



Y3219917

分类号 U491.3

密 级 公开

单位代码 10618

学 号 2140950032



重庆交通大学

专业硕士学位论文

集装箱码头装卸作业调度优化研究

研 究 生 姓 名: 严庭玉

导师姓名及职称: 盛进路 副教授

申请专业学位类别 工程硕士 学位授予单位 重庆交通大学

论文提交日期 2017 年 4 月 10 日

专 业 领 域 名 称 交通运输工程 论文答辩日期 2017 年 5 月 30 日

2017 年 6 月 08 日

分类号 U491.3
密 级 公开

单位代码 10618
学 号 2140950032



重庆交通大学

专业硕士学位论文

集装箱码头装卸作业调度优化研究

研 究 生 姓 名: 严庭玉

导师姓名及职称: 盛进路 副教授

申请专业学位类别 工程硕士 学位授予单位 重庆交通大学

论文提交日期 2017 年 4 月 10 日

专 业 领 域 名 称 交通运输工程 论文答辩日期 2017 年 5 月 30 日

2017 年 6 月 08 日



Y3219917

Research on Container Terminal Handling Operation Scheduling Optimization

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

Candidate: Yan Tingyu

Supervisor: Prof. Sheng Jinlu

Chongqing Jiao tong University, Chongqing, China

重庆交通大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：严庭云

日期：2017年6月12日

重庆交通大学学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆交通大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本人学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并进行信息服务（包括但不限于汇编、复制、发行、信息网络传播等），同时本人保留在其他媒体发表论文的权利。

学位论文作者签名：严庭云
日期：2017年6月12日

指导教师签名：严庭云
日期：2017年6月12日

本人同意将本学位论文提交至中国学术期刊（光盘版）电子杂志社 CNKI 系列数据库中全文发布，并按《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》规定享受相关权益。

学位论文作者签名：严庭云
日期：2017年6月12日

指导教师签名：严庭云
日期：2017年6月12日

摘 要

集装箱码头作为港口企业的重要组成部分、现代物流的节点，在快速发展的全球化经济中占据着重要的作用。随着集装箱港口吞吐量快速增加和集装箱船舶在港作业时间越来越长。如何实现合理配置码头装卸设备，提升集装箱码头整体调度水平，对减少船舶靠泊时间和降低码头、船公司成本、码头装卸作业效率等都至关重要。

本文首先针对集装箱码头装卸作业的特点，提出了如何在单装卸情况下使得装卸时间与成本最优。根据集装箱码头装卸作业的特点与运作方式画出作业流程图，然后基于图论方法建立了网络调度模型进行求解。通过将求解的结果与集成调度的整数规划模型求解结果相比较，明显运用网络调度模型求解的结果具有更好的表现性。其次，基于考虑影响装卸效率的因素文章提出船方及港方在合作中的利益博弈问题，通过双方在集装箱船的配积载计划编制过程中的利益分歧进行分析，建立基于港方和船方在配积载过程中利益均衡的博弈模型，在装船顺序和箱位分配的博弈中对港方和船方的博弈均衡进行预测，找到港方与船方在博弈中的最优策略，使得配积载方案在基本满足船舶适航要求的基础上，综合考虑双方的成本，确保码头生产高效和节能。

总的来说，提高码头的生产作业效率对码头可持续发展有着重要意义，实现集装箱码头作业系统整体优化；节约船方、港方生产成本，是现在码头运营研究的重要课题。

关键词：集装箱码头；集装箱装卸作业；网络调度；利益博弈

ABSTRACT

As an important part of port enterprises, modern logistics nodes, container terminal occupies an important role in the rapid development of the global economy. With the rapid increase in container port throughput and the increasing length of container ships in Hong Kong. With the rapid increasing throughput of container port and container ships in port operation time longer and longer. It is quite important to reduce the ship berthing time and dock, and the costs of shipping companies, improving the efficiency of container terminal handling operation by realize the rational allocation of port loading and unloading equipment, and improving the whole level of scheduling container terminal.

This paper first puts forward the characteristics of loading and unloading time and cost in the case of single loading and unloading. According to the characteristics and operation of container terminal loading and unloading operation, the operation flow chart is drawn, and then the network scheduling model is established based on graph theory. By comparing the results of the solution with the integer programming model of the integrated scheduling, the results of the solution using the network scheduling model are better. Secondly, This paper consider the ship and terminal interests in the cooperative game, through the analysis of the interests of the Hong Kong side and the ship side in the preparation process of the container ship, the establishment of a game model based on the balance of interests of the Hong Kong side and the ship in the distribution process, The optimal strategy of the Hong Kong side and the ship side in the game is found, so that the cumulant loading scheme can be considered on the basis of basically satisfying the ship's airworthiness requirements. Both sides of the cost, to ensure the safety of the, efficient and energy efficient.

In general, improving the production efficiency of terminal to terminal has great significance to the sustainable development. it is now important hot topic in the field of port operation to save the ship and terminal production cost and to realize the global optimization of container terminal operation system.

KEY WORDS: Container terminal; Container handling operations ; network scheduling; benefit game

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 选题背景和意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	3
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 集装箱码头单一阶段调度研究	4
1.2.2 集装箱码头各阶段集成调度研究	5
1.2.3 集装箱码头调度最新研究成果	6
1.3 主要研究内容及技术路线	7
1.3.1 主要内容	7
1.3.2 技术路线	8
第二章 集装箱码头装卸作业概述	9
2.1 大型集装箱船舶特征及箱位表示	9
2.2 集装箱码头功能及设施	10
2.2.1 集装箱码头的功能	10
2.2.2 集装箱码头设备设施	11
2.3 进出口作业流程	12
2.4 集装箱码头装卸作业调度过程	13
2.4.1 各生产阶段独立调度作业	13
2.4.2 各生产阶段集成调度作业	14
2.5 影响集装箱码头装卸调度效率的因素	15
第三章 集装箱码头装卸作业网络调度研究	17
3.1 网络调度模型介绍	17
3.2 网络模型前提描述	17
3.3 模型假设	18
3.3.1 参数定义	19
3.3.2 决策变量	19
3.4 网络调度模型建立	20
3.5 数值实验	21
3.5.1 成本与效率分析	21

3.5.2 实例	21
第四章 配积载中港方和船方利益博弈优化分析	26
4.1 集装箱配积载作业分析	26
4.1.1 集装箱码头配积载流程	26
4.1.2 集装箱船舶配积载原则及要求	27
4.2 集装箱配积载博弈影响因素分析	29
4.3 集装箱船舶配积载中港方和船方利益均衡博弈	31
4.3.1 供应链理论及港口供应链	31
4.3.2 博弈论理论	32
4.4 港方和船方非合作博弈模型	33
4.4.1 模型假设	33
4.4.2 博弈模型	33
4.5 港方和船方的合作博弈	35
4.6 数值实验	36
4.7 配积载中博弈论模型应用的思考	39
第五章 结论与展望	40
5.1 结论	40
5.2 主要研究成果	40
5.3 展望	40
致 谢	42
参考文献	43
研究成果	46

第一章 绪 论

1.1 选题背景和意义

1.1.1 研究背景

（1）集装箱港口吞吐量持续增长

现代集装箱港口的集装箱吞吐量不断增加,据调查^[1]世界 2/3 以上贸易通过海运方式实现的。而由于我国港口基础设施建设的不断完善,我国港口货物吞吐量和集装箱吞吐量增涨迅速。据中华人民共和国国家统计局统计数据显示,近十年来,我国各港口集装箱吞吐量总体呈稳步增长趋势。期间从 2008 年下半年开始,受全球金融危机的影响,我国各港口的集装箱吞吐量增速有些放缓。但在之后,随着世界经济的复苏、世界范围内外贸往来频繁及国内需求不断增长等因素的带动下,我国各港口生产稳步回升,增长速度明显加快。在 2010 年以后,随着全球经济放缓,我国各港口的集装箱吞吐量的增长率虽有所下降,但集装箱吞吐量还在平稳增加。2010 年吞吐量 1.45 亿标准箱,增长率为 18.8%,这一年中国港口集装箱吞吐量明显高于国外港口,充分体现我国政府对拉动内需对时间经济的贡献。这种影响在之后几年也有体现,2011 年吞吐量 1.62 亿标准箱,增长率为 11.4%;2012 年吞吐量 1.77 亿标准型,增长率为 8.1%;2013 年吞吐量 1.89 亿标准箱,增长率 6.7%;2014 年吞吐量 2.01 亿标准箱,增长率 6.1%;2015 年吞吐量 2.1 亿标准箱,增长率 4.1%;2016 年吞吐量 2.2 亿标准箱,增长率 3.6%。近年来我国集装箱码头集装箱吞吐量的变化情况如图 1.1 所示,我国港口码头集装箱吞吐量的同比增长率如图 1.2 所示(资料来源于统计年鉴)。

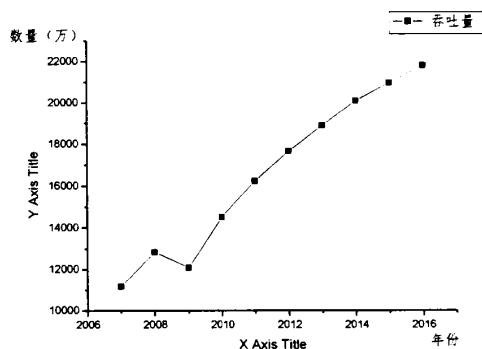


图 1.1 近年来全国港口完成集装箱吞吐量

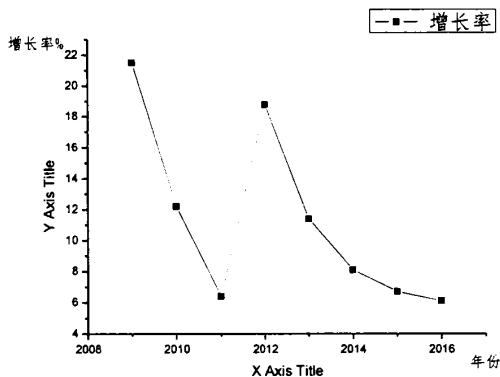


图 1.2 集装箱吞吐量同比增长率

以上两图反映出我国集装箱港口集装箱的吞吐量逐年呈稳步上升趋势,表明各港口的业务量逐年增加。

(2) 集装箱运输量与码头能力缺口矛盾凸显

随着集装箱运输业迅猛发展,集装箱船舶正在向着大型化方向发展。目前,集装箱船舶历经六代。60 年代第 1 代集装箱船的载运能力仅为 750-1000TEU,重量约为 10000 吨,80 年代后期出现的第三代是高效节能型集装箱船舶,提高了运输效率,载重数达到 3000TUE,载重量为 20000-3000 吨。此后集装箱船舶更新换代速度加快,第 4 代和第 5 代间隔缩短到 7 年,随后仅间隔 2 年时间,就出现了以 8000TEU 为代表的第 6 代集装箱船^[2],集装箱大型化对港口的基础设施带来了更高的要求,即港口泊位、装卸效率以及配套的集疏运设施。我国港口水深有限,船舶大型化使得海底挖泥费用增大施工时间;码头基础设施的改进速度滞后,为了适应船舶大型化的要求,港口装卸系统也必须大型化,尤其是对外伸具和吊具高度的要求。码头集装箱吊桥的重新定做,计算机系统改进,各部门的人员安排等都需要相当一段时间,资金和技术问题是集装箱船舶大型化所不得不面对的两大难关;集装箱大型化客观上要求更高的港口作业效率。另外是对班轮公司经营策略——资源整合和对挂靠港口的影响。在大多数情况下,对港口的投资,除了港口本身的基础设施外,还包括对其相关区域设备设施的投资。多式联运的巨额开支,对任何国家落实建设的成本都是巨大的。

(3) 现代信息技术在港口的应用

集装箱运输快速发展催生了信息化技术快速转化为生产力。近年,集装箱码头加速信息化建设原因有:

全球集装箱码头信息化趋势加快,集装箱码头必然采用一切可以利用的技术

提高码头的生产能力。

码头生产作业需要处理庞大数据,需要采用融合了优化算法人工智能性质的实时交互式作业计算机管理系统。

现代集装箱码头越来越多合资企业,合资码头为引入高新技术提供了资金基础。现阶段在码头应用的高新技术主要有:码头操作系统(TOS),主要是用于管理集装箱码头作业各阶段的计算机管理系统,是码头生产管理的核心;无线终端(RDT),主要用于控制各阶段作业的装卸设备,指挥司机操作;电子数据交换系统(DEI),主要用于集装箱码头与外界的信息交换;还有码头闸口集装箱号和车牌号识别技术等。

综合上述港口集装箱码头发展的现实背景可知,随着码头集装箱吞吐量加大,集装箱运输量与码头通货能力凸出,港方和船方在合作中的分歧越来越大,船方希望在合作中尽量满足船体稳性、装载能力及航线效益最大化等方面要求,而港方在基本满足船方的同时,要求保证装卸作业高效、节能。因此,提高集装箱码头作业效率,保障双方在合作中效益最优是满足经济发展需要、符合其现实需求的。

1.1.2 研究意义

近年,我国沿海港口码头发展水平在不断的提高,很多码头的实力水平在不断提升。但不能忽视,当前我国港口,尤其是集装箱码头,在管理方面存在水平较低、生产作业缺乏快速有效的决策,造成资源浪费。在码头生产作业过程中,各环节脱节,衔接不够流畅导致设备闲置或空载运行的现象时有发生。因此,研究集装箱码头装卸作业调度优化的意义主要表现在:

(1) 集装箱码头营运公司提高装卸作业能力会吸引更多船舶挂靠,从而减少船舶在港运营成本。

(2) 同时,集装箱码头营运公司使用优化的装卸作业调度模型能充分利用装卸设备,减少作业时间,减少机械和作业成本,提高集装箱码头运作效率,增加收益。

(3) 集装箱码头营运公司提高装卸作业能力能全面提升港口的竞争力,能使港口在世界的港口中占据更重要的位置。

(4) 船舶大型化的发展,除了建造技术上面临的难题,在运营上以及相关配套服务上也带来诸多挑战,其中集装箱船的配积载的质量对新形势下集装箱码头的装卸作业效率和船舶运营商的航线经济效益至关重要。提高集装箱码头运营的弹性和柔性,提高码头作业效率,是当前形势下提高港口竞争力的关键。

(5) 集装箱码头的装卸作业调度优化研究还可为机场、物流配送中心等其

它大型货物集散中心的相关问题研究提供参考和借鉴,对提高我国物流产业的整体运行效率和管理水平、降低综合运输成本具有深远的现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 集装箱码头单一阶段调度研究

目前,国内外学者对集装箱码头装卸调度优化问题已经有了一定的研究,但是大多数研究都是围绕装卸作业的某一阶段的优化调度问题展开的。

在岸桥装卸作业研究方面, Peterofsky 和 Daganzo^[3]研究岸桥的调度策略对码头吞吐量和船舶滞港时间对码头成本的影响,并且对静态的岸桥调度问题提出了分支定界法,但是两篇文章都没有考虑岸桥干涉约束,即岸桥可以自由穿越。Kim^[4]建立了岸桥调度优化数学模型,并分别用分枝定界法、贪婪随机适应性搜索算法进行求解。董良才等提出了带时间窗的岸桥调度 MIP 模型,设计遗传算法求解,但对岸桥作业的现实约束考虑不全面。靳志宏等^[5]对集装箱码头岸桥调度问题构建了非线性整数规划模型,并设计了基于任务排序的遗传算法求解。对集卡调度问题可以看作是车辆路径优化问题在集装箱码头上的应用。Nishi—mura 等^[6]对比了集卡静态调度与动态调度法,建立了集卡动态路径优化模型。Vis et al.^[7]研究了半自动化码头上动态作业分配下决策 AGV (Automated Guided Vehicle, AGV, 自动引导卡车) 的数目问题。还有一些学者研究了码头 AGV 的路径优化问题。Garabardella 等^[8]对码头各种设备的调度进行了建模,以减少设备冲突和等待集卡时间最小为优化目标,通过模拟仿真,最终得到设备的最佳配置。Canonaco^[9]采用排队论对集装箱码头的作业线调度问题进行了研究,但没有考虑集装箱岸桥之间的交叉扰、作业预定义顺序对码头装卸作业的影响。Chen 等对集装箱码头三阶段的整体操作进行了数学建模,并且提出了一个禁忌搜索算法求解,但是没有考虑岸边桥吊的碰撞约束。汤齐等^[10]提出最小化各船舶载泊位中的装卸时间和最小化各船舶在泊位中的装卸时间和最小化岸桥总工作时间的多目标函数的连续泊位和岸桥调度优化模型。

在集卡水平运输作业研究方面,曾庆成与杨忠振^[11]建立了集卡调度动态模型,并设计了基于 Q 学习算法的求解方法,获得在不同状态下的集卡调度策略。边展等^[12]规划每个集装箱堆存/提取的位置,及确定完成箱次装载任务的集卡,实验表明提出的模型算法可以为码头预先制定集卡计划。

在场桥堆取作业研究方面, Kim 和 Kim^[13]建立了混合整数规划模型,目标函数为最小化堆区内设备调整时间和吊车移动时间的总和,他们以提出了一个启发

是算法。Zhang et al.^[14]也研究了场地吊车的调度问题,通过预测的工作负载,寻求最佳的调度方案,以使得遭受延迟的工作量最小。他们建立了一个整数规划,并通过拉格朗日松弛方法进行求解。韩晓龙^[15]研究了在装卸作业中场桥最优路径问题。郭媚^[16]建立场桥和堆存空间之间的相关成本模型,提出为场桥编制集装箱装卸运输计划的 SAM 模型。

1.2.2 集装箱码头各阶段集成调度研究

上一小节描述了对集装箱码头单一作业阶段优化调度的研究,其实,国内外学者对多阶段作业集成调度也有一定研究。

Chen et al.^[17]将集装箱码头上的调度问题看作是有预定义约束和阻塞约束的混合流水车间调度问题。对集装箱码头岸桥、集卡、场桥三阶段的整体调度进行建模。他们提出了禁忌搜索算法进行求解,并验证了算法的可行性。乐美龙等^[18]研究了龙门吊与集卡的协同调度,模型中考虑了岸桥间交叉干扰、安全距离等约束,并用一种多层遗传算法求解。梁亮与陆志强^[19]将集装箱码头作业调度问题看成混合流水线基本问题的延伸,对作业三阶段整体建立整数规划模型,并设计启发式算法求解,但没有考虑岸桥逐贝作业的特点。康海贵等^[20]针对岸桥、集卡和场桥对集装箱船舶的装卸作业提出了一个场桥一车辆的规划模型,并用改进的遗传算法求解。曾庆成^[21]针对集装箱码头装卸船作业系统建立集成调度模型,并用优化算法、仿真技术、强化学习等多种方法提高求解效率。陈超等^[22]以泊位分配、设备配置、集卡行驶路径为决策变量,建立了三阶段集成调度优化模型,并设计双层遗传求解以实现运营成本最小。但迄今为止还没有学者完整地分析描述集装箱装卸作业的各种作业约束,按实际情况对作业任务进行分类,并设计集成算法。但迄今为止还没有学者完整地分析描述集装箱装卸作业的各种作业约束,按实际情况对作业任务进行分类,并设计集成算法。集装箱码头集成调度从整个物流综合系统来看,也包括产业链开端的集装箱船舶配载阶段,现在来看看相关研究。王开颜^[23],在探讨了影响集装箱码头作业效率的因素后,提出了相应的技术方法来增进集装箱码头营运弹性、增强码头作业水平,提升国际竞争力。金健^[24]从集装箱码头的角度分析了配积载计划的编制过程中应考虑的因素,引入时间和空间概念,在原有的集装箱码头配积载方法的基础上发展建立了切块法和梯形法。李小斌^[25]从船舶适航要求、船公司营运要求、码头作业要求等方面,分析集装箱船舶配载技巧,提高集装箱码头配载作业效率。刘庆^[26]在双 40 英尺岸桥和同贝位边装边卸工艺的基础上,从码头的船舶配载和堆场布局角度,提出了堆场出口箱与进口箱混合堆存的方法。卫家骏^[27]在装箱问题上提出了一个改进的降序最优适应的集装箱船配载算法,解决集装箱在船长方向上的分布和船舶适航性参

数的控制。王君红^[28]在分析了集装箱在装船时产生倒箱的原因及现有控制方法的基础上,采用网格化方法设计算法,优化了全航线船舶配载。马云崙^[29]在准确分析了集装箱船舶产生错误数据的环节及原因,并通过 C 语言编程完成差异数据的提取,对初配图进行相应的校正,是对目前国内配积载图编制流程中数据校对环节缺失的一种有效解决方案。魏梦月^[30]将复杂的配载问题简化,研究了堆场箱区与船上箱区的对应分配问题,在预配图的限制基础上,结合堆场情况,使得分配最为合理,提高设备利用效率,并研究了箱位配载优化,是一次有益的尝试。杜刚和邱文昌^[31]将集装箱配积载的理论和工作实际相结合,提出了一些适合实际工作要求集装箱船配载的方法。张维英^[32]等人在条件下,建立的重心高度最低和横倾力矩最小的优化目标模型具有很好实用性,并通过禁忌搜索法求解,得出集装箱在行箱位的最佳位置。周昕和尹芳^[33]提出一种集装箱配积载的改进遗传算法,对集装箱的箱位分配进行了一定优化研究。

1.2.3 集装箱码头调度近年研究趋势

集装箱码头装卸作业调度的最新研究方向和研究成果,不仅体现出调度方法日趋严谨和成熟,更加体现出世界各地贸易往来频繁化下的集装箱码头运作的日趋先进性和完善性。

王力^[34]从装卸设备的调整时间、阻塞约束以及岸桥碰撞约束的建立了混合整数规划模型,并对该问题进行求解,最大程度的减少机器阻塞或空闲时间,提高整个作业系统效率。田亮^[35]提出了基于同步装卸的岸桥和集卡协同作业研究,发现这种作业模式相较于传统作业模式更能实现岸边吊桥桥和集装箱卡车的满负荷运转,减少岸桥和集卡的空驶。匡家喜^[36]对同时采用边装边卸工艺和双 40 英尺岸桥的集装箱码头作业系统的调度问题,运用混合流水车间调度问题及其下界理论进行研究,并定义出集装箱混合装卸系统。钱继锋等^[37]研究集装箱码头的作业计划与调度方面的协同,应用滚动计划法实施作业计划的调整,应用信息技术实现对装卸设备实施协同调度。汤齐等^[38]结合现代集装箱码头先进管理技术,提出集装箱码头单船舶的异贝位混合装卸作业的调度方法,以岸桥和集卡运作时间最短为目标建立数学模型。李斌^[39]围绕计算机操作系统中的进程和线程概念,参照 OS 任务调度的框架、机制、模式、算法,提出了 CTLS 调度决策计算体系。柯冉绚等^[40]为了解决集装箱码头自动导航车调度优化问题,建立了以无效最短时间为原则的数学模型,比较“作业线”和“作业面”两种调度模式,验证了所建立数学模型的合理性以及“作业面”调度模式的优越性。张清波等^[41]建立了一个各环节作业设施的联合调度模型,以实现集装箱码头整个水平运输系统的最优化调度。

从上述对集装箱码头优化调度最新的研究可以大致总结出：（1）研究者更多的是对码头装卸设备集成调度研究，改变单一研究某一阶段作业效率的方式。（2）随着码头作业设备增多研究着考虑到更多的作业约束条件，及改进传统调度理念，研究新型调度模式。（3）从集装箱码头装卸作业调度研究趋势反应出集装箱码头装卸设备的日渐先进化，对集装箱码头装卸调度研究趋向于集成化。

1.3 主要研究内容及技术路线

1.3.1 主要内容

本文通过查阅国内外相关文献和实地调查，首先在不考虑集装箱配积载的情况下分析集装箱码头生产作业过程各环节对装卸作业能力的影响，以集装箱码头三环节集成调度为研究基础，以码头生产作业成本最低和船舶停靠时间最短为目标函数，建立调度优化模型；其次集装箱码头和船公司在同一个问题的考虑上，分别从以各自利益最大化的角度出发，在集装箱配积载过程中的多重因素之间展开利益博弈和利弊权衡，如何在基本满足船方要求的同时，确保码头生产的安全、高效和节能是集装箱码头面临的一大难题。主要研究的内容如下：

本文在第一章绪论部分，介绍了集装箱码头装卸作业研究的背景、研究的目的以及研究意义，分析了相关的国内外文献综述。另外，本章还给出整篇文章的主要研究内容及研究的技术路线。

本文在第二章中主要介绍集装箱码头相关设备设施概念，主要介绍大型集装箱船舶及箱为特征、码头的设备设施、生产作业环节等。进一步探讨了目前对集装箱码头装卸作业及设备运作优化问题研究的现状，并且着重分析了集装箱码头装卸作业三个阶段的调度研究情况。阐述了集装箱码头装卸作业调度优化研究的必要性以及目标。

本文的第三章简要的概述了集装箱码头装卸作业的优化问题；确定了建模的前提条件；建立了以最小装卸成本、最短装卸时间的目标函数及其约束条件；用流程图的方式解析了集装箱码头装卸作业的三阶段过程，并对网络调度模型的求解。本章中概括了关于成本和效率的分析，并通过数值实验与 0-1 规划结果对比，验证整个模型的可行性。

本文的第四章考虑前文是以给定了集装箱配积载图及堆场图为研究前提，因此分析船方和港方在船舶配积载过程中的利益博弈问题，利用博弈论模型，优化双方在配积载中的配载和积载方案。

本文第五章总结本文观点，指出创新之处及本文不足之处。

1.3.2 技术路线

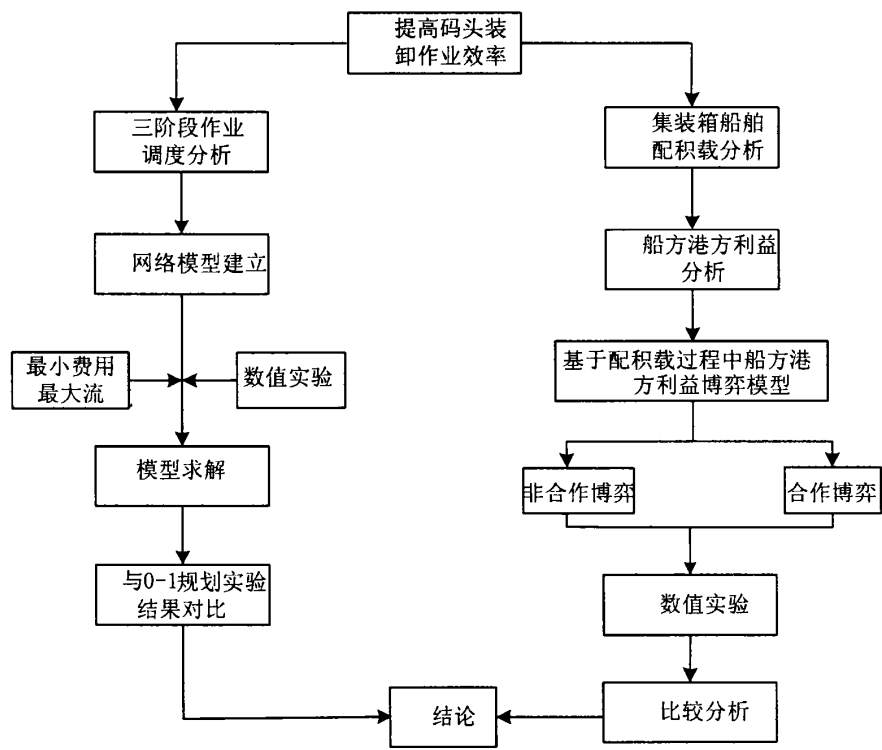


图 1.3 技术路线

第二章 集装箱码头装卸作业概述

本章对集装箱码头的功能、相关设备设施作基本概述，重点分析影响集装箱码头装卸调度的各因素，为本文集装箱码头的装卸作业集成优化调度研究奠定理论基础。

2.1 大型集装箱船舶特征及箱位表示

(1) 大型集装箱船舶及主要特征

集装箱船舶大型化是集装箱运输普遍发展趋势，本文对大型集装箱船舶做简要阐述。

从 2003 年世界集装箱船队组成的统计可以看出载重能力在 5000TUE 以上增加最大达 23.1%，而 2000TUE 以下的集装箱呈现下降趋势^[42]。近年来这种船舶大型化的趋势越来越明显，可见，大型集装箱船在市场已经逐渐占有主要地位，而小型的集装箱船舶逐渐被市场淘汰。

现在的学术界并没有明确定义集装箱船舶大型化和超大型化的概念，但就其集装箱船舶大型化的发展趋势，可以定义大型化集装箱船舶：船体总长超过了 300 米，船宽 42 米以上，船深 24 米以上，结构吃水在 14-16 米之间，全船总箱位为：甲板堆 8 层时超过 8000TUE，载重量超过 9.3 万吨。大型集装箱船舶的主要特征如下：

大型和超大型集装箱船舶在全球运输干线的比重不断增加，在全球三大主要干线：亚洲—欧洲、欧洲—美洲、环太平洋航线比例较高。这主要是因为干线港口的水深较深容易吸引大型船舶，容易发挥大型船舶的规模经济。

箱位记录不断刷新，最高箱位数变化反应出集装箱大型化的发展趋势，如今，在全球各大航线上的集装箱船舶的载运能力普遍在 6000TUE^[43]。

平均箱位数明显增加，平均箱位上升代表着整个航运业的普遍上升趋势，从上个世纪 80 年代集装箱船舶 1000 标准箱到 20 世纪初 2000 标准箱。

大型集装箱船舶在整个集装箱船舶中的比重不断上升，在当前的世界集装箱船舶中，船型以 4000-6000TEU 为主，无论是集装箱船舶的数量还是集装箱船舶的箱位都接近 60%，大型集装箱船舶占绝大多数。

(2) 集装箱船舶的箱位表示

基于集装箱船的结构特点，为了便于集装箱船舶上集装箱的管理，ISO 制定了国际统一的箱位代码编号规则，用以对每一个集装箱在船舶上的唯一确定的积载位置进行三维定位。集装箱船上的箱位代码通常由 6 位阿拉伯数字组成，分别

用以表示行 (Bay)、列 (Row)、层 (Tier)。

行位 (BAY No.)

前 2 位表示行位,是指集装箱在船舶纵向上的序列编号。编号从船首向船尾按顺序排列,不足 2 位的用 0 补足。装载 20ft 集装箱时,以单数 01, 03, 05……表示,装载 40ft 集装箱时,以 02, 04, 06……表示。

列位 (ROW No.)

中间 2 位表示列位,是指集装箱在船舶横向上的序列编号。以船舶中纵剖面为基准,向两舷依次排列,自中向左为奇数编号,自中向右为偶数编号,左右列数相等,若船舶总列数为奇数,则中纵剖面上的一列的编号为 00。

层位 (TIER No.)

最后 2 位表示层位,编号方法为甲板和仓内两种。甲板上的编号自上而下依次编号,并在数字前加一“D”。舱内的编号自上而下依次编号,并在数字前加一“H”。

例如,某一集装箱箱位号为“0402D1”,则表示该箱为 40ft 集装箱积载在第四排右舷第二行甲板第一层。

2.2 集装箱码头功能及设施

2.2.1 集装箱码头的功能

随着集装箱运输发展,在世界范围内陆续建立起许多现代化集装箱码头,这些码头在整个集装箱货物运送中的功能和作用不断凸显。其作用主要体现在:加快周转速率,提高运输速度,减少了运输时间。其功能主要有以下几个方面:

(1) 集散功能,集装箱码头一般是货物的集散地,在集装箱运输过程中起着集中和发散的功能。

(2) 堆存集装箱功能,集装箱码头的基本功能就是堆存功能,是集装箱储存和转换地。

(3) 枢纽功能,集装箱码头链接内陆与沿海地区,发挥着连接水路运输和陆地运输的枢纽功能。

(4) 在国际进出口贸易中,集装箱码头作为所有国家的终端,可以为进出口的集装箱货物提供通关、检验、信息接收与传递的功能。

另外,随着现代物流业的迅猛发展,集装箱码头业务功能也越来越丰富,其中包括集装箱货物包装、加工、配送、信息处理等一些增值业务。因此,集装箱码头逐渐成为商品流通及货物配送的中心。

2.2.2 集装箱码头设备设施

为了能够更好的实现集装箱码头的上述功能，为货主提供相应的服务，集装箱码头需要具备相应的设备设施。

它的基础设备包括：泊位、岸边起重机（岸桥）、龙门吊（轮胎吊和轨道吊）、水平机械设备（集装箱卡车或跨运车）、堆场等，还包括道路、大门、人员、办公室等。集装箱码头主要设备设施如图 2.1 所示

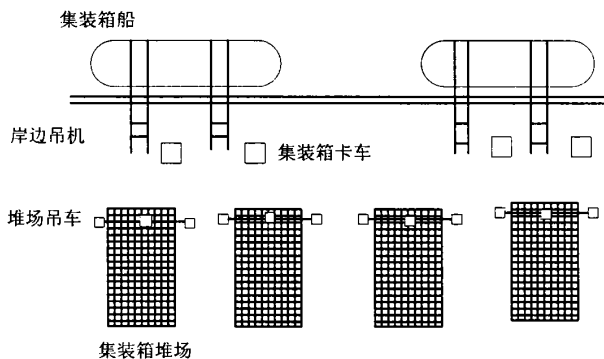


图 2.1 集装箱码头主要设施平面示意图

靠泊设施：主要由码头岸线和码头岸壁组成。码头岸线供来港装卸的集装箱船舶停靠，码头岸壁是集装箱船停靠时需要的系船设施。集装箱码头的泊位长度一般为 300 米。

码头前沿：指沿码头岸壁到集装箱编排场之间的码头面积，一般取 40 米左右，每个集装箱船专用泊位一般配置 2 台岸桥。

集装箱堆场：堆场有很多个箱区(Block)组成，每个箱区有 20-30 个贝位(Bay)，每个贝位有 6-8 列(Row)，每一列的堆高层数(Tier)一般最高是 7-9 层；集装箱堆场分为前方堆场和后方堆场，前方堆场是集装箱码头作业中心，通常布置在码头前沿与后方堆场之间；后方堆场，是进行集装箱交接、重箱、空箱保管，集装箱安全检查的场所。码头堆场主要业务有卸船收箱、装船发箱，进箱收箱、提箱发箱，集装箱在堆场内移动转堆、翻箱等。

集装箱货运站主要任务是出口拼箱货的接收、装箱以及进口拼箱货的拆箱；控制台的主要任务是监视和指挥船舶装卸作业及堆场作业，被看作码头生产作业的枢纽；检查口也称闸口和大门，是集装箱码头的出入口，所有进出集装箱码头的集装箱均在检查口进行检查；维修车间是码头内各种机械设备检查、维修、保养的场所；行政楼属于集装箱码头为客户办理相关手续的场所，同时也是各个管

理部门进行行政办公的地点。

2.3 进出口作业流程

集装箱码头的作业过程可以分为两大类，一类为进口业务，另一类是出口业务。这两种作业过程都存在着三阶段的集装箱装卸作业流程才能完成，集装箱进出口作业流程如图 2.2 及图 2.3 所示。

(1) 集装箱码头的进口业务流程

在船舶靠港之前，船公司会将即将靠泊的船舶的一昼夜船舶计划、月度计划和近期计划发送给集装箱码头。码头的调度计划工作人员会根据码头的实际情况进行不断的修改最后做出泊位计划，并且码头的调度计划工作人员会根据从船公司获取的进口资料等来制作船舶的进口舱单，然后制定出码头的装卸作业机械配置、卸船计划、堆场预编排、作业线路数等方案。在船舶靠港后，调度的控制人员根据已经制定好的卸船计划和堆场计划等来安排岸桥、水平运输工具、场吊等装卸机械，岸桥将在指定的船舶泊位前开始卸载集装箱，集卡会在岸桥处取到集装箱然后运输至指定堆场，堆场的场吊设备如轨道式龙门吊从集卡上卸下集装箱堆码集装箱到指定的箱位，直到船舶上的所有需在本港卸下的进口箱全部在堆场中堆放完成，卸船作业视为结束。

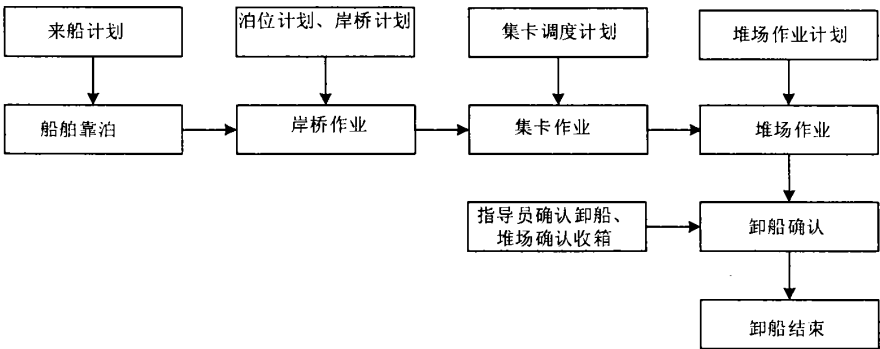


图 2.2 集装箱码头进口作业流程

(2) 集装箱码头的出口业务流程

在将集装箱装船前必须要先根据到港口堆场的集装箱与当前船舶箱位的积载情况进行预配载，配载员再比较船舶上的预配载并且根据集装箱在堆场的分布情况，遵照总体分路要求以队列的作业顺序的对多路进行配载。现场的调度人员按照作业计划对装卸作业机械设备进行指挥调度。集装箱卡车到堆放出口集装箱的堆场等待场吊对其进行装载作业，然后集卡将集装箱运至集装箱码头前沿指定

的岸边装卸桥处，由岸桥将集卡的集装箱装载至船舶的指定箱位。当出口堆场的集装箱全部按指定的箱位装载至船上，装船作业视为结束。

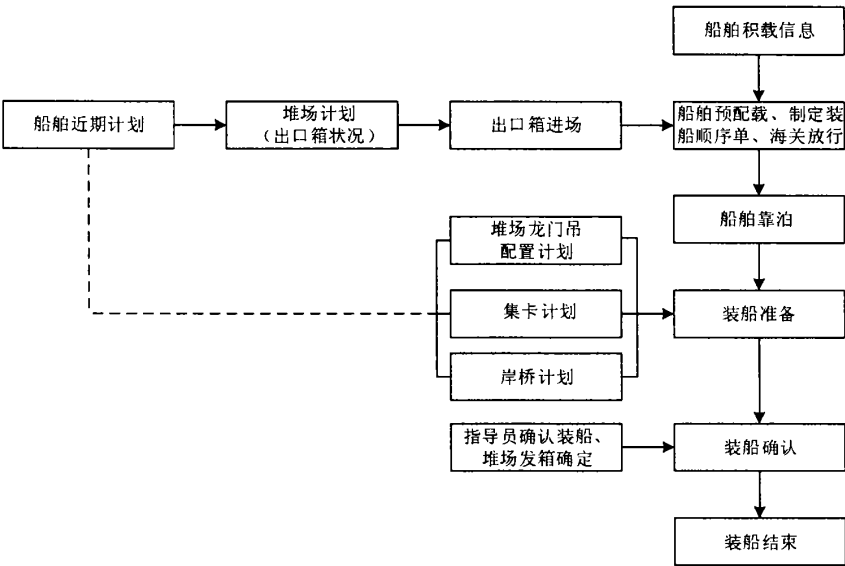


图 2.3 集装箱码头出口作业流程

2.4 集装箱码头装卸作业调度过程

待码头的进出口作业流程图编制完成后，码头根据计划图配置相应的岸桥设施、水平运输设施及场地吊设施进行集装箱的装卸调度。本文主要阐述各阶段独立作业方式及各阶段集成作业方式。

2.4.1 各生产阶段独立调度作业

集装箱码头生产作业过程以集装箱船挂靠泊位为起点，依次经过三个主要环节：岸桥装卸环节，集卡水平搬运环节，场桥堆码作业环节。这三个环节相互影响共同构成了集装箱码头的装卸生产过程：

（1）岸桥装卸环节，岸桥装卸环节是码头生产作业的起始环节，岸桥在船舶完成靠泊作业后，开始进行装船作业和卸船作业。该环节主要考虑岸桥设备的配置问题，码头需要根据靠泊船舶的船期，装卸量，集装箱配给载状况等安排相应数量和型号的岸桥，以保证船舶在规定时间内完成装卸任务，驶离泊位。同时考虑配合码头其他生产作业环节，以保证岸桥不出现闲置和其他环节拥堵的情况。

(2) 集卡水平搬运环节, 集卡的水平搬运过程是码头生产作业的中心环节, 集卡将岸桥从船上卸下的进口箱搬运至进口箱区, 由场桥进行堆放; 或在出口箱区装载出口箱行驶至岸桥, 由岸桥进行装船作业。此环节在码头生产作业过程中发挥着衔接码头生产作业功能, 是重要的支撑环节。本文所指的水平运输设备是指集装箱码头内部的集卡运输, 也就是这里的集卡只是负责集装箱码头前沿与堆场之间的集装箱水平运输部分。如果视外部集卡, 指的主要是从外部进入到集装箱码头堆场进行提箱或者送箱作业的, 而且只能在后方堆场接受堆场装卸设备的服务。在集装箱码头的整个运作过程中, 集装箱卡车作业连接岸边装卸桥装卸船舶作业和堆场的集装箱堆取箱作业连接起来, 而如果集装箱码头的集装箱卡车的调度不当的话, 会导致码头的装卸作业效率降低。如果装卸作业系统的集装箱卡车数量过多, 就会导致集装箱卡车在岸边装卸桥和场吊处排队距离增加, 从而导致集装箱卡车等待的服务时间增加, 严重的话会造成码头内部的道路拥堵。若是集装箱卡车数量过少的话, 又可能导致岸桥和场吊在等待集装箱卡车的时间增加, 使得装卸设备的使用率降低。

(3) 场桥堆场堆码环节, 此环节属于码头生产作业的末端环节, 主要是将进口箱从集卡上卸下堆放在指定箱区; 或将出口箱装在集卡上。码头需要根据出口箱的堆放状况和进口箱的堆存计划, 同时考虑箱区的分散情况, 其他生产环节的效率, 进行场桥配置。

码头生产作业需要提高其效率, 先进的调度措施和高效的管理技术有利于实现三阶段作业环节相互协调, 保证码头整体生产水平最优。

2.4.2 各生产阶段集成调度作业

对于码头装卸三阶段(岸桥作业阶段、集卡运输阶段、场桥堆卸阶段)单一阶段的研究分析已经比较充分但对于码头装卸设备集成调度问题的研究仍出于起步阶段。这里需要指出的是集成调度的具体含义: (1) 作业设备的集成, 即在调度过程中同时考虑三个阶段的作业次序; (2) 作业方式的集成, 即装卸设备除了对某些船上贝采取单装(卸)作业方式外, 也在条件具备的情况下采用装卸混合作业方式。本文主要研究的是单装卸集装箱船舶作业设备集成调度问题。

集装箱码头三阶段作业设施作业模式如图 2.4 所示

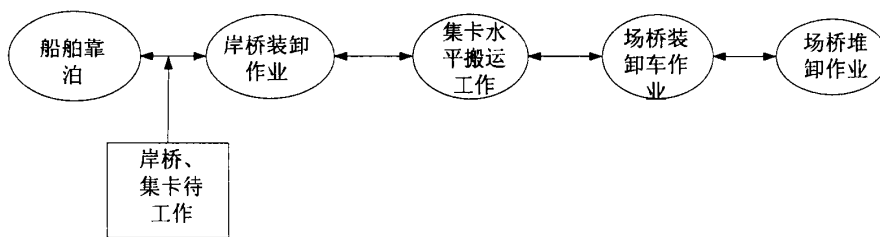


图 2.4 集装箱码头装卸操作过程

当集装箱船舶进入到指定泊位后，岸边吊桥便开始工作，岸桥首先移到船上指定位置后，集装箱被岸桥卸载至集卡上，再由集卡运输到指定的场地吊桥边。再由场地吊桥将集装箱吊起堆放在指定位置。这样完成一个集装箱卸载任务。对于集装箱装箱任务，它的操作顺序正好相反，现有场地吊将集装箱吊起放在待作业的集卡上，再由集卡运输到指定的岸桥边，岸桥将其装入集装箱船舶的指定贝位上。

2.5 影响集装箱码头装卸调度效率的因素

海上运输作为全球最大的运输方式，被要求提供更加快捷高速的服务。集装箱化成为了越来越重要的运输手段，而集装箱码头作为连接海上运输与陆地运输的枢纽节点，也迫切的需要提高整个码头的运作效率来满足社会的要求。而影响集装箱装卸调度效率的因素有很多：

(1) 集装箱船舶的配积载等生产计划制定：集装箱船舶的配积载及其他生产计划的制定是一个完整的集装箱运输流程的起始环节，这一计划的制定直接影响到码头相应配套的设备设施的配置，及码头的整个作业计划的制定。

(2) 泊位的配置：在船舶靠泊中，船舶的停靠位置、船舶作业时间及船舶的排队顺序，拖船的工作效率等因素直接影响到船舶靠泊效率。目前有离散泊位分配及连续泊位分配两种分配方式，前者根据船舶到港情况分配特定泊位；后者把岸线看作一个整体，根据船舶长度依次停泊，连续泊位方式更能提高停泊效率。由于船舶大型化，岸边作业设施的工作量加大，当船舶靠泊时，如果不能合理配置岸边作业设施，待靠泊的集装箱船舶等待时间必然增加。

(3) 岸桥作业效率：岸桥是集装箱码头最贵的设施，现代岸桥平均每小时可以作业 40-50TUE，近年更有双 40ft 箱岸桥出现，它的效率可提高 50%（每小时装卸平均达到 70TUE）（资料来自中国工程设备材料网）。一般一个泊位配置 1-2 台岸桥，岸桥控制不当可能发生相互干扰的现象。而近年集装箱码头存在的边装边卸模式或是两舷同时进行装卸的模式，虽然缩短了船舶停靠时间，避免岸桥空移，但是不注重船舶负荷及取箱问题，同样影响装卸效率。

(4) 水平运输设备作业效率：影响集卡的配置的首要因素就是岸桥的配置数量及装卸效率。如果岸桥的装卸效率高，集装箱周转速度快，可能会出现集卡空闲的状况；反之，会增加集卡的等待时间，容易造成道路拥堵。其次，待装卸集装箱总量是配置集卡的重要因素，当码头作业较空闲时，集卡更加方便调度，速度更快。若是码头布局空间不足，前方堆场和后方堆场距离较近道路狭窄，或是调度不当则会出现堆场拥堵的情况。有些码头，特别是国外会采用跨运车或 GPS 自动导航等运输设备，虽让节约了大量的人力成本，当时跨运车移动速度较慢，CPS 拖车容易因程序问题导致拖车瘫痪的情况。

(5) 堆场堆卸效率：码头堆场在进行堆卸作业时易产生大量的翻箱作业，有些是没有必要及可以避免的。而出口箱进场与装船之间也存在冲突，虽然工作人员提前制定了一系列详细计划，安排运输顺序，但是其他外界因素是不可测得，例如天气因素。还有进口箱卸船与提箱的冲突，外部集卡进入堆场的计划是随机的，如果遇到集装箱装船作业，将会引起作业冲突。中转箱发箱与收箱之间的存在冲突，中转箱因不同的中转需求在堆场停留的时间有很大的随机性，如果正好同时作业，那既有中转箱装船作业又有卸船作业。当然在集装箱进出口及中转中会遇到各项检查，如海关港内检查，检验局检查等。

由此上述分析可以看出，集装箱码头的集成调度优化问题可以看作是一个由岸边吊桥、集装箱卡车和场地吊桥三种设备构成的复杂调度问题。因此，本文将三个作业阶段看成一个完整的网络调度图，在满足船舶停靠时间最短，装卸成本最低的前提下分析集装箱运输的最大流量。

第三章 集装箱码头装卸作业网络调度研究

上一章节分析了装箱码头装卸调度方法及影响集装箱码头装卸调度因素, 大多数研究基于一两个阶段, 对于三阶段集成调度研究较少。本章以码头生产成本最低、船舶时间最短为目标建立一种三阶段集成网络调度模型, 以提高码头的装卸效率。

3.1 网络调度模型介绍

在集装箱码头装卸作业三个阶段的集成优化调度中, 引用运筹学中的最小费用最大流的模型来优化调度方案使得整个网络调度中集装箱通过量最大(最大流, 也即船舶停靠时间最短)和运行成本最低的双重目的。

给定网络 $D=(V, A, C)$ 每弧长 $(v_i, v_j) \in A$, 除了已给出的容量 $c_{i,j}$ 外, 还给出 (v_i, v_j) 上单位流的费用 $b(v_i, v_j) \geq 0$, (简记 $b_{i,j}$)。所谓最小费用最大流问题就是要求一个最大流 f , 使得总输 $b(f)$:

$$b(f) = \sum_{(v_i, v_j)} b_{ij} \cdot f_{ij}$$

取最小值。

3.2 网络模型前提描述

集装箱码头的装卸作业从集装箱船舶进入指定泊位之后开始, 集装箱搬运系统需要在计划期内完成进、出港集装箱的搬运作业。其中涉及到由岸边吊桥、集装箱卡车以及场地吊车所构成的一个多阶段一体化复杂操作系统, 且装/卸作业都有其固定的流程(卸载作业: 岸边卸载-集卡运输-场地吊放; 装载作业: 场地吊放-集卡运输-岸边装载)。集装箱码头装卸作业三阶段流程如图 3.1 所示。在这个过程中, 每个设备完成操作集装箱的时间和成本是不尽相同。

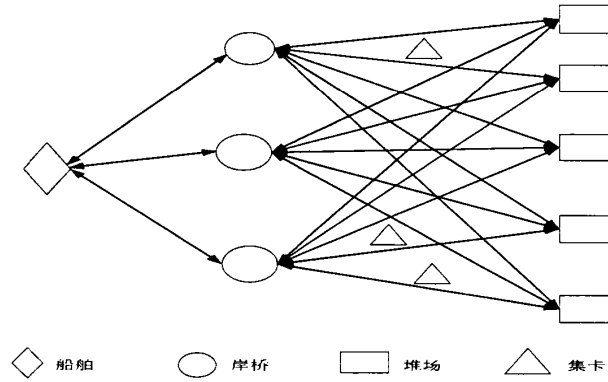


图 3.1 集装箱装卸三阶段流程图

图 3.1 中的菱形代表待装卸的船舶；圆形这表示为这个船舶服务的岸边装卸桥；而三角形则是代表着往来码头前沿和堆场之间的集装箱卡车；而矩形则是代表了集装箱码头堆场；其中的双向箭头代表了可以进行装卸作业的方向。图 3.1 中都是双向箭头则说明了装船作业和卸船作业都是能进行的，特别是集卡所走的路线更是说明了集卡在整个集装箱码头中是实时调度的，不存在数量过多造成的拥堵或者数量过少而使岸桥或场吊等待的情况，也就是指明了集卡不是这个集装箱装卸作业调度优化模型的瓶颈。

集装箱码头装卸作业调度问题可以看成是运筹学中的最小费用最大流的图解模型的一个延伸例子。把整个集装箱码头装卸系统三阶段的作业流程简化成最小费用最大流的整个网络图，其中的最大流可以使得集装箱码头装卸作业的时间最短化的同时使其的装卸作业成本最优。最小费用最大流的图解模型非常好的解决了当前的研究现状。现在多数关于集装箱码头装卸系统的调度优化的研究局限的认为只要解决了集装箱的装卸时间就能得到整个集装箱码头运营企业的最优执行方案。这种现状在一定的程度上是有一定的道理，但是明显的没有考虑到成本在其中的重要性。任何企业的建立都是建立在能盈利的基础上的，而要使得运营企业的利益最大化首要考虑的就是成本的问题。所以最小费用最大流的图解模型非常好的解决了这种只考虑装卸时间的现状，使得关于成本以及关于集装箱操作时间都能同时在一个模型中得到最优解。

3.3 模型假设

(1) 由于所操作的集装箱种类有很大的差异，这里我们都将折算为 20 尺的标准箱进行计算。

(2) 一艘船舶靠泊后，可能进行的装卸作业是多样的，比如可能就包含了

卸船、装船、转运等装卸作业。我们这里统一规定，岸桥只有在完成了其中一种装卸作业块后才会开始下一个装卸作业块，比如必须先进行了卸船，完成后才能开始装船作业。

(3) 船舶上的集装箱从船尾向船头进行的贝位依次编号与岸边装卸桥编号增大的顺序一致，这样就防止了岸边装卸桥的交叉作业。

(4) 船舶会存在翻箱作业，本文建立的模型中不考虑翻箱作业。

(5) 在集装箱码头划分的三个作业阶段中，相对于岸边装卸桥与场吊，集卡行驶速度较快且数量充足，因此，第二阶段的集卡运输不是瓶颈作业。

(6) 船舶配载图在港口进行调度前已知，即待卸集装箱及其在船舶上的位置确定，也就是船舶的集装箱卸船顺序是已经知道的，避免了岸边装卸桥的交叉作业，也求得每个装卸桥的卸集装箱数和吊装集装箱数。

(7) 堆场的计划堆放图在调度前已生成，即卸船集装箱转移到堆场上的位置是已知的。但是我们这里假设所要卸载的集装箱可以任意堆放在任何一个集装箱堆场片区。

3.3.1 参数定义

job : 一个集装箱作业任务, $J=1,2,\dots,j$ 为集装箱作业任务的索引; 规定 $j=0$ 为虚拟集装箱任务, 为所有集装箱第一个任务。

k : 操作阶段索引; 其中 $k=1,2,3$ 依次表示卸载集装箱所经过的岸桥作业阶段, 集卡作业阶段和场吊作业阶段。

M : 所有设备集合;

$i \in M$: 为设备索引;

T : 单船完成集装箱装卸所花的时间;

3.3.2 决策变量

$M_{k,i}$: 第 k 阶段设备 i 的集合;

$V_{k,i}$: 第 k 阶段设备 i 的效率;

$X_{k,i}$: 单位时间内, 第 k 阶段设备 i 上最大能完成集装箱数量;

$C_{j,k,i}$: 第 k 阶段设备 i 上操作完成一个集装箱任务 j 所耗的成本;

$t_{k,i}$: 第 k 阶段设备 i 上操作完成指定的集装箱所需要的时间;

3.4 网络调度模型建立

现在将上述的集装箱码头装卸作业流程图转化为运筹学中的最小费用最大流的网络图，如图 3.2 所示：

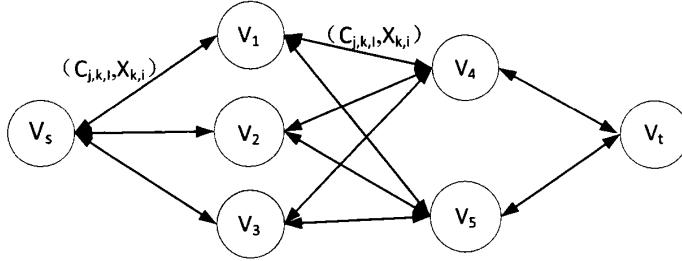


图 3.2 最小费用最大流网络图

上图中是对集装箱码头装卸作业流程图的一个实例转化。假设 V_s 代表的是待装卸的船舶， V_1 、 V_2 、 V_3 则是代表了为这个船舶服务的三个岸边装卸桥， V_4 、 V_5 代表的是集装箱堆场的场吊，特别强调的是 V_t 在这里没有实际作用，只是作为求解运筹学最小费用最大流的虚拟点。而 V_s 到 V_1 、 V_2 、 V_3 之间的双向箭头代表的是岸边装卸桥的装卸过程，即装卸搬运系统的第一阶段； V_1 、 V_2 、 V_3 到 V_4 、 V_5 之间的双向箭头代表的是集卡的运输过程，即装卸搬运系统的第二阶段； V_4 、 V_5 到 V_t 之间代表的是集装箱码头堆场场吊的装卸过程，也即装卸搬运系统的第三阶段。而双向箭头（也就是网络图中的弧）上的 $C_{j,k,i}$ 等同于给定网络中的单位流的费用 $b_{i,j}$ ， $C_{j,k,i}$ 代表在 k 阶段的设备 i 操作完成一个集装箱作业任务 j 所耗成本；给定网络图中 $C_{i,j}$ ，也就是容量，在这里是 $X_{k,i}$ ，也就是单位时间内在 k 阶段设备 i 上最大能完成集装箱数量。

由此我们可以得到装卸调度目标：

$$\min C = \sum_{j \in J} C_{j,k,i} \cdot f_{k,i} = \sum_{j \in J} C_{j,k,i} \cdot V_{k,i} \cdot t_{k,i} \quad (1)$$

$$\text{约束条件 } C_{j,k,i} \geq 0, \forall j \in J, \forall k \in \{1, 2, 3\}, \forall i \in M_k \quad (2)$$

$$f_{k,i} \leq X_{k,i} \cdot t_{k,i}, \forall k \in \{1, 2, 3\}, \forall i \in M_k \quad (3)$$

约束条件（2）保证成本都存在且大于 0，约束条件（3）规定了在设备上的最大流要小于或等于该设备的最大容量。

3.5 数值实验

3.5.1 成本与效率分析

前文中提到的成本 $C_{j,k,i}$ ，即在 k 阶段设备 i 完成一个集装箱任务 j 所消耗的成本。例如在卸船过程中，第一阶段中岸桥 1 完成集装箱 1 操作，成本为 $C_{1,1,1}$ ，这里成本的大小决定于岸桥的型号、起重量及它的购买成本还有集装箱的尺寸、载重量等等。在第二阶段，水平运输阶段，成本的大小决定于上一阶段岸桥到集装箱堆场指定位置的距离的长短，以及集装箱的尺寸和载重量。第三阶段，场吊的成本主要是场吊设备不同及集装箱所要堆放的位置来决定 k 。我们假设岸桥装卸成本为 x 元，集卡运输成本为 y 元每公里，场吊的装卸成本为 z 元，那么单箱全程成本 $w = x + \alpha y + z$ ，其中 α 为岸桥到堆场的公里数。

目前多数码头经营企业这三个阶段的成本如表 3.1 所示：

表 3.1 集装箱码头不同作业阶段装卸成本

	20 尺重箱	20 尺空箱	40 尺重箱	40 尺空箱
岸桥装卸成本 x （元）	242	161	346	230
集卡运输成本 y （元/公里）	87	58	123	82
场吊装卸成本 z （元）	17	11	25	17
单箱全程成本合计 w （元）	$259 + 87\alpha$	$172 + 58\alpha$	$371 + 123\alpha$	$247 + 82\alpha$

本文主要研究的效率是岸桥和场吊的效率。目前世界上通用并且成熟的集装箱码头前沿的装卸设备主要是岸边装卸桥，堆场装卸设备主要是轮胎吊和轨道吊及正面吊。集装箱码头前沿的装卸设备岸边装卸桥的效率在 30-50TEU/h 左右；集卡的行走速度一般在 30-40km/h；堆场的轨道吊和轮胎吊的效率都基本在 50-60TEU/h 范围内。

3.5.2 实例

现在以某港口的一号泊位为例，假定现在执行的是卸船作业，包含了 20 尺和 40 尺的重箱，这里将统一折合为 20 尺重箱统一计算。一号泊位配备了三个不同型号的岸桥。岸桥完成一个标准集装箱的成本以及岸桥的效率如表 3.2 所示：

表 3. 2 岸桥完成标准箱的成本及效率

	1 号岸桥	2 号岸桥	3 号岸桥
成本（20 尺重箱）	210	250	280
效率（TEU/h）	35	40	45

国内多数集装箱码头普遍是将 6 至 7 辆集卡固定配备给一个岸桥，在整个作业流程中这些集卡仅仅为这一个岸桥服务。但是该港口的集卡数量是充足的，而且每个集卡都能为全部的岸桥服务，实行的是实时调度方法，即集卡不会成为整个模型的瓶颈。集卡的费用取决于该港口不同岸桥到堆场的距离，集卡在该港口的行走速度平均值为 35km/h。该港口 2 个堆场片区跟岸桥的距离如表 3.3 所示：

表 3. 3 该港岸桥到片区的距离

距离（m）	片区 1	片区 2
1 号岸桥	320	350
2 号岸桥	370	400
3 号岸桥	420	450

由上述的参数也能得到岸桥到不同片区的成本（以 20 尺重箱为例），结果如表 3.3 所示：

表 3. 3 不同岸桥到不同片区的成本

成本（元）	片区 1	片区 2
1 号岸桥	28	30
2 号岸桥	32	35
3 号岸桥	37	39

该港口的堆场的每个片区均配备 2 台轨道吊，足以满足装卸要求，不存在让集卡等待装卸的情况。轨道吊的效率为每小时 55TEU/h；每装卸一个标准重箱的成本为 17 元。

现在举例，假设这是一个卸船过程。由以上的数据可以得到关于该港的调度网络图如图 3.3 所示：

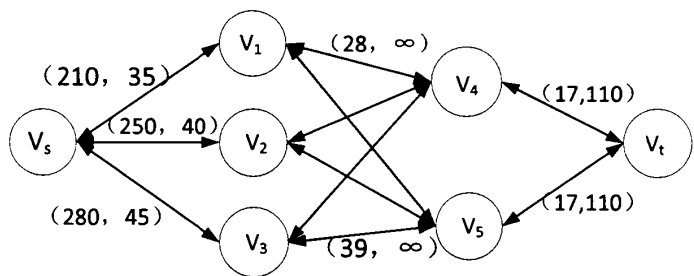


图 3.3 该港最小费用最大流网络图

图中有些弧没有赋值，现在列出： $(V_1, V_5) = (30, \infty)$ ； $(V_2, V_4) = (32, \infty)$ ；
 $(V_2, V_5) = (35, \infty)$ ； $(V_3, V_4) = (37, \infty)$

先利用上述文中所给的求解步骤来求解，可以得到单位时间（一小时）内的最小费用最大流网络求解：

$$\begin{aligned} \min C &= \sum_{j \in J} C_{j,k,i} \cdot f_{k,i} \\ &= (210 + 28 + 17) \times 35 + (250 + 32 + 17) \times 40 \\ &\quad + (280 + 37 + 17) \times 35 + (280 + 39 + 17) \times 10 \\ &= 8925 + 11960 + 11690 + 3360 \\ &= 35935 \end{aligned}$$

同时也得到单位时间内在最小费的情况下，获得最大流（也即在单位时间内通过的最大集装箱数量）为： $f_{k,i} = 35 + 40 + 35 + 10 = 120(\text{TEU})$

在此基础上，可以利用最小费用最大流模型算出在不同装卸规模下装卸时间及成本，如下表：

表 3.4 不同装卸规模下最小费用最大流求得装卸时间成本

问题规模(计划期内卸载集装箱 总数)	装卸时间(秒)	装卸成本(元)
1000	30000.00	299458.33
1500	45000.00	449187.50
2000	60000.00	598916.67
2500	75000.00	748645.83
3000	90000.00	898375.00
3500	105000.00	1048104.17
4000	120000.00	1197833.33
4500	135000.00	1347562.50

5000	150000.00	1497291.67
5500	165000.00	1647020.83
6000	180000.00	1796750.00
6500	195000.00	1946479.17
7000	210000.00	2096208.33

在相同规模及约束条件下，采用 0-1 规划求解的装卸时间如表 3.5 所示：

表 3.5 不同装卸规模下 0-1 整数规划求得的集装箱装卸时间

问题规模(计划期内卸载集装箱 总数)	装卸时间(秒)
1000	36621.77
1500	52094.61
2000	68556.85
2500	85698.69
3000	107978.69
3500	125774.02
4000	132336.99
4500	139518.07
5000	146926.09
5500	164301.02
6000	183250.17
6500	197429.09
7000	219633.71

采用 0-1 整数规划求解只能得到装卸时间，因此本文采用最小费用最大流模型求得装卸时间与其对比。对比图如下：

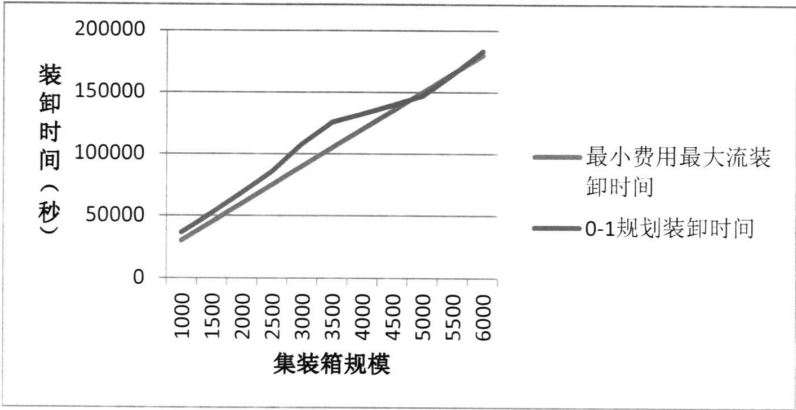


图 3.4 不同集装箱装卸规模下，最小费用最大流模型与 0-1 规划求的装卸时间对比图

由图 3.4 可以看出，在相同的问题规模情况下，应用最小费用最大流图解模型求解得到的装卸时间明显比 0-1 整数规划下 JLS 算法得到的结果好。不管是在问题规模小或者问题规模较大的情况下，最小费用最大流图解模型求解得到的装卸时间均小于 0-1 整数规划下 JLS 算法所求得的装卸时间。而且应用最小费用最大流图解模型不仅能求解到装卸时间，并且能将成本同时求解出来。最重要的一点是，最小费用最大流图解模型的建立和求解比 0-1 整数规划的建立和 JLS 算法要简单的多，但是求得的结果准确性和 0-1 整数规划的相比更加好。

第四章 配积载中港方和船方利益博弈优化分析

上一章基于最小费用最大流理论,以船舶停靠时间最短,码头装卸成本最低为目标函数,建立对集装箱装卸调度三阶段进行集成调度网络模型。前文论述中提及集装箱船舶配积载是影响码头的装卸作业效率重要因素,且前文研究中假定集装箱船舶配载图已给定。因此,本章以集装箱船舶配积载为重点分析对象,利用博弈论模型,分析集装箱配积载中港方和船方的利益博弈问题。

4.1 集装箱配积载作业分析

4.1.1 集装箱码头配积载流程

前文已经大致概述大型集装箱船舶特征及箱位表述,这里不再赘述。

集装箱船的配载和积载从严格意义上讲是不同的。船公司对需要运输的集装箱进行分类整理,编制出预配图;码头会在预配图基础上加以调整,绘制实配图。根据船上实际装箱情况编制而成的图示称为积载图。在实际的生产过程中,将整个过程统称为船舶配积载。

船舶配积载是指为了保证船舶的航行安全,减少中途港倒箱,提高船舶的装卸效率,在装卸集装箱前,根据集装箱的不同性质事先对集装箱船上的配置与堆放做出正确合理的安排,明确每一个装船集装箱在船上的舱位,通常以配积载图的形式表示。集装箱船舶配积载图的主要目的和意义在于保证船舶安全和缩短船舶在港时间从而提高船舶经济效益。集装箱码头作为这种服务的提供方,在制定集装箱配积载图时,应当在尽量满足船方要求的同时,最大限度地确保码头生产作业的高效性。

集装箱码头配积载流程如下:码头根据船公司提供的预配船图制定配积载计划,并将制作完成的配积载计划船图提交给船方(船舶大副或船方配载中心);船方根据船体强度、船舶稳性、装载能力等方面的要求进行测算,经过微调后最终确认配积载计划船图;码头根据最终确认的配积载计划船图完成装船作业。由此可见,船舶配积载在很大程度上取决于码头配积载,船舶配积载实际上由码头完成,船方只是对此过程进行控制。集装箱配积载图的编制主要包括预配、实配和审核过程,分别完成预配图、实配图和最终积载图。

预配:船公司的预配中心将航次订舱单加以整理分类,按集装箱的目的港和相应数量将各港口待装集装箱箱位做出大致的安排,编制预配船图,并传给码头。预配图从船的角度给出箱型、港序、重量等方面的限制,给集装箱码头提供配载

依据,并不对具体箱位做出安排,但预配图是集装箱配积载中最重要、最关键的环节。

实配:集装箱码头装卸公司根据船公司提供的预配图、箱主代码、航次订舱单核查表、箱封号核对清单、挂港顺序表等资料,综合考虑集港集装箱在堆场的堆存情况以及码头资源情况等码头具体情况,在既能满足“集装箱预配计划”的总体要求、又能减少码头堆场集装箱作业量的条件下编制实配图。实配图给出了具体的箱位安排和作业顺序,实配图一般由封面图、装船统计表、Bay 位图组成。

审核:待集装箱船靠泊后、装船作业开始前,集装箱码头应将实配图交由船长、大副全面审核,进行出口船图确认,船方会按需根据船舶安全、效率要求做出相应调整。船长和大副核准并签字后,初配载计划才能作为指导船舶装卸作业的正式配载计划。最终积载图是外轮理货公司理货员编制的船舶实际装载情况的积载图,是计算集装箱船稳性、吃水差和强度的依据,是集装箱船最主要的载货文件。最终的实配载文件包括:全船行箱位总图,集装箱船各行箱位图,集装箱装船统计表,船舶稳性、强度和吃水核算结果。

过程中还应考虑泊位计划、船舶作业监控,进行适当调整。码头配载最主要的问题是根据预配情况、集装箱堆场储存堆放情况和机械配置情况来设计可以预见的作业方案,计划、安排符合码头作业规律的集装箱船作业流程,以确保装船作业效率,使整个码头供应链系统流通更加顺畅、高效。

4.1.2 集装箱船舶配积载原则及要求

由于集装箱船舶配积载关系到船舶运营的安全性、经济性和高效性,在编制船舶配积载图的过程中应当对各种相关的因素予以充分的考虑。因此,应当综合考虑一下因素:

(1) 保证船舶具有良好的稳性

由于集装箱船的甲板集装箱通常占全船总箱量的 30%以上,所以集装箱船的重心普遍偏高,从而导致稳性降低,所以在集装箱船舶配积载的过程中需要特别注意保证船舶具有适当的稳性,将重箱装在下层,轻箱装在上层。船舶稳性不宜太高,船舶的初稳性高度(GM)值一般在 1.2-1.5 米的范围内,横摇周期在 15-18s 内较为适宜,具体应根据集装箱船的大小确定。

(2) 满足船舶的吃水差要求

保持船舶适当的吃水差有利于船舶保持最佳航行状态,使船舶航行更加安全、经济。集装箱船在配积载的过程中应当注意集装箱在船长方向的重量分布,尽量避免首倾和过度尾倾,减少压载水调整吃水差,保证船舶安全、良好的操作性、航行稳定性和经济性。

（3）满足船舶强度要求

船舶强度包括总纵强度和局部强度，纵向强度、横向强度、剪切强度、扭转强度和局部强度，集装箱船舶舱口大，纵向强度较弱，在集装箱船舶配积载过程中，要注意集装箱在船舶的纵向重量分布。由于集装箱船大多是尾机型船，淡水舱和油舱集中于此，应尽量避免首部满载造成中拱变形，保障船体安全。同时，应注意集装箱负荷分布不要过于集中于一个点，尤其是舱盖上和甲板上，防止船体结构发生损伤。

（4）充分利用船舶箱容量和载重量

在集装箱船舶配积载的过程中，应当充分利用船舶的箱容量和载重能力，以达到船舶航次利润最大化。限制船舶装载能力的因素有很多，船舶的设计箱位数、船舶的最大载重量是船舶的设计容量限制，同时，压载水的使用会使得船舶载重量降低，特种超长超宽箱型的运输也会降低船舶的箱位利用率。合理的重量分布和箱型分布可以在保证船舶稳性的前提下，最大限度的利用船舶箱容量和载重量。

（5）尽量避免中途港翻舱倒箱

集装箱班轮在整个航次中要停靠多个港口，通常情况下，倒箱无法完全避免，如果箱位顺序不合理，将会导致在中途港的翻舱倒箱量增加，影响装卸效率，延长船舶在港停留时间，从而导致船舶的航线效益受到影响。在集装箱的配积载过程中，应使集装箱箱位的配置满足装卸顺序和快速装卸的要求，避免装卸作业过程中的翻舱倒箱。

（6）保证装卸作业时船舶保持左右平衡

在装船过程中，由于集装箱船采用栅格结构，所以横倾角过大会影响船舶作业，一般横倾角大于 3° 就会导致集装箱进出栅格困难^[44]，因此在配载的过程中应当避免将同一卸港的集装箱几种配载于船舶同一侧，以免影响作业效率。船舶一般都会设置横倾调平舱，以便使船舶处于正浮状态。

（7）避免同一装卸港的集装箱过分集中

当某个港口装卸箱量特别多的时候，如果集装箱贝位过分集中而形成重点舱，则不利于多个岸桥同时作业，从而影响整体的装卸作业效率，同时，还会导致在卸箱完毕后全船重量分布不均匀，影响船体的强度和稳性。

（8）满足特种箱配载要求

特种箱通常有平台箱、框架箱、冷藏箱、危险货物箱、超长箱、超宽箱、超高箱、超重箱等，由于特种箱的结构、尺寸、重量和货物种类等特征，对在船舶上的积载有特殊的要求，同时还要满足特种箱在卸船的过程中的便捷性。然后，在满足特种箱的配积载要求后，最大限度的提高箱位利用率。

（9）符合堆场取箱规则

由于集装箱码头采用的装卸搬运工艺的不同,集装箱码头的堆场取箱规则也不尽相同,在编制集装箱船舶配积载图时,应当注意考虑码头的堆场取箱规则,避免频繁的倒箱操作,提高码头作业的高效性和安全性。

(10) 确保机械设备合理、有序移动

配积载过程中,要尽量使作业中的岸边机械、堆场机械和水平运输机械合理有序的移动,避免过多的重复作业和频繁移动,符合最优的作业路线和高效的装卸作业。

4.2 集装箱配积载博弈影响因素分析

在配积载过程中,集装箱码头和船公司虽然都以提高装卸作业效率为目标,但是由于二者在所考虑装卸作业效率影响因素上的不同,导致二者在对装卸作业效率的定义上有所不同。在配积载过程中,集装箱码头在满足船舶稳性、吃水、绑扎力、特种箱位置、船舶强度的基本适航前提下,重点考虑码头堆场取箱规则、单船作业计划、设备合理有序移动,保证生产组织的安全、高效、节能;船公司在基本适航条件得到满足的基础上,希望从中途港倒箱、亏舱率、在港停泊时间、航线挂靠港装卸方便等方面,提高船舶效率和航次收益。集装箱码头和船公司分别从自身效用最大化的角度出发,在集装箱配积载过程中的多重因素之间展开利益博弈和利弊权衡。

因此,港口和船公司间利益与决策并非完全一致的,而是互相影响、互相制约的,既相互冲突、又相互依赖,任何一方的策略改变都会影响到其他一方的利益和决策,双方的策略是不能独立存在的。一般而言,港口的规模越大,吸引货物越多,从而越有利于提高船舶载重量利用率,因而能吸引更多船舶来港挂靠。来港挂靠的船舶越多,港口航线也就越丰富,航班也就越密集,从而吸引更多的货物,达到良性循环。港口的货流量与挂靠船舶的多少决定了港口的发展规模,而港口规模及经营策略又将影响到船东的决策。

(1) 集装箱取箱规则

箱区取箱规则:码头的配积载计划应使轮胎吊在取箱过程中能够从箱区大位置向小位置依次推进,且与集卡的行车方向保持一致(见图 4.1)。避免轮胎吊箱区内逆序取箱,来回取箱,导致的作业效率低下,增加行车成本;方便集卡根据轮胎吊的位置来停位,避免集卡频繁倒车,从而减少安全隐患,节约时间,提高作业效率。码头在配积载的装船顺序的规划过程中要充分考虑到堆场箱区内的取箱顺序,提高设备和机械的利用率。

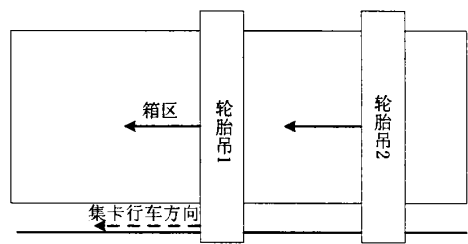


图 4.1 箱区取箱规则

箱位取箱规则：码头配积载应使轮胎吊在特定箱位上的取箱作业按从外到内、从上至下的顺序进行。应当优先从外侧和高位开始取箱，尽量避免轮胎吊吊箱跨越高层的集装箱，对轮胎吊取箱造成运行障碍，增加取箱难度，造成安全隐患。以图 4.2 为例，若先配阴影部分的集装箱，轮胎吊发箱时必须首先跨越外面的集装箱，导致安全隐患增加，作业效率降低。

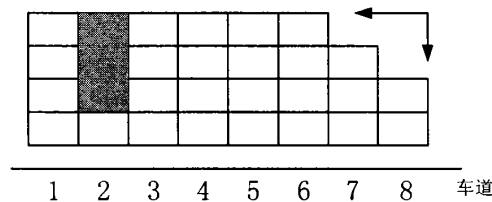


图 4.2 箱位取箱规则

(2) 单船作业计划

作为集装箱码头配积载过程中的主要依据，码头首先应根据预配船图，预先了解单船作业计划中开路情况、装卸箱量等，确定船舶各舱和各作业路的作业量是否均衡，合理安排岸边机械和作业顺序和作业量分配，避免装卸作业出现阻碍，船舶某航次中，根据船舶的在泊时间限制，从各贝位作业情况可确定方形区域作业量大且集中，应为重点舱；椭圆形区域恰好相反，为非重点舱。集装箱码头的船舶作业需要尽量将更多的资源配置给重点舱，对重点舱进行重点突破，提高整体的作业效率。码头配积载过程中，应注意将距离船舶停靠泊位距离短、摆放整齐、集中、易取的集装箱优先分配给重点舱，平衡重点舱舱时。此外，卸船作业情况将对集装箱码头的转船作业产生一定影响：卸船作业量较多的作业路会对集装箱船的装船作业产生一定的阻碍，在安排不同作业路的作业量是应当考虑到相应的卸船作业量，避免作业路停工等待。出口箱海关放行情况^[45]此类特殊情况外界因素在配积载时也应考虑。

(3) 时间和空间冲突

就时间概念而言，码头配积载时，必须根据船舶作业计划对船舶作业过程进行模拟，预测某一特定时刻，不同作业路相互之间、不同船舶相互之间、泊位与

堆场之间是否存在时间上的作业冲突区间,避免形成相互干扰的情况;就空间概念而言,不同作业路产生具有针对性的指令同时指向同一箱区时,负责该箱区内的作业机械由于一次只能完成一个指令,无法同时完成多个指令,必然造成另一个指令的等待而降低作业效率。另外箱区内在取待装船箱的同时还有进场箱作业,会对取箱作业产生干扰;某些特殊要求集装箱,如直装船集装箱,其到达时间不能充分保证,会对其他相对计划装载产生影响。由此可见,科学合理的码头配积载应同时引入时间和空间概念,避免实际作业时出现相互干扰的情况。船方在配积载计划的编制过程中更关注在航线上除本港外的其他港口的装卸作业时的倒箱问题。

集装箱码头在对配积载进行优化的过程中,应重点考虑装卸作业设备的调整时间、阻塞约束^[46]、岸桥碰撞约束、作业路等待时间等计量因素。

4.3 集装箱船舶配积载中港方和船方利益均衡博弈

4.3.1 供应链理论及港口供应链

供应链理论在全球制造业和全球经济一体化的发展过程中得到了充分的应用与发展。在不断的发展过程中,逐渐形成了一套完善的理论体系——供应链管理(Supply Chain Management),并迅速成为企业参与世界市场竞争、提高国际竞争力的先进管理模式。供应链通过对信息流、物流、资金流的控制,将供应链中各个成员企业连成一个整体的功能网链结构模式^[47]。供应链是一种建立在合作竞争理念之上的由各种流聚合集成的增值链网络,它通过共享信息和共同计划提高整个物流系统的效率。

港口供应链:航运公司扩大海运网络并参与内陆运输,为客户提供了全程运输成本低和运输速度快相协调的运输链选择方案,使港口间的竞争逐步走出点对点的竞争走向供应链际的竞争。

集装箱港口作为综合运输网络体系中的重要枢纽,在供应链链条中处于核心位置,也是促进世界大经济环境中生产和消费的重要部分。以集装箱港口为中心的服务型供应链上主要节点有:港口企业、航运公司或船公司、货主、货代和船代企业、铁路运输企业、公路运输企业等等。

在制造企业供应链中,制造型企业从降低成本和增强自身核心竞争力出发,加强整个供应链的整合,增加供应链系统整体收益。而在集装箱码头供应链中,其原动力则主要来自于船公司和码头^[48]。

现在的市场环境下,港口供应链各成员企业之间倾向于结成纵向联盟^[49],并

于横向联盟形式相结合，形成规模经济，共同提供更低成本、更高效的综合物流服务。

4.3.2 博弈论理论

博弈论是研究社会经济现象的数学工具中的一种，将复杂的经济现象抽象成博弈论中的基本元素，利用这些元素构建数学模型进行分析，然后再引入对系统产生影响的其他因素，对主体间产生冲突的因素进行分析，找到冲突中的均衡，分析结果，得出结论。博弈分析的目的是使用博弈规则预测均衡。冲突反映了博弈适用问题的特性，优化是博弈本身的主要特征，而均衡则是博弈应用研究的主要内容。一个完整的博弈包含如下要素：参与者、策略集、支付、行动次序、均衡。其中，参与者、策略集、支付是博弈的基本要素。

根据决策者行为方式不同，博弈可分为合作博弈与非合作博弈。两者的根本区别在于是否形成一个有约束力的协议。合作博弈通过合作实现集体理性，博弈各方可通过合作与协商，获得满足行为理性和合理性的 Pareto 解。非合作博弈在竞争过程中实现个体理性，博弈各方在一定的环境和规则约束下构建各自不同的目标函数。通过各自的最优决策的选择，获取自身目标函数的最优，最终形成均衡的结果，达到博弈的“均衡点”。

纳什均衡^[50]是完全信息静态博弈解的一般概念，没有任何一个战略严格优于纳什均衡战略。纳什均衡点所有局中人策略构成一个策略组合，得到的决策，在别人不改变策略的情况下，每个局中人的对策都是能够是自己达到最优的对策，所以每个人都不会轻易改变自己的对策，从而达到稳定的均衡状态。遵守均衡状态带来的效用大于不遵守均衡带来的效用，没有任何参与人都有积极性不遵守均衡，即这个均衡状态是可以自动实施的，此时，才会构成一个纳什均衡。纳什均衡可以分成两类：“纯战略纳什均衡”和“混合战略纳什均衡”^[51]。

根据纳什定理，非零和非合作博弈的纳什均衡点一定存在。矩阵博弈中，必定存在一个混合策略纳什均衡。非合作 n 人对策在混合策略意义下的平衡局势一定存在。

事实上，一个博弈可能不止一个纳什均衡，而可能有无数个。纳什均衡并不意味着博弈双方达到了一个整体的最优状态，并非只有所有的策略都是最优策略才可以达成纳什均衡，纳什均衡是对博弈的一致性预测，并不意味着纳什均衡一定使每一个参与者达到效用最大化。纳什均衡有强弱之分，而弱优势和弱劣势策略也有可能达成纳什均衡。强纳什均衡对博弈支付矩阵的微小变化并不像弱纳什均衡那样敏感。

4.4 港方和船方非合作博弈模型

4.4.1 模型假设

- (1) 参与人船方和港方都是理性的；
- (2) 进入码头堆场的所有出口集装箱的尺寸都是 20 英尺的；
- (3) 堆场取箱设备为轮胎吊，岸边装设设备为岸桥；
- (4) 冷藏箱、危险箱等特殊箱的箱位分配有特殊的规定，在此忽略不予考虑；
- (5) 集装箱的重量、航线、尺寸等信息不可随意更改；
- (6) 港口堆场有翻箱的缓冲区，却暂不考虑翻箱过程中的落箱位置；
- (7) 从船舶全航次的角度看，集装箱船舶的装卸作业包括某一特定港口的装卸作业和航次中该港口之后的各港的装卸作业，本文中以“本港”即某一特定港为考虑对象；
- (8) 单箱操作收益已经确定，操作箱量确定；
- (9) 船舶稳性、吃水、捆扎力、特种箱位置、船舶强度等适航条件的属于必须满足的博弈环境条件，不允许参与博弈，假定配积载计划已经满足约束条件；

4.4.2 博弈模型

(1) 选手集

博弈的参与者为：选手 1 集装箱码头（港方）和选手 2 船公司（船方）。

(2) 策略集

港方与船方的博弈主要从两个角度考虑：装船顺序和装船位置，装船位置的选择很大程度上取决于装船顺序。装船顺序以堆场上堆存的集装箱为参考，以简化的堆场取箱规则为依据，集装箱堆放分为 k 个贝位，贝位 b_1, b_2, \dots, b_k 集装箱的顺序 B 分别表示轮胎吊是否逆序取箱；集装箱堆放分为列 r ，列位 r_1, r_2, \dots, r_k 集装箱的顺序 R 表示是否跨高度取箱；集装箱堆放分为 t 层，层数 t_1, t_2, \dots, t_k 集装箱 T 表示是否需要倒箱操作。

现仅以两行两列两层集装箱堆放情况描述取箱规则。这样就可取得 4 个集装箱，分别为 $A_1(b_1, r_1, t_1)$ 箱， $A_2(b_1, r_1, t_2)$ 箱， $A_3(b_2, r_1, t_1)$ 箱， $A_4(b_1, r_2, t_1)$ 箱如图 4.3 所示。将堆场集装箱装船顺序问题简化为 3 种集装箱装船顺序的组合问题，装船顺序策略集 K 共有 8 种组合类型（当问题规模扩大时，可以效仿两行两列两层集装箱的取箱规则）：

$$k_1(B \ R \ T), k_2(B \ R \ \bar{T}), k_3(B \ \bar{R} \ T), k_4(\bar{B} \ R \ T), k_5(B \ \bar{R} \ \bar{T})$$

$$k_6(\bar{B} \ R \ \bar{T}), k_7(\bar{B} \ \bar{R} \ T), k_8(\bar{B} \ \bar{R} \ \bar{T})$$

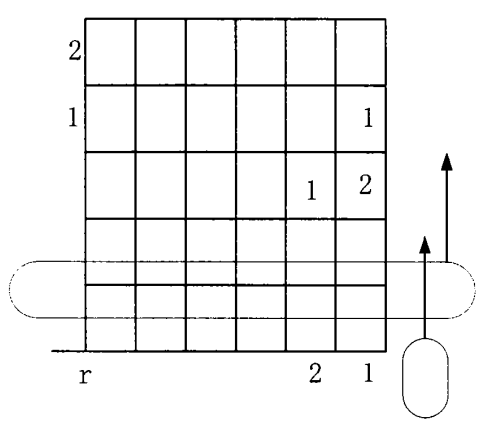


图 4.3 取箱规则示意图

所以，港方的策略集为：

$$P = K = \{P_1, P_2, \dots, P_8\}$$

船方的策略集为：

$$S = K = \{S_1, S_2, \dots, S_8\}$$

(3) 决策集

定义决策集 $D \subset P \times S$ ，记 $x_{ij} = p_i s_j$ ，决策及包含元素如下表 4.1

表 4.1 决策集

x_{ij}	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8
p_1	$p_1 s_1$	$p_1 s_2$	$p_1 s_3$	$p_1 s_4$	$p_1 s_5$	$p_1 s_6$	$p_1 s_7$	$p_1 s_8$
p_2	$p_2 s_1$	$p_2 s_2$	$p_2 s_3$	$p_2 s_4$	$p_2 s_5$	$p_2 s_6$	$p_2 s_7$	$p_2 s_8$
p_3	$p_3 s_1$	$p_3 s_2$	$p_3 s_3$	$p_3 s_4$	$p_3 s_5$	$p_3 s_6$	$p_3 s_7$	$p_3 s_8$
p_4	$p_4 s_1$	$p_4 s_2$	$p_4 s_3$	$p_4 s_4$	$p_4 s_5$	$p_4 s_6$	$p_4 s_7$	$p_4 s_8$
p_5	$p_5 s_1$	$p_5 s_2$	$p_5 s_3$	$p_5 s_4$	$p_5 s_5$	$p_5 s_6$	$p_5 s_7$	$p_5 s_8$
p_6	$p_6 s_1$	$p_6 s_2$	$p_6 s_3$	$p_6 s_4$	$p_6 s_5$	$p_6 s_6$	$p_6 s_7$	$p_6 s_8$
p_7	$p_7 s_1$	$p_7 s_2$	$p_7 s_3$	$p_7 s_4$	$p_7 s_5$	$p_7 s_6$	$p_7 s_7$	$p_7 s_8$
p_8	$p_8 s_1$	$p_8 s_2$	$p_8 s_3$	$p_8 s_4$	$p_8 s_5$	$p_8 s_6$	$p_8 s_7$	$p_7 s_8$

(4) 支付函数

从港方的角度来看，集装箱装船顺序的不同会导致港方增加的成本包括堆场倒箱成本 C_1 、轮胎吊跨高作业成本 C_2 、轮胎吊箱区来回取箱成本 C_3 ，影响港方的单箱收入 U_p 。由此，我们可以得出港方的盈利函数为：

$$f_p = U_p - (C_1 + C_2 + C_3) \quad D \rightarrow E_p \quad (1)$$

定义 E_p 为港方的合理反应集

从船方的角度来看, 集装箱的箱位分配的不同会导致船方航次挂靠港船上倒箱成本 C_4 和载重量利用率成本 C_5 增加, 装船顺序的不同会导致船方航次挂靠港船上倒箱成本 C_4 的增加, 影响船方的单箱收入 U_s 。由此, 我们可以得出船方的支付函数为:

$$f_p = U_s - (2C_4 + C_5) \quad D \rightarrow E_s \quad (2)$$

定义 E_s 为船方的合理反应集

(3) 博弈均衡

在船方选择 $s_j (j=1, 2, \dots, 8)$ 策略的情况下, 港方希望 $p_i \in p (i=1, 2, \dots, 8)$, 使得

$$f_p(s_j) = \max_{p_i \in P} \{f_p(p_i, s_j) | (p_i, s_j) \in D\} \quad (3)$$

定义 $E_p = \{(p_i, s_j) \in D | (p_i, s_j) \text{使 (3) 成立}\}$ 为港方的合理反应集。

同理, 在港方选择 $p_i \in p (j=1, 2, \dots, 8)$ 策略的情况下, 船方希望选择 $s_j \in S (i=1, 2, \dots, 8)$ 使得:

$$f_s(p_i) = \max_{s_j \in S} \{f_s(s_j, p_i) | (s_j, p_i) \in D\} \quad (4)$$

定义 $E_s = \{(s_j, p_i) \in D | (s_j, p_i) \text{使 (4) 成立}\}$ 为船方的合理反应集。

将港方与船方的合理反应集求交集, 得到:

$$(s_j, p_i) \in E_p \cap E_s$$

即为港方和船方的非合作博弈的纳什均衡点。

在纳什平衡点的解得到的是双方达到最优的每一个决策, 都对应了一个唯一确定的港方对策和船方对策组合。

纳什均衡点得到的决策集合, 在别人不改变对策的情况下, 港方和船方每个人的对策都是能够是自己达到最优的对策, 所以每个人都不会轻易改变自己的对策。因此, 非合作博弈的解将在纳什均衡点处出现, 且在混合策略意义下平衡局势一定存在。

4.5 港方和船方的合作博弈

实际情况中, 港方与船方往往会采取合作的方式, 建立港口供应链的纵向联盟, 形成规模经济, 共同提供更低成本、更高效率的综合物流服务。船公司与港口作为港口供应链上的两个重要节点, 要想在激烈的竞争中取胜, 就必须形成紧

密的合作关系，在竞争与合作中找到利益的均衡点。合作博弈通过合作实现集体理性，博弈各方可通过合作与协商，达成一个有约束力的协议，获得满足行为理性和合理性的 Pareto 解。

由上一小结分析我们得出，港方和船方的利润函数分别为 (3)，(4) 记港方与船方的合作效用函数为：

$$f = \lambda_1 f_p + \lambda_2 f_s \quad (5)$$

设港方与船方利益对等，即 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1, U_p + U_s = U$ 则

$$f = U - (C_1 + C_2 + C_3 + 2C_4 + C_5) \quad (6)$$

作为理性人，双方中每一方的均衡收益都应当不小于纳什均衡点的收益。否则，均衡效用小于纳什均衡点效用的一方将不愿意参加合作而导致合作破裂。所以，定义

$$D^* = \{x_{ij} \in D | f(x) \geq f(x_0)\}$$

为合理集，其中， x_0 是纳什均衡点。合作博弈的最终决策必定出自合理集，使得双方的收益都大于纳什均衡点的收益，且使得合作联盟的效用最大化。

4.6 数值实验

(1) 基于非合作博弈分析

对港方来说，假设在对一个集装箱进行操作时，可获得收入 $U_p = 100$ 倒箱成本 $C_1 = 30$ ，轮胎吊跨高作业成本 $C_2 = 10$ ，轮胎吊箱区来回取箱成本 $C_3 = 20$ ，对于船方来说，船方操作每一个集装箱可获得收入 $U_s = 100$ ，航次挂靠港船上倒箱成本 $C_4 = 30$ 和载重量利用率成本 $C_5 = 10$ 。在装卸作业过程中，如果港方为了满足船方的要求进行某项特殊操作，则会发生该项特殊操作对应的成本，船方则由于要求得到满足而不发生对应的成本，否则相反。

当决策中港方与船方选择的装船对策不相符时，港方或船方会有一定程度的利润损失，设船方减损后的利润所占比例均为既得利润中贝列层相同项目的成本与总成本之比；港方由于是最终计划的执行者，利润损失较小，减损后的利润所占比例均为既得利润中贝列层相同项目的成本与总成本之比再增加 20%。当双方的对策完全相反时，港方与船方无法达成业务，船方的船长或大副会否定集装箱码头提供的配积载计划，然后进行配积载计划的重新制定。所以，此时双方的利润都为 0。

所以，可以得到港方与船方的非合作博弈决策的效用矩阵：

(40,100)	(24,40)	(40,40)	(32,77)	(16,6)	(8,26)	(24,26)	(0,0)
(42,57)	(70,70)	(28,10)	(14,39)	(70,23)	(56,51)	(0,0)	(42,13)
(50,57)	(20,10)	(50,70)	(30,39)	(30,23)	(0,0)	(40,51)	(10,13)
(48,86)	(12,30)	(36,30)	(60,90)	(0,0)	(36,34)	(60,34)	(24,4)
(32,14)	(80,23)	(48,40)	(0,0)	(80,40)	(48,26)	(16,26)	(64,26)
(32,14)	(82,60)	(0,0)	(54,51)	(54,17)	(90,60)	(36,9)	(90,17)
(42,43)	(0,0)	(56,67)	(70,51)	(14,17)	(28,9)	(70,60)	(42,17)
(0,0)	(60,30)	(20,30)	(40,13)	(80,34)	(100,34)	(60,34)	(100,30)

对效用矩阵进行划线法求解纳什均衡点，得

$$x_{55}(80,40)$$

$$x_{73}(56,60)$$

$$x_{77}(70,60)$$

$$x_{85}(80,34)$$

$$x_{86}(100,34)$$

所以，在非合作博弈的情况下：

①当船方选择策略时，港方选择策略，此时双方同时达到最优，即当船方要求的装船顺序和箱位分配需以 $k_5(B \ \bar{R} \ \bar{T})$ 的操作方式进行时，港方在配积载时应当按照 $k_5(B \ \bar{R} \ \bar{T})$ 的操作方式取箱装船，此时港方才能在双方均获得满足的情况下达到最大利润；

②当船方选择策略时，港方选择策略，此时双方同时达到最优，即当船方要求的装船顺序和箱位分配需以 $k_3(B \ \bar{R} \ T)$ 的操作方式进行时，港方在配积载时应当按照 $k_7(\bar{B} \ \bar{R} \ T)$ 的操作方式取箱装船，此时港方才能在双方均获得满足的情况下达到最大利润；

③当船方选择策略时，港方选择策略，此时双方同时达到最优，即当船方要求的装船顺序和箱位分配需以 $k_7(\bar{B} \ \bar{R} \ T)$ 的操作方式进行时，港方在配积载时应当按照 $k_7(\bar{B} \ \bar{R} \ T)$ 的操作方式取箱装船，此时港方才能在双方均获得满足的情况下达到最大利润；

④当船方选择策略时，港方选择策略，此时双方同时达到最优，即当船方要求的装船顺序和箱位分配需以 $k_5(B \ \bar{R} \ \bar{T})$ 的操作方式进行时，港方在配积载时应当按照 $k_8(\bar{B} \ \bar{R} \ \bar{T})$ 的操作方式取箱装船，此时港方才能在双方均获得满足的情况下达到最大利润；

⑤当船方选择策略时,港方选择策略,此时双方同时达到最优,即当船方要求的装船顺序和箱位分配需以 $k_6(\bar{B} \ R \ \bar{T})$ 的操作方式进行时,港方在配积载时应当按照 $k_8(\bar{B} \ \bar{R} \ \bar{T})$ 的操作方式取箱装船,此时港方才能在双方均获得满足的情况下达到最大利润。

其中船方和港方要想在配积载计划的编制过程中的博弈中获得最大化的效益,双方要求的装船顺序和箱位分配所需的操作必须为相同的层序,即如果最终装船顺序和箱位分配导致集装箱码头倒箱率增加,会使得港方和船方的收益都减少。所以在至装箱码头配积载计划编制的过程中应当尽量避免倒箱。

在集装箱船舶的配积载计划的编制过程中,当双方出现利益博弈,在集装箱装船顺序和箱位分配方面出现分歧时,应当根据不同的情况,遵循均衡局势时的最优决策,使得配积载方案在基本满足船舶适航要求的基础上,综合考虑双方的成本,确保码头生产的安全、高效和节能。

因为是港方和船方是非合作的,无法通过协商最大化双方的利润,双方的均衡局势有可能会出现在弱势均衡点,使得双方的获益均减少,但是一方改变对策就会导致均衡消失,所以这里的平衡点作为决策的解未必合适,此时需要考虑合作情况下的解。

(2) 基于合作博弈分析

港方与船方的合作博弈决策的效用矩阵如下:

140	64	80	109	22	34	50	0
99	140	38	53	93	107	0	55
107	30	120	69	53	0	91	23
134	42	66	150	0	70	94	28
46	103	88	0	120	74	42	90
61	132	0	105	71	150	45	107
85	0	116	121	31	37	130	59
0	90	50	53	114	134	94	130

纳什均衡点的利润为

$$f(x_0) = \max(f(x_{55}), f(x_{73}), f(x_{77}), f(x_{85}), f(x_{86})) = 134$$

所以,我们可以得到合作博弈决策的合理集包含的策略为

$$x_{11} = 140, x_{22} = 140,$$

$$x_{41} = 134, x_{44} = 150,$$

$$x_{66} = 150, x_{86} = 134,$$

我们看到,决策 x_{44}, x_{66} 即当船方和港方选择的转出按顺序和箱位分配都要求操作方式为 $k_4(\bar{B} \ R \ T)$ 或 $k_6(\bar{B} \ R \ \bar{T})$ 时,会给船方和港方的联盟带来最大化

的利润。

在船方与港方选择合作的情况下，在集装箱码头配积载时，如果双方要求的装船顺序和箱位分配相同或者相似，会大大提高联盟的总体利润。在不会对集装箱码头取箱带来太多的干扰的情况下，港方应当尽量满足船方的装船顺序和箱位分配，避免船方发生较多的航次挂靠港船上倒箱成本，尽量满足集装箱在船舶上的负荷分布要求，避免过度使用压载水，降低船方载重量的无效流失，最大化船方与港方联盟的经济效应。

对比船方与港方的合作博弈和非合作博弈，我们可以看到，当船方与港方进行深度合作，结成统一的联盟体，会使得港方和船方都能在经营过程中获得更高的利润。而且港方在进行船舶配积载时应当充分考虑船方在航次挂靠港的装卸作业方便，以集体理性为联盟带来更高的经济效应。

4.7 配积载中博弈论模型应用的思考

（1）通过对集装箱码头配积载计划的编制过程中基于港方与船方利益均衡的博弈模型的分析，我们可以得出合作博弈是船方与港方最优的选择，但是在实际情况中，港方与船方虽然属于合作关系，但是合作关系不紧密，仅仅是简单的业务上的往来，没有达成充分的集体理性，个体理性依然占优。要想在港方和船方利益均衡的基础上取得最大化的收益，必须加强港方与船方的港口供应链纵向深度合作，结成统一的利益联盟，才会使得双方都能在经营过程中获得更高的收益。

（2）在集装箱船舶配积在船方和港方的博弈中，双方的优势、劣势不仅仅取决于双方实力的大小，而是取决于参与者制约和策略，改变任何一个因素都会使博弈的局面发生变化。

（3）成本是博弈论模型在本文应用的核心考虑因素，无论是船方还是港方合作往来力求达到的集体理性，还是个体理性。其核心都是在尽可能降低自身运营成本下选择最佳策略。

（4）在现实的集装箱船舶配积载中，情况比模型往往更加复杂。不同的班轮公司、不同的集装箱船舶在配积载中策略的改变，都将引起集装箱码头作业设施配置策略及作业方式的变化。

第五章 结论与展望

5.1 结论

随着集装箱运输迅速发展,集装箱码头及其所在的区域的竞争也越来越激烈。码头的经济效益与船舶配载计划、各环节的装卸效率密切相关。为了将码头效益提升最大化,并合理利用各项资源,本文首先在不考虑集装箱配载图及堆场图的前提下对装卸作业各阶段进行集成化调度研究。其次,以集装箱船舶配积载为重点,利用博弈论模型,分析船方及港方载配载中的利益优化问题。以寻求实现集装箱运输综合经济效益。

5.2 主要研究成果

文章首先针对集装箱码头搬运系统调度问题建立网络调度图解模型并给出了详细的算法步骤,用以解决集装箱码头船舶作业时间和成本同时最优问题。数值实验结果显示最小费用最大流图解模型对于集装箱码头的装卸作业调度问题有良好的表现。其次文章建立船方及港方在船舶配积载中的利益均衡博弈模型,以获得最优配载方案。

文章中所建立的网络调度模型针对性地解决了船东所希望的船舶在港停泊时间最短和集装箱码头企业希望装卸成本最优的集装箱码头装卸系统调度问题,并且能够在吞吐量不确定的情况下同样具有同样高效的可行性。而且本文中的网络调度模型的原理十分精炼易懂,求解过程也比较容易掌握,相对于目前研究中的集成调度 0-1 整数规划模型推广性更好。

双方在博弈中主要考虑装船顺序及装船位置两个策略集,当二者发生分歧时建立非合作博弈模型及合作博弈模型,并求解比较分析,以实现最小化双方倒箱成本、减少堆场逆序取箱、最大化载船舶利用率、避免时间与空间上的冲突,保证作业路通畅,使双方达到最优化的博弈均衡局势,实现双赢。

5.3 展望

集装箱码头的整个生产过程被视为一个复杂的综合系统,系统的构成要素众多,各个构成环节的衔接方式也非常复杂,码头在生产作业过程中的动态随机性也很强。本文在集装箱码头装卸作业中给出的最小费用最大流调度优化模型、博弈论和算法方面做了一部分的研究工作,也得到了很有价值的研究结果,但是对

于涉及内容很广泛并具有很强复杂性、随机性、动态性的集装箱码头装卸作业调度问题来说，仍然有很多问题有待进一步的深入研究。

（1）本文是在单装卸的情况下进行求解的，也就是只有在完成了卸船作业后才开始进行装船作业。

（2）应用网络调度模型时，集装箱船舶的配载图及码头后方堆场的堆码计划图已给出，不在模型的考虑范围内。

（3）在应用最小费用最大流模型求解中是没有考虑到翻箱作业，但是现实的码头营运中还是存在相当一部分翻箱作业的。

（4）集装箱船舶配载问题研究是以码头堆场研究为基础，并没有充分考虑不同集装箱船体配载中的复杂性。

致 谢

在即将完成本篇论文之时，我要深深地感谢在我完成这篇论文的过程中，所有在我论文的写作中给予帮助和关心的老师与同学。首先，我要十分感谢全程指导我论文写作的盛进路老师，这篇论文可以顺利的完成凝聚了盛进路老师的辛勤督促与指导。盛进路老师在本篇论文的选题，研究方案的确定以及具体的实施过程都给予了我十分周密的指导，特别是在本论文的模型建立及求解阶段给予了我许多有益的指导和建议。盛老师不仅有严谨的治学态度和系统的科研思路，同时，在生活上的盛老师平易近人、和蔼可亲形象也给我留下了深刻的印象。在本论文的完成过程中，同学们也给了我很大的帮助与关心。在此，感谢盛进路老师在本文写作过程中提供的所有帮助，感谢同学们给我提供的帮助与关心。同时我也非常感谢我的父母在背后给予我的大力支持。感激之情，述之不尽，只好言止于此。

参考文献

- [1]UNCTAD. Review of maritime transport [R].Geneva: United Nations,2001:16.
- [2]郑楼先, 林晓东. 船舶大型化的利与弊[J]. 海洋工程, 2005, 4: 79-80.
- [3] R. I. Peterkofsky and C. F. Daganzo, "A branch and bound solution method for the crane scheduling problem," *Transportation Research Part B:Methodological*, vol. 24, pp. 159-172, 6// 1990.
- [4] Kim K H. A crane scheduling method for port container terminals[J]. *European Journal of Operational research*, 2004, 156(3): 752—768.
- [5]靳志宏, 李娜. 基于泊位计划的集装箱码头岸桥动态调度优化[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2011, 11(3): 58—64.
- [6]Nishi-mura E, Imai A, Stratos P. Yard trailer routing at a maritime container terminal[J]. *Transportation Research Part: Logistics and Transportation Review*, 2005, 41(1): 53—76.
- [7] I. F. A. Vis, R. De Koster, K. J. Roodbergen, and L. W. P. Peeters,"Determination of the number of automated guided vehicles required at asemi-automated container terminal," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 52, pp. 409-417, // 2001.
- [8] Gambardella L M, Mastroliti M, Rizzoli AE, et al. An optimization methodology for intermodal terminal management[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2001, 12(5—6): 521—534.
- [9] Canonaco P, Legato P, Mazza R M, et al. A queuing network model for the management of berth crane operations[J].*Computers&Operations Research*, 2008, 35(8): 2432—2446.
- [10]汤齐, 滑建辉. 连续行泊位与岸桥配置的多目标问题求解[J]. 天津, 天津工业大学管理学院学报, 2016, 18(1).
- [11]曾庆成, 杨忠振. 集装箱码头集卡调度模型与 Q 学习算法[J]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(1): 1—4.
- [12]边展, 靳志宏. 不同装卸作业模式下的集卡指派问题[J]. 北京: 系统工程, 2015.
- [13] K. Y. Kim and K. H. Kim, "Heuristic algorithms for routing yard-side equipment for minimizing loading times in container terminals," *Naval Research Logistics*, vol. 50, pp.498-514, // 2003.
- [14] C. Zhang, Y. W. Wan, J. Liu, and R. J. Linn, "Dynamic crane deployment in container storage yards," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol.36, pp. 537-555, // 2002.
- [15]韩晓龙. 集装箱港口龙门吊最优路径问题[J]. 上海海事大学学报, 2005, 26(2): 39—41.

- [16]郭媚. 集装箱码头堆场优化管理研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2006.
- [17] L. Chen, N. Bostel, P. Dejax, J. Cai, and L. Xi, "A tabu search algorithm for the integrated scheduling problem of container handling systems in a maritime terminal," *European Journal of Operational Research*, vol. 181, pp. 40-58, 8/16/ 2007.
- [18]乐美龙, 包节, 范志强. 龙门吊与集卡协同调度问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(14): 241—248.
- [19]梁亮, 陆志强. 集装箱码头装卸系统集成调度的建模与优化[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(3): 476—483.
- [20]康海贵, 周鹏飞. 集装箱船舶装卸作业时起吊设备一车辆的规划研究[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46[3]: 372—379.
- [21]曾庆成, 杨忠振. 集装箱码头装卸作业集成调度模型与方法[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [22]陈超, 张哲, 曾庆成. 集装箱码头混合交叉作业集成调度模型[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(3): 92—100.
- [23] 王开颜. 探讨提高集装箱码头作业效率的因素[J]. 科技视界, 2014(26):140-144.
- [24] 金健. 集装箱码头配积载技巧[J]. 集装箱化, 2010(7):26-28.
- [25] 李小斌. 集装箱船舶配载技巧[J]. 集装箱化, 2013(5):5-7.
- [26] 刘庆. 集装箱码头的船舶配载与堆场规划[J]. 物流工程与管理, 2012(4):41-42.
- [27]卫家骏. 一种集装箱船配载问题改进算法探讨[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009(5):969-972.
- [28] 王君红. 基于网格化的集装箱船舶全航线优化配载问题研究[D]. 大连, 大连海事大学, 2013.
- [29] 马云崙. 集装箱配载数据差异对比及配载图校正[D]. 大连, 大连海事大学, 2012.
- [30] 魏梦月. 集装箱配载优化研究[D]. 大连, 大连海事大学, 2011.
- [31]杜刚, 邱文昌. 集装箱船的合理配载[J]. 航海技术, 2007(2): 28-29.
- [32] 张维英, 林焰, 纪卓尚等. 基于指派问题的 Bay 位集装箱优化模型与算法[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(1):61-67.
- [33]周昕, 尹芳. 基于遗传算法的集装箱配载问题研究[J]. 科技论坛, 2010, (19): 15.
- [34]王力. 集装箱码头装卸系统三阶段设备集成调度优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [35]田亮. 基于同步装卸的岸桥与集卡协同作业优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [36]匡家喜. 集装箱混合装卸系统的集卡一岸桥协同作业研究[D]. 武汉: 武汉理工大学,

2012.

[37]钱继锋,朱晓宁,刘占东.集装箱码头装卸作业计划调度的协同与优化[J].综合运输,2013.

[38]汤齐,武德俊.异贝位混合装卸作业的集装箱码头设备调度优化[J].天津:天津大学学报,2015.

[39]李斌.面向计算思维的集装箱码头装卸作业调度[J].福建:福建工程学院学报,2016,16(3).

[40]柯冉绚,任亚东.集装箱码头 AGU 调度优化[J].福建:集美大学航海学院学报,2016,21(1).

[41]乐美龙,张清波.自动化码头吊桥、自动引导车以及龙门吊的联合调度[J].上海:上海海事大学学报,2015,36(5).

[42]宋尚福.大型集装箱船舶的结构特点及操作性能[J].上海:航海技术,2006(5):7-8.

[43]段超.集装箱船舶大型化发展研究[D].大连:大连海事大学,2013.

[44]刘小健.集装箱船配载稳性研究[D].武汉:武汉理工大学,2005.

[45]金健.集装箱码头配积载技巧[J].集装箱化,2010(7):26-28.

[46]王力.集装箱码头装卸系统三阶段设备集成调度优化[D].上海,上海海事大学,2013.

[47]马士华,林勇.供应链管理(第2版)[M].北京:机械工业出版社,2006.36-37.

[48]张庭发.集装箱港口竞争与对策研究[D].济南,山东师范大学,2009.

[49]王雁凤.上海集装箱港口横向纵向合作博弈策略研究[D].青岛,中国海洋大学,2012.

[50]张维迎.博弈论与信息经济学[M].上海:上海人民出版社,2007,39-42.

[51]Graham Romp. Game Theory Introduction and Applications [M].The American Law Library,1997.

研究成果

一、发表的论文

- [1]严庭玉, 盛进路等. 集装箱码头装卸作业优化配置研究[J]. 青岛远洋船员职业学院学报, 2016(1).
- [2]盛进路, 赵虎刚. 严庭玉等. 内河船舶避碰决策研究现状及趋势分析[J]. 世界海运, 2015(3):37-40.
- [3]盛进路, 赵虎刚. 严庭玉等. 液态危险品智能储运装置的设计[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(1).

二、专利和软件著作权

- [1]赵虎刚;盛进路;严庭玉等. 气压自动测漏储运桶[P]. 实用新型专利: CN201520053007. X, 2015-07-01.
- [2]赵虎刚, 杨富华, 严庭玉等. 基于船舶领域的内河船舶避碰决策系统: 软件著作权, 2015SR159796[Z]. 2015-06-15.
- [3]杨富华, 王俊杰, 严庭玉等. 长江干线危险品运输船舶管理信息系统: 软件著作权, 2015SR159623[Z]. 2015-06-18.

三、参与项目

- [1]取消船舶签证对规费征收工作的影响及对策研究, 重庆海事局. 2014. 3-2014. 12.
- [2]港口建设费减免缓征管理工作研究, 交通运输部海事局, 2015. 1-2015. 12
- [3]规费征收现场稽查工作指南, 交通运输部海事局, 2016. 1-2016. 12.
- [4]长江干线危防监管新模式研究, 长江航务管理局, 2015. 1-2015. 12.
- [5]内河船舶尾气催化净化处理关键技术研究. 2016. 1-2016. 12.
- [6]内河三维船舶领域及避碰决策优化模型研究, 国家内河航道整治工程研究中心. 2015.
- [7]港口建设费低值货物名称及特征分析, 交通运输部水科院, 2016.