

生产调度干扰应对 模型和算法

王杜娟 著



科学出版社

生产调度干扰应对模型和算法

王杜娟 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对加工制造企业生产加工过程中面临的计划外新任务到达和随机机器故障两类典型干扰事件,在充分考虑实际加工过程中的环境特性和生产因素的基础上,提出相应的生产系统干扰应对模型和求解算法,进而为决策者提供多个可以在加工成本和系统扰动之间进行权衡选择的科学合理的干扰应对方案。作者将所提出的模型和算法在大连市某集装箱制造企业的生产系统干扰应对过程中进行了成功应用。所述内容为加工制造企业的干扰事件应对提供了决策支持。

本书可供管理科学与工程、工业工程、自动控制及其相近专业的高校师生阅读,也可供服务运作管理领域的研究及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

生产调度干扰应对模型和算法/王杜娟著. —北京:科学出版社,2018.7
ISBN 978-7-03-058066-5

I. ①生… II. ①王… III. ①生产调度-干扰-数学模型②生产调度-干扰-算法 IV. ①F406.2-05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 132720 号

责任编辑:李欣/责任校对:邹慧卿
责任印制:张伟/封面设计:陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年7月第一版 开本:720×1000 B5

2018年7月第一次印刷 印张:10 插页:4

字数:200 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在加工制造企业的生产加工过程中,受源自市场需求不确定的计划外新任务到达以及企业生产过程中的随机机器故障等干扰事件的影响,已经制定的加工成本和资源配置最优的原始调度方案往往不再最优甚至不可行。干扰事件在增加加工成本的同时,会造成实际调度方案与原始调度方案的偏差,对依赖于原始调度方案的交货时间制定、工人排班和原材料采购等生产活动造成干扰。如何针对干扰事件特点,进行快速有效应对方案的制定,从而对受扰调度方案进行快速调整,在优化加工成本的同时降低扰动影响,成为加工制造企业亟待解决的问题,也是干扰管理研究领域的关键和核心问题。

在已有的生产调度干扰应对方案研究中,往往忽略加工过程中工人操作疲劳、设备老化磨损等环境特性对工件实际加工时间造成的恶化效应影响,忽略工件加工时间的可控特性、对机器故障概率信息的充分利用以及安排机器维护、拒绝部分工件的加工等生产因素对提高干扰应对柔性的重要作用。由于应对方案制定的高度复杂性和实时多目标性,现有的理论和方法难以兼顾多方利益、快速形成同时优化加工成本和系统扰动的有效应对方案。因此,本书针对加工制造企业生产加工过程中面临的计划外新任务到达和随机机器故障两类典型干扰事件,在充分考虑实际加工过程中的环境特性和生产因素的基础上,提出相应的生产系统干扰应对模型和求解算法,进而为决策者提供多个可以在加工成本和系统扰动之间进行权衡选择的科学合理的干扰应对方案。作者将所提出的模型和算法在大连市某集装箱制造企业的生产系统干扰应对过程中进行了成功应用。

在干扰应对模型研究方面所做的工作如下:

(1) 充分考虑恶化效应和加工时间可控对加工过程的影响,针对计划外新任务到达,采用“预案—反应”应对策略,构建了同时优化加工成本和系统扰动的干扰应对 Pareto 优化模型;

(2) 将机器维护和加工可拒绝两类生产因素引入干扰事件应对,针对计划外新任务到达,采用“预案—反应”应对策略,构建了安排机器维护和重调度集成优化,以及加工可拒绝与重调度集成优化的干扰应对 Pareto 优化模型;

(3) 充分利用可获取的干扰事件信息,针对随机机器故障,采用“鲁棒式”应对策略,构建了同时优化加工成本与鲁棒性指标,以及同时优化鲁棒性质量与风险的干扰应对 Pareto 优化模型。

为求解上述复杂的 Pareto 优化模型,在分析具体模型结构性质的基础上,设

计了高效的新型多目标进化算法,在优化机制设计、利用模型结构性质相关的先验知识和降低仿真评价代价方面分别进行了改进,从而能保证干扰应对方案生成的科学性和实时性。具体求解算法所做的改进工作如下:

(1) 在算法优化机制设计方面,针对 NSGA-II 易限于局部极优的不足,采用多目标模拟退火过程和禁忌规则对 NSGA-II 算法的全局寻优能力进行改进,降低算法陷入局部极优的概率;针对 NSGA-II 进化过程中种群多样性下降的不足,采用差分进化变异与高斯变异自适应切换的方式,增强了算法的局部搜索能力。

(2) 在利用模型结构性质相关的先验知识方面,分析了多目标干扰应对模型的结构性质,提取了工件加工次序相关和资源分配量等相关先验知识,用于对多目标进化算法的搜索过程进行引导,提高了算法收敛速度和有效前沿的多样性与收敛性。

(3) 在降低仿真评价代价方面,建立了支持向量回归模型进行鲁棒性指标的代理评价,并设计了基于随机干扰事件信息的优化策略指导搜索过程,降低了仿真评价过程的计算代价,提高了算法的求解速度和有效前沿质量。

最后,通过随机生成数值实验、Benchmark 测试函数求解以及与商业优化软件求解结果的对比,验证了所提出的干扰应对模型和求解算法的有效性。在此基础上,以集装箱加工过程中的干扰事件应对为背景,对所提出的干扰应对模型和求解算法进行了应用研究,为集装箱制造企业提供了更加科学合理的干扰应对方案,检验了理论研究的应用价值,将理论研究推广到实际应用。

本书内容属于运筹学、工业工程与人工智能的交叉与渗透,对有效应对实际生产中的频发干扰事件,构建更加科学实用的干扰应对模型和求解算法进行了有益探索,为生产调度中复杂干扰应对方案的制定提供了新思路和新方法,为加工制造企业的干扰事件应对提供了决策支持,有利于提高企业的干扰应对能力、决策效率和管理水平。本书的内容结构如下:

第 1 章 绪论。明确生产调度中干扰应对问题的产生和发展,分析具有恶化效应的生产调度和现有生产调度干扰应对方法,在此基础上明确本书的研究内容与篇章结构。

第 2 章 加工时间可控的新任务到达应对方法。针对计划外新任务到达,充分考虑恶化效应对加工过程的影响和工件加工时间的可控特性,采用“预案—反应”策略,构建同时优化加工成本和系统扰动的 Pareto 优化模型;根据模型特点,设计基于先验知识、多目标模拟退火和 NSGA-II 的新型多目标进化算法,以快速有效地求解这一大规模的干扰应对问题。

第 3 章 考虑多生产因素的新任务到达应对方法。在第 2 章的基础上,针对计划外新任务到达,充分考虑安排机器维护和加工可拒绝两类生产因素对提高干扰应对柔性的重要作用,采用“预案—反应”策略,分别构建两类生产因素与重

调度集成优化的干扰应对 Pareto 优化模型,对加工成本和系统扰动目标同时进行优化;根据模型特点,设计基于先验知识、差分进化变异、禁忌搜索和 NSGA-II 的新型多目标进化算法,以快速有效地求解这一大规模的干扰应对问题。

第 4 章 考虑调度方案鲁棒性的随机机器故障应对方法。针对随机机器故障,根据企业的干扰应对需求,充分考虑机器故障的概率信息,采用“鲁棒式”策略,分别从同时优化加工成本和鲁棒性指标,以及鲁棒性的质量与风险的角度,构建基于无缓冲时间方式的机器故障应对 Pareto 优化模型;将基于支持向量回归的代理模型引入多目标进化算法,对调度方案的鲁棒性进行近似估计,有效降低仿真评价过程中的高昂计算代价,从而提高算法求解速度,保证干扰应对的实时性要求。同时,节省的运算代价用于对模型的解空间进行全局和局部搜索,提高所输出有效前沿的质量。

第 5 章 实际案例研究。以大连市某集装箱制造企业的生产系统干扰应对过程为背景开展实际案例研究。针对集装箱加工过程中的新增订单和随机设备故障,根据实际加工过程中的环境因素和干扰应对需求,分别采用前述干扰应对模型和求解算法进行应对方案生成。通过将所生成的方案与该企业原有应对方案的应对效果进行对比分析,验证所提出的干扰应对模型和求解算法的有效性及其应用价值。在此基础上,构建集装箱加工过程干扰应对的实时辅助软件原型系统,以期将本书的理论研究成果进行有效的应用转化。

感谢国家自然科学基金项目 (No.71501024, 71871148)、四川大学创新火花项目库项目 (No.2018hhs-47)、四川大学一流学科群“管理科学与国家治理”对我们研究工作的资助,责任编辑对本书内容的表述提出了很多宝贵的意见,谨致谢忱。

由于作者的学识水平有限,书中难免存在疏漏之处,诚恳地希望读者批评指正。

作 者

2018 年 4 月

主要符号表

符号	代表意义
n_O	原始工件数量
n_N	新到达工件数量
\bar{p}_j	工件 J_j 的正常加工时间
p_j	工件 J_j 的实际加工时间
α	所有工件的共同恶化率
t_j	工件 J_j 的实际开始加工时间
u_j	工件 J_j 的资源分配量
\bar{u}_j	工件 J_j 的资源分配量上界
b_j	工件 J_j 的加工时间压缩率
c_j	工件 J_j 的单位资源费用
e_j	工件 J_j 的拒绝费用
\bar{C}_j	工件 J_j 的原始完工时间
C_j	工件 J_j 的实际完工时间
T_j	工件 J_j 的虚拟延误时间
B	随机机器故障的开始时刻
D	随机机器故障的持续时长
π^*	原始最优调度方案
π	可行调度方案
W_{\min}	机器故障后新旧调度方案的匹配时长

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 生产调度中干扰应对问题的产生和发展	1
1.2 具有恶化效应的生产调度	3
1.2.1 具有恶化效应和加工时间可控的生产调度	4
1.2.2 具有恶化效应和带有机器维护的生产调度	4
1.2.3 具有恶化效应和加工可拒绝的生产调度	5
1.3 生产调度干扰应对方法	5
1.3.1 生产调度干扰应对模型的构建	5
1.3.2 干扰应对模型的求解算法	12
1.3.3 小结	16
1.4 本书的研究内容	17
第 2 章 加工时间可控的新任务到达应对方法	20
2.1 具有恶化效应和加工时间可控的新任务到达应对分析	20
2.2 干扰应对模型构建及性质分析	21
2.2.1 原始调度方案制定	21
2.2.2 干扰应对模型的构建	23
2.2.3 模型结构的性质分析	24
2.3 干扰应对模型的求解算法	26
2.3.1 基于先验知识和混合优化机制的多目标进化算法	26
2.3.2 基于 Benchmark 测试函数的算法最优性检验	32
2.3.3 数值实验和结果分析	35
2.4 本章小结	40
第 3 章 考虑多生产因素的新任务到达应对方法	42
3.1 考虑多生产因素的新任务到达应对分析	42
3.2 考虑机器维护的集成优化干扰应对方法	43
3.2.1 考虑机器维护的原始调度方案制定	43
3.2.2 考虑机器维护的集成优化干扰应对模型的构建	45
3.2.3 考虑机器维护的集成优化干扰应对模型的结构性质分析	46

3.2.4	基于先验知识和混合优化机制的多目标进化算法	50
3.2.5	数值实验和结果分析	56
3.3	考虑加工可拒绝的集成优化干扰应对方法	62
3.3.1	考虑加工可拒绝的原始调度方案制定	62
3.3.2	考虑加工可拒绝的集成优化干扰应对模型的构建	65
3.3.3	考虑加工可拒绝的集成优化干扰应对模型的结构性质分析	65
3.3.4	基于先验知识和混合优化机制的多目标进化算法	66
3.3.5	数值实验和结果分析	70
3.4	本章小结	78
第 4 章	考虑调度方案鲁棒性的随机机器故障应对方法	80
4.1	考虑调度方案鲁棒性的随机机器故障应对分析	80
4.2	考虑加工成本与鲁棒性指标的随机机器故障应对方法	81
4.2.1	考虑加工成本与鲁棒性指标的调度模型	81
4.2.2	基于代理模型和先验知识的多目标进化算法	83
4.2.3	数值实验和结果分析	88
4.3	考虑鲁棒性的质量与风险的随机机器故障应对方法	93
4.3.1	考虑鲁棒性的质量与风险的调度模型	93
4.3.2	基于代理模型和随机排序策略的多目标进化算法	94
4.3.3	数值实验和结果分析	100
4.4	本章小结	106
第 5 章	实际案例研究	107
5.1	集装箱加工过程及干扰应对问题分析	107
5.2	考虑安排设备大维修的新增订单应对	110
5.2.1	考虑安排设备大维修的新增订单应对方案生成	111
5.2.2	考虑安排设备大维修的新增订单应对方案评价	113
5.3	考虑外包加工的新增订单应对	115
5.3.1	考虑外包加工的新增订单应对方案生成	115
5.3.2	考虑外包加工的新增订单应对方案评价	116
5.4	考虑调度方案鲁棒性的随机设备故障应对	118
5.4.1	考虑调度方案鲁棒性的随机设备故障应对方案生成	118
5.4.2	考虑调度方案鲁棒性的随机设备故障应对方案评价	120
5.5	集装箱加工过程干扰应对辅助软件原型系统	121
5.5.1	原始调度方案生成模块	122
5.5.2	干扰应对方案生成模块	122
5.6	本章小结	123

参考文献	125
附录 A 算法性能指标	137
附录 B 问题 (P3) 的混合整数规划模型	139
索引	141
彩图	

图 目 录

图 1.1	篇章结构	18
图 2.1	并行混合进化算法步骤	28
图 2.2	Benchmark 测试函数求解结果	34
图 2.3	求解过程中距离理想点的收敛曲线	37
图 2.4	求解过程中每一代有效前沿的进化过程	37
图 2.5	得到的有效前沿对比	38
图 2.6	串行与并行算法求解过程中与理想点距离的收敛曲线	39
图 3.1	NSGA-II/DE 算法流程	53
图 3.2	初始种群对比	58
图 3.3	求解过程对比	59
图 3.4	每一代有效前沿变化过程	60
图 3.5	得到的有效前沿对比	61
图 3.6	算法设计思路	66
图 3.7	NSGA-II/DE+TL 算法的流程	68
图 3.8	仿真流程	72
图 3.9	不同种群规模的算法有效前沿对比	73
图 3.10	针对小规模问题的结果对比	74
图 3.11	在 12 组实验下 R_i 平均值的均值和标准差对比	75
图 3.12	求解过程对比	76
图 3.13	得到的有效前沿对比	77
图 4.1	ADK/SA-NSGA-II 算法的流程图	84
图 4.2	初始种群对比	90
图 4.3	求解过程对比	91
图 4.4	得到的有效前沿对比	92
图 4.5	SVR/PSS-NSGA-II 算法每一代进化流程	95
图 4.6	PSS 策略的工作流程	97
图 4.7	三种算法的初始种群对比	102
图 4.8	三种算法的求解过程对比	103
图 4.9	每一代有效前沿的变化过程对比	104
图 4.10	三种算法的有效前沿对比	104

图 5.1	集装箱生产流程	108
图 5.2	干扰应对辅助软件系统体系结构图	121
图 5.3	原始调度方案生成设置界面	122
图 5.4	新增订单应对方案生成设置界面	122
图 5.5	新增订单应对方案列表	123
图 5.6	随机生产设备故障应对方案生成设置界面	123

目 录

表 2.1	四种实验参数	36
表 2.2	PHEA 与 NSGA-II 的性能衡量指标对比	39
表 2.3	PHEA-POSQ 与 PHEA 的性能衡量指标对比	39
表 3.1	求解算法设计的三个层次	51
表 3.2	调参结果	57
表 3.3	算法性能指标对比	62
表 3.4	实验参数	71
表 3.5	对每组实验进行各 30 次仿真的 R_i 平均值	75
表 3.6	不同规模问题的性能指标对比	78
表 4.1	算法调参结果	89
表 4.2	SA-NSGA-II 和 NSGA-II 的量化指标对比	92
表 4.3	ADK/SA-NSGA-II 和 SA-NSGA-II 求解结果对比	93
表 4.4	SVR/PSS-NSGA-II 的参数调试结果	102
表 4.5	SVR-NSGA-II 和 NSGA-II 的量化指标对比	105
表 4.6	SVR/PSS-NSGA-II 和 SVR-NSGA-II 的量化指标对比	105
表 4.7	SVR/PSS-NSGA-II 和 NSGA-II 的量化指标对比	105
表 5.1	一组待加工订单的实际加工参数	111
表 5.2	考虑安排设备大维修的原始调度方案	112
表 5.3	新增订单的加工参数	113
表 5.4	考虑安排设备大维修的新增订单应对方案	113
表 5.5	考虑安排设备大维修的不同应对方案的性能对比	114
表 5.6	考虑外包加工的原始调度方案	116
表 5.7	考虑外包加工的新增订单应对方案	116
表 5.8	考虑外包加工的不同应对方案的性能对比	117
表 5.9	考虑加工成本与鲁棒性指标的原始调度方案	119
表 5.10	人工经验方式的原始调度方案	119
表 5.11	加工成本最优的原始调度方案	119
表 5.12	考虑加工成本与鲁棒性的随机设备故障应对方案	120
表 5.13	不同原始调度生成方式的结果对比	120

第1章 绪 论

1.1 生产调度中干扰应对问题的产生和发展

中国作为世界上最大的制造国,在过去的30年里,制造业规模增长了18倍,占GDP的比例高达40%。然而,中国目前的制造业仍处于附加值低、创新能力弱和结构不合理的产业链中端,在整个产业价值链中扮演加工和组装为主的角色。随着中国人口结构变化和人力成本上升,如何有效地降低加工制造企业运营成本,为中国制造业带来高附加值,将是未来30年中国制造业的重要发展方向。“中国制造2025”已经拉开工业4.0的序幕,这使得动态的、实时优化的价值链成为现实,并带来成本、资源消耗等方面的最优化选择。

制造企业实时地从网上接受众多客户的定制数据,并通过网络协同配置各方资源、组织生产、向客户反馈,以及管理后续环节。为了实现各生产环节的无缝对接,需要进行合理的生产调度安排,从而有效提高机器设备的利用率、降低生产成本、提升客户满意度,同时提高企业的管理水平,并增强其市场竞争力。目前,快速有效的生产调度方案已经成为加工制造企业和众多学者争相研究的对象。然而,相关研究工作往往基于理想状态下的生产调度问题,忽略加工制造过程中可能出现的干扰事件。生产调度中典型干扰事件可以分为资源相关干扰事件和任务相关干扰事件。其中,资源相关干扰事件包括机器故障、机器维护、加工原材料的供给延迟和供给中断以及车间工人旷工等。任务相关干扰事件包括计划外新任务到达、加工任务取消、交货期提前或者延迟、工件优先级变化、任务重新返工与工件加工时间扰动等。

由于原始调度方案明确了所有加工任务的加工次序和开始—结束时刻,并且加工系统中原材料供应、交货期制定和加工资源配置等内、外部生产活动均以此为参照进行了具体安排,车间工人的绩效评价同样以此为基础进行了制定。干扰事件的发生将对上述过程造成消极影响,具体体现在两个方面:①增加了与调度方案的总完工时间和加工时间表长等相关的生产费用,以及工人加班费用、外包费用、额外资源消耗费用和运输费用等方面的成本;②对原始调度方案造成扰动影响,包含受扰任务完工时间的提前或者延误、加工次序的变化以及“机器—任务”的重新指派等。因此,如何在干扰事件发生后,快速有效地制定干扰应对方案以应对干扰事件,从而在优化生产成本的同时,有效降低干扰事件造成的扰动影响,将是一项

极具现实意义的研究工作。

目前已有学者根据干扰事件的类型和不确定程度不同,采取了“预案—反应”^[1]和“鲁棒式”^[95]两种策略进行生产调度干扰应对方案制定。前者主要用于应对不确定性信息难于获取的干扰事件,致力于干扰事件发生后实时进行受扰方案的重调度研究;而后者主要用于干扰事件不确定信息可获取的情形,聚焦于增强原始调度方案的鲁棒性。针对上述工作,相关学者已经取得部分成果^[2,3,5,12-15],然而研究中尚存以下不足。

(1) 现有研究通常假设工件的加工时间为固定常数^[5],而实际生产中受工人操作疲劳和设备老化磨损等环境特性影响,工件的实际加工时间往往呈现出“恶化效应”^[8-11]。此外,分配额外的加工资源可以缩短工件的加工时间,进而可以缩短工件的完工时间、降低恶化效应的影响和提升客户的满意度。在干扰事件应对研究中考虑上述恶化效应的影响和工件加工时间的可控特性,有助于提高干扰应对的科学性和实用性,然而相关研究尚处于起步阶段^[16-18]。

(2) 针对生产调度中干扰事件的影响,安排机器维护(休息时间段)以降低机器老化(工人操作疲劳)的影响、拒绝部分工件的加工(外包加工)以满足苛刻的时间约束要求,可以有效提高干扰应对的柔性。然而,鲜有学者将上述柔性生产因素引入干扰应对模型的构建。将上述生产因素与重调度进行集成优化,有助于制定更有效的干扰应对方案,这将是一项既有理论价值又有现实意义的研究工作。

(3) 针对随机机器故障,将其概率信息引入干扰应对模型,通过制定具有鲁棒性的调度方案能够有效降低机器故障对加工过程造成的扰动影响,然而相关研究尚处于起步阶段^[21-23]。同时,为求解上述“鲁棒式”的干扰应对模型,基于仿真的求解过程往往要付出高昂的计算代价,如何采取有效的代理评价方式以提高求解效率和优化结果,将为上述干扰应对方案的快速生成和科学的干扰应对提供基本保证。

针对上述研究不足,本书将选取加工制造企业日常生产加工过程中普遍面临的源自市场需求的计划外新任务动态到达,以及源自企业生产过程的随机机器故障这两类典型干扰事件,开展具体的生产调度干扰应对模型和求解算法研究。充分考虑恶化效应和加工时间可控对加工过程的影响,从同时优化加工成本和系统扰动的角度进行 Pareto 优化模型的构建。其中,针对计划外新任务到达,采用“预案—反应”策略,分别构建机器维护和加工可拒绝与重调度的集成优化模型,从而提高干扰应对的柔性;针对随机机器故障,采用“鲁棒式”策略构建鲁棒调度模型,从而在机器故障发生后能够以较低的成本吸收干扰事件影响,以期尽快与原始调度方案匹配,从而提高干扰应对的效果。结合上述模型特点,设计基于模型结构性质相关先验知识、代理模型和混合优化机制的新型求解算法,以期为解决复杂干扰应对方案的制定难题提供新思路和新方法。最后,为了验证上述理论研究工作的

科学合理性, 将所构建的模型和算法应用到大连市某集装箱制造企业的干扰应对过程, 以实际生产数据为支撑进行应用研究, 并开发典型干扰事件应对的辅助软件原型系统, 以期将理论研究成果进行有效的应用转化。

随着中国加工制造企业的不断发展和“中国制造 2025”的推进, 生产调度中针对干扰事件的应对研究已经逐渐成为学术界和企业界共同关注的前沿问题。在加工制造企业的加工过程中, 计划外新任务到达或随机机器故障发生后, 如何快速有效地应对干扰事件并形成同时优化加工成本和系统扰动的应对方案, 对于该领域理论的深化以及加工制造企业的发展都具有一定的意义。

理论层面上, 本书提出的综合考虑恶化效应、工件加工时间可控特性、机器故障概率信息以及安排机器维护、加工可拒绝两类生产因素柔性作用的干扰应对模型及其求解算法, 可快速有效地给出同时优化加工成本和系统扰动的干扰应对方案。本书的研究不仅有利于促进组合优化、智能优化等学科理论的交叉与渗透, 提高决策的科学性和有效性, 而且有利于丰富干扰管理的理论与方法, 为物流配送、航空调度、钢铁铸造及医疗调度等领域干扰应对问题的研究提供一定的参考。

应用层面上, 由于在加工制造过程中, 受市场需求和企业内部不确定性影响, 计划外新任务到达或随机机器故障频繁发生, 因此本书的研究成果可以为加工制造企业的干扰事件快速应对提供决策支持。它不仅有利于增强企业处理干扰的能力, 提高企业的决策效率, 而且有利于提高其服务水平, 促进加工制造业及其相关产业的发展。

1.2 具有恶化效应的生产调度

恶化效应源自生产加工过程中机器老化磨损以及车间操作人员疲劳等环境特性, 导致加工效率下降从而造成工件的实际加工时间变长。具有恶化效应的生产调度问题广泛存在于钢铁、塑料、军事以及机械加工等行业。二十世纪九十年代, Browne 和 Yechiali^[32] 较早研究了具有恶化效应的生产调度问题^[32]。此后, 这一问题一直是组合优化领域的热点与难点, 引起了国内外学者的广泛关注^[9,33,34,36]。

工件加工时间的恶化效应模型主要可以分为两类^[34]: ①位置相关 (positional): 工件的实际加工时间是其在加工时间表中的开始加工位置的非减函数; ②时间相关 (time-dependent): 工件的实际加工时间是其在加工时间表中开始加工时间的非减函数。Gordon 等^[33] 和 Janiak 等^[36] 综述了两类恶化效应模型下生产调度问题的研究进展。Gawiejnowicz^[35] 更加详细地总结了时间相关恶化效应的相关研究成果。Wang^[37] 和 Yang^[38] 研究了综合考虑时间相关和位置相关恶化效应的生产调度问题。

在具有恶化效应的生产环境下, 为了增加生产调度过程的柔性, 相关学者分别

从生产过程的资金、场地和人员受限等角度,研究了资源分配加工时间可控的生产调度问题^[40];从设备因使用磨损导致加工效率下降的角度,研究了带有机器维护的生产调度问题^[41,42];从降低在制品库存并便于协调营销和生产决策等角度,研究了工件加工可拒绝的生产调度问题。

1.2.1 具有恶化效应和加工时间可控的生产调度

在很多生产环境中,工件往往具有弹性可变的加工时间,通过在生产过程中增加额外的人力、物力或财力等,能够在一定范围内对加工时间进行压缩和控制。这类排序问题也称为加工时间可控的调度问题^[26,180]。自 Vickson 提出这一问题以来,众多学者开始着手这一富有挑战性课题的研究。在具有恶化效应的生产环境下,通过分配额外的资源以压缩加工时间可以进一步提高加工效率和调度质量。X. Wang 和 J. Wang^[44]在具有恶化效应的单机环境下,针对工件加工时间为资源分配量凸函数的情形,研究了最小化两类加工成本目标函数的生产调度问题。其中一类加工成本目标包含加工时间表长、总完工时间、总完工时间偏差和总资源消耗费用,另一类加工成本目标包含加工时间表长、总等待时间、总等待时间偏差和总资源消耗费用,分别给出了多项式时间算法。X. Wang 和 J. Wang^[45]在具有恶化效应的单机加工环境下,研究了对工件加工次序、资源分配量和工件交货期进行决策,以最小化交货期相关的调度性能指标和资源消耗费用的生产调度问题。Hsu 和 Yang^[46]在同时考虑恶化效应和加工时间可控的并行机环境下,进行了与 X. Wang 和 J. Wang^[44]类似的生产调度问题研究,不同之处在于将其中单机环境下的加工时间表长目标替换为并行机环境下所有机器的负载之和。Oron^[40]在具有恶化效应的单机生产环境下,分别针对资源费用为资源分配量的线性函数和凸函数的情形,研究了最小化加工时间表长与资源费用之和的生产调度问题。Yin 等^[47]在具有恶化效应的并行机生产环境下,同样针对资源费用为线性函数和凸函数两种情形,分别研究了最小化多种经典调度性能目标与资源消耗费用之和的生产调度问题。

1.2.2 具有恶化效应和带有机器维护的生产调度

在实际生产中机器的加工效率通常由于长时间使用磨损而降低,为恢复机器的加工效率,通常按一定计划为其安排维护^[19]。Lodree 和 Geiger^[48]较早地在具有恶化效应的加工环境下,研究了在生产周期内带有单个固定机器维护时间段的最小化加工时间表长问题。S. Yang 和 D. Yang^[49]在具有恶化效应的加工环境下,研究了生产周期内存在多个机器维护时间段约束的最小化总完工时间问题。与将机器维护作为约束条件不同,Yang^[38,50]在综合考虑加工时间具有时间相关和位置相关恶化效应的环境下,研究了安排机器维护,其中机器维护开始时间和持续时间作为决策变量,从而最小化加工时间表长与总完工时间的生产调度问题。Rustogi