



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化 两化融合
研究与应用

粒子群算法及其 工业应用

钱 锋 著



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化两化融合研究与应用

粒子群算法及其工业应用

钱 锋 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书阐述了粒子群算法的基本思想及各种改进方法;从峰值形态、高度、位置等几何特征分析了测试函数对单极值、多极值优化问题,欺骗性问题以及高维问题优化性能的影响;对粒子群的搜索模式进行了深入探讨,提出了收敛模式和深度搜索模式,并从两种模式中获得粒子群算法收敛和收敛到全局最优解的一般规律与经验,为粒子群新算法的研究提供改进思路 and 方向;从粒子群的社会性、扰动变异、多种群协同、多算法融合等方面提出了多种改进粒子群优化方法的搜索策略。在理论研究的基础上,本书结合具体工业应用,将改进粒子群算法应用于汽油调合、乙烯装置优化运行、精对苯二甲酸装置优化运行等一类操作优化问题,并在软测量建模与控制、车间作业调度、数据挖掘等方面进行了应用研究。

本书可为化工、石化等相关行业自动化技术的研究和开发提供参考,也可供控制科学与工程等学科高年级本科生或研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

粒子群算法及其工业应用/钱锋著. —北京:科学出版社,2013

(信息化与工业化两化融合研究与应用)

ISBN 978-7-03-034652-0

I. 粒… II. 钱… III. 电子计算机-算法理论-应用-工业技术-研究
IV. TP301.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 118644 号

责任编辑:姚庆爽/责任校对:张怡君

责任印制:张 倩/封面设计:黄华斌

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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 3 月第一次印刷 印张:18 3/4

字数:370 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《信息化与工业化两化融合研究与应用》序

传统的工业化道路,在发展生产力的同时付出了过量消耗资源的代价:产业革命 200 多年以来,占全球人口不到 15% 的英国、德国、美国等 40 多个国家相继完成了工业化,在此进程中消耗了全球已探明能源的 70% 和其他矿产资源的 60%。

发达国家是在完成工业化以后实行信息化的,而我国则是在工业化过程中就出现了信息化问题。回顾我国工业化和信息化的发展历程,从中国共产党的十五大提出“改造和提高传统产业,发展新兴产业和高技术产业,推进国民经济信息化”,到党的十六大提出“以信息化带动工业化,以工业化促进信息化”,再到党的十七大明确提出,“坚持走中国特色新型工业化道路,大力推进信息化与工业化融合”。这充分体现了我国对信息化与工业化关系的认识在不断深化。

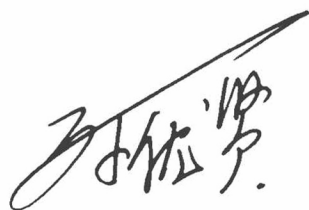
工业信息化是“两化融合”的主要内容,它主要包括生产设备、过程、装置、企业的信息化,产品的信息化和产品设计、制造、管理、销售等过程的信息化,其目的是建立起资源节约型产业技术和生产体系,大幅度降低资源消耗;在保持经济高速增长和社会发展过程中,有效地解决发展与生态环境之间的矛盾,积极发展循环经济,这对我国科学技术的发展提出了十分迫切的战略需求,特别是对控制科学与工程学科提出了十分急需的殷切期望。

“两化融合”将是今后一个历史时期里,实现经济发展方式转变和产业结构优化升级的必由之路,也是中国特色新型工业化道路的一个基本特征。为此,中国自动化学会与科学出版社共同策划出版《信息化与工业化两化融合研究与应用》,旨在展示两化融合领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升控制科学与工程学科的学术水平。丛书内容既可以是新的研究方向,也可以是至今仍然活跃的传统方向;既注意横向的共性技术的应用研究,又注意纵向的行业技术的应用研究;既重视“两化融合”的软件技术,也关注相关的硬件技术;特别强调那些有助于将科学技术转化为生

产力以及对国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大专家、学者的积极参与和大力支持,以及编委的共同努力,本丛书将为繁荣我国“两化融合”的科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

最后,衷心感谢所有关心本丛书并为丛书出版提供帮助的专家,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助,感谢广大读者对本丛书的厚爱。

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Sun Yifang, the Chairman of the Chinese Society of Automatic Control.

中国自动化学会理事长

2010年11月

前 言

随着计算机技术的迅速发展和广泛应用,计算智能成为继人工智能之后的又一个热点研究领域。与基于逻辑推理的人工智能不同,计算智能以数据为基础,偏重于数值计算,并具有分布性、并行性、智能性等特点,这使其在求解复杂问题,特别是一类 NP 难问题时,具有明显的优势。借助于现代计算模拟手段,计算智能无论在科学研究方面,还是服务于生产实践中,都取得了突飞猛进的发展。计算智能已不局限于最初的模糊系统、神经网络和进化计算的研究,与其他学科理论的交叉与融合使计算智能涉及的领域更加广泛。目前,计算智能的研究领域主要包括模糊逻辑、神经网络、遗传算法、进化策略、进化规划、人工免疫系统、人工生命、群体智能、DNA 软计算、模拟退火、禁忌搜索等。

群体智能是计算智能中专注于研究模拟自然界生物群体智能的一类方法,通过对简单生物个体,如飞鸟、蚂蚁、蜜蜂等的行为模拟,来研究群体涌现出的超越个体行为的自组织性和智能性。这些生物个体行为简单,但它们能够在感知环境的过程中,不断利用周围的信息来调整自身的行为,实现对环境较强的适应能力,在没有集中控制和全局模型的情况下,实现对复杂问题的求解。由社会心理学博士 Kennedy 和电子工程学博士 Eberhart 于 1995 年提出的粒子群优化算法是群智能算法中的典型代表之一。粒子群算法受 Reynolds 提出的著名鸟群模型的启发,利用了鸟群行为规则与优化问题求解的相似性,通过对鸟群行为的模拟来实现优化问题的求解。粒子群算法所固有的并行性和分布式处理特征,使其在解决大规模优化问题上显示出强大的优势。粒子群算法可以求解相当广泛的一类优化问题,如连续和组合优化问题、静态和动态优化问题、单目标和复杂的高维多目标优化问题等。粒子群算法在求解与优化命题相关的应用领域里也得到了快速的发展,如机器学习、模式识别、图像处理、自动控制、经济管理、机械工程、电气工程、化工过程等。粒子群算法简单、易用,实现灵活方便,并易与其他方法结合,相互取长补短,粒子群算法对求解问题的模型没有特殊要求,既可以是具有显示数学表达式的函数,也可以是基于数据的智能模型,这些优点正是粒子群算法研究不断取得发展的重要原因。

本书结合作者多年来在粒子群算法的理论和实际应用研究中取得的成果,对粒子群算法的基本理论和改进方法进行了系统、全面的介绍,并结合工业背景和实际应用,给出了粒子群算法在工业操作优化、软测量建模、控制、车间作业调度、数据挖掘等中的应用情况。本书共 10 章。第 1 章绪论,概述了计算智能和群智能算

法的起源、发展,并概述了粒子群算法的理论和应用研究现状。第2~4章是关于粒子群算法的理论方法研究,其中第2章基本粒子群算法,介绍了基本粒子群算法实现以及与算法性能密切相关的结构和参数;第3章测试函数特征与算法搜索模式,从测试函数问题本身的特征出发,来深入理解测试函数特征对优化算法搜索性能产生的影响,分析了基本粒子群算法的行为模式;第4章改进粒子群算法,从粒子群的社会性、扰动变异、多种群协同、多算法融合等方面介绍作者提出的改进粒子群算法。第5~10章是关于粒子群算法在工业过程中的应用研究,其中第5章粒子群算法在汽油调合优化中的应用,介绍了基于粒子群算法的离线和在线汽油调合优化方法;第6章粒子群算法在乙烯装置优化运行中的应用,介绍了基于粒子群算法的乙烯裂解炉深度优化和乙烯装置蒸汽管网用能优化;第7章粒子群算法在精对苯二甲酸装置优化运行中的应用,介绍了基于粒子群算法的PX氧化反应过程操作优化,PX氧化反应尾气冷凝系统用能优化,粗对苯二甲酸加氢精制反应过程操作优化,加氢精制过程结晶器-换热器综合网络用能优化;第8章介绍了粒子群算法在建模和控制中的应用;第9章介绍了粒子群算法在车间作业调度中的应用;第10章介绍了粒子群算法在数据挖掘中的应用。

本书第3~10章的内容都是作者及所指导的博士后、博士研究生、硕士研究生和其科研团队近年来取得的研究成果。在此感谢钟伟民、程辉、王振雷、赵亮、葛宏伟、梁毅、宁国忠、廖振兴、党明梅、刘玲、汤奇峰、庄敏慧、周轩、王辉为本书提供内容,感谢杜文莉和罗娜为本书撰写提出的建议和热心的帮助,特别感谢祁荣宾在本书资料整理和统稿过程中所做的工作。书中部分内容引用了国内外一些专家、学者的研究成果,在此向他们表示诚挚谢意!

由于作者学识有限,书中不妥之处在所难免,诚请广大同行、读者及时给予指正。

作 者

2011年12月于上海

目 录

《信息化与工业化两化融合研究与应用》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 计算智能概述	1
1.3 群智能概述	5
1.3.1 蚁群算法简介	6
1.3.2 人工鱼群算法简介	10
1.3.3 混合蛙跳算法简介	13
1.3.4 粒子群算法简介	14
参考文献	19
第 2 章 基本粒子群算法	28
2.1 引言	28
2.2 基本粒子群算法的原理	29
2.3 基本粒子群算法的模型分析	30
2.4 基本粒子群算法的参数分析	32
2.5 基本粒子群算法的种群拓扑结构	34
2.6 基本粒子群算法的改进研究	36
参考文献	39
第 3 章 测试函数特征与算法搜索模式	43
3.1 引言	43
3.2 测试函数特征与优化性能	43
3.2.1 测试函数的控制域	43
3.2.2 单极值问题优化性能分析	45
3.2.3 多极值问题优化性能分析	46
3.2.4 欺骗性问题优化性能分析	47
3.2.5 高维问题优化性能分析	48
3.2.6 实验仿真	49
3.3 粒子群算法的搜索模式	55
3.3.1 收敛模式	56

3.3.2 深度搜索模式	58
参考文献	65
第4章 改进粒子群算法	66
4.1 社会粒子群算法	66
4.1.1 社会粒子群算法基本思想	66
4.1.2 社会粒子群算法实现步骤	68
4.1.3 社会粒子群算法从众阈值的选取	69
4.1.4 静态函数仿真测试	71
4.1.5 动态函数仿真测试	72
4.2 自适应粒子群算法	74
4.2.1 自适应粒子群算法思想	75
4.2.2 自适应粒子群算法实现步骤	76
4.2.3 自适应粒子群算法实验测试	76
4.3 基于扰动变异的粒子群算法	83
4.3.1 基于高斯白噪声扰动变异的粒子群算法	83
4.3.2 动态双变异粒子群算法	89
4.4 混合粒子群算法	98
4.4.1 混沌粒子群算法	98
4.4.2 协同量子粒子群算法	105
4.4.3 基于量子理论的粒子群算法	121
4.5 相位角粒子群算法	126
4.5.1 相位角粒子群算法的结构	126
4.5.2 相位角粒子群算法实现步骤	127
4.5.3 函数仿真测试	127
4.6 基于载波的粒子群算法	130
4.6.1 基于载波的全局搜索	130
4.6.2 基于载波扩展的局部精确搜索	131
4.6.3 基于载波的粒子群算法实现步骤	133
4.6.4 函数仿真测试	134
参考文献	138
第5章 粒子群算法在汽油调合优化中的应用	142
5.1 汽油调合建模方法	143
5.1.1 辛烷值调合效应模型	143
5.1.2 雷德蒸汽压模型	144
5.2 汽油调合优化方法	145

5.2.1 离线调合优化技术	145
5.2.2 在线调合优化技术	146
5.3 汽油调合优化方法仿真研究与现场应用	150
5.3.1 离线优化技术的仿真学习	150
5.3.2 离线优化技术的现场应用	155
5.3.3 在线优化技术的仿真学习	160
参考文献	163
第 6 章 粒子群算法在乙烯装置优化运行中的应用	164
6.1 乙烯裂解炉裂解深度优化	164
6.1.1 乙烯裂解炉裂解深度优化目标	165
6.1.2 乙烯裂解炉裂解深度优化控制方案	165
6.2 乙烯装置蒸汽管网用能优化	176
6.2.1 乙烯装置蒸汽管网用能优化模型	178
6.2.2 基于协同量子粒子算法的蒸汽管网用能优化	180
参考文献	181
第 7 章 粒子群算法在精对苯二甲酸装置优化运行中的应用	183
7.1 PX 氧化反应过程操作优化	184
7.1.1 PX 氧化反应动力学模型	184
7.1.2 神经网络宏观速率常数模型	185
7.1.3 PX 氧化反应宏观动力学模型	186
7.1.4 乙酸和 PX 的燃烧损失模型	187
7.1.5 PX 氧化反应过程的建模	189
7.1.6 基于 θ -PSO 算法的 PX 氧化反应过程操作优化	189
7.2 PX 氧化反应尾气冷凝系统用能优化	193
7.2.1 PX 氧化反应尾气三级冷凝系统流程模拟	193
7.2.2 PX 氧化反应尾气四级冷凝系统流程模拟	195
7.2.3 基于混沌粒子群算法的 PX 氧化反应尾气冷凝系统用能优化	196
7.3 粗对苯二甲酸加氢精制反应过程操作优化	199
7.3.1 加氢精制反应宏观动力学模型	200
7.3.2 加氢精制反应器模型	201
7.3.3 加氢精制反应过程的建模	202
7.3.4 基于 θ -PSO 算法的加氢精制反应过程的操作优化	202
7.4 加氢精制过程结晶器-换热器综合网络用能优化	207
7.4.1 结晶器-换热器综合网络模型	209
7.4.2 基于改进粒子群算法的结晶器-换热器综合网络用能优化	209

参考文献	211
第 8 章 粒子群算法在建模和控制中的应用	213
8.1 软测量建模	213
8.1.1 软测量技术原理	213
8.1.2 粒子群算法在软测量建模中的应用	215
8.1.3 基于动态双变异粒子群的丙烯精馏塔软测量建模	216
8.1.4 基于自适应粒子群的对羧基苯甲醛软测量建模	221
8.2 超声马达的辨识与控制	223
8.2.1 基于异化粒子群算法的 Elman 网络学习算法	224
8.2.2 基于 DPSO 学习算法的 Elman 网络对超声马达的辨识	226
8.2.3 基于 DPSO 学习算法的 Elman 网络对超声马达的速度控制	230
参考文献	232
第 9 章 粒子群算法在车间调度作业中的应用	234
9.1 车间作业调度	234
9.1.1 Job Shop 调度问题描述	234
9.1.2 JSSP 性能指标的正规性、等价性和活动调度	236
9.2 基于粒子群优化的车间作业调度问题求解	237
9.2.1 粒子群系统中 JSSP 问题的表述	237
9.2.2 初始粒子群生成	238
9.2.3 目标函数和适应度函数	238
9.2.4 冗余性与二级编码	239
9.2.5 粒子群系统的更新方式	240
9.2.6 基于粒子群优化求解 JSSP 问题的流程	241
9.2.7 数值模拟实验及结果	242
9.3 基于粒子群优化与人工免疫系统的混合智能算法求解车间作业调度问题	244
9.3.1 基于人工免疫系统的车间作业调度问题求解	245
9.3.2 基于 PSO 和 AIS 的混合智能算法	248
9.3.3 数值模拟实验及结果	248
参考文献	257
第 10 章 粒子群算法在数据挖掘中的应用	259
10.1 数据挖掘概述	259
10.1.1 数据挖掘的产生及发展	259
10.1.2 数据挖掘的定义与功能	259
10.1.3 粒子群优化算法在数据挖掘中的应用	264

10.2 免疫混合粒子群增量分类算法.....	266
10.2.1 免疫记忆	266
10.2.2 人工免疫分类方法	267
10.2.3 基于免疫记忆的粒子群增量算法	270
10.2.4 仿真分析	271
参考文献.....	275
附录 A 常用的测试函数	279

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

20 世纪 80 年代以来,工业生产过程向着大型化、连续化、综合化的方向发展,形成了复杂的生产过程,各类工程问题的优化计算越来越成为人们急需解决的问题。优化,简单地说即在多种(有限种或无限种)决策中挑选最好决策的问题,它作为一个重要的学科分支一直受到人们的重视^[1~3]。优化广泛应用于工业、农业、国防、工程、交通、金融、化工、能源、通信等许多领域,如在过程操作、系统控制、模式识别、生产调度、VLSI 技术、计算机工程等许多领域中产生了巨大的经济效益和社会效益。工程过程的最优化对提高效率和效益,节省资源具有重要作用。应用实践表明,在同样条件下,经过优化技术的处理,对系统效率的提高、能耗的降低、资源的合理利用及经济效益的提高等均有显著的效果,而且随着处理对象规模的增大,这种效果也更加显著。对国民经济的各个领域,其应用前景都是巨大的。

优化方法的理论研究对改进算法性能、拓宽算法应用领域、完善算法体系同样具有重要作用。目前,基于严格机理模型的开放式方程建模与优化已成为国际上公认的主流技术方向。然而,基于严格机理模型所得到的优化命题往往具有方程数多、变量维数高、非线性强等特点,这使得相关变量的存储、计算及命题的求解都相当困难。不仅工业界存在着复杂的优化问题,在国民经济的各个领域中也存在着相当多的涉及因素多、规模大、难度高和影响广的优化命题,如工业过程中的操作优化、运输中的最优调度、生产流程的最优排产、资源的最优分配、农作物的合理布局、工程的最优设计以及国土的最优开发等,所有这些问题的解决也必须有一个强有力的优化工具来进行求解。常规的优化算法面对这样的大型问题已无能为力,无论是在计算速度、收敛性、初值敏感性等方面都远不能满足要求。而基于计算智能的优化方法易于实现,算法中仅涉及各种基本的数学操作,计算相对简单。另外,其数据处理过程对 CPU 和内存的要求也不高。更为重要的是,计算智能的方法大都具有潜在的并行性和分布式特点,这些特点为处理大量的以数据库形式存在的数据提供了技术保证。

1.2 计算智能概述

进入 90 年代以来,以不确定性、非线性、时间不可逆为内涵,以复杂问题为对

象的科学新范式得到学术界的普遍认同,建立在解析基础上的常规方法对于这种新范式显得无能为力。人们逐渐认识到,必须探索新的方法来解决更加灵活、鲁棒性较强的系统。此时,智能模拟方法开始兴起,并越来越多地得到研究者的重视。其实一些智能模拟方法已有数十年的发展历史,只是当时这些方法并未得到足够的重视。分析其原因,除了这些方法本身不很成熟之外,计算机结构和技术的局限性以及基于符号的传统人工智能所取得的辉煌成就,也使人们很难认识到研究其他智能模拟方法的可能性和必要性。而随着传统人工智能在感知、理解、学习、联想及形象思维等方面遇到的严重困难,以及计算机容量和计算速度的不断提高、大规模并行处理技术的产生和自身理论的逐步成熟,智能模拟方法进入了一个全新的发展时期。由智能模拟方法组成的计算智能技术,更是引起了包括人工智能在内的诸多领域专家学者的关注。计算智能的诞生和发展,为摆脱传统人工智能所面临的困境提供了一种新的方法,已成为该领域的一个新的发展方向。

通常将基于符号处理的传统人工智能称为符号智能,以区别于计算智能。符号智能的特点是以知识为基础,偏重于逻辑推理;而计算智能则是以数据为基础,偏重于数值计算。如果说传统的人工智能是以知识库为基础,以顺序离散符号推理为特征,包括知识表示、推理和利用的知识系统,那么计算智能则是以数学或计算等模型为基础,以分布、并行、仿生计算为特征的信息系统。前者强调规则的形成和表示,而后者强调模型的建立和构成。

1992年,美国学者 Bezdek^[4]在近似推理的国际杂志上首次给出计算智能定义,计算智能依靠生产者提供的数字材料,而不是依赖于知识。1994年IEEE为了促进多学科渗透和结合,把模糊系统、神经网络和进化计算三个年会合并举行,于6月23日~7月3日在美国佛罗里达州的 Orlando 召开了第一届计算智能会议,并首次提出了计算智能学科。也就是在该计算智能大会上,Bezdek^[5]提出将智能分为三个层次:第一层次是生物智能,它是由人脑的物理化学过程反映出来的,人脑由有机物组成,它是智能的物质基础;第二层是人工智能,它是由非生物的、人造的、常用的符号来表示,人工智能的来源是人类知识的精华和传感器数据;第三个层次是计算智能,它是由数学方法和计算机实现的。三者的关系为:生物智能包含人工智能,人工智能又包含计算智能。人工智能是计算智能到生物智能的中间过渡,计算智能则是借助现代计算工具模拟人的智能求解问题或处理信息的理论和方法,它是人工智能的进一步深化和发展^[6]。

计算智能一词的出现至今已近三十年,期间吸引了国内外众多学者的研究^[7],至少创立了十个以计算智能命名的期刊,而出现智能一词的期刊数量更是远胜于此。计算智能的研究范畴已由最初的模糊系统、神经网络和进化计算逐渐被扩展,与其他学科理论的交叉与融合使计算智能涉及的领域更加广泛,一些基于统计和数学的方法,如支持向量机、粗糙集、贝叶斯网络、概率推理,甚至是统计自然语言

处理也被包含进计算智能主题的某些期刊中。而数值优化方法、近似理论、统计方法等更是超出其计算智能研究范畴。相比之下,有关书籍能更加专注于计算智能研究的核心内容, Springer 出版社和 IEEE 计算智能协会已经在计算智能及其相关应用领域方面出版了系列书籍,并有趋势表明计算智能被看做是包含模糊逻辑、人工神经网络、遗传算法、概率置信网络和机器学习等基于数据驱动的方法。目前,人工免疫系统、群智能、混沌系统等也被加入到计算智能的研究范畴。

计算智能是受到大自然智慧和人类智慧的启发,基于不同的观点和视野而设计出一类方法的统称。这些方法或模仿生物界的进化过程,或模仿生物的生理构造和身体机能,或模仿动物的群体行为,或模仿人类的思维、语言和记忆过程的特性,或模仿自然界的物理现象。计算智能方法主要包括模糊逻辑、神经网络、遗传算法、进化策略、进化规划、人工免疫系统、人工生命、群体智能、DNA 软计算、模拟退火、禁忌搜索等。这些方法有着相同的要素,即自适应的结构、随机产生或指定的初始状态、适应度的评价函数、修改结构的操作、系统状态存储、终止计算条件、指示结果的方法、控制过程的参数等。此外,计算智能的方法还具有自学习、自组织、自适应的特征和计算简单、通用、鲁棒性强、适于并行处理的特点。

神经网络诞生于 1943 年,是连接主义的经典代表。1949 年 Hebb 根据神经元连接强度的改变代表生物学习过程的假设而提出了 Hebb 学习规则。虽然从那以后神经网络的研究经历了几起几伏,但最终还是取得了许多丰硕成果,典型的有 1977 年的 Kohonen 无指导自组织竞争网络、1982 年产生的 Hopfield 网络和 1986 年的 BP 网络等。神经网络由于其模型、拓扑关系、学习与训练算法等都建立在对生物神经元系统的研究之上,虽然离人们设想的程度还很远,但它仍是目前模拟人脑模式识别、联想、判断、决策和直觉的理想工具。它具有高度的并行性、非线性全局作用,以及良好的容错性与联想记忆能力,同时它还以强大的学习能力和很好的自适应性在专家系统、知识获取、智能控制、自适应系统中有良好表现。

模糊计算是计算智能的另一个重要方面。美国 Berkeley 大学的自动控制理论专家 Zadeh 教授最先提出模糊理论。1965 年,他在 *Information & Control* 杂志上发表了模糊集合“Fuzzy Set”一文,首次提出了模糊集合的概念,即用模糊集合(fuzzy set)来描述模糊事物的概念,很快为科技工作者所接受。二十多年来,模糊数学及其应用发展十分迅速。模糊计算方法的重要性在于它可以表现事物本身性质的内在不确定性,因此可以模拟人脑认识客观世界的非精确、非线性的信息处理能力。另外,模糊计算可以对人的自然语言进行量化及模糊处理,在社会学方面也颇有成效。

另外,近年来基于自然选择和遗传学的进化计算方法也在计算智能的研究中取得了令人瞩目的成果。进化计算的典型算法就是遗传算法。1975 年,美国密歇根大学的心理学教授、电子工程学与计算机科学教授 Holland 和他的同事及学生

们共同研究了具有开创意义的遗传算法理论和方法。遗传算法是一种借鉴自然界自然选择和进化机制发展起来的高度并行、随机、自适应的搜索算法。简单而言,它使用了群体搜索技术,将种群代表一组问题解,通过对当前种群施加选择、交叉和变异等一系列遗传操作,从而产生新一代的种群,并逐步使种群进化到包含近似最优解的状态。由于其思想简单、易于实现以及表现出来的健壮性,遗传算法在问题求解、优化和搜索、机器学习、智能控制、模式识别和人工生命等应用领域都取得了许多令人鼓舞的成就。

在大自然中存在的确定性现象和随机性现象之间,还有一类可由确定性方程描述的非确定性现象——混沌现象。作为科学术语的“混沌”,指的是貌似随机的事件背后存在着的内在联系。混沌科学着眼于发现隐藏的模式、细微的差别、事物的敏感性,还有不可预测的事物千变万化的“规则”。

生物免疫系统是一个高度进化的生物系统,它旨在区分外部有害抗原和自身组织,从而清除病原并保持有机体的稳定。从计算的角度来看,生物免疫系统是一个高度并行、分布、自适应、自组织的系统,具有很强的学习、识别、记忆、特征提取能力和强大的信息处理能力。人们从生物免疫系统的运行机制中获取灵感,开发面向应用的免疫系统计算模型——人工免疫系统(artificial immune system, AIS),用于解决工程实际问题,目前, AIS 已发展成为计算智能研究的一个崭新的分支。

群体智能作为一种新兴的演化计算技术已成为越来越多研究者关注的焦点。群体智能这个概念是源于对那些群居生物群体行为观察和研究而得到的。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”。群体智能指的是“简单智能的主体通过合作表现出复杂智能行为的特性”。Bonabeau 等将任何启发于群居性生物群体的集体行为而设计的算法和分布式问题解决装置都称为群体智能。目前,群智能研究领域的主要代表成果是蚁群算法和粒子群优化算法。前者是对蚂蚁群体食物采集过程的模拟,其已成功应用于许多离散优化问题;后者也是起源于对简单社会系统的模拟,最初是模拟鸟群觅食的过程,后被发现是一种很好的优化工具。

计算智能的各领域之间不是相互独立的,而是有着深刻的内在联系。与传统的符号主义不同,计算智能的各领域用不同方式实现了连接主义的计算,即研究简单个体如何在简单交互规则指导下,构成具有复杂智能行为的高层系统。由此带来各种算法的统一特点,如社会性、并行性、单元的智能性、开放性等。另外,计算智能是多个简单个体通过生态行为,或者说是社会行为,自组织的形成智能的过程。系统是由异构的、分布的、动态的、大规模的、自主的成分构成的计算系统,一个复杂的计算任务由大量的计算单元非同时的计算行为完成;执行这些任务的单元的全部特性对其他单元甚至系统本身也是未知的;大量的单元的行为决定是基

于它们对系统的不完全知识和延迟的甚至是矛盾的信息作出的。

从以上分析可以知道,计算智能理论的共同特点:它们都是受人类智慧和大自然智慧的启发而产生,都已经或正在理论和实践应用中不断完善,取得了许多实际成果。另外,它们各有特点,模糊系统善于描述和利用经验知识;神经网络善于直接从数据中进行学习;而进化计算、群智能善于求解复杂的全局最优问题,具有极强的稳健性和整体优化性。模糊系统的推理能力强于神经网络和进化计算,而神经网络、进化计算、群智能的学习、搜索能力强于模糊系统。进化计算、群智能优化搜索的广度和适应性优于神经网络,而神经网络的优化、学习精度优于进化计算。免疫系统有很多有趣的特征,如学习、适应、进化、自组织能力等,这些特点在工程应用中有着很大的启发作用。虽然各有特点,但它们共同的仿生基础决定了它们存在必然的联系。尤其是这些技术的结合所产生的强大生命力更是吸引了越来越多的研究者和探索者。近年来,计算智能方法呈互相融合的趋势,它们之间的相互补充可增强彼此的能力,从而获得更有力的表示和解决实际问题的能力。

1.3 群智能概述

近年来,在计算智能领域里,有一类主要针对模拟自然界生物群体智能行为的群智能算法备受国内外学者关注。创立于20世纪60年代的仿生学,为模仿生物特性和功能,发展和创立了很多理论和实用工具,在这样的背景下,一些学者开始关注社会性动物的自组织行为,研究发现,行为非常简单、能力非常有限、几乎没有意识和智能的个体,当它们一起协同工作的时候,却能够“涌现”出非常复杂的行为特征,并且这种行为特征并非是一种简单的个体行为能力的叠加。人们从这些现象得到启发,通过研究群体生活的昆虫等动物的社会行为,提出了模拟生物系统中群体生活习性的群智能算法。在群智能算法中,每个个体不具有或仅具有简单的智能,在没有集中控制和全局模型的前提下,个体之间能够通过局部信息交互,表现出群体智慧,实现复杂分布式问题的求解。

术语“群体智能”最早出现在1989年,由Beni等^[8,9]在研究元胞机器人系统中提出。典型的群体智能由一群有局部影响的简单Agent和它们所处的环境构成。尽管群体智能系统中没有集中的控制结构来指导这些Agent的行为,但是它们之间的局部影响往往能产生全局的涌现行为。1999年,Bonabeau、Dorigo和Theraulaz在*Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*^[10]中对群智能进行了详细的论述和分析,给出了群智能的一种不严格的定义:任何一种由昆虫群体或其他动物社会行为机制而激发设计出的算法或分布式解决问题的策略均属于群智能。在群智能中“群(swarm)”可以被看做是一些相互之间会有影响和作用的相邻个体的集合,如生物群落中的蚁群、鸟群、鱼群、蜂群等。这些群体中的个