

制造过程智能优化调度 算法及其应用

Intelligent Optimization Scheduling Algorithms for
Manufacturing Process and Their Applications

■ 刘民 吴澄 著 ■



国防工业出版社

National Defense Industry Press

制造过程智能优化调度 算法及其应用

**Intelligent Optimization Scheduling Algorithms for
Manufacturing Process and Their Applications**

刘 民 吴 澄 著

國防工業出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

制造过程智能优化调度算法及其应用 / 刘民, 吴澄著.
北京: 国防工业出版社, 2008.3

ISBN 978-7-118-05609-9

I. 制... II. ①刘...②吴... III. 制造业—生产调度—
智能控制 IV. F407.406.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 024998 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 11 字数 253 千字

2008 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于 1988 年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列

选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	程洪彬	
秘书长	程洪彬			
副秘书长	彭华良	蔡镭		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	刘世参
(按姓氏笔画排序)	李德毅	杨星豪	吴有生	何新贵
	佟玉民	宋家树	张立同	张鸿元
	陈冀胜	周一宇	赵凤起	侯正明
	常显奇	崔尔杰	韩祖南	傅惠民
	舒长胜			
本书主审委员	何新贵			

序

制造业是国家的支柱产业,制造生产过程信息化是制造业现代化的必由之路,制造过程的生产调度优化是制造企业现代化管理的目标和关键。

智能化是信息化的发展方向与开发策略,人工智能与优化技术相结合,发展了各种智能优化方法,是优化技术从确定性、结构化优化向非确定性、非结构化优化发展的新动向、新阶段。

《制造过程智能优化调度算法及其应用》一书是作者大量科研、教学、应用和开发工作的系统性总结,其特点有二:

1. 学术思想新颖,总结了作者在国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目、国家 863 高技术计划项目、国家自然科学基金项目中取得的有创新性的高水平研究成果。

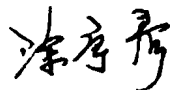
2. 理论联系实际,作者和学生们将研究成果应用于我国制造企业智能优化调度系统,取得了显著的经济效益。

因此,该专著的出版,将对提高我国制造业的现代化水平,促进制造过程从信息化走向智能化,作出积极的贡献。

特致贺诗一首:

制造工业现代化,生产调度需优化;
多快好省效益高,和谐协调智能化。

中国人工智能学会



2007 年 11 月

前 言

近年来,国家相继制定了“以信息化带动工业化,以工业化促进信息化,走新型工业化道路”,“用高新技术改造和提升传统产业”等一系列战略决策,以加速我国制造业产业结构调整,提高我国制造业的经济效益和市场竞争能力。制造业信息化是实施上述战略决策不可缺少的关键手段之一。随着制造业信息化技术应用范围的不断扩展及应用层次的不断提高,智能技术作为信息技术的精髓,正在我国制造业信息化进程中发挥着越来越重要的作用。制造过程的智能优化调度是制造业信息化的重要内容,也是智能技术在制造过程中的重要应用领域,其对优化企业生产流程、提高生产效率、缩短制造周期、降低生产成本、提高企业经济效益和市场竞争能力、满足国防现代化和武器装备现代化需要等具有重要意义,同时对提高制造过程自动化和智能化水平也具有重要作用。

制造过程调度技术是先进制造与自动化领域学术界和工业界备受关注的前沿性研究方向,该技术的核心是制造过程调度算法,对其研究始于 20 世纪 50 年代。迄今为止,基于分支定界和动态规划等数学规划方法的精确调度算法、基于调度规则的启发式方法等传统调度算法在制造过程调度问题中已得到广泛应用。但由于上述研究大多针对典型制造过程调度问题,其对实际制造过程调度问题进行了较多简化并附加了相关假设条件,而实际制造过程调度问题具有大规模、不确定、多目标、约束复杂等特点,因此已提出的上述传统调度算法难以直

接应用于实际制造过程调度中。近年来,以进化计算、禁忌搜索、模拟退火等为代表的智能优化算法因具有不以寻求最优解为目标、适应问题类型广、对目标函数限制少等优点,在求解上述复杂调度问题上显示出了很好的应用前景,已成为调度算法研究的热点方向。

本书是关于制造过程智能优化调度算法的一本专著。在作者多年来对制造过程智能优化调度理论与算法的研究、教学和工程实践的基础上,本书紧密结合制造过程调度的实际需求,首先对制造过程调度问题进行了描述和分类;在简述进化计算和禁忌搜索等方法基础上,总结了面向制造过程调度问题的遗传算法和禁忌搜索算法的设计方法;并以作者近年来在该技术领域的研究成果为主,系统论述了求解不同调度目标和不同约束条件下的并行机、Flow Shop 和 Job Shop 等制造过程调度问题的进化计算和禁忌搜索等算法;最后,还介绍了制造过程智能优化调度系统及其实施方法,并阐述了应用智能优化调度算法解决实际制造过程调度问题的一些基本思路。

本书共分为 5 章:第 1 章绪论;第 2 章制造过程调度问题描述及分类;第 3 章求解制造过程调度问题的进化计算方法;第 4 章求解制造过程调度问题的禁忌搜索方法;第 5 章制造过程智能优化调度系统及其实施方法。作者还提供了求解并行机和 Job Shop 调度问题的进化计算和禁忌搜索算法的源程序,见网址 http://www.cims.tsinghua.edu.cn/center_th/team/person/lm/lm.html,供读者参考。

本书由刘民主要撰写,吴澄参与了本书部分撰写工作。感谢作者所指导的研究生郝井华、董明宇、张龙、尹文君、孙元凯、吴怡、李鹏、孙跃鹏、张瑞、刘涛和陈少卿等及课题组成员蒋宇等在相关研究上所做出的贡献及为本书的资料收集和文稿整理所做的大量工作。

中国航天科工集团第二研究院科学技术委员会副主任、北

京航空航天大学自动化学院院长李伯虎院士,中国人工智能学会荣誉理事长和前任理事长涂序彦教授在百忙之中认真审阅了本书,并为本书撰写了推荐意见,涂序彦教授还为本书作了序,在此向两位教授表示衷心的感谢。

书中部分内容还引用了国内外其他专家的研究成果,也在此表示诚挚的谢意。

同时感谢国防科技图书出版基金对本书的资助,也感谢国防工业出版社编辑在本书出版中所付出的辛勤劳动。

本书内容的研究得到了由作者主持的国家 973 计划项目课题“复杂生产制造过程实时智能优化调度理论与算法研究”(No. 2002CB312202)、国家自然科学基金项目(No. 60004010, No. 60274045, No. 60443009)、国家 863 高技术计划课题(No. 2006AA04Z163)、国家科技部中英科技合作基金项目、教育部新世纪优秀人才支持计划项目、北京市科技计划重点项目课题(No. D0305005040321)及清华大学创世界一流大学学科规划(985 规划)先进制造学科群重点基金项目等资助,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中错误和不妥之处在所难免,恳请同行专家和广大读者批评指正。

作 者

2007 年 12 月于清华园

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 制造过程调度问题的概念	1
1.2 制造过程调度技术的研究意义	5
1.3 制造过程调度算法研究概述	7
第 2 章 制造过程调度问题描述及分类	11
2.1 调度问题的基本概念及一般描述	11
2.1.1 调度问题主要变量说明	11
2.1.2 典型调度问题一般描述	13
2.1.3 调度性能指标及调度问题解的分类	24
2.2 调度问题的三元表示法	26
2.2.1 $\alpha \beta \gamma$ 三元表示法简介	26
2.2.2 调度问题三元表示法举例	29
2.3 调度问题的析取图表示法	32
2.3.1 析取图表示法简介	32
2.3.2 析取图的性质	34
2.4 调度问题的分类	36
第 3 章 求解制造过程调度问题的进化计算方法	38
3.1 遗传算法简述	39
3.1.1 概述	39
3.1.2 染色体编码方式	43

3.1.3	种群初始化方法	48
3.1.4	选择方法	49
3.1.5	交叉方法	55
3.1.6	变异方法	58
3.2	面向制造过程调度问题的遗传算法的设计 方法	60
3.2.1	交叉方法	61
3.2.2	变异方法	69
3.2.3	混合遗传算法的构造方法	70
3.3	求解并行机调度问题的遗传算法	73
3.3.1	求解最小化完工时间并行机调度问题的遗传 算法	74
3.3.2	求解最小化拖期工件数并行机调度问题的遗传 算法	77
3.3.3	求解提前/拖后并行机调度问题的遗传算法	82
3.3.4	求解带特殊工艺约束并行机调度问题的遗传 算法	88
3.3.5	求解具有工件释放时间并行机调度问题的遗传 算法	111
3.4	求解 Flow Shop 调度问题的遗传算法	117
3.4.1	求解 Flow Shop 调度问题的启发式方法	117
3.4.2	求解 Flow Shop 调度问题的 Chen 遗传算法和 Etiler 遗传算法	123
3.4.3	求解 Flow Shop 调度问题的 Murata 遗传算法	129
3.5	求解 Job Shop 调度问题的遗传算法	138
3.5.1	Job Shop 调度问题的 Benchmark 实例	139
3.5.2	Job Shop 调度问题实例难易程度近似定量评价 方法	144
3.5.3	面向 Job Shop 调度问题的遗传算法中染色体的	

编码方式	157
3.5.4 基于操作编码的遗传算法	176
3.5.5 基于优先表编码的遗传算法	180
3.5.6 基于操作编码的并行遗传算法	183
3.5.7 基于问题特征的遗传算法	196
3.6 求解制造过程调度问题的其他进化计算方法	216
3.6.1 进化策略简述	217
3.6.2 求解制造过程调度问题的进化策略方法	220
3.6.3 进化规划简述	229
3.6.4 求解制造过程调度问题的进化规划方法	231
3.7 研究展望	237
第4章 求解制造过程调度问题的禁忌搜索方法	240
4.1 禁忌搜索方法简述	240
4.1.1 传统局部搜索方法简述	241
4.1.2 禁忌搜索方法的基本思想及基本算法流程	243
4.1.3 禁忌搜索算法的实现技术	246
4.2 求解广义并行机调度问题的禁忌搜索算法	250
4.2.1 广义并行机调度问题描述	250
4.2.2 禁忌搜索算法设计	251
4.2.3 数值计算与分析	254
4.3 求解 Job Shop 调度问题的禁忌搜索算法	255
4.3.1 求解最小化完工时间 Job Shop 调度问题的禁忌 搜索算法	256
4.3.2 求解 Job Shop 调度问题的变邻域结构禁忌搜索 算法	266
4.3.3 求解 Job Shop 调度问题的 BS + TS 混合 算法	273
4.3.4 求解带并行机 Job Shop 调度问题的分层迭代禁	

忌搜索算法	281
第 5 章 制造过程智能优化调度系统及其实施方法	291
5.1 实际复杂制造过程调度问题的特点	291
5.2 应用智能优化调度算法解决实际复杂制造过程 调度问题的一些基本思路	296
5.3 制造过程智能优化调度系统体系结构及 基本功能	304
5.4 系统实施方法	309
5.4.1 系统实施原则	310
5.4.2 系统实施阶段及方法	311
参考文献	317

Contents

Chapter1	Introduction	1
1.1	Concepts of Manufacturing Process Scheduling Problem	1
1.2	Research Significance of Manufacturing Process Scheduling Technology	5
1.3	Introduction to Manufacturing Process Scheduling Algorithms	7
Chapter2	Descriptions and Classifications of Manufacturing Process Scheduling Problem	11
2.1	Basic Concepts and General Descriptions of Manufacturing Process Scheduling Problem	11
2.1.1	Definitions of Main Variables in Manufacturing Process Scheduling Problem	11
2.1.2	General Description of Typical Manufacturing Process Scheduling Problems	13
2.1.3	Scheduling Objectives and Classification of Scheduling Solutions	24
2.2	Three – Field Classification Scheme of Scheduling Problem	26
2.2.1	Introduction to $\alpha \mid \beta \mid \gamma$ Three – Field Classification Scheme	26
2.2.2	Several Examples of Three – Field Classification	

Scheme of Scheduling Problem	29
2.3 Disjunctive Graph Model of Scheduling Problem	32
2.3.1 Introduction to Disjunctive Graph Model	32
2.3.2 Characteristics of Disjunctive Graph Model	34
2.4 Classification of Scheduling Problems	36
Chapter3 Evolutionary Computation Methods for	
Manufacturing Process Scheduling Problem	38
3.1 Introduction to Genetic Algorithm	39
3.1.1 Introduction	39
3.1.2 Coding Methods	43
3.1.3 Population Initialization Methods	48
3.1.4 Selection Methods	49
3.1.5 Crossover Methods	55
3.1.6 Mutation Methods	58
3.2 Design Methods of Manufacturing Process Scheduling	
Problem Oriented Genetic Algorithms	60
3.2.1 Crossover Methods	61
3.2.2 Mutation Methods	69
3.2.3 Design Methods of Hybrid Genetic Algorithms	70
3.3 Genetic Algorithms for Parallel Machine Scheduling	
Problems	73
3.3.1 Genetic Algorithm for Parallel Machine	
Scheduling Problem with the Objective of	
Minimizing the Makespan	74
3.3.2 Genetic Algorithm for Parallel Machine Scheduling	
Problem with the Objective of Minimizing the Total	
Number of Tardy Jobs	77
3.3.3 Genetic Algorithm for Parallel Machine Scheduling	
Problem with the Objective of Minimizing the	

Earliness – Tardiness Costs	82
3.3.4 Genetic Algorithms for Parallel Machine Scheduling Problem with Machine Eligibility Constraints	88
3.3.5 Genetic Algorithm for Parallel Machine Scheduling Problem with Job Release Time	111
3.4 Genetic Algorithms for Flow Shop Scheduling Problem	117
3.4.1 Heuristics for Flow Shop Scheduling Problem	117
3.4.2 Chen Genetic Algorithm and Etiler Genetic Algorithm for Flow Shop Scheduling Problem	123
3.4.3 Murata Genetic Algorithm for Flow Shop Scheduling Problem	129
3.5 Genetic Algorithms for Job Shop Scheduling Problems	138
3.5.1 Benchmark Instances of Job Shop Scheduling Problem	139
3.5.2 Approximate Quantificational Evaluation Method of the Degree of Difficulty or Easiness of Job Shop Scheduling Problem Instance	144
3.5.3 Job Shop Scheduling Problem Oriented Coding Methods	157
3.5.4 Operation – Coding Based Genetic Algorithm	176
3.5.5 Priority List – Coding Based Genetic Algorithm	180
3.5.6 Operation – Coding Based Parallel Genetic Algorithm	183
3.5.7 Problem Characteristic Based Hybrid Genetic Algorithms	196
3.6 Other Evolutionary Computation Methods for Manufacturing Process Scheduling Problem	216