



智能科学技术著作丛书

# 多目标智能优化算法 及其应用

雷德明 严新平 编著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

智能科学技术著作丛书

# 多目标智能优化算法及其应用

雷德明 严新平 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

智能优化算法是一类通过模拟某一自然现象或过程而建立起来的优化方法,这类算法包括进化算法、粒子群算法、禁忌搜索、分散搜索、模拟退火、人工免疫系统和蚁群算法等。本书系统地介绍了多目标智能优化算法理论与应用,力图全面地介绍多目标智能优化算法的最新研究进展。全书共分为8章,主要内容包括:多目标进化算法、多目标粒子群算法、其他多目标智能优化算法、神经网络优化、交通与物流系统优化、多目标生产调度和电力系统优化及其他。

本书内容取材新颖,覆盖面广,系统深入,注重理论联系实际。本书可作为计算机、自动控制、人工智能、管理科学和工业工程等专业的研究生及高年级本科生教材,也可作为从事计算智能、生产调度等研究人员和工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

多目标智能优化算法及其应用/雷德明,严新平编著. —北京:科学出版社,2009

(智能科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-023694-4

I. 多… II. ①雷… ②严… III. 人工智能-算法理论 IV. TP183

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第197882号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:宋玲玲

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009年3月第一版 开本:B5(720×1000)

2009年3月第一次印刷 印张:25 1/4

印数:1—3 000 字数:490 000

定价:75.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

## 《智能科学技术著作丛书》编委会

名誉主编：吴文俊

主 编：涂序彦

副 主 编：钟义信 史忠植 何华灿 蔡自兴 孙增圻 谭 民

秘 书 长：韩力群

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

蔡庆生（中国科学技术大学）

蔡自兴（中南大学）

杜军平（北京邮电大学）

韩力群（北京工商大学）

何华灿（西北工业大学）

何 清（中国科学院计算技术研究所）

黄河燕（中国科学院计算语言研究所）

黄心汉（华中科技大学）

焦李成（西安电子科技大学）

李祖枢（重庆大学）

刘 宏（北京大学）

刘 清（南昌大学）

秦世引（北京航空航天大学）

邱玉辉（西南师范大学）

阮秋琦（北京交通大学）

史忠植（中国科学院计算技术研究所）

孙增圻（清华大学）

谭 民（中国科学院自动化研究所）

涂序彦（北京科技大学）

王国胤（重庆邮电学院）

王家钦（清华大学）

王万森（首都师范大学）

吴文俊（中国科学院系统科学研究所）

杨义先（北京邮电大学）

尹怡欣（北京科技大学）

于洪珍（中国矿业大学）

张琴珠（华东师范大学）

钟义信（北京邮电大学）

庄越挺（浙江大学）

## 《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 and 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

大多数工程和科学问题都是多目标优化问题,存在多个彼此冲突的目标,如何获取这些问题的最优解,一直都是学术界和工程界关注的焦点问题。与单目标优化问题不同,多目标优化的本质在于,大多数情况下,某目标的改善可能引起其他目标性能的降低,同时使多个目标均达到最优是不可能的,只能在各目标之间进行协调权衡和折中处理,使所有目标函数尽可能达到最优,而且问题的最优解由数量众多,甚至无穷大的 Pareto 最优解组成。

智能优化算法是一类通过模拟某一自然现象或过程而建立起来的优化方法,这类算法包括进化算法、粒子群算法、禁忌搜索、分散搜索、模拟退火、人工免疫系统和蚁群算法等。和传统的数学规划法相比,智能优化算法更适合求解多目标优化问题。首先,大多数智能优化算法能同时处理一组解,算法每运行一次,能获得多个有效解。其次,智能优化算法对 Pareto 最优前端的形状和连续性不敏感,能很好地逼近非凸或不连续的最优前端。目前,智能优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,出现了一些热门的研究方向,如进化多目标优化,同时,多目标智能优化算法在电力系统、制造系统和控制系统等方面的应用研究也取得了很大的进展。

本书力图全面总结作者和国内外同行在多目标智能优化算法的理论与应用方面所取得的一系列研究成果。全书包括两部分,共 8 章。第一部分为第 1~4 章,主要介绍了各种多目标智能优化算法的理论。其中第 1 章为绪论,介绍各种智能优化算法的基本思想和原理。第 2 章介绍多目标进化算法,主要描述多目标进化算法的基本原理、典型算法和各种进化机制与策略,如混合策略、协同进化和动态进化策略等。第 3 章介绍多目标粒子群算法,包括基本原理、典型算法、混合算法和交互粒子群算法等。第 4 章描述除粒子群算法和进化算法之外的其他多目标智能优化算法,主要介绍多目标模拟退火算法、多目标蚁群算法、多目标免疫算法、多目标差分进化算法和多目标分散搜索等。

第二部分为第 5~8 章,主要介绍了多目标智能优化算法的应用,包括神经网络优化、生产调度、交通与物流系统优化、电力系统优化及其他。第 5 章描述人工神经网络的多目标优化,主要包括 Pareto 进化神经网络、径向基神经网络、递归神经网络和模糊神经网络。第 6 章介绍交通与物流系统优化,主要描述了智能优化算法在物流配送、城市公交线路网络和公共交通调度等方面的应用。第 7 章全面介绍进化算法和粒子群算法在多目标生产调度方面的应用,首先描述生产调度问

题和生产调度的表示方法,然后介绍这两类算法对多种不同类型的生产调度问题的应用。第8章首先介绍电力系统优化,包括多目标无功优化和多目标电网规划等;然后介绍多播 QoS 路由优化和禁忌搜索在单元制造系统设计中的应用;最后描述进化算法和模拟退火在自动控制系统设计中的应用。

本书涉及作者的研究成果是在 973 项目“城市生命体承载系统的健康识别和调控理论与方法研究”(2005CB724205)、中国博士后科学基金项目(20070410296)、湖北省自然科学基金项目(2007ABA332)、国家自然科学基金“混合遗传算法在制造系统中的应用”(70077017)等项目资助下取得的。

本书内容取材新颖,覆盖面广,系统深入,注重理论联系实际,可作为计算机、自动控制、人工智能、管理科学和工业工程等专业研究生教材,也可作为相关研究人员和工程技术人员的参考书。

由于作者水平有限,不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。



# 目 录

《智能科学技术著作丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 进化算法	1
1.1.1 进化算法的基本框架	2
1.1.2 遗传算法	2
1.1.3 进化策略	8
1.1.4 进化规划	9
1.2 粒子群算法	10
1.2.1 标准粒子群算法	11
1.2.2 算法解析	11
1.3 蚁群算法	12
1.3.1 蚁群算法的基本思想	12
1.3.2 蚁群算法的实现过程	14
1.3.3 蚁群算法描述	15
1.3.4 蚁群优化的特点	18
1.4 模拟退火算法	19
1.4.1 模拟退火算法的基本原理	19
1.4.2 模拟退火算法描述	21
1.5 人工免疫系统	23
1.5.1 生物免疫系统	23
1.5.2 人工免疫系统	24
1.6 禁忌搜索	29
1.7 分散搜索	30
1.8 多目标优化基本概念	31
参考文献	33
第 2 章 多目标进化算法	36
2.1 基本原理	36
2.1.1 MOEA 模型	37
2.1.2 性能指标与测试函数	38

2.2	典型多目标进化算法	41
2.2.1	VEGA、MOGA、NPGA 和 NSGA	41
2.2.2	SPEA 和 SPEA2	43
2.2.3	NSGA2	47
2.2.4	PAES	48
2.2.5	其他典型 MOEA	50
2.3	多目标混合进化算法	50
2.3.1	多目标遗传局部搜索	51
2.3.2	J-MOGLS	54
2.3.3	M-PAES	56
2.3.4	多目标混沌进化算法	57
2.4	协同多目标进化算法	61
2.5	动态多目标进化算法	68
2.5.1	IMOEa	68
2.5.2	动态 MOEA(DMOEA)	72
2.6	并行多目标进化算法	80
2.6.1	并行多目标进化算法的基本原理	80
2.6.2	多分辨率多目标遗传算法	83
2.6.3	并行单前端遗传算法	85
2.7	其他多目标进化算法	91
2.7.1	高维多目标优化的 NSGA2 改进算法	91
2.7.2	动态多目标优化的进化算法	95
2.8	结论与展望	99
	参考文献	99
<b>第 3 章</b>	<b>多目标粒子群算法</b>	<b>105</b>
3.1	基本原理	105
3.2	典型多目标粒子群算法	106
3.2.1	CMOPSO	106
3.2.2	多目标全面学习粒子群算法	111
3.2.3	Pareto 档案多目标粒子群优化	115
3.3	多目标混合粒子群算法	120
3.3.1	模糊多目标粒子群算法	120
3.3.2	基于分散搜索的多目标混合粒子群算法	129
3.4	交互粒子群算法	133
3.5	结论	142

参考文献	142
<b>第 4 章 其他多目标智能优化算法</b>	145
4.1 多目标模拟退火算法	145
4.2 多目标蚁群算法	150
4.2.1 连续优化问题的多目标蚁群算法	150
4.2.2 组合优化问题的多目标蚁群算法	154
4.3 多目标免疫算法	158
4.4 多目标差分进化算法	169
4.5 多目标分散搜索	175
4.6 结论	184
参考文献	185
<b>第 5 章 人工神经网络优化</b>	188
5.1 Pareto 进化神经网络	188
5.2 径向基神经网络优化与设计	194
5.3 递归神经网络优化与设计	208
5.4 模糊神经网络多目标优化	217
5.5 结论	222
参考文献	223
<b>第 6 章 交通与物流系统优化</b>	225
6.1 物流配送路径优化	225
6.1.1 多目标车辆路径优化	225
6.1.2 多目标随机车辆路径优化	232
6.2 城市公交路线网络优化	240
6.3 公共交通调度	248
6.3.1 概述	248
6.3.2 多目标驾驶员调度	249
6.4 结论	257
参考文献	257
<b>第 7 章 多目标生产调度</b>	261
7.1 生产调度描述	261
7.1.1 车间调度问题	262
7.1.2 间隙生产调度	263
7.1.3 动态生产调度	264
7.1.4 批处理机调度和 E/T 调度	265
7.2 生产调度的表示方法	266

7.3	基于进化算法的多目标车间调度	270
7.3.1	多目标流水车间调度	271
7.3.2	多目标作业车间调度	277
7.4	基于进化算法的多目标模糊调度	284
7.4.1	模糊调度:Sakawa 方法	285
7.4.2	模糊作业车间调度:CMEA 方法	288
7.5	基于进化算法的多目标柔性调度	291
7.5.1	混合遗传调度方法	291
7.5.2	混合遗传算法	296
7.6	基于粒子群优化的多目标调度	300
7.6.1	基于粒子群优化的多目标作业车间调度	301
7.6.2	多目标柔性调度的混合粒子群方法	308
7.7	多目标随机调度	315
7.8	结论与展望	321
	参考文献	322
<b>第 8 章</b>	<b>电力系统优化及其他</b>	<b>328</b>
8.1	电力系统优化	328
8.1.1	基于免疫算法的多目标无功优化	328
8.1.2	基于分层优化的多目标电网规划	335
8.1.3	基于 NSGA2 及协同进化的多目标电网规划	340
8.2	多播 QoS 路由优化	344
8.3	单元制造系统设计	351
8.3.1	概述	351
8.3.2	基于禁忌搜索的多目标单元构造	352
8.3.3	基于并行禁忌搜索的多目标单元构造	360
8.4	自动控制系统设计	365
8.4.1	概述	365
8.4.2	混合动力学系统控制	367
8.4.3	鲁棒 PID 控制器设计	370
8.5	结论	380
	参考文献	381
<b>附录</b>	<b>部分测试函数</b>	<b>386</b>

# 第 1 章 绪 论

智能优化算法是通过模拟某一自然现象或过程而建立起来的,它们具有适于高度并行、自组织、自学习与自适应等特征,为解决复杂问题提供了一种新途径。这类算法包括进化算法(EA)、粒子群算法(PSO)、禁忌搜索(TS)、分散搜索(SS)、模拟退火(SA)、人工免疫系统(AIS)和蚁群算法(ACO)等。

进化算法来源于对生物进化过程的模拟,它将问题的求解表示成染色体的适者生存过程,通过染色体的一代代进化,最终收敛到最适应环境的个体(即问题的最优解或满意解),该类算法主要包括遗传算法(GA)、进化策略(ES)和进化规划(EP)等。

粒子群算法来源于对鸟群优美而不可预测的飞行动作的模拟,粒子的飞行速度动态地随粒子自身和同伴的历史飞行行为改变而改变。

禁忌搜索是一种全局逐步优化算法,它模拟人类的智力过程,通过引入一种灵活的存储结构和相应的禁忌规则来避免迂回搜索,并通过藐视原则来赦免一些被禁忌的优良状态,以实现全局优化。

分散搜索主要组成部分包括五个方法:多样化产生方法、改进方法、参考集新方法、子集产生方法和组合方法等。分散搜索十分灵活,它的每个组成部分都能采取不同的方式实现。

模拟退火是基于 Monte Carlo 迭代求解策略的随机寻优算法,其出发点是固体物质的退火过程与一般组合优化问题的相似性,从某一初温开始,随着温度的降低,结合概率突跳特性在解空间中搜索最优解,即在局部解时能概率性地跳出并最终趋于全局最优。

人工免疫系统是一种模仿生物免疫系统功能的智能系统,免疫系统是一种复杂的分布式信息处理学习系统,这种系统具有免疫保护、免疫记忆、免疫学习功能以及较强的自适应性、多样性、学习、识别和记忆等特点。

蚁群算法是受自然界中蚂蚁搜索食物行为的启发而提出的一种随机优化算法,单个蚂蚁是脆弱的,而蚁群的群居生活却能完成许多单个个体无法承担的工作,蚂蚁间借助于信息素这种化学物质进行信息的交流和传递,并表现出正反馈现象:某段路径上经过的蚂蚁越多,该路径被重复选择的概率就越高。正反馈机制和通信机制是蚁群算法的两个重要基础。

## 1.1 进化算法

进化算法最初由 GA、EP 和 ES 三大分支组成,20 世纪 90 年代初,在遗传算

法的基础上又发展了遗传编程(GP)。这些方法各自有不同的侧重点,各自有不同的生物进化背景,各自强调了生物进化过程中的不同特性,但它们有共同的特点:借助生物进化的思想和原理来解决实际问题。

### 1.1.1 进化算法的基本框架

进化算法提供了一种求解复杂系统优化的通用框架,其基本着眼点是基于对生物进化过程的模拟,是一种具有较强鲁棒性的通用计算模型。

进化算法的几个分支虽然着眼于自然界生物进化的不同背景,由不同的研究者独立开发出来,但它们之间有很多相似之处,可统一于基本框架内。下面描述进化算法的一种基本框架<sup>[1]</sup>。

进化算法的基本框架:

- (1) 进化代数计数器初始化:  $t = 0$ 。
- (2) 随机产生初始群体  $P(t)$ 。
- (3) 评价群体  $P(t)$  的适应度值。
- (4) 个体重组操作:  $P'(t) = \text{Recombination}[P(t)]$ 。
- (5) 个体变异操作:  $P''(t) = \text{Mutation}[P'(t)]$ 。
- (6) 评价群体  $P''(t)$  的适应度值。
- (7) 个体复制操作:  $P(t+1) = \text{Reproduction}[P(t) \cup P''(t)]$ 。
- (8) 终止条件判断:若不满足终止条件,则  $t = t + 1$ ,转移到第(4)步,继续进行进化操作过程;若满足终止条件,则输出当前最优个体,算法结束。

进化算法的基本特点<sup>[2]</sup>:

- (1) 算法的操作对象都是由多个个体所组成的一个集合,即群体。
- (2) 每个个体都有一个对系统环境的适应度,适应度是对个体优劣程度的一种度量。
- (3) 算法都要进行复制操作,以便能将当前群体中具有较高适应度的个体更多地保留到下一代群体中;都要进行个体重组、变异等进化操作,以及对个体加入一些微小扰动以增强群体的多样性。
- (4) 算法所模拟的生物进化过程是一个反复迭代的过程。在群体的迭代过程中,个体的适应度值和群体的平均适应度值得到不断改进,最终可得到一个或几个较高适应度的个体,对应问题的最优解或近似最优解。

(5) 算法具有一种天然的并行结构,适合于在并行机或局域网环境中进行大规模复杂问题的求解。

### 1.1.2 遗传算法

遗传算法的基本思想来源于达尔文的进化论和孟德尔的遗传学说。达尔文的

进化论认为每一物种在不断的发展过程中会越来越适应环境。物种的每个个体的基本特征被后代所继承,但后代又不完全同于父代,这些新的变化若适应环境,则被保留下来。在某一环境中那些更能适应环境的个体特征被保留下来,这就是适者生存的原理。

孟德尔的遗传学说认为遗传是作为一种指令封装在每个细胞中,并以基因的形式包含在染色体中,每个基因有其特殊的位置并控制某种特殊的性质。每个基因产生的个体对环境有一定的适应性,基因杂交和基因突变可能产生对环境适应性更强的后代。通过优胜劣汰的自然选择,适应度高的基因结构保存下来。

GA<sup>[3,4]</sup>将问题的求解表示为染色体,从而构成一群染色体,将它们置于问题的环境中,根据适者生存的原则,从中选择出适应环境的染色体进行复制即再生(reproduction)、再通过交叉(crossover)、变异(mutation)两种基因操作产生出新一代更能适应环境的染色体群,这样的过程一代代不断地进化,最后收敛到一个最适应环境的个体上,求得问题的最优解。图 1.1 给出了 GA 的基本流程图。

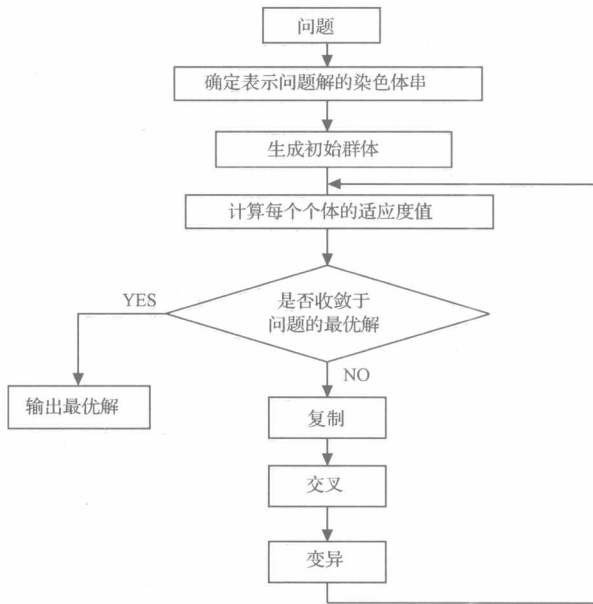


图 1.1 GA 的基本流程图

下面描述 GA 的主要步骤。

### 1. 编码策略

人们已提出了很多种编码策略,如二进制编码、实数编码和符号编码等,其中,二进制编码是遗传算法中最简单和最早使用的一种编码方法,它将问题的解空间

映射到二进制位串空间  $\{0,1\}^l$ 。位串的长度与问题所要求的求解精度有关。使用二进制编码存在问题:首先,二进制编码存在着连续函数离散化时的映射误差,个体编码串长度较短时,达不到精度要求,而个体编码串长度较长时,能提高编码精度,但会使遗传算法的搜索空间急剧增大;其次,二进制编码不便于反映所求问题的特定知识,这样不便于开发针对问题专门知识的遗传算子。

为改进二进制编码的这些缺点,提出了实数编码。实数编码就是指个体的每个基因值用某一范围的一个实数来表示,个体的编码长度等于其决策变量的个数。符号编码方法指染色体中每个基因值取自一个具有一定代码意义的符号集。对于具有 10 个城市的旅行商问题(TSP),其对应的符号编码染色体可为  $\{2,1,3,4,7,8,9,5,6,10\}$ ,也可以是  $\{b,a,c,d,g,h,l,e,f,m\}$ ,符号编码方法在组合优化问题(如作业车间调度问题、TSP 和车辆路径优化问题等)中应用广泛。

其他编码方式还包括格雷编码<sup>[5]</sup>和动态编码<sup>[4]</sup>等。

## 2. 适应度函数

遗传算法的一个特点在于它仅使用所求问题的目标函数值就可以得到下一步的搜索信息,而对目标函数的使用则通过评价个体的适应度来体现。常用的两种适应度评价方法为:① 原始适应度函数,原始适应度函数就是直接利用问题的目标函数作为个体的适应度度量。② 标准适应度函数。由于某些选择策略,例如,基于适应度值的比例选择要求适应度函数非负,而适应度值越大,表明个体的性能越好,这时,需要将原始适应度函数转化为标准形式,即都转化为极大化情形,且适应度非负。因此,对于极小化问题,标准适应度值可定义为  $F = C_{\max} - f$ ,其中  $C_{\max}$  为充分大的正数,  $f$  为目标函数,  $F$  为适应度函数。

## 3. 选择

遗传算法使用选择来对个体优胜劣汰,适应度较高的个体遗传到下一代的概率较大,而适应度较低的个体遗传到下一代的概率较小。选择对算法性能的影响很大,不同的选择策略将导致不同的选择压力,即下一代中父代个体的复制数目的不同分配关系,较大的选择压力将使最优个体具有较高的复制数目,使算法收敛较快,但容易出现过早收敛;较小的选择压力能使群体保持足够的多样性,增大了算法收敛到全局最优的概率,但收敛速度较慢。

### 1) 适应度值比例方法

适应度比例方法也叫轮盘赌方法<sup>[4]</sup>,首先根据个体的适应度值计算它的选择概率:

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad (1.1)$$



式中,  $f_j$  是群体中第  $j$  个个体的适应度值;  $N$  为种群规模。

然后, 根据选择概率将一个圆盘分成  $N$  份, 其中第  $i$  个扇形的中心角为  $2\pi P_i$ 。进行选择时, 可以假想移动圆盘, 若某参照点落在第  $i$  个扇形, 则选择个体  $i$ , 具体实现过程如下: 先产生  $[0, 1]$  区间内的随机数  $r$ , 若  $\sum_{j=0}^{i-1} P_j \leq r < \sum_{j=0}^i P_j$ , 则选择个体  $i$ , 其中  $P_0 = 0$ 。

### 2) 精英个体保留策略<sup>[3]</sup>

该方法的思想是把群体中适应度最高的个体不进行配对交叉而直接复制到下一代。该方法的优点在于, 进化过程中某一代的最优解可不被交叉和变异操作所破坏, 但也存在一种危险, 即局部最优个体的遗传基因会急剧增加, 而使搜索陷于局部最优解。

### 3) 锦标赛选择方法<sup>[6]</sup>

该方法十分简单, 基本思想是, 从群体中任意选择一定数目的个体 (称为锦标赛规模), 其中适应度最高的个体保留到下一代, 这一过程反复执行, 直到保存到下一代的个体数达到预先设定的数目为止。锦标赛规模一般取 2。

### 4) 排序选择方法<sup>[3]</sup>

排序选择方法指在计算每个个体的适应度值后, 根据适应度值大小, 对种群个体进行排序; 然后, 把事先设计好的概率表按序分配给个体, 作为各自的选择概率。所有个体按适应度大小进行排序, 但选择概率与适应度值无直接关系, 而仅与序号有关。

其他选择方法还包括排挤方法<sup>[7]</sup>和 Boltzmann 选择方法<sup>[8]</sup>等。

## 4. 交叉

交叉指把两个父代个体的部分基因加以替换重组而生成新个体的操作。交叉操作的设计与实现与所研究的问题密切相关。一般要求它既不能太多地破坏个体编码串中表示优良性状的优良模式, 又能有效地产生一些较好的新个体模式。交叉算子的设计还要与个体编码设计一起考虑。

连续优化常见的交叉操作有均匀交叉、模拟二进制交叉、单点交叉和两点交叉等。

(1) 均匀交叉<sup>[9]</sup>。均匀交叉依概率交叉两个父代个体的每一位, 其过程是, 先随机产生一个与父代个体具有同样长度的二进制串, 其中 0 表示不交换, 1 表示交换, 这个二进制串成为交叉模板如图 1.2 所示; 然后根据该模板对两个父代个体进行交叉, 得到两个新个体。



图 1.2 均匀交叉