

应用数学译丛

Genetic Algorithms
and Engineering Optimization

遗传算法与工程优化

玄光男 程润伟 著
于歆杰 周根贵 译

www.tup.tsinghua.edu.cn

应用数学译丛

Genetic Algorithms
and Engineering Optimization

遗传算法与工程优化

玄光男 程润伟 著
于歆杰 周根贵 译

www.tup.tsinghua.edu.cn

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书总结了遗传算法在工业工程相关领域应用的前沿进展。全书共分9章:遗传算法基础、组合优化问题、多目标优化问题、模糊优化问题、可靠性设计问题、调度问题、高级运输问题、网络设计与路径问题和制造元设计问题。内容既涵盖了遗传算法在传统优化问题中的新进展,又涉及了目前在供应链和物流研究中相当热门的话题。本书论述严谨、深入浅出,并有大量图形和表格,便于读者深入理解其内容。

本书可供高等院校或科研机构相关专业的高年级本科生、研究生、教师和研究人員参考。

Mitsuo Gen, Runwei Cheng

Genetic Algorithms and Engineering Optimization

EISBN: 0-471-31531-1

Copyright©2000 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

Simplified Chinese translation edition is published and distributed exclusively by Tsinghua University Press under the authorization by John Wiley & Sons, Inc., within the territory of the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan).

本书中文简体字翻译版由约翰威立出版公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2002-2025

图书在版编目(CIP)数据

遗传算法与工程优化/玄光男,程润伟著;于歆杰,周根贵译. —北京:清华大学出版社,2003

(应用数学译丛)

书名原文: Genetic Algorithms and Engineering Optimization

ISBN 7-302-07482-8

I. 遗… II. ①玄… ②程… ③于… ④周… III. 遗传—算法—应用—工业工程—最优化 IV. F4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 096104 号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 客户服务: 010-62776969

责任编辑: 刘 颖

印 刷 者: 北京四季青印刷厂

装 订 者: 北京市密云县京文制本装订厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印张: 25.75 字数: 524 千字

版 次: 2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-07482-8/O · 328

印 数: 1~5000

定 价: 39.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: (010)62770175-3103 或 (010)62795704。

献给我们的父亲、母亲和家庭

译者的话

自 20 世纪 80 年代以来,遗传算法逐渐受到不同领域研究人员的重视,每年都有相当数量的高水平学术论文发表。玄光男教授和程润伟教授编著的《遗传算法与工程优化》及时总结了遗传算法在工业工程相关领域应用的前沿进展。作者选择了遗传算法基础、组合优化问题、多目标优化问题、模糊优化问题、可靠性设计问题、调度问题、高级运输问题、网络设计与路径问题以及制造元设计问题作为论述内容,既涵盖了遗传算法在传统优化问题中的新进展,又涉及了目前在供应链和物流研究中相当热门的话题。该书无论在国际上还是在国内都具有较大影响,将其翻译出版有利于遗传算法的进一步普及和应用。

2000 年,科学出版社翻译出版了本书的前一版:玄光男教授和程润伟教授编著的《遗传算法与工程设计》。该书讨论了约束优化问题、机器调度、设备布局问题等内容,可以与本书相互参考。

在翻译过程中,译者在征得原著者同意的基础上对原书中的错漏之处做了必要的修改。另外,为了帮助读者理解算法的关键点,译者在认为必要的地方加了译者注。

中译本的索引条目根据英文版索引条目翻译而来,其页码与中译本中的位置相应。在正文中,所有索引条目都用楷体表示,以便于读者查找。

翻译分工为:于歆杰博士负责第 1 章~第 6 章的翻译,周根贵教授负责第 7 章~第 9 章和序言部分的翻译,两位译者共同完成了索引部分的翻译。本书的翻译工作得到了清华大学基础研究基金(No. JC2001019)、国家自然科学基金(No. 60074035)和浙江省自然科学基金(No. 600042)的资助,在此表示谢意。

本书的翻译出版得到了清华大学数学科学系刘宝碇教授的积极支持和热情鼓励,在此深表谢意。原著者玄光男教授和程润伟教授在百忙之中悉心回答译者的问题,为中译本增色不少。最后译者还要向我们的家人对翻译工作的理解和支持表示衷心感谢。

由于我们水平有限,对原著的理解难免存在不够准确之处,译文中一定存在不少缺点和错误,热诚欢迎读者批评指正。来信请寄:“北京市清华大学电机系 于歆杰收(100084)”。

于歆杰、周根贵
2003 年 5 月 18 日

序 言

过去 10 年来,如何运用遗传算法解决工业工程中的各类问题已成为管理科学、运筹学、工业与系统工程领域许多研究和工程实践人员的研究课题,其原因在于遗传算法是一种强有力的、应用范围十分广泛的随机搜索优化技术,它对许多传统方法难以解决的问题是非常有效的。在大多数工程优化问题中,常常都带有复杂的约束条件,简单的遗传算法往往不能很好地解决这类工程优化问题。因此,如何结合问题的特性就成为面向工业工程遗传算法的研究焦点。本书旨在论述遗传算法在工业工程优化问题中应用的主要研究课题。

自 1993 年以来,我们在面向工业工程遗传算法方面做了大量的研究工作,在我们研究小组,6 位博士研究生运用遗传算法研究了作业调度问题、生成树问题、运输问题、可靠性优化问题、选址与再选址问题以及生产计划等问题,他们中有的受邀在 1997 年美国波多黎哥举办的 21 届《计算机与工业工程》国际会议上作了“遗传算法及其应用”的演讲,有的受邀在 1997 年中国北京举办的《管理科学与工业工程》研讨会上作了“工程设计中的遗传算法”的专题报告,有的受邀在 1998 年美国圣路易斯举办的《工程中的神经网络》会议上作了“网络设计与工程应用中的混合遗传算法”的专题报告。他们中还有的受邀于数个国际杂志的特辑主编,例如:《计算机与工业工程》杂志的“遗传算法与工业工程”特辑,第 30 卷第 4 期,1996 年;《工程设计与自动化》杂志的“智能化工程设计”特辑,第 3 卷第 2 期,1997 年;《工程评价与费用分析》杂志的“工程评价中的进化计算”特辑,第 2 卷第 3 期,1999 年;《计算机与工业工程》杂志的“工业工程中的智能计算”特辑,第 36 卷第 2 期,1999 年。

早在 1996 年,我们总结了 1992 至 1996 年有关遗传算法的研究成果,并由约翰威立出版公司出版了《遗传算法与工程设计》一书,该书包括以下研究内容:约束优化问题、组合优化问题、流水作业调度问题、加工作业调度问题、机器调度问题、运输问题、设备布局设计问题以及其他工程设计的问题等。由于内容的限制以及许多新的研究成果未包含在那本书内,出于这个原因,我们着手编写本书。

本书适合作为工业与系统工程、管理科学、运筹学、计算机科学以及相关学科专业的本科高年级学生、研究生在遗传算法以及应用方面的教材,本书也可作为系统分析人员、运筹学与管理科学工作者、工程师,以及从事工业工程(运筹学)相关的优化设计的专家和学者的综合参考书。

本书组成如下:第 1 章到第 4 章为基础知识,余下各章相对独立,但都涉及到第 1 章

MAG 9/5/06

到第4章的基础知识。第1章介绍遗传算法的基础知识,包括编码、适应性、遗传优化,以及最新的遗传算法及其应用研究的博士论文;第2章讨论遗传算法在组合优化问题的应用,例如,集覆盖问题、装箱问题、背包问题以及最小生成树问题;第3章我们给出了遗传算法求解多目标优化问题的综述。许多工业工程中优化问题都带有多个目标和复杂的约束条件,本书为读者提供了这类问题的丰富内容。第4章介绍如何运用遗传算法求解模糊优化问题,它是工程设计与优化问题中任何处理不确定性和非精确性的重要课题。余下的5章介绍遗传算法在可靠性设计问题、调度问题、运输问题、网络设计与路径问题、制造元设计问题等的特别研究内容。

我们特别感谢美国路易维尔大学教授,约翰威立出版公司《工程设计与自动化》系列丛书主编 Hamid R. Parsaei 博士,他给予了我们参加该系列丛书编写的机会。本书的编写受益于与许多同事和朋友的研讨,以及他们给予的有价值的建议,他们是:美国加州大学伯克利分校 Ronald Wolff 博士和 Shmuel Oren 博士、美国奥本大学 Alice E. Smith 博士、美国波多黎哥大学 Gursel A. Süer 博士、美国内布拉斯加大学 Sang M. Lee 博士、美国堪萨斯州立大学 Frank A. Tillman 博士和 Young-Jou Lai 博士、美国得克萨斯 A&M 大学 Way Kuo 博士、美国桑那·克拉克大学 Chaiho Kim 博士、美国加利福尼亚州立大学 Shu-Cherng Fang 博士和 Jeffrey A. Joines 博士、美国路易维尔大学 Anup Kumar 博士、韩国 Ulsan 大学 Chiung Moon 博士、中国科学院管理科学与政策研究所徐伟宣博士、中国清华大学刘宝碇博士、中国东北大学汪定伟博士和杨志洪博士、韩国高级科技学院黄凯博士和金钟焕博士、浦汉科技大学文志雄博士、英国伯明翰大学 Xin Yao 博士、香港城市大学 Kin K. Lai 博士、K-EFE Engineering Volkswagen AG 的 Andreas Bastian 博士、日本京都大学片井修博士、日本东京都立科技大学山崎博士、日本大阪府立大学田中英夫博士、太田宏博士、市桥秀友博士、石渕久生博士、日本名古屋工业大学大野腾久博士、日本大阪大学石井博昭博士、日本东京工业大学中野智春博士和小林重信博士、日本 Kinjo Gakuin 大学 Zenji Katagata 博士、日本 Takasaki Shoka 学院的白井勉博士、日本明治大学向智政人博士、日本北海道大学佐藤吉原博士、日本足利工业大学横田孝雄博士、辻村泰宽博士、佐佐木正仁博士、木村忠彦博士。

我们也感谢更多的研究者,他们的工作贯穿于全书,虽然我们不能一一列举,但我们已尽力将他们的工作罗列在参考文献中了。

我们还要特别感谢日本足利工业大学的博士生们,他们是:周根贵博士、龚弟金博士、李银珍博士,以及田口竹雄、金鍾律、李昌润、崔俊五和真船由一郎等硕士研究生,在过去的几年中他们为本书的编写做了大量的工作。

我们非常高兴能够与约翰威立出版公司的编辑工作人员一起合作,在此,我们要特别感谢本系列丛书的执行主编 Robert L. Argentieri,以及 Millie Tores-Matias 小姐和 Ake-mi Kakada 小姐。

本书的出版得到日本文部省国际科研合作项目的资助,资助编号为:10041173:
1998年4月至2001年3月。

我们要向我们的妻子(Eiko Gen 和 Liying Zhang)和孩子们表示谢意,他们的爱、鼓励、理解和支持伴随着本书的准备过程。

玄光男

时任加利福尼亚大学伯克利分校访问教授

程润伟

时任足利工业大学访问学者

1999年9月30日

目 录

译者的话	Ⅲ
序言	V
第 1 章 遗传算法的基础	1
1.1 引言	1
1.1.1 编码问题	2
1.1.2 遗传算子	6
1.1.3 选择	7
1.1.4 遗传局部搜索	9
1.2 遗传算法的适应性	11
1.2.1 结构适应性	12
1.2.2 参数适应性	13
1.2.3 模糊逻辑控制器	14
1.3 遗传优化	21
1.3.1 全局优化	21
1.3.2 约束优化	26
1.3.3 组合优化	29
1.3.4 多目标优化	30
1.4 近期遗传算法的论文	30
第 2 章 组合优化问题	41
2.1 引言	41
2.2 集覆盖问题	41
2.2.1 航线机组成员调度问题	43
2.2.2 遗传表示	44
2.2.3 遗传算子	45
2.2.4 遗传算法	47
2.2.5 计算经验	47

2.3	装箱问题	48
2.3.1	启发式算法	49
2.3.2	遗传表示	50
2.3.3	遗传算子	52
2.3.4	适应值函数	53
2.3.5	初始化种群	54
2.3.6	计算经验	54
2.4	背包问题	55
2.4.1	多选择背包问题	56
2.4.2	多约束背包问题	60
2.5	最小生成树问题	63
2.5.1	二次最小生成树问题	64
2.5.2	度约束的最小生成树问题	67
2.5.3	双目标最小生成树问题	71
第3章	多目标优化问题	76
3.1	引言	76
3.2	多目标优化的基本概念	76
3.2.1	非支配解	77
3.2.2	偏好结构	78
3.2.3	基本求解方法	79
3.2.4	问题的结构和特性	82
3.3	遗传多目标优化	83
3.3.1	遗传搜索的特征	83
3.3.2	适应值分配机制	83
3.3.3	适应值共享和种群多样性	86
3.3.4	Pareto 解的概念	88
3.4	向量评价遗传算法	89
3.5	Pareto 排序和竞争方法	92
3.5.1	Pareto 排序方法	92
3.5.2	Pareto 竞争方法	94
3.6	权重和方法	95
3.6.1	随机权重方法	95
3.6.2	适应性权重方法	97

3.7	距离方法	100
3.7.1	距离方法的一般思想	100
3.7.2	计算距离度量	102
3.7.3	距离方法的应用	104
3.8	妥协方法	105
3.9	目标规划方法	106
第4章	模糊优化问题	109
4.1	引言	109
4.2	模糊线性规划	109
4.2.1	模糊线性规划模型	110
4.2.2	遗传算法方法	114
4.2.3	交互式方法	116
4.2.4	数值例子	118
4.3	模糊非线性规划	120
4.3.1	非线性规划模型	120
4.3.2	用于求解 FO/RNP-1 的非精确方法	123
4.3.3	交互式方法	125
4.3.4	数值例子	126
4.4	模糊非线性混合整数目标规划	128
4.4.1	模糊非线性混合整数目标规划模型	128
4.4.2	遗传算法方法	130
4.4.3	数值例子	132
4.5	模糊多目标整数规划	138
4.5.1	问题描述	138
4.5.2	增广的最小最大问题	140
4.5.3	遗传算法方法	140
4.5.4	交互式模糊满意方法	143
4.5.5	数值例子	144
第5章	可靠性设计问题	148
5.1	引言	148
5.2	网络可靠性设计	148
5.2.1	问题描述	150

5.2.2	Dengiz, Altiparmak 和 Smith 的方法	150
5.2.3	Deeter 和 Smith 的方法	155
5.3	基于树的网络可靠性和局域网设计	160
5.3.1	双目标网络拓扑设计	160
5.3.2	数值例子	166
5.4	多目标可靠性设计	169
5.4.1	双目标可靠性设计	169
5.4.2	遗传算法方法	169
5.4.3	混合遗传算法方法	171
5.4.4	带有模糊目标的可靠性设计	174
第 6 章	调度问题	178
6.1	引言	178
6.2	作业车间调度	178
6.2.1	基本方法	179
6.2.2	编码	179
6.2.3	适应性遗传算子	180
6.2.4	以启发式方法为特点的遗传算子	183
6.2.5	混合遗传算法	185
6.2.6	讨论	191
6.3	群体作业调度问题	192
6.3.1	问题的描述和必要条件	192
6.3.2	基本运行	194
6.3.3	表示	196
6.3.4	评价	197
6.3.5	遗传算子	197
6.3.6	整体过程	197
6.3.7	数值例子	198
6.4	资源约束的项目调度	200
6.4.1	基于优先权的编码	202
6.4.2	遗传算子	205
6.4.3	评价与选择	207
6.4.4	试验结果	208
6.5	并行机器调度	211

6.5.1	支配条件	212
6.5.2	Memetic 算法	216
6.5.3	试验结果	218
6.6	多处理器调度问题	220
6.6.1	问题描述与假设	220
6.6.2	求解 MSP 的遗传算法	220
6.6.3	数值例子	223
第 7 章	高级运输问题	226
7.1	引言	226
7.1.1	运输模型	226
7.1.2	运输问题的构造	227
7.2	基于生成树的方法	230
7.2.1	树的表示	231
7.2.2	初始化	233
7.2.3	遗传运算	234
7.2.4	评价与选择	234
7.2.5	整个算法过程	235
7.3	多目标运输问题	236
7.3.1	问题的描述	236
7.3.2	多目标运输问题的基于生成树的遗传算法	237
7.3.3	数例	239
7.4	固定费用运输问题	242
7.4.1	数学模型	242
7.4.2	fcTP 问题的难点	243
7.4.3	fcTP 的求解方法	243
7.4.4	遗传算法的实现	244
7.4.5	数例	244
7.5	容量限制的工厂选址问题	246
7.5.1	数学模型	247
7.5.2	针对工厂问题的基于生成树的遗传算法	248
7.5.3	数例	249
7.6	带模糊系数的双目标运输问题	250
7.6.1	问题的表述	251

7.6.2	排序模糊数·····	251
7.6.3	遗传算法的实现·····	252
7.6.4	数例·····	254
第 8 章	网络设计与路径·····	258
8.1	引言·····	258
8.2	最短路径问题·····	258
8.2.1	问题描述·····	259
8.2.2	遗传算法的方法·····	260
8.2.3	数例·····	265
8.3	有适应能力的网络路由·····	266
8.3.1	基于遗传算法的有适应能力的路由·····	267
8.3.2	染色体表示·····	267
8.3.3	染色体评价·····	268
8.3.4	遗传算子·····	268
8.3.5	数例·····	272
8.4	集中式网络设计·····	275
8.4.1	问题的描述·····	275
8.4.2	遗传算法·····	276
8.4.3	数例·····	277
8.5	计算机网络扩展·····	278
8.5.1	问题描述·····	278
8.5.2	Kumar, Pathak 和 Gupta 的方法·····	279
8.5.3	数例·····	281
8.6	多阶段工序计划·····	282
8.6.1	问题的描述·····	282
8.6.2	遗传算法·····	283
8.6.3	数例·····	284
8.7	网络上的 $M/G/s$ 队列设备定位·····	285
8.7.1	问题的描述·····	286
8.7.2	进化计算方法·····	289
8.7.3	数例·····	291

第 9 章 制造元设计	294
9.1 引言	294
9.2 制造元设计	295
9.3 传统的制造元设计方法	296
9.3.1 相似系数方法	297
9.3.2 基于数组的方法	297
9.3.3 数学规划方法	298
9.3.4 图与网络方法	298
9.4 遗传算法方法	299
9.4.1 遗传子表示和遗传算子	299
9.4.2 Joines 基于次序的方法	301
9.4.3 Moon 和 Kim 的方法	304
9.4.4 Joines 的整数规划方法	310
9.4.5 其他方法	315
9.5 可选加工计划的制造元设计	316
9.5.1 可选操作和机器冗余的结合	317
9.5.2 可选路径的结合	320
9.5.3 Moon, Gen 和 Kim 的对于独立单元的方法	325
9.6 独立单元的设计	330
9.6.1 机器类型数最小化的族群构造	330
9.6.2 族群数的确定	334
9.6.3 极小化机器数	337
9.6.4 其他设想	338
参考文献	339
索引	381

第 1 章 遗传算法的基础

1.1 引言

自 1960 年以来,人们对于模拟生物以及由此开发的针对复杂优化问题的有效算法产生了浓厚兴趣。当前在该领域中常常引用的术语就是进化计算(evolutionary computation)。它包含以下一些主要算法:遗传算法(genetic algorithms)(由 Holland 开发^[303]),进化策略(evolution strategies)(由 Rechenberg^[530]和 Schwefel 开发^[567]),进化规划(evolutionary programming)(由 Fogel 等人开发^[200])和遗传程序设计(genetic programming)(由 Koza 开发^[375])。当然还存在若干将上述算法的各种特点加以结合而形成的混合算法。当前进化计算领域的最新发展水平在 Bäck 和 Schwefel^[33], Michalewicz^[454]以及 Fogel^[198]等人的综述里有很好的介绍。

作为强有力且应用广泛的随机搜索和优化方法,遗传算法可能是当今影响最广泛的进化计算方法之一。在过去的几年中,遗传算法界将更多的注意力放在工业工程领域的优化问题上,并由此产生了一批新的研究和应用^[28,198,219,239,249,455,567]。有关遗传算法的参考书目请参阅 Alander 的著述^[11]。

一般认为,遗传算法有 5 个基本组成部分(这是由 Michalewicz 归纳的^[455]):

1. 问题的解的遗传表示
2. 创建解的初始种群的方法
3. 根据个体适应值对其进行优劣判定的评价函数
4. 用来改变复制过程中产生的子个体遗传组成的遗传算子
5. 遗传算法的参数值

遗传算法维持由一群个体组成的种群 $P(t)$ (t 代表遗传代数)。每一个体均代表问题的一个潜在的解。每一个体都被评价优劣并得到其适应值。某些个体要经历称作遗传操作的随机变换,由此生产新的个体。主要有两种变换方法:变异(mutation)的方法是将一个个体改变从而获得新的个体;杂交(crossover)的方法是方法将两个个体的有关部分组合起来形成新的个体。新产生的个体(称作后代(offspring) $C(t)$)继续被评价优劣。从父代种群和子代种群中选择比较优秀的个体就形成了新的种群。在若干代以后,算法收敛到一个最优个体,该个体很有可能代表着问题的最优或次优解。遗传算法的一般结构可以描述如下:

遗传算法过程

```
begin
     $t \leftarrow 0$ 
    初始化  $P(t)$ 
    评价  $P(t)$ 
    while(终止条件不满足) do
        begin
            重组  $P(t)$  以产生  $C(t)$ 
            评价  $C(t)$ 
            从  $P(t)$  和  $C(t)$  中选择  $P(t+1)$ 
             $t \leftarrow t+1$ 
        end
    end
```

关于搜索策略存在两种重要方案：深度搜索最优解和广度搜索解空间^[71]。遗传算法提供了一种在复杂解空间上进行有向随机搜索的方法。遗传算子原则上进行的是盲搜索；选择算子则有可能将遗传搜索的方向引导到解空间的理想区域中。针对特定现实世界中问题开发的遗传算法需要注意这样一条普遍原则，即要在对解空间进行深度搜索和广度搜索中维持很好的平衡。为实现这一原则，必须仔细考虑遗传算法的所有组成部分。另外可能还需要结合附加的启发式方法来增强其性能。

1.1.1 编码问题

如何将问题的解编码成为染色体是遗传算法使用中的关键问题。该问题已经从多方面进行过研究，比如当个体需要解码成为解时从基因型空间到表现型空间的映射性质，以及个体被遗传算子操作时的变形特性等。

编码的分类 在 Holland 的工作中，编码采用了二进制字符串(binary strings)的形式^[303]。已经知道，由于 Hamming 悬崖的存在，二进制编码对于函数优化问题存在严重缺陷。Hamming 悬崖指的是表现型空间中距离很小的个体对可能有很大的 Hamming 距离^[427]。举例来说，个体对 0111111111 和 1000000000 属于表现型空间中的相邻点（最小 Euclidean 距离点），但它们却在基因型空间具有最大的 Hamming 距离。为了翻越 Hamming 悬崖，个体的所有位需要同时进行改变。由杂交和变异实现翻越 Hamming 悬崖的可能性非常小。在这种情况下，二进制编码无法维持表现型空间中点的位置。

对于工业工程领域里的许多问题而言，几乎不可能用二进制编码来表示它们的解。在过去的 10 年里，已经针对特定的问题提出了各种编码方法，其目的都是为了能够更有效地实现遗传算法。根据采用何种符号作为基因的等位基因，编码方式可以分类如下：