

混沌神经网络 及其应用

HUNDUN SHENJING WANGLUO JIJI YINGYONG

徐耀群 孙明◇著

混沌神经网络 及其应用

HUNDUN SHENJING WANGLUO JIQI YINGYONG

徐耀群 孙明◇著

图书在版编目(CIP)数据

混沌神经网络及其应用 / 徐耀群, 孙明著. -- 哈尔滨: 黑龙江大学出版社, 2012.9
ISBN 978 - 7 - 81129 - 507 - 8

I. ①混… II. ①徐… ②孙… III. ①人工神经网络
IV. ①TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 153746 号

混沌神经网络及其应用

HUNDUN SHENJING WANGLUO JIQI YINGYONG

徐耀群 孙 明著

责任编辑 李 丽 肖嘉慧
出版发行 黑龙江大学出版社
地 址 哈尔滨市南岗区学府路 74 号
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 720 × 1000 1/16
印 张 16.75
字 数 225 千
版 次 2012 年 9 月第 1 版
印 次 2012 年 9 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978 - 7 - 81129 - 507 - 8
定 价 39.00 元

本书如有印装错误请与本社联系更换。

版权所有 侵权必究

前 言

混沌是一种普遍的非线性现象,其行为复杂且貌似随机,但存在精致的内在规律性,是目前非线性科学研究的主体之一。神经网络是高度的非线性动力学系统,具有大规模的并行处理能力、信息存储能力、容错能力以及自组织和自适应能力。与当今的计算机相比,神经网络更加接近大脑的信息处理模式。大量的生物实验表明,脑神经系统具有分岔、混沌和奇怪吸引子等动力学行为,因此神经网络与混沌密切相关。混沌神经网络被认为是可实现其真实世界计算的智能信息处理系统之一,已被应用于优化计算、模式识别、通信以及图像处理等领域。

通过引入 Lyapunov 能量函数的概念, Hopfield 把神经网络的拓扑结构,即网络的连接权值矩阵与组合优化问题的目标函数对应起来,从而将神经网络的寻优问题转换成动力系统的演化问题。由于 Hopfield 首次将神经网络成功地应用于组合优化问题,引起了人们的广泛关注和研究。但是, Hopfield 神经网络采用了梯度下降策略,在寻优过程中极易收敛到优化问题的局部极小,甚至还会收敛到优化问题的不可行解,因而限制了 Hopfield 神经网络的应用。为此,人们就如何改善 Hopfield 神经网络的优化性能进行了广泛而深刻的研究。混沌神经网络借鉴混沌动力学的全局遍历性特点,使网络的搜索过程不受能量函数的限制,有效地避免了优化过程陷入局部极小点,成为了改进 Hopfield 神经网络的优化效率和质量,乃至解决组合优化问题的有效工具。

本书详细介绍了以 Hopfield 神经网络为基础而发展出来的混沌神经网络模型,分析和阐述了它们在优化过程中所体现的优化机制及

动力学特性,反映了混沌神经网络在研究过程中所存在的问题,预示了混沌神经网络的研究方向;同时,本书还融入了作者近年来在混沌神经网络及应用领域所取得的一些最新研究成果,希望可以丰富混沌神经网络的研究内容,为混沌神经网络的应用提供一定的理论参考和借鉴。

全书共四部分九章。第一部分包括第 1、2 章。首先介绍混沌学与混沌神经网络优化计算的发展状况以及混沌神经网络的应用研究现状;然后详细介绍混沌动力学与迟滞动力学的相关概念。第二部分即第 3 章。首先简单介绍最优化问题,然后主要介绍 Hopfield 神经网络的发展,包括经典的 Hopfield 神经网络、迟滞 Hopfield 神经网络、混沌神经网络等网络模型,最后介绍 Hopfield 神经网络与混沌神经网络的统一框架理论。第三部分包括第 4、5、6、7、8 章。主要从激励函数、模拟退火和自反馈等角度介绍目前发展了的新型混沌神经网络,包括小波与 Sigmoid 激励函数组合的暂态混沌神经网络、非线性自反馈暂态混沌神经网络、带扰动的暂态混沌神经网络以及带白噪声的暂态混沌神经网络,并分别在旅行商组合优化问题上进行了仿真与比较。第四部分即第 9 章。主要介绍混沌神经元动力学系统的密码学特性及其在图像加密上的应用,包括混沌长久保持的混沌神经元及其所表现的超混沌。全书第 1、2、5、6 章由孙明博士著,第 3、4、7、8、9 章由徐耀群教授著。

本书的出版得到了黑龙江省普通高等学校优秀学术著作出版资助项目的资助,评审专家对书稿进行了认真审阅,提出了许多宝贵意见和建议。在此,对黑龙江省教育厅相关领导和专家、黑龙江大学出版社相关责任编辑表示诚挚的谢意。

由于作者水平所限,书中难免存在错误和不足之处,恳请广大读者批评指正。

徐耀群 孙明

2011 年 10 月于哈尔滨

目 录

| | |
|---|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 引言 | 1 |
| 1.2 混沌神经网络的研究进展 | 2 |
| 1.3 混沌神经网络的应用研究 | 12 |
| 1.4 本书内容安排 | 13 |
| 参考文献 | 15 |
| 第 2 章 混沌与迟滞动力学 | 24 |
| 2.1 混沌与混沌动力系统 | 24 |
| 2.2 混沌的特征与特征量 | 26 |
| 2.3 迟滞动力学 | 35 |
| 参考文献 | 38 |
| 第 3 章 Hopfield 神经网络与混沌神经网络 | 39 |
| 3.1 最优化问题简介 | 39 |
| 3.2 Hopfield 神经网络 | 43 |
| 3.3 迟滞 Hopfield 神经网络 | 48 |
| 3.4 混沌噪声 Hopfield 神经网络 | 51 |
| 3.5 混沌神经网络 | 53 |
| 3.6 暂态混沌神经网络 | 57 |
| 3.7 统一框架理论 | 62 |
| 参考文献 | 66 |

| | |
|---|------------|
| 第 4 章 连续小波与 Sigmoid 激励函数组合的暂态混沌神经网络及其在优化问题上的应用 | 69 |
| 4.1 小波变换与逆变换 | 69 |
| 4.2 连续小波与 Sigmoid 激励函数组合的暂态混沌神经网络 | 70 |
| 4.3 分段模拟退火对求解旅行商问题优化性能的影响 | 87 |
| 参考文献 | 106 |
| 第 5 章 非线性自反馈暂态混沌神经网络及其在旅行商问题上的应用 | 107 |
| 5.1 Gauss 小波自反馈暂态混沌神经网络 | 107 |
| 5.2 Morlet 小波自反馈暂态混沌神经网络 | 133 |
| 5.3 三角函数自反馈混沌神经网络 | 144 |
| 5.4 反三角函数自反馈混沌神经网络 | 155 |
| 参考文献 | 166 |
| 第 6 章 扰动对暂态混沌神经网络的影响 | 168 |
| 6.1 三角函数扰动对暂态混沌神经网络的影响 | 168 |
| 6.2 小波函数扰动对暂态混沌神经网络的影响 | 181 |
| 参考文献 | 194 |
| 第 7 章 白噪声反馈神经网络 | 195 |
| 7.1 白噪声 Hopfield 反馈神经网络 | 195 |
| 7.2 白噪声线性自反馈混沌神经网络 | 200 |
| 7.3 白噪声非线性自反馈混沌神经网络 | 211 |
| 参考文献 | 219 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 第 8 章 小波迟滞混沌神经网络及其在旅行商问题 | |
| 上的应用 | 220 |
| 8.1 基于小波尺度退火的迟滞暂态混沌神经元 | 221 |
| 8.2 基于小波尺度退火的迟滞暂态混沌神经网络 | 225 |
| 8.3 旅行商问题仿真 | 228 |
| 参考文献 | 231 |
| 第 9 章 混沌神经元动力学系统的密码学特性分析 | |
| 及其在图像加密上的应用 | 233 |
| 9.1 基于混沌搜索永久保持的小波混沌神经元动力系统 | 234 |
| 9.2 小波混沌动力系统的超混沌 | 242 |
| 9.3 小波混沌神经网络的超混沌在图像加密上的应用 | 249 |
| 参考文献 | 256 |

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

神经网络(Neural Network, NN)理论是近年来人工智能的一个热门研究领域。神经网络基于连接机制,由多个神经元以某种规则连接而成。神经网络能够依靠神经元之间的相互作用,表现出复杂的动力学行为,具有大规模的并行处理能力、信息存储能力、容错能力以及自组织和自适应能力。与当今的计算机相比,神经网络更加接近人脑的信息处理模式。^[1]目前,神经网络已成为解决很多问题的有力工具,对突破现有科学技术的瓶颈,更深入地探索非线性等复杂现象起到了重大作用。

自 1943 年美国心理学家 McCulloch Warren S. 与数学家 Pitts Walter H. 提出人工神经元的 M - P 模型^[2]以来,人工神经网络的研究已有 60 多年的历史,其发展过程曲折起伏。20 世纪 80 年代, Hopfield 神经网络^[3]和反向传播(Back Propagation, BP)神经网络^[4]的提出,掀起了神经网络新的研究热潮,成为神经网络发展史上伟大的里程碑,为神经网络的研究和发展奠定了坚实的基础。

1982 年, Hopfield 开创性地在物理学、神经生物学和计算机科学等领域架起了桥梁,提出了 Hopfield 反馈神经网络,证明了在高强度连接下的神经网络能够依靠集体的协同作用自发产生计算行为。^[5] Hopfield 通过在网络中引入能量函数,构造出动力学系统,并使网络的平衡态与能量函数的极小解相对应,从而将求解能量函数极小解的过

程转化为网络向平衡态的演化过程。^[5]旅行商问题(Traveling Salesman Problem, TSP)是一个经典的 NP 完全的组合优化问题,由于其在许多领域中具有实际的应用价值,所以一直有众多学者对其进行研究。Hopfield 神经网络对 TSP 的成功求解,开辟了神经网络在计算机科学领域中应用的新天地。

然而,由于单纯采用梯度下降策略进行寻优,所以 Hopfield 神经网络极易收敛到组合优化问题的局部极小解(非组合优化问题的全局最优解),也可能会收敛到组合优化问题的不可行解。这限制了 Hopfield 神经网络的应用,特别是在复杂或大规模问题上的应用。

为了提高 Hopfield 神经网络的优化性能,许多学者将生物神经元动力学或其他技术引入到 Hopfield 神经网络当中,以克服梯度下降策略的缺陷。受生物神经元混沌特性的启发,通过在 Hopfield 神经网络中引入混沌动力学,Aihara^[6],Nozawa^[7]和 Chen 等^[8]学者提出了混沌神经网络模型。该类型的网络借鉴了混沌动力学的全局遍历性特点,其搜索过程不受能量函数的限制,从而可有效地避免优化过程陷入局部极小点。^[5]另外,受生物神经元迟滞特性^[9]的启发,许多学者^[10-12]亦将迟滞动力学引入到 Hopfield 神经网络中,提高了 Hopfield 神经网络在存储容量、信噪比和回忆等方面的性能。除了混沌动力学和迟滞动力学外,研究者^[13-16]也考虑将小波技术与 Hopfield 型网络(以 Hopfield 神经网络为基础的网络)结合起来,以提高网络的优化性能。

1.2 混沌神经网络的研究进展

混沌是目前非线性科学研究的主体之一。科学界认为,混沌的研究不仅具有重大的科学意义,而且具有广泛的应用前景,它几乎涉及到自然科学和社会科学的各个领域。^[17]混沌科学最热心的倡导者、美国海军部官员 M. Shlesinger 认为,混沌可与相对论和量子力学相提并论,而物理学家 J. Ford 则认为混沌就是 20 世纪物理学的第三次重大的革命。^[18]

由于神经网络是高度非线性动力学系统,与混沌密切相关,因此混沌神经网络被认为是可实现其真实世界计算的智能信息处理系统之一。^[18]目前对混沌神经网络的研究还处于初始阶段,其研究主要限于认识单个神经元的混沌特性和对简单混沌神经网络的行为分析。

在过去几年里,混沌神经网络已经被证明是解决组合优化问题的有效工具,并且已有许多学者建立了许多新的混沌神经网络模型,成功地解决了组合优化问题,但是对混沌神经网络模型参数之间的内在联系、参数对网络求解组合优化问题性能的关系以及参数的初始化等方面缺乏较严格的理论分析。

1.2.1 混沌学综述

混沌学的研究热潮开始于20世纪20年代,但混沌学的研究渊源则可以追溯到19世纪。^[19]

科学界认为,真正发现混沌的第一位科学家是伟大的法国数学家、物理学家庞加莱(J. H. Poincaré, 1854—1912),他在研究太阳系三体问题的稳定性时,发现了三体引力的相互作用能够产生惊人的随机行为。当庞加莱意识到当时的数学水平不足以解决太阳系三体运动的复杂问题时,就将动力学系统和拓扑学有机地结合起来对其进行研究,并于1903年在其《科学与方法》一书中提出了庞加莱猜想,即太阳系三体问题在一定范围内的解是随机的。实际上,庞加莱猜想就是一种保守系统中的混沌。

1954年,苏联概率论大师Kolmogorov在阿姆斯特丹国际数学大会上宣读了《哈密顿(Hamilton)函数中微小变化时条件周期运动的保持》^[20],该文章是KAM理论的雏形,为保守系统如何出现混沌提供了信息,被公认为具有划时代意义的科学文献。1963年,Kolmogorov的学生V. I. Arnold和瑞士数学家J. Moser几乎同时证明了在近可积的哈密顿系统中随机成分是有限的,即导致不可积性的扰动项很小。这就是著名的以他们三人名字的首字母命名的KAM定理。^[18]我国著名的混沌学家郝柏林院士认为KAM定理是牛顿力学发展史上最重大

的突破。^[21] KAM 定理被科学界公认为混沌学研究的第一个重大突破。

1963 年,美国著名气象学家 E. N. Lorenz 在其论文《确定性的非周期流》^[22]中指出,三阶非线性自治系统(不显含时间 t 的系统)在一定的初始条件下能够表现出混沌解。他研究的三阶非线性自治方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = -\sigma(x - y) \\ \dot{y} = -xz + rx - y \\ \dot{z} = xy - bz \end{cases} \quad (1-1)$$

该方程就是著名的 Lorenz 方程,是大气在温度梯度作用下的自然对流系统。当 $b = 8/3, \sigma = 10, r < 1$ 时, Lorenz 方程的解的性质趋于无对流时的稳态;而当 $b = 8/3, \sigma = 10, r > 1$ 时, Lorenz 方程的解看起来很混乱,呈现出非周期性。图 1-1 是 $b = 8/3, \sigma = 10, r = 28$ 时 Lorenz 方程的解在三维相空间的演化图。需要注意的是,与 KAM 定理不同, Lorenz 方程讨论的是耗散系统。KAM 定理和 Lorenz 方程分别从不同的角度说明了保守系统和耗散系统是如何演化出混沌的。与保守系统相比,耗散系统的显著特点是演化过程的不可逆性,这是耗散系统产生混沌的主要原因。耗散系统的另一个特点是存在吸引子。总的

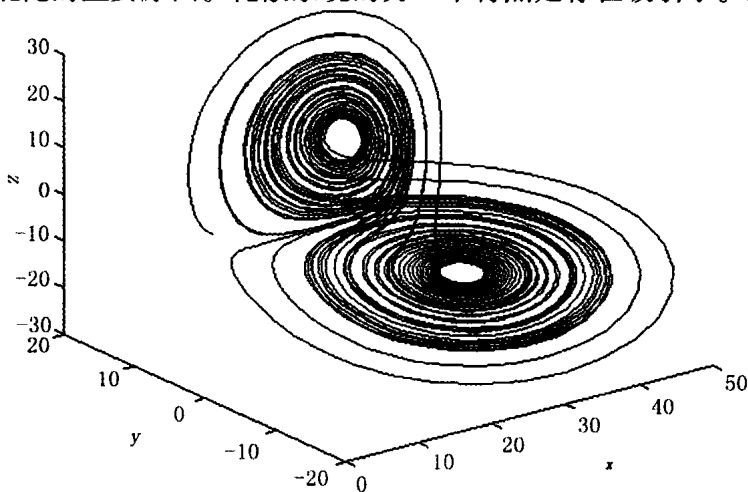


图 1-1 $b = 8/3, \sigma = 10, r = 28$ 时 Lorenz 方程的三维演化图

来说,耗散系统更具有产生混沌的优越条件,这被科学界认为是混沌学研究的第二个重大突破。

“混沌”作为数学名词,首次出现在 1975 年李天岩和他的导师 J. Yorke 所发表的《周期 3 蕴含混沌》^[23]一文中。“周期 3 蕴含混沌”即著名的 Li - Yorke 定理,是一个关于混沌的数学定理,它描述了混沌的数学特征,其基本思想是受 Lorenz 1963 年的论文^[22]启发并由李天岩证明得到的。该定理为以后一系列的研究开辟了方向。

Logistic 方程是种群生态学家对混沌学的一个巨大贡献。在生态学中,研究动植物群体与环境之间的相互作用是非常有意义的。自然界中群体数目的多少经常取决于食物、竞争者和捕食者等因素。最著名的虫口模型,即 Logistic 方程可描述如下:

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n) \quad (1-2)$$

式中, x_n 为某地区第 n 年虫口数量与该地区能供养的最大虫口数量之比; μ 为控制参数,又称为分岔参数。在某一范围内,由于虫口赖以生存的食物等资源有限,虫口之间的资源争夺必将导致复杂的动力学演化行为。

1976 年,生态学家 R. May 发表了题为《具有复杂动力学过程的简单数学模型》^[24]的综述文章,以单峰映射为对象,重点讨论了 Logistic 方程的动力学特征,考察了混沌区的精细结构,绘制了分岔轮廓图。当分岔参数 $3 \leq \mu \leq 4$ 时,Logistic 方程的动力学形态十分复杂,系统状态的演化由倍周期分岔通向混沌,这就是著名的倍周期分岔进入混沌之路,如图 1-2 所示。当分岔参数 μ 为 4 时,Logistic 方程单峰映射上的混沌如图 1-3 所示。1979 年,Feigenbaum^[25,26]在 May 的研究基础上独立地发现了倍周期分岔过程中分岔间距的几何收敛率,并发现该收敛率为一常数,等于 4.669 201 66...,这就是著名的 Feigenbaum 常数。Feigenbaum 还把相变临界态理论中的普适性、标度性和重正化群方法引入混沌学,计算出了一组新的普适常数,建立了关于一维映射混沌的普适理论,发现了尺度变换的方法,给出了一条通往混沌的具体道路,把混沌学研究从定性分析阶段推进到定量分析阶段,从而成

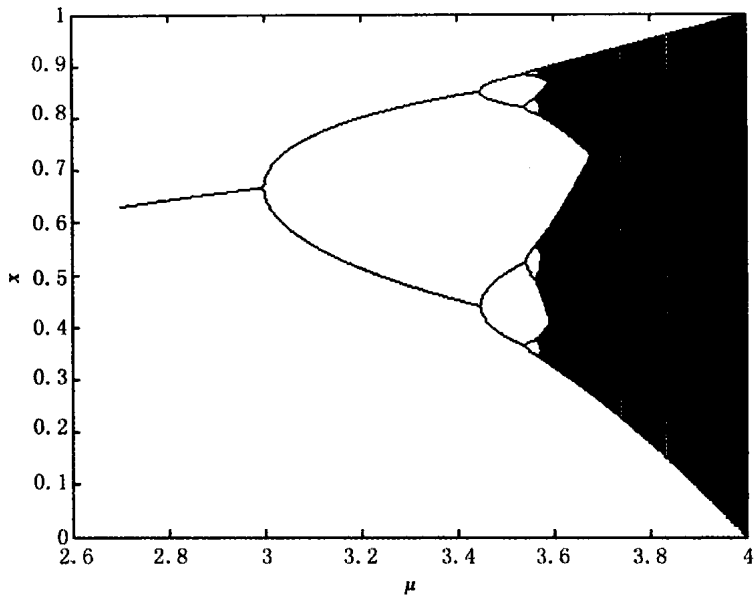


图 1-2 Logistic 方程的倍周期分岔图

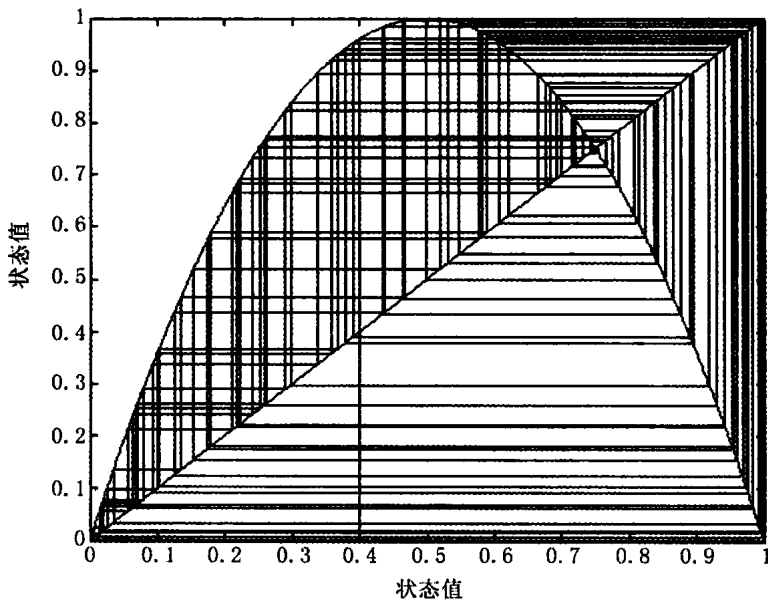


图 1-3 Logistic 方程单峰映射上的混沌图

为混沌学研究的一个重要的里程碑。

进入 20 世纪 80 年代,系统如何从有序进入新的混沌以及混沌的特征量是人们重点研究的内容。这一阶段的著名科学家代表有美国数学家 Mandelbrot 和 Takens, Packard, Farmer 以及 Grassberger, Procaccia 等。Mandelbrot 的《自然界的分形几何学》^[27] 等奠定了分形研究的基础,克服了传统几何学描述混沌在相空间运动的局限性,是描绘混沌的种种不规则、回转曲折的相空间轨道的理想工具。Takens^[28], Packard, Farmer 等^[29] 提出了重构动力学轨道相空间的延迟法。Grassberger, Procaccia 等^[30] 则利用重构动力学轨道相空间的延迟法,从时间序列中计算出系统的奇怪吸引子的统计特征,如分数维、Lyapunov 指数和 Kolmogorov 熵等,弥补了分形几何学不能完全揭示系统动力学特性的缺陷。

郝柏林编撰的《混沌》一书为国内混沌科学的发展起到了一定的推动作用。徐京华提出了能表现出混沌的 3 种神经细胞的复合网络,并且能得到与人脑的脑电图相似的输出。丁明洲和郝柏林对 Lorenz 模型的周期窗口进行了系统的研究。此后,国内出版了一系列与混沌研究相关的科技图书,比如郝柏林的《从抛物线谈起——混沌动力学引论》、卢侃翻译的《混沌动力学》、黄润生的《混沌及其应用》、陈士华与陆君安合著的《混沌动力学初步》以及吕金虎等的《混沌时间序列分析及其应用》,极大地推动了国内在混沌上的研究进展。

混沌是自然界中普遍存在的一种现象,对混沌的研究能够推动其他学科的发展,其他学科又能够反过来促进对混沌的研究。目前,混沌已在生物学、数学、物理学、化学、人脑科学、信息科学、气象学、宇宙学、地质学、经济学和美术等多个领域得到了广泛的应用。

1.2.2 混沌神经网络优化计算发展综述

1982 年 Hopfield 提出的神经网络的离散随机模型^[3] 以及 1984 年 Hopfield 提出的神经网络的连续模型^[31] 体现了 D. Marr 关于神经计算等理论^[32,33] 的基本精神,把神经网络看作动力学系统,并用 Sigmoid 函

数来代替二值逻辑。通过引入 Lyapunov 能量函数的概念, Hopfield 把神经网络的拓扑结构(网络的连接权值矩阵)与组合优化问题(目标函数)对应起来,从而将神经网络的寻优问题转换成动力系统的演化问题。引入了 Lyapunov 指数后,网络的收敛性和稳定性有了明确的判据。Hopfield 神经网络具有联想记忆、分类与误差自校正等智能特性,为研制新型的电子神经计算机奠定了基础。Hopfield 还首次将神经网络应用于组合优化问题,其在城市旅行商问题上的成功应用,引起了人们的广泛关注和研究。然而,由于 Hopfield 神经网络采用梯度下降策略,所以其在寻优过程中极易收敛到优化问题的局部极小,甚至还会收敛到优化问题的不可行解,从而限制了 Hopfield 神经网络的应用。为此,人们就如何改善 Hopfield 神经网络的优化性能进行了广泛而深刻的研究。

受生物神经元混沌特性的启发,通过在 Hopfield 神经网络中引入混沌动力学, Aihara 等^[6]于 1990 年提出了混沌神经网络模型;通过 Euler 离散 Hopfield 神经网络的连续模型并增加一个大的自反馈项, Nozawa^[7]于 1992 年得到了一个类似的混沌神经网络模型。该类型的网络是借鉴混沌动力学的全局遍历性特点,使网络的搜索过程不受能量函数的限制,从而可有效地避免优化过程陷入局部极小点。^[5]对城市旅行商问题的优化研究,验证了混沌神经网络相对随机算法的有效性。因而,混沌神经网络成为了改进 Hopfield 神经网络的优化效率和质量,乃至解决组合优化问题的有效工具。

借鉴模拟退火的退温策略,通过控制混沌神经网络的参数,使网络表现出混沌动力学特性,以进行全局遍历搜索,是利用混沌神经网络求解组合优化问题的一类有效途径。通过指数递减混沌神经网络的自反馈连接权值, Chen 与 Aihara^[8]提出了混沌模拟退火算法,即网络在优化初期先利用混沌动力学进行全局遍历性“粗搜索”,然后通过倍周期倒分岔退出混沌进入梯度下降阶段,利用梯度下降策略进行“细搜索”,从而成功高效地解决了城市旅行商等组合优化问题。通过指数递减 Euler 离散的连续 Hopfield 神经网络的时间步长, Wang

等^[37]提出了另一种混沌模拟退火算法,网络动态同样能够经历一个由混沌“粗搜索”到倍周期倒分岔再到梯度下降“细搜索”的过程,同样能够有效地避免网络陷入局部极小点。由于混沌遍历搜索在整个网络的寻优过程中是暂时性的,因此以上两种经典的网络又被称为暂态混沌神经网络。

通过控制网络内部参数,使网络表现出混沌动态,并利用混沌遍历克服网络陷入局部极小点的策略,可称为“内方法”。上述的Chen - Aihara 与 Wang 的暂态混沌神经网络均属于“内方法”。而通过在Hopfield神经网络中引入外部机制产生的混沌噪声来构成混沌神经网络的策略,则称为“外方法”。这种方法基于混沌时间序列永不可精确重复的规律,当外部引入的混沌的幅度足够小时,能量函数曲面上的寻优过程在具有丰富时空特性的混沌动态的激励下能够产生避免局部极小的能力,并保持对问题的原始描述不变。“外方法”是用于解决组合优化问题的另一种途径。

对“内方法”的研究大体可细分为模拟退火、激励函数和自反馈等3个方面。

(1)在“内方法”的模拟退火上,Zheng 等^[38]将 Chen - Aihara 网络自反馈连接权的模拟退火(指数递减)和 Wang 网络的时间步长模拟退火(指数递减)相结合,提出了新的混沌神经网络模型,该网络同时具有 Chen - Aihara 网络和 Wang 网络的特性,这两种不同的模拟退火的结合不仅影响着能量函数的大小,而且影响着能量函数的形状;Xu 等^[39]对混沌神经网络中激励函数的陡度系数、神经元耦合因子以及自反馈连接权的模拟退火速度进行了详细的分析,发现了它们影响神经元混沌动态及其收敛速度的规律,并在此规律的指导下控制网络的这些参数,使其有助于提高网络的优化性能;谢传泉等^[40]通过分析自反馈连接权的指数递减方式和线性递减方式对神经元收敛速度的影响,提出了一种新的分段模拟退火方式,加快了暂态混沌神经网络的收敛速度。

(2)在“内方法”的激励函数上,何振亚^[41]、谭营^[42]及张学义^[43]