

# 复杂系统控制 与决策中的智能计算

FUZA XITONG KONGZHI YU JUECEZHONG  
DE ZHINENG JISUAN

倪建军 任黎 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 复杂系统控制与决策 中的智能计算

倪建军 任黎 著

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书采用系统的研究思路,从复杂系统控制与决策的特点分析入手,指出复杂系统控制与决策存在的问题,然后以水资源水环境系统为主要研究对象,着重研究智能计算方法在复杂系统控制与决策中的应用。

本书全面介绍了复杂系统控制与决策中的主要智能计算方法,全书共分8章,包括绪论、神经网络、模糊计算、群体智能、强化学习、小波神经网络、核主元分析与支持向量机、智能计算新进展及其应用前景展望等。

本书可以作为高等院校系统工程、控制科学、人工智能、信息学科以及相关交叉学科的大学生和研究生教材,也可以作为相关领域研究人员和教师的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

复杂系统控制与决策中的智能计算/倪建军,任黎

著. —北京:国防工业出版社,2013.10

ISBN 978-7-118-09055-0

I. ①复… II. ①倪… ②任… III. ①水环境—控制系统②水环境—决策支持系统—计算方法 IV. ①X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 236758 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 880×1230 1/32 印张 5½ 字数 220 千字

2013 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

复杂性科学是研究复杂系统和复杂性的一门方兴未艾的交叉学科。国外有学者称复杂性科学是科学史上继相对论和量子力学之后的又一次革命,国内戴汝为院士称其为“21 世纪的科学”。人类正在更大范围内改造自然和社会,面临的复杂系统问题越来越多,这些系统包括环境系统、经济系统、社会系统等,深入研究复杂系统的控制与决策问题,具有现实的指导意义。智能计算是随着计算机技术发展和人们对自然界的深入理解而发展起来的一种仿生计算方法,它强调对人类和其他生物智能行为的模仿,注重向自然界学习、汲取其中有益的规律和原理。智能计算方法作为一种从自然界发展过程中受到启迪发展起来的计算方法,可以较好地解决复杂系统中多个方面的问题,包括建模、预测、决策、控制等。

目前,复杂系统的研究已得到广泛关注,有不少研究成果问世,但是系统介绍复杂系统控制与决策的专著还较少。已出版的复杂系统相关著作,主要是针对复杂系统的某一专题进行阐述,有些则是在哲学层面展开讨论。作者早些时候出版的《复杂系统多 Agent 建模与控制的理论及应用》(电子工业出版社,2011 年)主要介绍了复杂系统多 Agent 建模与控制的相关理论方法,作为该书的姊妹篇,本书的主要目的不在于介绍复杂系统研究的深奥理论和探讨复杂系统研究的哲学意义,而是希望借助于复杂系统有关具体问题的解决,探讨复杂系统控制与决策的方法,从而期望能在一定程度上解决使复杂系统研究人员深感兴趣但又深受困扰的问题——因为“复杂”而产生研究兴趣,可是又由于太复杂而无法在现实中把握具体、有意义的研究对象,以至无法进行具体和实质性的研究工作,从而失去信心和方向。

本书主要研究智能计算方法在复杂系统控制与决策中的应用,全

书以水资源水环境复杂系统为主要研究对象进行介绍。同时结合笔者最新研究课题——仿动物空间认知的多机器人搜救,对智能计算在复杂系统控制与决策中的应用前景进行了展望。

本书是在作者近几年研究工作的基础上写作而成。自2005年以来,在相关研究领域,作者先后得到了国家自然科学基金(61203365)、江苏省自然科学基金(BK 2012149, BK 20130842)、中央高校基本科研业务费专项资金(2011B04614)、上海市国内科技合作项目(12595810200)、常州市传感网与环境感知重点实验室开放基金(CZSN 201102)等项目的资助。上述基金项目为我们的研究工作提供了较好的基础和氛围,作者先后在IEEE Transactions系列期刊及其他有关杂志发表学术论文多篇,这些成果构成了本书的主要内容,在此向有关部门、期刊及其审稿人等表示感谢并致以敬意。

在研究和写作过程中,得到了许多老师和同志们的帮助。研究生张传标、刘明华等为本书的部分实验做了编程和仿真工作,殷霞红、李新云等对书稿进行了校正,在此表示感谢。本书的研究工作得到了加拿大圭尔夫大学 Simon. X. Yang 教授、中国矿业大学马小平教授、上海海事大学朱大奇教授、国防科技大学徐昕研究员、河海大学徐立中教授、董增川教授、范新南教授、费峻涛教授、刘小峰教授等的热情鼓励和积极帮助,特一并表示感谢。

限于作者水平,书中定有不少缺点和不足,恳请读者和专家批评指正。在本书的编写过程中参考过的文献已尽可能一一列出,但由于文献资料较多,疏漏在所难免,在此表示歉意,并向所有参考文献的作者表示衷心的感谢。

倪建军 任 黎

2013年9月于河海大学

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                    | 1  |
| 1.1 复杂系统概述 .....                  | 1  |
| 1.1.1 复杂系统相关概念 .....              | 1  |
| 1.1.2 复杂系统控制与决策 .....             | 2  |
| 1.2 关于智能计算 .....                  | 3  |
| 1.2.1 智能计算简介 .....                | 3  |
| 1.2.2 智能计算主要方法 .....              | 3  |
| 1.3 复杂系统控制与决策中的智能计算 .....         | 12 |
| 1.3.1 复杂系统控制与决策中存在的问题 .....       | 12 |
| 1.3.2 智能计算在复杂系统控制与决策中的应用 .....    | 14 |
| 1.4 本书的研究内容和结构安排 .....            | 15 |
| 1.4.1 本书的主要研究内容 .....             | 15 |
| 1.4.2 本书的结构安排 .....               | 17 |
| 1.5 本章小结 .....                    | 17 |
| 参考文献 .....                        | 18 |
| 第 2 章 神经网络在湖泊水文水质调节功能模拟中的应用 ..... | 22 |
| 2.1 引言 .....                      | 22 |
| 2.2 研究内容 .....                    | 22 |
| 2.3 基于 BP 神经网络的水文调节功能模拟 .....     | 23 |
| 2.3.1 BP 神经网络 .....               | 23 |
| 2.3.2 三峡运行对湖口水位的影响分析 .....        | 30 |
| 2.4 基于自适应神经网络的水质调节功能模拟 .....      | 37 |
| 2.4.1 A-BP 神经网络二维水质模型 .....       | 37 |
| 2.4.2 模拟计算 .....                  | 38 |
| 2.5 本章小结 .....                    | 40 |

|                                         |           |
|-----------------------------------------|-----------|
| 参考文献 .....                              | 41        |
| <b>第 3 章 模糊计算在水质评价及时间序列挖掘中的应用 .....</b> | <b>42</b> |
| 3.1 引言 .....                            | 42        |
| 3.2 模糊计算基础 .....                        | 42        |
| 3.2.1 模糊集合理论 .....                      | 42        |
| 3.2.2 模糊关系与模糊推理 .....                   | 44        |
| 3.3 基于模糊综合评价的水质分析 .....                 | 46        |
| 3.3.1 评价指标 .....                        | 46        |
| 3.3.2 改进模糊综合评价模型 .....                  | 48        |
| 3.3.3 水质变化趋势分析 .....                    | 50        |
| 3.4 基于模糊推理的时间序列挖掘 .....                 | 53        |
| 3.4.1 小波分解原理 .....                      | 54        |
| 3.4.2 基于 ANFIS 的时间序列预测方法 .....          | 55        |
| 3.4.3 仿真实验 .....                        | 56        |
| 3.5 本章小结 .....                          | 59        |
| 参考文献 .....                              | 59        |
| <b>第 4 章 群体智能及其在水价预测中的应用 .....</b>      | <b>62</b> |
| 4.1 群体智能与多 Agent 系统 .....               | 62        |
| 4.1.1 多 Agent 理论与方法 .....               | 63        |
| 4.1.2 基于多 Agent 的智能决策支持系统 .....         | 64        |
| 4.1.3 Agent 的学习问题 .....                 | 66        |
| 4.2 水价预测问题介绍 .....                      | 67        |
| 4.3 基于降维的多 Agent 强化学习算法 .....           | 67        |
| 4.3.1 算法描述 .....                        | 67        |
| 4.3.2 与普通算法的比较 .....                    | 69        |
| 4.4 基于多 Agent 的水价预测智能系统 .....           | 71        |
| 4.4.1 水价预测智能系统的建立 .....                 | 71        |
| 4.4.2 仿真实验 .....                        | 73        |
| 4.5 本章小结 .....                          | 76        |
| 参考文献 .....                              | 77        |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 第 5 章 强化学习及其在智能决策中的应用 .....       | 79  |
| 5.1 强化学习与多 Agent 智能决策概述 .....     | 79  |
| 5.1.1 单 Agent 强化学习 .....          | 79  |
| 5.1.2 多 Agent 强化学习 .....          | 83  |
| 5.1.3 强化学习在多 Agent 智能决策中的应用 ..... | 84  |
| 5.2 城市水资源配置问题描述 .....             | 85  |
| 5.3 改进的多 Agent-Q 学习算法 .....       | 86  |
| 5.3.1 基于遗传算法的最大映射 $Q$ 值 .....     | 86  |
| 5.3.2 自适应多因素回报值 .....             | 89  |
| 5.4 实验研究 .....                    | 91  |
| 5.4.1 实验一(正常情况下) .....            | 94  |
| 5.4.2 实验二(动态环境下) .....            | 96  |
| 5.4.3 讨论分析 .....                  | 97  |
| 5.5 本章小结 .....                    | 100 |
| 参考文献 .....                        | 100 |
| 第 6 章 基于小波神经网络的湖泊生态系统健康评价 .....   | 103 |
| 6.1 引言 .....                      | 103 |
| 6.2 评价体系与评价标准的确定 .....            | 104 |
| 6.2.1 评价指标构建原则 .....              | 104 |
| 6.2.2 指标体系的结构框架 .....             | 105 |
| 6.2.3 评价指标的度量 .....               | 106 |
| 6.2.4 评价标准的确定 .....               | 108 |
| 6.3 基于小波神经网络的评价模型 .....           | 112 |
| 6.3.1 模型结构 .....                  | 112 |
| 6.3.2 初始值的选择 .....                | 114 |
| 6.3.3 计算流程 .....                  | 115 |
| 6.4 湖泊生态系统健康评价 .....              | 116 |
| 6.4.1 训练样本和检验样本 .....             | 116 |
| 6.4.2 算法步骤 .....                  | 119 |
| 6.4.3 评价结果 .....                  | 120 |
| 6.5 本章小结 .....                    | 123 |

|                                                 |            |
|-------------------------------------------------|------------|
| 参考文献 .....                                      | 124        |
| <b>第7章 基于核主元分析与支持向量机的水环境<br/>系统突发事件监测 .....</b> | <b>126</b> |
| 7.1 核主元分析与支持向量机方法简介 .....                       | 126        |
| 7.1.1 核主元分析方法 .....                             | 127        |
| 7.1.2 支持向量机方法 .....                             | 129        |
| 7.2 水环境系统突发事件监测问题描述 .....                       | 131        |
| 7.3 基于信任机制的水环境系统突发事件监测方法 .....                  | 133        |
| 7.3.1 信任机制概念 .....                              | 133        |
| 7.3.2 基于信任机制的突发事件诊断 .....                       | 134        |
| 7.4 仿真实验与结果分析 .....                             | 137        |
| 7.4.1 传感器突发失效故障诊断 .....                         | 139        |
| 7.4.2 突发水污染事件诊断 .....                           | 142        |
| 7.4.3 复杂情况下的突发事件诊断 .....                        | 144        |
| 7.4.4 与传统的 KPCA 方法和 BP 神经网络比较 .....             | 146        |
| 7.5 本章小结 .....                                  | 149        |
| 参考文献 .....                                      | 150        |
| <b>第8章 智能计算新进展及其应用前景展望 .....</b>                | <b>152</b> |
| 8.1 引言 .....                                    | 152        |
| 8.2 生物启发的智能计算方法 .....                           | 152        |
| 8.2.1 人工免疫算法 .....                              | 152        |
| 8.2.2 DNA 算法 .....                              | 155        |
| 8.2.3 膜计算方法 .....                               | 155        |
| 8.2.4 生物启发神经网络模型 .....                          | 157        |
| 8.3 文化算法 .....                                  | 159        |
| 8.3.1 文化算法基本原理 .....                            | 160        |
| 8.3.2 文化算法研究进展 .....                            | 161        |
| 8.4 智能计算在复杂系统中的应用前景 .....                       | 162        |
| 8.5 本章小结 .....                                  | 164        |
| 参考文献 .....                                      | 164        |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 复杂系统概述

### 1.1.1 复杂系统相关概念

目前关于复杂系统的定义还未统一,至少有 30 多种<sup>[1]</sup>。那么到底什么是复杂系统?有人提出具有复杂性的系统,就是复杂系统,而简单的系统就不是复杂系统。这里又产生一个新的问题,那就是什么是复杂性?由此可见,关于什么是复杂系统可能远没有我们想象的这么简单。试问蚂蚁是如何形成分工明确、等级森严的王国的?生命是如何起源的?大脑又是什么,难道大脑仅仅是简单的随机进化的结果?感情、思想和意识这些不可言喻的特征是如何产生的?这些问题看似不是什么科学的问题,然而它们都有一个共同点,那就是它们都属于复杂系统的研究范畴<sup>[2]</sup>。

复杂性科学研究的复杂系统涉及的范围非常广,包括自然、工程、生物、经济、管理、政治与社会等各个方面,它探索的复杂现象从一个细胞呈现出来的生命现象,到股票市场的涨落、城市交通的管理、自然灾害的预测,乃至社会的兴衰等等。目前,复杂系统还没有统一的定义,从科学方法论的角度看复杂性应该是复杂系统的首要特征,应该给出它的科学定义,然而,不同的学者由于研究背景的不同,对复杂性的认识和理解都不一样。1999 年,美国《科学》杂志出版了一期以“复杂系统”为主题的专辑,这个专辑分别就化学、生物学、神经学、动物学、自然地理学、气候学、经济学等学科领域中的复杂性研究进行了报道。为了避开术语上的争论,该专辑采用了“复杂系统”这个名词。概括起来,演化、涌现、自组织、自适应、自相似被认为是复杂系统的共同特征,通过这些基本特征,可以在某种程度上对复杂系统进行描述。

关于复杂性科学的一些来龙去脉,圣菲研究所(Santa Fe Institute,

SFI)的首任院长柯文(George A. Cowan, 费米奖的获得者)在 1994 年 SFI 举行的一次学术会议的开幕式上作过简要的叙述:复杂性作为一门科学,及现代唤醒复杂性兴趣的起源地是维也纳。美国系统科学家和人工智能专家西蒙在《人工科学——复杂性面面观》一书中指出,从 20 世纪中叶以来,人们对复杂性和复杂系统的研究有三次大的兴趣波,前两次分别是关于整体论和老三论,在目前这一波中经常与复杂性相联系的词语是混沌、自适应系统、遗传算法和元胞自动机。在复杂系统研究的初期,贝塔朗菲(Von Bertalanffy)、怀特海(Alfred North Whitehead)等人做出了突出贡献;到 20 世纪 60、70 年代普利高津(Prigogine)的耗散结构论、哈肯(Haken)的协同学等学说的出现,为系统科学补充了新的理论基础和新的佐证。从 90 年代开始,SFI 致力于复杂性科学的各个有关部分的工作,成为研究复杂系统的中心。在我国,著名科学家钱学森对系统科学加以开拓,于 80 年代末总结和提炼出复杂巨系统及其方法论<sup>[3]-[6]</sup>。

### 1.1.2 复杂系统控制与决策

从宏观上可以将复杂系统的研究范畴概括为三个层次,即物理层次、生物层次和社会层次,与此同时,还需要开展这三个层次之间共性的研究,即关于复杂性与复杂系统的理论与方法的研究<sup>[7]</sup>。可见,复杂系统的研究涉及方方面面,主要包括复杂系统的动力学分析与建模;复杂系统的结构、功能与行为;复杂系统的度量、辨识、预测与评价;复杂系统的演化、涌现、自组织、自适应、自相似的机理;复杂系统中的策划与调控;人一机结合的综合集成;复杂系统与复杂性研究的典型方法,如演化计算、元胞自动机、多智能体(Multi-Agent)等。

在复杂系统涉及的这些问题中,复杂系统控制与决策问题的研究具有重大的现实意义。从哲学的观点来看,复杂系统的基本问题可具体化为相对于只有微观系统能力的子系统而言的预测问题、相对于具有宏观系统能力的子系统而言的组织问题和相对于具有宇观系统能力的子系统而言的控制问题<sup>[8]</sup>。因此,我们这里所研究的控制与决策是广义的,涉及系统的建模、辨识、预测与评价、控制与决策等。研究复杂系统的控制与决策问题,可以带动复杂性科学其他方面研究的发展,因为在解决复杂系统控制与决策相关问题的时候,必须首先弄清楚所研究复杂系统的结构、

行为、系统的演化、涌现、自适应机理等,然后才能采取相应的、合适的理论方法进行系统的控制与决策。

## 1.2 关于智能计算

### 1.2.1 智能计算简介

生命在长期进化过程中,积累了许多神奇的功能,人类很早就从中得到启发而改进自己的工具,如传说鲁班被茅草割破手指而发明锯,等等。开始的时候这些发明还只是偶然的模仿和发现,现在人们已经开始有意识地进行这方面的研究。一方面我们模仿生物的结构进行发明创造,如模仿苍蝇的复眼结构,人类发明了蝇眼照相机,这种照相机的镜头由 1329 块小透镜组成,一次就能拍摄 1329 张照片,其分辨率达 4 千条线,等等,这些都属于仿生学的范畴。另一方面我们从自然界的规律中得到启迪,利用其原理设计算法,如根据蚂蚁觅食的基本过程,人们设计了蚁群算法,这就是智能计算的基本思想。

智能计算又称为“软计算”,目前还没有一个统一的定义,它是随着计算机技术发展和人们对自然界的深入理解而发展起来的一种仿生计算方法,它强调对人类和其他生物智能行为的模仿,注重向自然界学习、汲取其中有益的规律和原理。与传统方法相比智能计算更具有柔性和自适应性,它不需要太多的领域知识,就可以解决许多问题尤其是一些大规模的复杂问题。智能计算将不同的学科紧密联系起来,是一门涉及物理学、数学、生理学、心理学、神经科学、计算机科学和智能技术等交叉学科。近年来,随着国内外学者对智能计算研究的不断深入,智能计算的研究内容得到了拓展、应用领域得到了扩大、计算方法得到了改善<sup>[9-11]</sup>。

### 1.2.2 智能计算主要方法

智能计算主要方法包括人工神经网络、模糊逻辑、进化计算与群体智能、强化学习机制以及最近几年发展起来的核主元分析与支持向量机等。下面对这些方法进行简单介绍。

#### 1. 人工神经网络

神经网络最早的研究可追溯到 1890 年 William James 的工作,他首

先定义了学习的神经过程,并指出了多连接(Multi-Connection)的重要性。到了 20 世纪 40 年代,心理学家 McCulloch 和数学家 Pitts 合作提出阈值加权和(M-P)模型,这才真正拉开了神经网络研究的序幕。神经网络的发展大致经过三个阶段:①1947—1969 年为初期阶段。在这期间科学家们提出了许多神经元模型和学习规则,如 MP 模型、HEBB 学习规则和感知器等。②1970—1986 年为过渡阶段。这个期间神经网络研究经历了一个低潮期。在 20 世纪 60 年代末,美国著名人工智能专家 Minsky 和 Papert 对 Rosenblatt 的工作进行深入研究,出版了有较大影响的《Perceptron》一书,指出感知机的功能和处理能力的局限性,甚至连 XOR(异或)这样的问题也不能解决,因此 Minsky 的结论是悲观的。另一方面,60 年代以来集成电路和微电子技术日新月异的发展,电子计算机的计算速度飞速提高,等等,这些技术进步给人们造成这样的认识:以为串行信息处理及以它为基础的传统人工智能技术的潜力是无穷的,这就暂时掩盖了发展新型计算机和寻找新的人工智能途径的必要性和迫切性。另外,当时对大脑的计算原理,对神经网络计算的优缺点、可能性及局限性等还很不清楚。总之,认识上的局限性使对神经网络的研究进入了低潮。在这一低潮时期,仍有一些学者扎扎实实地继续着神经网络模型和学习算法的基础理论研究,提出了许多有意义的理论和方法。如 Hopfield 引入能量函数的概念,给出了网络的稳定性判据,提出了用于联想记忆和优化计算的途径。1985 年, Hinton、Sejnowsky、Rumelhart 等人所在的并行分布处理小组的研究者在 Hopfield 网络中引入了随机机制,提出所谓的 Boltzman 机。1986 年, Rumelhart 等人提出误差反向传播神经网络,简称 BP 神经网络。③1987 年至今为发展阶段。传统的计算机和人工智能技术面临着重重困难,模拟人脑的智能信息处理过程,如果仅靠串行逻辑和符号处理等传统的方法来解决复杂的问题,会产生计算量的组合爆炸。因此,具有并行分布处理模式的神经网络理论又重新受到人们的重视,对神经网络的研究又开始复兴<sup>[12]</sup>。

人工神经网络是由大量简单的基本元件——神经元相互联结,模拟人的大脑神经处理信息的方式,进行信息并行处理和非线性转换的复杂网络系统<sup>[13]</sup>。人工神经网络模型主要考虑网络连接的拓扑结构、神经元的特征、学习规则等。目前,已有近 40 种神经网络模型,包括 BP 神经网络、感知器、自组织特征映射网络、Hopfield 网络、竞争网络等。随着该学

科的发展,不断有改进或者全新的网络模型和算法得以提出。针对具体的实际问题,选择合适的网络模型、训练方式以及学习算法是神经网络在实际应用中必须解决的问题。这里我们只对 BP 神经网络和模糊神经网络的应用情况进行简单介绍,在后续的章节中将对 BP 算法的基本原理进行详细介绍。

在众多神经网络模型中,BP 神经网络是用得最多的一种模型,它具有较强的非线性模拟能力。如张宝菊等人<sup>[14]</sup>利用 BP 神经网络进行人体血液中红细胞浓度无创检测;Wu 和 Ren<sup>[15]</sup>建立了一个三层 BP 神经网络模型,用于预测热轧带钢的机械性能,等等。但是传统 BP 神经网络存在一些缺陷,如学习算法的收敛速度慢,容易陷入局部极小问题,以及网络的初始权值、阈值及隐层单元数往往根据经验选取等。针对 BP 算法存在的问题,研究者提出一些改进方案,主要包括改变误差函数和网络拓扑结构,动态调整学习率和相关参数,以及发现初值的确定方法等<sup>[16]</sup>。如 Hu 和 Zeng<sup>[17]</sup>结合自适应粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)的全局搜索能力和 BP 反向传播算法的局部搜索能力,提出了一种混合 PSO-BP 算法,用 PSO 优化 BP 算法的权重和误差初始参数,提高了算法的精度和收敛速度。于合龙等人<sup>[18]</sup>提出一种改进的 BP 神经网络集成方法,并将其用于建立作物精准施肥模型,该方法采用 K-均值聚类优选神经网络个体,采用拉格朗日乘子计算待集成的神经网络个体的权值。试验结果表明,在施肥模型的拟合精度方面,改进的神经网络集成方法明显优于单个神经网络方法。Zhang 和 Xu<sup>[19]</sup>将混沌理论的遍历性引入 BP 神经网络,提出了混沌 BP 神经网络,采用混沌激励函数代替常用激励函数,并用混沌搜索决定神经网络的权重,提高了算法的实时性和收敛速度等。

模糊神经网络(FNN)是由人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)与模糊逻辑系统的有机结合而产生的一种混合智能系统。作为一种混合智能系统,它充分地考虑了两者之间的互补性,是一个集逻辑推理、语言计算、分布式处理与非线性动力学过程于一体的系统,是一种能处理抽象信息的网络结构,具有强大的自学习和自调整功能。它主要包括三种模型:基于模糊算子的 FNN、模糊化神经网络和模糊推理网络。近年来 FNN 凭借自身的优势在各个领域得到了快速的发展,为了适应当前发展的需要,研究人员在不同方面对其进行了改进。如张颖<sup>[20]</sup>提出了

一种基于误差补偿的多校正网络结构形式的 T-S FNN,使用多个与前件网络结构形式相同的网络作为输出偏差的校正网络,输出各分量的偏差信息都依靠对应的校正网络去记忆,具有一定的实用性和较好的校正精度;段淇倡等人<sup>[21]</sup>对传统补偿 FNN 的算法进行了改进,提出了动态调整学习步长的方法,避免了算法的较大震荡,同时加快了迭代速度,并将其用于通风空调故障诊断中,具有收敛速度快、诊断精度高、适应性强等优点等。

总之,ANN 凭借其信息处理的并行性和信息存储的分布性、良好的容错性、计算的非精确性、自学习、自组织和自适应性等优良的特性,广泛应用于各个领域,包括经济学、社会学、工业生产、国防军事、航空航天等领域,特别在模式识别、信号处理、人工智能、自适应控制等方面的应用最为广泛<sup>[14,17,18,22,23]</sup>。

## 2. 模糊逻辑和模糊推理

模糊逻辑理论主要用于研究现实世界中一些模糊不清的问题,并使之清晰化。模糊逻辑的引入可将人的判断、思维过程用比较简单的数学形式直接表达出来,从而使对复杂系统作出符合实际和人类思维方式的处理成为可能。模糊逻辑理论的基础是模糊数学和模糊集合。在经典集合理论中,任何一个元素或个体与任何一个集合之间的关系只有“属于”和“不属于”两种情况,两者必居其一,而且只居其一,绝对不允许模棱两可。而在模糊逻辑理论中,一个元素可以以不同的隶属度属于不同的集合,隶属度由隶属度函数确定,这样元素在不同集合间的过渡是渐变的,而不是突然的。模糊集合完全由其隶属度函数来刻画,论域  $U$  中的模糊子集  $A$  是以隶属函数  $\mu_A$  表征的集合, $\mu_A$  称为模糊子集  $A$  的隶属度函数, $\mu_A(u)$  称为  $u$  对  $A$  的隶属度,它表示论域中的元素  $u$  属于模糊子集  $A$  的程度,它在  $[0,1]$  闭区间内可连续取值。模糊逻辑模型一般具有如下属性,即每个元素对于所有模糊子集的隶属度之和为“1”。

模糊推理是信息科学中一个进行模糊信息处理和实现机器智能的重要工具,是计算机科学、控制科学和人文决策等学科的重要研究课题。模糊推理中有三种模型:单输入单输出的模糊推理模型、多条规则的模糊推理模型以及一般的模糊推理模型。模糊推理中最重要的两种推理形式是模糊假言推理(FMP)和模糊反驳推理(FMT)。根据模糊规则的条数和前提个数的不同,模糊推理又可分为简单模糊推理、多重模糊推理、多

维模糊推理、多重多维模糊推理。模糊推理方法具有还原性、鲁棒性、逻辑可靠性、语气单调性、属性介值性或单调性、保正规性、泛逼近性和运算简单性等特性,其中,还原性是对模糊推理方法最基本的要求,也是研究最多的模糊推理方法的重要性质之一<sup>[24-26]</sup>。

在模糊推理算法中,常用的有 Mamdani 模糊推理、Larsen 模糊推理、Tsukamoto 模糊推理、T-S 模糊推理等<sup>[27]</sup>。针对传统模糊推理系统存在人工干预多、推理速度慢、精度低,很难实现自适应学习等问题,近年来研究人员提出了各种改进的算法。如许哲万等人<sup>[28]</sup>提出了基于偏移率的 T-S 模糊推理方法,可以减少学习时间和学习误差;李天明与张永江<sup>[29]</sup>提出了一种基于数值计算的模糊推理算法——计算型模糊推理(CFR),在推理计算中引入线性数值计算方法,对输入隶属度的线性数值进行计算,推理得到输出隶属度,该算法具有推理精度高、推理速度快的优点,等等。

近年来,模糊推理的理论和应用研究都取得了很大的进展,在数据分类、决策分析、专家系统、图像处理、故障检测、机器人控制等领域得到了广泛的应用。如邢龙平等<sup>[30]</sup>将模糊逻辑应用到无损视频压缩算法中,来提高无损视频压缩算法的性能;刘瑞兰和陈小惠<sup>[31]</sup>将模糊交互多模型算法运用到双观察平台纯方位测量的机动目标跟踪中,提出了基于限定记忆归一化的模糊交互多模型算法;骆德渊等人<sup>[32]</sup>提出了基于模糊逻辑的移动机器人路径跟踪控制方法,该方法通过合理选择模糊控制器的参数和优化规则库,使其输出合适的线速度和角速度,从而控制移动机器人准确地跟踪预规划的路径;Li 等人<sup>[33]</sup>利用模糊逻辑来定义一个称为电池工作状态的新参数,用以解决电池过度放电问题和由于充电状态的不正确估计而导致的电池损害,等等。

### 3. 进化计算

进化计算模拟自然界生物进化过程而产生的一种群体导向随机搜索技术和方法,它的基本原理是进化机制和自然选择法则。进化计算采用简单的编码技术来表示各种复杂的结构,并通过对一组编码进行简单的遗传操作——复制、交换和突变及优胜劣汰的自然选择来指导学习和确定搜索方向。简而言之,进化计算不需要了解问题的全部特征,就可以通过体现进化机制的进化过程完成问题的求解。进化算法可以在解空间的不同区域中对多个点进行搜素,它能以很大的概率找到全局最优解而不易陷入局部最优情况。进化算法还具有简单、通用、稳健性强、适合于

并行处理等特点,及自组织、自适应、自学习、鲁棒性等特性,已被成功地应用到那些难以用传统的方法进行求解的复杂问题之中。进化计算最典型的方法有四种:遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、进化策略(Evolutionary Strategy, ES)、进化规划(Evolutionary Programming, EP)和遗传程序设计(Genetic Programming, GP)<sup>[34,35]</sup>,其中遗传算法是主要代表,下面对其进行简要介绍。

遗传算法使用群体搜索技术,它通过对当前群体施加选择、交叉、变异等一系列遗传操作,从而产生出新一代的群体,并逐步使群体进化到包含或接近最优解的状态。一般的遗传算法由四个部分组成:编码机制、控制参数、适应度函数(目标函数)、遗传算子。遗传算法提供了一种求解复杂系统优化问题的通用框架,它不依赖于问题的具体领域,对问题的种类有很强的鲁棒性,所以广泛应用于很多领域,如函数优化、生产调度、自动控制、机器学习、图像处理、人工生命、数据挖掘等<sup>[36-38]</sup>。如章琳等人<sup>[39]</sup>提出了一种基于遗传算法的多小波自适应去噪算法,该方法能通过遗传算法自适应地寻求去噪后图像的最小均方误差;Monoyios 和 Vlachos<sup>[40]</sup>采用两个遗传算法解决静态感知损伤的路由波长分配(Routing and Wavelength Assignment, RWA)问题等。

虽然遗传算法在许多优化问题中都有成功的应用并得到了持续完善和改进,但其本身仍存在一些不足,包括早熟收敛、结果可能为局部最优解以及进化后期搜索效率较低等。为提高遗传算法的搜索效率并保证得到问题的最优解,可以从以下几个方面对遗传算法进行改进:①编码方案;②适应度函数;③选择、交叉和变异;④种群的进化与进化终止条件。

#### 4. 群体智能

受社会性昆虫行为的启发,计算机工作者通过对社会性昆虫的模拟产生了一系列对于传统问题的新的解决方法,这些方法就是群体智能。群体智能中的群体指的是:“一组相互之间可以进行直接通信或者间接通信(通过改变局部环境)的主体,这组主体能够合作进行分布问题求解”。所谓群体智能,指的是“无智能的主体通过合作表现出智能行为的特性”。群体智能的主要特点包括:灵活性、稳健性、自组织性、分布性、简单性、可扩充性、鲁棒性、适应性等,它的这些特点使之在没有集中控制且不提供全局模型的前提下表现出明显的优势,为寻找复杂的分布式问题的解决方案提供了基础<sup>[41]</sup>。目前群体智能方法主要包括蚁群算法、粒子群算法、人工蜂群算