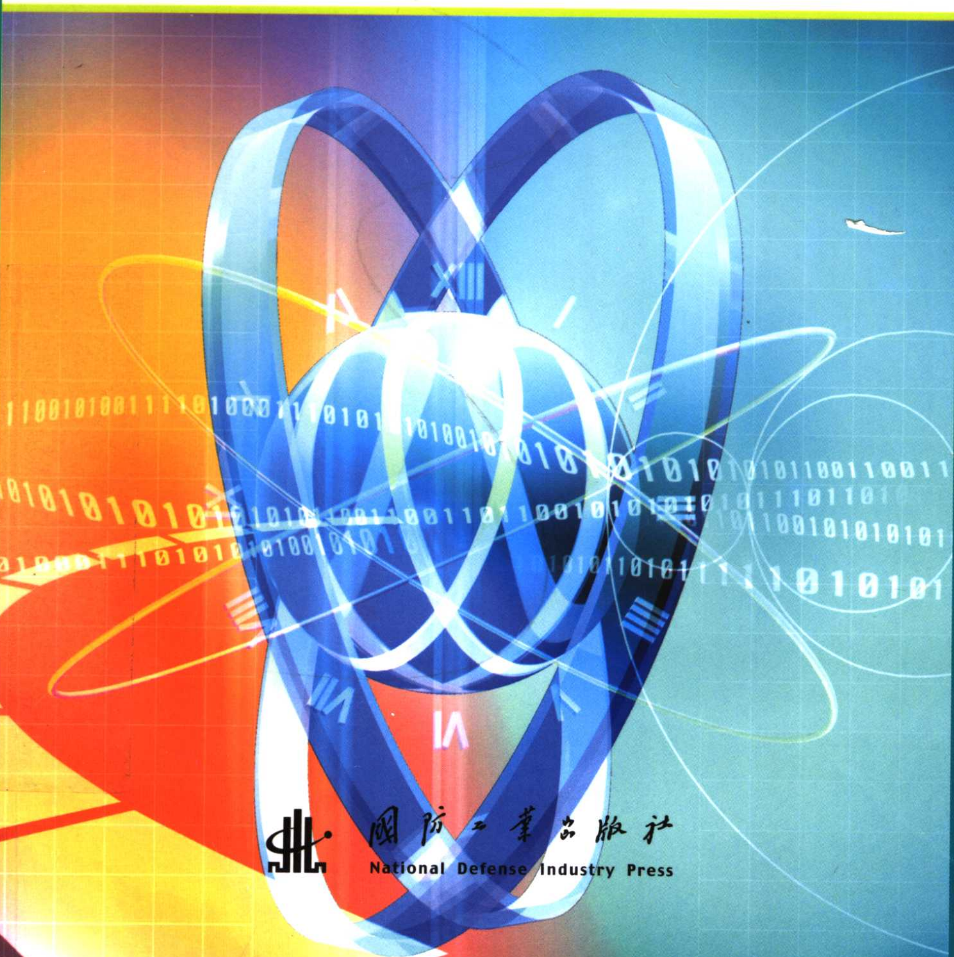
智能优化算法及其应用

黄友锐 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

智能优化算法及其应用

黄友锐 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

智能优化算法及其应用/黄友锐著.—北京:国防工业出版社,2008.1

ISBN 978-7-118-05413-2

Ⅰ.智... Ⅱ.黄... Ⅲ.最优化算法 Ⅳ.0242.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 166880 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 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6½ 字数 165 千字

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 20.00 元

国防书店:(010)68428422 发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535 发行业务:(010)68472764

前　言

优化技术是一种以数学为基础，用于求解各种工程问题优化解的应用技术。作为一个重要的科学分支，它一直受到人们的广泛重视，并在诸多工程领域得到迅速推广和应用，如系统工程、组合优化、函数优化、生产调度、VLSI 技术和计算机工程等。鉴于实际工程问题的复杂性、约束性、非线性、多极值、建模困难等特点，寻求一种适合于大规模且具有智能特征的优化算法已成为优化技术的一个主要研究目标和引人注目的研究方向。

生命科学与工程科学的相互交叉、相互渗透和相互促进是近代科学技术发展的一个显著特点。智能优化算法是通过模拟或揭示某些自然现象或过程发展而来的，其思想和内容涉及数学、物理学、生物学和计算机科学等方面，为解决复杂问题提供了新的思路和手段。智能优化算法具有全局的、并行高效的优化性能，鲁棒性、通用性强，无需问题特殊信息等优点，已广泛用于计算机科学、优化调度、运输问题、组合优化、工程优化设计等领域，引起了国内外学者的广泛重视，并掀起了该领域的研究热潮。

本书是作者多年来在智能优化算法及其应用所进行的一系列深入研究的基础上撰写而成的，同时吸收了国内外许多具有代表性的最新研究成果。感谢国内外该领域的各位专家所做的工作为本书提供了部分素材。全书取材新颖，覆盖面广，深入浅出，注重理论联系实际，力图体现国内外在这一学术领域的最新研究进展。

全书共 6 章，每章自成体系。第 1 章为绪论，主要介绍优化问题和优化算法及其分类。第 2 章、第 3 章、第 4 章和第 5 章分别介

绍了遗传算法、免疫克隆选择算法、粒子群算法和蚁群算法的优化流程、机制与特点、收敛性理论、参数选取与实现技术、算法改进等内容，并对改进的算法（自适应遗传算法、免疫遗传算法、量子遗传算法、自适应克隆算法、自适应小生境克隆算法、小生境粒子群算法和小生境蚁群算法）进行了仿真研究和参数取值分析，结果表明各种改进算法在函数优化问题和 PID 参数整定方面都取得了较好效果且算法具有较强的收敛性。第 6 章首先介绍量子计算的研究进展，进而介绍量子计算的实现过程，并把量子计算应用到固定费用运输问题。最后，本书在附录中给出了主要算法的源代码和相应的测试函数，便于读者使用和研究。

与作者共同研究的人员有凌六一、朱君、唐超礼、章魁、王爽、曲立国、田一鸣等研究生。特别需要指出的是书中第 5 章和附录是由唐超礼硕士撰写的，谨此致谢。本书在付印出版过程中得到了安徽理工大学专著出版基金、安徽理工大学科研处和电气与信息工程学院的大力支持，在此一并表示诚挚的谢意。

本书可作为与优化相关专业的师生、研究人员以及工程技术人员的参考书。由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，诚望读者批评指正。

著　者

2007 年 8 月

目　录

第1章 绪 论

1.1 优化算法及其分类

所谓优化算法，其实就是一种搜索过程或规则，它是基于某种思想和机制，通过一定的途径或规则来得到满足用户的问题的解。就优化机制与行为来分，目前工程中常用的优化算法主要可分为：经典优化算法、构造型优化算法、智能优化算法和混合型优化算法。

1. 经典优化算法

包括线性规划、动态规划、整数规划和分枝定界等运筹学中的传统算法，其算法计算复杂性一般很大，只适于求解小规模问题。

2. 构造型优化算法

用构造的方法快速建立问题的解，通常算法的优化质量差，难以满足工程需要。比如，调度问题中的典型构造方法有：Johnson法、Palmer法、Gupta法、CDS法、Daunenbring的快速接近法、NEH法等。

3. 智能优化算法

智能优化算法是通过模拟或揭示某些自然现象或过程发展而来的，与普通的搜索算法一样都是一种迭代算法，对问题的数学描述不要求满足可微性、凸性等条件，是以一组解(种群)为迭代的初始值，将问题的参数进行编码，映射为可进行启发式操作的数据结构，仅用到优化的目标函数值的信息，不必用到目标函数的导数信息，搜索策略是结构化和随机化的(概率型)，其优点是：具有全局的、并行高效的优化性能，鲁棒性、通用性强等。智能优化算法的适用范围非常广泛，特别适用大规模的并行计算。

4. 混合型算法

指上述各算法从结构或操作上相混合而产生的各类算法。

优化算法当然还可以从别的角度进行分类,如确定性算法和不确定性算法,局部优化算法和全局优化算法,普通搜索算法与现代启发式优化算法(智能优化算法)等。

1.2 最优化问题及其分类

随着生产、经济、技术的发展,在实际工作中,人们常常会遇到下面这样一些问题。

(1) 在安排生产计划方面,如何在现有的人力、物力等条件下,合理安排生产,使总生产和总利润最高。

(2) 在生产工艺确定方面,如何在保证产品质量的前提下,选择合理的操作方式,使操作费用最低。

(3) 在产品设计方面,如何选择参数使设计既满足要求成本又最低。

(4) 在配料方面,如何合理配料,在保证质量要求的前提下使成本最低。

(5) 在资源分配中,如何使分配的方案既能满足要求,又能取得较好的经济效益。

(6) 在城市规划和工厂布局方面,如何合理布局才能既方便群众又利于城市各行业及工厂的发展。

(7) 在交通运输方面,如何在保证安全行驶的条件下,时间最省;或如何选择合理的路线,使运输费用最低。

(8) 在农业方面,如何合理选择生产条件,使农业生产周期最短或农产品产量最高。

(9) 在林业方面,如何合理建造防护林带,使之既能阻挡风沙,经济又最省;或如何合理砍伐森林,使成材的木料最多。

(10) 在商业方面,如何合理组织货源,既能满足顾客的需求,又使资金周转最快或总利润最高。

(11) 在国防方面，如多级火箭发射，如何在规定的时间内，烧完规定的燃料，使达到的速度最大；或在规定的时间内，达到某个速度，而燃料最省；又如潜艇最佳速沉降，如何使之在限定的条件下下沉并到达预定的深度且时间最短。

诸如这类问题，就是工程应用中的最优化问题，它们的共同点都是从多个可能的方案中选出最合理的、能实现预定最优目标的方案，这个方案称为最优方案。长期以来，人们为了得到最优方案进行了不断的研究和探索，以期望找到科学、合理的求解方法。寻找最优方案的方法称为最优化方法，利用最优化方法解决最优化问题的技术称为最优化技术。

优化方法涉及的工程领域很广，问题种类与性质繁多。归纳起来，最优化问题可分为函数优化问题和组合优化问题两大类，其中函数优化的对象是一定区间内的连续变量，而组合优化的对象则是解空间中的离散状态。

1.2.1　函数优化问题

函数优化问题通常可描述为：令 S 为 R_n 上的有界子集(即变量的定义域)，$f: S \to R$ 为 n 维实值函数，所谓函数 f 在 S 域上全局最小化就是寻求点 $X_{\min} \in S$ 使得 $f(X_{\min})$ 在 S 域上全局最小，即 $\forall X \in S: f(X_{\min}) \leqslant f(X)$。

算法的性能比较通常是基于一些称为 Benchmark 的典型问题展开的。就函数优化问题而言，目前文献中常用的 Benchmark 问题如下：

(1) Sphere Model

$$f_1(X) = \sum_{i=1}^{30} x_i^2, |x_i| \leqslant 100$$

其最优状态和最优值为

$$\min(f_1(X^*)) = f_1(0,0,\cdots,0) = 0$$

(2) Schwefel's Problem 1.2

$$f_2(X)=\sum_{i=1}^{30}(\sum_{j=1}^{i}x_i)^2,\ |x_i|\leqslant 100$$

其最优状态和最优值为

$$\min(f_2(X^*))=f_2(0,0,\cdots,0)=0$$

(3) Schwefel's Problem 2.21

$$f_3(X)=\max_{i=1}^{30}\{|x_i|\},\ |x_i|\leqslant 100$$

其最优状态和最优值为

$$\min(f_3(X^*))=f_3(0,0,\cdots,0)=0$$

(4) Schwefel's Problem 2.22

$$f_4(X)=\sum_{i=1}^{30}|x_i|+\prod_{i=1}^{30}|x_i|,\ |x_i|\leqslant 10$$

其最优状态和最优值为

$$\min(f_4(X^*))=f_4(0,0,\cdots,0)=0$$

(5) Generalized Rastrigin's Function

$$f_5(X)=\sum_{i=1}^{30}[x_i^2-10\cos(2\pi x_i)+10],\ |x_i|\leqslant 5.12$$

其最优状态和最优值为

$$\min(f_5(X^*))=f_5(0,0,\cdots,0)=0$$

(6) Generalized Griewank Function

$$f_6(X)=\frac{1}{4000}\sum_{i=1}^{30}x_i^2-\prod_{i=1}^{30}\cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right)+1,\ |x_i|\leqslant 600$$

其最优状态和最优值为

$$\min(f_6(X^*))=f_6(0,0,\cdots,0)=0$$

(7) Six-Hump Camel-Back Function

$$f_7(X)=4x_1^2-2.1x_1^4+\frac{x_1^6}{3}+x_1x_2-4x_2^2+4x_2^4,\ |x_i|\leqslant 5$$

其最优状态和最优值为

$$\min(f_7(X^*)) = f_7(0.08983, -0.7126) = f_7(-0.08983, 0.7126) = -1.0316285$$

1.2.2 组合优化问题

组合优化问题通常可描述为：令 $\Omega = \{s_1, s_2, \cdots, s_n\}$ 为所有状态构成的解空间，$C(s_i)$ 为状态 s_i 对应的目标函数值，要求寻找最优解 s^*，使得 $\forall s_i \in \Omega, C(s^*) = \min C(s_i)$。组合优化往往涉及排序、分类、筛选等问题，它是运筹学的一个重要分支。

典型的组合优化问题有旅行商问题(Traveling Salesman Problem, TSP)、加工调度问题(scheduling problem，如 Flow－shop，Jop－shop)、0－1 背包问题(knapsack problem)、装箱问题(bin packing problem)、图着色问题(graph coloring problem)、最小生成树问题等。

1. 旅行商问题

TSP 问题描述十分简单，简言之就是寻找一条最短的遍历 n 个城市的途径，或者说搜索整数子集 $X = \{1, 2, \cdots, n\}$ (X 的元素表示对 n 个城市的编号)的一个排列 $\pi(X = \{v_1, v_2, \cdots, v_n\})$，使 $T^d = \sum_{i=1}^{n-1} d(v_i, v_{i+1}) + d(v_i, v_n)$ 取最小值。式中的 $d(v_i, v_{i+1})$ 表示城市 v_i 到城市 v_{i+1} 的距离。

2. 加工调度问题

Job－shop 问题是一类较 TSP 更为复杂的典型加工调度问题，是许多实际问题的简化模型。一个 Jop－shop 问题可描述为：n 个工件在 m 台机器上加工，O_{ij} 表示第 i 个工件在第 j 台机器上的操作，相应的操作时间 T_{ij} 为已知，事先给定各工件在各机器上的加工次序，使加工性能指标达到最优。在 Job－shop 问题中，除技术约束外，通常还假定每一时刻每台机器只能加工一个工件，且每个工件只能被一台机器所加工，同时加工过程为不间断。若各工件的技术约束条件相同，一个 Job－shop 问题就转化为较简单的 Flow－shop 问题。进而，若各机器上各工件的加工次序也相

同,则问题可进一步转化为置换 Flow-shop 问题。

3. 0-1 背包问题

0-1 背包问题:给出几个尺寸为 $s_1, s_2, \cdots, s_n$ 的物体和容量 C 的背包,此处 $s_1, s_2, \cdots, s_n$ 和 C 都是正整数;要求找出 n 个物件的一个子集使其尽可能地填满容量为 C 的背包。用数学形式可以更精确地描述如下:

$$\text{最大化} \quad \sum_{i=1}^{n} s_i x_i$$

$$\text{满足:} \sum_{i=1}^{n} s_i x_i \leqslant C$$

$$x_i \in \{0,1\}, 1 \leqslant i \leqslant n$$

还有一种更为广义的背包问题,它比上面的描述更为有用,其输入由两个向量 $\boldsymbol{C} = (s_1, s_2, \cdots, s_n)$ 和 $\boldsymbol{P} = (p_1, p_2, \cdots, p_n)$ 组成。设 X 为一整数集合,即 $X = 1, 2, 3, \cdots, n$, T 为 X 的子集,则问题就是找出满足约束条件 $\sum_{i \in T} s_i \leqslant C$,而使 $\sum_{i \in T} p_i$ 获得最大的子集 T,即求 s_i 和 p_i 的下标子集。在应用问题中,设 S 的元素是 n 项经营活动各自所需的资源消耗,C 是所能提供的资源总量,P 的元素是人们从每项经营活动中得到的利润或收益,则背包问题就是在资源有限的条件下,追求总的最大收益的资源有效分配问题。广义背包问题可以数学形式更精确地描述如下:

$$\text{最大化} \quad \sum_{i=1}^{n} p_i x_i$$

$$\text{满足:} \sum_{i=1}^{n} s_i x_i \leqslant C$$

$$x_i \in \{0,1\}, 1 \leqslant i \leqslant n$$

背包问题在计算理论中属于 NP——完全问题,其计算复杂度为 $O(2^n)$;若允许物件可以部分地装入背包,即允许 x_i 可取从 0.00~1.00 闭区间上的实数,则背包问题就简化为极简单的 P 类问题,此时计算复杂度为 $O(n)$。

4．装箱问题

即如何以个数最少的尺寸为1的箱子装入 n 个尺寸不超过1的物品。

5．图着色问题

对于 n 个顶点的无环图G，要求对其各个顶点进行着色，使得任意两个相邻的顶点都有不同的颜色，且所用颜色种类最少。

6．最小生成树问题

最小生成树问题（Minimum Spanning Tree Problem，MSTP）在组合优化中具有悠久的历史。Boruvka于1926年首次提出该问题，目的是寻找电力线网络最经济的布局。此后最小生成树问题被广泛应用于许多组合优化问题中，比如运输问题、通信网络设计、分布式系统等。

考虑连通图 $G=(V,E)$，其中 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$，是顶点（vertices）的有限集合，$E=\{e_1,e_2,\cdots,e_m\}$ 是边（edge）的有限集合。边将顶点之间连接起来。每个边有一个正实数权重 $W=\{w_1,w_2,\cdots,w_m\}$ 用来表示距离或费用。最小生成树问题就是寻找图G中连接所有顶点的具有最小权重的子图。

设 x 为一个二进制决策变量。如果边 e_i 被选中，则 $x_i=1$，否则 $x_i=0$。设 T 代表图G的所有生成树的集合。最小生成树问题数学上的表示为

$$\min\left\{z(x)=\sum_{i=1}^{m}w_ix_i \mid x\in T\right\}$$

人们对最小生成树问题的算法进行了大量的研究，产生了多种快速算法。这些算法可以在近似线性的时间复杂度内进行求解，时间复杂度与边的数量或顶点数量相关。

显然，上述问题描述均非常简单，并且有很强的工程代表性，但最优化求解很困难，其主要原因是所谓的“组合爆炸”。比如，聚类问题的可能划分方式有 $\frac{k^n}{k!}$ 个，Job-shop问题的可能排列方式有 $(n!)m$ 个，基于置换排列描述的 n 城市TSP问题有 $n!$ 种可