



高等学校精品规划教材

软计算原理及其工程应用

谭建豪 章 兢 胡章谋 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

21 世纪高等学校精品规划教材

软计算原理及其工程应用

谭建豪 章 兢 胡章谋 著

内 容 提 要

本书系统地介绍了软计算的基本原理、基本方法和基本技术及软计算的最新进展,并以较大篇幅叙述了其在工程中的应用情况。

本书阐述了软计算基本概念及与人工智能的关系,深入而系统地讨论了软计算的几个重要研究分支:模糊计算、神经计算、进化计算、集群计算、量子计算、自然计算等。在此基础上,介绍了将其综合应用于数据挖掘、工程规划、医学图像配准、故障诊断、系统辨识等领域的一些富有挑战性的研究课题及相应研究成果。全书分为两篇,上篇为基础理论篇,下篇为综合应用篇。上篇基础理论篇,共分7章,包括软计算概述、模糊计算、神经计算、进化计算、免疫计算、自然计算和其他软计算方法;下篇综合应用篇,共分4章,包括:模糊计算在复杂工业系统中的应用、遗传算法在医学图像配准中的应用、人工免疫在故障诊断中的应用、自然计算在系统辨别中的应用。

本书可作为高等院校自动化、电子信息、测控技术与仪表、电气工程、系统工程、机电工程等专业的本科生和研究生教材,也可作为相关专业工程技术人员的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

软计算原理及其工程应用 / 谭建豪, 章兢, 胡章谋
著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011.8
21世纪高等学校精品规划教材
ISBN 978-7-5084-8791-5

I. ①软… II. ①谭… ②章… ③胡… III. ①电子计
算机—计算方法—高等学校—教材 IV. ①TP301.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第137624号

策划编辑: 周益丹 责任编辑: 杨元泓 加工编辑: 陈洁 封面设计: 李佳

书 名	21 世纪高等学校精品规划教材 软计算原理及其工程应用
作 者	谭建豪·章兢·胡章谋 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京蓝空印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 18.5 印张 457 千字
版 次	2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	32.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

多年来,传统的优化方法和技术已经成功地应用于求解一类具有清晰定义结构/行为的系统,有时称为“硬”系统(Hard System)。一般地,称此类优化方法为确定型或清晰型优化方法。清晰型优化方法的基础是清晰的数字模型和精确的数学方法。然而,由于社会、生产和经济系统中常常存在多种形式的非确定性信息,如事件发生的随机性、数据的非精确性、语言的含糊性等,这些非确定性信息常来源于多种方式,其中包括测量误差、缺乏足够的历史/统计数据、缺乏足够可用的理论来描述和支持、知识表达的方式、人类的主观性判断或偏好等。这些形式的非确定性可以归类为两种类型,即随机非确定性(Stochastic Uncertainty)和模糊非确定性(Fuzzy Uncertainty)。随机非确定性的特点是信息的描述是清晰的,但非确定性以频率形式表现出来,这类系统常称为随机(非确定性)系统,常用基于概率理论的随机优化方法求解。

实际上,决策者并不认为通常的概率分布是正确的,对于一些非精确情形,特别是没有清晰界限(Sharp)的信息,与人类语言/行为相关的信息,或者由于受人类知识和认识所限而难以表达和清晰定义的信息等,这种非确定性信息统称为模糊性信息。具有模糊性信息的系统称为模糊系统,有时也称“软”系统(Soft-System)。这类系统的特点是,系统的行为/结构没有清晰的界定,系统的信息反映了人类的主观属性(Subjective Nature)和非精确性(Imprecision)。基于精确数学理论的优化方法和基于概率理论的随机优化方法都不能准确地描述这类系统的行为和特性,因而也不能有效地求解这类系统。起源于50年代并很快得到发展的计算智能,提供了处理这类软系统的建模和优化的有效方法和技术。基于计算智能的建模和优化方法称为软计算方法和智能优化方法。

多年来,随处可见关于智能优化方法的书籍,但是系统阐述软计算,特别是关于软计算与智能优化方法的书籍却不多见。软计算是混合的智能化计算方法,实际上它是不以精确解为目标的快速搜索较好解的计算方法,软计算是利用不精确性、不确定性和部分真方法的一个聚合体,它们结合起来比单独使用效果更好。用此方法得到的结果具有易处理性、鲁棒性与现实相一致性。软计算不是单一方法,而是具有合作关系的多种方法的集成。这些方法主要包括模糊计算、进化计算、神经计算、粗糙集方法、支持向量机方法、人工免疫算法、量子计算、蚁群算法等,它们是相互补充而不是相互竞争的。本书正是为满足读者系统了解软计算及与智能优化方法关系这一需求而编写的。

目前,许多学校正在对传统的教学内容进行改革,自动化、电子信息、测控技术与仪表、电气工程、系统工程、机电工程等专业迫切需要较多与信息相关的知识。由于这些专业的学生在本科阶段已较为扎实地掌握了人工智能的知识,在研究生阶段的着力点已转入人工智能理论与技术的综合应用。如何将人工智能的理论与技术在一个大的框架内以统一的视角用于解决工程实际问题,是本书着力的方向。

本教材是为电子信息及相关专业编写的。作为一门技术基础课,它以人工智能课程为先修课。既要学时少,又要让学生对软计算原理及其工程应用建立较全面的印象,同时还应该

使学生学有所用，并为今后的发展打下基础，这是本书编写的指导思想。编者力求使本书避免与先修课程内容的重复，对本书必不可少的相关知识只做简单介绍。

本书阐述了软计算基本概念及与人工智能的关系，深入而系统地讨论了软计算的几个重要研究分支：模糊计算、神经计算、进化计算、集群计算、量子计算、自然计算等。在此基础上，介绍了将其综合应用于数据挖掘、工程规划、医学图像配准、故障诊断、系统辨识等领域的一些富有挑战性的研究课题及相应研究成果。

全书分为两篇，上篇为基础理论篇，下篇为综合应用篇。

上篇基础理论篇，共分7章，各章内容安排如下：

第1章 软计算概述。阐述软计算基本概念，剖析软计算与人工智能的关系，揭示软计算方法的广义模糊认知哲学基础。

第2章 模糊计算。就模糊集合、模糊关系、模糊推理的基本概念、基本原理和基本方法进行讨论，并给出模糊计算在工程技术中3个方面的应用实例，最后简要介绍粗糙集方法。

第3章 神经计算。阐述神经网络基本概念，讨论神经网络类型和神经网络学习算法，重点介绍几种典型的神经网络，给出神经计算在工程技术中的2个应用实例。

第4章 进化计算。阐述遗传算法基本概念，简要介绍进化策略和进化编程，给出进化计算在工程技术中的3个应用实例。

第5章 免疫计算。就人工免疫系统的生物学原理进行阐述，其中包括生物免疫学的发展、生物免疫系统、生物免疫原理、生物免疫系统对人工免疫系统研究的启示等内容，进而引出人工免疫概念，并讨论几种典型的人工免疫算法。

第6章 自然计算。介绍自然计算产生的背景；阐述自然计算的基本概念及主要研究领域；论述自然计算的基本特征；论述由自然启发获得自然计算模型的映射方法并构造自然计算系统的计算算法；对协同进化计算进行自然计算理念求证。最后，描述自然计算研究整体框架。

第7章 其他软计算方法。阐述群集智能基本概念，重点介绍其中的蚁群算法和粒子群算法，并将集群智能与其他计算智能进行比较；论述量子计算的基本概念、基本原理和基本方法，最后简要介绍支持向量机理论。

下篇综合应用篇，共分4章，各章内容安排如下：

第8章 模糊计算在复杂工业系统中的应用。以综合实例说明如何实现模糊计算在复杂工业系统中的应用，研究基于遗传算法的第二类模糊非线性规划问题求解、基于遗传算法的动态模糊聚类、模糊计算在洗衣机控制系统中的应用3方面的问题。

第9章 遗传算法在医学图像配准中的应用。阐述医学图像配准的原理与方法；深入研究基于互信息的医学图像配准方法；详细分析局部极值的成因，提出采用降低图像灰度级的方法来抑制局部极值方法，并对该方法对配准速度和精度所产生的影响做详细的分析；针对Powell算法容易陷入局部极值，导致误配准的问题，引入基于实数编码的自适应遗传算法。采用两种算法相结合的混合优化算法，对三维多模态医学图像进行仿真实验。

第10章 人工免疫在故障诊断中的应用。研究基于免疫系统否定选择机理的设备异常检测方法，在对免疫系统否定选择机理及已有检测器算法进行分析的基础上，结合设备异常检测的实际需要，提出改进型否定选择算法，并将该改进后的算法用于变压器的故障诊断。实验结果与传统“三比值”法比较证明算法的有效性；借鉴免疫系统的克隆变异机理及已有的人工免疫系统成果，结合故障诊断的实际需要，研究具有故障诊断能力，同时又具有对故障

样本的连续学习功能的故障诊断方法。实现故障诊断系统在对新的故障样本学习的过程中,保持已学知识。通过对标准样本的分类识别及实际的故障诊断实例验证所提出方法的有效性。

第 11 章 自然计算在系统辨识中的应用。论述自然计算系统整体框架和自然计算系统中的辨识机制,构造辨识系统的两种典型框架——RFG 框架和 NFG 框架;讨论模糊优化基本术语及性质和传统模糊优化问题;研究回归方程和神经网络的结构辨识和参数辨识问题,构造回归方程和神经网络参数辨识的效用函数(目标函数)及用最大效用法进行参数辨识的模糊优化模型,并对模糊优化问题的遗传算法求解进行深入探讨;对基于 RFG 框架的系统辨识问题进行描述,说明回归模型辨识算法的基本策略,构造该算法的主要步骤和方法,给出其在飞边尺寸设计准则辨识中的应用实例;对基于 NFG 框架的系统辨识问题进行描述,说明神经网络模型辨识算法的基本策略,构造该算法的主要步骤和方法,给出其在飞边金属消耗设计准则辨识中的应用实例。对这两种辨识算法分别进行分析比较,实验验证它们的有效性。

本书可作为高等院校自动化、电子信息、测控技术与仪表、电气工程、系统工程、机电工程等专业的本科生和研究生教材,也可作为相关专业工程技术人员的自学参考书。

本书编者从事自动化专业的教学与科研 10 多年,积累了丰富的教学经验和可供参考的科研成果,对于本书的成功编写无疑将起到关键作用。

在本书编写过程中,得到了鲁蓉蓉老师的鼎力支持,研究生张伟刚、李晓光、李伟雄、赵削剑、宋彩霞的大力帮助,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,本书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者
2011 年 6 月

目 录

前言

上篇 基础理论篇

第1章 软计算概述.....1	3.2 神经网络类型.....28
1.1 软计算基本概念.....1	3.3 神经网络学习算法.....31
1.2 软计算与人工智能的关系.....2	3.4 几种典型的神经网络.....32
1.2.1 从传统人工智能到计算智能.....2	3.4.1 生物神经元模型.....32
1.2.2 软计算对计算智能的意义.....3	3.4.2 人工神经元模型.....33
1.3 软计算方法的广义模糊认知哲学基础.....4	3.4.3 BP 网络.....34
1.4 小结.....8	3.4.4 Hopfield 网络.....38
习题1.....8	3.5 神经计算在工程技术中的应用实例.....41
第2章 模糊计算.....9	3.5.1 神经网络控制的结构.....41
2.1 模糊集合.....9	3.5.2 神经控制在复杂系统中的应用.....42
2.1.1 模糊集合概念.....9	3.6 小结.....44
2.1.2 隶属函数.....10	习题3.....44
2.1.3 模糊集合运算.....11	第4章 进化计算.....46
2.1.4 模糊集合与普通集合的关系.....11	4.1 遗传算法.....46
2.2 模糊关系.....12	4.1.1 遗传算法基础理论.....46
2.2.1 模糊关系基本概念.....12	4.1.2 遗传算法研究进展.....49
2.2.2 模糊关系合成.....13	4.2 进化策略简介.....51
2.2.3 模糊变换.....13	4.3 进化编程简介.....52
2.3 模糊推理.....13	4.4 进化计算在工程技术中的应用实例.....54
2.3.1 模糊语言与语言变量.....13	4.4.1 组织协同进化分类算法.....54
2.3.2 模糊命题与模糊条件语句.....14	4.4.2 AGAFCM 算法.....55
2.3.3 模糊推理.....16	4.4.3 遗传算法在模糊控制中的应用.....57
2.4 模糊计算在工程技术中的应用实例.....17	4.5 小结.....59
2.4.1 模糊控制系统的原理与设计过程.....17	习题4.....60
2.4.2 模糊控制在电饭锅中的应用.....18	第5章 免疫计算.....61
2.4.3 模糊优化研究进展.....21	5.1 人工免疫系统的生物学原理.....61
2.5 粗糙集方法简介.....22	5.1.1 生物免疫学的发展.....61
2.6 小结.....25	5.1.2 生物免疫系统概述.....62
习题2.....25	5.1.3 生物免疫原理.....63
第3章 神经计算.....27	5.1.4 生物免疫系统对人工免疫系统研究的启示.....66
3.1 神经网络基本概念.....27	

5.2 人工免疫算法	67	6.4.2 自然计算算法	90
5.2.1 从生物免疫系统到人工免疫系统	67	6.5 协同进化计算的自然计算理念求证	91
5.2.2 典型的人工免疫算法	67	6.5.1 协同进化的生物学基础	92
5.3 小结	72	6.5.2 协同进化的动力学描述	95
习题 5	78	6.6 自然计算研究整体框架	97
第 6 章 自然计算	79	6.7 小结	97
6.1 自然计算产生背景	79	习题 6	98
6.1.1 生物系统	79	第 7 章 其他软计算方法	99
6.1.2 生态系统	81	7.1 群集智能	99
6.2 自然计算相关概念	82	7.1.1 蚁群算法	99
6.2.1 基本概念	82	7.1.2 粒子群算法	102
6.2.2 主要研究领域	82	7.1.3 集群智能与其他计算智能的比较	103
6.3 自然计算基本特征	84	7.2 量子计算	104
6.3.1 从人工智能到自然计算	84	7.3 支持向量机	107
6.3.2 自然计算的新特征	86	7.4 小结	108
6.4 自然计算算法原理	89	习题 7	108
6.4.1 自然计算映射模型	89		

下篇 综合应用篇

第 8 章 模糊计算在复杂工业系统中的应用	109	8.3.3 洗衣机模糊神经控制系统的实现	132
8.1 基于遗传算法的第二类模糊非线性 规划问题求解	109	8.3.4 结论	136
8.1.1 第二类模糊非线性规划问题描述	109	8.4 小结	137
8.1.2 FRNLP 模型的常规容差法最优 模糊判决及求解	109	习题 8	137
8.1.3 FRNLP 模型的满意解和精确最优解	111	第 9 章 遗传算法在医学图像配准中的应用	138
8.1.4 遗传算法在非线性规划上的运用	111	9.1 医学图像配准研究背景	138
8.1.5 实验仿真	112	9.1.1 医学图像配准的意义	138
8.1.6 结论	112	9.1.2 医学图像配准技术的发展历史	138
8.2 基于遗传算法的动态模糊聚类	112	9.1.3 医学图像配准技术在临床上的应用	139
8.2.1 模糊聚类基本概念	112	9.1.4 医学图像配准技术存在的问题	139
8.2.2 将遗传算法用于迭代优化映射 平面的坐标	114	9.2 医学图像配准技术综述	139
8.2.3 实验仿真	115	9.2.1 图像配准的基本原理及概念	139
8.2.4 结论	118	9.2.2 图像配准方法的分类	140
8.3 模糊计算在洗衣机控制系统中的应用	118	9.2.3 图像配准的主要过程	141
8.3.1 模糊神经控制的知识基础	119	9.2.4 主要的医学图像配准方法	143
8.3.2 基于模糊神经网络的洗衣机控制 系统的设计	124	9.2.5 配准的评估	146
		9.3 基于互信息的医学图像配准	146
		9.3.1 基本概念	147
		9.3.2 互信息配准的基本步骤	148
		9.4 互信息局部极值的成因及抑制方法	155

9.4.1 互信息函数局部极值成因分析·····	155	11.1.2 模糊优化研究进展及现状·····	199
9.4.2 基于压缩图像灰度级对局部极值的抑制·····	157	11.1.3 遗传算法研究进展及现状·····	200
9.4.3 配准实验·····	163	11.1.4 基于遗传算法的模糊优化在系统辨识中的应用·····	201
9.4.4 算法可靠性分析·····	166	11.2 自然启发的系统辨识·····	202
9.5 互信息最优化搜索算法·····	167	11.2.1 系统辨识基本性质·····	202
9.5.1 基本遗传算法·····	167	11.2.2 经典系统辨识·····	203
9.5.2 改进遗传算法·····	169	11.2.3 现代系统辨识·····	204
9.5.3 实数编码自适应遗传算法配准实验·····	171	11.2.4 基于自然计算的系统辨识·····	215
9.5.4 混合优化算法·····	173	11.2.5 RFG 框架与 NFG 框架特点分析·····	220
9.6 小结·····	174	11.3 系统辨识中的模糊优化·····	222
习题 9·····	175	11.3.1 模糊优化相关概念·····	222
第 10 章 人工免疫在故障诊断中的应用·····	176	11.3.2 传统模糊优化问题·····	226
10.1 课题研究背景·····	176	11.3.3 系统辨识中的模糊优化问题·····	232
10.1.1 研究目的及意义·····	176	11.4 模糊优化问题的遗传算法求解·····	238
10.1.2 人工免疫系统概述·····	176	11.4.1 基于正交设计的初始化方法·····	238
10.1.3 故障诊断方法综述·····	178	11.4.2 遗传参数适应性调整·····	240
10.2 基于否定选择算法的故障诊断方法·····	180	11.4.3 沿加权梯度方向的变异及其权值的自适应调整·····	242
10.2.1 基于 aiNet 故障样本约减研究·····	181	11.4.4 遗传算法的改进策略·····	244
10.2.2 基于否定选择算法的变压器故障诊断方法·····	185	11.4.5 基于遗传算法的模糊优化求解的有效性·····	244
10.3 基于克隆变异机理的故障诊断方法研究·····	190	11.5 基于自然计算的系统辨识实现·····	249
10.3.1 免疫克隆变异机理与克隆选择算法·····	191	11.5.1 系统辨识的性能评估·····	250
10.3.2 故障诊断方法研究·····	191	11.5.2 基于 RFG 框架的系统辨识实现·····	251
10.4 小结·····	196	11.5.3 基于 RFG 框架的系统辨识应用·····	255
习题 10·····	197	11.5.4 基于 NFG 框架的系统辨识实现·····	262
第 11 章 自然计算在系统辨识中的应用·····	198	11.5.5 基于 NFG 框架的系统辨识应用·····	267
11.1 课题研究背景·····	198	11.6 小结·····	273
11.1.1 自然计算概念提出的背景·····	198	习题 11·····	275
		参考文献·····	277

上篇 基础理论篇

第 1 章 软计算概述

传统计算（硬计算）的主要特征是严格、确定和精确。但是硬计算并不适合处理现实生活中的许多问题，而软计算（Soft Computing, SC）通过对不确定、不精确及不完全真值的容错以取得低代价的解决方案和鲁棒性。它模拟自然界中智能系统的生化过程（人的感知、脑结构、进化和免疫等）来有效处理日常工作。软计算包括几种计算模式：模糊逻辑、人工神经网络、遗传算法和混沌理论。这些模式是互补及相互配合的，因此在许多应用系统中组合使用。

传统人工智能进行符号操作，这基于一种假设：人的智能存储在符号化的知识库中。但是符号化知识的获得和表达限制了人工智能的应用（即符号主义的缺点）。一般地，软计算不进行太多的符号操作。因此，从某种意义上说，软计算是传统人工智能（TAI）的补充。传统的人工智能加上软计算就可成为智能计算。

软计算作为一种创建计算智能系统的新颖方法，正在引起人们的关注。目前已经认识到，复杂的实际问题需要智能系统对各种不同来源的知识、技术和方法进行组合。人们期望这些智能系统在特定领域拥有像人类一样的专门知识，在变化的环境中能够调节自身将学习做得更好，并对怎样做出决策和采取行动进行解释。在解决实际计算问题时，协同地而不是互斥地采用几种计算技术通常具有优越性，所产生的系统被称为互补的混合智能系统。设计这类智能系统的精髓就是神经—模糊计算，其中神经元网络负责识别模式和按变化的环境进行自适应调节，模糊推理系统包含对人类知识进行推理和决策。这两种互补方法，连同一些非求导优化技术的集成，产生了一门新颖的学科，即软计算科学。

1.1 软计算基本概念

软计算是混合的智能化计算方法，实际上它是不以精确解为目标的快速搜索较好解的计算方法，软计算是利用不精确性、不确定性和部分真方法的一个聚合体，它们结合起来比单独使用效果更好。用此方法得到的结果具有易处理性、鲁棒性与现实相一致性，且这些结果常常好于只用传统的（“硬”）计算方法得到的结果。高精度对于实际应用有时是没有意义的，大部分情况下可用牺牲精度来换取速度、提高效率。软计算不是单一方法，而是具有合作关系的多种方法的集成。这些方法主要包括模糊计算、进化计算、神经计算、粗糙集方法、支持向量机方法、人工免疫算法、量子计算、蚁群算法等，它们是相互补充而不是相互竞争的。

伴随 20 世纪“数学：确定性的终结”，诞生了后来称之为“软计算”的新兴学科。自 20 世纪 60 年代中期模糊逻辑（FL）的诞生，神经元算法（NN）、遗传算法（GA）和概率推理（PR）相继问世，构成了软计算方法群的核心部分。后来纳入其中的有置信网络（BN）、混沌理论（CT）、粗糙集（RS）、部分地还包括学习理论（LT）等。上述方法皆在以语言表达代替数的表达，旨在通过不精确性和不确定性计算来解决常规（硬）计算难以处理的复杂问题，

故亦名“计算智能”或“不确定性计算”。

“软计算”是相对于“硬计算”（传统计算）而言的，所谓的软计算是指对研究对象只求近似而非精确解释的有效计算方法。传统计算的主要特征是严格、确定和精确。但是它并不适合处理现实生活中的许多问题，如汽车驾驶。“软计算”通过对不确定、不精确及不完全真值的容错来取得低代价的解决方案和鲁棒性。它模拟自然界中智能系统的生化过程（人的感知、脑结构、进化和免疫等）来有效地处理日常工作。1992年，Loft A. Zadeh 教授指出人工神经网络、模糊逻辑及遗传算法与传统计算模式的区别，将它们命名为软计算。

软计算是正在发展起来的一种计算方法，它与人脑相对应，具有在不确定及不精确环境中进行推理和学习的卓越能力。软计算由若干种计算方法构成，除上面提到的神经网络、模糊集合理论、遗传算法外，近年来将近似推理、模拟退火算法等都归入软计算范畴。

一般地，软计算不进行很多的符号运算，这对于传统人工智能来讲，可谓一大福音。此外，Zadeh 曾多次强调：“软计算的成员间在问题求解中是互为补充而非竞争。为此，通常将其联合使用，这将导致混合智能系统的形成”。事实上，由于软计算成员鲜明的特色和迥异的侧重点，使得这种“混合”既可行也必要，软计算的成员间的混合及软计算方法与其他方法的混合在复杂问题求解层面上极具重要的研发意义。

1.2 软计算与人工智能的关系

软计算是正在发展起来的一种计算方法，它与人脑相对应，具有在不确定及不精确环境中进行推理和学习的卓越能力。

软计算是利用非精确裕度和非确定裕度来获得易控性、鲁棒性及低成本的方法集合。它不是一种单一的方法，而是由若干种计算方法构成，包括神经网络、模糊逻辑及一些非导数优化方法，如遗传算法和模拟退火。它们分别提供不同方面的能力，其中模糊逻辑主要处理非精确性和进行近似推理，神经网络使系统获得学习和适应的能力，遗传算法等进化算法则提供进行随机搜索和优化的能力。其中的每一种方法都有其长处，将这些技术紧密集成就形成了软计算的核心；通过协作，可以保证使计算有效利用人类知识、处理不精确及不确定的情况，对未知或变化的环境进行学习和调节以提高性能。针对学习和自适应，软计算需要强化计算。在这个意义下，软计算与计算智能有共同的特征。

1.2.1 从传统人工智能到计算智能

人工智能，是计算机科学、控制论、信息论、神经生理学、心理学、语言学等多种学科互相渗透而发展起来的一门综合性学科。从计算机应用系统的角度出发，人工智能是研究如何制造出人造的智能机器或智能系统，以模拟、延伸和扩展人类的智力能力的科学。传统 AI 致力于以语言或符号规则的形式来表达和模拟人类的智能行为。1956 年夏天举行的达德茅斯研讨会，被认为是人工智能作为一门独立学科正式诞生的标志。这次研讨会聚集了来自数学、信息科学、心理学、神经生理学和计算机科学等不同领域的领导者，包括 Minsky、McCarthy、Newell 和 Simon。与会者从不同角度搜索了使机器具有智能的途径和方式，并决定用“人工智能”一词来概括这一新的研究方向。达德茅斯研讨会开创了人工智能的第一个发展时期。在其后的大部分时间里，人工智能主要是在符号主义，特别是在“物理符号系统”假设的背景下，



通过对计算机的编程来实现的。1976年, A.Newell 和 H.A.Simon 两人从符号语义的观点出发, 对智能的本质进行了深入分析。他们一致认为“正如不存在能通过自己的特殊性质表示生命实质的‘生命原理’一样, 也不存在任何‘智能原理’。”认为计算机之所以能表现智能的特征, 是因为它具有存储和处理符号的能力。认为“符号是智能行动的根基”, 智能水平则取决于系统处理符号的能力。

在某些很窄的问题领域, 不可否认, 如果存在明显的知识, “物理符号系统”假设将具有重要的意义, 如专家系统, 可谓是传统 AI 的成功典范。但是, “物理符号系统”假设的实现本身依赖于十分苛刻的条件, 即如果把计算机看成是符号系统的物理实现, 那么就必须要将被求解的问题形式化, 也就是把对象用统一的抽象符号和固定规则精确地表示出来。人们曾认为, 只要符号足够丰富, 操纵这些符号的规则足够细致和严密, 建立起一个能够为计算机识别和处理的形式化系统是可能的。但是, 在其后的研究中人们发现, 基于“物理符号系统”假设的人工智能以静止的、精确的逻辑方式来处理问题, 这与人类智能依靠人脑思维灵活地处理问题的方式显然不是同一个概念。

进入 90 年代, 以不确定性、非线性、时间不可逆性为内涵, 以复杂的问题为对象的科学新范式得到学术界的普遍认同。1994 年, 关于神经网络、演化程序设计、模糊系统的 3 个国际学术会议在美国佛罗里达州奥兰多市联合举行了“首届计算智能世界大会”(WCCI), 进行了题为“计算智能·模仿生命”的主题讨论会, 取得了关于计算智能的共识。继传统人工智能之后, 计算智能犹如异军突起, 吸引着众多研究开发者投身于这一新领域的开拓。因此, 从某种意义上来说, 软计算是传统人工智能的补充。

1.2.2 软计算对计算智能的意义

计算智能 (Computational Intelligence) 本质上是一种借鉴仿生学思想, 基于自然界的生物进化、神经网络、模糊推理等机制, 用数学语言进行抽象描述的计算方法。单从概念上可以看到, 它与软计算之间存在很大的正交关系, 曾有观点形象地描述计算智能为“模仿生命的软计算”, 更有观点认为“计算智能就是软计算”。当然, 这些观点不可避免地依赖于个人的判断, 也不能就此表面的类似作为二者存在联系的论据。下面就从软计算所包含的主要方面和特征来探讨它对计算智能的启示和意义。

1. 模糊逻辑理论和模糊计算

自然和人工系统中存在着 3 种复杂性: 随机性、模糊性和不确定知性。20 世纪 60 年代, L.A Zadeh 教授系统地提出了刻画和处理模糊不确定性的理论基础——模糊集合论。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, 它铺设了经典的定量化方法和“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。具体来讲, FL 有逻辑的方面: 源于多值逻辑系统; 集合论方面: 源于难以定义边界结合的表达式; 推理方面: 注重模糊关系的表达与应用; 认识论方面: 包含了 FL 在基于知识的模糊系统和数据库上的应用。自模糊集合的概念提出以来, 以模糊逻辑为核心的模糊计算获得了广泛的应用, 在自动控制、决策分析、智能系统等领域取得大批成果。

2. 人工神经网络

人工神经网络系统是由大量简单的处理单元, 即神经元广泛地连接而形成的复杂网络系统。在人工神经网络中, 计算是通过数据在网络中的流动来完成的。在数据的流动过程中, 每个神经



元从与其连接的神经元处接收输入数据流, 对其进行处理以后, 再将结果以输出数据流的形式传送到与其连接的其他神经元中去。通过这个学习过程, 人工神经网络可以不断地从环境中自动地获取知识, 并将这些知识以网络结构和连接权值的形式存储于网络之中。人工神经网络具有良好的自学习、自适应和自组织能力, 以及大规模并行、分布式信息存储和处理等特点, 这使得它非常适合于处理那些需要同时考虑多个因素的、不完整的、不准确的信息处理问题。

3. 进化计算

受生物界的自然选择和自然遗传机制启发, 20 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计算方法——进化计算提出。这类计算方法由遗传算法、进化策略和进化规划等组成。它的理论基础是基于 Darwin 进化论和 Mendel 的遗传学说的。它是计算机科学和生物遗传学相互结合渗透而形成的一种新的计算方法。进化计算采用简单的编码技术表示各种复杂的结构, 并通过对一组编码表示进行简单的遗传操作和优胜劣汰的自然选择策略来指导学习和确定搜索方向。

1.3 软计算方法的广义模糊认知哲学基础

纵观软计算方法包含的几个主要内容, 它的工作特性可归纳为几点:

(1) 受感于生物的计算模型。受生物神经元网络的鼓励, 软计算中大量使用人工神经网络来处理有关感知、模式识别、非线性回归与分类的问题。

(2) 处理问题的灵活性。软计算中应用了来源于不同思想领域的新颖的最优化方法, 包括遗传算法、蚁群算法、模拟退火、随机搜索等, 这些优化方法不需要目标函数的梯度向量, 因此在解决复杂优化问题时有更大的灵活性。

(3) 容错性。神经元网络和模糊推理系统都有很好的容错性, 从神经元网络中删除一个神经元, 或从模糊推理系统中去掉一条规则, 并不会破坏整个系统。

基于这些优势, 软计算方法可谓对传统人工智能所面临的问题提出了新的解决方案, 不失为一种创建计算智能系统的新颖方法。

1994 年, Adleman 在《Science》杂志上发表开创性文章, 提出了 DNA 计算的概念, 并成功地解决了著名的 Hamilton 路径问题, 还指出了 DNA 计算潜在的巨大并行性及待研究的问题。1995 年, Lipton 也在《Science》杂志上发表文章, 进一步论证了 DNA 计算可解决完全性问题。至此, DNA 计算引起了国际学术界的广泛关注。近年来, DNA 计算逐渐引入软计算, 尤其是 DNA 计算与软计算的集成更是引起国内外研究者的广泛兴趣和关注, 人们开始尝试以 DNA 作为符号来模拟人类智能行为。人们不能将传统 AI 陷入困境的根本原因归咎于它使用了符号, 也不能归咎于它用符号去映射事物, 而在于它过分地依赖于物理符号, 把从对象中抽象出来的符号系统看成静态的、具有固定搭配关系的系统, 寄希望于能够最终掌握这一系统的内在结构, 并把这种结构用“符号”描述出来, 然后通过对计算机的编程, 构成这一结构符号拷贝, 达到再现智能的目的。DNA 计算与软计算的集成使人们萌生了用 DNA 来构筑符号的想法, 这种实时的、人性化的“生命符号系统”弥补了传统的静止的、严格的“物理符号系统”的不足, 为人工智能的发展提供了新思路, 加之软计算方法将众多的解决复杂问题的技术结合在一起, 为不确定性和不确切性问题的解决提供了更为有效的方法, 从而为人工智能的发展奠定了新的理论基础。



1. 软计算——“数学的近似推理”

伴随 20 世纪“数学：确定性的终结”，诞生了后来称之为“软计算”的新兴学科。

自 60 年代中期模糊逻辑 (FL) 诞生以来，神经网络 (NN)、遗传算法 (GA) 和概率推理 (PR) 相继问世，构成了软计算方法群的核心部分。后来纳入其中的有置信网络 (BN)、混沌理论 (CT)、粗糙集 (RS)，还包括可信度理论、证据理论、学习理论 (LT) 等。上述方法皆以语言表达代替数的表达，旨在通过不精确性和不确定性计算来解决常规计算 (硬计算) 难以处理的复杂问题，故亦名“计算智能”或“不确定性计算”。

例如，不确定性环境下的决策分析，包括统计决策、模糊决策、基于神经网络的决策和基于粗糙集理论的决策等，皆殊途同归，都是从不同角度尝试在信息不完全、不精确的情况下，根据已有数据进行数据开采 (DM)，从而产生合理的决策方案。表明在这个方法群中，各种方法之间的关系是协同互补的而不是竞争的。这里“不确定性”是在广义上使用的，涵盖模糊性、随机性、粗糙性、不精确性、不完整性、部分真值及近似表达等，均属于广义模糊认知的范畴。因而上述“计算智能”或“不确定性计算”亦可称为“数学的近似推理”，或“不精确推理”。

按照模糊理论和软计算理论创始人扎德的提议，有关软计算的哲学课题包括软计算的本体论、认识论、逻辑、伦理、社会哲学、教育哲学诸方面。例如，可以研究软计算中的概念构成、诠释和定义，研究其理论构成、理论和模型等。在探索数学不确定性的哲学意蕴大背景下，从“人脑是软计算的角色模型”这一论点出发，通过简要讨论软计算中关于不确定性理解的几个方面：不确定性和确定性、精确性和模糊性、随机性和模糊性、粗糙性和模糊性、不确定性和相对性等，可以看出软计算方法的近似推理机制及其应用前景。

2. 数学不确定性与软计算的现实基础

不确定性是相对于确定性而言的，因而也是一种相对性。

从数学上看，量可以分为确定性的量和不确定性的量。前者由经典数学处理，后者由非经典数学处理。对“确定的”概念或加以“限制”后的“非确定的”概念，经典集合论所作的描述是“非此即彼”：任意一个对象，要么属于某个给定的集合，要么不属于这个集合，二者必居其一。它在数学上反映为排中律成立。至于对“非确定性”本身，经典数学要描述它就无能为力了。数学上的不确定性包括随机性、模糊性、粗糙性等，它们分别由概率统计、模糊数学、粗糙集理论等不确定性数学加以处理。随机性是指有明确定义但不一定出现事件中包含的不确定性。数学上指事件发生与否的条件可能性，以在 $[0,1]$ 区间上取值的概率分布函数加以描述。模糊性是指已经出现但难以给出明确定义的事件中包含的不确定性。数学上指已出现的事件对某一特定集合的隶属关系，以在 $[0,1]$ 区间上取值的隶属函数加以描述。粗糙性 (不可分辨性) 是指不能清晰定义的一类集合，原因是对其缺乏足够的论域知识，但可用一对清晰集合 (上、下近似集) 逼近而加以描述。

不确定性数学的产生和发展有其客观基础。人脑是软计算的角色模型。现实生活中往往需要人们根据不确定的和不完整的信息作出决策。软计算正是研究系统知识中的不确定性和模糊性现象，并开发和完成处理这些现象的各种数学方法，诸如模糊逻辑、神经网络、遗传算法、概率的和近似的推理等。不确定性数学的哲学背景则在于确定性与不确定性之间相互依存、相互转化的辩证关系。确定性中包含不确定性，不确定性中也包含确定性。

因此，如何从不确定的和不完整的信息中提取更多有用的东西，或者说，如何根据不确定和不完整信息的不同状况应用不同的数学方法进行近似推理，就成为数学理论和实践经验之间矛盾



运动的一个新的知识生长点。由此生发出来的软计算通过允许不精确性、不确定性、部分真值及近似表达,而使问题变得易于处理,获得可靠性,减少求解费用,以更好地与实际相符。

与传统的“硬计算”(常规计算、推理、决策)要求精确、确定、严密不同,“软计算”可以在认知推理和决策中容忍不精确、不确定和不完整。与计算机不同,“软计算”从根本上意味着人类心智拥有强大的能力去储存和处理通常是不精确的、非确定的和未经分类的信息,对这些信息(计算目标)进行有意义的范式转换或数据开采(DM),从而在现实生活许多应用领域获得易处理的、可靠的和低成本解决方案,这是“硬计算”所难以实现的。例如,在管理科学与决策科学中,H.Simon提出的非程序化决策观念,其中出现的不确定性就是模糊性。他用“令人满意原则”代替寻找最优解,既能满足实际需要又使问题大为简化。

3. 数学近似推理中的模糊性模型与精确性

精确性与模糊性是数学和逻辑学中的一对矛盾。

自柏拉图以来,数学就以追求精确性知识为其最高目标。然而,“对现实世界弥漫着的不精确性而言,传统计算及硬计算的概念结构太过于精确了”。古典逻辑也是非常精确的,但是人的逻辑并非如此精确。20世纪中叶,扎德将经典集合论拓展为模糊集合论,推广了传统逻辑的肯定前件式(the Modus Ponens),引进了语言变量、模糊“若一则”规则和模糊图等,从而奠定了模糊逻辑(FL)作为一种近似推理逻辑的基础。模糊逻辑就是试图仿效人的近似推理为真实生活推理建立模型。诚如扎德所说:“模糊逻辑的原形本质上即为人类的心智。”基于模糊集的模糊数学也已建立起模糊拓扑学、模糊群论、模糊图论、模糊概率和模糊理论等分支,成为一个崭新的数学体系。

古典方法论仅认可精确的描述,而模糊集方法特别是模糊信息粒化方法则推广于主观的和模糊的现象,能有效地描述不精确的、不完整的和模糊的信息。但是,除非能够由此进行推理,否则这种描述便毫无用处。它包括近似推理的应用,借助近似推理,模拟人是怎样从不精确信息中获得信息的。其中一个重要目标是达到对人的知识和经验的描述,以便能够在机器上加以实验。模糊集的应用方法与基于系统的传统知识(KBS)所组织起来(建立数学模型)的那种方式类似但又不同。

模糊逻辑不是抽象的思维,而是建立在精确的数学公式基础上的具体思维。模糊性是客观存在的。系统的复杂性越高,精确化能力就越低,也就意味着模糊性越强。扎德总结出来的这一不相容原理,表明精确性和复杂性之间的反变关系,而这正是模糊控制的依据所在。模糊技术的突出优点是能较好地仿效和描述人的思维方式,总结和反映人的经验,对复杂事物和系统可进行模糊度量、模糊识别、模糊推理、模糊决策和模糊控制。

一方面,国外有的学者认为,扎德的模糊集论还有其不完善的地方,即“缺乏确定隶属函数值的一种理论或经验的方法。能用合理的精确性来使主观概率客观化。但是,至今没有发现什么方法能使主观的模糊性客观化”。另一方面,在软科学中,许多学科涉及的数量事实上几乎都带有模糊性。混沌理论、模糊集合、神经网络(NN)和遗传算法(GA)本质上具有共性,即系统的非线性和状态的随机性,故近年来国内外学者都以模糊性数学模型为基础,把它们结合起来研究或研究其两两结合的共同特性。广而言之,各种不确定性或不精确性处理方法之间的“整合”研究乃是软计算发展的一大趋势。数学近似推理中的随机性模型与模糊性随机性模型是一种传统的数学近似推理形式。它揭示自然过程中偶然的、随机的现象所遵循的一定统计规律,不是对现象本身作准确的数量刻画,而是对其演化趋势作出近似的数量描绘,并从



中揭示各种可能出现的结果的比例分布。

从哲学上看,随机性和模糊性是两种不同的不确定性。随机性属于偶然性领域,与必然性相对,根源于事物的因果关系不确定;模糊性属于模糊领域,与精确性相对,它是事物的一种客观属性,是事物的差异之间存在着中间过渡的结果。从数学上看,随机性现象是由概率论处理的,表示为从论域 U 到 $[0,1]$ 上的映射。概率论认为,随机事件只有通过它与其他事件之间的联系才能被认识。在合理划定(或给定)的条件下,随机事件出现的可能性的的大小能够用 $[0,1]$ 中唯一的实数 p 表达。模糊性现象则是模糊数学处理的,可表示为从事件集合到 $[0,1]$ 上的映射。概率论和模糊数学同属于不确定性数学。

所谓模糊性是指边界不清楚,既在质上没有确切的含义,又在量上没有明确的界限。这种边界不清的模糊概念不是由于人的主观认识达不到客观实际造成的,而是由本质的不确定性引起的。另外,本质上确定的事物也会出现不确定现象——随机现象,表现为一因多果。现象的随机性在于:事件本身具有明确的含义,仅仅是由于条件不充分,使在条件与事件之间未出现确定性的因果关系,从而在事件的出现与否上表现出不确定性。它是因果律的一种破缺。

数学上对随机性(一个本质上确定的事物其发生与否的不确定性),是采用一个确定的概率来描述,因为不确定的偶然性中存在着某种必然性。一个事件发生的概率可以用大量重复试验得到的频率近似地表示,即“概率是可以客观度量的”。概率反映了一定条件对事件的内在联系与制约,其客观意义可以由随机试验中所呈现的频率稳定性所反映。

概率原本只适用于同类现象甚多的场合,而不能用之判断一些罕见的现象,如天灾、中彩票、找石油等,因为这方面的参考数据几乎是零。随着模糊理论的发展,导致在随机现象中引入模糊性的模糊概率论的问世。开始研究诸如模糊事件发生的概率、事件发生的模糊概率、模糊事件的语言概率等。贝叶斯理论提供了作为不确定性推理的概率推理(PR)的一种模式。认知概率推理从认知(包括接受信念及反馈信念)的动态过程去把握概率的本质,也是一个值得探讨的课题。

4. 数学近似推理中的粗糙性模型与模糊性

粗糙集理论(Rough Set)或粗糙集数学模型是一种较新并较有发展前途的软计算方法。

粗糙集基于分类机制,将知识看作是对数据的划分,并进而把知识库定义为一个关系系统。划分所形成的对象间的不可分辨关系揭示出论域知识的颗粒状结构。粗糙集使用两个精确集,即粗糙集的上近似集和下近似集来近似地描述,并使用粗糙隶属函数来刻画知识的这种模糊性。作为一种不确定性数学处理工具,其独特之处是利用已知知识库中的知识来刻画不精确和不确定的知识,有效地分析和处理不精确、不一致、不完整等各种不完备信息,并从中发现隐含的知识。

众所周知,在经典集合中外延与内涵是等价的,故可列举与描述。以此作为参照,粗糙集与模糊集是不同的,但两者相互补充。就模糊集而言,其内涵是清晰的,但外延不确定,故可用描述法而不能用列举法;就粗糙集而言,其外延确定但内涵不确定,故可列举而难以描述。粗糙集研究不同类中的对象组成的集合关系,以对象间的不可分辨关系为基础,侧重分类;模糊集研究属于同一类的不同对象间的隶属关系,基于元素对集合隶属程度的不同,强调集合边界的不分明性(Vagueness)。前者依据不分明和模糊,通过统计方法求近似值;后者依据不分明关系和不完全知识,通过数学公式求近似值。

此外,在处理不确定信息时,粗糙集方法与模糊集方法和概率统计方法也不同。前者仅



利用已知数据本身提供的信息，无须任何先验知识。后者则需要一些数据的附加信息，如模糊隶属函数和概率分布等。因而在粗糙集中，“与概率论和模糊集合论不同，不精确性的数值不是事先假定的，而是通过表达知识不精确性的概念近似计算得到的，这样不精确性的数值表示的是有限知识（对象分类能力）的结果”。由此可见，粗糙集理论是一种具有模糊边界的集合理论，是一种采用新方式来处理模糊性和不精确性的数据分析工具，因而被广泛应用于不相容决策表中的规则提取，即利用粗糙集从数据中发现规则。基于此，粗糙集理论对 AI 和认知科学非常重要，已在信息系统分析、决策支持、专家系统、归纳推理知识与数据发现、模式识别与分类等方面有成功的应用。例如，数据库中的知识发现（KDD），它涉及从不断增长的企业信息数据库中挖掘出额外的非平凡的知识方面。更主要的任务之一是探求内部数据的关联和关系，如医学数据库中症状和病症之间的联系。目前，基于粗糙集对模糊集合、概率推理、神经网络和遗传算法的整合已见端倪或尚待开发。粗糙集理论与非标准分析、非参数统计学及定性物理学之间的关系也有待研究。

1.4 小结

本章阐述了软计算基本概念，剖析了软计算与人工智能的关系，揭示了软计算方法的广义模糊认知哲学基础。

习题 1

8

1. 试简述软计算与人工智能的关系。
2. 什么是软计算？它的特点是什么？
3. 简述从传统人工智能到计算智能的发展过程。
4. 软计算所包含的主要方面和特征有哪些？它对计算智能的意义是什么？
5. 软计算方法的工作特性是什么？
6. “软计算”与传统的“硬计算”的主要区别是什么？
7. 试叙述软计算中关于不确定性在不确定性和确定性、精确性和模糊性、随机性和模糊性、粗糙性和模糊性、不确定性和相对性方面的理解；并说明软计算方法有什么近似推理机制及应用前景。