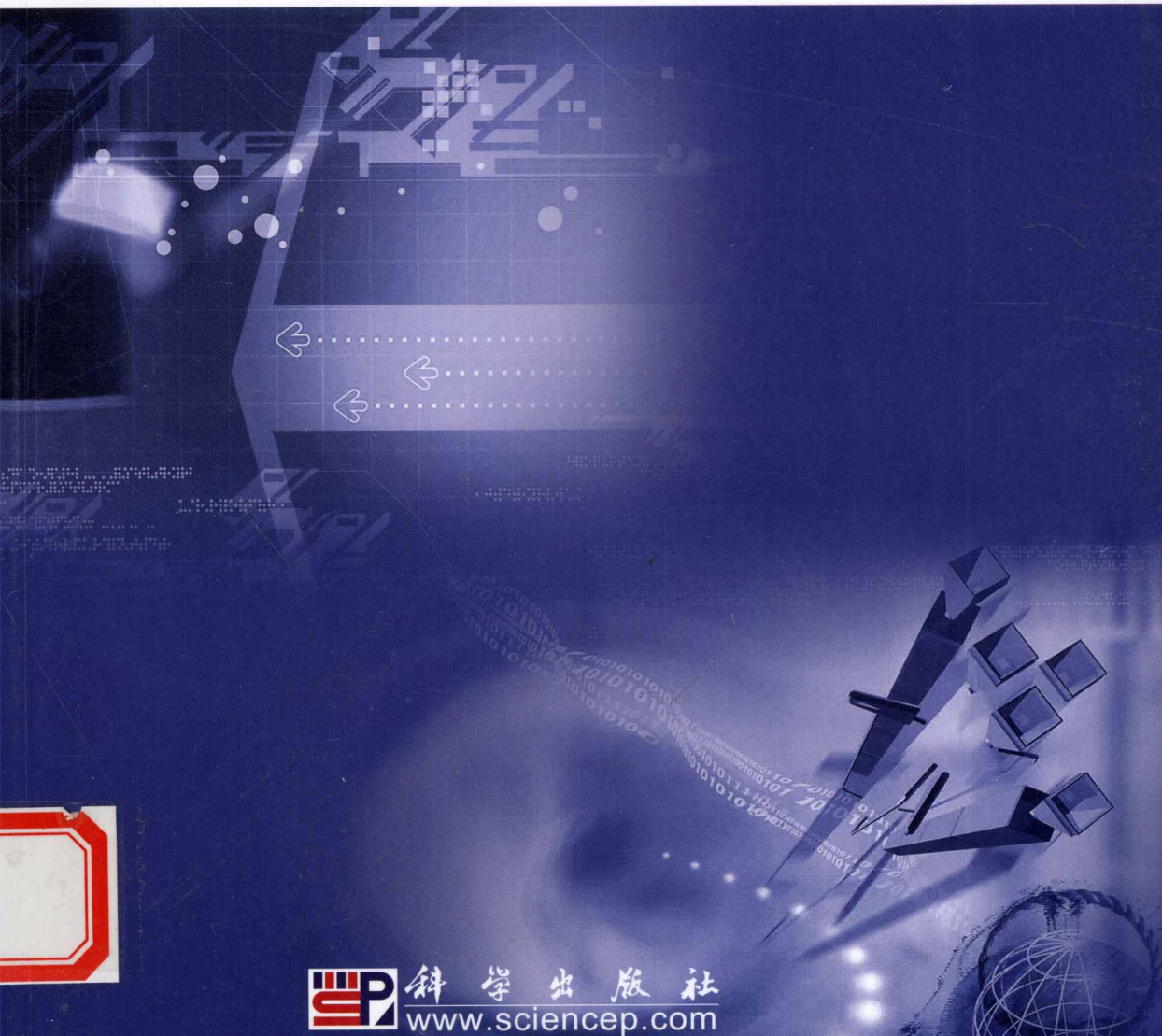




智能科学技术著作丛书

多目标优化免疫算法、 理论和应用

焦李成 尚荣华 马文萍 著
公茂果 李阳阳 刘 芳



科学出版社

www.sciencep.com

智能科学技术著作丛书

多目标优化免疫算法、理论和应用

焦李成 尚荣华 马文萍 公茂果 李阳阳 刘 芳 著

科学出版社

北 京

TP183

J667-3

内 容 简 介

本书在全面总结国内外多目标优化及人工免疫系统发展现状的基础上,着重介绍作者在基于人工免疫系统的多目标优化这一领域的研究成果,主要包括:免疫克隆选择多目标优化算法及其在多目标 0/1 背包问题、约束优化问题、动态多目标优化问题及多目标聚类中的应用,用于求解约束多目标优化的免疫记忆克隆算法,求解多目标优化的非支配近邻免疫算法,求解偏好多目标优化的偏好等级免疫记忆克隆选择算法,基于多智能体的多目标社会协同进化算法,量子免疫克隆多目标优化算法,并针对不同问题提出了多种新的算法和实现策略。

本书可为计算机科学、信息科学、人工智能、自动化技术等领域从事人工免疫系统或多目标优化研究的相关专业技术人员提供参考,也可作为相关专业研究生和高年级本科生教材。

图书在版编目(CIP)数据

多目标优化免疫算法、理论和应用 / 焦李成等著. —北京:科学出版社,2010

(智能科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-026356-8

I. 多… II. 焦… III. 人工智能-算法理论 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 003474 号

责任编辑:耿建业 汤 枫 / 责任校对:朱光光

责任印制:赵 博 / 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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 1 月第一次印刷 印张: 20 1/4

印数: 1—3 000 字数: 384 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《智能科学技术著作丛书》序

“智能”是“信息”的精彩结晶,“智能科学技术”是“信息科学技术”的辉煌篇章,“智能化”是“信息化”发展的新动向、新阶段。

“智能科学技术”(intelligence science& technology, IST)是关于“广义智能”的理论方法和应用技术的综合性科学技术领域,其研究对象包括:

- “自然智能”(natural intelligence, NI),包括:“人的智能”(human intelligence, HI)及其他“生物智能”(biological intelligence, BI)。

- “人工智能”(artificial intelligence, AI),包括:“机器智能”(machine intelligence, MI)与“智能机器”(intelligent machine, IM)。

- “集成智能”(integrated intelligence, II),即:“人的智能”与“机器智能”人机互补的集成智能。

- “协同智能”(cooperative intelligence, CI),指:“个体智能”相互协调共生的群体协同智能。

- “分布智能”(distributed intelligence, DI),如:广域信息网,分散大系统的分布式智能。

1956年,“人工智能”学科诞生,50年来,在起伏、曲折的科学征途上不断前进、发展,从狭义人工智能走向广义人工智能,从个体人工智能到群体人工智能,从集中式人工智能到分布式人工智能,在理论方法研究和应用技术开发方面都取得了重大进展。如果说,当年“人工智能”学科的诞生是生物科学技术与信息科学技术、系统科学技术的一次成功的结合,那么,可以认为,现在“智能科学技术”领域的兴起是在信息化、网络化时代又一次新的多学科交融。

1981年,“中国人工智能学会”(Chinese Association for Artificial Intelligence, CAAI)正式成立,25年来,从艰苦创业到成长壮大,从学习跟踪到自主研发,团结我国广大学者,在“人工智能”的研究开发及应用方面取得了显著的进展,促进了“智能科学技术”的发展。在华夏文化与东方哲学影响下,我国智能科学技术的研究、开发及应用,在学术思想与科学方法上,具有综合性、整体性、协调性的特色,在理论方法研究与应用技术开发方面,取得了具有创新性、开拓性的成果。“智能化”已成为当前新技术、新产品的发展方向和显著标志。

为了适时总结、交流、宣传我国学者在“智能科学技术”领域的研究开发及应用成果,中国人工智能学会与科学出版社合作编辑出版《智能科学技术著作丛书》。需要强调的是,这套丛书将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大智能科学技术工作者的积极参与和大力支持,以及编委们的共同努力,《智能科学技术著作丛书》将为繁荣我国智能科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

祝《智能科学技术著作丛书》出版,特赋贺诗一首:

**智能科技领域广
人机集成智能强
群体智能协同好
智能创新更辉煌**

涂序彦

中国人工智能学会荣誉理事长

2005年12月18日

前 言

最优化问题是工程实践和科学研究中主要的问题之一,其中,仅有一个目标函数的最优化问题被称为单目标优化问题,目标函数超过一个并且需要同时处理的最优化问题被称为多目标优化问题(multi-objective optimization problems, MOP)。多目标优化问题起源于许多实际复杂系统的设计、建模和规划问题,这些系统所在的领域包括工业制造、城市运输、资本预算、能量分配、城市布局等,很多重要的现实生活中的决策问题都存在多目标优化问题。对于多目标优化问题,一个解可能对于某个目标来说是较好的,而对于其他目标则可能是较差的,因此,存在一个折中解的集合,被称为 Pareto 最优解集(Pareto-optimal set)或非支配解集(nondominated set)。起初,多目标优化问题往往通过加权等方式转化为单目标问题,然后用数学规划的方法来求解,每次只能得到一种权值情况下的最优解。同时,由于多目标优化问题的目标函数和约束函数可能是非线性、不可微或不连续的,传统的数学规划方法往往效率较低,且它们对于权重值或目标给定的次序较敏感。

20 世纪 80 年代中期,进化算法作为一类启发式搜索算法,已被成功应用于多目标优化领域,发展成为一个相对较热的研究方向——进化多目标优化(evolutionary multi-objective optimization, EMO)。进化计算的权威期刊 *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 从 1997 年创刊至 2007 年底发表的文章中,被 SCI 引用次数最多的两篇文章均是关于 EMO 的研究成果。2001 年至今,进化多目标优化的专题国际会议 EMO 每两年举办一次,成为进化计算领域的主流会议之一。2007 年 9 月在新加坡召开的进化计算领域的年度盛会 IEEE CEC 上,关于 EMO 的分会最多,达到了四个。这些现象表明,EMO 已经成为进化计算领域的主流研究方向之一,并且进入了快速发展阶段。

人工免疫系统(artificial immune systems, AIS)是人工智能领域的最新研究成果之一。早在 20 世纪 80 年代中期,Farmer 等率先基于免疫网络学给出了免疫系统的动态模型,并探讨了免疫系统与其他人工智能方法的联系,开始了人工免疫系统的研究。但是,这以后的研究成果比较少见。直到 1996 年 12 月,在日本举行了基于免疫系统的国际专题讨论会,首次提出了“人工免疫系统”的概念。随后,人工免疫系统的相关研究迅速展开,有关论文和研究成果逐年增加。1997 年和 1998 年 IEEE Systems, Man and Cybernetics 国际会议还组织了相关专题讨论,并成立了“人工免疫系统及其应用分会”。随后,一些人工智能领域著名的国际会议,如

International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)、International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)、IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)和 Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO) 等也相继开辟了人工免疫系统专题。从 2002 年开始,在英国、意大利、加拿大、葡萄牙、巴西、泰国等连续召开了八届人工免疫系统国际会议,即 ICARIS02~09。

人工免疫系统结合了分类器、神经网络和机器推理等系统的一些优点,是模仿自然免疫系统功能的一种智能方法,它实现一种受生物免疫系统启发,通过学习外界物质的自然防御机理的学习技术,提供噪声忍耐、无教师学习、自组织、记忆等进化学习机理,因此具有提供新颖解决问题方法的潜力。其研究成果涉及控制、数据处理、优化学习和故障诊断等许多领域,已经成为继神经网络、模糊逻辑和进化计算后人工智能的又一研究热点。与进化算法相比,人工免疫系统算法已经表现出很多优异的特性,如在提高收敛速度的同时,较好地保持了种群的多样性,从而能够比较有效地克服诸如早熟收敛、骗等进化计算本身难以解决的问题。

从 1996 年开始,在国家 973 计划项目(2006CB705707)、国家 863 计划项目(863-306-ZT06-1、863-317-03-99、2002AA135080、2006AA01Z10、2006AA01Z107、2008AA01Z125 和 2009AA12Z210)、国家自然科学基金重点项目(60133010、60703107、60703108、60872548 和 60803098)及面上项目(60073053、60372045 和 60575037)、国家部委科技项目资助项目(XADZ2008159 和 51307040103)、陕西省自然科学基金(2007F32 和 2009JQ8015)、国家教育部博士点基金(20070701022 和 200807010003)、中国博士后科学基金特别资助项目(200801426)、中国博士后科学基金资助项目(20080431228 和 20090451369)、教育部重点科研项目(02073)及教育部长江学者和创新团队支持计划(IRT0645)的资助下,作者所在团队对进化计算理论、算法及应用进行了较为系统的研究,尤其对免疫进化计算、克隆选择、量子进化计算、人工免疫系统、多目标优化等进行了较为深入的探讨。

本书在全面总结目前国内外多目标优化及人工免疫系统发展现状的基础上,着重介绍作者在基于人工免疫系统的多目标优化这一领域的研究成果,主要包括:免疫克隆选择多目标优化算法及其在多目标 0/1 背包问题、约束优化问题、动态多目标优化问题及多目标聚类中的应用,用于求解约束多目标优化的免疫记忆克隆算法,求解多目标优化的非支配近邻免疫算法,求解偏好多目标优化的偏好等级免疫记忆克隆选择算法,基于多智能体的多目标社会协同进化算法,量子免疫克隆多目标优化算法,并针对不同问题提出了多种新的算法和实现策略。本书可为计算机科学、信息科学、人工智能、自动化技术领域从事人工免疫系统及多目标优化研究的相关专业技术人员提供參考,希望起到抛砖引玉的作用。

本书是西安电子科技大学智能信息处理研究所和智能感知与图像理解教育部

重点实验室近 10 年来集体智慧的结晶。特别感谢保铮院士多年来的悉心培养和指导,感谢中国科技大学陈国良院士和 IEEE 计算智能学会副主席、英国 Birmingham 大学的姚新教授,IEEE Fellow、美国 Florida 大学的李荐兼职教授,*IEEE Transaction Knowledge and Data Engineering* 主编、美国 Vermont 大学的吴信东教授,澳大利亚 Queensland 大学的李雪博士的指导和帮助;感谢国家自然科学基金委信息科学部的大力支持;感谢田捷教授、高新波教授、石光明教授、梁继民教授的帮助;感谢潘晓英、杨咚咚、刘若辰等智能感知与图像理解教育部重点实验室全体成员所付出的辛勤劳动。

感谢作者家人的大力支持和理解。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2009 年 5 月

目 录

《智能科学技术著作丛书》序

前言

第 1 章 多目标优化研究进展	1
1.1 多目标优化问题	1
1.2 多目标优化问题的数学模型	3
1.3 多目标优化算法	4
1.3.1 古典的多目标优化方法	4
1.3.2 基于进化算法的多目标优化方法	5
1.3.3 基于粒子群的多目标优化方法	10
1.3.4 基于协同进化的多目标优化方法	11
1.3.5 基于人工免疫系统的多目标优化方法	12
1.3.6 基于分布估计的多目标优化方法	16
1.4 多目标优化的研究趋势	16
1.4.1 新型占优机制研究	17
1.4.2 高维多目标优化的研究	17
1.4.3 动态多目标优化的研究	19
1.4.4 多目标优化测试问题研究	19
1.5 多目标优化算法的设计目标	20
参考文献	21
第 2 章 人工免疫系统基础	28
2.1 进化计算的基础	28
2.1.1 进化计算的生物学基础	28
2.1.2 进化算法的一般框架及特点	29
2.1.3 进化算法的主要分支	30
2.1.4 进化算法研究进展	32
2.2 生物免疫系统	34
2.2.1 生物免疫学和免疫的基本概念	34
2.2.2 免疫分类	35
2.2.3 免疫系统及其功能	36
2.3 生物免疫系统的两个重要学说	40

2.3.1 克隆选择学说	40
2.3.2 免疫网络学说	42
2.4 人工免疫系统	43
2.4.1 人工免疫系统研究历史和现状	43
2.4.2 人工免疫系统模型	44
2.4.3 人工免疫系统算法	45
参考文献	48
第3章 多目标优化算法的收敛性及性能度量	53
3.1 多目标优化算法的收敛性	53
3.1.1 概述	53
3.1.2 全局收敛性的特征	54
3.1.3 Pareto-最优解集的特征	54
3.1.4 多目标优化算法的收敛性	56
3.2 多目标优化算法的性能度量	57
3.2.1 概述	57
3.2.2 常见的性能度量方法	58
3.2.3 改进的性能度量方法	60
3.3 本章小结	64
参考文献	64
第4章 免疫克隆选择多目标优化算法	67
4.1 引言	67
4.2 算法设计与实现	68
4.2.1 算法流程图	69
4.2.2 初始化	69
4.2.3 免疫克隆操作	69
4.2.4 免疫基因操作	71
4.2.5 克隆选择操作	72
4.2.6 抗体群更新操作	73
4.2.7 NICA 用于求解多目标优化问题	74
4.3 算法的复杂度分析	75
4.4 算法的性能度量指标	76
4.5 仿真结果及其分析	76
4.5.1 测试问题	76
4.5.2 算法的参数选择和分析	79
4.5.3 仿真结果分析	81

4.6 本章小结	109
参考文献	110
第5章 免疫克隆多目标优化算法求解约束优化问题	113
5.1 引言	113
5.2 问题定义	113
5.3 约束处理技术	114
5.3.1 已有的约束处理技术	114
5.3.2 本章使用的约束处理方法	115
5.4 算法设计与实现	116
5.4.1 免疫和克隆选择	116
5.4.2 克隆操作	116
5.4.3 免疫基因操作	117
5.4.4 求解约束优化问题的免疫克隆多目标优化算法	120
5.5 算法的收敛性分析	121
5.6 算法的复杂度分析	123
5.7 实验结果与分析	124
5.7.1 测试问题	124
5.7.2 测试结果及性能分析	128
5.8 本章小结	131
参考文献	131
第6章 免疫记忆克隆算法用于求解约束多目标优化问题	133
6.1 引言	133
6.2 约束多目标优化问题的数学模型	134
6.3 用于约束多目标优化的免疫记忆克隆算法	134
6.3.1 约束条件的处理方法	134
6.3.2 免疫记忆克隆	135
6.3.3 免疫克隆重组操作	136
6.3.4 免疫克隆变异操作	136
6.3.5 免疫记忆克隆约束多目标优化	136
6.4 算法的特点分析	138
6.5 算法的复杂度分析	139
6.6 性能度量指标	140
6.7 实验结果与分析	140
6.7.1 测试问题	140
6.7.2 算法的参数选择和分析	141

6.7.3 测试结果及性能分析	142
6.8 本章小结	146
参考文献	147
第7章 免疫克隆算法求解动态多目标优化问题	149
7.1 引言	149
7.2 动态多目标优化问题	150
7.3 算法设计与实现	151
7.3.1 免疫克隆选择算子	151
7.3.2 非一致性变异算子	152
7.3.3 抗体群更新算子	152
7.3.4 动态多目标免疫克隆优化算法	153
7.4 算法的性能分析	154
7.5 算法的复杂度分析	155
7.6 实验结果与分析	155
7.6.1 收敛测度	155
7.6.2 测试问题	156
7.6.3 测试结果及性能分析	158
7.7 本章小结	165
参考文献	166
第8章 基于免疫优势克隆选择的多目标组合优化	167
8.1 引言	167
8.2 典型多目标优化问题的数学模型	168
8.3 用于多目标组合优化问题的免疫优势克隆选择算法	169
8.3.1 基本定义	169
8.3.2 免疫优势获得操作	171
8.3.3 免疫优势克隆操作	171
8.3.4 免疫优势选择操作	172
8.3.5 免疫优势克隆选择算法	173
8.4 算法机理分析	174
8.4.1 算法的机理	174
8.4.2 算法的复杂度分析	175
8.5 性能评价指标	176
8.6 IDCMA 求解背包问题	177
8.6.1 多目标 0/1 背包问题的数学模型	177
8.6.2 约束处理	178

8.6.3 算法设计	178
8.7 实验结果与分析	179
8.7.1 测试问题	179
8.7.2 算法的参数选择	179
8.7.3 实验结果分析	180
8.8 本章小结	184
参考文献	184
第9章 基于免疫克隆优化的多目标聚类	186
9.1 引言	186
9.2 多目标聚类算法分析	187
9.3 基于免疫克隆优化的多目标聚类算法	188
9.3.1 概念与定义	188
9.3.2 个体基因表示及操作算子	190
9.3.3 目标函数	192
9.3.4 算法描述	193
9.4 聚类数的自动确定	194
9.4.1 控制数据	194
9.4.2 Pareto 最优面及控制面的集合	195
9.5 实验测试结果	196
9.5.1 对比算法描述	196
9.5.2 实验参数设置	196
9.5.3 聚类性能评价函数	197
9.5.4 算法聚类性能	197
9.6 本章小结	201
参考文献	201
第10章 求解多目标优化的非支配近邻免疫算法	203
10.1 非支配近邻免疫算法	203
10.1.1 基本概念	203
10.1.2 算法描述与分析	204
10.2 实验分析	207
10.2.1 实验设置	207
10.2.2 NNIA 与 PESA-II、SPEA2、NSGA-II 和 MISA 的比较	212
10.2.3 重组对 NNIA 性能的影响	220
10.2.4 可扩展性研究	221
10.3 本章小结	223

参考文献	225
第 11 章 求解偏好多目标优化的偏好等级免疫记忆克隆选择算法	226
11.1 引言	226
11.2 问题与定义	227
11.2.1 偏好多目标优化问题定义	227
11.2.2 偏好关系模型	228
11.3 偏好等级免疫记忆克隆选择算法	229
11.3.1 偏好多目标优化	229
11.3.2 偏好等级的定义	230
11.3.3 偏好等级免疫记忆克隆选择算法	231
11.4 实验仿真	236
11.4.1 度量标准	236
11.4.2 测试函数	237
11.4.3 实验设置	238
11.4.4 实验测试结果与分析	239
11.4.5 PISA 用于解决高维多目标问题	244
11.4.6 重组算子对 PISA 的影响	247
11.4.7 对比运行时间分析	248
11.5 本章小结	249
参考文献	249
第 12 章 多目标优化问题的多智能体社会进化算法	252
12.1 引言	252
12.2 多目标优化问题的多智能体社会进化算法	252
12.2.1 social multi-Agent 系统	252
12.2.2 Agent 生存环境	253
12.2.3 Agent 定义	253
12.2.4 局部感知环境定义	254
12.2.5 Agent 行为设计	255
12.2.6 算法描述	257
12.2.7 算法复杂度分析	258
12.3 实验结果及其分析	258
12.3.1 性能评价方法	258
12.3.2 多目标函数优化问题测试	259
12.3.3 局部环境建立方式分析	264

12.4 本章小结	266
参考文献	266
第13章 量子免疫克隆多目标优化算法	268
13.1 量子计算原理	268
13.1.1 状态的叠加	269
13.1.2 状态的相干	269
13.1.3 状态的纠缠	270
13.1.4 量子并行性	270
13.2 量子计算智能的几种模型	270
13.2.1 量子人工神经网络	270
13.2.2 基于量子染色体的进化算法	271
13.2.3 基于量子特性的优化算法	272
13.2.4 量子聚类算法	272
13.2.5 量子模式识别算法	273
13.2.6 量子小波与小波包算法	273
13.2.7 量子退火算法	273
13.2.8 其他算法	274
13.3 量子进化算法	274
13.3.1 量子进化算法的提出	274
13.3.2 量子进化算法中用到的一些基本概念	275
13.3.3 量子进化算法	276
13.3.4 量子进化算法的结构框架	279
13.3.5 量子进化算法的收敛性	282
13.4 量子克隆进化算法	284
13.4.1 量子克隆遗传算法	285
13.4.2 量子克隆进化规划	285
13.4.3 量子克隆进化策略	286
13.4.4 量子克隆进化算法的收敛性	286
13.5 量子免疫克隆多目标优化算法	288
13.5.1 问题描述	288
13.5.2 量子免疫克隆算子设计	289
13.5.3 算法描述	290
13.6 算法分析	291

13.6.1 算法的特点分析	291
13.6.2 算法的复杂度分析	292
13.7 仿真实验比较研究	293
13.8 本章小结	302
参考文献	302

第1章 多目标优化研究进展

1.1 多目标优化问题

多目标优化问题起源于许多实际复杂系统的设计、建模和规划问题,这些系统所在的领域包括工业制造、城市运输、资本预算、能量分配、城市布局等,几乎每个重要的现实生活中的决策问题都存在多目标优化问题^[1]。

多目标优化问题的最早出现应追溯到 1772 年,当时 Franklin 就提出了多目标矛盾如何协调的问题^[2]。但国际上一般认为多目标优化问题最早是由法国经济学家 Pareto 在 1896 年提出的^[3]。当时他从政治经济学的角度,把很多不好比较的目标归纳成多目标优化问题。1944 年, von Neumann 和 Morgenstern 又从博弈论的角度,提出了多个决策者彼此间相互矛盾的多目标决策问题^[4]。1951 年, Koopmans 从生产与分配的活动分析中提出了多目标优化问题,且第一次提出了 Pareto-最优解的概念^[5]。同年, Kuhn 和 Tucker 从数学规划的角度,给出了向量极值问题的 Pareto-最优解的概念,并研究了这种解的充分与必要条件^[6]。1953 年, Arron 等对凸集提出了有效点的概念,从此多目标优化问题逐渐受到人们的关注。1968 年, Johnsen 系统地提出了关于多目标决策模型的研究报告,这是多目标优化这门学科开始大发展的一个转折点。

多目标优化问题从 Pareto 正式提出到 Johnsen 的系统总结,先后经过了六七十年的时间。但是多目标优化问题的真正兴旺发达时期,并且正式作为一个数学分支进行系统的研究,则是 20 世纪 70 年代以后的事情了。具有代表性的有 1975 年 Zeleny 出版了一本关于多目标最优化问题的论文集。到现在为止,多目标优化不仅在理论上取得很多重要成果,而且在应用领域上也越来越显示出其强大的生命力。

20 世纪 80 年代中期,进化算法作为求解多目标优化问题的新方法受到了广泛关注。近年来,涌现出很多种进化多目标优化算法,其中一些已成功应用到工程实践,从而形成最新的一个热门研究和应用领域^[7,8]。1967 年, Rosenberg^[9] 就建议采用基于进化的搜索来处理多目标优化问题,但他没有具体实现。1975 年, Holland^[10] 提出了遗传算法。1985 年, Schaffer^[11] 提出了矢量评价遗传算法,第一次实现了遗传算法与多目标优化问题的结合。1989 年, Goldberg 在其著作 *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*^[12] 中,提出了将