



信息科学技术学术著作丛书

面向复杂系统的 群集智能

肖人彬 等 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

信息科学技术学术著作丛书

面向复杂系统的群集智能

肖人彬 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从复杂性科学的视角出发,系统阐述了面向复杂系统的群集智能理论与方法。全书内容共分为8章。作为绪论的第1章综述了群集智能的研究进展并描述了全书的概貌,起到导引的作用。第2~5章是本书的主要内容,其中,前两章分别探讨群集智能中的优化和广义优化(进化)问题,属于“方法导向研究”;后两章分别探讨群集智能中的分工合作和结构涌现问题,属于“问题导向研究”;上述4章构成了本书的主体篇。第6~8章是对群集智能的拓展性研究,它们共同构成本书的扩展篇,其中,第6章讨论模拟人类群体情感的社会情感计算,第7章阐述群集智能与人工神经网络和人工免疫系统的关系,第8章进一步给出了不同方法的融合范例。

本书适于从事智能科学和复杂性研究的科技工作者阅读使用,也可作为高等院校智能科学与技术、系统工程、管理科学与工程等信息类和管理类相关专业研究生和本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

面向复杂系统的群集智能/肖人彬等著. —北京:科学出版社,2013.6
(信息科学技术学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-037625-1

I. ①面… II. ①肖… III. ①人工智能 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 115155 号

责任编辑:刘宝莉 孙 芳 / 责任校对:胡小洁

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013年6月第一次印刷 印张:24 1/4

字数:467 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《信息科学技术学术著作丛书》序

21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代,一场以网络科学、高性能计算和仿真、智能科学、计算思维为特征的信息科学革命正在兴起。信息科学技术正在逐步融入各个应用领域并与生物、纳米、认知等交织在一起,悄然改变着我们的生活方式。信息科学技术已经成为人类社会进步过程中发展最快、交叉渗透性最强、应用面最广的关键技术。

如何进一步推动我国信息科学技术的研究与发展;如何将信息技术发展的新理论、新方法与研究成果转化为社会发展的新动力;如何抓住信息技术深刻发展变革的机遇,提升我国自主创新和可持续发展的能力?这些问题的解答都离不开我国科技工作者和工程技术人员 的求索和艰辛付出。为这些科技工作者和工程技术人员提供一个良好的出版环境和平台,将这些科技成就迅速转化为智力成果,将对我国信息科学技术的发展起到重要的推动作用。

《信息科学技术学术著作丛书》是科学出版社在广泛征求专家意见的基础上,经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播网络科学和未来网络技术,微电子、光电子和量子信息技术,超级计算机、软件和信息存储技术,数据知识化和基于知识处理的未来信息服务业,低成本信息化和用信息技术提升传统产业,智能与认知科学、生物信息学、社会信息学等前沿交叉科学,信息科学基础理论,信息安全等几个未来信息科学技术重点发展领域的优秀科研成果。丛书力争起点高、内容新、导向性强,具有一定的原创性;体现出科学出版社“高层次、高质量、高水平”的特色和“严肃、严密、严格”的优良作风。

希望这套丛书的出版,能为我国信息科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时,欢迎广大读者提出好的建议,以促进和完善丛书的出版工作。

中国科学院计算技术研究所所长



序 一

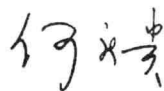
人工智能这门旨在探索如何使计算机更“聪明”的新兴学科自 1956 年问世以来发展迅速,其初创时期的基本理念是人类思维逻辑的形式化,称之为符号智能(即传统的人工智能)。为了进一步模拟人的思维过程,随后计算智能应运而生,它主要包括人工神经网络、模糊逻辑和进化计算等分支,与符号智能相互补充。后来,不少学者在深入研究和总结的基础上,认识到人类智慧是社会化的产物,人的智能往往源于个体之间的交互作用,转而开始研究由这种简单个体组成的群体中涌现的集体智能,由此将人工智能推进到了一个新阶段。

目前,国内多数学者对群集智能的研究通常都是围绕蚁群优化和微粒群优化算法展开,内容相对比较单一。肖人彬教授等人的学术著作《面向复杂系统的群集智能》独辟蹊径,将其研究领域进一步推进到对群集个体间分工合作和组织结构相关问题的探索,不乏新颖之处。该书还开展了群集智能的拓展性研究,书中内容广博,包含不少真知灼见。该著作特色鲜明,反映了作者在群集智能研究方面的丰富成果。书中提出的“问题导向的群集智能研究”具有深刻的启发性和方法学意义,可望对今后的群集智能研究起到相应的引领作用。

纵观全书,可见其立意新颖,结构严谨,创新突出,是我国近年来智能科学研究领域中取得的重要进展之一,其出版价值不言而喻。

特此作序并期盼作者做出更多新的研究成果。

北京大学教授、中国工程院院士



2013 年 3 月 27 日

序 二

群集智能指的是简单主体通过交互作用所表现出来的不可预见的宏观智能行为的特性,主要用于复杂问题求解。面向复杂系统的群集智能研究是智能科学与复杂性科学的前沿交叉课题,具有重要的理论意义和学术价值。

呈现在读者面前的这本《面向复杂系统的群集智能》著作独树一帜,在智能科学与复杂性科学的结合上做出了有益探索。书中机理揭示与定性分析互补,既有原理、模型、方法的理论探讨,又有较多仿真计算和应用实例;既涵盖经典的群集智能优化方面内容,又包括蚁群劳动分工和群集智能作用下的结构涌现等前沿论题;一方面总结了作者多年来在群集智能研究中所取得的一系列创造性成果,另一方面对群集智能的发展状况也有深入的论述、分析和评价。全书内容丰富,结构严谨,系统性强。该著作立意新颖,基于复杂性科学的理念,从复杂系统的角度切入,问题导向与方法导向并重,视角独特,启发性强。在此基础上,该著作博采众长,综合集成,将定性分析与定量研究融为一体。在写作方面语言流畅,文字生动,具有较强的可读性。

《面向复杂系统的群集智能》一书凝聚了作者肖人彬教授等人多年的研究成果,他们的研究工作思路开阔,视野独特,问题导向充分,学术创新显著,已发表数十篇高水平的学术论文,获得过多项省部级自然科学奖及科技进步奖,成果颇丰。

作为群集智能的研究专著,我相信,《面向复杂系统的群集智能》一书的出版对于促进群集智能理论与方法在中国的传播和推动复杂性科学的发展将会产生重要影响,该著作适于智能科学与技术、控制理论与控制工程、系统科学与系统工程、管理科学等领域的科技工作者、教师和研究生阅读使用,颇有参考价值。

同济大学教授、国家自然科学基金委员会管理科学部主任

吴启迪

2013年4月16日

前 言

著名学者霍金在世纪之交的 2000 年断言新的世纪将是复杂性科学的世纪(I think the next century will be the century of complexity),有关探索性研究可谓方兴未艾。复杂性的表现载体是复杂系统,生物系统则是复杂系统的典型代表,而导致生物系统复杂的根本原因是其具有高度智能:因此,通过智能科学的途径来探索系统复杂性无疑是一种颇有前景的发展方向。群集智能表现出一类重要的复杂系统特性,正因为如此,集中展示群集智能涌现特性的社会性生物群体行为规律的研究引起了极大关注并得到高度重视。

目前,国内相关研究提到的群集智能在通常情况下已有既定含义,一般特指群集智能优化,主要以蚁群优化和微粒群优化为代表,这一方面的研究工作侧重于对优化算法的性能进行改进,可以称为“方法导向的群集智能研究”。本书虽有两章内容讨论群集智能优化问题,但并不局限于此,而是另辟蹊径,针对群集智能中的分工合作问题开展了蚁群劳动分工建模与仿真研究,针对群集智能中的结构涌现问题探讨了群集智能作用下的结构涌现机制并建立了结构涌现模型。上述两类问题研究的成败关键在于充分把握问题对象的特征,我们称之为“问题导向的群集智能研究”。本书在将群集智能研究从方法导向层面推进到问题导向层面的基础上,进一步开展了若干拓展性研究。例如,将面向社会性昆虫的群集智能研究向高层次延伸,探讨了模拟人类群体情感的社会情感计算问题,考察了群集智能与其外部的联系,阐明了通过智能计算方法的融合来实现复杂问题的集成化求解的理论依据和有关原理。

近十年来,作者先后获得若干与群集智能有关的国家自然科学基金项目及其他基金项目 and 人才计划项目,在这些科研项目的连续资助下,作者以问题驱动方式围绕群集智能理论与方法进行了系统深入的研究。本书除了介绍国内外群集智能的研究进展外,主要从复杂系统的视角集中展示作者近年来在群集智能理论与方法研究方面所取得的一系列成果,这些研究工作对于揭示复杂系统的运行机制、提高智能科学发展水平具有重要的意义,并曾获得教育部自然科学奖、湖北省自然科学奖等多项科研奖励。

本书涉及论题系统完整,既涵盖群集智能优化方面内容,又包括蚁群劳动分工行为和群集智能作用下的结构涌现等方面研究,还探索了社会情感计算、智能计算方法融合等前沿课题。书中既有原理、模型、方法的理论探讨,又有较多仿真计算和应用实例,使得两者紧密结合起来。在研究工作中,问题导向与方法导向

并重,实现了有机融合。本书的出版一方面弥补了国内在群集智能研究著作上存在的空缺,另一方面力图促进群集智能理论与方法的研究和发展。

本书由华中科技大学肖人彬教授、陶振武博士(现工作单位为中国移动通信研究院)与太原科技大学崔志华博士及浙江工商大学陈庭贵博士合作完成。按照肖人彬拟订的写作提纲,上述作者共同承担了书稿撰写工作,各章分工情况如下:第1章由肖人彬撰写,第2章由崔志华、肖人彬、陶振武撰写,第3章由陶振武撰写,第4章由肖人彬撰写,第5章由陶振武、肖人彬撰写,第6章由崔志华撰写,第7章由肖人彬、陈庭贵撰写,第8章由肖人彬、陈庭贵撰写,最后由肖人彬对全书进行统校定稿。

本书反映了作者所承担的多项国家自然科学基金(项目编号:60974076, 60474077, 61003053, 71171089, 70150001)及高等学校博士学科点专项科研基金(项目编号:200804870070, 20030487054)等基金项目和教育部新世纪优秀人才支持计划项目(项目编号:NCET-05-0653)及湖北省新世纪高层次人才工程科研项目择优资助等人才计划项目的学术成果。上述科研课题的支持为本书作者创造了宽松的学术氛围和研究环境,谨在此向有关部门表示深深感谢并致以敬意。

本书的出版得到了2011年度国家科学技术学术著作出版基金的资助,在此感谢国家科学技术学术著作出版基金委员会的支持。同时感谢本人指导的多位博士生及硕士生为本书所做出的贡献,感谢科学出版社编辑所付出的辛勤劳动。

谨以此书献给我的母亲八十华诞!



2012年10月6日写于

华中科技大学60周年校庆之际

目 录

《信息科学技术学术著作丛书》序

序一

序二

前言

第一篇 导 引 篇

第 1 章 绪论	3
1.1 引言	3
1.2 群集智能行为的生物原型	5
1.2.1 蚁群觅食	5
1.2.2 鸟群觅食	6
1.2.3 蚁群劳动分工	6
1.2.4 蚁群基地构造	7
1.2.5 蜂群筑巢	7
1.3 群集智能研究进展	8
1.3.1 群集智能系统结构	9
1.3.2 群集智能模型与算法	11
1.3.3 群集智能典型应用	15
1.3.4 群集智能发展展望	18
1.4 群集智能特性分析及其对复杂系统研究的意义	20
1.4.1 群集智能特性分析	20
1.4.2 群集智能对复杂系统研究的意义	23
1.5 本书的主要内容	25
1.6 本书的篇章结构	28
参考文献	30

第二篇 主 体 篇

第 2 章 群集智能优化的算法理论与算法改进	39
2.1 群集智能优化概述	39
2.2 群集智能优化算法及其理论分析	41

2.2.1	微粒群算法	41
2.2.2	蚁群算法	44
2.2.3	人工蜂群算法	45
2.2.4	微粒群算法的理论分析	47
2.3	微粒群算法的稳定性	48
2.3.1	生物学背景	48
2.3.2	带被动 c-聚集的微粒群算法	50
2.3.3	近邻个体交互微粒群算法	52
2.3.4	近邻个体交互微粒群算法的李雅普诺夫稳定性分析	55
2.3.5	带主动 c-聚集的微粒群算法	58
2.3.6	PSOAC 算法的一致渐近稳定性分析	59
2.3.7	基于群体决策信息的微粒群算法	70
2.4	最大速度上限的改进策略	73
2.4.1	最大速度常数的研究现状	73
2.4.2	最大速度上限的作用	74
2.4.3	最大速度上限的随机策略	76
2.5	具有确定认知策略的混合微粒群算法	79
2.5.1	标准微粒群算法的局部收敛性能分析	79
2.5.2	具有确定认知策略的混合微粒群算法原理	83
2.5.3	非稳定线性系统逼近问题	90
2.6	自适应分工微粒群算法	91
2.6.1	微粒群算法中的自适应分工原理	91
2.6.2	局部环境因子和种群自适应分工策略	92
2.6.3	ADPSO 算法的结构与实现	94
2.6.4	ADPSO 算法的性能分析	95
2.7	群集智能优化方法的综合应用实例	99
2.7.1	问题的描述	99
2.7.2	并行公差优化设计问题的模型转换	101
2.7.3	面向并行公差优化设计的混合群集智能算法	103
2.7.4	综合求解实例	106
2.8	小结	108
	参考文献	109
第 3 章	基于群集智能的复杂系统共进化	115
3.1	引言	115
3.2	复杂系统的共进化机制分析	117

3.2.1 生物系统中的进化与共生进化	117
3.2.2 基于遗传算法的共生进化机制	118
3.2.3 群集智能中的共生进化机制	120
3.2.4 复杂系统共生进化的研究思路	121
3.3 共生进化问题求解的基本原理	122
3.3.1 复杂问题求解的一般过程	122
3.3.2 “问题空间-算子空间-解空间”的共生进化求解原理	123
3.3.3 问题空间与解空间的共生进化	126
3.3.4 算子空间与解空间的共生进化	126
3.3.5 问题空间与算子空间的共生进化	128
3.4 基于群集智能的多目标共生进化优化方法	129
3.4.1 多目标优化问题及其求解分析	129
3.4.2 面向离散变量的 CACSM 算法	133
3.4.3 面向连续变量的 MOPSO 算法	137
3.5 基于群集智能的多群体共生进化优化方法	143
3.5.1 问题求解背景	143
3.5.2 面向问题的多群体共生进化蚁群优化方法	145
3.5.3 问题空间-解空间共生进化优化的应用实例	154
3.6 小结	158
参考文献	159
第4章 蚁群劳动分工建模与仿真	161
4.1 引言	161
4.1.1 蚁群劳动分工模型研究概述	161
4.1.2 应用背景分析	163
4.2 蚁群劳动分工模型	165
4.2.1 群体动力学模型	165
4.2.2 固定响应阈值模型	166
4.2.3 时变响应阈值模型	169
4.2.4 分析说明	172
4.3 多任务蚁群劳动分工建模与仿真	173
4.3.1 研究背景	173
4.3.2 多任务蚁群劳动分工模型的设计与实现	174
4.3.3 供应链式虚拟企业仿真	176
4.3.4 组织虚拟式虚拟企业仿真	180
4.3.5 分析讨论	183

4.4	多状态蚁群劳动分工建模与仿真	185
4.4.1	研究背景	185
4.4.2	多状态蚁群劳动分工模型的设计与实现	187
4.4.3	基于多状态蚁群劳动分工模型的仿真实例	188
4.5	多项目调度蚁群劳动分工模型建立及其求解	193
4.5.1	多项目调度问题描述	193
4.5.2	多项目调度蚁群劳动分工模型的设计与实现	195
4.5.3	基于多项目调度蚁群劳动分工模型的仿真实例	201
4.6	基于精英策略的蚁群劳动分工模型优化	204
4.6.1	研究思路	204
4.6.2	基于精英策略的蚁群劳动分工模型优化方法 with 实现	205
4.7	小结	207
	参考文献	208
第5章	群集智能作用下的结构涌现	211
5.1	引言	211
5.2	基于蚁群墓地构造的聚类模型及其应用	214
5.2.1	基于蚁群墓地构造的聚类模型	214
5.2.2	蚁群聚类模型的并行化及有关说明	218
5.2.3	基于蚁群聚类模型的机构轨迹综合	220
5.3	基于蜂群筑巢的实体结构涌现模型及其应用	225
5.3.1	社会性昆虫群体的筑巢行为	225
5.3.2	基于群集智能的筑巢模型及其实现算法	226
5.3.3	基于筑巢模型的结构涌现仿真分析	228
5.4	基于元胞自动机的实体结构涌现模型及其应用	231
5.4.1	基于元胞自动机的连续结构涌现模型	232
5.4.2	基于元胞自动机的连续结构涌现模型的相关性能分析	239
5.4.3	基于连续结构涌现模型的拓扑优化设计实例	243
5.5	基于社会网络的虚拟结构涌现模型及其应用	246
5.5.1	社会网络结构涌现的有关说明	246
5.5.2	社会网络的结构涌现	247
5.5.3	社会网络中社区结构涌现的实例分析	252
5.6	小结	256
	参考文献	256

第三篇 扩 展 篇

第 6 章 群集智能的新发展——社会情感计算	261
6.1 引言	261
6.2 社会情感优化算法概述	262
6.2.1 社会情感理论	262
6.2.2 标准社会情感优化算法	264
6.3 基于情感强度第三定律的社会情感优化算法	266
6.4 引入情绪调整策略的小世界社会情感优化算法	275
6.4.1 算法思路	275
6.4.2 数值实验仿真	277
6.4.3 人工神经网络的训练	282
6.5 社会情感优化算法的适应值预测策略	287
6.5.1 引言	287
6.5.2 基于适应值的加权平均预测思想	288
6.5.3 基于适应值的加权平均预测公式	289
6.5.4 预测的比例讨论	291
6.6 小结	291
参考文献	292
第 7 章 群集智能与人工神经网络和人工免疫系统的关系	295
7.1 引言	295
7.2 人工神经网络与人工免疫网络概述	296
7.2.1 人工神经网络生物原型与算法	296
7.2.2 人工免疫系统生物原型与算法	298
7.3 群集智能与人工神经网络的相似性	305
7.3.1 系统结构的相似性	306
7.3.2 学习机制的相似性	307
7.3.3 反馈机制的对比分析	308
7.3.4 问题求解的对比分析	309
7.4 群集智能与人工免疫系统的关联性	315
7.4.1 相似性分析	315
7.4.2 差异性分析	319
7.4.3 问题求解的对比分析	322
7.5 小结	331
参考文献	332

第 8 章 人工蜂群算法与人工免疫网络系统的融合	337
8.1 引言	337
8.2 人工蜂群算法概述	338
8.2.1 基本人工蜂群算法	338
8.2.2 人工蜂群算法模型	340
8.3 人工蜂群算法与人工免疫算法的融合机理	341
8.4 混合算法在工程约束优化参数设计中的应用	344
8.4.1 约束优化问题的数学模型	344
8.4.2 仿真实验	345
8.4.3 仿真结果分析	348
8.5 具有多峰特性的多项目调度问题的混合算法求解	350
8.5.1 问题背景	350
8.5.2 MRCMPSP 问题数学模型及其约束简化	351
8.5.3 混合算法对 MRCMPSP 问题的求解	357
8.5.4 数值实例	359
8.6 小结	361
参考文献	361
索引	365
后记	370

第一篇 导 引 篇

第 1 章 绪 论

复杂性科学(complexity science)的兴起已是有目共睹的事实,世界范围内的复杂性研究(complexity study)高潮迭出,确实反映出科学发展的一种趋势。群集智能(swarm intelligence,又称为群体智能或者群智能)表现了一类重要的复杂系统(complex system)特性,正受到越来越多的关注。

作为绪论,本章基于复杂性研究的视角,以复杂系统为背景,从群集智能行为的生物原型描述入手,围绕系统结构、模型与算法、典型应用等方面情况综述了群集智能的研究进展;在对群集智能进行特性分析的基础上,阐述了群集智能对复杂系统研究的意义;最后对本书的主要内容进行了说明,并给出了全书的篇章结构。

本章所述内容构成这本学术著作的导引部分,便于了解全书概貌。

1.1 引 言

复杂性研究是 21 世纪的一门新兴学科,“探索复杂性”正在成为当代科学的革命性前沿^[1~3]。我国学者在复杂性研究方面做出了独特的贡献,特别是钱学森先生总结提炼出来的“开放的复杂巨系统”的概念及处理这类系统的从定性到定量的综合集成方法具有开创意义^[4]。复杂性的表现载体是复杂系统,而复杂系统的典型代表则是生物系统^[5];因此,采用仿生途径研究系统复杂性无疑是一种重要方式和恰当选择,如遗传算法(genetic algorithm, GA)^[6]、人工免疫系统(artificial immune system, AIS)^[7]、元胞自动机(cellular automata, CA)^[8]等方法均可归于仿生途径。戴汝为等学者也提出了复杂性研究要从无生命系统转变到有生命系统,这与国外的研究观点不谋而合^[9,10]。

导致生物系统复杂性的根本原因是其具有高度智能。生物智能的基本特征表现为目的性、综合性和学习扩展性^[11]。

(1) 生物智能的目的性。生物为了更好地适应环境,求得生存或繁衍后代,往往通过各种智能活动来达到一定的目的,如模式识别、声音语言表达、肢体运动等。对于属于高级动物的人类,为了改进生活质量,扩展精神文明空间,也在音乐、绘画、棋牌之类的活动中表现出自己的聪明才智来。

(2) 生物智能的综合性。生物为了觉察和适应周围环境的变化,通过视觉、听觉、嗅觉、味觉和触觉来接收外来的信息,再由神经系统进行处理,然后用肢体动