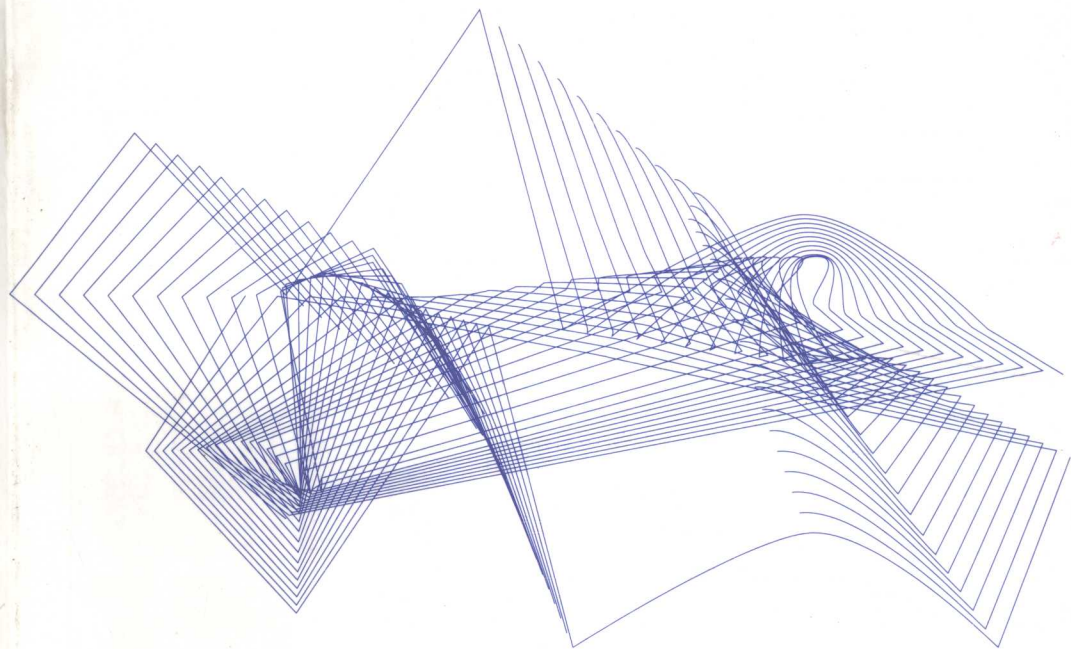


现代教育理论与实践研究文库第四辑



王攀 冯帅 蒋艳◎著

RUAN JI SUAN FANG FA JI CHENG DE LI LUN YU YING YONG YAN JIU

软计算方法集成的 理论与应用研究



中国出版集团

现代教育出版社

软计算方法集成的 理论与应用研究

王攀 冯州 蒋艳 著

现代教育出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

软计算方法集成的理论与应用研究 / 王攀 冯帅 蒋艳著.
—北京:现代教育出版社,2007.8

ISBN 978-7-80196-333-8

I. 软… II. ①王… ②冯… ③蒋… III. 计算技术—研究—
高等学校 IV. G40-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 050326 号

书 名: 软计算方法集成的理论与应用研究

责任编辑: 赵鸣鸣

封面设计: 张玉霞

出版发行: 现代教育出版社

社 址: 北京市朝阳区安华里 504 号 E 座

邮政编码: 100011

印 刷: 北京忠信诚胶印厂

开 本: 880mm×1230mm 1/32

印 张: 7

字 数: 175 千字

印 数: 2000 册

版 次: 2007 年 8 月北京第 1 版

印 次: 2007 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-80196-333-8

全套定价: 200.00 元 (本册定价: 18.60 元)

版权所有 违者必究

内容简介

本书比较系统全面地论述了方法集成的典型范例——软计算方法集成的若干理论与方法，并介绍了其在建模、优化与决策中的应用。其主要内容包括：软计算集成中的几个理论问题；混合目标系统的多目标集成评价（决策）；（合作型）协同进化计算的几个问题；模块化神经网络的子网集成；软计算方法集成软件 NenralCraft 的介绍等。

本书适合于高等学校控制类、信息类、计算机类、管理类、系统科学等专业与方向的师生及工程技术人员使用与参考。

前 言

首先，让我们来欣赏两首著名宋词的片段：
烟柳画桥，风帘翠幕，参差十万人家。
云树绕堤沙，怒涛卷霜雪，天堑无涯。

.....
重湖叠巘清佳，有三秋桂子，十里荷花。
羌管弄晴，菱歌泛夜，嘻嘻钓叟莲娃。

—— 柳永《望海潮》

千里澄江似练，翠峰如簇。
归帆去棹残阳里，背西风、酒旗斜矗。
彩舟云淡，星河鹭起，画图难足。

—— 王安石《桂枝香》

如此美妙的景观从何而来，又何以继？是丰富多彩的综合集成，是异彩纷呈的和而不同，是妙到毫颠的多样性使然。维持这般的佳境恐怕也需要不断的保护、丰富和完善这样的综合集成，如是的和而不同，上述的多样性。

当前，科技创新引发了前所未有的高度关注。如在创造人间仙境中的作用一样，作为科技创新的两种最主要模式之一的集成创新在问题求解策略中起着举足轻重的作

用。在广阔的科学研究领域中，集结人类在解决各类问题中的优秀思想理论方法是行之有效的问题解决之道，并不断在实践中得到印证。这种综合集成的问题处理模式往往起到“春雨断桥人不渡，小船撑出柳荫来”的关键作用。同时，在应用综合集成于问题求解的过程中，也并非总是传来福音。常常也会出现因不恰当的使用集成而带来“集成冗余”、“集成失效”、“集成崩溃”的负面情形。因此，深入总结缜密研究综合集成的指导原则、基础理论、经验方法并广泛实践显得十分重要、必要、紧迫。唯此，才有可能如愿以偿地起到运用综合集成所期望带来的优势互补、相得益彰的创新效果。

软计算的概念最早由模糊逻辑的创始人 Lofti A. Zadeh 教授于 1990 年提出。在 1992 年加州大学伯克利分校的课程 One-page announcement 中，他就提出了软计算的概念方法等问题^[1]。软计算是方法的集合体，由最早的模糊逻辑或模糊计算，神经计算，概率推理到后来的进化计算，混沌系统，序数优化，模拟退火，其成员不断发展壮大。学术界普遍认为：软计算是一种创建计算智能系统的新方法，甚至许多学者认为软计算和计算智能同义。2004 年，著名的学术组织 IEEE 将 Neural Networks Society 更名（拓展）为 Computational Intelligence Society (CIS)。这一方法体系旨在：开发对不精确性、不确定性和不完全真实性的适应以获取可驾驭性，鲁棒性，解的低成本及与事实更好的亲和力。

集结人类智能（更广泛地说是生物智能）、人工智能、计算智能是解决不确定环境下复杂系统的决策与信息处理

问题的一种极其重要的思路。本书就其中的一个特色鲜明的子命题——软计算的集成进行了方法论、方法学方面的初步研究，具体表现在如下几个方面：

讨论了方法集成的若干理论基础问题：给出了方法空间的形式化描述，论述了方法集成的哲学基础和方法学基础；提出了方法集成的两点基本原则。同时，较详细地对软计算的方法集成进行了分析探讨：从不同角度给出软计算的分类；对于软计算内部子算法的6种集成方式作了综述。

对于决策领域的重要命题——具有定性定量混合目标的系统决策（评价）问题进行了创新性的研究，提出一套完整的综合决策程序并给出了计算方法，该程序在变权分析、定量目标刻画及评价上有全新的思路和方法。

研究了协同演化和模块化神经网络决策的若干问题。在**（合作型）协同演化**方面，首先从不同角度对一个有效的协同演化范例——协同进化遗传算法中的模块化思想的背景、特征、意义进行了初步分析讨论，部分地揭示了它在包含协同进化遗传算法在内的问题求解策略中的重要作用；提出一类有效的“分而治之”多种群进化算法。在模块化神经网络方面，给出了一大类模块化神经网络的形式化描述；研究了模块化神经网络子网的动态集成问题，并提出了5种有效的动态集成算法，还给出了一条基于“一专多能”思想的技术线路；然后详细分析了模块化神经网络的子网选择性集成的问题，得到几个充分条件和一个选择性集成的方法；研究了两种各具特色的模块化神经网络的贝叶斯学习方法；分析了一篇著名文献；介绍了一个我

们开发的软计算方法集成软件系统—NeuralCraft 的设计和应用。

最后提出了若干进一步有待研究的命题。

毋庸讳言，相对于人类面临的层出不穷、纷繁复杂的问题世界而言，本书的工作仅可能涉及冰山一角、沧海一粟，挂一漏万、浅尝则止，贻笑大方。然而正是由于所面临工作的挑战性和复杂性，正是由于综合集成的极端重要性，才不断引发了我们的浓厚兴趣和力图窥视出问题内部玄机的强烈好奇心，鞭策我们以止于至善为宗旨，不敢懈怠，乐此不疲。

全书由武汉理工大学王攀、冯帅与上海理工大学蒋艳共同完成，王攀负责全书的策划、统稿和大部分写作工作，冯帅完成了模块化神经网络的部分工作，蒋艳完成了系统决策（评价）方面的部分工作。

本书的最终出版，得益于许多人士和机构的无私帮助。第一作者的恩师我国控制理论界前辈、资深学者何文蛟教授晚年时对作者启迪蜚浅，教益良多。其高屋建瓴的人生观、学术观常常令人领略到云淡风轻、海阔天空的深远意境和春风化雨、润物无声的无穷妙意。在作者从事博士后研究期间他不幸离世，令人伤感和怆然。此书的出版，也是对其 90 诞辰和逝世 3 周年的纪念。

我们还要真诚感谢王攀攻读硕士、博士学位期间的指导老师华中科技大学冯珊教授，博士后研究合作导师武汉理工大学万君康教授，蒋艳攻读硕士、博士学位期间的指导老师华中科技大学岳超源教授的一贯指导和关怀。同时对华中科技大学张勇传院士、廖晓昕教授、方华京教授、

甄西丰副教授、周凯波副教授、彭刚副教授、刘振元副教授、海军工程大学龚沈光教授、重庆大学高波博士、浙江大学陈国斌博士、李幼凤博士、南方医科大学丁克祥教授、丹麦科技大学副教授范衡博士、武汉理工大学秦娟英教授、徐承志、魏崑、陈捷、张坚坚、张俊文等等在不同时期对作者的支持、帮助、关心、鼓励和启发表示诚挚的谢意。

国家自然科学基金委员会、上海市教育委员会、武汉市科技局、武汉理工大学等对作者的研究提供了经费支持，这里一并致谢。

必须指出：作者的家人是促使本书顺利完成的重要原动力，他们或一直以来对作者的成长给予了莫大教诲、关爱和帮助；或引领作者进入科学研究的殿堂；或给予作者面对困难一往无前的勇气和动力；或将追求正义和崇高的理念、愈挫弥坚百折不回的品格通过其言传身教植入到作者的精神和血脉之中；或无怨无悔默默支持作者在科学研究的崎岖道路上义无反顾，勇往直前。在此作者要对他们真诚无私的理解帮助表示诚挚的感谢！

王攀 冯帅 蒋艳

2007年春

目 录

| | | |
|-------|-----------------------|-----|
| 1 | 软计算方法集成中的几个理论问题 | /1 |
| 1.1 | 软计算简介 | /1 |
| 1.1.1 | 模糊逻辑或模糊计算 | /2 |
| 1.1.2 | 神经计算 | /3 |
| 1.1.3 | 进化计算 | /4 |
| 1.1.4 | 模拟退火 | /5 |
| 1.1.5 | 序数优化 | /6 |
| 1.2 | 方法集成的理论基础 | /6 |
| 1.2.1 | 问题—方法空间的形式化描述 | /7 |
| 1.2.2 | 方法集成的哲学基础 | /9 |
| 1.2.3 | 方法集成的方法学基础 | /10 |
| 1.2.4 | 方法集成的原则 | /14 |
| 1.3 | 软计算的方法集成的几种形式 | /15 |
| | 本章参考文献 | /21 |
| 2 | 混合目标系统的多目标集成评价(决策) | /27 |
| 2.1 | 引言 | /27 |
| 2.2 | 混合目标系统多人多目标评价(决策)方法研究 | /29 |
| 2.2.1 | 定性—定量单目标评价方法研究 | /30 |
| 2.2.2 | 混合目标体系决策方法 | /35 |

| | | |
|-------|------------------------------|------------|
| 2.3 | 基本情形下的规范化(单目标评价)数学模型 | /37 |
| 2.3.1 | 效益型目(指)标规范化方法 | /37 |
| 2.3.2 | 成本型指标规范化方法 | /40 |
| 2.3.3 | 中间型指标规范化方法 | /42 |
| | 本章参考文献 | /43 |
| | 本章附录1 变权综合的若干问题研究 | /45 |
| | 本章附录2 方案排序对权重的敏感性分析 | /55 |
| 3 | (合作型)协同进化计算的几个问题 | /69 |
| 3.1 | 引言 | /69 |
| 3.2 | 协同进化遗传算法中的模块化机制研究 | /70 |
| 3.2.1 | 模块化的生物学基础 | /70 |
| 3.2.2 | 模块化的计算学习特征 | /72 |
| 3.2.3 | 任务分解 | /73 |
| 3.2.4 | 结语 | /75 |
| 3.3 | 一类基于分治原理的多种群协同进化算法 | /76 |
| 3.3.1 | 引言 | /76 |
| 3.3.2 | “分而治之”(divide and conquer)法则 | /77 |
| 3.3.3 | 算法介绍 | /78 |
| 3.3.4 | 仿真算例 | /81 |
| 3.3.5 | 结论 | /84 |
| | 本章参考文献 | /85 |
| 4 | 模块化神经网络的子网集成 | /87 |
| 4.1 | 引言 | /87 |
| 4.2 | 几种形式化描述 | /89 |
| 4.3 | 模块化子网的启发式动态集成 | /93 |
| 4.4 | 一类模块化神经网络子网的选择集成 | /102 |

| | | |
|-------|------------------------------|------|
| 4.5 | 模块化神经网络子网的贝叶斯集成 | /105 |
| 4.5.1 | 引言 | /105 |
| 4.5.2 | 基于改进的 Bayes 学习的子网集结方法 | /106 |
| 4.5.3 | 基于序贯 Bayes 学习的子网集结方法 | /113 |
| | 本章参考文献 | /121 |
| | 本章附录 | /122 |
| 5 | NeuralCraft —— 一个软计算方法集成仿真软件 | /140 |
| 5.1 | 引言 | /140 |
| 5.2 | 模块化神经网络工具箱的设计动机 | /141 |
| 5.3 | 基于“一专多能”思想的模块化神经网络模型 | /142 |
| 5.4 | NeuralCraft 的设计思想 | /145 |
| 5.5 | 软件架构 | /147 |
| 5.5.1 | NeuralCraft 的功能结构 | /147 |
| 5.5.2 | NeuralCraft 内部组件及其接口 | /148 |
| 5.6 | 程序演示 | /151 |
| 5.6.1 | 正弦函数拟合 | /151 |
| 5.6.2 | 3D 墨西哥草帽函数拟合 | /154 |
| | 本章参考文献 | /157 |
| 6 | 总结与展望 | /158 |
| 6.1 | 全书研究总结 | /158 |
| 6.2 | 研究展望 | /160 |
| | 本章参考文献 | /161 |
| 附录 I | NeuralCraft 使用指南 | /162 |
| 附录 II | NeuralCraft 部分程序清单 | /169 |

1 软计算方法集成中的几个理论问题

1.1 软计算简介

软计算 (soft computing) 的概念最早由模糊逻辑的创始人 Lofti A. Zadeh 教授于 1990 年提出。在 1992 年加州大学伯克利分校的课程 One-page announcement 中, 他就提出了软计算的概念方法等问题^[1]。软计算是方法的集合体, 由最早的模糊逻辑或模糊计算 (FL 或 FC), 神经计算 (NC), 概率推理 (PR) 到后来的进化计算 (EC), 混沌系统 (CS), 序数优化 (OO), 模拟退火 (SA), 其成员不断发展壮大。学术界普遍认为: 软计算是一种创建计算智能 (computational intelligence) 系统的新方法, 甚至许多学者认为软计算和计算智能同义 (有人认为最早给出“计算智能”定义的是美国学者 Bezdek^[2])。2004 年, 著名的学术组织 IEEE 将 Neural Networks Society 更名 (拓展) 为 Computational Intelligence Society (CIS)。

这一方法体系旨在: 开发对不精确性、不确定性和不完全真实性的适应以获取可驾驭性, 鲁棒性解的低成本及与事实更好的亲和力^[3]。

为什么会提出软计算呢？简单地说，是由于现实世界的复杂性使人类原有的解决问题的一些基本手段（如依赖模型的方法体系）在纷繁复杂的问题面前出现较大困难：如解决约束和不确定性的困难^[4]。而软计算针对原有方法和待求解问题的难以调和的矛盾，以软化目标（由寻求最优软化为寻求满意甚至是可行）、软化可遇不可求的前提（如软化严格的分析性质）为宗旨，开展研究和应用，因此在复杂系统分析、决策、优化、控制、预测等广阔领域中都极具生命力。下面就其主要成员分别予以简单介绍。

1.1.1 模糊逻辑或模糊计算

自然和人工系统中存在着三种可能导致复杂性的不确定性：随机性，模糊性和不确定。上世纪六十年代，L. A Zadeh 教授系统的提出了刻画和处理模糊不确定性的理论基础：模糊集合论^[5]。模糊集合论是处理模糊信息的有效方法，其特点是用严格的数学方法分析模糊的系统信息，它铺设了经典的量化方法和“模糊”世界的桥梁。而模糊逻辑则是建立在模糊集合论基础上的处理不确定知识和近似推理的主要方法。

在 1999 年 Proceedings of IEEE 的一本专辑中，Bonissone 等指出^[6]：狭义上讲，FL 可被看做是 Lukasiewicz Aleph-1 多值逻辑的模糊化。然而从广义来看，这个狭义的解释仅能表达 FL 四个方面中的一个。具体来讲，FL 有逻辑的方面，源于多值逻辑系统；集合论的方面，源于难以定义边界结合的表达；推理的方面，注重模糊关系的表达与应用；认识论的方面，包含了 FL 在基于知识的模糊系统和数据库上的应用。

自模糊集的概念提出以来，以模糊逻辑为核心的模糊计算（模糊推理）就获得了广泛的应用，在自动控制、决策分析、智

能系统等领域取得了一大批成果^[7-10]。模糊计算与其他技术的有机结合(本文后续部分将作详细介绍),更使其可解问题域大为延拓,问题求解的质量显著提高,从而逐渐成为软计算中不可或缺的重要组成。

1.1.2 神经计算

人类在探索未知的进程中,从自然界得到启发获取灵感是一条行之有效的问题解决之道。无机界和有机界芸芸万物的诸多几近完美的天成品性,使人类学到丰富的经验知识并成功移植到科学研究、社会生活的方方面面。仿生学也由此孕育而生。本小节所论述的神经计算以及后面涉及的一些方法就是这方面的成功范例。

人工神经网络(ANN)是简单模拟脑神经元组织结构特征而构造的新型计算工具。关于ANN最早的工作可追溯到1943年McCulloch和Pitts在Bull Math Biophys上的文献^[11]。ANN是并行分布式信息处理网络,由神经元及神经元之间的连接组合而成。从拓扑结构来看,ANN可被分为前向网络和回归网络两大类。前向网络包括单层或多层感知器以及径向基函数(RBF)网络;回归网络包括竞争网络、自组织映射(SOM's)、Hopfield网络以及自适应共振理论(ART)模型。如果说前向网络采用的都是监督模式的话,那么回归网络更多使用的是非监督学习、联想记忆或者自组织等方式。关于目前神经计算的全面综述可参看文献^[12]。

最后,需强调指出的是,神经计算在多个领域受到重视是因为ANN有如下的突出特点:

(1) 分布性 ANN的分布特性使得它在信息处理过程中常常呈现出“整体大于部分之和”的特性,为成功解决复杂问题奠定

了结构基础。

(2) 容错性 ANN 的结构特征直接导致它有良好的容错性：局部结构的破坏或局部的功能丧失在许多情形下并不会对全局造成较大的影响。这一点是仿生学的成功范例。

(3) 自适应性 ANN 的联结和输入输出特性决定了它有较强的自适应能力，其权值、结构可较容易的随着环境的变化而变化。

1.1.3 进化计算

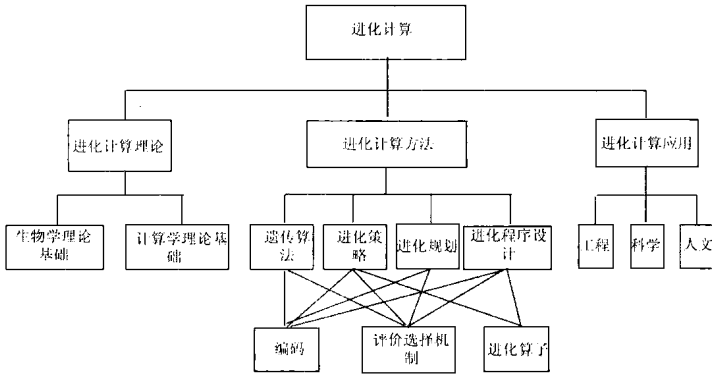
受生物界的自然选择和自然遗传机制启发，上世纪后半叶以来，一类模拟生物界“物竞天择，适者生存”的思想用以分析、设计、控制和优化人工系统的计算方法——进化计算在几乎相互隔离的情形下分别相继提出。这类计算方法由遗传算法（GA，genetic algorithms，Holland 等提出^[13]）、进化策略（ES，evolution strategies，Rechenberg 和 Schwefel 等提出^[14]）和进化规划（EP，evolutionary programming，L. J. Fogel，等提出^[15]）等组成。

直到九十年代初期，遗传算法、进化规划和进化策略领域的学者才进行了实质性交流。通过交流，他们发现彼此在研究中所依赖的源于 Darwin 进化理论的基本思想十分相似——“…每种方法都是保持一群试探解，并对这些解强加一些随机变化，而且引入选择机制来决定可存留到下一代中的解…”^[16]。于是人们将这类方法统称为“进化计算（EC）”。

同时，它们之间的区别是^[16]：GA's 强调遗传算子（如自然界中观察到的）的建模，如交叉、倒置和单点变异等，并将它们作用到抽象的染色体上…，而 ES 和 EP 则“侧重于变异，通过变异来维持父代和子代间行为的联系”。

EC 的重要优势在于其具有良好的自适应性，从而能处理非

线性高维问题，而不需要可微性或者关于问题结构的明确知识。因此，这种算法对时变行为具有很高的鲁棒性^[6]。EC的这一优势使得它在相当广阔的领域中都取得了令人满意的应用效果。EC的组成示意图如下：



1.1.4 模拟退火

如果说神经网络和进化计算是模拟有机界产生的计算方法，那么模拟退火（SA）^[17,18]则是成功模拟无机界自然规律的结晶。

作为一种非导数的优化方法，SA基于这样的原理：能量最低原理。原子的稳定状态取决于其所在的能级：能级越高，越不稳定；反之则越稳定。如果将目标函数的最小化视作寻求原子的最小能级，则可巧妙地应用诸如金属原子由高能级（宏观上反映为高温金属）到低能级状态变化（即金属冷却）时的物理性质即若处于高能级时，原子有较高概率跃迁到更不稳定的状态，而随着温度的降低，这种概率越来越小，进行优化，从而使得处于局部极小的解能够得以跃迁出去，这种问题求解策略与进化计算一样很好地克服了许多传统方法面临的局部极小困难。下图反映了