

集装箱港口运作管理 优化问题研究

镇璐/著



科学出版社



集装箱港口运作管理优化问题研究

 镇 璐 著 

科学出版社

北京

内 容 简 介

集装箱港口是全球贸易的枢纽,对全球经济的运转和发展起着非常重要的支撑作用。自 20 世纪 60 年代以来全球集装箱运输一直保持着较高的发展势头。目前,世界排名前十的特大型集装箱港口年吞吐量基本都在 1000 万标准箱以上。如此大的吞吐量,使得传统港口设施、运营方式正经受严峻的考验。我国是一个港口大国,世界十大港口中有七个在我国。在应对当前日益激烈的国际港口竞争中,如何提高这些大型集装箱港口的运作效率,是我国港口管理者迫切关心和亟须解决的核心问题。

本书针对集装箱港口运作管理中的各类资源分配与调度优化问题,从岸线侧、堆场侧、集成优化、港口新技术、港口集疏运系统等角度,介绍了上述领域中一些系统化的研究成果。具体研究了泊位、岸桥、堆存区域、港口新型设备、港区拖船等港口核心资源的分配与调度优化问题,建立了相关决策模型,并设计了相应的高效求解算法。同时,本书还展示了大量实验分析结果,验证了所提模型的优化效果和算法的求解效率。最后,本书对集装箱港口运营管理优化决策领域中未来可能的研究方向进行了展望和分析。

本书可供从事集装箱港口运营的生产和管理人员参考,也可供高校和科研院所中从事管理科学与工程、物流管理、港口与航运等相关专业研究的学者、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

集装箱港口运作管理优化问题研究/镇璐著. —北京:科学出版社,2017.12

ISBN 978-7-03-056003-2

I. ①集… II. ①镇… III. ①集装箱码头-港口管理-运营管理
IV. ①U656.106

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 309673 号

责任编辑:陶璇/责任校对:王瑞 孙婷婷

责任印制:霍兵/封面设计:无极书装

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

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张:28

字数:550 000

定价:226.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

镇璐，上海大学管理学院教授、博士生导师、副院长。教育部青年长江学者、国家优秀青年科学基金获得者、上海市青年拔尖人才、上海市东方学者特聘教授、上海市曙光学者。1981年出生于湖北省宜都市，1999年考入上海交通大学机械与动力工程学院试点班，2003年7月本科毕业，获工学学士学位；之后本校直升，五年硕博连读，2008年9月博士毕业于上海交通大学工业工程与管理系。2008年11月至2010年12月在新加坡国立大学从事博士后研究；2011年3月起在上海大学管理学院担任讲师，分别于2011年10月、2012年11月破格晋升为副教授、教授，2015年1月担任管理学院副院长。主要研究领域集中于：港口与航运物流运作管理优化、智能物流与供应链管理等。近年来发表SCI或SSCI国际期刊论文56篇（第一作者或通讯作者），涵盖 *Transportation Science*、*Transportation Research Part B*、*Naval Research Logistics*、*IIE Transactions* 等国际著名期刊；先后主持包括三项国家级课题在内的13项各类研究项目。先后受邀担任四本SCI/SSCI国际期刊和两本EI国际期刊的副主编和编委。另外受邀担任上海市学位委员会第五届学科评议组成员（管理科学与工程）、上海市管理科学学会“物流与供应链”专业委员会秘书长、中国管理科学与工程学会理事、中国物流学会常务理事等。





序



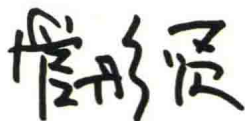
全球航运网络犹如支撑世界经贸活动运转的“主动脉”，在世界经济的发展历程中发挥着不可替代的基础性作用。20世纪50年代，集装箱运输模式的出现与兴起，极大地促进了航运物流效率的提升与成本的降低。越来越多的货物采用集装箱运输模式，集装箱海运也逐渐成为全球供应链运营活动的重要载体，进而形成“全球集装箱供应链”。集装箱港口作为全球航运网络中的重要节点，在全球集装箱供应链中承担着枢纽作用。集装箱港口运作效率极大地影响着全球航运网络乃至全球物流活动的整体运营效率，对世界经济发展也存在着不可忽视的作用。

伴随着中国经济的腾飞，我国港口业近年来也取得举世瞩目的成就。从集装箱吞吐量排名的角度看，我国已有七个港口跻身世界前十，上海港已经连续七年居世界第一。从港口技术水平的角度看，上海振华重工股份有限公司（简称振华重工）参与设计实施的洋山港四期工程，可实现码头装卸、水平运输、堆场装卸环节的全过程智能化、无人化操作，这将是世界最大的自动化集装箱码头。振华重工1992年从零开始，成功走向世界，多年来占80%世界市场份额的业绩，实现了创业时提出的目标：“世界上凡有集装箱作业的码头，就有上海振华重工生产的集装箱机械”，上海振华重工的成功是“天人合一”的成果，顺应世界贸易全球化、中国经济腾飞的趋势。无论是从码头建设还是港口设备技术来看，我国已经逐步发展为世界港口大国。然而，如何真正成为世界港口强国，如何进一步提升集装箱港口的运作管理水平与效率，是我国所面临的非常重要、亟须重视的研究问题，具有非常重大的现实意义。

镇璐教授长期从事港口与航运物流管理问题研究，对港口与航运物流中一些运作管理优化决策问题开展了深入而系统的研究工作。该书针对集装箱港口中涉及的泊位分配、堆存区域分配、岸桥调度、自动化码头系统等决策优化问题，借助运筹学领域中一些数学建模理论和计算机领域中算法设计与实现工具，提出了一系列决策优化模型和算法，并基于一些实际港口数据开展了数值实验，验证了这些模型和算法的有效性。书中阐述的这些研究成果，对于集装箱港口运作管理

效率提升具有较强的理论价值和现实意义。这些先进的数学模型和求解算法将来可以嵌入港口运作管理领域中的一些决策支持软件中，进一步提升当前港口运作管理软件的“智能化”程度，这对当前所开展的“智慧港口”建设也具有较强的支撑作用。

随着“智慧港口”“绿色港口”等建设规划的深入推进，港口运作管理水平提升的迫切性日趋增强。中国是世界港口大国、上海港是世界第一大集装箱港口，我期待上海大学镇璐教授，以及越来越多的中国学者，继续关注和研究港口运作管理问题，与港口企业合作，运用世界最先进的管理优化理论、人工智能理论，结合我国港口的实际问题背景，不断探索管理新模式、效率提升新途径，为进一步提升我国港口的运营水平和现代化程度做出新的贡献。



2017年12月10日



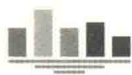
目 录

第一篇 绪 论

第 1 章 集装箱港口运作管理概论	3
1.1 世界集装箱港口发展历史概况.....	3
1.2 集装箱港口发展的影响因素.....	5
1.3 港口运营现状及趋势分析.....	7
1.4 本书研究内容框架.....	12
第 2 章 港口运作管理优化问题研究现状	15
2.1 基于文献统计的相关研究概况分析.....	15
2.2 岸线侧资源分配问题研究现状.....	34
2.3 堆场侧资源分配问题研究现状.....	43
2.4 小结.....	52

第二篇 岸线侧运作管理优化问题研究

第 3 章 不确定环境下泊位分配问题	55
3.1 引言.....	55
3.2 集装箱港口泊位分配问题背景.....	55
3.3 基于场景的两阶段随机规划模型.....	56
3.4 考虑船舶序列的改进型模拟退火算法.....	60
3.5 关于求解算法和泊位分配模型的数值实验.....	67
3.6 小结.....	79

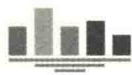


第 4 章	考虑周期性的中期层面泊位分配问题	81
4.1	引言	81
4.2	不确定性环境下的周期型泊位分配问题背景	81
4.3	周期型泊位分配问题的随机优化模型	85
4.4	模型求解算法	88
4.5	中期层面的泊位分配问题的鲁棒优化模型	92
4.6	模型验证与模型间关联分析的数值实验	97
4.7	讨论和拓展	111
4.8	小结	113
第 5 章	潮汐港泊位分配问题	115
5.1	引言	115
5.2	潮汐港泊位分配问题背景	115
5.3	考虑潮汐和航道限制等因素的泊位分配模型	121
5.4	基于列生成的算法设计	126
5.5	关于列生成算法的数值实验	131
5.6	连续型泊位分配问题的拓展	139
5.7	小结	140
第 6 章	鲁棒型泊位分配双目标优化问题	142
6.1	引言	142
6.2	双目标鲁棒型泊位分配问题背景及模型构建	142
6.3	面向双目标决策优化模型的求解算法设计	146
6.4	不确定环境下模型验证与参数灵敏度分析数值实验	153
6.5	小结	161
第 7 章	特大型港口码头分配问题	162
7.1	引言	162
7.2	考虑燃料消耗的转运港码头分配问题背景及模型构建	163
7.3	码头分配问题模型线性化	170
7.4	基于局部分支和粒子群算法的求解方法设计	176
7.5	不同码头和船舶数量下的实验研究	181
7.6	小结	189



第三篇 堆场侧运作管理优化问题研究

第 8 章	不确定时空维度下堆存区域分配问题	193
8.1	引言	193
8.2	堆存区域分配问题背景	193
8.3	面向不确定船舶停泊位置和到港时间的模型构建	195
8.4	基于模型约束松弛的高效求解算法设计	197
8.5	面向算法性能与模型有效性验证的数值实验研究	199
8.6	小结	206
第 9 章	不确定数量维度下堆存区域分配问题	207
9.1	引言	207
9.2	不确定环境下堆存区域分配问题背景	207
9.3	堆存区域分配问题的相关约束	214
9.4	基于场景的随机规划模型构建	216
9.5	改进的模拟退火算法设计	219
9.6	不同应用环境下的数值实验研究	222
9.7	模型扩展与分析	230
9.8	小结	230
第 10 章	周期型堆存区域分配问题	232
10.1	引言	232
10.2	堆存区域分配问题和堆场模板介绍	232
10.3	混合多周期模式下堆场模板优化模型构建	237
10.4	基于局部分支和粒子群算法的求解方法设计	243
10.5	面向模型有效性验证与算法性能比较的数值实验分析	250
10.6	小结	258
第 11 章	考虑拥塞的堆存区域分配问题	260
11.1	引言	260
11.2	考虑拥塞因素的堆存区域分配问题背景	260
11.3	期望行驶时间计算公式推导与堆存模板优化模型构建	269
11.4	基于优先权序列空间搜索的求解算法设计	277



11.5 面向建模中考虑拥塞因素的效用分析与算法性能测试280
 11.6 小结287

第 12 章 堆存模板下卸货存放位置分配问题289

12.1 引言289
 12.2 堆场分配过程中的不确定因素290
 12.3 恢复策略：处理不确定性的一种传统方法291
 12.4 面向不确定性环境下卸货存放位置实时分配的决策支持系统294
 12.5 动态分配模板与静态分配模板数值对比实验300
 12.6 小结306

第四篇 岸线与堆存侧资源分配集成优化问题研究

第 13 章 岸线与堆存侧资源分配集成优化问题311

13.1 引言311
 13.2 大型转运港中泊位分配与堆存区域分配问题背景311
 13.3 面向周期型分配计划模板设计的建模扩展315
 13.4 周期型泊位分配与堆存区域分配集成优化决策模型316
 13.5 面向大规模算例求解的高效算法设计324
 13.6 模型与算法有效性验证和参数灵敏度分析实验329
 13.7 小结341

第五篇 面向港口新技术的运作优化问题研究

第 14 章 面向新技术的港口运作效率比较分析研究345

14.1 引言345
 14.2 基于钢架桥的自动化集装箱码头系统345
 14.3 基于排队论模型的两种不同堆场自动化系统的比较348
 14.4 基于离散事件仿真模型的验证研究362
 14.5 小结365

第 15 章 基于钢架桥的自动化集装箱码头起重机调度研究367

15.1 引言367



15.2	基于钢架桥的自动化码头系统中起重机调度问题背景	367
15.3	针对两类起重机调度的整数规划模型构建	370
15.4	面向新系统中岸桥起重机调度模型的求解算法设计	374
15.5	算法性能比较实验与参数灵敏度分析	378
15.6	小结	383

第六篇 面向内河航线的枢纽港拖船调度问题研究

第 16 章	面向内河航线的枢纽港拖船调度问题	387
16.1	引言	387
16.2	面向内河航线的驳船运输系统中拖船调度问题背景	387
16.3	内河驳船运输系统中拖船调度决策优化模型构建	389
16.4	基于分支定价的精确求解算法	395
16.5	面向上海港与长江航线的实验分析	404
16.6	小结	408

第七篇 总结与展望

第 17 章	总结与展望	413
17.1	研究内容总结	413
17.2	未来研究方向展望	415
参考文献	417
后记	433





第一篇 绪 论



第 1 章

集装箱港口运作管理概论

随着社会经济的发展及全球一体化进程的推进，各国之间的商贸往来日趋频繁，海运以其超大的载货能力和相对低廉的单位运输价格成为了当代国际贸易的主要运输方式。为了满足日益增长的海洋运输总量，港口从只具备装卸搬运功能，逐步发展演化成兼具工业、信息、服务等功能的重要经济活动节点。同时，依托腹地实体经济的发展，以港口为核心的港口工业、服务业逐渐成为一个地区甚至一个国家的支柱型产业。一些大型港口已成为整合资金流、信息流、物流、人流的关键节点枢纽，在全球贸易中占据重要一环^[1]。联合国贸易和发展会议报告数据显示，全球海运物流系统承担了约 90% 的国际贸易运输量，由此看出海运已成为全球供应链的生命线。面对与日俱增的全球贸易量和货物运输需求，如何提高港口的运作效率，已成为港口运营商亟须解决的核心问题之一。本章首先简要回顾了世界港口发展历程、世界集装箱港口发展历程及中国国内集装箱港口发展历程；然后分析了影响集装箱港口发展的重要因素；最后论述了集装箱港口运作管理的现状及未来发展趋势。

1.1 世界集装箱港口发展历史概况

1.1.1 世界港口的发展历程

世界港口的演化与发展相伴于世界经济文明的发展历程。世界港口的发展主要分为四阶段。第一阶段：19 世纪 60 年代以前。当时港口功能较为单一，主要用于货物的装卸搬运、仓储与集散，并利用这一枢纽实现海运、路运和空运等各类运输方式间的转换。第二阶段：19 世纪 60 年代至 20 世纪 80 年代。传统港口已无法满足日益增长的业务需求，一些传统港口开始凭借自身优势发展临港产业，对到港货物进行再加工，使其增加产品附加价值。第三阶段：20 世纪 80 年代至 20 世纪末。港口技术、航运技术和信息技术得以发展，港口成为国际贸易增长的关键节点。并且依托临港产业的发展，港口逐渐成为集国际贸易、物流、金融、服务、工业等功能的多位一体的综合性区域。数据显示，在这一阶段，世界港口的吞吐量由 3635 万标准箱（twenty-foot equivalent unit, TEU）增长到了 22 040 万

TEU, 其增幅高达近 6 倍。随后, 为了适应全球贸易的需要, 在港口逐渐建立各类出口加工区、保税园区和物流园区等, 从而带动了港口的进一步发展。第四阶段: 20 世纪末至今。依托国际贸易的发展, 以港口所处城市或地区为主体, 具备国际调度、综合服务和信息化等功能并融入全球供应链理念的国际航运中心应运而生。而目前考虑枢纽港与经济腹地之间存在着客观距离, 资源不可能完全集中在枢纽港附近, 利用喂给港可以将经济腹地的货物通过小型或中型海轮运输至枢纽港进行中转, 使得货物可以通过枢纽港上船出海^[2]。由此在空间布局上, 形成了以国际航运中心为核心, 地区性枢纽港、支线港和喂给港为辅的港口群结构。

1.1.2 集装箱港口的发展历程

“集装箱”是海运发展历史上最重要的发明之一。早在 19 世纪初, 欧洲就曾提出了集装箱的概念。而后, 第一次工业革命期间, 为了解决机器运输与人工搬运之间的矛盾, 1830 年出现了一种用于装载煤及杂货的容器, 可以说是集装箱的雏形。20 世纪初, 集装箱运输方式首先应用于英国铁路的运输当中, 此时其发展速度还处于一个较慢的阶段。到了 20 世纪 50 年代, 美国在北美与欧洲的北大西洋航线上, 第一次运行 220TEU 的集装箱船。自此, 在美洲、欧洲及其他沿海地区, 集装箱运输开始逐渐兴起。随后, 集装箱技术日益成熟, 推动了世界范围内港口的基础设施建设, 也对全球航运网络及港口体系格局产生了深远影响。70 年代中期以后, 集装箱船舶数量在全球范围内迅速增加, 集装箱港口初具规模, 形成欧洲、东亚和北美洲三大集装箱港口群“三足鼎立”的局面。20 世纪 90 年代, 受经济全球化、信息技术革命、环境变化等诸多因素的影响, 西方经济增速下降, 全球经济格局发生变化, 全球集装箱港口格局也随之改变。北美洲、欧洲及大洋洲的集装箱港口数量及规模发展速度减慢甚至停滞, 发展中国家和地区更多地参与到全球生产制造的过程中。以中国香港和新加坡为首, 亚太地区逐渐成为国际贸易运输的核心地区。此时, 中转型港口也在世界集装箱运输行业中占据了非常重要的地位^[3]。进入 21 世纪以后, 亚洲地区集装箱港口核心地位更加凸显, 经航运界网统计, 2016 年全球集装箱港口排名, 前 10 名之中亚洲地区集装箱港口占据 9 席, 共完成前 30 大港口总箱量的 58.54%, 而在这 9 席之中, 中国占据了 7 席。近年来, 尽管欧洲、日本经济有所复苏, 局部范围内集装箱港口的规模有所调整, 但全球集装箱港口的总格局并未改变。

1.1.3 中国大陆集装箱港口的发展历程

鉴于中国与发达国家的经济发展差距, 我国集装箱港口呈现起步较晚、发展



周期较短、发展速度快的特点。中国集装箱运输兴起于20世纪70年代。1972年,在天津港完成了我国第一次集装箱的运输。但由于当时造船技术有限,港口装卸搬运机械等设备也不完善,集装箱运输事业并没有取得突破性发展。改革开放以后,才正式拉开我国现代化集装箱运输的序幕。1978~1988年被认为是我国集装箱港口发展的起步阶段。1978年,我国第一次拥有通往国际的集装箱运输航线。同年,半集装箱“平乡城”号完成了国际航运的任务,开辟了中国国际集装箱班轮运输的新纪元。1981年之后,天津港、上海港、青岛港、广州港等国内首批集装箱专用码头相继投入使用。这一时期,我国从事集装箱运输的港口,由原来的4个增加到近20个,港口年吞吐量由1979年的3.29万TEU,增长到1988年的97.24万TEU,涨幅近30倍。20世纪末至21世纪初,是我国集装箱港口的快速发展阶段。1992年,上海、天津、青岛及大连等港口进入全球集装箱港口百强行列。进入21世纪以来,我国集装箱港口不断向专业化、大型化方向发展,港口运作效率明显提高。2013年,货物吞吐量3亿t以上的中国大陆港口数量达到10个,集装箱吞吐量500万TEU以上的港口数量达到11个。“一带一路”倡议提出之后,进一步加强了我国对外贸易,为航运业发展创造了有利条件。根据交通运输部公布的各港口数据,2016年,全国规模以上港口完成货物吞吐量118.3亿t。

1.2 集装箱港口发展的影响因素

世界集装箱港口的形成和发展具有内在机理,影响其发展的驱动要素相互促进和制约,并且不断充实和丰富。

1.2.1 自然因素

一般来说,航道水深、结冰期长短、岸线类型、港湾特征及区位条件等自然因素会对集装箱港口的发展产生影响^[4]。①航道水深会直接影响其可航运船只的吨位。大型集装箱船舶的数量持续增加,航道过浅的港口易被航运市场边缘化,最终被淘汰。②纬度较高,冬季结冰期较长的港口,全年可营运时间较短,有时还要依赖破冰船开辟航道,增加了运营成本。③岸线类型方面,海岸线曲折、水位较深、地表承重能力强的区域适宜港口的建设。而海岸线相对平坦、浅滩面积大或是存在淤泥海滩的区域,建港难度较大,甚至要依靠人工填挖形成人工港。④风浪一直以来都是影响港口作业的重要因素之一,港湾内风浪较少,口小内宽常被称为优良的港湾。⑤港口发展的过程中,难免遇到如腹地资源、转运量的竞

争,因此港口的区位条件也会对港口的进一步发展产生影响。⑥随着能源的稀缺,燃油成本的价格已经显著增长,现在已经超过了船舶总成本的35%。能源的消耗会影响大型集装箱船舶的速度,很显然能源价格的进一步上涨也将会影响船舶规模大小的选择。而速度和规模的下降不仅会增加运输的交货时间,还会增加相应的库存时间。

1.2.2 经济因素

从世界各国经济发展的角度来看,18世纪60年代,工业革命之后,欧洲经济迅速发展,首先提出并采用了集装箱运输方式。第二次世界大战之后,世界经济格局发生变化,美国成为经济霸主,从而形成了围绕北大西洋航区的两大集装箱港口群。20世纪70年代之后,第三次工业革命期间,亚洲国家加快学习西方先进技术,其经济呈现快速发展趋势,以中国香港、中国台湾、新加坡、韩国及日本为代表,出现了香港港、基隆港、釜山港等大型港口,两大集装箱港群逐渐演变为美国、欧洲、东亚等世界三大港口群。但受经济全球化、人口老龄化、环境变化等多种因素的影响,西方国家经济增速放缓,东南亚国家经济增速明显,全球集装箱航运中心逐步向亚洲转移。尤其是21世纪之后,中国改革开放成果显著,逐渐成为全球制造业的中心,以中国为核心的全球集装箱航运中心的格局正式形成。另外,从港口腹地经济发展的角度来看,通过与周围经济区域的贸易联系,产生了更多的港口货运需求。

根据以往研究结果显示,集装箱吞吐量和地区生产总值(gross domestic product, GDP)的增长呈现类似的趋势和轨迹。以部分年份数据为例,1980年,世界生产总值为11万亿美元,全球前十大集装箱港口的吞吐总量为1100万TEU。2000年,世界生产总值为33万亿美元,全球前十大集装箱港口的吞吐总量为7983万TEU。到了2013年,世界生产总值为76万亿美元,全球前十大的集装箱港口吞吐总量也达到2.9亿万TEU,其中有8个港口的集装箱吞吐量在1500万TEU以上。航运业的发展、集装箱港口的发展与世界经济的发展趋势保持一致。

1.2.3 科技因素

科学技术的进步、全球经济的发展及港口的发展,三者之间相互影响、相互促进。以现代经济的快速发展为基础,集装箱技术不断取得突破,随之促进集装箱港口在全球范围内的发展。先进的集装箱装卸系统,专业化、标准化的大型机