

多目标优化方法

在材料成型中的应用

马劲红 陈伟 李娟 张利亚 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

多目标优化方法 在材料成型中的应用

马劲红 陈伟 李娟 张利亚 著



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2014

内 容 简 介

本书共分8章。第1章主要介绍了遗传算法的生物学基础、发展及应用；第2章介绍了人工神经网络的发展、人工神经元和神经网络的基本概念；第3章介绍了模糊数学的发展、模糊集及模糊数学模型；第4章介绍了多目标优化发展、概念、求解方法及演化算法和多目标优化的应用；第5章利用多目标遗传算法优化了棒材连轧孔型设计；第6章应用多目标遗传算法和有限元相结合的优化方法优化了波纹轨腰钢轨的波纹参数，优化了异型坯连铸二冷配水方案及万能型钢轧机机架圆角；第7章利用BP-NSGA相结合的优化方法优化了万能型钢轧机机架圆角；第8章利用模糊综合评判方法优化了Y型轧机轧辊参数。

本书适合研究生和从事材料成型的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

多目标优化方法在材料成型中的应用/马劲红等著. —北京:
冶金工业出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-5024-6651-0

I. ①多… II. ①马… III. ①工程材料—成型 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第167642号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 常国平 美术编辑 杨帆 版式设计 孙跃红

责任校对 王佳祺 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6651-0

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；北京百善印刷厂印刷

2014年8月第1版，2014年8月第1次印刷

148mm×210mm；4.875印张；139千字；145页

28.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题，本社营销中心负责退换)

前 言

随着科学技术的发展，现代设计方法已被广泛采用。优化设计是现代设计方法的重要内容之一，它以现代演化算法为基础，以计算机为工具，在充分考虑多种设计约束的前提下，寻求满足预定目标的最佳设计方案。现在工程技术人员所面临的优化设计问题往往为多目标优化设计问题。把优化设计用于材料成型中，无论对于设备设计还是工艺设计，都可以缩短设计周期，降低设备生产成本，优化材料成型工艺过程，最大限度地降低生产成本，提高产品性能，具有重要的理论意义和较大的经济价值。

本书将多目标优化方法用于优化材料成型设备及工艺，对于从事设备设计和制订工艺过程的工程人员，具有一定的参考价值。全书共分8章。第1章主要介绍了遗传算法的生物学基础、发展及应用；第2章介绍了人工神经网络的发展、人工神经元和神经网络的基本概念；第3章介绍了模糊数学的发展、模糊集及模糊数学模型；第4章介绍了多目标优化发展、概念、求解方法及演化算法和多目标优化的应用；第5章利用多目标遗传算法优化了棒材连轧孔型设计；第6章应用多目标遗传算法和有限元相结合的优化方法优化了波纹轨腰钢轨的波纹参数，优化了异型坯连铸二冷配水方案以及万能型钢轧机机架圆角；第7章利用BP-NSGA相结合的优化方法优化了万能型钢轧机机架圆角；第8章利用模糊综合评判方法优化了Y型轧机轧辊参数。

本书由马劲红、陈伟、李娟、张利亚著。其中，第 6.6 节由陈伟著，第 7.1 节由李娟著，第 8.1~8.3 节由张利亚著，其余章节由马劲红著。

本书在写作过程中得到了燕山大学张文志教授的指导和河北联合大学冶金与能源学院研究生陶彬的帮助，特此表示感谢！

由于写作时间仓促和著者水平所限，书中难免存在不妥之处，恳请专家和读者批评指正。

作 者

2014 年 5 月于河北联合大学

目 录

1 遗传算法	1
1.1 遗传算法的生物学基础	1
1.1.1 遗传与变异	1
1.1.2 进化	2
1.1.3 遗传与进化的系统观	3
1.2 遗传算法的发展	3
1.3 遗传算法的特点	5
1.4 遗传算法的应用	6
1.5 遗传算法优化	9
1.5.1 遗传算法优化的基本原理和步骤	9
1.5.2 遗传算法优化的特点	13
2 人工神经网络	16
2.1 人工神经网络简介	16
2.2 人工神经网络发展历史	17
2.3 人工神经元模型	18
2.3.1 生物神经元的结构	18
2.3.2 人工神经元模型	19
2.4 神经网络基本概念	21
2.4.1 典型的神经网络结构	21

2.4.2	学习方式	22
2.4.3	学习算法	23
2.4.4	BP 神经网络	25
2.5	人工神经网络的技术特性及优势	29
3	模糊数学	30
3.1	模糊数学的发展	30
3.2	模糊集	32
3.2.1	模糊集合的相关概念	32
3.2.2	模糊子集的定义	32
3.2.3	截集	33
3.3	模糊数学模型	33
3.3.1	对称性模糊优化数学模型	33
3.3.2	非对称性模糊优化数学模型	34
3.3.3	水平截集法	35
3.3.4	水平截集法的改进	36
3.3.5	基于二级模糊评判理论确定最优水平值 λ^* 的方法	36
4	多目标优化	39
4.1	多目标优化问题概述	39
4.2	多目标优化的基本概念	41
4.3	传统多目标优化问题求解方法	44
4.3.1	求解方法	44
4.3.2	局限性	48
4.4	求解多目标问题的演化算法	48
4.4.1	求解多目标问题演化算法的发展过程	48

4.4.2	主要算法	49
4.4.3	按照适应度和选择方式进行分类	53
5	多目标遗传算法	55
5.1	多目标遗传算法的优化机理	55
5.2	多目标遗传算法的常用求解方法	56
5.3	基于 MATLAB 遗传工具箱的优化方法	58
5.3.1	MATLAB 遗传算法工具箱的通用函数	58
5.3.2	MATLAB 遗传算法的终止	61
5.4	多目标遗传算法计算步骤	61
5.5	棒材孔型多目标遗传优化设计	62
5.5.1	孔型多目标优化设计中的目标函数	63
5.5.2	棒材孔型多目标优化设计的约束条件	64
5.5.3	惩罚函数法	70
5.5.4	棒材全连轧孔型优化设计	71
6	多目标遗传算法和有限元法相结合的优化方法及应用	80
6.1	多目标遗传算法和有限元法相结合的优化思想	80
6.2	多目标遗传算法和有限元程序的结合方法	81
6.2.1	APDL 语言简介	81
6.2.2	多目标遗传算法和有限元法相结合的方法	82
6.3	多目标遗传算法和有限元法相结合程序的计算步骤	84
6.4	多目标遗传算法和有限元法相结合的程序	85
6.5	多目标遗传算法和有限元法相结合优化波纹轨 腰钢轨的波纹参数	85
6.5.1	优化的有限元模型	86

6.5.2	优化方法	87
6.5.3	优化分析	88
6.6	多目标遗传算法和有限元法相结合优化连铸坯冷却参数	90
6.6.1	优化数学模型	90
6.6.2	两种优化算法	92
6.6.3	异型坯连铸二冷配水方案优化结果	93
6.6.4	算法比较	95
6.7	多目标遗传算法和有限元法相结合优化机架圆角	96
6.7.1	优化的有限元模型	96
6.7.2	优化方法	97
6.7.3	优化分析	97
7	BP-NSGA 相结合的优化方法	100
7.1	BP-NSGA 相结合的优化思想	100
7.1.1	非支配分类遗传算法	100
7.1.2	带精英策略的非支配分类遗传算法	100
7.1.3	基于 BP 神经网络的预测模型	101
7.1.4	BP 神经网络和带精英策略的非支配分类遗传算法相结合	104
7.2	BP-NSGA-II 相结合的优化方法	104
7.3	BP-NSGA 相结合的优化方法的计算步骤	105
7.4	BP-NSGA 相结合的优化机架圆角	106
7.4.1	机架的有限元分析	106
7.4.2	机架载荷的施加	107
7.4.3	机架有限元计算的结果分析	109
7.4.4	训练样本	112

7.4.5	测试神经网络的预测性能	114
7.4.6	基于 NSGA-II 的轧机机架结构参数的多目标优化 ...	116
8	模糊综合评判在多目标优化中的应用	120
8.1	模糊优化设计的概述	120
8.2	模糊优化分析的方法	120
8.2.1	采用模糊贴近度法寻求最优解	121
8.2.2	一级模糊综合评判方法	124
8.3	模糊多目标优化步骤	125
8.4	Y 型轧机轧辊的优化设计	125
8.4.1	轧辊有限元分析	126
8.4.2	设计变量	128
8.4.3	设计约束	129
8.4.4	目标函数	131
8.4.5	轧辊优化方法的选取	132
8.4.6	多目标优化的结果	133
8.4.7	模糊综合评判	138
8.4.8	优化结论	139
	参考文献	140

1 遗传算法

1.1 遗传算法的生物学基础

生物在自然界中的生存繁衍，显示出了其对自然环境的优异自适应能力。受其启发，人们致力于对生物各种生存特性的机理研究和行为模拟，为人工自适应系统的设计和开发提供了广阔的前景。遗传算法（genetic algorithms, GA）就是这种生物行为的计算机模拟，遗传算法使得各种人工系统具有优良的自适应能力和优化能力。遗传算法所借鉴的生物学基础就是生物的遗传和进化。

1.1.1 遗传与变异

世间的生物从其亲代继承特性或性状，这种生命现象就称为遗传（heredity），研究这种生命现象的科学叫做遗传学（genetics）^[1]。由于遗传的作用，使得人们可以种瓜得瓜、种豆得豆，也使得鸟仍然是在天空中飞翔，鱼仍然是在水中遨游。

构成生物的基本结构和功能单位是细胞。细胞中含有的一种微小的丝状化合物称为染色体（chromosome），所有遗传信息都包含在这个复杂而又微小的染色体中。遗传信息是由基因（gene）组成的，生物的各种性状由其相应的基因所控制，基因是遗传的基本单位。细胞通过分裂具有自我复制的能力，在细胞分裂的过程中，其遗传基因也同时被复制到下一代，从而其性状也被下一代所继承。经过生物学家的研究，现在人们已经明白控制并决定生物遗传性状的染色体主要是由一种叫做脱氧核糖核酸（deoxyribonucleic acid, DNA）的物质所构成，除此之外，染色体中还含有很多蛋白质。DNA 在染色体中有规则地排列着，它是个大分子的有机聚合物，其基本结构单位是核苷

酸。每个核苷酸由四种称为碱基的环状有机化合物中的一种、一分子戊糖和磷酸分子所组成。许多核苷酸通过磷酸二酯键相结合形成一个长长的链状结构，两个链状结构再通过碱基间的氢键有规律地扭合在一起，相互卷曲起来形成一种双螺旋结构。另外，低等生物中还含有一种叫做核糖核酸（ribonucleic acid, RNA）的物质，它的作用和结构与 DNA 类似。基因就是 DNA 或 RNA 长链结构中占有一定位置的基本遗传单位。生物基因数量根据物种的不同也多少不一，小的病毒只含有几个基因，而高等动植物的基因却以数万计。DNA 中，遗传信息在一条长链上按一定的模式排列，即进行了遗传编码。一个基因或多个基因决定了组成蛋白质的 20 种氨基酸的组成比例及其排列顺序。遗传基因在染色体中所占据的位置称为基因座（locus），同一基因座可能有的全部基因称为等位基因（allele）。某种生物所特有的基因及其构成形式称为该生物的基因型（genotype），而该生物在环境中呈现出的相应的性状称为该生物的表现型（phenotype）。一个细胞核中所有染色体所携带的遗传信息的全体称为一个基因组（genome）。

细胞在分裂时，遗传物质通过复制（reproduction）而转移到新产生的细胞中，新细胞就继承了旧细胞的基因。有性生殖生物在繁殖下一代时，两个同源染色体之间通过交叉（crossover）而重组，即在两个染色体的某一相同位置处被切断，其前后两串分别交叉组合而形成两个新的染色体。另外，在进行细胞复制时，虽然概率很小，但也有可能产生某些复发生某种制差错，从而使变异（mutation）产生出新的染色体。这些新的染色体表现出新的性状。如此这般，遗传基因或染色体在遗传的过程中由于各种各样的原因而发生变化。

1.1.2 进化

生物在其延续生存的过程中，逐渐适应于其生存环境，使其品质不断得到改良，这种生命现象称为进化（evolution）。生物的进化是以集团的形式共同进行的，这样的—一个团体称为群体（population），组成群体的单个生物称为个体（individual）。每一个个体对其生存环境都有不同的适应能力，这种适应能力称为个体的适应度（fitness）。

达尔文 (darwin) 的自然选择学说 (natural selection) 构成了现代进化论的主体^[2]。自然选择学说认为, 通过不同生物间的交配以及其他一些原因, 生物的基因有可能发生变异而形成一种新的生物基因, 这部分变异了的基因也将遗传到下一代。虽然这种变化的概率是可以预测的, 但具体哪一个个体发生变化却是偶然的。这种新的基因依据其与环境的适应程度决定其增殖能力, 有利于生存环境的基因逐渐增多, 而不利于生存环境的基因逐渐减少。通过这种自然的选择, 物种将逐渐地向适应于生存环境的方向进化, 从而产生出优良的物种。

1.1.3 遗传与进化的系统观

虽然人们还未完全揭开遗传与进化的奥秘, 既没有完全掌握其机制, 也不完全清楚染色体编码和译码过程的细节, 更不完全了解其控制方式, 但遗传与进化的以下几个特点却为人们所共识:

(1) 生物的所有遗传信息都包含在其染色体中, 染色体决定了生物的性状。

(2) 染色体是由基因及其有规律的排列所构成的, 遗传和进化过程发生在染色体上。

(3) 生物的繁殖过程是由其基因的复制过程来完成的。

(4) 通过同源染色体之间的交叉或染色体的变异会产生新的物种, 使生物呈现新的性状。

(5) 对环境适应性好的基因或染色体经常比适应性差的基因或染色体有更多的机会遗传到下一代。

1.2 遗传算法的发展

遗传算法起源于对生物系统所进行的计算机模拟研究。早在 20 世纪 40 年代, 就有学者开始研究如何利用计算机进行生物模拟的技术, 他们从生物学的角度进行了生物的进化过程模拟、遗传过程模拟等研究工作。进入 60 年代后, 美国密执安大学的 Holland 教授及其学生们受到这种生物模拟技术的启发, 创造出了一种基于生物遗传和进化机制的适合于复杂系统优化计算的自适应概率优化技术——遗传算

法。下面是在遗传算法的发展进程中一些关键人物所做出的一些主要贡献^[3]。

(1) J. H. Holland。20 世纪 60 年代, Holland 认识到了生物的遗传和自然进化现象与人工自适应系统的相似关系, 运用生物遗传和进化的思想来研究自然和人工自适应系统的生成以及它们与环境的关系, 提出在研究和设计人工自适应系统时, 可以借鉴生物遗传的机制, 以群体的方法进行自适应搜索, 并且充分认识到了交叉、变异等运算策略在自适应系统中的重要性。

70 年代初, Holland 教授提出了遗传算法的基本定理——模式定理 (schema theorem), 从而奠定了遗传算法的理论基础。模式定理揭示出了群体中的优良个体 (较好的模式) 的样本数将以指数级规律增长, 因而从理论上保证了遗传算法是一个可以用来寻求最优可行解的优化过程。1975 年, Holland 出版了第一本系统论述遗传算法和人工自适应系统的专著——《自然系统和人工系统的自适应性 (Adaptation in Natural and Artificial Systems)》^[4]。

80 年代, Holland 教授实现了第一个基于遗传算法的机器学习系统——分类器系统 (classifier systems, CS), 开创了基于遗传算法的机器学习的新概念, 为分类器系统构造出了一个完整的框架。

(2) J. D. Bagley。1967 年, Holland 的学生 Bagley 在其博士论文中首次提出了“遗传算法”一词, 并发表了遗传算法应用方面的第一篇论文。他发展了复制、交叉、变异、显性、倒位等遗传算子, 在个体编码上使用了双倍体的编码方法。这些都与目前遗传算法中所使用的算子和方法相类似。他还敏锐地意识到了在遗传算法执行的不同阶段可以使用不同的选择率, 这将有利于防止遗传算法的早熟现象, 从而创立了自适应遗传算法的概念。

(3) K. A. De Jong。1975 年, De Jong 在其博士论文中结合模式定理进行了大量的纯数值函数优化计算实验, 树立了遗传算法的工作框架, 得到了一些重要且具有指导意义的结论^[5]。例如, 对于规模在 50~100 代的群体, 经过 10~20 代的进化, 遗传算法都能以很高的概率找到最优或近似最优解。他推荐了在大多数优化问题中都较适用的遗传算法的参数, 还建立了著名的 De Jong 五函数测试平台, 定义

了评价遗传算法性能的在线指标和离线指标。

(4) D. J. Goldberg。1989 年, Goldberg 出版了专著《搜索、优化和机器学习中的遗传算法 (Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning)》^[6]。该书系统总结遗传算法的主要研究成果,全面而完整地论述了遗传算法的基本原理及其应用。可以说这本书奠定了现代遗传算法的科学基础,为众多研究和发展遗传算法的学者所瞩目。

(5) L. D. Davis。1991 年, Davis 编辑出版了《遗传算法手册 (Handbook of Genetic Algorithms)》一书,书中包括了遗传算法在科学计算、工程技术和社会经济中的大量应用实例^[7]。这本书为推广和普及遗传算法的应用起到了重要的指导作用。

1.3 遗传算法的特点

为解决各种优化计算问题,人们提出了各种各样的优化算法,如单纯形法、梯度法、动态规划法、分枝定界法等。这些优化算法各有各的长处,各有各的适用范围,也各有各的限制。遗传算法是一类可用于复杂系统优化计算的鲁棒搜索算法,与其他一些优化算法相比,它主要有下述几个特点^[6]:

(1) 遗传算法以决策变量的编码作为运算对象。传统的优化算法往往直接利用决策变量的实际值本身来进行优化计算,但遗传算法不是直接以决策变量的值,而是以决策变量的某种形式的编码为运算对象。这种对决策变量的编码处理方式,使得我们在优化计算过程中可以借鉴生物学中染色体和基因等概念,可以模仿自然界中生物的遗传和进化等机理,也使得我们可以方便地应用遗传操作算子。特别是对一些无数值概念或很难有数值概念,而只有代码概念的优化问题,编码处理方式更显示出了其独特的优越性。

(2) 遗传算法直接以目标函数值作为搜索信息。传统的优化算法不仅需要利用目标函数值,而且往往需要目标函数的导数值等其他一些辅助信息才能确定搜索方向。而遗传算法仅使用由目标函数值变换来的适应度函数值,就可确定进一步的搜索方向和搜索范围,无需目

标函数的导数值等其他一些辅助信息。利用这个特性,对很多目标函数是无法或很难求导数的函数,或导数不存在的函数的优化问题以及组合优化问题等,应用遗传算法时就显得比较方便,因为它避开了函数求导这个障碍。再者,直接利用目标函数值或个体适应度,可以把搜索范围集中到适应度较高的部分搜索空间中,从而提高了搜索效率。

(3) 遗传算法同时使用多个搜索点的搜索信息。传统的优化算法往往是从解空间中的一个初始点开始最优解的迭代搜索过程。单个搜索点所提供的搜索信息毕竟不多,所以搜索效率不高,有时甚至使搜索过程陷于局部最优解而停滞不前。遗传算法从由很多个体所组成的一个初始群体开始最优解的搜索过程,而不是从一个单一的个体开始搜索。对这个群体所进行的选择、交叉、变异等运算,产生出的就是新一代的群体,在这之中包括了很多群体信息。这些信息可以避免搜索一些不必搜索的点,所以实际上相当于搜索了更多的点,这是遗传算法所特有的一种隐含并行性。

(4) 遗传算法使用概率搜索技术。很多传统的优化算法往往使用的是确定性的搜索方法,一个搜索点到另一个搜索点的转移有确定的转移方法和转移关系,这种确定性往往也有可能使得搜索永远达不到最优点,因而也限制了算法的应用范围。而遗传算法属于一种自适应概率搜索技术,其选择、交叉、变异等运算都是以一种概率的方式来进行的,从而增加了其搜索过程的灵活性。虽然这种概率特性也会使群体中产生一些适应度不高的个体,但随着进化过程的进行,新的群体中总会更多地产生出许多优良的个体,实践和理论都已证明了在一定条件下遗传算法总是以概率 1 收敛于问题的最优解。当然,交叉概率和变异概率等参数也会影响算法的搜索效果和搜索效率,所以如何选择遗传算法的参数在其应用中是一个比较重要的问题。而另一方面,与其他一些算法相比,遗传算法的鲁棒性又会使得参数对其搜索效果的影响会尽可能地低。

1.4 遗传算法的应用

遗传算法提供了一种求解复杂系统优化问题的通用框架,它不依

赖于问题的具体领域，对问题的种类有很强的鲁棒性，所以广泛应用于很多学科^[7~10]。下面是遗传算法的一些主要应用领域：

(1) 函数优化。函数优化是遗传算法的经典应用领域，也是对遗传算法进行性能评价的常用算例。很多人构造出了各种各样的复杂形式的测试函数，有连续函数也有离散函数，有凸函数也有凹函数，有低维函数也有高维函数，有确定函数也有随机函数，有单峰值函数也有多峰值函数等。用这些几何特性各具特色的函数来评价遗传算法的性能，更能反映算法的本质效果。而对于一些非线性、多模型、多目标的函数优化问题，用其他优化方法较难求解，而遗传算法却可以方便地得到较好的结果。

(2) 组合优化。随着问题规模的增大，组合优化问题的搜索空间也急剧扩大，有时在目前的计算机上用枚举法很难或甚至不可能求出其精确最优解。对这类复杂问题，人们已意识到应把主要精力放在寻求其满意解上，而遗传算法是寻求这种满意解的最佳工具之一。实践证明，遗传算法对于组合优化中的完全问题非常有效。例如，遗传算法已经在求解旅行商问题、背包问题、装箱问题、图形划分问题等方面得到成功的应用。

(3) 生产调度问题。生产调度问题在很多情况下所建立起来的数学模型难以精确求解，即使经过一些简化之后可以进行求解，也会因简化得太多而使得求解结果与实际相差甚远。而目前在现实生产中也主要是靠一些经验来进行调度。现在遗传算法已成为解决复杂调度问题的有效工具，在单件生产车间调度、流水线生产车间调度、生产规划、任务分配等方面遗传算法都得到了有效的应用。

(4) 自动控制。在自动控制领域中有很多与优化相关的问题需要求解，遗传算法已在其中得到了初步的应用，并显示出了良好的效果。例如，用遗传算法进行航空控制系统的优化、使用遗传算法设计空间交会控制器、基于遗传算法的模糊控制器的优化设计、基于遗传算法的参数辨识、基于遗传算法的模糊控制规则的学习、利用遗传算法进行人工神经网络的结构优化设计和权值学习等，都显示出了遗传算法在这些领域中应用的可能性。

(5) 机器人学。机器人是一类复杂的难以精确建模的人工系统，