



智能

科/学/技/术/著/作/丛/书

先进多目标粒子群 优化理论及其应用

张 勇 巩敦卫 著



科学出版社

智能科学技术著作丛书

先进多目标粒子群 优化理论及其应用

张 勇 巩敦卫 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书阐述了多目标粒子群优化算法的原理及其应用, 主要内容包括基于最小角度的粒子引导者选择、外部储备集的两阶段更新、基于目标分割的多种群协同进化、少控制参数的多目标骨干粒子群优化等; 还给出了不同方法在复杂约束优化、区间不确定优化、异质数据特征选择、危险环境下机器人全局路径规划、区间收益多项目选址中的具体应用, 并给出了详细的算法对比结果。书后附有部分多目标粒子群优化算法源程序。

本书可供高等院校计算机、自动化和人工智能等专业的教师和研究生阅读, 也可供相关专业的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进多目标粒子群优化理论及其应用 / 张勇, 巩敦卫著. —北京: 科学出版社, 2016. 3

(智能科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-047379-0

I. ①先… II. ①张…②巩… III. ①计算机算法 IV. ①TP301.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 031956 号

责任编辑: 刘宝莉 孙伯元 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 左讯科技

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

*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 16

字数: 302 000

定价: 95.00 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》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 何新贵 李德毅 蔡自兴 孙增圻

谭 民 韩力群 黄河燕

秘 书 长：黄河燕

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

蔡庆生（中国科学技术大学）

杜军平（北京邮电大学）

何华灿（西北工业大学）

何新贵（北京大学）

黄心汉（华中科技大学）

李德毅（中国人民解放军总参谋部第六十一研究所）

李祖枢（重庆大学）

刘 清（南昌大学）

邱玉辉（西南师范大学）

史忠植（中国科学院计算技术研究所）

谭 民（中国科学院自动化研究所）

涂序彦（北京科技大学）

王家钦（清华大学）

吴文俊（中国科学院数学与系统科学研究院）

杨义先（北京邮电大学）

张琴珠（华东师范大学）

钟义信（北京邮电大学）

蔡自兴（中南大学）

韩力群（北京工商大学）

何 清（中国科学院计算技术研究所）

黄河燕（北京理工大学）

焦李成（西安电子科技大学）

刘 宏（北京大学）

秦世引（北京航空航天大学）

阮秋琦（北京交通大学）

孙增圻（清华大学）

谭铁牛（中国科学院自动化研究所）

王国胤（重庆邮电学院）

王万森（首都师范大学）

于洪珍（中国矿业大学）

赵沁平（北京航空航天大学）

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。

“人工智能”学科自 1956 年诞生以来，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

在日常生活、管理及工程等领域,存在着诸多需要使多个目标函数同时最优的问题,这类问题称为多目标或多指标优化问题。如电力经济调度中,在满足客户负荷需求的条件下需要使发电机运行费用与污染指数等指标同时最优。不同于传统的单目标优化问题,由于该类问题包含了多个相互冲突的目标函数,不再具有唯一的最优解。事实上,它的最优解变为一个可能包含无穷多元素的集合,即常说的 Pareto 最优解集。如何寻找具有好的扩展性和分布性且逼近真实 Pareto 前端的最优解集,一直是多目标优化理论研究的开放性难题。

粒子群优化算法,或称微粒群优化算法,作为一类基于种群的启发式优化方法,源于鸟类寻找食物等自然界中的群体行为。用于求解多目标优化问题的粒子群优化算法,称为多目标粒子群优化算法。一方面,类似于人们熟知的多目标进化算法,基于种群进化的特性保证了多目标粒子群优化算法可以同时搜索问题的多个 Pareto 最优解,而不需要优化问题梯度信息的特点又使得它有能力处理各种复杂的问题,包括连续的、离散的、可微或者不可微的等;另一方面,相比进化算法,粒子群优化算法具有概念简明、实现方便和收敛速度快等特点。得益于上述优点,近年来多目标粒子群优化算法得到了学者们的广泛关注。

作者一直从事粒子群优化算法理论及其应用的研究工作,在多项国家自然科学基金和省部级科研项目的资助下,提出了一系列提高粒子群优化算法效率的方法,并将其成功应用于多种复杂的实际问题。作者的这些工作大大丰富了多目标粒子群优化理论,提高了粒子群优化算法解决复杂实际问题的能力,也为粒子群优化算法在其他领域的进一步应用奠定了技术基础,具有重要的理论意义和实际应用价值。

本书是作者在国内本领域权威期刊以及有影响的国际会议论文集上所发表学术论文的基础上进一步加工、深化而成的,是对已有研究成果的全面总结。本书共 10 章,第 1 章给出多目标粒子群优化理论与方法的研究现状,介绍相关的基础入门知识;第 2~5 章解决多目标粒子群优化面临的 4 个关键问题:粒子引导者的选择、外部储备的更新、控制参数的设置以及多样性的保持,分别提出相应的解决方法,并通过实验分析其有效性;第 6 章和第 7 章考虑实际问题中含有

约束、区间不确定参数的情况,分别给出了用于问题求解的约束多目标骨干粒子群优化算法以及基于概率支配的多目标粒子群优化算法;第8章~第10章将多目标粒子群优化理论和方法应用于异质数据特征选择、危险环境下机器人全局路径规划以及区间收益多项目选址等实际多目标优化问题。为便于应用本书阐述的算法,书后附有部分算法的源程序。著者愿将这些研究成果与国内外同行一起分享,以推动该领域的进一步研究与发展。

本书的撰写过程中,已毕业博士研究生张建化、硕士研究生胡滢提供了部分书稿内容,在此向他们表示衷心的感谢。中国矿业大学信息与电气工程学院的郭一楠教授、孙晓燕教授、张扬博士以及理学院姚香娟副教授等为本书的撰写提供了许多有益的指导。除此之外,在本书的撰写、编辑、修改及其参考文献整理等方面,博士研究生耿娜、硕士研究生夏长红和荣森等同学也付出颇多。本书出版受到国家自然科学基金项目(61473299, 61005089)、中国博士后科学基金资助项目(2014T70557, 2012M521142)、江苏省博士后科研资助计划项目(1301009B)以及中央高校基本科研业务费专项资金(2013QNA51, 2013XK09)的联合资助,在此一并表示感谢。

多目标粒子群优化是一个快速发展、多学科交叉的新颖研究方法,其理论及应用均有大量的问题尚待进一步深入地研究。由于作者学识水平和可获得资料的限制,书中不妥之处在所难免,敬请同行专家和读者批准指正。

目 录

《智能科学技术著作丛书》序

前言

第 1 章 多目标粒子群优化入门	1
1.1 多目标优化问题	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 经典多目标求解方法	3
1.1.3 多目标进化优化方法	4
1.2 粒子群优化算法	6
1.2.1 算法的起源及发展	6
1.2.2 算法的基本原理	7
1.2.3 算法参数	8
1.2.4 粒子群拓扑	10
1.3 多目标粒子群优化算法	11
1.3.1 外部储备集	13
1.3.2 粒子引导者的更新或选择	13
1.3.3 粒子群多样性	14
1.3.4 其他研究成果	15
1.4 主要内容及组织	15
1.5 本章小结	18
参考文献	18
第 2 章 基于最小角度的粒子引导者选择策略	25
2.1 研究动机	25
2.2 基于最小角度的粒子全局引导者选择	26
2.3 基于粒子浓度的个体引导者更新	27
2.3.1 所提粒子个体引导者更新策略	27
2.3.2 进一步解释	28
2.4 基于最小角度的多目标粒子群优化算法	29

2.5 在数值函数优化问题中的应用	30
2.5.1 测试函数及参数设置	30
2.5.2 性能比较测度	31
2.5.3 实验结果及分析	32
2.6 本章小结	36
参考文献	36
第3章 外部储备集的两阶段更新策略	38
3.1 研究动机	38
3.2 外部储备集的更新	40
3.2.1 基本思想	40
3.2.2 两阶段转化条件及网格划分阈值的确定	41
3.2.3 网格划分方法	42
3.2.4 两阶段储备集更新步骤	42
3.3 外部储备集候选点的选取	43
3.3.1 基本思想	43
3.3.2 储备集候选点选取机制	44
3.3.3 进一步解释	44
3.4 基于两阶段储备集更新的多目标粒子群优化算法	45
3.5 在数值函数优化问题中的应用	46
3.5.1 测试函数及参数设置	46
3.5.2 储备集更新策略分析	47
3.5.3 储备集候选点选取机制分析	50
3.6 本章小结	51
参考文献	52
第4章 少控制参数的多目标骨干粒子群优化	53
4.1 研究动机	53
4.2 传统骨干粒子群优化算法	54
4.3 多目标骨干粒子群优化	55
4.3.1 初始化	55
4.3.2 粒子个体引导者的更新	55
4.3.3 粒子全局引导者的选择	55
4.3.4 粒子位置的更新	57

4.3.5	时变变异	57
4.3.6	外部储备集的更新	59
4.3.7	复杂性分析	59
4.4	在数值函数优化问题中的应用	59
4.4.1	测试函数	59
4.4.2	性能测度	61
4.4.3	比较算法	61
4.4.4	仿真结果及其分析	62
4.5	本章小结	73
	参考文献	73
第5章	基于目标分割的多种群协同粒子群进化	75
5.1	研究动机	75
5.2	所提多目标粒子群优化算法	76
5.2.1	面向从种群的改进粒子群优化方法	77
5.2.2	局部版多目标粒子群优化方法	79
5.3	在数值函数优化问题中的应用	79
5.3.1	准备工作	80
5.3.2	仿真结果及其分析	80
5.4	关键算子分析	87
5.4.1	局部版多目标粒子群优化方法的作用	87
5.4.2	类半径的作用	88
5.5	本章小结	90
	参考文献	90
第6章	用于约束优化的多目标骨干粒子群优化算法	92
6.1	研究动机	92
6.2	约束多目标骨干粒子群优化算法	93
6.2.1	含约束支配关系	93
6.2.2	粒子个体引导者的更新	94
6.2.3	可行和非可行储备集的更新	94
6.2.4	粒子全局引导者的选择	95
6.2.5	算法步骤	96
6.3	在数值函数优化问题中的应用	97

6.3.1	测试函数	97
6.3.2	实验框架	99
6.3.3	比较结果及分析	100
6.4	本章小结	105
	参考文献	105
第7章	基于概率支配的区间多目标粒子群优化算法	107
7.1	研究动机	107
7.2	相关工作	109
7.2.1	基本概念	109
7.2.2	用于区间多目标优化问题的进化优化	110
7.3	所提区间多目标粒子群优化算法	112
7.3.1	Pareto 概率支配	112
7.3.2	外部储备集的更新	115
7.3.3	粒子个体引导者的更新	117
7.3.4	粒子全局引导者的选择	117
7.3.5	算法步骤	119
7.4	在数值函数优化问题中的应用	120
7.4.1	测试问题	120
7.4.2	参数设置	121
7.4.3	算法性能测度	121
7.4.4	储备集更新策略的可行性分析	122
7.4.5	性能比较	122
7.5	本章小结	125
	参考文献	126
第8章	面向异质数据的多目标粒子群特征选择方法	128
8.1	研究背景	128
8.2	相关工作	129
8.2.1	传统的特征选择方法	130
8.2.2	基于进化优化的特征选择方法	132
8.3	问题建模	133
8.4	所提多目标粒子群特征选择方法	134
8.4.1	粒子编码	134

8.4.2 储备集的更新	135
8.4.3 粒子全局引导者的选择	135
8.4.4 粒子扰动	137
8.4.5 算法步骤	137
8.5 实例分析	138
8.5.1 粒子全局引导者选择方法分析	138
8.5.2 粒子扰动策略分析	139
8.5.3 对比实验及分析	139
8.6 本章小结	143
参考文献	143
第9章 面向不确定机器人全局路径规划的多目标粒子群优化方法	147
9.1 研究背景	147
9.2 问题建模	148
9.2.1 环境建模	149
9.2.2 路径性能指标	149
9.2.3 优化目标	152
9.3 所提约束多目标粒子群优化方法	152
9.3.1 粒子编码	152
9.3.2 含约束支配关系	152
9.3.3 粒子个体引导者的更新	153
9.3.4 储备解的更新	153
9.3.5 粒子全局引导者的选择	153
9.3.6 粒子位置的更新	154
9.3.7 算法步骤	155
9.4 实例分析	156
9.4.1 实例1	156
9.4.2 实例2	159
9.4.3 实例3	163
9.5 本章小结	167
参考文献	167
第10章 面向区间收益多项目选址的粒子群优化方法	169
10.1 研究背景	169

10.2	问题建模	170
10.3	模型的精确化	171
10.3.1	P-可信度指标	172
10.3.2	MLP-2 模型的精确化	173
10.4	基于对换变异的粒子群优化求解方法	175
10.4.1	粒子编码	175
10.4.2	粒子解码	176
10.4.3	对换变异	176
10.4.4	算法步骤	177
10.5	实例分析	178
10.5.1	问题描述及算法参数设置	178
10.5.2	精确化方法的可行性分析	182
10.5.3	所提算法的性能分析	183
10.6	本章小结	184
	参考文献	185
附录	部分多目标粒子群优化算法源程序	187
附录 A	基本粒子群优化算法源程序	187
附录 B	第 4 章多目标骨干粒子群优化算法源程序	189
附录 C	第 9 章多目标粒子群机器人路径规划方法源程序	203

第 1 章 多目标粒子群优化入门

在实际应用中人们常遇到需要使多个目标在给定区域上均尽可能最佳的优化问题,如电力经济调度中,在满足负荷需求的条件下需要使发电机运行费用以及污染指数等指标同时最优;项目选址中,在保证经济效益最大化的同时,还需要考虑环境污染和社会效益等其他指标,该类问题称为多目标优化问题。考虑到多目标优化问题在实际生活中的普遍性,学者们提出了许多有效的多目标优化算法,如多目标遗传算法和多目标差分算法等。

借鉴鸟类寻找食物等自然现象而提出的粒子群优化算法,作为一种有效的单目标优化技术,已经得到广大学者的认可。然而,对于各个目标之间互相冲突的多目标优化问题而言,由于问题不再具有唯一的最优解,传统的粒子群优化算法变得不再适用,因此研究用于多目标优化问题的粒子群优化算法十分必要。

本章主要介绍与研究内容相关的背景知识和文献,为后续章节奠定基础。首先,给出多目标优化问题的基本概念,并简述常用的求解方法;其次,介绍基本粒子群优化算法,包括它的发展和基本原理;最后,概况多目标粒子群优化算法的研究进展。

1.1 多目标优化问题

多目标优化问题,又称为多准则优化问题、多性能优化问题或向量优化问题。国际上一般认为它最早是由法国经济学家 Pareto 在 1896 年提出的。

1.1.1 基本概念

由于最小化与最大化问题可以相互转换,本章仅以最小化的多目标优化问题为例,阐述相关概念。

定义 1.1 多目标优化问题(multi-objective optimization problem, MOP) 一个典型的多目标优化问题可定义为发现满足如下条件的决策向量 $\vec{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$:

$$\textcircled{1} x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i = 1, 2, \dots, n, \text{ 其中, } \vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1.1)$$

② J 个等式约束

$$h_j(\vec{x}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (1.2)$$

③ K 个不等式约束

$$g_k(\vec{x}) \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (1.3)$$

④ 同时最小化目标向量函数

$$\vec{f}(\vec{x}) = (f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_M(\vec{x})) \quad (1.4)$$

定义 1.1 中, 函数 $\vec{f}(\vec{x})$ 称为目标函数或适应值函数, $\vec{x}$ 为决策变量, 它的每一个分量值都被两个边界值(下界 x_i^L 和上界 x_i^U) 所约束, 决策变量所有分量的边界值构成了问题的决策空间 $S \in \mathbf{R}^n$, 而 M 个目标函数的输出值构成问题的目标空间 Z 。满足所有约束函数(1.1)~(1.3)的向量 $\vec{x} \in S$ 组成了问题的可行域 $F \in S$, 可行域 F 中满足条件④的解称为问题的可行最优解。

不同于单目标优化问题, 由于 MOP 包含了多个相互冲突的目标函数, 它不再具有唯一的最优解, 其最优解变为一个可能包含无穷多元素的解集。设计多目标优化算法的目标就是求得这个最优解集。为此, 学者们提出了 Pareto 支配和 Pareto 最优解集等概念, 下面将给出相关定义^[1,2]。

定义 1.2 Pareto 支配(Pareto dominance) 对于给定向量 $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_M) \in \mathbf{R}^M$, 它支配或占优向量 $\vec{y} = (y_1, y_2, \dots, y_M) \in \mathbf{R}^M$, 当且仅当

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, M\}, x_i \leq y_i, \text{ 且 } \exists j \in \{1, 2, \dots, M\}, x_j < y_j \quad (1.5)$$

并记为 $\vec{x} < \vec{y}$ 。

以两目标函数为例, 图 1.1 展示了不同解间 Pareto 支配关系。

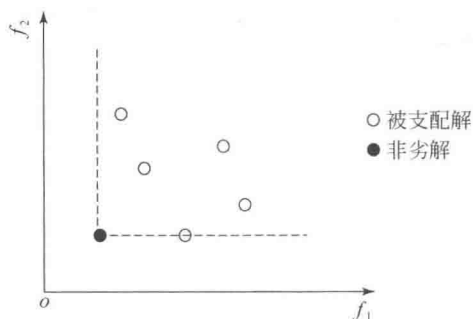


图 1.1 两目标空间上的 Pareto 支配关系

定义 1.3 非被支配解或非劣解(non-dominated solution) 对于集合 $\Gamma \in \mathbf{R}^n$, 如果 Γ 中不存在另一个元素 $\vec{x}'$, 使得 $\vec{f}(\vec{x}') < \vec{f}(\vec{x})$, 那么, 称决策向量 $\vec{x} \in \Gamma$

为一个关于集合 F 的非被支配解或非劣解。

定义 1.4 Pareto 最优 (Pareto optimal) 对于一个可行域为 F 的多目标优化问题 $\vec{f}(\vec{x})$, 一个向量 $\vec{x}^* \in F$ 是 Pareto 最优的, 如果对于任意 $\vec{x} \in F$ 都有

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, M\}, f_i(\vec{x}^*) \leq f_i(\vec{x}), \text{ 且} \\ \exists j \in \{1, 2, \dots, M\}, f_j(\vec{x}^*) < f_j(\vec{x}) \quad (1.6)$$

定义 1.5 Pareto 最优解集 (Pareto optimal set) 对于给定的多目标优化问题 $\vec{f}(\vec{x})$, 定义它的 Pareto 最优解集 F^* 为

$$F^* = \{\vec{x} \in F \mid \neg \exists \vec{x}' \in F, \vec{f}(\vec{x}') < \vec{f}(\vec{x})\} \quad (1.7)$$

定义 1.6 Pareto 前端 (Pareto front) 对于给定的多目标优化问题 $\vec{f}(\vec{x})$, 定义它的 Pareto 前端为

$$PF^* = \{\vec{f}(\vec{x}) = (f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_M(\vec{x})) \mid \vec{x} \in F^*\} \quad (1.8)$$

图 1.2 给出了两目标优化问题中一组解的 Pareto 前端。

对于大多数多目标优化问题而言, 找到所有的 Pareto 最优解是很难或不可能的。在处理多目标优化问题时, 大家普遍接受的方法是, 寻找满足如下条件的 Pareto 最优解集:

(1) 包含足够多的 Pareto 最优解, 通过这些解可以近似给出真实 Pareto 前端的形状。

(2) 无限接近或者已经包含在真正 Pareto 最优解集中。

(3) 所对应的 Pareto 前端应该具有尽可能好的均匀分布性和延展性。

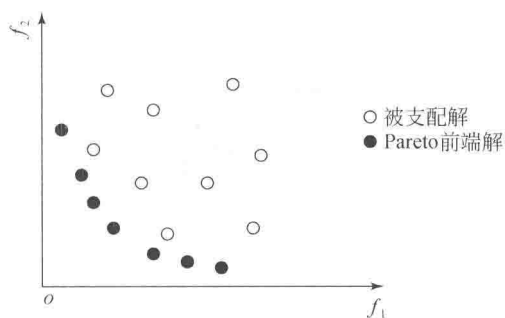


图 1.2 两目标空间上一组解的 Pareto 前端

1.1.2 经典多目标求解方法

到 20 世纪 80 年代中期为止, 人们已经提出了很多用于处理多目标优化问题