

大连市政府学术专著出版项目资助图书

不确定生产调度 管理及其应用

• 周鹏飞 著

BUQUEDINGSHENGCHAN DIAODU
GUANLI JIQI YINGYONG



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

大连市政府学术专著出版项目资助图书

不确定生产调度管理及其应用

周鹏飞 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书针对实际生产管理与调度问题的动态不确定性,系统分析了生产调度中可能面临的不确定性因素及其对生产调度的影响规律,提出了不确定环境下生产调度的优化理论,探讨了不确定生产干扰管理、仿真优化和 Multi-Agent 调度系统方法。利用上述理论和方法,分别对港口岸边作业系统、堆场作业系统、起吊设备及拖车调度问题进行了系统的研究,对其调度建模、求解算法和管理问题进行了系统的阐述和分析。最后,详细阐述了集装箱堆场收发箱管理 MAS 系统的关键问题和实现。

本书可供从事生产管理与调度领域问题研究或对该领域问题关心的科研人员、学生、管理系统研发人员和企业管理人员等学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

不确定生产调度管理及其应用 / 周鹏飞著. —北京:电子工业出版社, 2012.10
ISBN 978-7-121-18755-1

I. ①不… II. ①周… III. ①企业管理—生产调度—研究 IV. ①F273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 246910 号

责任编辑:赵娜 特约编辑:王纲

印刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开本:720×1 000 1/16 印张:14.5 字数:325 千字

印次:2012 年 10 月第 1 次印刷

定价:42.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

随着世界经济和生产的全球化，市场竞争越来越激烈，这表现为产品和服务更新换代加快、技术含量提高，并向多样化和个性化方向发展，对产品和服务的要求也越来越高了。现代生产企业具有生产环节多、协作关系复杂、生产连续性强、外部环境多变等特点。生产企业为了适应市场和行业的发展需求，在竞争中立于不败之地，就要提高其生产的效率、柔性和可靠性，在生产和提供高质量产品和服务的同时节约资源、降低成本、获取更高的效益。企业生产的精细化与集约化管理是达到上述要求的必由之路，而生产调度管理中的不确定因素及其影响是提高生产管理集约化与精细化的关键。

码头生产管理是多年来国内外学术界普遍关注的复杂系统问题，涉及装卸、堆存、搬运、集疏运等多个环节，是提高港口通过能力、改善港口服务水平的重要途径。不确定性因素是生产调度问题的难点，不确定环境下的生产调度是该领域研究的重要方向，也是当前世界生产管理领域的热点问题。本书较为系统地阐述了不确定条件下生产调度理论、方法以及在码头生产中的应用，主要分理论方法和应用两大部分。理论方法部分主要包括：生产调度中的不确定因素及其干扰影响、不确定优化理论、生产调度干扰管理、生产调度仿真优化以及生产调度Multi-Agent系统。应用部分探讨不确定调度理论方法在码头生产中的应用，主要包括：码头岸边作业调度管理、码头堆场区段分配管理、堆场具体箱位分配管理、堆场桥吊调度管理、岸桥拖车场桥作业优化管理以及集装箱收发箱管理Multi-Agent系统。本书共有12章，第1章是绪论。第2章主要阐述生产调度中不确定因素的来源、起因、影响及其主要处理方法。第3章主要阐述不确定优化的基本理论，包括不确定变量、不确定优化建模和不确定变量模拟与算法。第4章主要介绍生产调度中的不确定干扰管理，包括干扰管理概述、干扰管理建模以及干扰管理的求解算法。第5章主要介绍离散系统仿真

原理，生产调度仿真建模方法以及优化技术。第6章主要介绍Multi-Agent系统原理、生产调度Multi-Agent系统架构、生产调度单Agent设计以及通信协作问题。第7章主要阐述离散型和连续型泊位岸桥调度管理问题。第8章和第9章主要介绍堆场区段以及具体箱位的不确定分配管理，采用不确定优化和仿真。第10章和第11章主要讨论堆场起吊设备与拖车的不确定优化，主要方法有不确定优化和仿真。第12章介绍集装箱堆场收发箱管理的MAS系统。本书的思路是从理论方法到应用，撰写过程中作者也力求各章独立完整，因此，读者可以从理论方法部分逐章阅读，也可以跳读感兴趣的章节，遇到理论方法问题再查询相应章节。

本书是作者多年来对不确定生产调度管理与码头应用研究成果的总结，力求反映研究的新颖性。本书涉及管理学、运筹学、信息科学等相关学科，对从事不确定生产调度管理方面研究与相关管理系统的研发人员有重要的参考价值。

本书部分为国家自然科学基金课题（71101014，71211140349）、高等学校博士学科点专项科研基金（200801411105）、中央高校基本科研业务费专项课题（DUT10JS10）、辽宁省高等学校科研项目（2008Z056）等项目的研究成果。感谢大连市政府学术专著出版委员会和大连理工大学水利工程学院对本书出版的资助。感谢康海贵教授和董国海教授在书稿撰写和出版过程中的关心和帮助。感谢电子工业出版社赵娜编辑在图书出版过程中的大力支持和帮助。感谢硕士生魏晓晓、方金灿、李丕安和史瑞芬所做的书稿校对和排版工作。在此向所有给予本书出版支持和帮助的单位和个人一并表示感谢。

由于作者水平所限，书中难免有不当之处，还请读者不吝赐教，联系邮箱：pfzhou@yeah.net。

周鹏飞

2012年7月

目 录

第一篇 绪论

第 1 章 绪论	2
1.1 生产调度管理问题	2
1.1.1 现代生产特点	2
1.1.2 生产调度问题	2
1.1.3 码头生产调度	4
1.2 生产调度方法研究	6
1.2.1 鲁棒性调度方案	6
1.2.2 适应性调度方案	7
1.2.3 智能性调度方案	8
1.3 不确定优化研究	9
1.3.1 不确定优化建模	10
1.3.2 不确定优化算法	11
1.3.3 不确定优化应用	12
1.4 码头生产调度研究	12
1.4.1 闸门及拖车调度	12
1.4.2 泊位及岸桥分配	13
1.4.3 堆场箱位场桥分配	14
1.4.4 码头资源协调管理	14

第二篇 不确定生产调度管理理论和方法

第 2 章 生产调度中不确定因素及其干扰影响	17
2.1 不确定因素的来源与分类	17
2.1.1 不确定因素的来源	17
2.1.2 不确定因素的起因	18
2.1.3 不确定因素的分类	18
2.2 不确定因素描述及其干扰影响	19
2.2.1 不确定因素的描述	19
2.2.2 不确定因素的干扰影响	20
2.3 不确定因素管理	21

2.3.1	生产调度模型中引入不确定因素	21
2.3.2	生产调度执行中减少不确定因素干扰	22
第 3 章	不确定优化理论	23
3.1	不确定变量	23
3.1.1	不确定测度的公理化定义及不确定变量	25
3.1.2	不确定变量的运算、特征数和比较	30
3.2	不确定优化模型	34
3.2.1	期望值优化模型	35
3.2.2	机会约束优化模型	37
3.2.3	相关机会优化模型	40
3.2.4	不确定多层优化模型	41
3.3	不确定变量模拟与混合智能算法	42
3.3.1	不确定变量模拟	42
3.3.2	混合智能算法	48
第 4 章	生产调度干扰管理	52
4.1	干扰管理简介	52
4.1.1	干扰管理思想的形成和发展	52
4.1.2	干扰管理方法与其他方法的区别	53
4.1.3	干扰管理的概念	53
4.2	干扰管理模型	55
4.2.1	网络图模型	55
4.2.2	数学模型	57
4.3	干扰管理算法	59
4.3.1	精确算法	59
4.3.2	近似算法	61
第 5 章	生产调度仿真优化	64
5.1	离散系统仿真原理	64
5.1.1	定义及组成	64
5.1.2	仿真系统的构建	66
5.1.3	仿真校核、验证与确认	68
5.2	生产调度仿真优化方法	71
5.2.1	仿真优化原理	71
5.2.2	仿真建模方法	72
5.2.3	优化搜索方法	73

5.2.4	仿真优化软件	76
5.3	应用案例	77
5.3.1	港口拖轮配置优化问题	77
5.3.2	港区通航系统仿真建模	79
第 6 章	生产调度 Multi-Agent 系统	82
6.1	Multi-Agent 系统概论	82
6.1.1	定义及特点	82
6.1.2	MAS 在生产调度中的应用	83
6.2	生产调度 Multi-Agent 系统架构设计	84
6.2.1	Agent 分类和结构	84
6.2.2	MAS 体系结构	86
6.2.3	生产调度系统组成与 Agent 选取	86
6.2.4	生产调度 MAS 的体系结构	88
6.3	生产调度单 Agent 设计	89
6.3.1	Agent 的内部结构	89
6.3.2	Agent 知识的表示	91
6.3.3	Agent 精神状态的表示	91
6.4	生产调度 MAS 通信	91
6.5	生产调度 MAS 的协作与协调	93
6.6	MAS 实现问题讨论	95

第三篇 不确定生产调度管理 码头生产应用

第 7 章	码头岸边作业调度管理	97
7.1	泊位—岸桥调度问题分析	97
7.2	离散型泊位—岸桥调度	98
7.2.1	问题界定与假设	98
7.2.2	不确定优化模型	99
7.2.3	集束搜索算法	102
7.2.4	改进遗传算法	103
7.2.5	混合智能算法	106
7.2.6	实验与分析	107
7.3	连续型岸线调度与干扰管理	109
7.3.1	连续型岸线调度描述	109
7.3.2	连续型岸线调度管理	111
7.3.3	调度方案干扰恢复管理	114

7.3.4 实验与分析	117
第 8 章 码头堆场区段分配管理	119
8.1 堆场箱位分配问题描述	119
8.2 堆场区段分配模型 I——堆场区段作业量平衡优化	122
8.2.1 概念和符号	122
8.2.2 目标函数和约束方程	123
8.2.3 不确定函数等价处理	124
8.2.4 求解算法	124
8.3 堆场区段分配模型 II——堆场区段箱组分配优化	126
8.3.1 模型中的概念和符号	126
8.3.2 目标函数和约束方程	126
8.3.3 基于最优解特征的启发式求解算法	127
8.4 实验与分析	128
第 9 章 码头堆场具体箱位分配管理	133
9.1 不确定条件下的进口箱堆场箱位分配	134
9.1.1 问题描述和假设	134
9.1.2 提箱次序模型及求解	134
9.1.3 堆场箱位分配模型	135
9.1.4 启发式求解算法	137
9.1.5 实验与分析	138
9.2 不确定条件下的出口箱堆场箱位分配	141
9.2.1 集装箱交箱序列分析	141
9.2.2 问题界定与模型假设	142
9.2.3 箱位分配两阶段随机规划模型	142
9.2.4 禁忌搜索算法	147
9.2.5 实验与分析	150
9.3 不确定提箱序列的进口箱翻箱落位优化	152
9.3.1 翻箱落位优选问题描述	152
9.3.2 集装箱堆场翻箱概率估计	154
9.3.3 翻箱优化启发式算法	160
9.3.4 实验与分析	163
第 10 章 码头堆场桥吊调度管理	166
10.1 堆场桥吊调度描述	166
10.2 场桥在堆场区段间调度 I	167

10.2.1	模型假设	167
10.2.2	模型构建	168
10.2.3	集束搜索算法	170
10.3	场桥在堆场区段间调度 II	171
10.3.1	模型假设	171
10.3.2	模型构建	172
10.3.3	求解算法	173
10.4	实验与分析	173
第 11 章	码头岸桥—拖车—场桥作业优化管理	176
11.1	问题描述	176
11.2	不确定优化模型	178
11.3	近似求解算法	183
11.3.1	集束搜索求解算法	184
11.3.2	混合智能遗传算法	185
11.4	实验与分析	188
第 12 章	集装箱堆场收发箱管理 Multi-Agent 系统	191
12.1	收发箱管理 MAS 架构	192
12.1.1	收发箱工艺流程与业务分析	192
12.1.2	Agent 的选取及属性	193
12.1.3	系统架构	194
12.2	MAS 中的 Agent 模型	195
12.2.1	Agent 结构和功能设计	195
12.2.2	堆场 Agent 设计	196
12.2.3	优化 Agent 设计	198
12.3	Agent 间的通信与协作	201
12.3.1	Agent 间的通信	201
12.3.2	Agent 间的协作	203
12.4	系统实现与实验分析	204
12.4.1	系统实现	204
12.4.2	实验设计	205
12.4.3	收箱箱位分配实验分析	206
12.4.4	翻箱优化实验分析	207
12.5	小结	209
	参考文献	210

第一篇

绪 论



第1章 绪 论

1.1 生产调度管理问题

1.1.1 现代生产特点

生产是指组织将其投入转换为产出的过程，即投入一定的资源，经过一系列或多种形式的转换，增加附加价值并产生效用，最后以某种形式的产出提供给社会的过程。生产既包括有形产品的形成过程（Production & Manufacturing），也包括提供服务的过程（Operation）。根据不同的生产目的，不同的生产企业应投入不同的资源，包括劳动力、资金、土地、建筑物、机器设备、工艺装备、原材料、燃料、信息等。企业要通过自身的努力，使生产产出大于生产投入才能真正实现企业的赢利目标。为此，企业应尽可能采用最经济的生产方式提供优质的产品和服务，以消耗最少的人力、物力、财力和时间，降低成本，缩短交货期。

随着世界经济和生产的全球化，市场竞争越来越激烈，具体表现为产品和服务更新换代加快，技术含量提高，并向多样化和个性化方向发展，对产品和服务的要求也越来越高。现代生产企业具有生产环节多、协作关系复杂、生产连续性强、外部环境多变等特点。为了适应市场和行业的发展需求，在竞争中立于不败之地，生产企业就要提高生产效率、柔性和可靠性，在生产和提供高质量产品和服务的同时节约资源、降低成本、获取更高效益。企业生产的精细化与集约化管理是达到上述要求的必由之路，而其核心是生产调度管理。

1.1.2 生产调度问题

所谓生产调度（Scheduling），是以生产进度计划为依据，在现有生产设备、工艺条件和能力约束下，对生产资源在时间和空间上的调度和规划，从而确定生产路线，以达到所追求的生产目标。大部分生产调度是组合优化问题，以车间作业调度为例，其需要解决的是作业次序（工件或和加工机器的次序）和时间分配问题。

生产调度的性能指标大致可以归结为三类:

- (1) 最大能力指标, 包括最大生产率、最短生产周期等;
- (2) 成本收益指标, 包括最大利润、最小运行费用、最小投资、最大收益等;
- (3) 客户满意度指标, 包括最短延迟、最小提前或者拖期惩罚等。

影响生产调度问题的因素很多, 正常情况下有产品投产期、交货期(完成期)、生产能力、加工顺序、加工设备和原料可用性、批量大小、加工路径、成本限制等, 这些都可称为约束条件。

现代生产调度问题主要有以下特点。

(1) 复杂性: 实际生产调度问题通常较为复杂, 模型求解往往是 NP 完全问题, 使得一些常规的最优化方法无能为力。

(2) 动态不确定性: 由于生产过程是动态的, 生产环境的变化, 如订单任务的改变、制造设备的异常、人员的误操作等, 都会影响原先已经制定好的生产调度计划, 如果继续执行原有调度计划, 其效率往往会下降, 有时甚至是不可完成的。因此, 必须对原有的加工计划进行修订, 以使其适应新的生产环境。

(3) 多约束、多目标性: 生产调度受生产能力、工艺条件、生产任务等多种条件约束, 需要考虑资源利用率、生产成本、客户满足度、收益等多目标。

传统的调度问题有 Job Shop 调度、Flow Shop 调度和并行机调度, 这三类调度问题虽然以机械加工为背景, 并且在模型的描述上经过简化, 但在许多实际生产调度问题中得到了体现, 有些生产调度问题实质上是由这几类调度模型混合组成的。这三类基本调度问题忽略了工件准备时间和交货期要求, 假设每道工序有且只有一台机器, 一台机器只能同时加工一个工件, 然而实际的生产调度问题往往突破了这些假设条件, 形成非传统的调度问题。如码头生产作业中的很多设备调度问题就属于非传统调度问题, 以码头泊位调度为例, 由于码头通常有多个泊位为船舶提供靠泊服务, 因此, 泊位调度问题首先属于并行机调度问题, 如果考虑泊位水深及泊位长度与船舶吃水深度和船型匹配的问题, 那么泊位调度问题又属于带工艺约束的并行机调度问题。另外, 如果再考虑船舶柔性靠泊, 即一个泊位可同时靠泊多艘船舶(船舶总长只要不超过泊位长度), 这时的泊位调度问题更是突破了一台机器同一时刻只能加工一个工件的假设条件, 可称为 multiple-job-on-one-processor-pattern 调度问题。另外, 当船型较大而泊位较小时, 就可能产生一艘船舶占用两个或者以上泊位的情况, 此时的调度问题突破了一个工件只需一台机器加工的假设条件, 可称为 one-job-two-machine-pattern 调度问题。码头岸桥调度问题通常也是多设备同时服务于一个作业任务的情况。

生产调度问题是一个传统研究课题, 应用数学、运筹学、工程技术等领域的学者对调度问题进行了大量研究工作, 20 世纪 50 年代后逐渐形成了独立分支研究方向。生产调度的核心是建立调度模型和设计求解算法, 前者包括问题建模、调度规则、

目标函数等问题,后者包括问题可解性、计算复杂性、有效算法等。目前生产调度方法主要有如下几类。

(1) 数学规划方法:主要包括数学规划、分支定界法等。这类方法通常基于某些简化的假设,并能产生一个最优的调度方案。其中绝大多数调度问题是 NP 问题,随着调度问题规模的增大,上述方法的求解难度将急剧增加,因而最优化方法往往不能适应生产实际对实时性的要求。此外,该方法大多基于理想化的假设,远不能反映实际生产环境的复杂性,而且要充分表达实际生产环境的随机性和动态性也极为困难,所以不能单独使用此类方法来解决实际的生产调度问题。

(2) 启发式方法:启发式方法针对生产调度问题的 NP 特性,并不企图在多项式时间内求得问题的最优解,而是在计算时间和调度效果之间进行折中,以较小的计算量来得到最优解或近似最优解。比较经典的启发式方法有模拟退火算法、遗传算法、人工神经网络、禁忌搜索等。由于该方法计算量小、效率高、实时性好,因此在动态调度研究中被广泛采用。

(3) 基于人工智能的方法:近年来,基于知识的智能调度系统方法和研究取得了很大发展,如针对具体问题的专家系统。专家系统作为一种较好的调度方法也存在着不容忽视的缺点:对新调度环境的适应性差,由于生产环境的高度不确定,调度目标常常是变化、动态甚至是冲突的,使得专家系统只能适应于相对稳定的系统;开发周期长,费用高;专家系统是基于知识的系统,但是人们对经验和知识的获取受到了历史条件的限制。

随着对生产调度问题研究的不断深入以及精细化生产要求的不断提高,实际生产中不确定因素及其对生产调度的影响越来越受到人们的关注。不确定条件下的生产调度也逐渐成为该领域的研究热点,目前成熟的不确定生产调度主要有适应性调度、鲁棒性调度等^[1]。1.2 节将重点阐述不确定生产调度的策略和方法。

1.1.3 码头生产调度

“港口是经济前瞻指标”,而码头是港口的前沿部分,是港口主要功能实现的生产单位。随着改革开放的不断深化,经济的飞速发展,我国与世界各国的贸易往来得到了长足发展,港口吞吐量也随之出现了高速增长的势头。近 30 年来,我国集装箱运输业发展迅猛,其吞吐量稳居世界首位。世界吞吐量前 10 位的港口中国占了 6 个席位,上海港已稳居第二的位置,并且在不久的将来有望超过新加坡港成为世界第一大集装箱港口。随着港口吞吐量的持续增长,货运需求与码头能力缺口的矛盾凸显,我国优良码头的岸线资源有限。在现有生产资源条件下如何挖掘潜力,改进码头的管理水平,提高港口吞吐能力,是码头生产调度所面临的问题。

合理的码头生产调度管理可以提高船舶的装卸效率、加速车船周转、降低货运

成本、缩短货运时间。目前船舶发展逐渐走向大型化和高速化,例如,马士基海陆运输班轮公司(Maerisk Sea-land)、丹麦航运集团公司(Dannisk Carrier)等世界著名集装箱运输公司经营的第七代集装箱船舶的装载能力达到了7000标准箱(TEU)以上,有些甚至高达10000 TEU以上;船速达到25节(kn),有些甚至达到了40 kn。船舶大型化和高速化的发展为码头生产带来了巨大的压力。同时,随着码头的建设和发展,港口间的竞争也变得越来越激烈。港口的竞争优势除来自港口的地理位置和腹地经济条件之外,港口的技术条件、作业效率和管理水平也是体现其竞争力的重要因素。要在新一轮的港口竞争中取得优势,必须使港口生产作业系统化、合理化,为船舶的装卸提供一个良好的作业平台,而实现这一目标的唯一有效途径是优化港口资源的分配与调度管理(见图1-1)。



图 1-1 集装箱码头

作为物流链条上的重要节点,集装箱码头既是水运系统的集散站,又是转换运输方式的缓冲池,码头生产的主要任务是完成集装箱装卸、临时堆存、集装箱交接等基本功能。围绕这些基本功能,集装箱码头系统可分为闸口检验、堆场作业、岸边作业、港内运输等子系统。图1-2给出了集装箱码头系统的作业示意图,其中岸边作业子系统完成船舶的停靠、装卸等任务,堆场作业子系统负责集装箱的核查、堆码、提取以及暂存等任务,闸口检验子系统负责对进出港车辆和集装箱进行检验、登记等作业,港内运输子系统完成集装箱在堆场与岸边间的搬运。码头主要生产资源包括泊位(Berth)、岸边吊装设备(Quay Crane)、港内运输设备(Container Vehicle)、堆场空间(Container Yard Space)、堆场吊装设备(Container Yard Crane)、闸口检验车道(Gate Lane)以及人力资源等。集装箱码头企业可以看成一类特殊的生产企业,其生产调度是在集装箱码头作业工艺约束下,以到港船、箱、车任务计划为依据,

合理分配和规划其资源的使用，完成船、箱、车的在港周转服务，获取最大效益。本书应用部分主要探讨集装箱码头泊位、岸桥、拖车、堆场空间、场桥等生产资源的调度管理问题。

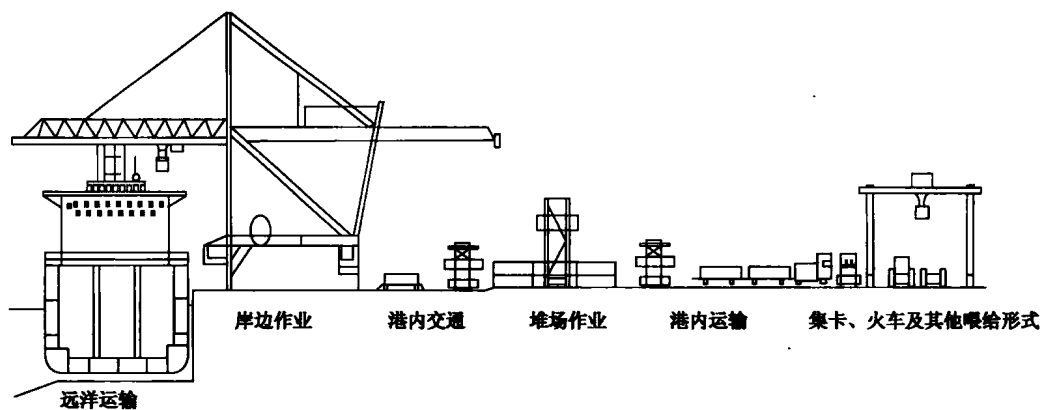


图 1-2 集装箱码头作业示意图

集装箱码头生产调度具有以下特点：

- （1）协调性。由于码头是多种运输方式的衔接点，其生产组织涉及多个部门和机构。从外部看，码头既要和船东、货主、集疏运部门保持联系，又要同海关、港监等机构协作；从内部看，码头要协调交接箱、装卸、搬运和理箱等多工种，形成有机体，码头生产需要多部门、多工种、多环节的内外协作。
- （2）动态性。码头生产组织要基于船公司、船代、货主、集疏运等部门的计划安排，而这些计划信息是动态变化的，如船期会因天气变化等改变。
- （3）不确定性。码头调度涉及多种不确定因素，如船期、岸桥作业、拖车行驶时间等^[2]。

1.2 生产调度方法研究

生产调度管理涉及多种事先无法预料的不确定因素，必须考虑多种不确定因素才能保证生产的顺利进行，同时获取满意的调度方案。针对不确定因素和调度管理的策略主要有鲁棒性调度、适应性调度和智能性调度。

1.2.1 鲁棒性调度方案

不确定因素对生产调度目标的影响不同，调度方案对不确定因素的灵敏度也不同。针对生产中出现的不确定因素，综合考虑目标与调度方案鲁棒性之间的矛盾，

制定满足实际需求的调度方案,称为鲁棒(Robust)调度,制定的方案称为鲁棒调度方案。鲁棒性调度方案在执行的时候,可以使干扰或各种不确定因素对最初计算性能指标的影响最小。如文献[3,4]采用情景分析方法,或者基于最坏情景建模,求取最优的性能指标。很显然这是一种保守或风险厌恶的做法,但很多人证明保守的方法在生产调度问题上是有利的。

生产鲁棒性调度的研究较多,如李明切等^[5,6]用随机变量描述不确定作业时间,基于随机规划建立鲁棒调度模型,采用遗传算法进行寻优。Pistikopoulos^[7]分析了不确定性条件下生产过程设计和调度的一体化,在生产过程最优设计中考虑了调度问题,建立了设计和调度关联的二级随机规划模型,增加生产过程的柔性,使生产过程在不确定环境下调度获得满意解。一般来说,对于变化频繁但幅度较小的不确定因素,只要不出现大的扰动,可考虑采用鲁棒调度方案,能获得比较满意的效果。码头生产中面临着天气、机器故障等诸多不确定性,如船舶抵港延迟、计划外船舶靠泊、装卸箱量变化、岸桥作业效率波动与故障等。Moorthy 和 Teo^[8]利用时间约束图(Time-constrained Graph)模型估计船舶在锚地的等待时间,求解鲁棒预调度方案。周鹏飞^[2]较全面地分析了面向不确定环境的集装箱码头优化调度方案选择和不确定因素的处理方法,针对船舶抵港时间和装卸时间的随机性建立了面向随机环境的集装箱码头泊位-岸桥分配模型,旨在获得鲁棒性较强的泊位岸桥分配方案。

1.2.2 适应性调度方案

适应性调度是早期处理不确定性因素主要采用的方法,就是当不确定的事件发生之后再决定应该怎么做,根据实际情况对初始调度进行动态修改,也可以称为在线调度,这也曾经被认为是处理调度中不确定情况的最好方法,是由 Macchietto^[9]最先提出的。适应性调度可以分为重调度(Rescheduling)、滚动调度(Rolling Scheduling)、动态调度(Dynamic Scheduling)、在线调度(On-line Scheduling)等^[10]。重调度又可分为连续性和周期性两类:连续性重调度要求在引起系统状态变化的事件发生时立即进行重调度,能极快地跟踪系统变化,但其计算量极大,对于复杂系统难于满足实时性要求^[11,12,13];周期性重调度是在一定生产时间间隔后进行重调度,但在时间间隔内对突发事件不敏感,时间间隔内的偏差积累可能导致系统整体性能的恶化,其优点是计算量较小,易于实现在线重调度。

滚动调度是利用滚动优化的思想,可分为 Time-based(基于时间窗)和 Job-based(基于工作窗)的滚动调度。针对柔性制造系统(FMS)中突发事件多采用重调度和滚动调度^[14,15,16]。吴受章等^[17]基于自适应控制思想,提出了一种 FMS 自适应调度模型。王朝晖等^[18]针对缓冲库存约束调度问题,采用模糊变量处理不确定因素,建立了模糊规划模型,并提出了 Lagrangian 松弛求解算法。由于流程工业的复杂性和任