

## 摘 要

集装箱码头的生产运作主要指泊位船舶的装卸作业,包括设备的使用,人员的组织安排,泊位生产过程的有序高效管理对码头整体运作有着至关重要的影响。

本文研究了集装箱码头泊位的生产运作管理问题,主要重点是在龙门吊装卸工艺系统下的集卡的路径优化和设备优化配置问题。泊位资源是码头作业效率的关键,如何利用已成为当今研究的重点,船舶靠泊以后由集装箱装卸桥进行码头前沿的装卸工作,装卸桥的效率成为了泊位充分利用的关键,而为了使装卸桥的效率充分发挥,需要配备足够的集装箱卡来承接装卸桥的装卸工作,集卡从岸桥运行到码头的各个装卸堆场以及从各个堆场回到泊位岸桥处,这中间的路径行走并非随意,需要有科学的路径管理进行指导,使得集卡利用经济而有序,使得码头的管理工作富有组织性,对于同时存在一装一卸的两泊位生产运作问题,路径优化的研究就更加复杂化,需要将两泊位上的开头岸桥和进出口堆场同时考虑到一个系统中来进行优化。

另外,由路径优化得来的各时段路径必会长短不一,配置集卡数量同样需要科学的分析和管理的,同样场桥和集卡之间的作业要求也是如此。而三种设备中间的关键是衔接效率问题,那么如何配置就需要从它们之间的相互联系点来研究。

本文提出了将集卡独立作业与联合作业同时考虑的集卡路径优化模型,以集卡总行驶距离最短为目标,找出昼夜计划的集卡最优工作路径,然后以岸桥、集卡和场桥的作业效率为基础,以设备单位总运行费用最低的确定设备配置数量的解决思路。

通过泊位生产的流程分析以及理论建模的数学分析方法构建了描述集装箱码头泊位生产运作的整数线性优化模型。并应用该模型,给出一个虚拟码头的数字实验案例,得出了码头昼夜 24 小时的生产作业计划,结果比较客观合理,同时将集卡的总行驶距离同传统的仅独立作业使用方式进行了比较,得出集卡的效率可以提高 20%以上,证明了该模型对于管理集装箱码头泊位的实际生产运作情况具有很好的理论支持和现实指导作用。

**关键词:** 泊位生产运作; 独立作业; 联合作业; 最短路径; 设备配置

## ABSTRACT

The berth production operation(BPO) of container terminal mainly means the process operation of loading/discharging of containerships, which contains use of equipment and organization of workers. High efficient management of BPO plays an important role in the whole operation of container terminal.

This paper addresses the BPO management problem, aiming to solve issues of the route optimization of container trucks and deployment optimization of equipment on the basis of gantry cranes(GCs) handling system. The berth resources have become the key issues on a terminal operation, and how to make full use of them has already become the main point in today's research. After berthing a ship, quay cranes(QCs) take charge for loading and unloading work, so the efficiency of quay cranes can measure that whether the berths have been made full use of, in the meantime, in order to give full play to the efficiency of QCs, enough container trucks are needed. The container trucks move from QCs areas to container yards(CYs) or from CYs back to QCs, the routing arrangement should be directed by scientific routing management theories, instead of being decided at random, which makes use of container trucks economic and management of terminal organized. As for two berths, if circumstance of one berth loading while another unloading exists, the research on routing optimization problem will be more complicated, which should take QCs and CYs of both berths into consideration and put all the relative factors into a system.

Furthermore, the shortest routes of each period of time from routing optimization model are different, the number of container trucks for each route must be different, so how to deploy container trucks also needs scientific analysis and management, and the work requirement between GCs and container trucks is in the same way. The key issue among these three equipment is connection efficiency, so we need focus the research on the connected point between two links of the operation process.

This paper proposes a routing optimization model taking both independent

transport and combined transport of container trucks into consideration with the objective of shortest of total moving distance. Routing optimization model can find the optimal work routes of container trucks under day and night schedule of a container terminal, after that, the paper also proposes a Berth Equipment Deployment Model, which helps to decide the optimal deployed number of container trucks and GCs on the basis of work efficiency of various of equipment and the objective of lowest of total operation cost.

Trough the mathematic analysis mothod of production process analysis and mathematic theory modeling, the author gives a Integer Liner Programming Model discribing the berth production operation, and also puts this model into practice. The numeric experiment is about a fictitious container terminal, after using the model, we can get a production operation schedule of the whole day, the result is rather objective and reasonable, in the meantime, the author compares the optimal gross moving distance to that of traditional independent transport style, then finds that the container trucks efficiency happens more than 20% increasing, which can prove the model possesses pretty good academic support and practical directed effect on the actual work of berth production operation.

**Key Words: Berth Production Operation; Independent Transport; Combined Transport; Shortest Route; Equipment Deployment**

# 大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

## 原创性声明

本人郑重声明：本论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，撰写成博/硕士学位论文“集装箱码头泊位生产运作优化研究”。除论文中已经注明引用的内容外，对论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。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表或未公开发表的成果。本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：王海燕

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解大连海事大学有关保留、使用研究生学位论文的规定，即：大连海事大学有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连海事大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。同意将本学位论文收录到《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》（中国学术期刊（光盘版）电子杂志社）、《中国学位论文全文数据库》（中国科学技术信息研究所）等数据库中，并以电子出版物形式出版发行和提供信息服务。保密的论文在解密后遵守此规定。

本学位论文属于： 保 密 ☐ 在\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

不保密 ☒ （请在以上方框内打“√”）

论文作者签名：王海燕 导师签名：陈旭

日期：2010年6月29日

## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

#### 1.1.1 泊位生产问题的提出

贸易全球化趋势，产品生产地与市场交易地的跨国分离，极大地推动了集装箱运输的发展。由于集装箱运输量的增长以及集装箱运输方式的特点，集装箱码头成为船转船或船转其它种运输方式（诸如铁路、公路等）的中转服务中心，从而，集装箱码头已经成为物流系统网络中非常重要的一环。

海运和其他运输方式一样，效率也是非常重要的。随着贸易的增长，许多集装箱码头正致力于或者即将重点放在码头的工作性能上。除了这种趋势之外还有一个趋势就是集装箱船舶的日益大型化（10000TEU 以上的集装箱船舶已经开始运营），所以码头的运营的高效化就显得更加重要了。高效的码头能使集装箱快速装上或卸下船舶。这不仅使承运人满意，因为它提供了高效的运营效率，而且也符合码头的利益，因为这样码头每天装箱量增加，从而使得利润增大。因此，来自商业环节利益的巨大压力，要求必须提高码头服务能力，而泊位的生产能力是整个码头服务能力的关键，泊位生产效率的高低关系到整个码头系统地运行效率高低，进而影响整个港口的生产效率。

国内码头的泊位装卸系统一般为“装卸桥-集卡车-龙门吊”装卸工艺系统，装卸桥实施泊位的前沿装卸，集卡车进行泊位和堆场间的水平搬运工作，龙门吊在堆场作业集装箱的堆码摆放，各尽其职。本文的泊位生产就是基于这样一个泊位生产装卸系统进行讨论。

对于集卡的水平运输来说，现今出现了一种新型行走方式，在这里我们将传统集卡固定于岸桥的作业线行走方式表示为独立作业，而将在两个泊位一装一卸情况下集卡由进口堆场并不直接返回岸桥而是到出口堆场运箱到另一泊位岸桥的运输方式表示为联合作业，如图 1.1 和图 1.2 所示。

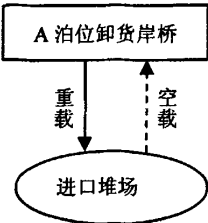


图 1.1 集卡独立作业模式

Fig.1.1 Independent Operation Mode

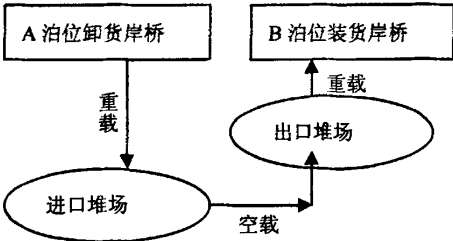


图 1.2 集卡联合作业模式

Fig.1.2 Combined Operation Mode

泊位生产主要是利用特定的装卸设备将集装箱从泊位有序装卸到堆场或从堆场将集装箱装卸到泊位的作业活动，是在泊位-后方堆场-前方堆场几个区域的生产活动，在我国的大部分港口中，衔接这几个区域的设备主要是集装箱装卸桥、集装箱卡车和堆场龙门吊，根据各个船舶的在泊时间要求需要足够的开头数<sup>1</sup>，为方便货主提箱或还箱以及港口管理等情况，使得码头箱子的摆放情况各堆场分散不一，靠泊船舶的进口箱和出口箱分散在堆场的各个堆区，而并不是将所有待卸进口箱或待装出口箱统一放在一个堆区内，这会导致集卡从码头前沿岸桥到各堆区的路径长短不一，那么码头在做昼夜生产计划时，桥吊如何安排？集卡路径如何？各路径上需要怎样配置集卡和场桥？才能使设备效率充分发挥，码头成本尽量节约。泊位安排生产的重点，就是将这些问题的综合解决。

另外，集装箱的装卸生产不同于散货，对于时间的把握要比散货更加精确，

<sup>1</sup> 船舶开头数：指集装箱船舶靠泊以后，泊位上装卸船舶同时使用的集装箱岸桥数。

这有利于控制集装箱的摆放安排，从更加微观的层面来看，集装箱的管理却要难于散货，首先集装箱船舶上的箱子隶属于不同的船东或货运站，货物也是诸多货主的货物集合，为了便于管理箱子和货物，这就需要在泊位装卸过程中将箱子有序摆放，以利于货主提/还箱，尽可能避免倒箱、短装短卸等问题，所以在船舶到达码头之前 1 到 2 天，码头根据船舶配积载和船舶装货清单应该已经预先将待卸和待装箱子的堆场安排妥当，堆场的每个堆区装卸箱数量合理分配，对于这些前期的计划管理非常重要，因为这涉及到后续的提/还箱工作，所以这些计划的有效实施非常重要，泊位生产过程中要严格按照计划装箱/卸箱。

由此看来，泊位的生产运作的实际任务也是一个值得研究的理论问题。因为生产过程是一个动态的过程，它同样由岸桥作业环节、集卡作业环节和场桥作业环节组成，联系着泊位和堆场，每个过程的系统输入量不同输出也就不会相同，这需要在码头区域内发展一个复杂的决策支持系统来指导各个作业环节的协调配合。每个决策也都需要理论充分研究论证，因为参数较多，数据量较大，经验已经不足以解决问题。本文就是基于集装箱化运输日益增加的重要性以及优化技术理论的发展开展研究的。

### 1.1.2 选题的目的和意义

由上文可知码头的堆场分散着许多卸箱堆区和装箱堆区，以前的很多研究都是基于一条船舶上的所有进口和出口箱都统一摆放在一个堆区，这样泊位和堆区的距离一致，确定路径简单明了，但是却不符合实际情况，因为一般卸箱堆区在后方堆场，装箱堆区在前方堆场，各个堆区计划摆放着一定数量的集装箱，由于摆放方便和便于管理等原因，将一条船舶进口箱和出口箱分散于这些堆区里，将一个货主或货运站箱子集中在堆区内的某一块，泊位生产的结果是将各个装箱堆区的集装箱装上船舶，将船舶上的集装箱卸到各个卸箱堆区，每个岸桥距离这些堆区路径距离不一，确定出集卡在这些堆区间的运行路径最短非常重要，这关系着总路径最短来提高设备使用效率的现实问题。

目前水平运输机械设备—集装箱卡车的调度方式是根据码头的实际操作业务量和船舶的在港时间要求配置桥吊，对每台岸桥桥吊配备 3—4 辆集卡、2—3 台场

桥,配备集卡和场桥始终为该岸桥服务直至船舶离开,整个作业过程中岸桥桥吊、集卡、龙门吊形成一条固定作业路线,集卡沿作业路线依次运输,司机操作简单,不易出错,但在运输过程中造成运输距离增加,作业成本上升,集卡在集装箱运输过程中不能被充分调度与利用,集卡空运载率高,在桥吊或轮胎吊下等待时间过长,不利于提高集装箱码头机械设备利用率等问题。设想如果有两个泊位在某个时间段内同时进行一装一卸,就可以考虑集卡的联合作业,就是在集卡将所卸箱子运到卸箱堆区以后再运行至装箱堆区装箱前往装船泊位,这样的联合作业提高了集卡的重载利用率,节约资源。当然这种运输会出现时段不完全重合且任务量不平衡情况,那么如果两船装卸时段不完全重合,可以找出重合时段作为一装一卸联合作业时段,在联合作业时段任务量不平衡情况下,任务量大的泊位就会同时存在联合作业和独立作业情况,这也并不复杂,在得到联合作业和独立作业任务量之后集卡就可以分别按任务量计划进行运输了。

本文主要考虑集卡优化调度算法——最短路径法在集卡调度中的应用,以时间段为考虑,首先判断在时间段内的独立作业和联合作业,本文为独立作业和联合作业都建立了一个路径优化模型。本文所论述的集卡优化调度算法打破了集卡的传统调度方式,根据路径优化模型,确定出集卡的运行路径以及优化路径次数,在联合作业阶段,可保证集卡减少空载率,提高集卡利用率,达到重进重出;同时根据桥吊的装卸效率对桥吊进行简单和联合作业的调度分配,而不局限在分配的3-4辆集卡,2-3个场桥,这个模型不仅仅基于总运行距离最短,同时将独立作业和联合作业分情况考虑更提高了集卡的运行效率。

一艘船舶到达码头,集装箱装卸桥将集装箱从船上卸到水平运输工具上,搬运工具再将箱子运到指定堆场或者火车/汽车直接运出码头。在堆场,场内门吊将集装箱从搬运车上卸下储存。同样地,对于装船来说,场内门吊将集装箱放到搬运车上,车子再从堆场将箱子运输到船边,装卸桥再将箱子装到船上,一般地,装卸岸桥相对于堆场门吊来说,工作地点是固定的,而堆场门吊在堆场区域可以服务很大一片区域。集卡也要基于岸桥进行配置,确定出恰当的配置量,保证不耽误岸桥作业的同时不至于集卡配置过量。

毫无疑问,建立一个优化系统是非常复杂的,一下子要解决港口系统中的所有决策问题是不可能的,泊位子系统是集装箱码头的主要工作系统,若单从泊位



生产运作操作层面上来说，我们可以预知一些情况，例如未来几天到达的船舶动态是已知的，港口可用泊位数和可用岸桥数目也是固定不变的，每条将要到达船舶装卸箱量装卸堆场位置可以作为是已知的，港口工人的工作效率也是大致确定的，那么为了使得港口利润最大化，所需解决的问题就比较清楚：船舶到达后泊位如何分配使用，船舶靠泊后，需要几台装卸桥，每台岸桥装卸哪些贝位，每台岸桥需要几辆集卡，堆场门吊服务哪些集卡，集卡车在船边和堆场间如何行使，车速多少才能尽量避免拥挤现象？这些设备的操作工人如何进行组织分配？很明显上述等等与泊位生产相关的关键问题之间是相互联系的，这些问题整合统一就属于泊位生产运作优化问题。

本文以泊位一天的生产计划为前提，将每个时间段的机械设备利用率达到最优，合理调度各种机械设备，才能给集装箱码头的发展带来巨大节约，获得更大的利润。本文通过计算机编程计算最优路径和最优设备配备方案，使集装箱码头的集卡达到预期的最优调度，集装箱岸桥、集卡、场桥间的无缝衔接，有效并高效地满足集装箱码头运输要求。

## 1.2 国内外研究综述

目前集装箱码头的生产操作自动化程度还不高，针对集装箱码头的物流优化研究方兴未艾，学术界与企业界已经对集装箱码头物流相关研究工作投入了广泛关注。虽然集装箱码头物流在学术界领域仅仅占据一个很小的席位，但它在欧洲、美洲、亚洲等许多国家和地区已经受到越来越多的重视。本节，总结国内外的集装箱码头物流作业的相关研究文献，对集装箱码头物流作业系统的相关模型等研究工作进行分析整理与归类总结。把现有相关研究工作的不足与集装箱码物流作业实际相结合，给出论文的研究方向与框架结构，为后续的研究工作提供主线。关于泊位生产运作的研究现今主要是分块研究，包括泊位分配研究，岸桥泊位协调分配研究，集卡路径优化研究，堆场分配研究等等，将整个优化系统综合研究的著述还处于浅尝阶段。

### 1.2.1 国内外研究状况

由于集装箱码头生产作业问题的复杂性，一次难以用单一的解析模型进行整体优化，日前较常见的优化方法是将作业系统分为若干子系统环节、分层次分阶段进行优化。具体地可以分为泊位调度分配、装卸岸桥调度、水平搬运设备例如集卡等的调度配置、堆场内场桥等设备的资源优化等。或者有许多学者根据动态过程采用仿真模拟方法。而对于泊位生产运作来说，主要由岸桥配备计划、集卡路径安排

(1) 关于集装箱码头的整体作业优化设想，吴岷(1999)<sup>[1]</sup>从宏观上阐述了集装箱码头作业整体优化的组成部分、优化步骤以及各步骤相关注意点，并对未来计算机技术的使用提出设想。张莉，霍佳震(2007)<sup>[2]</sup>系统性地介绍了集装箱码头运营优化的组成与概念，分析总结国内外各领域码头运营优化的研究概况，并说明仿真系统在我国部分部分运营优化中的融入使用。韩要稳、朱晓宁、闫振英(2007)<sup>[3]</sup>对集装箱码头的各环节协调特性进行了定性地宏观论述，运用物流理念，提高码头运作的整体经济型和效率。

船舶到港口首先获得泊位以便进行装卸作业，泊位的分配对集装箱码头的效率影响巨大。另外，泊位的分配又影响装卸桥调度、集卡的行驶距离，从而影响集装箱码头的整体作业效率。

将码头作业的整体环节拆分阶段分别进行研究的著述较多，包括泊位调度、装卸桥调度，集卡路径及调度和堆场设备调度等方面。

(2) 在泊位分配方面：一些学者先后创建了泊位分配优化模型。目前泊位分配模型主要有两类：一类是离散泊位分配模型，即根据船舶到港情况为其分配特定泊位。在这类一研究中，Imai等(2001)<sup>[4]</sup>创建的离散泊位分配动态模型，采用拉格朗日松弛算法进行了求解，Imai(2003)<sup>[5]</sup>在模型中又考虑不同船舶营运人不同停泊优先权，设计基于遗传算法的现代启发式算法。另外，Kim等(2003)<sup>[6]</sup>运用模拟退火算法求解离散泊位分配问题，并将模拟退火算法与最优化求解方法进行了对比。另一类是连续泊位分配模型，它不考虑泊位概念，将码头岸线看作连续的整体，根据船舶的长度依次进行停泊。Imai等(2005,2007)<sup>[7-8]</sup>建立的连续泊位分配模型，结合离散泊位分配模型求解过程，开发了求解模型的启发式算法，目标是总

服务时间最小,后来又进一步研究了交错式布局码头的泊位分配问题,并设计了基于遗传算法启发式算法。Wang 等(2007)<sup>[9]</sup>将泊位分配问题看为多阶段任务决策问题,设计了基于随机搜索算法的求解办法。离散泊位分配模型求解起来比连续分配模型简单,但连续分配方法可以提高码头的泊位利用效率,而且随着集装箱船舶大型化的发展趋势,集装箱码头泊位的分配需要更加灵活的方法,因此其连续分配模型得到了较快的发展。

(3) 在装卸桥作业优化方面,船舶靠泊后,由装卸桥完成进口集装箱卸船与出口集装箱装船作业。装卸桥调度是集装箱码头作业系统关键的环节。在集装箱码头装卸设备中,装卸桥是制约集装箱码头效率的主要瓶颈,是决定集装箱码头吞吐能力的主要因素。集装箱码头通常是根据装卸桥调度分配集卡与堆场龙门吊,因此,装卸桥的作业顺序在很大程度上决定了码头内其他设备的作业流程,是其他优化问题的基础及约束条件。

Daganz (1980, 1990)<sup>[10]</sup>建立了集装箱装卸桥调度的混合整数规划模型,他分别采用精确和近似算法对模型进行求解,模型的目标是优化分配给每个贝位的装卸桥数量与服务顺序,从而使所有船舶总延误成本最低,后又进一步发展了这一模型,针对多艘船舶运作情况,以总延误惩罚最小为目标,采取分支定解法求解整数解。Kim(2004)<sup>[11]</sup>研究了针对单条船舶作业的装卸桥调度问题,分别采用分枝定界法、贪婪随机适应性搜索算法对模型进行了求解。Ebru K.Bish(2001)<sup>[12]</sup>提出了泊位有限个装卸桥限制条件下的装卸桥调度问题,建立了多目标规划模型。

(4) 上述研究没有考虑泊位分配与装卸桥调度之间的相互约束关系,具有一定的局限性,为此,Imai(2007)<sup>[13]</sup>建立了泊位分配与装卸桥调度模型,设计了基于遗传算法的求解方法。韩晓龙(2005)<sup>[14]</sup>同时考虑装卸桥调度与泊位分配问题,并设计了启发式回溯算法。韩俊、孙晓娜、靳志宏(2008)<sup>[15]</sup>提出以船舶在港时间最小为目标的泊位与岸桥协调调度优化方法。对泊位调度与岸桥分配这两个相互关联的问题进行系统分析与集成

(5) 在集装箱码头装卸作业中,岸边与堆场之间的集装箱运输是由水平运输设备完成的。目前有关水平搬运设备调度的研究主要涉及集卡或 AGV (Automated Guided Vehicles) 的数量配置、路径优化等问题。Nishimura 等(2005)<sup>[16]</sup>分析对比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。杨静蕾(2006)<sup>[17]</sup>基于单

船同时进行装卸作业的情况,提出了集装箱码头物流路径优化模型,以集卡行驶距离最小为目标优化集卡的最优路径。李磊,孙俊清,韩梅(2008)<sup>[18]</sup>综合考虑进口泊位和出口泊位的装卸箱情况,提出基于时间最短的集卡优化模型,设计了免疫禁忌算法进行求解,实现对集卡的优化调度;严政,陶德馨(2006)<sup>[19]</sup>分析了基于动态优化组合的集装箱码头集卡调度问题;曾庆成,孙丽敏,杨忠振(2009)<sup>[20]</sup>为提高集装箱码头作业效率,建立装卸混合调度模型,并设计两阶段禁忌搜索算法来求解。

(6) 在码头内部作业的设备配置方面,如何科学地确定集装箱码头建设规模和装卸设备的拥有量、合理而有效地管理与使用集装箱码头的装卸资源,降低营运成本,国内外一些科研部门的学者和研究人员在积极地从事这方面的研究工作,发表了不少相关文章著作。韩晓龙(2005)<sup>[21]</sup>研究了集装箱港口装卸过程中的龙门吊数量配置问题。李建中等(2005)<sup>[22]</sup>建立了多目标非线性数学规划模型,研究龙门吊的动态配置问题,并通过 Lingo 对模型进行了求解。彭传圣(2005)<sup>[23]</sup>建立了计算机动画模拟,研究了在码头极限通过能力下,集装箱装卸桥的数量对码头服务水平的影响。与配备龙门吊一样,配置集卡时应满足:1)港区内水平运输量的要求;2)水平运输机械的运输能力应适当大于完成水平运输量的需要,以确保岸桥能力的发挥。一般的配备方案是一台岸桥配备 3—6 台集卡不等。由于在传统的“作业线”生产方式中,配给每个工作岸桥的集卡台数是固定,而对岸桥的任务分配由于各种原因不能均衡,所以常常会出现有的工作岸桥在等集卡,而有的工作岸桥下面却有集卡在排队的现象,造成岸桥和集卡都不能充分利用,因此有不少专家提出了打破传统的面向“作业线”装卸模式、采用面向“作业面”装卸模式的口号,即混合装船、卸船和转堆收发等一系列需要内集卡参与的多条作业路共享所有集卡,使每辆集卡同时对多条作业路,保证集卡在卸载后可就近投入其他需要负载的作业路中,并对新工艺中集卡调度原则进行了说明。金健(2006,2009)<sup>[24-25]</sup>介绍了面向“作业面”装卸模式的作业过程,提出了系统的优化措施,并将时间空间概念一起考虑引入到集装箱码头的作业计划中。

(7) 各环节的协调问题方面:集装箱码头作业系统各环节之间相互影响,在进行装卸作业时,只有各环节的有效配合,才能保证装卸作业的高效率,而上述针对各环节的优化模型无法处理作业中各环节间的协同问题。为此,一些学者针对作业系统各环节的协调问题开展了研究,在同一模型中考虑作业系统的多个

环节, Kozan 等(1999)<sup>[26]</sup>建立了集装箱码头装卸作业优化模型, 模型涉及两个方面的决策: 集装箱堆存策略、集装箱装卸作业顺序。模型的目标是船舶在港时间最短。康海贵等(2006)<sup>[27]</sup>提出了起吊设备—车辆规划配置模型, 在装卸桥作业顺序已知情况下, 对堆场龙门吊路径选择和集卡分配进行了系统的优化, 其目标是相关设备的空闲和堆场龙门吊空驶时间的最小, 并针对模型提出一种改进的遗传算法。Chen(2007)<sup>[26]</sup>提出装卸调度整体优化模型, 并设计了基于禁忌搜索算法的求解方法。

### 1.2.2 文献综述结论

综合前面的研究现状分析可以看出在对集装箱码头生产作业调度和泊位资源配置方面, 主要结论有:

#### (1) 局部优化与整体优化的问题。

集装箱码头作业系统是一不可分割的有机整体, 在进行装卸作业时, 各个环节只有有效配合, 才能保证装卸作业的高效率。因此, 作业系统各环节之间协同问题, 系统整体作业效率问题等是目前集装箱港口作业系统优化领域的重要研究课题。而日前的研究主要针对作业中各环节进行优化, 现有的集成调度模型在如何处理复杂约束条件、如何提高模型求解效率方面还存在较大的问题。

集装箱码头装卸作业是一项复杂的系统工程, 牵涉到多种资源的协调问题, 系统中各个要素之间往往存在目标冲突。例如, 如果仅以集卡利用率最高, 或集卡行走路径最短为目标进行优化, 虽然集卡的利用率可以增加, 它的行走路径也能达到最短, 但往往会因集卡在堆场停留时间过长而造成集卡不能及时返回岸边, 出现岸桥等待集卡的现象, 使岸桥不能连续地进行装卸船作业。如果仅以岸桥节点为目标来优化, 为了保证岸桥连续不断工作, 需配备更多的集卡和场桥, 这虽然保证了船舶效率, 但同时也增加了作业成本。因而, 以单个或几个内部物流要素为目标来优化集装箱码头内部物流系统, 在大多数情况下只得到局部最优解。

(2) 缺乏对码头系统整体综合分析的有效手段。在一些对集装箱码头装卸资源进行总体配置的研究中, 大部分尚停留在主要依靠经验和常规简化测算分析的状态。例如, 先根据集装箱码头的预测吞吐量和泊位通过能力、岸桥作业效率的经验数据确定泊位数量、岸桥拥有量, 再根据常规的岸桥、堆场龙门吊、集卡配

比数量确定其他装卸机械的拥有量。这种方法存在一定的盲目性，对配置方案也缺乏科学评价的工具和比较依据。

(3) 有些理论过于脱离实际，研究空洞无意义。研究的终极目的是为实际提出理论指导，目前有许多研究基于的事实因素及虚构现象过于虚幻，实际中并不存在，导致研究的结果不可用。

(4) 缺乏基于“作业面”的动态调度方法的研究。

目前集装箱码头作业调度方法主要有：基于“作业线”的作业调度法和基于“作业面”的作业调度法。目前集装箱码头多是采用基于“作业线”作业调度方法，即为装卸桥配备固定的集卡。集卡在将进口集装箱运到堆场后只能直接空驶返回固定的装卸桥运送下个集装箱，集卡不能在不同“作业线”之间动态分配，空驶较大，利用率较低。为提高集卡利用率以及码头作业效率，基于“作业面”的调度方法受到越来越多的重视。在“作业面”方式下，集卡不再为固定的装卸桥服务，而是根据现场作业任务实时分配。集卡将进口集装箱运到堆场后可以不空驶回岸边，而是提取出口集装箱返回岸边。采用“作业面”的方式可以实现装卸同时作业与集卡动态调度，从而提高集卡利用率。目前针对集装箱码头作业的研究主要是基于“作业线”的优化模型，而且多是针对作业系统某子过程进行优化，而基于“作业面”的动态调度的研究相对较少。

基于作业面的调度可靠性显然低于基于作业线的调度，因为它可能会往往因为某个环节的拥堵而产生整体上的闲置，从而降低总体利用率，这也是现实中一直没有采用作业面调度做法的主要原因。这种做法能够成熟应用于实际有赖于精密的计划和严格有序的监督管理，而随着码头管理水平的不断提高，加之作业面调度的设备高效利用率等优点，实践中采用作业面的作业方式的实现并不久远，为实践而做准备的理论研究就势在必行。

(5) 码头系统研究目标的综合性。

目前集装箱码头通常的装卸工艺是装卸分别调度，即船舶靠泊后，先卸后装。卸船顺序是由后至前(贝)，由内至外(列)，由上至下；装船顺序是由前至后(贝)，由外至内(列)，由下至上。将装船与卸船联合调度可以提高效率，如：一装一卸船舶的联合作业装卸。在此装卸工艺条件下，装卸桥在一个泊位进行装船，同时另一个泊位进行卸船，集卡的路线状态不是半重半空。此方法避免了通常作业模式

下装卸桥来回一次空运行的现象，可以有效地提高岸桥的效率。但是，日前针对装卸联合调度的研究非常少见，限制了其在集装箱码头作业实践中的应用。

且在设备资源配置上，目前的研究模型其目标往往仅是岸桥作业时间最短或船舶在港停时最短，而不是经济学中经典的财务指标(如费用最小、利润最大)，实际上也是不符合港口这个独立的经济实体运作的目标的。

以往研究的模型与方法都提高了集装箱码头作业调度的协调性与整体性，但是，如何有效处理各种约束条件和复杂的相互关系;如何提高模型求解效率;如何实现作业系统各个环节之间的协同调度，一直是其中没有得到较好解决的难题。

对于昼夜计划的泊位生产运作的研究也几乎没有，针对以上提出的研究缺陷，本文试图以国内主要生产运作流程为基础，考虑了泊位的独立作业和联合作业，根据现实因素，将装卸岸桥、水平机械、堆场桥吊有机结合调度以及给出最佳优化配置。

### 1.3 本文主要研究内容

本文首先分析集装箱码头生产经营以及装卸作业工艺系统，分析利弊，明确目前中国主要采用龙门吊装卸工艺系统，在此基础上介绍泊位的生产作业流程，再根据泊位的昼夜作业计划，将靠泊船舶上的集装箱准确高效的装卸到计划堆区，以及将各堆区上计划出口箱按时按量装到出口船舶上。笔者试图以路径最短优化模型将集卡联合作业和独立作业综合考虑，优化集卡路径，配置最佳数量的岸桥、集卡和场桥。

以昼夜 24 小时生产计划为依据，本文将泊位的生产运作分为两大阶段进行优化，第一个阶段为集卡的路径优化部分，各箱区装卸集装箱数量预知，每艘靠泊船舶需要开头数也预先可以确定，根据泊位岸桥-堆区距离和时间段内的装卸集装箱数量建立集卡路径优化模型首先求得各个桥吊到各个堆场的最佳路径，然后应用设备配置优化模型求得各个路径上的集卡和龙门吊配置数量，将泊位的作业系统高效链接起来，让泊位的管理井然有序。

因为涉及的集卡的联合作业，所以对于集卡与龙门吊的使用要进行实施监控，否则很容易引起管理的混乱。

第 1 章绪论主要介绍了本文的研究背景以及国内外相关问题研究概述，介绍本文的研究内容，研究方法和思路。

第 2 章对于集装箱码头的经营现状及发展趋势进行分析，详细介绍了集装箱码头的几种装卸工艺系统，最后对我国集装箱码头泊位的生产运作流程进行介绍分析。

第 3 章是本文的泊位生产运作的建模，主要有集卡路径优化模型和生产设备配置模型。

第 4 章是在第 3 章的基础上进行实际算例的运算。

第 5 章是本文的结论建议及研究展望。

### 1.4 拟采取的研究方法及思路

本文的理论依据是泊位的昼夜 24 小时作业计划以及堆场堆箱计划，在各个装卸工艺系统的综合比较中确定中国普遍采用的龙门吊装卸工艺系统为生产作业流程使用的装卸系统，将时间和空间都引入系统，首先根据靠泊计划和船舶在泊时间确定每条船舶的开头计划，分析进出口堆场位置，根据路径最短原则为船舶装卸集卡确定最优路径方案及路径方案上的运输箱数。一旦路径集合确定，接下来就需要为每个路径配备最佳的集卡和场桥数。

根据模型的特点识别为整数规划，进行数学分析，采用相应的 Lingo 或者 Matlab 等求解软件进行求解，得出泊位最优生产运作计划。

以下为本文的研究方法技术路线图：



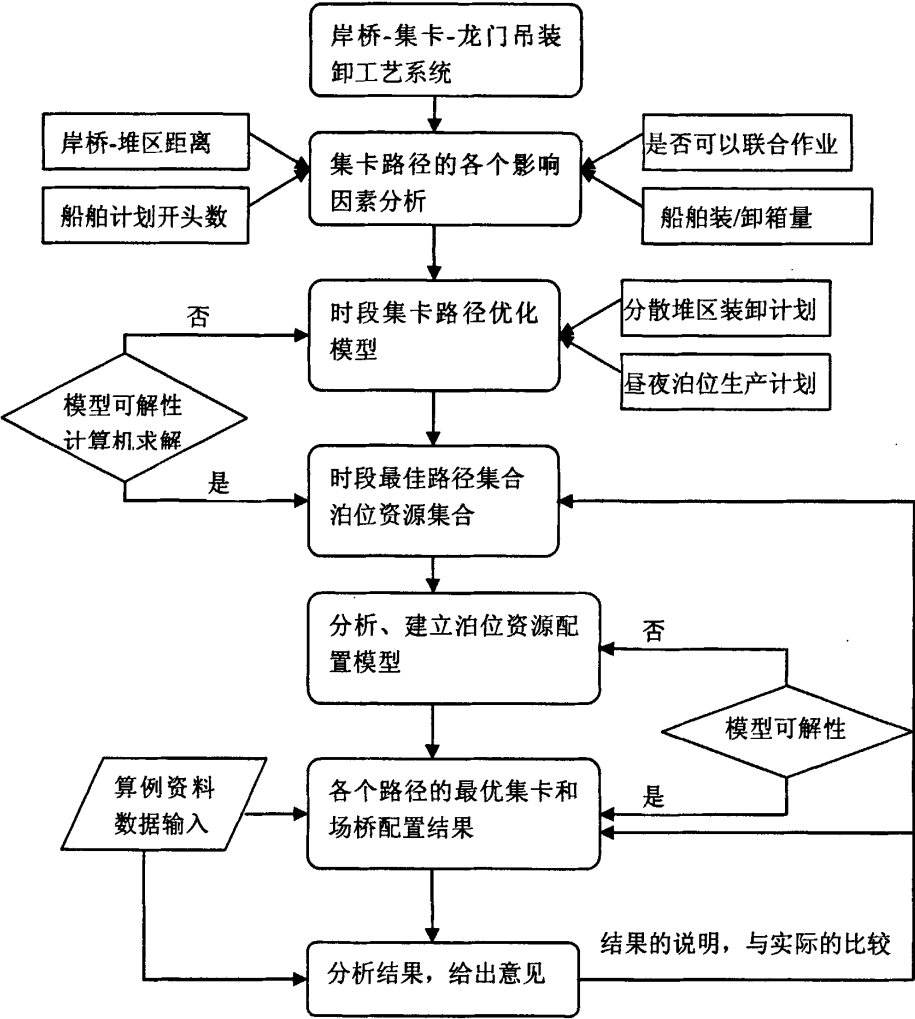


图 1.3 论文研究技术路线图  
Fig.1.3 Technical Analysis Process of This Paper

## 第 2 章 集装箱码头概述

### 2.1 集装箱码头的功能及布局介绍

#### 2.1.1 集装箱码头的基本功能

集装箱运输从 1956 年在美国兴起至今已有 50 多年的历史。随着集装箱运输行业的飞速发展，世界各国港口相继建造了大量的集装箱多用途和专用码头。集装箱码头在整个集装箱运输过程中对加速船舶、车辆周转，提高货运速度和货运质量，降低整体运输成本等方面发挥了巨大的作用。集装箱码头是海上运输的重要节点，主要有功能有：

- (1) 集装箱运输系统中的集散地，船舶的装卸点
- (2) 提供集装箱堆存，转换集装箱运输方式的缓冲地
- (3) 水路集装箱运输和陆路集装箱运输的连接点

随着现代物流的发展，集装箱码头的物流功能越来越强大，集装箱码头可以成为分拨中心，配送中心，流通加工中心等，可以为国际贸易方提供仓储、装卸、包装、运输、加工、配送及信息处理等一系列增值服务。

#### 2.1.2 集装箱码头的布局

集装箱码头是专供停靠集装箱船舶、装卸集装箱的作业场所，是在集装箱运输过程中水路和陆路运输的连接点，也是集装箱多式联运的枢纽。集装箱码头为了完成装卸、搬运等作业任务，要求集装箱码头同船舶共同形成一个不可分割的有机整体，同时需要港口有一些必要的设备和设施。现代集装箱码头通常应该有如下的必要设施：泊位、码头前沿、集装箱堆场、货运站、控制室、行政楼、检查口、维修车间等。这些必要设施的基本功能如下：

(1) 泊位 (berth)：是指在码头内，给船舶停靠的岸壁线与对应水域构成的区域。目前世界上集装箱港口泊位的长度一般为 300m 左右。

(2) 码头前沿 (apron)：是指沿码头岸壁线，从泊位岸壁到堆场之间的码头区域，主要是进出口集装箱进行换装的主要地点。前沿上设有集装箱装卸桥。

它是集装箱船舶装卸作业中最重要的一部分面积。如卸船时，从船上卸下的集装箱是放在前沿上或前沿的拖车上再转运到堆场。前沿也是堆放集装箱船舱盖的地方。因此，前沿必须要有一定宽度，不能过窄，以免引起装卸作业时混乱，影响整个码头的工作效率。

(3) 集装箱堆场(container yard, 简称 CY): 是指集装箱码头内, 所有堆存集装箱的场地。一般有前方堆场和后方堆场组成。一般按照集装箱的尺寸堆场上都画有存放集装箱的长方形格子, 称为“箱位”(slot), 并编有号码, 称之为场地位置(slot number)。集装箱再堆场的位置号码是由贝位、列号、层号共六位数字组成, 对堆存的集装箱进行位置标识。

(4) 集装箱货运站(CFS): 集装箱货运站时指把货物装进集装箱内或者从集装箱内取出, 并对这些货物进行贮存、防护和收发的作业场所。它主要为分属不同货主的拼箱货物提供装卸箱作业场所。集装箱货运站一般建于码头后方, 侧面靠近码头外公路或者铁路的区域。尽可能保证陆运车辆不必进入码头堆场内, 而直接进入货运站。随着集装箱码头装卸量的增加, 为了充分利用码头的堆场面积, 也可将货运站移至码头外。

(5) 控制室(control tower): 又称控制中心, 中控室。是集装箱码头各项作业的指挥调度中心, 是码头作业的中枢机构。它的作用是充分发挥码头各生产要素资源的作用, 监督和调整指挥集装箱码头各项作业计划的执行。因此其位置应该设在能清楚地看到堆场、码头前沿以及码头上所有堆放集装箱的地方, 所以其地理位置一般设置在码头操作办公楼的最高层。

(6) 行政楼(administration house): 是客户办理相关手续, 以及码头管理部门的行政场所。

(7) 检查口(gate): 俗称检查桥, 闸口, 大门等。是集装箱码头的出入口, 集装箱和集装箱货物的交接点, 也是区分码头内外责任的分界点。

(8) 维修车间(maintenance house): 是集装箱和集装箱装卸机械进行检查修理和保养的地方。

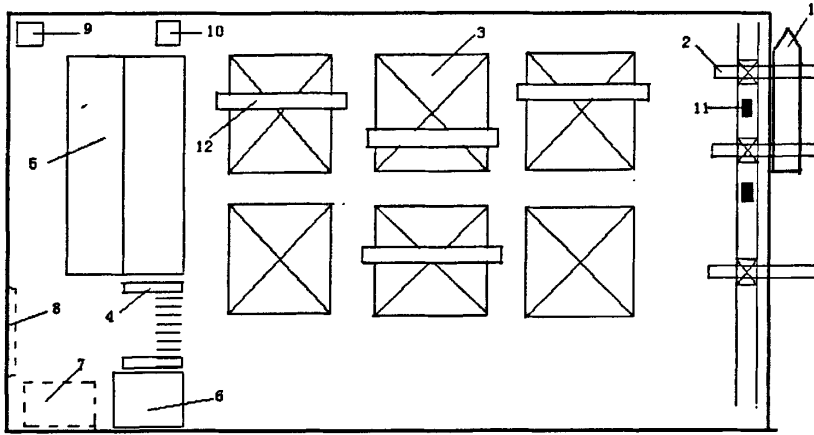


图 2.1 集装箱码头的标准布局模式

Fig.2.1 Standard Layout Mode of Container Terminal

图中：1、泊位（船舶）； 2、集装箱装卸桥； 3、堆场； 4、道口； 5、仓库（CFS 站）； 6、行政楼； 7、停车场； 8、大门； 9、变电站； 10、加油站； 11、集卡

## 2.2 集装箱码头的主要装卸机械

集装箱码头的机械设备主要分为码头泊位装卸机械、水平运输机械和场地装卸机械。岸边装卸的主要机械有岸边集装箱装卸桥、多用途门座起重机。

水平运输机械主要有：底盘车、跨运车。场地装卸机械主要有：集装箱叉车、龙门起重机、正面吊。

岸边集装箱装卸桥简称岸桥或桥吊，它是集装箱码头泊位装卸集装箱的专用设备，是每个集装箱码头必须配备的装卸机械，主要沿着与码头岸线垂直的小车轨道行走通常一个作业循环耗时约 120 秒。岸桥的作业效率越来越被认定为码头管理水平高低和竞争能力大小的重要标志之一。岸桥主要由带行走机构的门架、承担臂架机构的拉杆和臂架等几部分组成。随着集装箱船舶的大型化发展，标准的集装箱码头泊位的长度也在不断变长，每个泊位装卸桥的配备也不断提高。在集装箱国际枢纽港的专用码头，一般按每 80 米-100 米配 1 台岸桥进行配备。集装

箱岸桥的主要机械参数有：起重量、起升高度、外伸距、内伸距、横梁净空高度、基距、大车行走速度、小车行走速度等

## 2.3 集装箱码头装卸工艺系统分析

集装箱码头的装卸工艺有几种典型的系统，底盘车系统、跨运车系统、龙门吊系统及混合型系统等等，以下分别介绍。

### 2.3.1 底盘车系统（Trailer Chassis System）

码头的前沿采用岸边集装箱装卸桥承担船舶的装卸作业，进口集装箱由装卸桥直接卸到底盘车上，集装箱牵引车将载有集装箱的底盘车拖到堆场停放，出场时集装箱牵引车将载有集装箱的底盘车从堆场上直接拖出港区。出口集装箱由集装箱牵引车将载有集装箱的底盘车从港区停放在堆场上，装船时再由集装箱牵引车将载有集装箱的底盘车从堆场拖到码头前沿，由岸边集装箱装卸桥将箱吊装上船。该系统的主要特点是，集装箱在码头堆场的整个停留期间均放置在底盘车上。

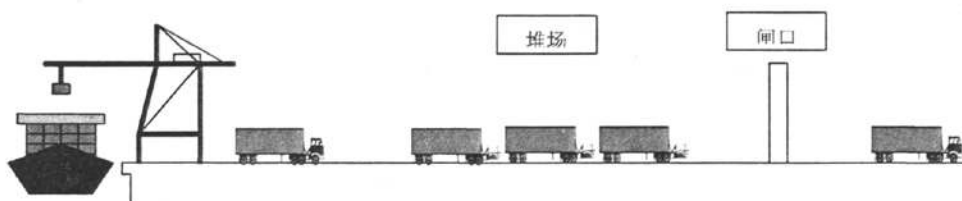


图 2.2 底盘车系统示意图

Fig.2.2 Illustration for Trailer Chassis System

底盘车系统的主要优点有：

- （1） 减少了集装箱在港的操作次数，装卸效率高，集装箱损坏率小。
- （2） 底盘车可直接用于陆运，适于门到门运输。
- （3） 底盘车轮压小，对场地承载能力要求低，节省场地铺面投资。
- （4） 工作组织简单，对装卸工人和管理人员的技术水平要求低。
- （5） 场地不需要复杂、昂贵的装卸设备。

底盘车系统的主要缺点有：

- （1） 为停放底盘车和拖挂作业的方便，需要较大的场地。

(2) 所需底盘车数量多,投资大,在运量高峰阶段可能会出现底盘车不足而间断作业。

(3) 不易实现自动化。

(4) 采用这种系统的大型码头托运距离长,在高峰期有可能造成港内道路堵塞。

(5) 底盘车不仅在堆场使用,在堆场外也使用,需要频繁的修理和保养。

这种系统主要适应的码头特点是:

(1) 码头集装箱通过量小,场地大。

(2) 适于集装箱码头的起步阶段,特别是整箱比例较大的码头。

(3) 有这种作业的码头,其陆路运输完全依赖于高效的公路运输。

### 2.3.2 跨运车系统(Straddle Carrier System)

码头前沿采用岸边集装箱装卸桥承担船舶的装卸作业,跨运车承担码头前沿与堆场之间的水平运输,以及堆场的堆码和进出场车辆的装卸作业。即“船到场”作业是由装卸桥将集装箱从船上卸到码头前沿,再由跨运车将集装箱搬运至码头堆场的指定箱位;“场到场”、“场到集装箱拖运车”、“场到货运站”等作业均由跨运车承担。

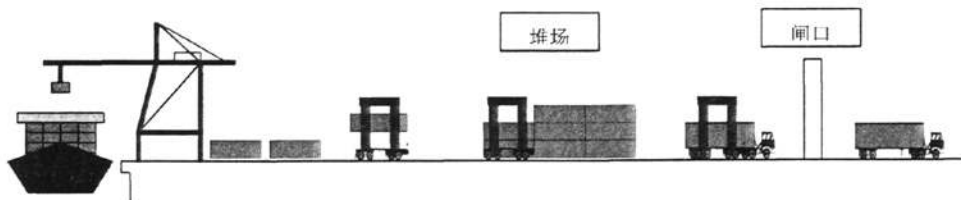


图 2.3 跨运车系统示意图

Fig.2.3 Illustration for Straddle Carrier System

跨运车系统的主要优点有:

(1) 跨运车一机完成多种作业(包括自取、搬运、堆垛、装卸车辆等),减少码头的机种和数量,便于现场生产组织管理。

(2) 跨运车机动灵活、箱角对位快,岸边装卸桥只需将集装箱卸在码头前沿,

无需准确对位，跨运车自行抓取运走，充分发挥岸边集装箱装卸桥的效率。

(3) 既能搬运又能堆码，减少作业环节，作业效率高。

(4) 相对于底盘车系统，由于可堆 2~3 层集装箱，场地利用较好，所需场地面积小。

跨运车系统的主要缺点

(1) 机械结构复杂，液压部件多，易损坏漏油，维修保养比较困难，要求维修人员有较高的技术水平。

(2) 初始投资大，堆场建造费用高。

(3) 对司机操作技术水平要求高，司机对位不准易造成集装箱损坏。

(4) 因货主取箱是任意的，所以堆场中常常进行倒垛，集装箱出场不如底盘车系统那样方便灵活。

该系统适用于进口重箱量大、出口重箱量小的集装箱码头。

### 2.3.3 轮胎式龙门起重机系统(Rubber Tire Gantry Crane System)

轮胎式龙门起重机系统的码头前沿采用岸边集装箱装卸桥承担船舶的装卸作业，轮胎式龙门起重机承担码头堆场的装卸和堆码作业，从码头前沿至堆场、堆场内箱区间的水平运输由集卡完成。轮胎式龙门起重机一般可跨 6 列和 1 列集卡车道，堆高为 3 至 5 层集装箱。轮胎式龙门起重机设有转向装置，能从一个箱区移至另一个箱区进行作业。轮胎式龙门起重机系统适用于陆地面积较小的码头。我国大部分集装箱码头采用这种工艺系统。

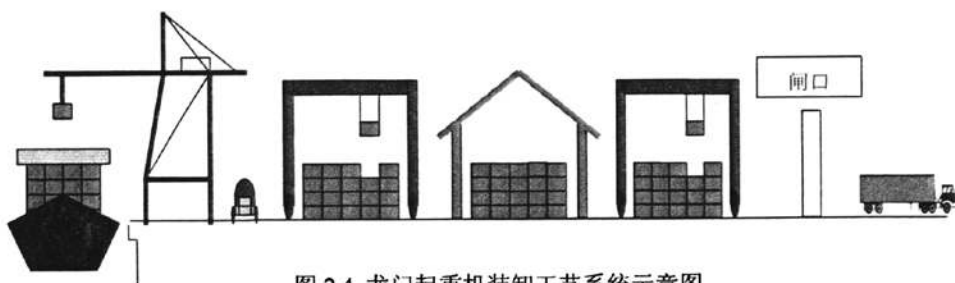


图 2.4 龙门起重机装卸工艺系统示意图

Fig.2.4 Illustration for Rubber Tire Gantry Crane System

轮胎式龙门起重机系统优点有：

(1) 可有效利用堆场，减少堆场建设费用。

- (2) 设备操作简单,对工人只需中等技术水平的训练。
- (3) 相对于跨运车系统,对集装箱损坏的机会少
- (4) 采用90度转向和定轴转向,占用通道面积小;不受轨道限制,可从一个堆区转移到另一个堆区。
- (5) 可采用直线行走自动控制装置实现行走轨迹自动控制,与计算机系统相连接,易于实现堆场作业自动化。

轮胎式龙门起重机系统缺点是:

- (1) 相对于跨运车系统灵活性不够,一次只能固定在一个堆区作业,转移到另一个堆区需要较长时间。
- (2) 跨距大,箱位多,堆垛高,提取集装箱困难,有时还需倒垛。
- (3) 需配集装箱半挂车承担集装箱水平运输,增加了作业环节,组织作业较为复杂。
- (4) 初始投资高。

这种系统适用于码头陆域面积较小而水-水中转量较大的码头。

#### 2.3.4 轨道式龙门起重机系统(Rail Mounted Gantry Crane System)

轨道式龙门起重机系统与轮胎式龙门起重机系统相比,堆场机械的跨距更大,堆高能力更强。轨道式龙门起重机可堆积4~5层集装箱,可跨14列甚至更多列集装箱。轨道式龙门起重机系统适用于场地面积有限,集装箱吞吐量较大的水陆联运码头。

轨道式龙门起重机系统优点主要有:

- (1) 堆场利用率高。
- (2) 机械结构相对简单,容易维修,作业可靠。
- (3) 机械为电力驱动,节省能源,减少污染。
- (4) 机械沿轨道运行,可采用计算机控制,易于实现堆场作业的自动化。

轨道式龙门起重机系统缺点在于:

- (1) 机动性差,轨道式龙门起重机只能沿轨道运行,作业范围受到限制。
- (2) 轨道式龙门起重机跨距大,提取集装箱、倒箱困难。
- (3) 初始投资大,且受电力供应影响。



这种系统适用于场地面积有限，集装箱吞吐量较大的水陆联运码头。

### 2.3.5 叉车系统(Forklift System)

码头前沿采用岸边集装箱起重机装卸，码头前沿与货场之间水平运输和货场集装箱的堆码与装卸车作业由叉车承担。

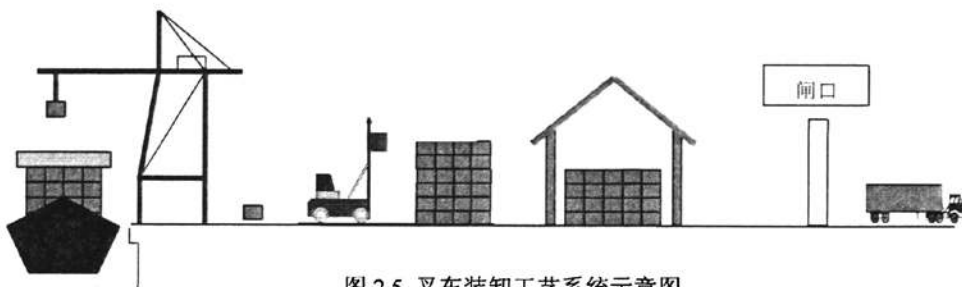


图 2.5 叉车装卸工艺系统示意图

Fig.2.5 Illustration for Forklift System

叉车系统优点主要有：

- (1) 通用性强，可适用于多种作业，机械在寿命期内得到充分利用。
- (2) 使用普遍，司机和维修人员容易培训，存在的技术问题较少。
- (3) 叉车价格便宜，初始投资小，装卸成本低。

叉车系统缺点在于：

- (1) 单机效率低，不适用于吞吐量大的码头。
- (2) 叉车轮胎载荷不均，轮压大，对路面磨损严重，增加场地建造成本。
- (3) 需要的通道宽，场地利用率较低。
- (4) 装卸作业时对箱位较困难。

这种系统主要适用于吞吐量较小的小型集装箱码头。

### 2.3.6 正面吊运机系统 (Reack Stacker System)

码头前沿采用岸边集装箱起重机装卸船舶作业，码头前沿与堆场之间水平运输和堆码集装箱的堆码与装卸车作业由正面吊运机承担。

正面吊运机系统优点是：

- (1) 可完成搬运、堆码、装卸车作业，减少码头机械配备，便于机械的维

修保养。

(2) 可跨箱作业，一般吊装 4 层箱高，有的可达到 5 层箱高，相对叉车系统场地利用率高。

(3) 可一机多用，作业灵活，减少箱损、货损。

这个系统地缺点有：

(1) 只能跨 1~2 箱作业，因而要求箱区小，通道多，且正面吊运机吊运集装箱时，一般箱体与吊运机垂直，因而需要较宽的通道，相对龙门起重机系统场地利用率低。

(2) 正面吊运机一机完成多种作业，单机效率低，需配备的机械台数多，系统初始投资大。

(3) 正面吊运机吊运集装箱行走时，载荷重心后移，造成转向轮轮压大，与路面磨损严重。

正面吊运机系统应用得尚不广泛，仅在集装箱吞吐量较小的码头上有所应用。

### 2.3.7 跨运车—龙门吊混合系统(Straddle-Gantry Crane System)

从经济性和装卸性能的观点来看，前四项工艺系统方案各有利弊，目前世界上有些港口采用了前述工艺方案的混合系统，跨运车—龙门吊混合系统，其主要特点是：

(1) 船边的装卸由岸边集装箱装卸桥承担；

(2) 进口集装箱的水平运输、堆码和交货装车由跨运车负责完成；

(3) 出口箱的货场与码头前沿之间的水平运输由集装箱半挂车完成，货场的装卸和堆码由轨道式龙门起重机完成。由于混合系统能充分发挥各种机械的特点，扬长避短，更加趋于合理和完善，目前世界上已有不少码头采用了这种方案。

香港的现代货箱码头公司的集装箱码头、东京的 OHI3/5 码头以及安特卫普的基尔森码头等也改造成组合系统。

这种组合系统能最充分地发挥每一类型系统的优点，克服其缺点，扬长避短，使系统更加合理和完善。

### 2.3.8 各种工艺系统技术经济比较

各种装卸工艺系统各有利弊，各指标的比较性能如下表所示：

表 2.1 各装卸工艺系统经济技术比较表

Table 2.1 Comparison Between Various of Handling Systems

装卸工艺系统 比较性	底盘车系统	跨运车系统	轮胎式龙门起重机	轨道式龙门起重机	叉车系统	正面吊运机系统	组合系统
储存能力	差	好	优	优	中	好	优
投资费用	差	好	好	好	优	好	优
工艺简单性	优	好	差	差	优	优	中
装卸效率	优	好	好	好	差	中	优
机动性	优	好	差	差	好	优	中
减轻集装箱损坏	优	差	好	好	好	好	好
降低维修成本	好	差	好	优	好	好	中
可扩张性	优	好	差	差	好	好	好
自动化适应性	差	差	好	优	差	差	好
与铁路接运	差	差	好	优	中	好	好

由表 2.1 可知，综合考虑各方面利弊，龙门起重机系统是最优的，特别是对中国的港口来说，场地大，堆量多，自动化水平不高，扩张可能性也不大情况下，龙门起重机系统发挥了重要作用，事实上，目前在中国港口普遍采用的就是轨道式/轮胎式龙门起重机系统，这是符合理论依据的。

那么本文的泊位生产运作流程分析研究也就是基于龙门吊系统进行研究的，符合现实状况，模型的创建也是紧扣这一装卸工艺系统进行设置求解。

## 2.4 码头堆场作业计划的原则

### 2.4.1 堆场的分类

(1) 重箱区：重箱区是专门堆存集装箱重箱的区域，约占堆场区总面积的 50%-80%。在堆场内用白线或黄线画“箱位”并为其编号，一般单号放置 20 尺柜，

双号放置 40 尺柜，箱间距约 0.3 m。集装箱在场地上的排列方式为“并排方式”，六排为一箱位，堆场内作业通道 13-15 m。堆场区可以按目的地、进口或出口、重量等级，有时还可按航线或疏运安排，分门别类地堆放。重箱一般堆 4 层高。堆场中集装箱箱位布置要考虑到集装箱的方向性，一般装船时箱门均向船尾，集卡运输时也是箱门朝后。

(2) 空箱区：约占堆场区总面积的 40%-60%，甚至只有 20%-30%。空箱堆场的位置通常设在集装箱货运站旁边或维修车间的附近，也有的沿堆场四周布置，视堆场业务情况而定。空箱一般堆高 5-6 层。

(3) 冷藏箱区：冷藏箱堆场区应布置在重箱区内，占重箱区的面积的 1.5%-3.5%。冷藏集装箱在运输、存储过程中需要供电，故冷藏箱区也应布置在接近供电设施处，每两排冷藏集装箱间应设专用的电源插座箱和检查平台。冷藏箱的堆高一般为 2-4 层。

(4) 拆箱库：港口从生产需要考虑，应具备一定的拆装箱能力，一般拆装箱所占重箱比例为 5%-15%。拆箱库是集装箱码头的重要组成部分，必须要有合理的布局。拆箱库的位置要尽量减少与堆场内集装箱运输的干扰，尽可能减少叉车作业距离，通常布置成矩形。

(5) 停车场：停放集卡的地方。

(6) 集装箱空箱堆场是专门办理空箱收集、保管、堆存或交接的场地。这种堆场不办理重箱或货物交接。它可以单独经营，也可以由集装箱装卸区在区外另设。有些国家对集装箱堆场并不分前方堆场或后方堆场，而统称为堆场。

### 2.4.2 码头堆场作业计划的原则

为了利于配载计划配载船舶，集装箱码头和航运企业签订操作协议，规定在船舶抵港前的固定时间段内允许车队进港送箱。对于超过规定时间到达的集装箱码头需要加收加载费，比规定时间提前到达的集装箱码头要收取市入费。码头堆场计划员将在规定时间内入港的集装箱集中安排在出口堆场。虽然堆场计划员依据集装箱的不同属性（如集装箱尺寸、重量、目的港等）预先对集装箱出口堆场进行规划，但由于集装箱货物抵港时间的不确定性和集装箱船舶配载的分散性。理想的解决办法是通过等待全部集装箱到达后重新分配位置来产生完全符合配载

要求的集装箱堆场的方法，由于堆场面积有限和时间上的要求，一般码头计划员为争取堆存效率，会将数量较多的相同属性的集装箱分散放置于堆场中的不同位置，配载计划员在配载时要充分考虑集装箱在堆场的位置，以保证能实现高效的装船，减少船舶的在港的作业时间。集装箱码头出口收箱通常遵循以下的原则：

- (1) 20 尺箱和 40 尺箱分开堆码；
- (2) 冷藏箱、危险品箱、大件箱单独堆码；
- (3) 空箱、重箱分开堆码；
- (4) 同一目的港的集装箱集中堆码；
- (5) 同一重量等级单独堆码；
- (6) 避免同时期操作的船舶争堆场；
- (7) 桥位就近原则，岸桥要就近放置到码放位置。

## 2.5 码头装卸船作业的原则

集装箱码头在装卸船的过程中应该遵循以下的原则：

(1) 同一贝位上要先卸后装。该原则是装卸工艺的要求的作业原则，如果正在作业的贝位有待卸的集装箱就进行装船作业，就会出现计划卸船的集装箱被装船箱压在下面。

(2) 卸船时要遵循的顺序是：从甲板后至舱内，从路侧至海侧；装船时要遵循的顺序是：从舱内后至甲板，从海侧至陆侧；

(3) 参与装卸船作业的岸桥要保证至少一个 40 尺大贝的距离。

(4) 岸桥的作业位置只能向同一方向依次进行，不能出现作业位置交叉。例如如果船舶是左舷靠泊，岸桥号码从船头至船尾依次增大。如果 Q01 在 bay22 作业，则 Q02 就不能到 bay22 以前的位置作业。

## 2.6 集装箱码头的基本流程介绍

集装箱码头的主要业务流程分为进口流程和出口流程，进口流程的具体操作流程是：

- (1) 船公司或者代理在每月末向港口计划员发送每月船期安排预报和计划

靠泊的船舶资料等基本信息；

(2) 码头船舶计划员据此编制码头船期表并制定各船舶出口箱的的入港时间；

(3) 每条船舶靠泊前，船代或者船公司通过数据交换中心向港口发送泊位申请，电子入港清单和清洁清单的基本信息，计划员据此制定泊位计划和堆场首相计划；

(4) 箱及港时，大门人员负责核对箱体是否完好，如果完好无损，打印操作条，分配出口箱场内位置；

(5) 出口箱落地后，单证计划员核对出口箱单证手续，配载计划员待单证计划员核对好手续后按照预配配载船舶，打印船图并向中控发送电子指令；

(6) 中控接到电子指令和装船船图后，按照计划要求进行相关人员进行作业；

具体的业务流程见图 2.6

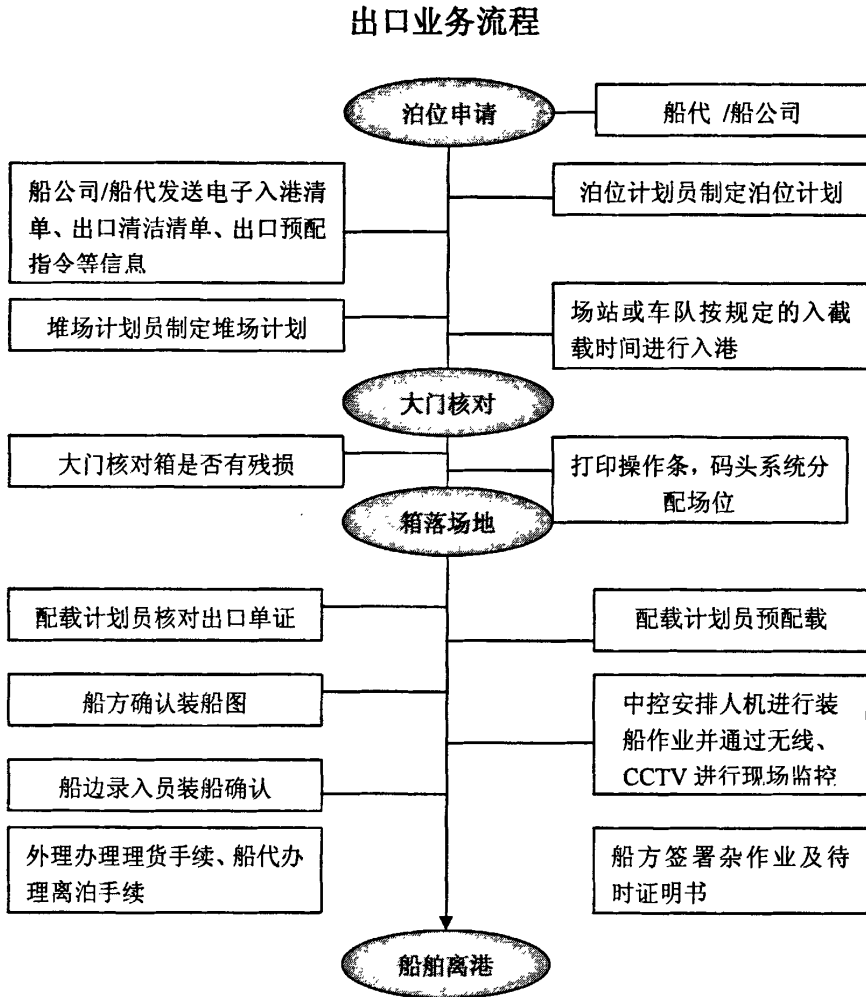


图 2.6 集装箱码头出口业务流程

Fig.2.6 Process of Export of Container Terminal

进口的具体业务流程是：

- (1) 船代或者船公司通过信息交换平台向码头发送泊位申请；
- (2) 船代或者船公司向码头进口电子舱单和弟子船图；
- (3) 配载计划员制定卸船计划，堆场计划员据此制定堆场落箱计划；
- (4) 船舶靠泊前，泊位计划负责安排好港监拖轮引水，保证船舶准时靠泊；
- (5) 中控根据卸船计划组织人员进行卸船；

(6) 进口箱落地后，货主结清码头费用后可以安排提箱；

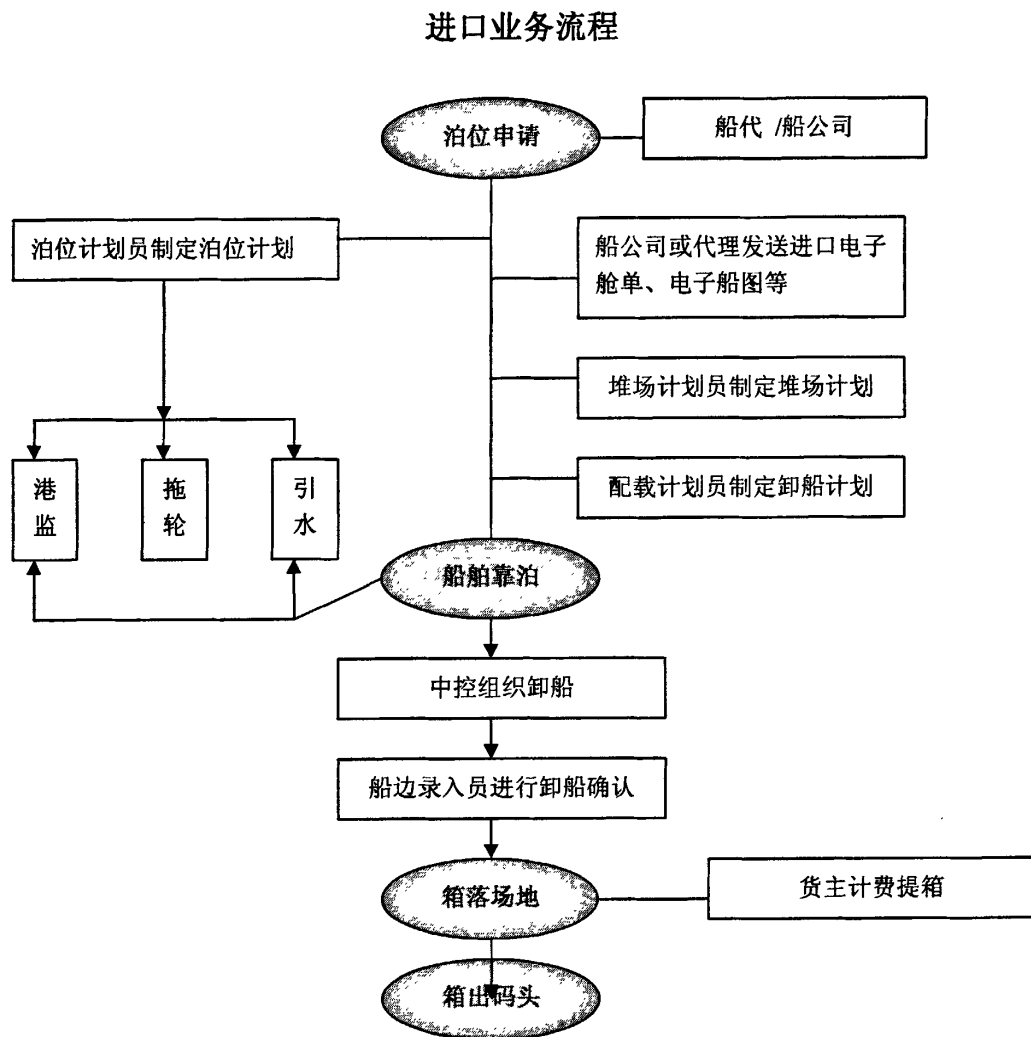


图 2.7 集装箱码头进口业务流程

Fig.2.7 Process of Import of Container Terminal



2.7 集装箱泊位生产运作分析

2.7.1 泊位生产运作流程描述

(1) 单泊位船舶生产作业流程描述

集装箱码头的泊位生产作业，是指港口以船舶为单位，以作业头为单元，根据船舶在港时间的要求，组织船舶装卸、水平搬运和堆场堆码等操作环节的实施过程。这些操作环节过程的具体描述如下：卸船作业时，装卸岸桥通过吊上/吊下将集装箱从船舱内卸到岸边的集卡车上、集卡车通过水平搬运将集装箱运至码头堆场、堆场门吊将集装箱从集卡车上卸下按堆码要求进行堆码摆放；装船作业时，上述操作环节连接的方式正好与卸船是相反（如图 2.8，2.9 所示）。

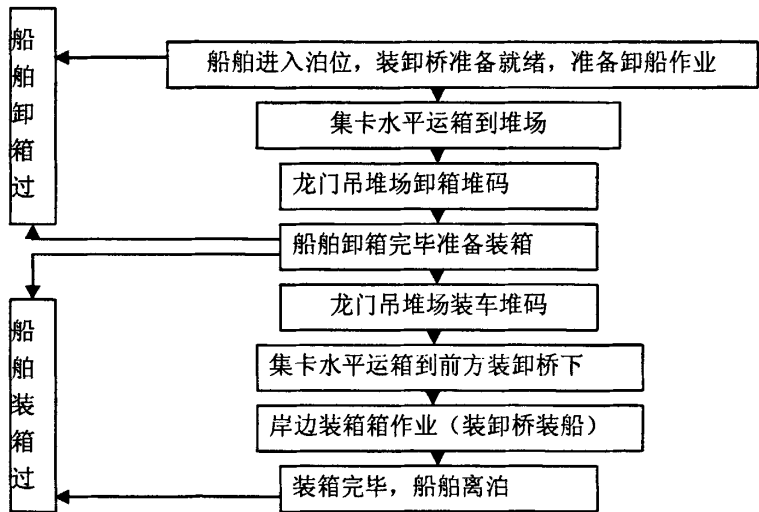


图 2.8 单泊位船舶的生产作业流程示意图

Fig.2.8 Illustration for Operation Process of One Berth

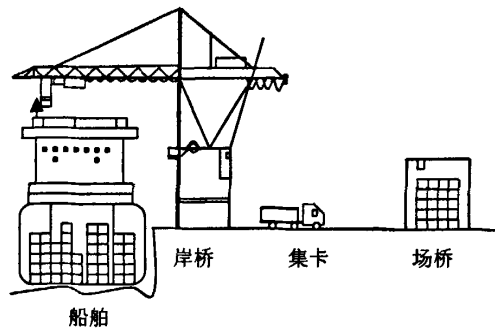


图 2.9 泊位生产运作流程示意图

Fig.2.9 Illustration for Berth Production Operation

(2) 多泊位集装箱生产运作流程

单泊位生产运作比较简单，只要将进口箱卸下然后再装上出口箱就可以了。但是在多泊位情况下，根据第一章的独立作业和联合作业概念，为了提高集卡的利用效率我们通常要求集卡进行联合作业，即使这样复杂了泊位的生产作业的管理。一旦在昼夜 24 小时作业时间段内有时段两泊位处于一装一卸阶段，就可以实施集卡的联合作业。

根据船舶在港通常是在同一泊位完成装卸任务的特点，集装箱码头的生产作业可分为卸船生产作业和装船生产作业两个阶段。对于目前港口普遍采用的“装卸岸桥—搬运集卡—堆场门吊”式的装卸工艺系统，由于出口待装集装箱堆放的堆场距离泊位较近，而进口堆放集装箱堆放的堆场距离泊位较远的特点，每一个作业头内装卸岸桥、搬运集卡和堆场门吊的数量在装卸作业过程中的合理配置将会受到诸多要素的影响。如：装卸岸桥的机械运行速度、连续工作时间要求、岸桥司机的操作水平、堆场与作业堆场的距离、搬运集卡在港区内的行驶速度限制、堆场门吊的机械运行速度和司机的操作技术水平、以及各类设备的投资成本和使用年限等等，都将在不同程度上对各类设备的合理配置产生影响。

由于在集装箱码头泊位生产作业的整个过程中主要是装卸岸桥、搬运集卡、堆场门吊和技术人员生产运作和组织，因此泊位生产运作的成本，除了港口设施的投资折旧和管理成本的分摊外，主要包含了这些设备和人员的配置使用费用。由此影响这些设备合理配置的要素也就自然成为了影响泊位生产运作成本的相关影响因素。在这些影响因素中，由于设备的投资成本较大，一些设备的闲置使用

将会对泊位生产运作成本产生较大的影响，如：装卸岸桥和堆场门吊。因此，保证大型设备的满负荷运行就成为了降低泊位生产运作成本的基本要求。而实现这一基本要求必然会带来提高效率、缩短船舶在港时间的港口与航运企业共盼的和谐效应。但集卡也并不是越多越好，过多的集卡会是道路拥挤，反而会降低集卡的使用效率，所以在保证大型设备（如装卸桥）正常工作情况下，集卡充分利用才是泊位生产的优化目标。

### 2.7.2 泊位生产运作主要影响因素分析

根据泊位生产运作的流程描述，可以知道影响泊位生产效率的主要因素有泊位调度计划，船舶装卸箱量以及靠离泊时间，这些都属于泊位生产作业计划范畴，如图 2.10 所示，船舶装卸量以及靠离泊时间影响了泊位开头数，而开头每个装卸桥的作业效率、桥吊到各分散堆区路径距离、各堆区作业箱量和作业计划的集卡作业模式影响集卡的路径选择，路径选择的结果和集卡的运行速度、场桥的装卸效率导致每条路径上配备的集卡和场桥配置量不同，这些因素之间相互影响，相互作用，最终我们需要知道的结果是如何根据各个影响因素之间的关系在众多路径中选择最优路径和路径上运输的最佳箱量，每条路径配置怎样的集卡和场桥数量才是最合适的，即既足够又不多余。这就是本文下章所要解决的关键问题。

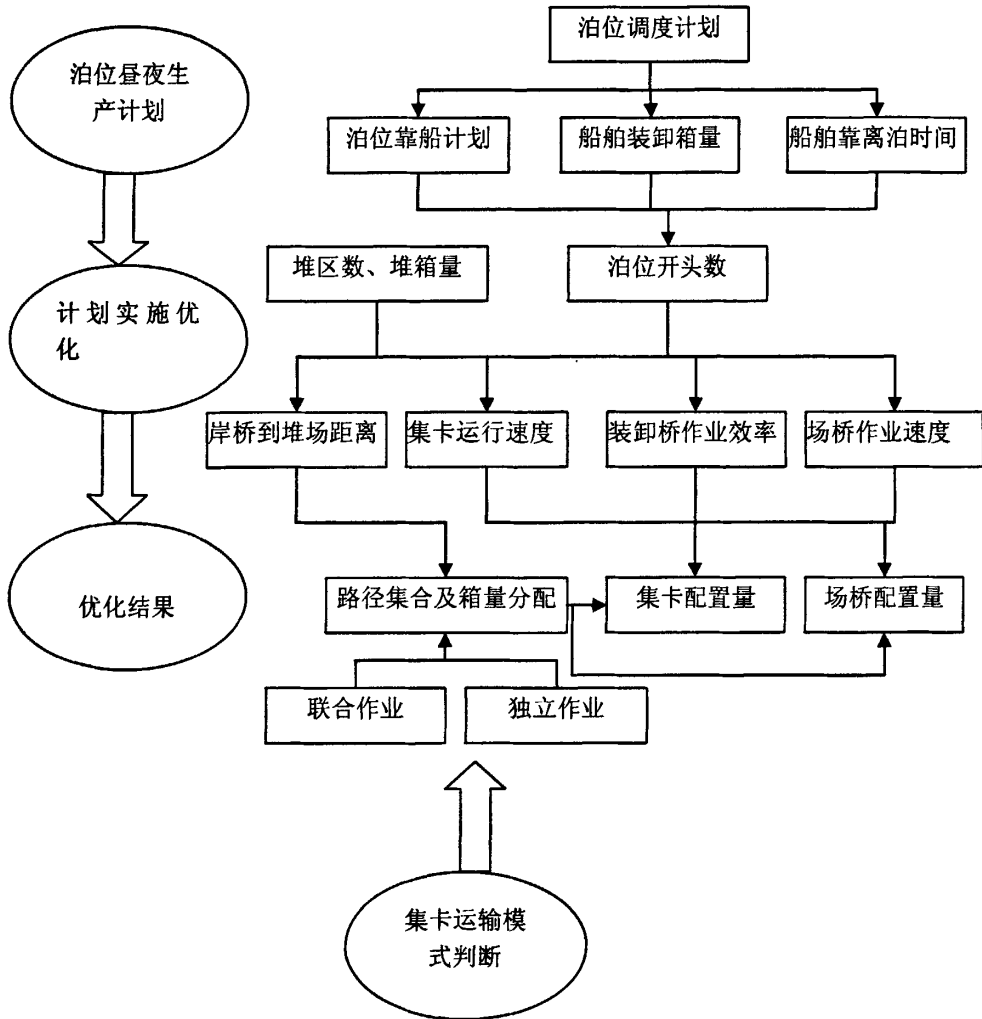


图 2.10 泊位生产运作影响因素分析图

Fig.2.10 Factors Analysis of Berth Production Operation

## 2.8 本章小结

本章介绍了集装箱码头的组成和空间布局，分析介绍了目前集装箱码头堆场的装卸工艺和设备使用资源，阐述了集装箱堆场计划的原则。介绍了集装箱码头的主要装卸机械以及码头的进出口的作业流程。通过对集装箱码头的基本介绍和泊位生产流程的影响因素分析，为集装箱码头泊位生产运作优化问题提供基础。

### 第3章 集装箱码头泊位生产运作优化建模

#### 3.1 问题描述

对于集装箱码头实际操作来说，泊位生产的一天计划都是事先排好的，本文假设中控室从 00:00——24:00，船舶靠泊计划已经安排妥当，如图 3.1 所示，左边部分为泊位装卸对应堆场布局简图，装箱堆场 1-11 分别对应泊位 A 和泊位 B 待装箱子的堆区分布，卸箱堆场 1-7 号分别对应泊位 A 和泊位 B 待卸箱子的堆场分布，可见堆场内各堆区位置相对分散，对于集装箱卡车的行走路径距离也就不会大致相当了；右图为泊位船舶靠泊装卸计划时间简图，集装箱船舶到达泊位时间在船舶动态中会事先预知，中控室每天都需要根据船舶大致到港时间给泊位安排靠泊时间与靠泊顺序，集装箱船舶装卸速度是有保障的，中控室也会给每艘船舶预留一定的时间浮动空间，可以保障泊位的有效利用以及船舶的正常靠离港。对于泊位 A 和泊位 B 来说，有些时间重叠范围内泊位 A 在卸而泊位 B 在装，这样集装箱卡车就可以进行联合作业，将泊位 A 卸下的箱子运到卸箱堆场后再赶往装箱堆场取箱子运到泊位 B 装船，然后赶往泊位 A 继续卸箱；或者是某个时间范围内泊位 A 在装而泊位 B 在卸箱，那么集卡就可以从 B 取下箱子运到卸箱堆场卸下箱子然后赶往装箱堆场取箱并运到泊位 A 进行装箱，相比较集卡的只装只卸的独立作业来说，这种联合作业避免了集卡的空返，提高了集卡的重载率，但将管理难度加大，这样的联合作业势必要管理谨慎，箱子存取位置准确，否则很容易将箱子存取搞错，增加后续工作困难，而在计算机信息系统日渐成熟的今天，这种运输也将逐渐尝试使用。

集卡在各个堆场间的运行路线确定之后，接下来就需要为这些路径的集合确定路径上必要的集卡和场桥数量，以保证岸桥的正常作业，装卸计划的顺利实施。

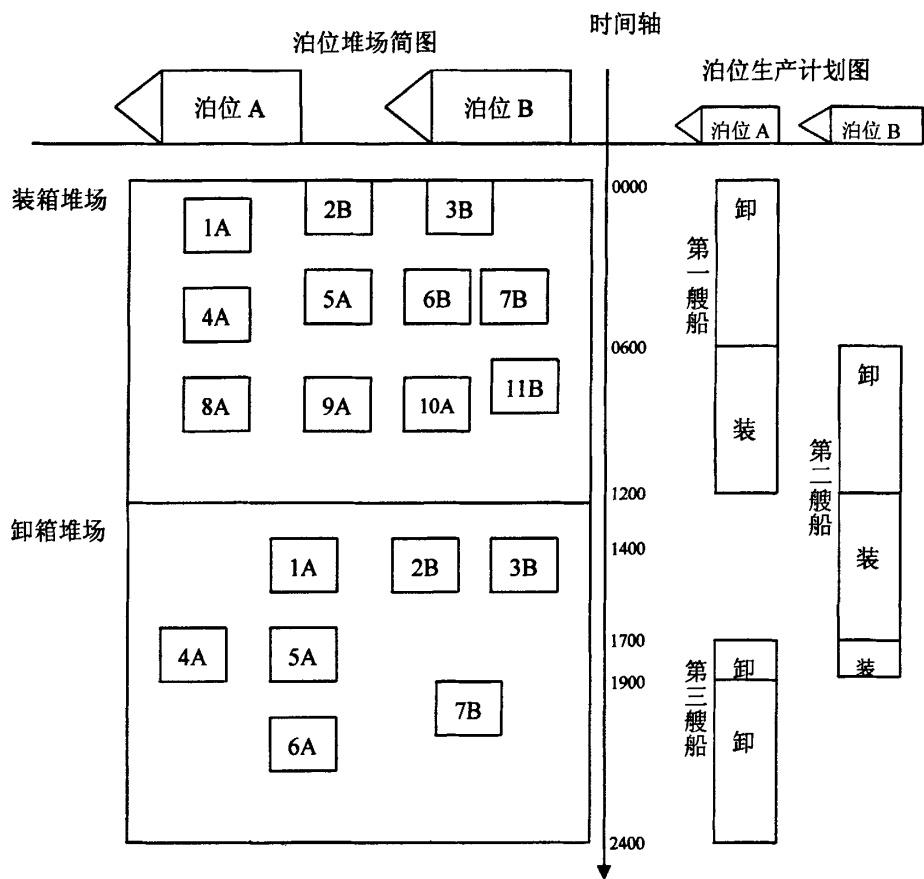


图 3.1 集装箱码头泊位生产运作计划简图

Fig.3.1 Simple Schedule Diagram of Container Berthes

两个泊位的堆区路线平面图如下：

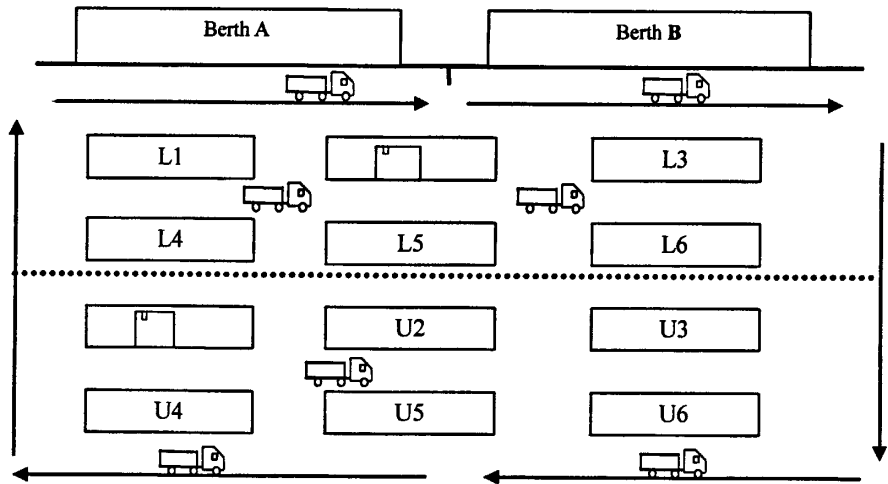


图 3.2 码头泊位堆区平面图

Fig.3.2 Ichnography of Terminal Yards

说明：箭头围起来的部分是堆场，L 代表装箱堆场，标记为 L1, L2,... Ln 号出口箱堆区  
U 代表卸箱堆场，标记为 U1, U2,..., Un 号进口箱堆区。

多泊位堆场分布图如下：

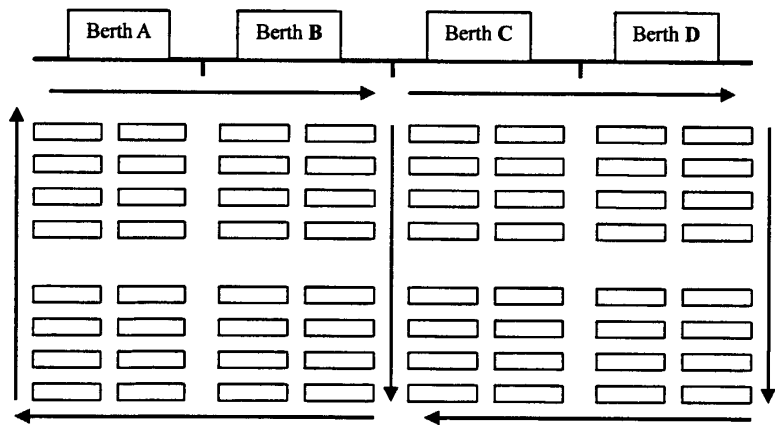


图 3.3 多泊位堆区布局图

Fig.3.3 Layout of Multi-Berth Yards

	A 泊位	B 泊位
00:00		
	卸 140	
02:20	装 430	
		卸 645
09:30		
		卸 120
10:50	卸 200	卸 150
12:30		
	卸 590	装 442
17:25	装 630	装 473
22:40		
	装 160	
24:00		

图 3.4 码头作业昼夜靠泊时间进度计划

Fig.3.4 Day and Night Berthing Schedule of Terminal Operation

时间轴定义如图 3.4 所示,按照两泊位装卸特点将昼夜分为多个时间段进行作业计划。

时间段说明:以第一个时间段为例,00:00-02:20 泊位 A 上继续卸完前一天靠泊船舶未卸完的箱子,从 02:20 开始,泊位 B 靠了第二艘船舶,同时泊位 A 卸完进口箱开始实施出口箱的装船作业,后续时间段意思以此类推。时间段内的数字代表时间段内需要装卸的集装箱数量。

## 3.2 泊位生产运作优化建模

### 3.2.1 泊位集卡装卸的路径优化模型

由上面的问题描述我们知道了一天的泊位生产计划,也将昼夜计划根据泊位装卸情况分为了很多个时间段,时间段的运输方式主要由独立装箱运输作业、独立卸箱作业、联合作业作业组成。

模型一:集卡独立作业模型:

(1) 假设:集卡一次只装卸一个 TEU,从某个岸桥到某个箱区的距离等于从这个箱区回到此岸桥的距离,泊位 A 指代独立作业泊位的独立卸船运输泊位,泊位



B 指代独立作业泊位的独立装船运输泊位。

(2) 参数说明:

$T_{ij}^k$ ——第  $k$  个时间段, 从时点  $i$  到点  $j$ , 根据集卡装卸时间段划分

$D_{ij}$ ——从第  $i$  号桥吊到第  $j$  号堆场的距离, 这里假设从第  $j$  号堆区回到第  $i$  号桥吊的距离也为  $D_{ij}$ , 即独立作业重载和空载距离相同

$Q_U^A$ ——第  $k$  个时间段内泊位 A 需要卸载的集装箱量

$Q_L^A$ ——第  $k$  个时间段内泊位 A 需要装载的集装箱量

$q_i^A$ ——泊位 A 上的第  $i$  个桥吊

$n_q^A$ ——第  $k$  个时间段内泊位 A 的开头数

$n_q^B$ ——第  $k$  个时间段内泊位 B 的开头数

$U_j$ ——第  $j$  个卸箱堆区堆箱数量

$n_U$ ——卸箱堆区数量

$L_k$ ——第  $k$  个装箱堆区堆箱数量

$n_L$ ——装箱堆区数量

$f$ ——函数目标

(3) 决策变量:

$X_{ij}$ ——第  $i$  号桥吊到第  $j$  卸箱堆区的集卡行走次数

(4) 模型表达式

$$\text{OBJ: } f = \min \sum_{i=1}^{n_q^A} \sum_{j=1}^{n_U} 2D_{ij} X_{ij} \quad (3.1)$$

$$\text{or } f = \min \sum_{i=1}^{n_q^B} \sum_{j=1}^{n_L} 2D_{ij} X_{ij} \quad (3.2)$$

S.T.

$$\sum_{i=1}^{n_q^A} \sum_{j=1}^{n_U} X_{ij} = \sum_{j=1}^{n_U} U_j = Q_U^A \quad (3.3)$$

$$\text{or } \sum_{i=1}^{n_q^B} \sum_{j=1}^{n_L} X_{ij} = \sum_{j=1}^{n_L} L_j = Q_L^B \quad (3.4)$$

$$\sum_{j=1}^{n_U} X_{ij} = \frac{Q_U^A}{n_q^A} \quad i = 1, 2, \dots, n_q^A \quad (3.5)$$

$$\text{or} \quad \sum_{j=1}^{n_L} X_{ij} = \frac{Q_L^B}{n_q^B} \quad i = 1, 2, \dots, n_q^B \quad (3.6)$$

$$\sum_{i=1}^{n_q^A} X_{ij} = U_j \quad j = 1, 2, \dots, n_U \quad (3.7)$$

$$\text{or} \quad \sum_{i=1}^{n_q^B} X_{ij} = L_j \quad j = 1, 2, \dots, n_L \quad (3.8)$$

$$X_{ij} \geq 0, \text{且为整数} \quad (3.9)$$

目标函数 (3.1) (3.2) 是单独卸和单独装独立作业下, 最小化集卡运行总距离。约束条件 (3.3) (3.4) 分别保证所有待卸和待装箱子都作业完; 约束 (3.5) (3.6) 表示每个岸桥的作业量相等; 约束 (3.7) (3.8) 分别表示每个卸箱堆区和装箱堆区的箱量要求符合生产计划要求; 约束 (3.9) 为变量取整约束。

首先要判断的是时间段内集卡的独立作业和联合作业, 独立作业情况下, 且是卸箱作业阶段, 我们应该使用泊位 A 的独立卸箱作业模型, 即使用公式 (3.1) (3.3) (3.5) (3.7) (3.9); 同理, 装箱作业阶段, 我们应该使用泊位 B 的独立卸箱作业模型, 即使用公式 (3.2) (3.4) (3.6) (3.8) (3.9)。

#### 模型二: 集卡联合作业模型

联合作业是指在两个泊位中有一个泊位在卸船, 同时另一个泊位在装船, 这样集卡可以在从卸船泊位将集装箱卸到卸箱堆区以后运行至装箱堆区装箱重载到装船泊位, 这样提高了集卡的重载率, 使得集卡运行效率提高。

如图 3.1 的靠泊计划 02:20-09:30 时间段, 其中泊位 A 中在装船, 同时泊位 B 在进行卸船, 这样集卡就可以实施联合作业计划了, 即集卡首先将泊位 B 上卸下的箱子运送到卸箱堆区, 在行驶至装箱堆区装上出口箱运行到泊位 A 实施装箱作业。因为泊位 A 的作业头数是 2, 泊位 B 的开头数是 3, 所以这段时间内装卸量是不同的, 泊位 B 的作业量大于泊位 A, 说明泊位 B 中同时有简单运输情况。

#### 模型如下:

(1) 模型假设从各岸桥到箱区的距离等于从箱区回到此岸桥的距离; 泊位 B

代表联合作业的卸船操作泊位，泊位 A 代表联合作业的装船操作泊位。泊位 A 和泊位 B 直接的距离为定值。

(2) 参数说明：

$D_{ijkl}$ ——从 i 号岸桥到 j 号箱区到 i 号箱区再到 l 号岸桥的联合距离

$Q_A^L$ ——A 泊位船舶装箱量

$Q_B^U$ ——B 泊位船舶卸箱量

$X_{ijkl}$ ——集卡从泊位 B 的第 i 个岸桥到第 j 号卸箱堆区然后到第 k 号装箱堆区最后运行到泊位 A 的第 l 号桥吊的联合作业次数，即经过联合作业运输的箱量。

$Y_{ij}$ ——从第 i 号岸桥到第 j 号堆区的独立行走次数，即从 i 到 j 的独立作业箱量

$Z_{kl}$ ——从第 l 号岸桥到第 k 号堆区的独立行走次数，即从 k 到 l 的独立作业箱量

(即： $X_{ijkl}$ 为联合作业的次数， $Y_{ij}$ 为从卸船岸桥到卸箱堆区独立作业次数， $Z_{kl}$ 为从装箱堆区到装船岸桥独立作业次数，同一个联合作业时间段内 Y 和 Z 不会同时存在)

$n_q^A, n_q^B$ ——A, B 泊位船舶开的岸桥头数；

$U_j, L_k$ ——第 j 个卸箱堆区和第 k 个装箱堆区的堆存量；

$n_U, n_L$ ——卸箱堆区和装箱堆区的数量

目标函数 Obj:

$$f = \min \sum_{i=1}^{n_q^B} \sum_{j=1}^{n_{Uj}} \sum_{k=1}^{n_L} \sum_{l=1}^{n_q^A} (D_{ijkl} + d) X_{ijkl} + \sum_{i=1}^{n_q^B} \sum_{j=1}^{n_{Uj}} 2D_{ij} Y_{ij} + \sum_{k=1}^{n_L} \sum_{l=1}^{n_q^A} 2D_{kl} Z_{kl} \quad (3.10)$$

约束条件 S.t.

$$\sum_{i=1}^{n_q^B} \sum_{j=1}^{n_{Uj}} \sum_{k=1}^{n_L} \sum_{l=1}^{n_q^A} X_{ijkl} + \sum_{i=1}^{n_q^B} \sum_{j=1}^{n_{Uj}} Y_{ij} = \sum_{j=1}^{n_U} U_j = Q_B^U \quad (3.11)$$

$$\sum_{i=1}^{n_q^B} \sum_{j=1}^{n_{Uj}} \sum_{k=1}^{n_L} \sum_{l=1}^{n_q^A} X_{ijkl} + \sum_{k=1}^{n_L} \sum_{l=1}^{n_q^A} Z_{kl} = \sum_{k=1}^{n_L} U_k = Q_A^L \quad (3.12)$$

$$\sum_{i=1}^{n_q^B} \sum_{j=1}^{n_U} \sum_{k=1}^{n_L} \sum_{l=1}^{n_q^A} X_{ijkl} = \min\{Q_A^L, Q_B^U\} \quad (3.13)$$

$$\sum_{i=1}^{n_q^B} \sum_{j=1}^{n_U} Y_{ij} = \max\{Q_B^U - Q_A^L, 0\} \quad (3.14)$$

$$\sum_{k=1}^{n_L} \sum_{l=1}^{n_q^A} Z_{kl} = \max\{Q_A^L - Q_B^U, 0\} \quad (3.15)$$

$$\sum_{j=1}^{n_U} \sum_{k=1}^{n_L} \sum_{l=1}^{n_q^A} X_{ijkl} + \sum_{j=1}^{n_U} Y_{ij} = \frac{Q_B^U}{n_q^B} \quad i = 1, 2, \dots, n_q^B \quad (3.16)$$

$$\sum_{i=1}^{n_q^B} \sum_{j=1}^{n_U} \sum_{k=1}^{n_L} X_{ijkl} + \sum_{k=1}^{n_L} Z_{kl} = \frac{Q_A^L}{n_q^A} \quad l = 1, 2, \dots, n_q^A \quad (3.17)$$

$$\sum_{i=1}^{n_q^B} \sum_{k=1}^{n_L} \sum_{l=1}^{n_q^A} X_{ijkl} + \sum_{l=1}^{n_q^A} Y_{ij} = U_j \quad j = 1, 2, \dots, n_U \quad (3.18)$$

$$\sum_{i=1}^{n_q^B} \sum_{j=1}^{n_U} \sum_{l=1}^{n_q^A} X_{ijkl} + \sum_{l=1}^{n_q^A} Z_{kl} = L_k \quad k = 1, 2, \dots, n_L \quad (3.19)$$

$$X_{ijkl}, Y_{ij}, Z_{kl}, \geq 0 \quad \text{且为整数} \quad (3.20)$$

公式说明:

(3.10.) 目标函数, 集卡总行走距离最短

(3.11.) B 泊位船舶卸箱量等于卸箱堆区的计划堆存总箱数

(3.12.) A 泊位船舶装箱量等于装箱堆区的计划装船总箱数

(3.13.) 联合作业的次数限制, 取两泊位作业箱量较少那部分

(3.14.) 泊位 B 出发的独立作业的次数, 如果泊位 B 卸箱量大于泊位 A 装箱量, 泊位 B 存在多余箱子需要独立卸箱操作

(3.15.) 装箱堆场出发到达装船泊位 A 的独立作业的次数, 如果泊位 A 装箱量大于泊位 B 的卸箱量, 装箱堆场存在多余箱子需要独立装箱操作到泊位 A

(3.16.) 岸桥 1 的作业次数等于岸桥 1 的作业量, 即每个卸载岸桥的作业量相等, 等于泊位上待卸箱子总量除以进行卸箱作业的岸桥数量

(3.17.) 岸桥 i 的作业次数等于岸桥 i 的作业量, 即每个装载泊位的岸桥的作业量相等, 等于泊位上待装箱子总量除以进行装箱作业的岸桥数量

(3.18.) 泊位卸到第 j 个卸箱堆区的箱子数量等于第 j 个卸箱堆区的计划卸

箱数量

(3.19.) 第  $k$  个装箱堆区的计划待装箱量要全部装上船舶

(3.20.) 变量取整约束

### 3.2.2 泊位生产设备配置量模型

集卡的路径优化只是泊位设备生产的一部分，在得出集卡的最优路径后我们就需要考虑，在每个路径上我们需配备多少辆集卡车、多少台场桥才能让各设备使用充分，码头的总体使用设备成本最低呢？

众所周知，泊位的生产设备主要有集装箱装卸桥、集装箱卡车以及码头堆场龙门吊，这些设备之间需使用协调，互相配合，才能让集装箱装卸任务顺利高效完成。目前成本的估计来说装卸桥的使用成本最高，一台新的装卸桥的投资大概在 5000 万元，按 12 年的使用年限，加上人力投资，折成每小时的成本大概在 800 元以上，而一台场桥的成本大致在 600 万元，折成每小时的使用成本大致为 150 元以上，集卡的成本大约 20 万元，折成小时的使用成本约为 50 元，由以上的数据可以看出岸桥的使用成本远远大于集卡的使用成本，那么码头对于岸桥的利用就要充分，保证场桥和集卡的数量配置满足岸桥的装卸效率，保障岸桥不至于因为等待集卡而出现闲置等待时间，这是我们集卡场桥数量配置的核心考虑。

因为船舶集装箱装卸量已知且固定，所以泊位生产的目标应该是尽量让设备使用成本最低，由此我们建立了如下的集装箱码头泊位生产运作设备配置优化模型。

在上节模型中我们可以得出各时间段的集卡各路径行走次数，以及集卡的运行路线集合，我们设为  $R$ ，其中联合作业部分的路径集合我们设为  $R_1$ ，简单运输部分的路径集合我们设为  $R_2$ ，则  $R_1 + R_2 = R$ 。

首先给出模型已知参数：用  $T$  表示船舶的规定在港时间（小时），包括从到港准备装卸到装完箱子离开港口止；

$C_Q$ —表示每台桥吊的单位使用成本，包括市场租金、所耗动力费、设备维护费和人工费用（元/台小时）；

$C_T$ —每辆集卡的单位使用成本，包括市场租金、所耗动力费、设备维护费和人工费用（元/辆小时）；

$C_G$ —每台场桥的单位使用成本，包括市场租金、所耗动力费、设备维护费和人工费用（元/台小时）；

$T_Q$ —装卸桥的单位装卸时间（h/TEU）；

$T_G$ —装卸桥的单位装卸时间（h/TEU）；

$V_T^L$ —集卡的重载平均运行速率（m/s）；

$V_T^E$ —集卡的空载平均运行速率（m/s）；

$D_i^L$ —路径  $i$  上集卡重载运行距离；

$D_i^E$ —路径  $i$  上集卡空载运行距离；

$n_i^x$ —路径  $i$  上需要的集卡数量；

$n_i^y$ —路径  $i$  上需要的场桥数量；

Obj:

$$f = \min C_Q N_Q + \sum_{i \in R} C_T n_i^x + \sum_{i \in R_2} C_G n_i^y + 2 \sum_{i \in R_1} C_G n_i^y \quad (3.21)$$

S.t.

$$T_Q n_i^x \geq \frac{D_i^L}{V_T^L} + \frac{D_i^E}{V_T^E} + 2T_G + T_Q \quad i \in R_1 \quad (3.22)$$

$$T_Q n_i^x \geq \frac{D_i^L}{V_T^L} + \frac{D_i^E}{V_T^E} + T_G \quad i \in R_2 \quad (3.23)$$

$$T_G \frac{n_i^x}{n_i^y} \geq \frac{D_i^L}{V_T^L} + \frac{D_i^E}{V_T^E} + 2T_Q + T_G \quad i \in R_1 \quad (3.24)$$

$$T_G \frac{n_i^x}{n_i^y} \geq \frac{D_i^L}{V_T^L} + \frac{D_i^E}{V_T^E} + T_Q \quad i \in R_2 \quad (3.25)$$

$$T_Q n_i^y \geq T_G \quad i \in R \quad (3.26)$$

$$n_i^x, n_i^y \text{ 均为大于0的整数} \quad (3.27)$$

(3.21.) 目标函数是单位时间设备总使用成本最低。

(3.22.) 联合作业路线下岸桥不能等集卡

(3.23.) 简单运输路线下岸桥也不能等集卡

(3.24.) 联合作业路线下场桥不能等集卡

- (3.25.) 简单运输路线下场桥也不能等集卡
- (3.26.) 场桥的配备要充分满足岸桥的需要
- (3.27.) 变量取整约束

### 3.3 模型的求解

路径优化模型变量较多,较为复杂,但仔细分析我们可以发现,变量之间相互约束,再将各式子稍加整理我们可以看出它是典型的整数规划模型,变量的运行复杂度也并不是属于大型数据范畴,可以借助现行的许多整数规划求解软件进行求解,诸如 Lingo, Matlab, Mathmatics 等,联合作业阶段属于四维变量,式子不容易展开,可以使用程序语言编写模型求解,matlab 的语言编程求解可以借助现行的线性规划函数,比较方便,但 Matlab 里没有供使用的整数规划函数,但可以应用分支定解法求解整数解。

设备配置模型相对简单,可以看出目标函数和约束条件都是整数规划,约束条件稍加整理都是整数线性不等式,我们同样可以借助 Lingo, Matlab 等软件求解。具体实验案例的 Lingo 求解过程在下章进行。笔者同时使用了 Matlab 和 Lingo 进行求解,相比较而言, Lingo 的结果显示比较清晰明显,有利于案例的分析总结,在变量规模不大的情况下,建议使用 Lingo 求解,比较通俗易懂。

### 3.4 本章小结

集装箱码头泊位作业过程是个动态过程,事前的计划安排也尤其重要,对于每个环节都需要严格控制,这样的管理复杂而多变,需要科学数据实施指导,本章在充分分析码头泊位生产作业流程以及影响因素基础上,创建了集卡路径优化模型和泊位设备配置模型,同时将集卡的联合作业也考虑在内,这样可以节省集卡的运行效率,这样在求得集卡的各个路径,以及路径上运载的集装箱之后,应用设备配置模型将各路径上集卡和场桥配备量确定出来,保证码头前沿岸桥效率的充分发挥。

通过分析模型,确定使用求解的方法及计算机软件,为码头泊位安排昼夜作业计划。

第 4 章 实例计算

4.1 已知数据

已知某个码头有两个泊位 A 和 B，某天有 3 艘船舶要挂靠在这两个泊位上，船舶的泊位计划已经安排好，根据船舶到港时间、堆场堆箱情况、船舶装箱情况以及船舶规定在港时间要求等，安排第一艘和第三艘船舶挂靠泊位 A，第二艘船舶挂靠泊位 B。

卸箱堆区 1—7 号位进口箱的卸箱区；装箱堆区 1—11 号位进口箱的装箱提取区。

码头全天的 24 小时计划如下图：

	A 泊位		B 泊位	
00:00				
	卸 140			
02:20		装 430		卸 645
09:30				
			卸 120	
10:50		卸 200		卸 150
12:30				
		卸 590		装 442
17:25				
		装 630		装 473
22:40				
		装 160		
24:00				

图 4.1 昼夜靠泊计划

Fig.4.1 Berthing Schedule of Day and Night



此昼夜作业计划分为 7 个时段，各时段的泊位装卸箱量要求见表 4.1

表 4.1 分时段需要卸/装的集装箱量 (TEU)

Table 4.1 Handling Quantity of Containers in Each Period of Time(TEU)

时段/泊位	泊位 A		泊位 B	
00-02:20	卸	140		0
02:00-09:30	装	430	卸	645
09:30-10:50		0	卸	120
10:50-12:30	卸	200	卸	150
12:30-17:25	卸	590	装	442
17:25-22:40	装	630	装	473
22:40-24:00	装	160		0

泊位 A 上从 10:50 开始挂靠第二艘船舶，第二艘船舶箱量较大，根据在泊时间要求，码头需要开四个头才能满足船舶离港要求。堆场布局图如图 4.2 所示，计划中有 3 个卸箱堆区，4 个装箱堆区（黑色覆盖部分）。卸箱堆区 U 和装箱堆区 L 以及泊位 A 上各岸桥和泊位 B 上各岸桥到装卸箱堆区距离分别如表 4.2、4.3 所示。

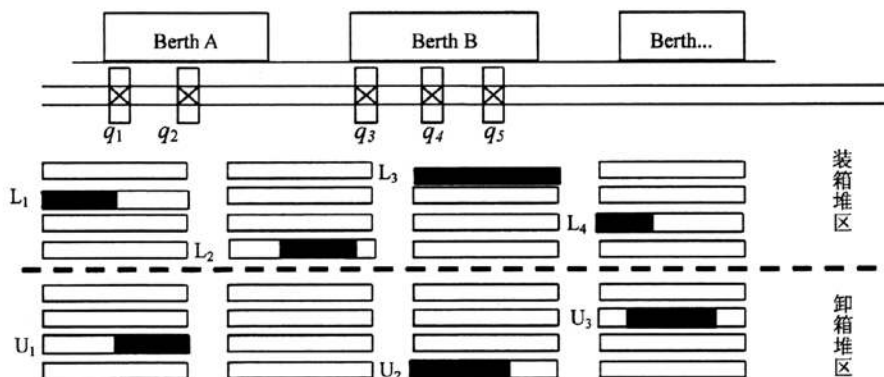


图 4.2 泊位/岸桥/堆场堆区区域划分图

Fig.4.2 Division Yards among Berth, QC and Container Yard

说明：根据作业量的不同，岸桥可在不同的泊位之间移动。比如说，泊位 A 船舶开两个头即为 q1,q2，泊位 B 船舶开三个头即为 q3,q4,q5。

表 4.2 各装箱堆区 Lk 与卸箱堆区 Uj 之间的距离(单位：千米)

Table 4.2 Distance Between Loading Yards and Unloading Yards(Km)

Distance	L1	L2	L3	L4
U1	1.5	0.9	2.4	1.4
U2	2	1.2	2.25	1.6
U3	1.5	0.7	1.6	0.8

表 4.3 各岸桥到各个堆区之间的距离（单位：千米）

Table 4.3 Distance Between QCs and Yards(Km)

Distance	U1	U2	U3	L1	L2	L3	L4
$q_1^A$	2.55	3.15	2.33	0.64	1.45	0.75	1.4
$q_2^A$	2.58	3.2	2.39	0.66	1.5	0.8	1.43
$q_3^A$	2.5	3.1	2.3	0.63	1.4	0.7	1.35
$q_4^A$	2.4	3	2.6	0.6	1.3	0.6	1.3
$q_1^B$	2.65	2.85	2.3	0.7	1.3	0.75	1.15
$q_2^B$	2.7	2.75	2.16	0.78	1.35	0.5	1.06
$q_3^B$	2.85	2.6	2.05	0.85	1.48	0.32	1

另外每个时段的堆区箱量见表 4.4，A 代表泊位 A，B 代表泊位 B。

表 4.4 昼夜 24 小时各时段各个堆区的卸/装量（TEU）

Table 4.4 Loading/Unloading Quantity of Each Yards in Each Period of Time

第 k 个时间段各个堆区的装/卸箱量							
时间 段	00:00- 02:20	02:20- 09:30	09:30- 10:50	10:50- 12:30	12:30- 17:25	17:25-22: 40	22:40- 24:00
U1	80	210	80	80A	180	0	0
U2	40	200	20	120A+50B	212	0	0
U3	20	235	20	100B	200	0	0
L1	0	90	0	0	100	160A+100B	50
L2	0	120	0	0	82	140A+71B	20
L3	0	150	0	0	150	250A+100B	30
L4	0	70	0	0	112	82A+200B	60

根据现行调查在设备成本部分中,平均每台岸桥的价格为 5000 万元/台；场桥单位价格 600 万元/台；集卡单位价格：20 万元/辆；港机折旧年限为 12 年。岸桥平均装卸一小时所耗动力费及设备维护费用为 400 元；场桥平均装箱一小时所耗动力费及设备维护费用为 100 元；集卡平均搬运一小时所耗动力费及设备维护费用为 50 元。每个班组的日工资约为 1500 元，每班 8 小时，港口年营运时间 360

天，每天 24 小时工作。其他数据如下表所示：

表 4.5 设备配置模型相关参数数据表

Table 4.5 Related Parameter Data of Equipment Deployment Model

parameter	单位	数据
T	小时	10
$C_Q$	元/台. 小时	882
$C_G$	元/台. 小时	169
$C_T$	元/辆. 小时	52
$T_Q$	小时/TEU	0.05
$T_G$	小时/TEU	0.025
$V_T$	千米/小时	35

4.2 应用 Lingo 软件求解模型

由图 4.1 可以看到，除 02:20-09:30 和 12:30-17:25 两个时段外，其他时段都是独立作业模式。以第一个时段为例，应用 Lingo 软件求解结果如下：

Global optimal solution found at iteration:		10
Objective value:		726.0000
Variable	Value	Reduced Cost
X( 1, 1)	50.00000	5.000000
X( 1, 3)	20.00000	4.600000
X( 2, 1)	30.00000	4.800000
X( 2, 2)	40.00000	6.000000

即：路径 Q1-U1-Q1 作业 50TEU；Q1-U3 作业 20TEU；Q2-U1 作业 30TEU；Q2-U2 作业 40TEU。总行走距离是 726 千米。

由图 4.1 可以看到 02:20-09:30 时段两泊位是一装一卸情况，集卡可以实施联合作业。此时泊位 B 在卸船，泊位 A 在装船，根据联合作业路径优化模型，应用 Lingo 求解结果如下：

Global optimal solution found at iteration:		32
Objective value:		3161.600
Variable	Value	Reduced Cost
X( 1, 1, 1, 1)	90.00000	0.000000

X( 1, 1, 2, 1)	55.00000	0.000000
X( 1, 1, 2, 2)	65.00000	0.000000
X( 1, 3, 4, 1)	5.000000	0.000000
X( 2, 3, 3, 2)	150.0000	0.000000
X( 2, 3, 4, 1)	65.00000	0.000000
Y( 3, 2)	200.0000	0.000000
Y( 3, 3)	15.00000	0.000000

即集卡在联合路径  $Q_1^B - U_1 - L_1 - Q_1^A$  作业 90 次, 卸箱量 90TEU, 装箱量 90TEU; 路径  $Q_1^B - U_1 - L_2 - Q_1^A$  作业 55 次; 路径  $Q_1^B - U_1 - L_2 - Q_2^A$  上作业 65 次; 路径  $Q_1^B - U_3 - L_4 - Q_1^A$  作业 5 次; 路径  $Q_2^B - U_3 - L_3 - Q_2^A$  作业 150 次; 路径  $Q_2^B - U_3 - L_4 - Q_1^A$  作业 65 次。集卡在独立路径  $Q_2^B - U_2$  上作业了 200 次, 即 200 个 TEU, 在路径  $Q_2^B - U_3$  上作业了 15 个 TEU。总行走距离是 3160 公里。

得出集卡的具体行走路径, 就可以为某个路径配备一定量的集卡和场桥数量, 这里以第一个时段为例, 有四条路径, 根据设备配置模型, 应用 Lingo 软件求解得出:

Global optimal solution found at iteration:		10
Objective value:		4208.000
Variable	Value	Reduced Cost
DISTANCE1( 1)	2.500000	0.000000
DISTANCE1( 2)	2.300000	0.000000
DISTANCE1( 3)	2.400000	0.000000
DISTANCE1( 4)	3.000000	0.000000
X( 1)	5.000000	52.00000
X( 2)	5.000000	52.00000
X( 3)	5.000000	52.00000
X( 4)	6.000000	52.00000
Y( 1)	2.000000	169.0000
Y( 2)	2.000000	169.0000
Y( 3)	2.000000	169.0000
Y( 4)	2.000000	169.0000

即为第一条路径 Q1-U1-Q1 作业 50TEU 配备 5 辆集卡；Q1-U3 作业 20TEU 配备 5 辆集卡；Q2-U1 作业 30TEU 配备 5 辆集卡；Q2-U2 作业 40TEU 配备 56 辆集卡，每个路径需要的场桥数均为 2 台。总行走距离是 726 千米，设配使用成本为 4208 元。

其他时段的独立作业和联合作业求解以此类推。在得出集卡路径后，将各时段所用路径总结出一个路径集合，应用 Lingo 求解软件为集合中的路径进行集卡和场桥的配备。最终针对每个时间段船舶挂靠以及装卸情况，得出拖车的具体路径结果，以及各路径上设备配置量见附录。

联合作业昼夜集卡作业总距离合计 11653.04 公里，若不采用联合作业模式，只进行独立作业的总距离是：

$$726+(3166.3+805.4)+614+1853+(3137.360+2153.240)+1965.68+320.6=14741.58\text{km}.$$

所以将联合作业模式考虑之后，集卡运行距离可以缩短 20.95% 的距离。集卡的利用率提高是非常显著的。对于集卡的配置来说，由结果可以看出一般路径上大致配 3-6 辆集卡车为最佳，根据路径远近酌情配置，本文应用一定的理论模型指导路径上集卡大致配置量，可以避免经验配置的盲目性。

### 4.3 本章小结

在上两节中，通过码头实际作业的流程及各环节数据，应用第 3 章的两个集卡路径优化模型和一个设备配置模型做出了昼夜两个泊位的靠泊船舶的装卸计划，计划主要包括了集卡从码头前沿的开头岸桥到堆场再到岸桥的路径选择，以及各个路径上需要装卸的集装箱量，同时要为每个路径配备一定量的集卡和岸桥数以满足前方岸桥的装卸效率，避免岸桥等待集卡现象。将优化结果同传统结果进行比较后得出集卡路径优化结果明显优于传统运输模式，为码头作业的实际操作提供了可靠的理论基础。

## 第 5 章 结论

### 5.1 全文总结

集装箱码头泊位是整个码头最主要的资源，泊位的生产运作是整个码头关系到码头整体工作的效率，如何提高泊位的生产效率让码头的生产运作顺利进行，如何让泊位作业过程中的使用设备无缝衔接，如何在传统的运作模式上优化改良成了集装箱码头目前亟待解决的问题。

本文大致介绍了集装箱码头内部布局、码头主要资源设备，详细介绍了码头的几种装卸工艺系统以及码头前沿泊位的生产流程，通过流程分析，确定泊位生产运作的影响因素。根据各影响因素之间关系，建立了码头泊位生产运作优化模型。通过理论分析，模型表述和算例求解，本文的主要结论主要有：

(1) 龙门吊装卸工艺系统在我国广泛采用。分析各装卸工艺系统特点，比较得出我国大部分集装箱港口适用龙门吊装卸工艺系统。实践中，目前国内集装箱码头的主要装卸工艺系统是龙门吊系统，根据设备成本比较关系得知该系统最重要的环节是泊位前沿的装卸桥作业环节。水平运输工具（如集卡）和场桥（轨道式/轮胎式龙门吊）等设备的工作效率要尽量满足岸桥的工作效率。

(2) 堆场内箱子分散不一，并不是统一摆放。在码头堆场很大时，昼夜生产计划的装卸箱子分散放置，将装卸箱子分散与各个堆场的各个堆区，码头前沿的岸桥距离各个堆区的路径距离不同，因为距离长短不一，对于路线的行走选择非常重要，在开头数和堆区都较多情况下，将各个小堆区看做一个点，连接各点路径即为线，建立点线结合系统，借助优化算法求解最佳路径和路径上最佳行走次数。

(3) 集卡联合作业方式显著缩短集卡总行走距离。目前集卡的行走方式还是为每个岸桥配备固定个数集卡和场桥，这些集卡和场桥只服务于单个岸桥，这种独立作业方式，集卡重载率低，设备使用浪费。在多泊位情况下，在同一个时间段内，应试着在一装一卸两个泊位考虑联合作业，对于本文算例两个泊位的昼夜 24 小时的作业计划来说，联合作业方式可以节省 30%左右的路程，极大地避免了集卡的使用浪费，集卡的联合作业是未来一种趋势，但同时这种方式复杂得多，

对码头调度的管理水平要求会相应提高。

(4) 泊位装卸作业中岸桥效率发挥尤其重要。岸桥的使用成本远远高于集卡和场桥，在关注设备配置上都要优先考虑岸桥的效率发挥，但也应注意没有浪费集卡和场桥的使用。本文算例得出一般集卡的最佳配置比例为 1:5，场桥为 1:2，具体配备还需借助理论数据指导，不能光凭经验判断。

(5) 管理要求泊位的昼夜 24 小时计划应该高效执行，不要有过大变动。本文算例严格按照昼夜计划执行，得出的结果是最优化结果。

## 5.2 本文研究不足及研究展望

本文研究了集装箱码头物流优化的一个子问题：泊位的生产运作优化问题，该问题主要包含了集卡路径的优化，路径上的岸桥、集卡和场桥的数量配备优化。将集卡的联合作业和单独运输模式综合考虑进去，以两个泊位昼夜 24 小时计划为基础、计划数据为依托建立了泊位生产运作优化问题。受研究时间和精力限制，本文还存在诸多问题，今后相关工作有待进一步研究，主要有：

(1) 根据装卸时间段分析的结果是站在时间段之前的计划阶段，还是静态的组织计划，这对实际执行的精细度很高，否则影响计划的实施。

(2) 分散堆区计划装卸箱量多少不一，在计划装卸箱量很少情况下，需考虑不能在同一时刻有两台岸桥同时作业在该堆区，因为这样势必会造成集卡和场桥的路径拥挤，实际工作将无法按照理论结果进行。

(3) 同岸桥与堆区间的距离比起来，堆区内距离微乎其微，本文将堆区缩为一个环节点进行建模分析，忽略了堆区内距离。但再小的堆区也是一个区而不是一个点，未来研究可以更加微观进行分析求解。

(4) 一个集装箱码头的泊位数一般都多于两个，码头的生产计划也不只限于两个泊位的装卸，在多于两个泊位情况的码头作业系统中，如何将集卡联合作业考虑进去使得泊位作业最优化是需要以后研究考虑的更加复杂问题。

(5) 在泊位数、进出口堆区和船舶开头数数量足够多时，本文模型涉及的变量将呈几何级数增长，一般的优化算法编写的优化软件（如 lingo）将无法在短时间内运行出最优结果，这就需要借助一些启发式算法求得满意解。

## 参 考 文 献

- [1] 吴岷. 集装箱码头作业的整体优化. 集装箱化, 1999, 12(6):15-16
- [2] 张莉, 霍佳震. 集装箱码头运营优化研究. 交通与计算机, 2007, 25(3):59-64
- [3] 韩要稳, 朱晓宁, 闫振英. 集装箱码头作业环节协调调度研究. 物流科技 2007, 12(8):60-63
- [4] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S. The dynamic berth allocation problem for a container port. Transportation Research Part B, 2001, 35 (4) : 401-417
- [5] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S. Berth allocation with service priority. Transportation Research-B, 2003, 37 (5) : 437-457
- [6] Kim K H, Moon K C. Berth scheduling by simulated annealing. Transportation Research-B, 2003, 37(6) : 541-560
- [7] Imai A, SunXin, Nishimura Etsuko etc. Berth Allocation in a container Port: using a continuous location space approach. Transportation Research part B[J] 39 (2005) 199-221
- [8] Imai A, SunXin, Nishimura Etsuko Masahiro Hattori et al. Berth allocation at indented berths for mega-container ships. European Journal of Operational Research, Volume179, June 2007, 579-593
- [9] Wang Fan, Lim Andrew. A stochastic beam search for the berth allocation problem. Decision Support Systems, Volume42, Issue4, January 2007, 2186-2196
- [10] Daganzo Carlos F. The crane scheduling problem. Transportation Research Part B[J] 23(1989) 159 — 175
- [11] Kim Kap Hwan. A crane scheduling method for port container terminals. European Journal of operational research, [J]156(2004) 752-765
- [12] Bish Ebru K. A multiple-crane-constrained scheduling Problem in a container terminal. European Journal of Operational Research 144(2003) 83-107
- [13] Imai Akio, Chen Hsieh Chia, Nishimura Etsuko et al. The simultaneous berth and quay crane allocation problem. Transportation Research Part E, July 2007
- [14] 韩晓龙. 集装箱装卸港口资源配置研究: (博士学位论文). 上海: 上海海事大学, 2005.
- [15] 韩俊, 孙晓娜, 靳志宏. 集装箱码头泊位与岸桥协调调度优化. 大连海事大学学报, 2008, 34(2) 117-121
- [16] Nishimura Etsuko, Imai Akio, Stratos. Yard trailer routing at a maritime container terminal [J] Transportation Research part E 41(2005) 53-76
- [17] 杨静蕾. 集装箱码头物流路径优化研究. 水运工程, 2006(1) 32-35



- [18]李磊,孙俊清,韩梅.基于“作业面”的集装箱码头集卡路径优化的研究[J].
- [19]严政,陶德馨.基于动态优化组合的集装箱码头集卡调度技术[J].武汉理工大学学报,2006,28(4):26-29
- [20]曾庆成,孙丽敏,杨忠振.集装箱码头装卸混合调度模型[J].哈尔滨工业大学学报,2009.10:287-289
- [21]韩晓龙.集装箱港口装卸中的龙门吊数量配置.系统工程,2005,23(10)12-16
- [22]李建中,韩晓龙.集装箱港口轮胎式龙门起重机的动态优化配置.上海海事大学学报,2005,26(3)44-48
- [23]彭传圣.集装箱码头前沿设备配置数量研究.集装箱化,2005.7,23-27
- [24]金健.引入时间和空间概念的集装箱码头作业计划.集装箱化,2009,(02)
- [25]金健.集装箱码头装卸作业控制革新新设想.集装箱化,2006,(04):9-11
- [26]Kozan Ethan, Preston Peter. Genetic algorithms to schedul container transfers at multi-modal terminals. Intl.Trans.in OP. Res. 6(1999) 311-329.
- [27]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.大连理工大学学报.2006,46(3)372—379
- [28]ChenLu, Bostel Nathalie, Dejax Pierre et al. A tabu search algorithm for the integrated scheduling Problem of containe rhandling systems in a maritime terminal. European Journal of operational Research, Vol181, Issue 1, 16 August 2007, 40-58.
- [29] Pyung Hoi Koo. Fleet sizing and routing for container transportation in a static environment. OR Spectrum, 2004(26):193—209
- [30]Chin I. Liu and P.A.loannou. A comparison of different AGV dispatching rules in an automated container terminal. Proceedings of The IEEE 5'h International Conference on Intelligent Transportation Systems, Singapore ,September 36,2002:880—885
- [31]Ling Qiu, Wen-Jing Hsu. Routing AGVs on a mesh-like path topology. Proceedings of the 2000 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Dearbom(MI),USA, October 35,2000:
- [32]Ling Qiu, Wen-Jing Hsu. Continuous scheduling of AGVs in a mesh-like path topology. Proceedings of the 2003 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 9—11,2003:62-67
- [33]Martin Grunow. Dispatching multi-load AGVs in highly automated seaport container terminals. OR Spectrum,2004(26):211—235
- [34]杨兴晏.利用综合成本模型研究集装箱码头设备投资的最佳规模.港工技术,1995(2):

17-21

- [35]杨静蕾. 集装箱码头设备配置的模拟研究. 系统仿真学报, 2003. 15 (8): 1069-1073
- [36]陈家源著. 港口通过能力理论与计算方法. 大连:大连海事大学出版社, 2003
- [37]张明君. 集装箱码头堆场面积的设定. 青岛远洋船员学院学报, 2003. 24 (3): 50-52
- [38]陈成源, 侯彤章. 集装箱码头堆场系统通过能力研究. 大连海事大学, 2006, 25-26
- [39]江涛. 集装箱码头集卡资源整合使用的路径优化研究. 上海海事大学, 2001, 18-21
- [40]徐少君、王 科国内码头集装箱运输经营现状及发展趋势 企业技术开发 2009. 7
- [41]靳志宏, 朴惠淑, 杨华龙. 集装箱多式联运系统装卸与运输一体化优化问题[J]. 系统工程, 2005, 23(11):1-6
- [42] C.F.Daganzo. The crane scheduling problem. Transportation Research, 1989. 2313(3):159-175
- [43]R. I. Peterkofsky, and C.F.Daganzo. A branch and bound solution method for the crane scheduling problem. Transportation Research, 1990. 24B(3):19-172
- [44]J. B. Tabernacle. A study of the changes in performance of quayside container cranes. Maritime Policy and Management, 1995. 22(2):115-124
- [45]J. B. Torsten Reiners, Dirk Steenken, Stefan Vob. Vehicle Dispatching at Seaport Container Terminals Using Evolutionary Algorithms. R. H. Sprague (Ed.) Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE, Piscataway (2000), DTM-IT:1-10
- [46]林敦清, 陶其钧. 集装箱码头装卸机械设备台数探讨. 上海港科技, 2001 (5): 19-22
- [47]张杰. 上海港集装箱码头装卸桥配置研究. 水运管理, 2002 (8) : 25-27
- [48]Lai, K. K. and Lam, K. A study of container yard equipment allocation strategy in Hong Kong. International Journal of Modeling and Simulation, 1994. 14(3): 134 — 138
- [49]Kozan, E. and Preston, P. Genetic algorithm to schedule container transfers at multimodal terminals. International Transactions in Operational Research 6, 1999: 311-329
- [50]Chuqian Zhang, Yat-wah Wan, and Jiyin Liu. Dynamic crane deployment in container storage yards. Transportation Research Part B, 2002. 36:537 — 555.
- [51]陶其钧. 集装箱堆场机械选型配置研究. 港口装卸, 2002 (1): 1-6
- [52]金健. 浅析 TPS 的优化. 集装箱化, 2002 (4): 19-20
- [53]Pyung Hoi Koo. Fleet sizing and routing for container transportation in a static environment. OR Spectrum, 2004(26):193 — 209
- [54]Chin I. Liu and P. A. Ioannou. A comparison of different AGV dispatching rules

in an automated container terminal. Proceedings of The IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Transportation Systems, Singapore, September 36, 2002:880 — 885

[55]Ling Qiu, Wen-Jing Hsu. Routing AGVs on a mesh-like path topology. Proceedings of the 2000 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Dearborn(MI), USA, October 35, 2000:

[56]Ling Qiu, Wen-Jing Hsu. Continuous scheduling of AGVs in a mesh-like path topology. Proceedings of the 2003 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 9 — 11, 2003:62-67

[57]Martin Grunow. Dispatching multi-load AGVs in highly automated seaport container terminals. OR Spectrum, 2004(26):211 — 235

[58]杨兴晏. 利用综合成本模型研究集装箱码头设备投资的最佳规模. 港工技术, 1995(2): 17-21

[59]陈家源著. 港口通过能力理论与计算方法. 大连:大连海事大学出版社, 2003

[60]张明君. 集装箱码头堆场面积的设定. 青岛远洋船员学院学报, 2003. 24 (3): 50-52

[61]谢金星, 薛毅. Lingo 优化建模与 Lingo/Lingo 软件. 北京:清华大学出版社, 2007.

## 附录 A 模型求解 Lingo 主程序段

(1) 简单运输:

```
min=@sum(link:2*DIS*X);
```

!约束条件 1: 为箱量要求, 需要卸的箱子全部卸完;

```
@for(QC(i):
    @for(UY(j):
        @sum(link:X)=QU
    )
);
```

!约束条件 2: 为岸桥作业量要求, 每个桥吊的作业量相等;

```
@for(QC(i):
    @sum(UY(j):X(i,j))=QU/num1
);
```

!约束条件 3: 为卸箱区箱量约束: 箱子卸到规定的堆区, 且符合数量要求;

```
@for(UY(j):
    @sum(QC(i):x(i,j))=nu(j)
);
!@if nu(j)<QU/num1,X(i,j)=nu(j);
!@for(QC(i):
    @for(UY(j):
        X(i,j)=@if(nu(j) #gt# QU/num1,QU/num1,nu(j))
    )
);
```

```
!@if nu(j)>=QU/num1,X(i,j)=QU/num1;
```

```
@for(link(i,j):@gin(X(i,j)));
```

(2) 联合作业:

```
min=@sum(LINK1:(DIS21+D)*X)+@SUM(LINK2:2*DIS22*Y)+@SUM(LINK3:2*DIS23*Z);
```

```
!SUBJECT2;
```

```
@SUM(LINK1:X)+@SUM(LINK2:Y)=QU;
```

```
!SUBJECT3;
```

```
@SUM(LINK1:X)+@SUM(LINK3:Z)=QL;
```

```
!SUBJECT4;
```

```
@SUM(LINK1:X)=@SMIN(QU,QL);
```

```
!SUBJECT5;
```

```
@SUM(LINK2:Y)=@SMAX((QU-QL),0);
```

```
!SUBJECT6;
```

```
@SUM(LINK3:Z)=@SMAX((QL-QU),0);
```

```
!SUBJECT7;
```

```
@FOR(QC1(I):
    @SUM(LINK1(I,J,K,L):X(I,J,K,L))+@SUM(LINK2(I,J):Y(I,J))=QU/NUM1
```

```

);
!SUBJECT8;
@FOR(QC2(L):
@SUM(LINK1(I,J,K,L):X(I,J,K,L))+@SUM(LINK3(K,L):Z(K,L))=QL/NUM2
);
!SUBJECT9;
@FOR(UY(J):
@SUM(LINK1(I,J,K,L):X(I,J,K,L))+@SUM(LINK2(I,J):Y(I,J))=nU21(J)
);
!SUBJECT10;
@FOR(LY(K):
@SUM(LINK1(I,J,K,L):X(I,J,K,L))+@SUM(LINK3(K,L):Z(K,L))=nL21(K)
);
!SUBJECT11,ALL THE VARIABLES ARE INTEGER;
@for(LINK1:@gin(X));
@for(LINK2:@gin(Y));
@for(LINK3:@gin(Z));
(3) 设配配置:
min=CQ*NQ+CT*@sum(ROUTES:X)+CG*@SUM(ROUTES:Y);
@for(ROUTES(I):
Distance1(i)/VT+TG<=TQ*X(i)
);
@for(ROUTES(I):
(Distance1(i)/VT+TQ)*Y(i)<=TG*X(i)
);
@for(ROUTES(I):
TQ*Y(i)>=TG
);
@for(ROUTES(I):@gin(X(i)));
@for(ROUTES(I):@gin(Y(i)));

```

## 附录 B 第 4 章算例最优路径、装卸箱量及设备配置

$T_k$	具体路径	配备集卡数	配备场桥数	距离 km
(00: 00-02:20)	$q_1^A \xrightarrow{50} U_1$	5	2	726
	$q_1^A \xrightarrow{20} U_3$	5	2	
	$q_2^A \xrightarrow{30} U_1$	5	2	
	$q_2^A \xrightarrow{40} U_2$	6	2	
(02:20-09:30)	$q_1^B \xrightarrow{90} U_1 \rightarrow L_1 \xrightarrow{90} q_1^A$	6	4	3161.6
	$q_1^B \xrightarrow{55} U_1 \rightarrow L_2 \xrightarrow{55} q_1^A$	6	4	
	$q_1^B \xrightarrow{65} U_1 \rightarrow L_2 \xrightarrow{65} q_2^A$	6	4	
	$q_1^B \xrightarrow{5} U_3 \rightarrow L_4 \xrightarrow{5} q_1^A$	3	4	
	$q_2^B \xrightarrow{150} U_3 \rightarrow L_3 \xrightarrow{150} q_2^A$	5	4	
	$q_2^B \xrightarrow{65} U_3 \rightarrow L_4 \xrightarrow{65} q_1^A$	5	4	
	$q_3^B \xrightarrow{200} U_2$	4	2	
	$q_3^B \xrightarrow{15} U_3$	5	2	
(09:30-10:50)	$q_1^B \xrightarrow{40} U_1$	4	2	614
	$q_2^B \xrightarrow{40} U_1$	5	2	
	$q_3^B \xrightarrow{20} U_2$	4	2	
	$q_3^B \xrightarrow{20} U_3$	4	2	
(10:50-12:30)	$q_1^A \xrightarrow{50} U_2$	4	2	1853
	$q_2^A \xrightarrow{50} U_1$	5	2	

	$q_3^A \xrightarrow{50} U_2,$	4	2	
	$q_4^A \xrightarrow{30} U_1$	4	2	
	$q_4^A \xrightarrow{50} U_2$	4	2	
	$q_1^B \xrightarrow{50} U_2$	4	2	
	$q_2^B \xrightarrow{50} U_2$	5	2	
	$q_3^B \xrightarrow{50} U_3$	5	2	
(12:30-17:25)	$q_1^A \xrightarrow{2} U_3 \rightarrow L_3 \xrightarrow{2} q_2^B$	2	4	3012.1 6
	$q_1^A \xrightarrow{86} U_3 \rightarrow L_3 \xrightarrow{86} q_3^B$	4	4	
	$q_1^A \xrightarrow{60} U_3 \rightarrow L_4 \xrightarrow{60} q_2^B$	4	4	
	$q_2^A \xrightarrow{32} U_1 \rightarrow L_1 \xrightarrow{32} q_1^B$	5	4	
	$q_2^A \xrightarrow{48} U_2 \rightarrow L_2 \xrightarrow{48} q_1^B$	5	4	
	$q_2^A \xrightarrow{16} U_2 \rightarrow L_2 \xrightarrow{16} q_2^B$	4	4	
	$q_2^A \xrightarrow{52} U_3 \rightarrow L_4 \xrightarrow{52} q_2^B$	4	4	
	$q_3^A \xrightarrow{68} U_2 \rightarrow L_1 \xrightarrow{68} q_1^B$	5	4	
	$q_3^A \xrightarrow{18} U_2 \rightarrow L_2 \xrightarrow{18} q_2^B$	5	4	
	$q_3^A \xrightarrow{62} U_2 \rightarrow L_3 \xrightarrow{62} q_3^B$	5	4	
	$q_4^A \xrightarrow{148} U_1$	4	2	
(17:25-22:40)	$q_1^A \xrightarrow{2} L_1$	2	2	1965.6 8
	$q_1^A \xrightarrow{92} L_3$	4	2	
	$q_1^A \xrightarrow{64} L_4$	5	2	
	$q_2^A \xrightarrow{158} L_1,$	5	2	

	$q_3^A \xrightarrow{140} L_2$	4	2	
	$q_3^A \xrightarrow{18} L_4$	3	2	
	$q_4^A \xrightarrow{158} L_3;$	5	2	
	$q_1^B \xrightarrow{100} L_1$	5	2	
	$q_1^B \xrightarrow{57} L_2$	3	2	
	$q_2^B \xrightarrow{14} L_2$	3	2	
	$q_2^B \xrightarrow{143} L_4,$	5	2	
	$q_3^B \xrightarrow{100} L_3$	5	2	
	$q_3^B \xrightarrow{57} L_4;$	4	2	
(22:40-24:00)	$q_1^A \xrightarrow{10} L_1$	5	2	320.6
	$q_1^A \xrightarrow{10} L_2$	4	2	
	$q_1^A \xrightarrow{20} L_4$	5	2	
	$q_2^A \xrightarrow{40} L_1,$	4	2	
	$q_3^A \xrightarrow{40} L_4$	4	2	
	$q_4^A \xrightarrow{10} L_2$	3	2	
	$q_4^A \xrightarrow{30} L_3$	4	2	



## 攻读学位期间公开发表论文

陈超, 王海燕 集装箱码头泊位生产运作优化模型 大连海事大学学报 第 35 卷 第 4 期

## 致 谢

能够顺利完成这篇论文，首先要感谢我的导师陈超教授。从论文最初的选题和构思开始，研究过程中遇到困难的解决，到最后的撰写和审核都饱含了老师的智慧与辛勤的教导。在两年的研究生学习生活中，陈老师以他广博的学识和踏实认真的处事态度，无论在研究学习还是待人处事上，都对我形成了很大影响，使我受益匪浅。在此，谨向导师陈超教授致以最诚挚的谢意。

在研究生的学习及论文研究期间，我得到了师兄师姐师弟师妹、寝室室友以及很多同学无私的帮助，并对我所进行的研究提供了很多宝贵意见及资料，使我深刻体会到了同窗之谊。

论文的完成也标志了我人生一段重要历程即将结束，回想起这两年研究生学习经历，学校为我们创造了良好的学习环境，老师对我们悉心栽培，使我受益匪浅。

感谢交通运输管理学院各位老师对我学习上的帮助。

感谢爸妈、姐姐、哥哥和弟弟对我生活中提供的支持和鼓励。

感谢各位教授在百忙之中对我的论文进行审阅。