表性的如自适应控制法、时延反馈控制法和正比于系统变量的脉冲控制法等。上述控制方法的共同点是，把原来正的李雅普诺夫指数变为负的，从而实现系统从不稳定到稳定的转变。此外，还有学者研究如何将传统的控制理论运用于混沌控制。

对于混沌神经网络而言，像一维耦合映像格子（coupled map lattice, CML）模型和 Aihara 混沌神经网络，钉扎控制方法可以有效地加以反馈控制。这些控制不仅仅抑制混沌，而且使得混沌神经网络直接用于信息记忆等。此外，混沌系统的控制方法，如延时反馈控制法也可以用到 Aihara 混沌神经元模型中。

0.2.3 混沌神经网络的同步

广义来讲，混沌同步属于特定的混沌控制。所谓同步是指两个或多个混沌系统在耦合或驱动的作用下使其混沌运动达到一致的过程，自 Pecora 和 Carroll 在理论与实验中研究、设计并发现 PC 同步法^[10]，使混沌系统可以同步以来，混沌同步及其在保密通信中的应用已经成为科学界和工程界研究的热点。PC 同步法的基本思想是，用一个混沌系统的输出去驱动另一个混沌系统来实现两个混沌系统的同步。这一驱动实际是指两个系统的单向耦合。在理论上，混沌