



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

# 基于计算思维的集装箱码头 物流系统建模仿真与控制决策

李 斌 李文锋 杨家其 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

# 基于计算思维的集装箱码头 物流系统建模仿真与控制决策

李 斌 李文锋 杨家其 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

集装箱码头物流系统(container terminal logistics system, CTLS)的控制决策是其装卸作业的灵魂,具有高度的非线性、随机性、动态性、耦合性和复杂性。现有的运筹规划、系统仿真、智能优化和基于仿真的优化等方法对于 CTLS 的调度决策都有一定的局限性,且缺乏通用性,所提出的数学模型和优化算法的可移植性不强,故无论是从理论研究还是从工程实践的角度来看,都亟须新的研究思路和解决方案。本书从计算思维(computational thinking)的角度重新审视了 CTLS 的计划调度,将集装箱码头内的装卸作业看做一种广义的“计算”,提出了利用计算机体系结构、操作系统任务调度和资源分配思想展开对 CTLS 建模的基础理论,给出了基于计算思维对 CTLS 进行建模仿真和决策优化的系统方法。在此理论框架下,面向集装箱码头的单个作业环节和协同作业生产调度,进行了大量的仿真实验和数据分析,验证了所提理论方法的可行性、可信性、适用性与优越性。

本书是利用计算思维对复杂交通/物流系统进行建模优化与计算实验的一次重要尝试,研究视角较为独特,具有一定的创新和学术价值,可作为交通运输工程、物流工程与管理、工业工程等专业教师、博士后、研究生的参考书,也可供从事交通运输工程、物流工程与管理、工业工程等专业研究方向的技术人员参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

基于计算思维的集装箱码头物流系统建模仿真与控制决策/李斌,李文锋,杨家其著. —北京:科学出版社,2016

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-050304-6

I. ①基… II. ①李… ②李… ③杨… III. ①集装箱码头-物流-物资管理-系统仿真 ②集装箱码头-物流-物资管理-系统建模 IV. ①U656.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 257988 号

---

责任编辑:姚庆爽 / 责任校对:郭瑞芝

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 10 月第一次印刷 印张:19 3/4

字数:400 000

定价:110.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

## 《博士后文库》序言

博士后制度已有一百多年的历史。世界上普遍认为,博士后研究经历不仅是博士们在取得博士学位后找到理想工作前的过渡阶段,而且也被看成是未来科学家职业生涯中必要的准备阶段。中国的博士后制度虽然起步晚,但已形成独具特色和相对独立、完善的人才培养和使用机制,成为造就高水平人才的重要途径,它已经并将继续为推进中国的科技教育事业和经济发展发挥越来越重要的作用。

中国博士后制度实施之初,国家就设立了博士后科学基金,专门资助博士后研究人员开展创新探索。与其他基金主要资助“项目”不同,博士后科学基金的资助目标是“人”,也就是通过评价博士后研究人员的创新能力给予基金资助。博士后科学基金针对博士后研究人员处于科研创新“黄金时期”的成长特点,通过竞争申请、独立使用基金,使博士后研究人员树立科研自信心,塑造独立科研人格。经过30年的发展,截至2015年底,博士后科学基金资助总额约26.5亿元人民币,资助博士后研究人员5万3千余人,约占博士后招收人数的1/3。截至2014年底,在我国具有博士后经历的院士中,博士后科学基金资助获得者占72.5%。博士后科学基金已成为激发博士后研究人员成才的一颗“金种子”。

在博士后科学基金的资助下,博士后研究人员取得了众多前沿的科研成果。将这些科研成果出版成书,既是对博士后研究人员创新能力的肯定,也可以激发在站博士后研究人员开展创新研究的热情,同时也可以使博士后科研成果在更广范围内传播,更好地为社会所利用,进一步提高博士后科学基金的资助效益。

中国博士后科学基金会从2013年起实施博士后优秀学术专著出版资助工作。经专家评审,评选出博士后优秀学术著作,中国博士后科学基金会资助出版费用。专著由科学出版社出版,统一命名为《博士后文库》。

资助出版工作是中国博士后科学基金会“十二五”期间进行基金资助改革的一项重要举措,虽然刚刚起步,但是我们对它寄予厚望。希望

通过这项工作,使博士后研究人员的创新成果能够更好地服务于国家创新驱动发展战略,服务于创新型国家的建设,也希望更多的博士后研究人员借助这颗“金种子”迅速成长为国家需要的创新型、复合型、战略型人才。



中国博士后科学基金会理事长

## 序

《基于计算思维的集装箱码头物流系统建模仿真与控制决策》的书稿摆在我的案头,给我带来了一份惊喜。这是我全程见证的一位年轻学者及其所在研究团队过去十年承担国家“十一五”科技支撑计划课题、国家自然科学基金、中国博士后科学基金项目等,对汉堡港、上海港、广州港、宁波港、厦门港、福州港、重庆港和武汉港集装箱码头实地调查和研究所取得成果的结晶。这部专著的样稿经中国博士后科学基金会《博士后文库》编委会严格初审、专家评议、科学出版社选题论证,获得2015年度博士后优秀学术专著出版资助,由科学出版社出版发行。我愿意向读者推荐这部著作。

现代港口作为国际物流系统中的核心节点,是远洋、内河船舶以及内陆运输的枢纽,也是各种信息、经济和技术的汇集点,既是货物运输系统的集散站,又是转换货物运输方式的缓冲池。CTLS是以集装箱为对象,由装卸作业系统、生产调度系统和管理信息系统组成的高度复杂的物流系统,包括装卸和运输设备、信息读取、传输及处理设备、集装箱堆存区域、船舶停靠区域和控制与调度系统等。现代集装箱码头物流系统(container terminal logistics system,CTLS)的建模优化与控制决策研究已经成为交通运输工程、物流工程与管理以及工业工程领域的重要研究方向。

现代CTLS具有以下特征:其体系结构复杂,公路、铁路、海运等多种集疏运方式并行作业时,既要确保每种集疏运方式具有专用的作业和存储空间、设施设备资源,彼此之间又需要能共享空间和资源,这样,码头的设施布局 and 系统结构非常复杂;是一个典型复杂多环节、并发性强的多维空间作业离散事件动态系统(discrete element dynamic system,DEDS),需用一组离散状态方程来描述其动态特性;是分布式控制系统(distributed control system,DCS)和多层次并行处理系统(multi-level parallel processing system,MPPS),涉及多种作业设备和服务资源,各设备及资源均有特定的计划、调度、控制、决策逻辑和模式;涉及物流、信息、调度等多种建模和优化技术,系统运行时存在并行、协调、竞争、博弈和同步/异步等多种关系;是一个典型的排队系统,到港船舶在满足泊位适应情况下除特殊物资优先考虑,一般按照先到先服务(FCFS)的原则进行处理;是资源动态重构服务系统,需要敏捷高效地进行泊位、岸桥、集卡、场桥和堆场的资源分配,按照作业面形成实时动态的装卸运输生产作业线;装卸工艺多样、生产调度复杂,同一码头有几种不同的作业模式并存,同一设备在作业周期内需要完成进口/出口箱、中转箱、内部周转

箱或客户提箱等多类操作,应尽量减少设备空转,提高各作业环节的并行性与协同性,尽量便于到港集装箱的集疏运作业;随机性强、柔性差、设备作业时间不确定、搬运设备之间协调性要求高,复杂多变的海洋气候环境和越来越个性化的客户需求,特别是某些根据潮汐规律作业的港口,增加了 CTLIS 系统的随机性;集疏运作业时吊运设备没有缓冲区,运输车辆装卸站的缓冲区容量很小,致使系统柔性差,特别是在多作业线并行时,易发生死锁和冲突现象。

基于以上诸点,要求现代 CTLIS 应具有合理的布局和先进、优化的集装箱装卸工艺,这是综合评价码头经济效益的基础。

现代 CTLIS 本质上是一个信息物理系统(cyber-physical systems, CPS)和智能物流枢纽,这为 CTLIS 的计划调度和控制决策引入新的优化思路提供了技术支撑,并奠定了其理论基础。

作者在这部专著中介绍了集装箱运输、集装箱码头物流系统,阐述了集装箱码头物流系统的建模与决策方法、决策对象的研究现状、研究趋势和共性关键问题;针对港口航运业的发展趋势和集装箱码头作业的实际需求,在计算思维和复杂系统的理论框架下,重新诠释“计算物流”的定义,集成计算机科学中体系结构、组成原理和操作系统的思想,融合分布式计算、并行计算、异构计算、可重构计算原理,对 CTLIS 的建模优化与调度决策的理论和进行了系统深入的研究,具有重要的理论意义与实际应用价值,广大作者阅读以后一定会感到有些别开生面,一定会感到有所收获。

该书的出版是作者利用计算思维对复杂交通/物流系统进行建模优化与计算实验的一次成功的尝试。相信作者将不断拓展相应的研究方法、计算框架和决策模式,为集装箱港口的生产计划调度系统和智能决策支持系统的设计与实现提供更加坚实、完备的理论支撑,进一步提高我国集装箱港口的规划、设计、计划、调度和决策的水平和竞争力,为我国“一带一路”和自由贸易区战略的顺利实施贡献自己的聪明才智。

2016年仲夏于武汉理工大学百花园



## 前 言

本书是过去十年间作者及其研究团队对集装箱码头实地调研和研究工作的全面回顾与系统总结。作者及其研究团队在分析集装箱码头物流系统(container terminal logistics system, CTLS)的平面布局、装卸工艺、设备配置、计划调度和控制决策的基础上,面向计算思维(computational thinking),融合交通运输工程、物流工程、系统工程、软件工程、工业工程的科学思想和方法,将集装箱码头内的装卸作业看做一种广义的“计算”,首先引出集装箱码头集成服务系统(container terminal integrated service systems, CTISS)的概念;继而将经典的精确计算和分布式控制架构——计算机体系结构和基于 Agent 的计算设计思想和方法体系相融合,以描述和建模 CTLS,得出一种新的 CTLS 整体建模和调度决策思想;随后基于计算机和自动化科学的思想方法,为 CTLS 的滚动计划、集成调度、协同控制和智能决策提出新的计算框架和算法模式族,并利用一系列典型生产实例进行大量的计算实验,验证相关的建模思想和决策范式。

基于计算思维对 CTLS 进行复合建模和决策优化是一条有别于传统的运筹规划、系统仿真、智能优化和基于仿真的优化的较新的应用基础研究思路和工程实践的解决路径。在过去的十年间,本书的第一作者一直致力于利用计算思维和相似理论对集装箱港口的生产调度和控制决策进行理论分析及应用基础研究。在先后考察汉堡港、上海港、广州港、宁波港、厦门港、福州港、重庆港和武汉港等多个有代表性的集装箱码头基础上,进行了大量的仿真实验和数据分析,对所提出的建模思想、决策框架、控制模式、调度算法和计算范式进行了验证、分析和修正。相关研究工作主要围绕国家“十一五”科技支撑计划课题:现代物流综合管理关键技术与平台(批准号:2006BAH02A06,骨干成员,按时结题);国家自然科学基金:面向同贝同步装卸的集装箱码头前沿集成生产调度计算实验(批准号:61304210,主持,在研);教育部人文社会科学研究一般项目:不确定环境下集装箱码头生产调度的复合模型、优化策略及其计算实现(批准号:11YJC630089,主持,免于鉴定结题);中国博士后科学基金:集装箱码头泊位-岸桥-集卡协同生产调度仿真优化研究(批准号:2012M511695,主持,按时结题);福建省自然科学基金:不确定环境下的集装箱码头泊位与岸桥协同配置调度仿真优化研究(批准号:2012J05108,主持,按时结题)和福建省教育厅 A 类科技项目:基于哈佛体系结构的集装箱码头物流系统建模与优化研究(批准号:JA10214,主持,按时结题)等国家、省部和市厅级科研项目进行展开。项目主要成果已经在 *International Journal of Distributed Sensor*

*Networks*、《计算机集成制造系统》《交通运输系统工程与信息》《东南大学学报》《电子科技大学学报》《系统仿真学报》、IEEE CDC、IEEE SMC、IEEE WSC、中国控制会议等权威学术期刊和国内外权威会议上发表学术论文 30 余篇,已被 SCI/EI 检索 22 篇,核心期刊 17 篇,在中国知网的下载总量超过 3000 次,他引超过百次。

项目团队李文锋和杨家其两位教授使我能够在武汉理工大学这座高等学府和传统交通行业院校中,在深爱的研究方向自由探索,毫无束缚地开展自己的工作。本书从选题到理论构造再到计算实验以及最终定稿的过程中都得到了两位导师的悉心指导和无私帮助。在校期间两位导师严谨的治学态度、渊博的知识、广阔的学术视野和勤奋进取的精神深深地影响着我,他们在学业上所给予的指导、精神上所给予的鼓励,成为鞭策我不断进取的动力,我的每一点进步都离不开两位导师的悉心指引和关怀,李老师和杨老师将是我毕生学习的楷模。

感谢实验室张煜教授、詹斌教授和葛艳红副教授对我的指导和帮助!

感谢实验室博士研究生闫新庆、陈维克、梁晓磊、钟叶、杨林等,硕士研究生孙波、刘曙光、吴翔、金龙、熊巧文、孙俊等同学在我学习和工作过程中给予的建议和帮助!

未来,作者的研究思路将进一步结合港航发展趋势和贴近港口作业实践,完善、拓展和提高相应的计算框架和决策模式,将相关的思想方法转化到港口的作业实践中,为集装箱港口的生产计划调度系统和智能决策支持系统的设计与实现提供理论支撑,切实提高我国集装箱港口的规划、设计、计划、调度和决策能力,为我国“一带一路”和自由贸易区战略的顺利实施提供有力的支撑。

# 目 录

《博士后文库》序言

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 集装箱运输	1
1.2 集装箱码头物流系统概述	2
1.3 研究现状	5
1.3.1 集装箱码头物流系统的建模与决策方法	5
1.3.2 集装箱码头物流系统的建模与决策对象	7
1.4 研究趋势与共性核心问题	15
1.5 本书研究的目的与意义	16
1.5.1 研究目的	16
1.5.2 研究的实际价值与理论意义	17
第 2 章 计算思维框架下的集装箱码头物流系统	19
2.1 集装箱码头物流系统分析	19
2.1.1 集装箱码头物流系统的运作描述及其转化模型	19
2.1.2 港口集装箱流	20
2.2 集装箱码头物流系统与信息物理系统	22
2.3 集装箱码头集成服务系统	25
2.4 计算思维与集装箱码头计算物流	29
2.4.1 计算思维	29
2.4.2 计算物流	29
2.4.3 面向集装箱码头的计算物流	30
2.4.4 面向 CTLS 的广义计算思维	30
2.5 面向计算思维的 CTLS 抽象定义	31
2.5.1 CTLS 的运作模式	31
2.5.2 面向 CTLS 的统一指令级体系结构	32
2.5.3 面向 CTLS 的通用计算指令集	33
2.6 本章小结	34
第 3 章 CTLS 和计算机系统的体系结构与调度机制相似分析	35

3.1	引言	35
3.2	两系统总体视图比较	37
3.2.1	系统层次结构比较	37
3.2.2	顶层视图映射	38
3.2.3	CTLS 和计算机系统的互连结构映射	39
3.3	系统组成与体系结构比较	43
3.3.1	整体结构比较	43
3.3.2	码头前沿与中央处理器	43
3.3.3	码头堆场和存储器	44
3.3.4	码头集装箱进出口与外设	45
3.3.5	CTLS 的体系结构分析	46
3.4	集装箱码头生产调度系统与计算机操作系统比较	47
3.4.1	基于排队网络理论的集装箱码头生产调度	47
3.4.2	码头前沿调度与处理机调度	49
3.4.3	堆场管理与内存管理	50
3.4.4	水平运输与总线调度	51
3.4.5	集装箱码头集疏运与输入输出设备管理	51
3.4.6	CTLS 生产调度层次	52
3.5	差异性浅析	54
3.6	本章小结	54
<b>第 4 章</b>	<b>基于哈佛体系结构和 Agent 计算的 CTLS 建模</b>	<b>55</b>
4.1	引言	55
4.2	多 Agent 系统与 CTLS	55
4.2.1	分布式人工智能与多 Agent 系统	55
4.2.2	基于 Agent 的计算及其应用研究	56
4.2.3	将智能 Agent 引入 CTLS	57
4.2.4	基于 Agent 的建模与仿真方法	57
4.3	面向 CTLS 的 Agent 建模	58
4.3.1	CTLS 中的 Agent 分类	58
4.3.2	核心 Agent 的功能分析	59
4.4	基于哈佛体系结构和 Agent 计算的整体建模思想	69
4.5	基于哈佛体系结构和 Agent 计算的 CTLS 的建模体系结构	70
4.5.1	CTLS 与计算机系统的组成映射关系	70
4.5.2	基于哈佛体系结构和 Agent 计算的 CTLS 的建模体系结构	71
4.6	CTLS 中各 Agent 间的交互和协作描述	73

---

4.6.1	Agent 间的相关性	73
4.6.2	Agent 间的通信方式	74
4.6.3	Agent 间的通信交互定义	74
4.7	基于属性的有阻塞的混合流水车间的集装箱码头生产调度建模	78
4.7.1	基于属性的有阻塞的混合流水车间问题	78
4.7.2	中央处理器与集装箱码头前沿装卸	79
4.7.3	集装箱码头生产调度的基于属性的有阻塞的混合流水车间描述	80
4.7.4	基于属性的有阻塞的混合流水车间的双层集装箱码头生产调度模型	83
4.8	本章小结	85
<b>第 5 章</b>	<b>集装箱码头操作系统的控制决策计算模型</b>	<b>86</b>
5.1	引言	86
5.2	集装箱码头操作系统的计算逻辑视图	86
5.2.1	集装箱码头操作系统和计算机操作系统	86
5.2.2	集装箱码头操作系统的分层微内核体系结构	88
5.2.3	集装箱码头操作系统的客户/服务器计算模型	90
5.2.4	集装箱码头操作系统的执行模式	91
5.3	基于多 Agent 的集装箱码头操作系统计算模型	92
5.3.1	基于 Agent 的计算和集装箱码头操作系统	92
5.3.2	集装箱码头操作系统的多 Agent 系统计算模型	94
5.3.3	集装箱码头操作系统的通用控制结构	97
5.4	模型评估与仿真分析	98
5.4.1	仿真模型设计	98
5.4.2	应用实例背景	99
5.4.3	仿真验证实验	101
5.4.4	系统性能评估	103
5.4.5	负载均衡分析	105
5.5	本章小结	111
<b>第 6 章</b>	<b>集装箱码头物流调度决策计算体系</b>	<b>112</b>
6.1	引言	112
6.2	面向进程和线程的集装箱码头生产调度	112
6.2.1	集装箱码头物流服务的进程与线程定义	112
6.2.2	面向进程与线程的集装箱码头物流调度计算框架	114
6.2.3	集装箱码头生产调度体系结构	116
6.3	集装箱码头操作系统的通信交互模式	118
6.4	集装箱码头操作系统的消息和事件处理机制	121

6.5	本章小结 .....	122
<b>第7章</b>	<b>基于哈佛体系结构和 Agent 计算的 CTLS 前沿生产调度 .....</b>	<b>123</b>
7.1	引言 .....	123
7.2	CTLS 中资源分配的基本思想 .....	124
7.3	动态泊位-岸桥调度模型 .....	126
7.4	多泊位指派问题 .....	128
7.4.1	基于计算机操作系统调度策略的泊位指派 .....	129
7.4.2	基于群集智能的泊位指派 .....	132
7.5	泊位-岸桥联合调度问题 .....	136
7.6	码头前沿泊位-岸桥配置研究 .....	137
7.6.1	计算机设计的量化原则 .....	137
7.6.2	CTLS 生产调度中的指导原则 .....	138
7.6.3	仿真实例 .....	139
7.7	本章小结 .....	141
<b>第8章</b>	<b>基于哈佛体系结构和 Agent 计算的集装箱码头核心设备调度 .....</b>	<b>142</b>
8.1	引言 .....	142
8.2	水平运输集卡调度模型 .....	143
8.3	集卡动态调度仿真研究 .....	147
8.3.1	仿真场景 .....	147
8.3.2	集卡动态调度机制 .....	148
8.3.3	仿真结果 .....	149
8.3.4	仿真分析 .....	152
8.4	水平运输集卡调度的量化评估 .....	157
8.5	基于仿真的优化——集卡调度 .....	159
8.6	集装箱码头场桥调度模型与算法 .....	162
8.6.1	场桥作业概述 .....	162
8.6.2	场桥调度限制条件与基本原则 .....	164
8.6.3	场桥调度与磁盘臂调度 .....	165
8.6.4	数学模型 .....	165
8.6.5	调度算法 .....	168
8.7	仿真实验 .....	169
8.7.1	仿真实例 .....	169
8.7.2	仿真分析 .....	171
8.7.3	场桥作业配置研究 .....	172
8.8	综合仿真实例 .....	173

8.8.1 仿真平台 .....	173
8.8.2 仿真实例 .....	174
8.8.3 实验结果及分析 .....	175
8.9 本章小结 .....	177
<b>第9章 基于多处理器片上系统的集装箱码头作业体系</b> .....	<b>178</b>
9.1 引言 .....	178
9.2 集装箱码头装卸作业发展趋势 .....	178
9.3 面向计算机体系结构的 CTLS 建模思想 .....	180
9.4 异构多处理器片上系统与集装箱码头物流系统 .....	182
9.4.1 多处理器片上系统视角下的集装箱码头平面布局 .....	182
9.4.2 异构多处理器协同计算与集装箱码头装卸工艺 .....	183
9.4.3 集装箱码头的并行硬件体系结构 .....	185
9.4.4 面向多处理器多线程的集装箱码头生产调度 .....	187
9.5 面向多处理器的 CTLS 并行体系结构分析和异步并行 计算模型 .....	187
9.6 面向多线程编程模型的集装箱码头任务调度 .....	190
9.6.1 冯·诺依曼计算机体系下的港口作业 .....	190
9.6.2 CTLS 的并行编程模型 .....	190
9.6.3 集装箱码头任务调度模型 .....	191
9.6.4 面向高性能的集装箱码头作业组织 .....	194
9.7 仿真实验与结果分析 .....	195
9.7.1 集装箱码头生产实例 .....	195
9.7.2 基于计算思维的综合调度算法 .....	196
9.7.3 性能评估与行为分析 .....	197
9.8 本章小结 .....	202
<b>第10章 面向并行可重构计算的集装箱码头生产调度</b> .....	<b>204</b>
10.1 引言 .....	204
10.2 港口生产与并行计算 .....	204
10.3 并行可重构计算视角下的码头作业 .....	206
10.4 面向混合流水车间的港口并行协同作业 .....	207
10.4.1 混合流水车间调度与 CTLS 控制决策 .....	207
10.4.2 基于属性的有阻塞的动态可重构混合流水车间的港口生产调度 .....	208
10.4.3 面向基于属性的有阻塞的动态可重构混合流水车间的多层双向 作业体系 .....	210
10.5 计算实验与结果分析 .....	213

10.5.1	实验场景	213
10.5.2	仿真结果	214
10.5.3	进一步分析	215
10.6	本章小结	217
<b>第 11 章</b>	<b>集装箱码头通用决策框架及其典型调度算法</b>	<b>218</b>
11.1	引言	218
11.2	生产调度通用框架	219
11.3	基于处理器关联的调度决策模式	221
11.3.1	处理器亲和性	221
11.3.2	基于处理器关联的调度决策模式	221
11.4	基于 PID 控制的调度决策体系与模式	222
11.4.1	面向相似理论的移植应用	222
11.4.2	PID 控制	223
11.4.3	面向 PID 控制的调度决策基本框架和实时作业负载系数	223
11.4.4	基于 PID 控制的调度决策算法	225
11.4.5	基于 PID 控制的调度决策子模式	227
11.5	仿真实验 I	228
11.5.1	实验场景	228
11.5.2	VV&A 实验	229
11.5.3	性能分析	230
11.5.4	负载均衡	233
11.6	仿真实验 II	235
11.6.1	实验场景	235
11.6.2	VV&A 实验	236
11.6.3	通过能力分析	237
11.6.4	综合性能评估	238
11.7	本章小结	243
<b>第 12 章</b>	<b>面向 PID 控制和仿真优化的集装箱码头作业调度</b>	<b>244</b>
12.1	引言	244
12.2	基于仿真的优化与 CTLS	244
12.3	面向 CTLS 的基于仿真的优化整体体系	246
12.4	面向 CTLS 的基于仿真的优化的参考模型	247
12.5	PID 控制与基于仿真的优化	249
12.5.1	经典的 PID 控制	249
12.5.2	基于仿真的优化	250



---

12.5.3 本质的统一与融合 .....	250
12.6 基于仿真优化的调度决策广义计算实验体系 .....	252
12.6.1 计算实验和基于仿真的优化 .....	252
12.6.2 面向计算思维的统一决策框架 .....	252
12.6.3 面向 CTLS 的广义计算实验 .....	254
12.7 面向 PID 控制的港口调度决策优化 .....	254
12.7.1 基于 PID 控制的调度决策算法 .....	254
12.7.2 基于 PID 控制的调度决策目标定义 .....	256
12.7.3 基于 PID 控制的调度决策模式参数整定 .....	258
12.8 前沿装卸作业抽象 .....	260
12.9 计算实验 .....	263
12.9.1 生产实例 .....	263
12.9.2 参数优化 .....	263
12.9.3 性能评估 .....	265
12.9.4 资源利用与负载均衡 .....	267
12.9.5 参数整定鲁棒性 .....	268
12.10 本章小结 .....	269
<b>第 13 章 总结与展望 .....</b>	<b>271</b>
13.1 本书的研究成果 .....	271
13.2 进一步的研究工作 .....	272
<b>参考文献 .....</b>	<b>274</b>
<b>近十年的主要科研工作 .....</b>	<b>291</b>
<b>编后记 .....</b>	<b>296</b>