

智能优化算法及其 在机械工程中的应用

ZHINENG YOUHUA SUANFA JIQI ZAI
JIXIE GONGCHENG ZHONGDE YINGYONG

张学良 刘丽琴 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

智能优化算法及其 在机械工程中的应用

张学良 刘丽琴 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书结合作者多年来在相关方面的科研和教学工作的积累,以较为通俗简练的语言详细地介绍了智能优化算法中的遗传算法、粒子群优化算法、差异演化算法、模拟植物生长算法和果蝇优化算法及其在机械工程中的应用,以期使读者能够尽快了解和掌握这些算法的基本理论和应用技术。

本书可作为机械工程、系统科学、计算机应用以及其他一些相关专业的研究生及本科生教材,也可以供相关专业的工程技术与科研人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能优化算法及其在机械工程中的应用 / 张学良,
刘丽琴著. —北京:国防工业出版社,2012.9
ISBN 978-7-118-08367-5

I. ①智… II. ①张… ②刘… III. ①最优化算法—
应用—机械工程 IV. ①TH ②0242.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 223248 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京市海淀区四季青印刷厂

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 8 $\frac{3}{4}$ 字数 250 千字

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 59.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

总 序

2012年,太原科技大学将迎来60周年华诞。值此六秩荣庆之际,我校的专家学者推出了这套学术丛书,以此献礼,共襄盛举。

60年前,伴随着新中国的成立,伟业初创,百废待兴,以民族工业为先锋的社会主义现代化建设蓬勃兴起,太原科技大学应运而生。60年来,几代科大人始终心系民族振兴大业,胸怀制造强国梦想,潜心教书育人,勇担科技难题,积极服务社会,为国家装备制造行业发展壮大和社会主义现代化建设做出了积极贡献。四万余名优秀学子从这里奔赴国民经济建设的各个战场,涌现出一大批杰出的科学家、优秀的工程师和知名的企业家。作为新中国独立建设的两所“重型机械”院校之一,今天的太原科技大学已发展成为一所以工业为主,“重大技术装备”领域主流学科特色鲜明,多学科协调发展的教学研究型大学,成为国家重型机械工业高层次人才培养和高水平科技研发的重要基地之一。

太原科技大学一直拥有浓郁的科研和学术氛围,众位同仁在教学科研岗位上辛勤耕耘,硕果累累。这套丛书的编撰出版,定能让广大读者、校友和在校求学深造的莘莘学子共享我校科技百花园散发的诱人芬芳。

愿太原科技大学在新的征途上继往开来、再创辉煌。

谨以为序。

太原科技大学校长 郭勇义

2012年6月

前 言

智能优化算法是人们受自然界或生物界规律的启发,根据自然界或生物界的原理,模仿其规律而设计的求解问题的算法。自然界一直是人类创造力的丰富源泉,人类认识事物的能力来源于自然界的相互作用之中,自然界的许多自适应优化现象不断给人类以启示。几十年来,一些与经典的数学规划原理截然不同的、试图通过模拟自然生态系统机制以求解复杂优化问题的仿生智能优化算法相继被提出和研究,这方面的内容很多,如模拟退火算法、遗传算法、粒子群优化算法、差异演化算法、模拟植物生长算法、果蝇优化算法、人工鱼群算法、蚁群算法、人工神经网络技术、人工免疫算法等智能优化算法。这些算法大大丰富了现代优化技术,也为那些传统优化技术难以处理的组合优化问题提供了切实可行的解决方案。

智能优化算法中每一个个体都是具有经验和智慧的智能体,个体之间存在互相作用机制,通过相互作用形成强大的群体智慧来解决复杂的问题。智能优化算法本质上是一种概率搜索算法,它不需要问题的梯度信息,具有以下不同于传统优化算法的特点。

(1) 群体中相互作用的个体是分布式的,不存在直接的中心主体,不会因为个别个体出现故障而影响群体对问题的求解,具有较强的鲁棒性,在不同的条件和环境下,体现出强大的适应性和有效性。

(2) 每个个体只能感知局部信息,个体的能力或遵循规则非常简单,所以群体智能的实现简单、方便。

(3) 自组织性,即群体表现出来的复杂行为是通过简单个体的交互表现出高度的智能。

(4) 都是一类不确定的算法,这种不确定性体现了自然界的生理机制,是伴随其随机性而来的,在求解某些特定问题时要优于确定性

方法。

(5) 都是一类概率型的算法,其主要步骤都含有随机因素,能有更多的机会获取全局最优解。

(6) 在优化过程中都不依赖于优化问题本身的严格数学性质以及目标函数和约束条件的精确数学描述。

(7) 都是一种基于群体的智能优化算法。

(8) 都具有隐含并行性,能以较少的计算获得较大的收益。

(9) 都具有突现性,其总目标的完成是在群体中个体的进化过程中突现出来的。

(10) 都具有进化性,其个体在复杂的、随机的、时变的环境中,通过自学习不断提高其适应性。

智能优化算法的这些特点为克服优化设计领域所面临的困难提供了有力的支持。

作者多年来从事于智能优化算法如遗传算法、粒子群优化算法、差异演化算法以及模拟植物生长算法和果蝇优化算法的科研和研究生教学工作,这些工作得到了教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20091415110002)、山西省自然科学基金(2008011027-1)、山西省研究生教育改革研究项目(20092016)和山西省研究生教育精品课项目的支持。基于所积累的一些成果和体验,本书力求以较为通俗简练的语言来介绍这些智能优化算法的基本概念、基本原理、算法与改进及其在机械工程中的应用,以期使读者能够尽快了解和掌握这些算法的基本理论尤其是其工程应用方法。

本书的特点是语言简练、通俗、易懂,并注重实用。

本书共分6章。第1章主要简要介绍智能优化算法相关概念;第2章介绍遗传算法的起源与发展简介、遗传算法的理论基础、遗传算法的实现、遗传算法的特点与改进、遗传算法在机械工程中的应用;第3章介绍基本粒子群优化算法、混沌粒子群优化算法、无约束多目标粒子群优化算法、约束多目标粒子群优化算法、基于极坐标的粒子群优化算法、带活力因子的粒子群优化算法、动态自适应惯性权重粒子群优化算法、自适应随机惯性权重粒子群优化算法和粒子群优化算法在机械优化设计中的应用;第4章介绍差异演化算法及其改进、单目标约束优化

差异演化算法、多目标中心差异演化算法、多目标约束中心差异演化算法及在机械优化设计中的应用、混合变量非线性规划问题的差异演化算法及其应用、增强差异演化算法及其应用、自适应差异演化算法及其应用、简单差异演化算法及其应用；第5章介绍模拟植物生长算法的理论基础、模拟植物生长算法的数学模型、模拟植物生长算法的迭代步骤、模拟植物生长算法的仿真实验；第6章介绍果蝇优化算法、应用果蝇优化算法求解极大值与极小值问题、几个典型测试函数的果蝇优化算法仿真测试、果蝇优化算法的工程应用实例。

为保证本书的理论完整性和系统性，在编写过程中也参考了一些同仁学者的相关研究成果，并在参考文献中进行了主要列出，在此作者谨向他们表示由衷的感谢和敬意。

研究生郭晓东、卢青波、刘志恒提供了本书中关于果蝇优化算法和模拟植物生长算法仿真与应用实例的程序代码和计算结果数据，在此向他们表示感谢。

本书的出版时值太原科技大学60周年华诞之际，感谢学校为本书的出版所给予的大力支持。

由于时间紧，再加上作者学识水平有限，本书在内容编排上尚有欠缺之处，同时也难免有错误与不足之处，敬请读者不吝赐教，对此作者不胜感激。

作者

2012年8月于太原

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 群智能的基本概念	3
1.2 群智能思想的起源简介	4
1.3 群智能理论简介	5
1.4 演化算法简介	6
1.5 本书主要内容与安排	7
第 2 章 遗传算法及其应用	8
2.1 遗传算法的起源与发展简介	8
2.1.1 遗传算法的生物学基础	8
2.1.2 遗传算法的提出与发展简介	11
2.2 遗传算法的理论基础	12
2.2.1 遗传算法的基本原理	12
2.2.2 遗传算法的几个基本概念	13
2.2.3 遗传算法的基本算子和数学基础	14
2.3 遗传算法的实现	19
2.3.1 遗传算法的实现	19
2.3.2 遗传算法实现举例	21
2.4 遗传算法的特点与改进	24
2.4.1 遗传算法的特点	24
2.4.2 对简单遗传算法的一些改进	25
2.4.3 几种常见的遗传算法	28
2.4.4 遗传算法应用的几个关键问题	31
2.5 遗传算法在机械工程中的应用	32

2.5.1	基于遗传算法的 Bounc-Wen 迟滞非线性 动力学模型的参数识别方法	32
2.5.2	基于遗传算法的圆柱齿轮变位系数的优化选择	33
2.5.3	基于遗传算法的机器人路径规划	37
第 3 章	粒子群优化算法及其应用	41
3.1	基本粒子群优化算法	41
3.1.1	粒子群优化算法的产生	41
3.1.2	基本粒子群优化算法	43
3.1.3	基本粒子群优化算法的参数选择	44
3.1.4	带惯性权重的粒子群优化算法	45
3.1.5	粒子群优化算法的控制参数分析	46
3.2	混沌粒子群优化算法	47
3.2.1	混沌的一些基本特性	47
3.2.2	混沌映射	48
3.2.3	基于群体适应度方差的混沌粒子群优化算法	52
3.3	无约束多目标粒子群优化算法	59
3.3.1	多目标优化问题的基本概念和术语	59
3.3.2	多目标优化问题的发展及其传统的解决方法	62
3.3.3	无约束多目标粒子群优化算法	65
3.4	约束多目标粒子群优化算法	71
3.4.1	约束优化问题	71
3.4.2	罚函数法	72
3.4.3	基于罚函数法的带约束条件的粒子群优化 算法	75
3.5	基于极坐标的粒子群优化算法	78
3.5.1	基于极坐标的粒子群优化算法的数学描述	79
3.5.2	有关 PPSO 算法的特点与讨论	80
3.5.3	基本粒子群优化算法和 PPSO 算法的测试 结果对比与讨论	81
3.6	带活力因子的粒子群优化算法	90

3.7	一种动态自适应惯性权重粒子群优化算法	93
3.7.1	算法原理	93
3.7.2	算法流程	96
3.7.3	仿真实验和结果	97
3.8	一种自适应随机惯性权重粒子群优化算法	104
3.8.1	算法原理	104
3.8.2	算法流程	105
3.8.3	仿真实验和结果	106
3.9	粒子群优化算法在机械优化设计中的应用	109
3.9.1	圆柱螺旋压缩弹簧优化设计问题描述	109
3.9.2	数学模型的建立	110
3.9.3	PSO 算法在圆柱螺旋压缩弹簧优化 设计中的应用	113
3.9.4	仿真及其结果分析	115
第 4 章	差异演化算法及其应用	118
4.1	差异演化算法及其改进	118
4.1.1	差异演化算法的原理	118
4.1.2	差异演化算法的扩展模式	120
4.1.3	差异演化算法的参数选择	121
4.1.4	差异演化算法的特点	121
4.1.5	差异演化算法的流程图	121
4.1.6	差异演化算法的改进策略	122
4.1.7	数值仿真实验	124
4.2	单目标约束优化差异演化算法	131
4.2.1	机械优化设计的数学模型	132
4.2.2	约束条件处理的一般方法	132
4.2.3	单目标约束优化差异演化算法	133
4.2.4	优化设计实例	137
4.3	多目标中心差异演化算法	141
4.3.1	多目标优化问题描述及相关定义	141

4.3.2	多目标演化算法的关键问题及其 主要策略分析	143
4.3.3	多目标中心差异演化算法	146
4.3.4	算法性能度量	151
4.3.5	仿真实验与结果	152
4.4	多目标约束中心差异演化算法及其在机械优化 设计中的应用	158
4.4.1	多目标约束中心差异演化算法	159
4.4.2	仿真实验与结果	160
4.4.3	工程实例	165
4.5	混合变量非线性规划问题的差异演化算法及其应用 ...	171
4.5.1	差异演化算法的一种改进策略	171
4.5.2	仿真实验及工程实例	173
4.6	增强差异演化算法及其应用	176
4.6.1	增强的变异操作	176
4.6.2	约束的处理方法	177
4.6.3	增强的差异演化算法	177
4.6.4	仿真实验与结果	178
4.6.5	圆柱压缩螺旋弹簧优化设计	180
4.7	一种自适应差异演化算法及其应用	181
4.7.1	种群差异度	181
4.7.2	自适应缩放因子	181
4.7.3	自适应交叉率	182
4.7.4	仿真实验与结果	183
4.7.5	焊接悬臂梁优化设计	188
4.8	一种简单差异演化算法及其应用	189
第5章	模拟植物生长算法及其应用	192
5.1	模拟植物生长算法的理论基础	192
5.2	模拟植物生长算法的数学模型——模拟植物向 光性的概率生长模型	194

5.3	模拟植物生长算法的迭代步骤	197
5.3.1	无约束整数规划	197
5.3.2	模拟植物生长算法的实施过程	197
5.3.3	有约束的情况	201
5.4	仿真实验	202
第6章	果蝇优化算法及其应用	206
6.1	果蝇优化算法	206
6.1.1	演化计算与群体智能	206
6.1.2	果蝇优化算法的基本观念	207
6.2	应用果蝇优化算法求解极大值与极小值问题	208
6.2.1	应用果蝇优化算法求解极大值问题	208
6.2.2	应用果蝇优化算法求解极小值问题	212
6.2.3	果蝇优化算法求解全局极大值	215
6.3	几个典型测试函数的果蝇优化算法仿真测试	219
6.4	果蝇优化算法的工程应用实例	236
6.4.1	起重机箱形主梁的优化设计	236
6.4.2	压力容器的优化设计	245
参考文献		254
致谢		256

第1章 概述

机械设计的最终目的是在满足生产的工艺性、使用的可靠性和安全性、且费用最省及误差最小的条件下使所设计的产品具有较好的性能。由于传统设计方法所提供的方案非常有限,要想取得最优方案几乎是不可能的。一方面,随着科学技术水平和生产能力的不断提高,一些机械产品日趋复杂化、大型化和精密化,许多设计问题没有成熟的先例可供参考,这时采用传统的设计方法更是无能为力。另一方面,随着新材料、新工艺、新技术的不断出现,机械产品的更新换代周期也日益缩短,这就要求加快设计进程、缩短设计周期,同时提高设计质量。因此,如何提高设计的质量,发展优化设计理论与方法等现代设计理论与方法,改进设计技术和方法就成为一个重要研究内容。

优化设计自 20 世纪 60 年代以来已取得了很大进展和很多的理论研究与应用成果。现有的优化方法主要可以分为两大类:传统的确定性优化方法和智能优化算法。

传统的确定性优化方法,如最速下降法、牛顿法、共轭梯度法、单纯形法、变尺度法、序列二次规划算法、惩罚函数法等,一般具有完善的数学基础和严格的数学定义,是一类应用比较广泛的优化方法。

传统的确定性优化方法求解约束非线性优化问题的方法大致分为三类:第一类是将约束问题转化为无约束非线性问题来进行求解;第二类是在每个迭代点处构造一个二次函数用于逼近目标函数,用线性函数逼近约束函数,每次迭代时构造一个二次规划子问题,把约束优化问题转化为二次规划子问题来进行求解,将子问题的解作为本次迭代的搜索方向,沿搜索方向寻优得到新的迭代点,使得迭代序列最终逼近原约束问题的最优解;第三类方法是可行方向法。

传统的确定性优化方法具有以下难以克服的局限性。

- (1) 单点运算方式大大限制了计算效率的提高。
- (2) 向改进方向移动易使算法陷入局部最优,失去全局搜索的能力。
- (3) 停止条件只是局部最优性的条件。
- (4) 传统的优化方法要求目标函数是连续可微的解析函数,有些甚至要求是高阶可微的,因此不适于求解离散、不连续、无导数等优化问题。
- (5) 计算复杂性一般较大。
- (6) 对初始点的选择很敏感。

随着人们所面临问题的日益多元化、复杂化,传统的确定性优化方法在计算速度、收敛性、初值敏感性等方面都远远达不到实际问题的优化设计要求,因此寻找具有快速的计算速度、好的收敛性能、对初值的选取不敏感以及对优化问题的目标函数和约束函数无函数性质上的要求等特点的高效优化算法,成了人们新的研究目标和方向。

受自然界自适应优化现象的启发,并且伴随着人工智能的发展,模拟生物进化过程、人类思维、物理智能、生物智能行为等并以此开发求解复杂优化问题的智能优化算法越来越受到人们的关注。

智能优化算法主要是指 20 世纪 80 年代以来,人们针对实际工程问题的复杂性、约束性、非线性、多峰值等困难,为了更好地寻找满足条件的最优解,提高优化算法的性能,同时克服传统优化方法的局限性而提出的一类模仿人类和生物繁衍、进化以及信息传播过程等的新颖的最优化计算方法,如遗传算法、进化规划、模拟植物生长算法、蚁群算法、粒子群(或微粒群)优化算法、差异演化(或差分进化)算法、人工鱼群算法、果蝇优化算法等。这些算法是通过模拟或揭示某些自然现象或过程而提出并得以发展的,其思想和内容涉及数学、生物进化、社会行为、人工智能和统计力学等方面。

智能优化算法可以分为两类:一类是模拟生物进化等的算法,如遗传算法、进化规划、模拟植物生长算法等;另一类是基于群体智能的算法,如蚁群算法、粒子群(或微粒群)优化算法、差异演化(或差分进化)算法、人工鱼群算法、果蝇优化算法等。尽管它们的表现形式和原理各

不相同,但它们都有一些共同的特征,即都是群体搜索、随机搜索,具有并行性和全局性。

1.1 群智能的基本概念

群智能(Swarm Intelligence, SI)的概念最早由 Beni、Hackwood 和 Wang 在分子自动机系统中提出。1999 年, Bonabeau、Dorigo 和 Theraulaz 在《Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems》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。

这里, Swarm 可被描述为一些相互作用相邻个体的集合体, 蜂群、蚁群、鸟群、鱼群、果蝇群都是 Swarm 的典型例子。一只蜜蜂或蚂蚁的行为能力非常有限,它几乎不可能独立存在于自然世界中,而多个蜜蜂或蚂蚁形成的 Swarm 则具有非常强的生存能力,且这种能力不是多个个体之间的能力通过简单叠加所获得的。社会性动物群体所拥有的这种特殊性能帮助个体很好地适应环境,个体所能获得的信息远比它通过自身感觉器官所取得的多,其根本原因在于个体之间存在着信息交互能力。信息的交互过程不仅仅在群体内传播了信息,而且群内个体还能处理信息,并根据所获得的信息(包括环境信息和附近其他个体的信息)改变自身的一些行为模式和规范,这样就使得群体涌现出一些单个个体所不具备的能力和特性,尤其是对环境的适应能力。这种对环境变化所具有的适应能力可以认为是一种智能,也就是说动物个体通过聚集成群而涌现出了智能。因此, Bonabeau 将群智能的定义进一步推广为无智能或简单智能的主体通过任何形式的聚集协同而表现出智能行为的特性。这里我们关心的不是个体之间的竞争,而是它们之间的协同。

群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(Agent),这组主体通过合作进行分布式的问题求解”,而群智能则是指“无智能的主体通过合作表现出智能行为的特性”。

1.2 群智能思想的起源简介

群智能思想的产生主要源于复杂适应系统理论以及人工生命的研究。复杂适应系统(Complex Adaptive System, CAS)理论是在 1994 年由 Holland 教授正式提出的。CAS 理论中成员称为具有适应性的主体,简称主体。主体的适应性,是指它能够与环境以及其他主体进行交流,在这种交流的过程中“学习”或“积累经验”,并且根据学到的经验改变自身的结构和行为方式。整个系统的演变或进化,包括新层次的产生、分化和多样性的出现,新的、聚合而成的、更大主体的出现等,都是在这个基础上出现的。CAS 理论具有以下四个基本特点。

(1) 主体是主动的、活的实体。具有适应性的主体的概念把个体主动性提高到了系统进化基本动因的位置,从而成为研究与考察宏观行为的出发点。

(2) 个体与环境(包括个体之间)之间的相互影响、相互作用是系统演变和进化的主要动力。相互作用是“可记忆”的,它表现为进化过程中每个个体的结构和行为方式的变化,以不同的方式“存储”在个体内部。

(3) 这种方法不像许多其他的方法那样,把宏观和微观截然分开,而是把它们有机地联系起来。

(4) 这种建模方法还引进了随机因素的作用,使它具有更强的描述和表达能力。随机因素的影响不仅影响状态,而且影响组织结构和行为方式。具有主动性的个体会接受教训,总结经验,并且以某种方式把“经历”记住,使之“固化”在自己以后的行为方式中。正因如此,CAS 理论提供了模拟生物、生态、经济、社会等复杂系统的巨大潜力。

人工生命是用来研究具有某些生命基本特征的人工系统。近年来,人工生命的研究发展非常快,在某些方面的研究已与传统的生物学形成了互补。人工生命包括两方面的内容:①如何利用计算技术研究生物现象;②如何利用生物技术研究计算问题。第二部分内容的研究中,已经有了很多源于生物现象的计算技巧。例如,人工神经网络是简化的大脑模型,遗传算法是模拟基因进化的过程,目前这一类计算技术统称为自然计算。群智能属于自然计算中的一类,它模拟另一种生

物系统——社会系统,更确切地说,是模拟由简单个体组成的群落与环境以及个体之间的互动行为,这些模拟系统利用局部信息,从而可能产生不可预测的群体行为。

1.3 群智能理论简介

James Kennedy 和 Russell C. Eberhart 在 2001 年出版的《Swarm Intelligence》是群智能发展的一个重要里程碑。认为构建一个群智能系统应满足五条基本原则。

(1) Proximity Principle: 群内个体具有能执行简单的时间或空间上的评估和计算的能力。

(2) Quality Principle: 群内个体能对环境(包括群内其他个体)的关键性因素的变化做出响应。

(3) Principle of Diverse Response: 群内不同个体对环境中的某一变化所表现出的响应行为具有多样性。

(4) Stability Principle: 不是每次环境的变化都会导致整个群体的行为模式的改变。

(5) Adaptability Principle: 环境所发生的变化中,若出现群体值得付出代价的改变机遇,群体必须能够改变其行为模式。

这五条基本原则目前已成为群智能的最基本理论,现有的群智能方法和策略都符合这些原则。

人的智能是源于社会性的相互作用,文化和认知是人类社会性不可分割的重要部分,这一观点成为群智能发展的基石。群智能研究的更进一步目标是对人类思想变化的社会行为的模拟。人类心理中存在着群体性、习惯性、一致性,常常是习惯性地遵循一些习俗和规则。无论什么时候,人们思想和行为总是因相互影响而变得非常近似,道德规范以及文化的形成就是这种通过相互间影响而导致近似的结果。人类的社会思想行为并不简单类似鸟群或鱼群的行为,人类思想的形成过程是一种在高维认知空间的探索历程。两种思想意见在认知空间上聚集到一点上,称为“一致”或“认同”,而不是鸟群或鱼群系统中的“碰撞”。如果某人认同认知空间某个点,那么就努力靠近它,反之则尽量