



“十二五”科学技术专著丛书

生产运营 优化研究

曾强 著

SHENGCHAN YUNYING
YOUHUA YANJIU



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

生产运营优化研究

曾 强 著



北京邮电大学出版社
[www. buptpress. com](http://www.buptpress.com)

内 容 简 介

不同的研究对象,其复杂程度不同,有些较为简单,用简单的数学分析方法便能进行优化,而有些研究对象很复杂,传统的数学方法难以对其进行优化,需要采用特殊的方法加以优化。例如,对于大型复杂随机系统宜采用仿真的方法进行分析与优化,对于大型组合优化问题宜采用启发式优化算法进行分析与优化。本书的研究对象是大型复杂随机系统或大型组合优化问题。本书中,作者将近十年来的相关研究成果归为四类并在后续相应的章节中进行了详细介绍,分别是产品优化设计、物流与设施优化、生产计划优化、生产调度优化。

图书在版编目(CIP)数据

生产运营优化研究 / 曾强著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2016.8

ISBN 978-7-5635-4838-5

I. ①生… II. ①曾… III. ①企业管理—生产管理—研究 IV. ①F273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 171192 号

书 名: 生产运营优化研究

著作责任者: 曾 强 著

责 任 编 辑: 刘 佳

出 版 发 行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号 (邮编: 100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京九州迅驰传媒文化有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 11.75

字 数: 291 千字

版 次: 2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-4838-5

定 价: 30.00 元

· 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

随着全球经济的发展,我国制造企业的生存和发展正面临着重大挑战。一方面,能源、原料、人工成本不断攀升缩小了企业获利空间;另一方面,随着全球步入低碳经济时代,“绿色”“环保”“健康”等需求进一步提高了企业的运营成本;再一方面,顾客个性化、多样化、短交货期等要求为企业经营增加了压力。在这种背景之下,制造企业进行生产运营优化成为必由之路。

众所周知,我国工业发展较为滞后,比西方发达国家落后了几十年甚至上百,企业生产运营管理主要以经验为主。改革开放到今天中国制造业的发展主要是靠扩大再生产来助推的。如今,中国经济发展正面临着转型,企业发展不能再简单依靠传统的扩大再生产方式进行,而是强调创新驱动式发展,不仅产品、技术要创新,而且管理要创新。从一个企业的发展历程来看,当企业规模较小时通常以经验式管理为主,当企业规模扩大到一定程度后,科学管理的引入则成为一种必然趋势。总之,在与时俱进的今天,制造企业传统的经验式管理已无法适应时代发展的需求,引入科学管理理论或方法,对制造企业生产运营进行优化具有重要意义。

具体而言,制造企业运营优化涉及的范围很广,几乎涉及企业运营的方方面面,包括厂房选址、设施布局、物流规划、经营战略、生产计划、生产调度、产品设计、工艺设计、质量管理、成本管理、销售管理等各个方面。针对不同的优化对象,其优化目标和优化方法有所不同,但有一点是确定的,通过科学的优化方法必然会增强企业的竞争力,使企业在激烈的市场竞争中能更好地生存和发展。

不同的研究对象,其复杂程度不同,有些较为简单,用简单的数学分析方法便能进行优化,而有些研究对象很复杂,传统的数学方法难以对其进行优化,需要采用特殊的方法加以优化。例如,对于大型复杂随机系统宜采用仿真的方法进行分析与优化,对于大型组合优化问题宜采用启发式优化算法进行分析与优化。本书的研究对象是大型复杂随机系统或大型组合优化问题。本书中,作者将近十年来的相关研究成果归为四类并在后续相应的章节中进行了详细介绍,分别是产品优化设计、物流与设施优化、生产计划优化、生产调度优化。

第1章 绪论:介绍本书的研究内容及技术手段。

第2章 产品优化设计:介绍基于单目标遗传算法(GA)的连续型参数多响应稳健设计优化方法、基于带精英策略的非劣前沿分级遗传算法(NSGA II)的系统可靠性分配多目标优化方法。

第3章 物流与设施优化:介绍基于带精英策略的非劣前沿分级遗传算法(NSGA II)的车间设施布局多目标优化方法、基于带精英策略的非劣前沿分级遗传算法(NSGA II)的有货位载重约束的自动化立体仓库货位分配多目标优化方法和基于单目标遗传算法(GA)的

有容量限制的自动化立体仓库堆垛机路径规划优化方法。

第4章 生产计划优化:介绍基于计算机仿真的带柔性工艺的多品种批量生产投产计划优化方法和基于程序设计的改进综合生产计划动态规划方法。

第5章 生产调度优化:本章是本书的重点内容,介绍基于启发式算法的单一产品复杂装配线平衡排产方法、基于多阶段父代更新自适应遗传——模拟退火算法的制造任务优化分配方法、基于分段混合变异禁忌搜索算法的非柔性作业车间多目标优化调度方法、基于多阶段混合变异禁忌搜索算法的带“需求时间窗”的柔性作业车间调度优化方法、基于带精英策略的非劣前沿分级遗传算法(NSGA II)和多规则设备分配的FJSP多目标集成优化方法、基于带精英策略的非劣前沿分级遗传算法(NSGA II)的不考虑分批单资源批量生产多目标调度优化方法、基于带精英策略的非劣前沿分级遗传算法(NSGA II)的准时交货等量分批FJSP多目标调度优化方法、基于带精英策略的非劣前沿分级遗传算法(NSGA II)的复合工艺流程下等量分批FJSP多目标优化方法、基于计算机仿真和带精英策略的非劣前沿分级遗传算法(NSGA II)的并行机作业车间等量分批多目标优化调度方法、基于带精英策略的非劣前沿分级遗传算法(NSGA II)的双资源等量分批FJSP多目标调度优化方法。

由于作者精力、水平所限,本书中介绍的研究内容难免存在某些瑕疵,有不对的地方敬请读者加以批评指正,感谢您的大力支持。

曾 强

2016 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究内容	1
1.1.1 产品优化设计	1
1.1.2 物流与设施规划优化	2
1.1.3 生产计划优化	2
1.1.4 生产调度优化	3
1.2 技术手段	4
1.2.1 最优化理论	4
1.2.2 遗传算法	6
1.2.3 NSGA II 算法	6
1.2.4 禁忌搜索算法	8
1.2.5 模拟退火算法	9
1.2.6 计算机仿真	9
参考文献	10
第 2 章 产品优化设计	12
2.1 连续型参数多响应稳健设计优化方法	12
2.1.1 引言	12
2.1.2 问题描述	13
2.1.3 技术思路	14
2.1.4 遗传算法设计	14
2.1.5 案例分析	17
2.1.6 小结	19
2.2 系统可靠性分配多目标优化方法	19
2.2.1 引言	19
2.2.2 问题描述	20
2.2.3 变量定义	20
2.2.4 优化模型构建	21
2.2.5 NSGA II 算法设计	22
2.2.6 案例分析	24

2.2.7 小结	25
参考文献	26
第3章 物流与设施优化	28
3.1 车间设施布局多目标优化方法	28
3.1.1 引言	28
3.1.2 技术思路	29
3.1.3 优化模型构建	29
3.1.4 NSGA II 算法设计	31
3.1.5 案例分析	32
3.1.6 小结	36
3.2 有货位载重约束的自动化立体仓库货位分配多目标优化方法	36
3.2.1 引言	36
3.2.2 货物分配方式的选择	37
3.2.3 变量定义	37
3.2.4 问题描述	38
3.2.5 优化模型构建	38
3.2.6 NSGA II 算法设计	39
3.2.7 案例分析	42
3.2.8 小结	45
3.3 有容量限制的自动化立体仓库堆垛机路径规划优化方法	45
3.3.1 引言	45
3.3.2 变量定义	46
3.3.3 问题描述	46
3.3.4 优化模型构建	46
3.3.5 遗传算法设计	47
3.3.6 案例分析	49
3.3.7 小结	52
参考文献	52
第4章 生产计划优化	55
4.1 带柔性工艺的多品种批量生产投产计划仿真优化方法	55
4.1.1 引言	55
4.1.2 问题描述	56
4.1.3 仿真逻辑设计	56
4.1.4 仿真模型构建	57
4.1.5 案例分析	60
4.1.6 小结	63
4.2 改进的综合生产计划动态规划优化方法	64

4.2.1	引言	64
4.2.2	原综合生产计划问题改进	64
4.2.3	综合生产计划数学优化模型改进	65
4.2.4	动态规划求解过程改进	65
4.2.5	计算机求解算法设计	66
4.2.6	案例分析	69
4.2.7	小结	72
	参考文献	72
第5章	生产调度优化	74
5.1	单一产品复杂装配线启发式平衡排产优化方法	74
5.1.1	引言	74
5.1.2	技术思路	75
5.1.3	关键技术	76
5.1.4	案例分析	82
5.1.5	小结	85
5.2	一类基于多个目标的制造任务优化分配方法	86
5.2.1	引言	86
5.2.2	问题描述及假设	86
5.2.3	优化模型构建	86
5.2.4	优化算法设计	87
5.2.5	案例分析	89
5.2.6	小结	91
5.3	非柔性作业车间多目标优化调度方法	91
5.3.1	引言	91
5.3.2	问题描述及假设	92
5.3.3	优化模型构建	92
5.3.4	优化算法设计	93
5.3.5	案例分析	95
5.3.6	小结	97
5.4	柔性作业车间调度优化方法	98
5.4.1	带“需求时间窗”的柔性作业车间调度优化方法	98
5.4.2	基于多规则设备分配及工序排序的 FJSP 多目标集成优化方法	107
5.5	不考虑分批单资源批量生产多目标调度优化方法	115
5.5.1	平顺移动下等量分批 FJSP 多目标优化方法	116
5.5.2	基于准时交货的等量分批 FJSP 多目标优化方法	125
5.5.3	复合工艺流程下等量分批 FJSP 多目标优化方法	136
5.6	等量分批单资源批量生产多目标调度优化方法	144
5.6.1	等量分批 FJSP 多目标集成优化方法	144

5.6.2 并行机作业车间等量分批多目标优化调度方法	154
5.7 双资源等量分批 FJSP 多目标调度优化方法	165
5.7.1 引言	165
5.7.2 变量定义	165
5.7.3 问题描述	166
5.7.4 优化模型构建	166
5.7.5 调度关键技术	167
5.7.6 NSGA II 算法设计	168
5.7.7 案例分析	171
5.7.8 小结	174
参考文献	174

第1章 绪 论

改革开放到今天,中国制造业逐渐发展壮大,如今中国被称为“制造大国”。然而,我们却离“制造强国”的目标还有很大差距。尤其是 21 世纪的今天,顾客个性化、多样化、短交货期等要求为企业经营增加了巨大压力,能源、原料、人工成本不断上升缩小了企业获利空间,低碳环保的要求更进一步提高了企业的运营成本,这一切表明,中国制造企业的生存和发展正面临着重大挑战。在这种背景之下,制造企业要创新,不仅技术要创新,而且管理要创新,才能在激烈的市场竞争中立足。生产运营优化是制造企业管理创新的重中之重,因此进行制造企业生产运营优化研究具有重要意义。

制造企业运营优化涉及的范围很广,几乎涉及企业运营的方方面面,包括厂房选址、设施布局、物流规划、经营战略、生产计划、生产调度、产品设计、工艺设计、质量管理、成本管理、销售管理等各个方面。针对不同的优化对象,其优化目标和优化方法有所不同,但有一点是确定的,通过科学的优化方法必然会增强企业的竞争力,使企业在激励的市场竞争中能更好地生存和发展。

不同的研究对象,其复杂程度不同,有些较为简单,用简单的数学分析方法便能进行优化,而有些研究对象很复杂,传统的数学方法难以对其进行优化,需要采用特殊的方法加以优化。例如,对于大型复杂随机系统宜采用仿真的方法进行分析与优化,对于大型组合优化问题宜采用启发式优化算法进行分析与优化。本书的研究对象是大型复杂随机系统或大型组合优化问题。本书中,作者将近十年来的相关研究成果归为四类并在后续相应的章节中进行了详细介绍,分别是产品优化设计、物流与设施优化、生产计划优化、生产调度优化。

1.1 研究内容

1.1.1 产品优化设计

产品质量是制造型企业竞争要素之一。产品质量取决于设计质量和生产质量。通常,设计质量决定了产品质量的 70% 以上。产品优化设计是指从源头把产品定位在高品质上,使产品在市场上具有先天优势。稳健性和可靠性是产品质量的两个重要特性,而它们的优劣更多地取决于设计阶段。

产品稳健性设计又称参数设计,参数设计是三次设计的第二步,是指通过合理确定产品各参数的组合使得某个或某些特定的输出特性既尽可能达到目标值又尽可能减少波动。参数设计的典型方法是田口方法,即以正交实验的方法获得多组输出特性值填入“外表”,根据

外表的多组实验值计算得到对应的信噪比,将信噪比填入“内表”中对应的实验行,最后对内表进行分析(直观分析、极差分析或方差分析)得到最佳参数组合。田口稳健性设计(参数设计)方法多年来在工程领域中得到了广泛应用。然而,一切事物都有两面性,田口方法也具有自身的优缺点,尤其对于一类输入参数全部为连续参数、有多个响应输出参数、响应输出参数具有响应函数的稳健性设计问题,本书提出了一种基于单目标遗传算法的优化方法,可获得相对更优的解(详见 2.1 节)。

可靠性设计包括两类问题,其一是使系统在满足规定的可靠性指标、完成预期功能的前提下,系统的性能、重量指标、制造成本、使用寿命等取得协调并达到最优化的结果,其二是在性能、重量、成本、寿命和其他要求的约束下,设计出高可靠性的系统。可靠性设计的内容包括可靠性预测、可靠性分配和可靠性分析,本书仅涉及可靠性分配。近年来国内外专家学者对可靠性分配进行了大量研究,提出了较多的方法,如同分分配法、代数分配法、再分配法、相对失效率法、评分分配法、层次分析法、神经网络法、遗传算法等,但对于大型有约束复杂系统可靠性多目标分配问题却需要研究提出新的方法。基于此,本书针对一类有约束多目标可靠性分配问题提出了一种基于 NSGA II 的多目标优化方法(详见 2.2 节)。

1.1.2 物流与设施规划优化

物流成本是制造型企业产品总成本中的一部分,降低物流成本能在一定程度上降低生产成本,从而增加产品竞争力。物流成本的降低有两个重要途径,其一是合理规划物流设施,其二是合理规划物流路径。

物流设施规划从宏观到微观主要分为场址选择、厂房布局、车间布局、仓储布局等。本书将研究车间设施布局问题和仓储布局中的货位分配问题。

车间设施布局的质量直接或间接影响着车间物流效率和成本。近年来,国内外学者对车间设施布局进行了大量研究并提出了一些车间布局优化的方法,这些方法可分为经验法、定性与定量结合法(系统布置设计方法 SLP、Reed 的工厂布置法、Apple 的工厂布置法)、数学量化法(二次分配模型、图论模型、混合整数规模模型)。这些方法各有优缺点和适用范围,本书针对一类多行、等行距、长方形作业单元的布局方式提出了一种基于 NSGA II 的多目标设施车间布局优化方法(详见 3.1 节)。

货位分配是仓储布局的一个重要问题,合理分配货位能有效提高货物入库和出库效率并降低仓储物流成本。本书针对有货位载重约束的自动化立体仓库货位分配问题,提出了一种基于 NSGA II 的多目标优化方法(详见 3.2 节)。

物流路径优化是一个经典研究课题,从宏观到微观可分为城市间物流配送路径优化问题、城市内物流配送路径优化问题、厂区内物流配送路径优化问题、车间内物流配送路径优化问题及仓储物流堆垛机路径优化问题等。本书针对有装载容量限制的自动化立体仓库堆垛机路径规划问题提出了一种基于单目标遗传算法的堆垛及路径规划优化方法(详见 3.3 节)。

1.1.3 生产计划优化

生产计划是根据市场需求预测、订单和企业所拥有的生产资源,对计划期内出产产品的内容、数量、顺序及为保证产品的出产所需劳动力水平、库存等措施所做的决策性描述。生

产计划的优化具有重要意义,生产计划的优劣在很大程度上决定了生产效率、生产成本和客户满意度等指标。本书针对一类带柔性工艺的多品种批量生产方式提出了一种投产计划仿真优化方法(详见4.1节),针对一类综合生产计划优化问题提出了一种改进的综合生产计划动态规划优化方法(详见4.2节)。

1.1.4 生产调度优化

生产调度是指在给定的时间内对生产系统中的有限资源进行合理安排,使之以尽可能优良的性能完成预定的任务。生产调度有多种分类,根据本书的研究内容,仅介绍按生产组织方式划分和按优化目标个数划分两种分类方式。

(1) 按生产组织方式划分

按生产组织方式可将生产调度问题分为大量流水线调度、单件调度、批量生产调度和项目调度四类。

① 大量流水线调度

大量流水生产方式具有加工对象(又称零件)量大、重量轻、在流水线上顺序移动等特点,这种生产方式生产调度的关键在于设计流水线,即根据产量目标、生产周期确定生产线的节拍并合理进行作业分配尽量达到以最少加工资源在规定的生产周期内完成所需产品生产的目。

② 单件生产调度

单件生产方式具有加工对象(又称零件)体积小、重量轻、调整一次加工一件等特点。此类生产方式生产调度的关键在于合理确定各个零件每道工序的加工资源及加工先后顺序,从而达到某个或某些特定的优化目标,如完工时间最短、流程时间最短、加工成本最低等。

③ 批量生产调度

批量生产方式具有加工对象(又称零件)具有体积小、重量轻、调整一次加工一批等特点。此类生产方式生产调度的关键也在于合理确定各批零件每道工序的加工资源及加工先后顺序,从而达到某个或某些特定的优化目标,如完工时间最短、流程时间最短、加工成本最低等。

④ 项目调度

项目生产方式具有加工对象体积庞大,加工对象不动而加工资源围绕加工对象移动等特点。项目生产方式生产调度的关键是合理组织项目各个任务的开工和完工时间,以达到缩短项目周期、保证项目质量、平衡加工资源、降低项目成本等目的。

其中,单件生产调度和批量生产调度还可以从其他角度进行进一步细分。

按照设备是否可选可分为非柔性作业车间调度和柔性作业车间调度两类。非柔性作业车间调度(Job Shop Scheduling)的特点如下:零件有多道工序,零件的加工路线互不相同,零件各工序的加工资源(通常指设备)不可选,各零件按加工路线依次经过指定的加工资源直至加工完毕。柔性作业车间调度(Flexible Job Shop Scheduling)是作业车间调度问题的扩展,其零件部分或全部工序的加工资源可选。

按照资源约束种类和数量可分为单资源调度和多资源调度两类。单资源调度指只有一种资源制约车间的生产能力,一般指加工设备。多资源调度指同时有两种及两种以上的资源制约车间的生产能力,如加工设备、搬运设备、机器人、操作人员及其他辅助资源(货盘、夹

具、刀具等)^[1]。

(2) 按优化目标数量划分

按优化目标数量可将生产调度问题分为单目标调度和多目标调度两类。

① 单目标调度:只有一个优化目标的生产调度问题,若有解则往往能找到最优解。

② 多目标调度:有两个及两个以上的优化目标的生产调度问题。对于多目标调度问题,通常没有最优解,需在各个非劣解之间进行平衡择优。

1.2 技术手段

针对以上研究内容,本书采用的技术手段有最优化理论、带精英策略的非劣前沿分级遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA II)、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、禁忌搜索算法(Tabu Search Algorithm, TSA)、模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)及计算机仿真(Computer Simulation)等。

1.2.1 最优化理论

所谓最优化,是指在满足特定约束条件的情况下求目标函数的最大值或最小值。由于最大化问题可以转换成最小化问题,因此最优化问题的普适模型如式(1.1)。

$$\begin{aligned} \min f(X) &= \min(f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)) \\ s. t. \\ X &\in R \\ R &= \{X | g_i(X) \leq 0, i \in (0, k)\} \end{aligned} \quad (1.1)$$

其中, m 为优化目标个数, k 为约束个数。

若按优化目标的数量,可以将最优化问题分为单目标优化和多目标优化两类:当优化目标数 $m=1$ 时为单目标优化问题,反之为多目标优化问题(两类问题本书均有涉及)。若按是否有约束,可以将最优化问题分为有约束和无约束两类:当约束个数 $k=0$ 时为无约束,反之为有约束(本书涉及有约束最优化问题)。若按决策变量是否连续,可将最优化问题分为连续型、离散型(或称组合型)和混合型(本书仅涉及离散型问题)。若按约束或目标函数中决策变量的指数,可将最优化问题分为线性和非线性两类(本书涉及线性优化问题)。

定义 1-1:最优解。对于单目标优化问题,若 $\exists X_0 \in R$, 对于 $\forall X \in R$, 有 $f(X) \geq f(X_0)$, 则称 X_0 是该单目标优化问题的理论最优解。单目标优化的任务是求其理论最优解 X_0 。

定义 1-2:非受支配解。对于多目标优化问题,若对于 $\forall i$, 有 $f_i(X) \geq f_i(Y)$, 且 $\exists j$ 使得 $f_j(X) > f_j(Y)$ 则称解 Y 支配 X 。若当前解集中任意解均不支配 X , 则称 X 为非受支配解。

定义 1-3: Pareto 最优解。若解空间 R 中的任意解均不支配 X , 则 X 是一个 Pareto 最优解。

定义 1-4: Pareto 最优解集。由一系列 Pareto 最优解组成的集合称为 Pareto 最优解集。

定义 1-5: Pareto 边界。Pareto 最优解集构成的边界称为 Pareto 边界。图 1.1 所示的 A、B、C、D、E、F 点构成 Pareto 边界。双目标优化问题的 Pareto 边界为一条曲线,三目标优化问题的 Pareto 边界为一曲面,四个及四个以上目标的多目标优化问题其 Pareto 边界为一超曲面。

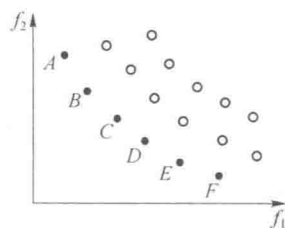


图 1.1 Pareto 最优解集

定义 1-6: Pareto 寻优。Pareto 寻优是指运用某些算法寻找多目标优化问题的 Pareto 最优解集的过程。需要指出的是,非受支配解不一定是 Pareto 最优解,非受支配解集不一定是 Pareto 最优解集。只有当算法收敛时,非受支配解才是 Pareto 最优解,非受支配解集才是 Pareto 最优解集。Pareto 寻优过程实际上是通过构造非支配集并使非支配集不断逼近 Pareto 最优解集的过程,因此算法的质量会对优化结果产生较大影响^[2]。

从理论上说,若单目标调度问题有解,则存在最优解(一个或多个)。单目标优化的目的就是采用某种优化方法寻找理论最优解或其近似最优解。单目标优化的常用方法有数学规划方法、启发式方法。数学规划方法适合求解规模较小的单目标优化问题,而对于规模较大的单目标优化问题更适合采用启发式方法求解,如遗传算法、模拟退火算法、蚁群算法等。

多目标优化相对复杂,其求解方法有间接法和直接法两种^[3,4]。间接法又称化多为少法,是指通过一些技术手段将多个目标转化为单目标,然后用单目标优化法在单目标空间寻优的方法,其代表方法主要有线性加权和法^[5,6]、极大极小法、理想点法、分层排序法^[7]、主要目标法^[8]、乘除法^[9,10]、功效系数法^[11]等。从结果上看,这些方法只能求得一部分最优解,而不能得到整个最优解集。直接法,顾名思义是直接的多目标空间寻优,主要包括线性加权和变系数法和基于 Pareto 寻优法两种代表性方法。

线性加权和变系数法采用随机权重法将多个目标转化为单目标,然后在单目标空间寻优,通过改变随机权重可得到一个 Pareto 解集^[5]。但该方法很难找到比较完整的 Pareto 解集,它要求随机权重足够均匀,优化结果受各指标无量纲化处理方式影响较大,因此并不是一种很好的解决方法。

基于 Pareto 寻优的优化方法,基于各个优化目标直接在多目标空间寻优,寻优结果为一个完整的 Pareto 解集供调度人员选择。基于 Pareto 的典型算法主要有:多目标遗传算法(Multi-objective Genetic Algorithm, MOGA)^[12]、向量评价遗传算法(Vector Evolution Genetic Algorithm, VEGA)^[13]、小生境 Pareto 遗传算法(Niched Pareto Genetic Algorithm, NPGA)^[14]、强化 Pareto 遗传算法(Strength Pareto Evolutionary Algorithm, SPEA)^[15,16]、非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA)^[17]。NSGA 是由 Srimivas 和 Deb 在 1994 年提出的^[18],其优点是优化目标个数任选,非劣最优解分布均匀,允许存在多个不同等效解^[19]。文献[20,21]对 NSGA、NPGA、VEGA 等算法做了定量比较得出结论:NSGA 的性能优于 NPGA 和 VEGA,文献[22]也得出 NSGA 的性能优于其他算法的结论。NSGA 的缺点是:①由于 Pareto 排序需重复多次,计算效率较低,计算复杂度为 $O(mn^3)$ (其中 m 为目标数量, n 为种群大小);②未采用精英保留策略;③共享参数 σ_{share} 需预先确定。2002 年,Deb 等人在 NSGA 的基础上又提出了带精英策略的非劣前沿分级遗传算法(NSGA II)^[16],大大提高了 NSGA 算法的性能。

1.2.2 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm,GA)是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法。最早是由美国密执安大学的 Holland 教授提出。20 世纪70 年代 De Jong 基于遗传算法的思想在计算机上进行了大量的纯数值函数优化计算实验。在一系列研究工作的基础上,80 年代由 Goldberg 进行归纳总结,形成了遗传算法的基本框架。遗传算法的设计及应用一般步骤如下^[23]。

第 1 步:确定决策变量及约束条件,即确定个体表现型 X 和问题的解空间。

第 2 步:建立优化模型,即确定目标函数的类型及其数学描述形式或量化方法。

第 3 步:确定表示可行解的染色体编码方法,即确定出个体的基因型 X 及其遗传算法的搜索空间。

第 4 步:确定编码方法,即确定出由个体基因型 X 到个体表现型 X 的对应关系或转换方法。

第 5 步:确定个体适应度的量化评价方法,即确定出由目标函数值 $f(X)$ 到个体适应度 $F(X)$ 的转换规则。

第 6 步:设计遗传算子,即确定出选择运算、交叉运算、变异运算等遗传算子的具体操作方法。

第 7 步:确定遗传算法的有关运行参数,即确定出遗传算法的种群规模(M)、终止条件(T)、交叉概率(P_c)、变异概率(P_m)等参数。

第 8 步:进行遗传运算,若算法多次收敛于同一个最优值,则找到其问题的最优解,同时说明算法具有较好的收敛性,否则需对算法进行改进。

1.2.3 NSGA II 算法

如前所述,NSGA II 算法是 NSGA 算法的改进版,它采用了非劣前沿排序分级以及精英策略,因而具有很多优点。本书采用的多目标优化技术手段主要是 NSGA II 算法,现对其进行简要介绍。

(1) 计算流程

由于传统的 NSGA II 算法针对的是处理连续型变量问题,而本书涉及的多目标优化问题为离散型优化问题,因此需要对其进行适当调整。总体上,本书采用了 NSGA II 算法的基本计算流程,如图 1.2 所示,但在某些细节上做了适当调整。

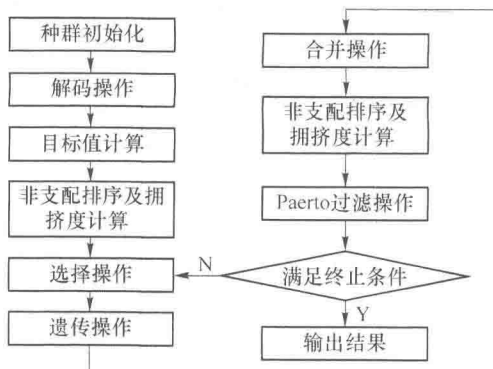


图 1.2 NSGA II 流程图

具体步骤描述如下:

步骤 1 种群初始化:生成规模为 Popsizes 的初始种群 ParentPop;

步骤 2 解码操作:对种群 ParentPop 中染色体进行解码;

步骤 3 目标值计算:根据解码结果计算各染色体目标值;

步骤 4 非支配排序并计算拥挤度:对种群 ParentPop 进行非支配排序得染色体前沿值 Rank 和拥挤度 CD;

步骤 5 选择操作:按联赛机制从种群 ParentPop 中选出 Popsizes/2 个染色体组成配对种群 PoolPop;

步骤 6 遗传操作:对种群 PoolPop 进行遗传操作生成规模为 Popsizes 的子种群 OffPop;

步骤 7 合并操作:将种群 ParentPop 与种群 OffPop 合并得规模为 2Popsizes 的种群 InterPop;

步骤 8 非支配排序并计算拥挤度:对种群 InterPop 进行非支配排序得到染色体前沿值 Rank 和拥挤度 CD;

步骤 9 Pareto 过滤操作:以 InterPop 中各染色体的前沿值 Rank 和拥挤度 CD 为依据,选择 Popsizes 个染色体形成子种群取代种群 ParentPop;

步骤 10 终止条件判断:若未达到进化终止条件则转步骤 5,否则终止进化过程。

(2) 非支配排序

非支配排序的目的是计算种群中各染色体的前沿值 Rank,从而将所有染色体进行分层。具体过程如下:找出当前种群中不被任何其他染色体支配的染色体,这些染色体的集合为第 1 级非支配染色体集,令其前沿值 Rank 为 1;将第 1 级非支配集中的染色体从当前种群中去除,然后从剩余染色体中找出非支配染色体集,令其 Rank 为 2;依此类推,直到所有染色体的 Pareto 前沿值确定为止。

(3) 拥挤度计算

为防止算法“早熟”,引入小生境技术保证种群中解的多样性,具体是通过染色体的拥挤度 CD 来实现的。某级非支配染色体集上第 i 个染色体的拥挤度 CD_i 可按式(1.2)计算。

$$CD_i = \begin{cases} \text{INF}, & \text{当 } f_k^{\max} = f_k^{\min} \text{ 且 } f_k(i) = f_k^{\max} \text{ 且 } f_k(i) = f_k^{\min} \\ \sum_{k=1}^m \frac{f_k(i+1) - f_k(i-1)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}}, & \text{当 } f_k^{\max} \neq f_k^{\min} \end{cases} \quad (1.2)$$

式(1.2)中, m 为优化目标数, f_k 为第 k 个目标函数。当 $m=2$ 时,拥挤度计算示意图如图 1.3 所示。从式(1.2)及图 1.3 可见,拥挤度 CD_i 越大,则说明染色体 i 周围的点越稀疏,在进行进化时应当给以较大的生存概率,从而保证种群多样性。如图 1.3 中, $CD_A < CD_B$,应当给 B 点以相对较大的生存概率。

(4) 选择操作

采用一种联赛机制进行选择:每次从种群中随机选择 tour-size 个染色体,从中选择前沿值 Rank 最小的染色体加入配对池 PoolPop,若有多个染色体具有相同的前沿值 Rank,则选择拥挤度 CD 最大的染色体加入配对池 PoolPop。采用此机制实际上是给优秀染色体以更大的生存概率,让其参与遗传进化。本书中设 tour-size 为 2,因此称为“二元联赛机制”。

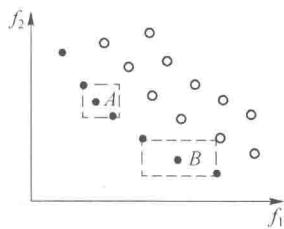


图 1.3 拥挤度计算

(5) Pareto 过滤操作

Pareto 过滤操作的目的是从 InterPop 选出优解进入下一代种群。首先依据 Rank 值由小到大的顺序进行选择,当种群规模接近 Popsizel 时,若下一级的染色体全部选入则会超过种群规模 Popsizel,此时按染色体的拥挤度从大到小的顺序进行选择使得种群规模达到 Popsizel。

1.2.4 禁忌搜索算法

禁忌搜索算法(TSA)是对局部邻域搜索的一种改进,它通过引入禁忌表和禁忌准则以避免迂回搜索,通过特赦准则赦免某些优良的解来跳出局部最优点,保证搜索的多样化从而实现全局优化。禁忌搜索算法(TSA)一般流程图如图 1.4 所示。

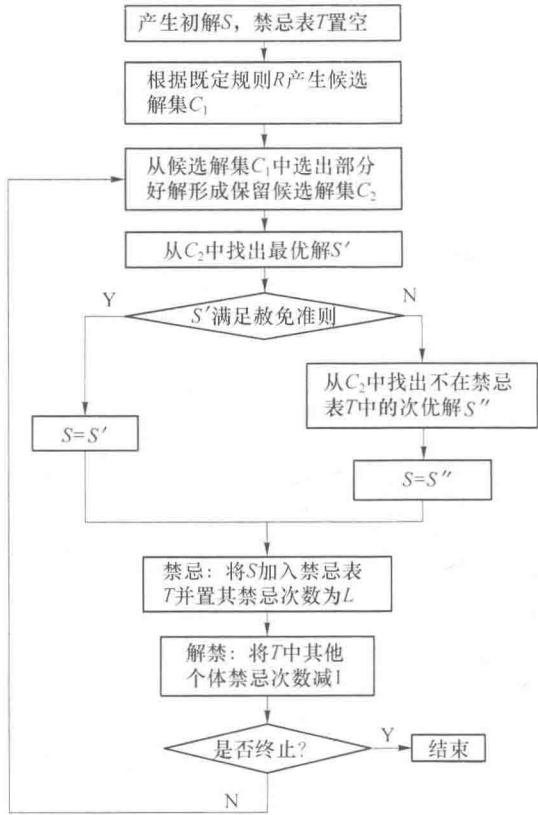


图 1.4 TSA 流程图

其具体步骤描述如下。

步骤 1:初始化。随机产生一个初始可行解 S,并置禁忌表 T 为空。

步骤 2:产生候选解集。以 S 解为基准,按既定的规则 R 产生 k_1 个可行解组成的候选解集 C_1 。

步骤 3:产生保留好解集。按适应度 C_1 进行排序,从筛选结果中优选 k_2 个个体形成保留好解集 C_2 。