

分类号: _____
UDC: _____

密级: _____
编号: _____

学 位 论 文

集装箱堆场空间资源分配模型研究

周 健

指导教师姓名: 康 凯 教 授 河北工业大学

申请学位级别: 硕 士 学科、专业名称: 管理科学与工程

论文提交日期: 2012 年 11 月 论文答辩日期: 2012 年 12 月

学位授予单位: 河北工业大学

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2012 年 11 月

Thesis Submitted to
Hebei University of Technology
for
The Master Degree of
Management Science and Engineering

**RESEARCH ON THE OPTIMIZATION MODEL OF
CONTAINER YARD SPACE RESOURCE ALLOCATION**

by
Zhou Jian

Supervisor: Prof. Kang Kai

November 2012

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，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，本学位论文不包含任何他人或集体已经发表的作品内容，也不包含本人为获得其他学位而使用过的材料。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

同健

日期：

2012.12.21

关于学位论文版权使用授权的说明

本人完全了解河北工业大学关于收集、保存、使用学位论文的以下规定：学校有权采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供本学位论文全文或者部分内容的阅览服务；学校有权将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流；学校有权向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：

同健

日期：

2012.12.21

导师签名：

同健

日期：

2012.12.21

集装箱堆场空间资源分配模型研究

摘要

进入 21 世纪以来,随着全球经济的不断发展,集装箱业务也迎来了其发展的高峰期,这使得全球范围内的集装箱吞吐量不断升高,从而带动了集装箱港口的发展,同时也促进了港口整体面积的扩张和装卸设备数量的增加,这就给港口的整体运作带来了更大的挑战。集装箱堆场是现代港口物流运营系统的一个重要组成部分,堆场中集装箱的堆存位置会直接影响到港口的装卸效率,从而对港口整体运作产生影响。因此,研究制定一个合适的堆存策略,对于堆场来说,不仅可以降低堆场的装卸作业时间,减少集装箱的倒箱作业;对港口来说,还可以有效的减少相关设备的机械成本,促进港口整体的装卸作业速度,提高堆场的堆存能力。

本文通过对影响集装箱贝位和箱位分配的主要因素进行分析,以堆场作业量的均衡和倒箱次数最小为目标,建立相应的数学模型,用以解决堆场内部空间资源的分配问题。

本文首先以集装箱堆场为研究对象,通过充分考虑堆场分配的动态性特征和影响因素,确立本文的研究问题;其次,本文以均衡各个箱区贝位间装卸作业总量为目的,通过减少集卡在堆场内部的运行距离,提高堆场内装卸设备的运作效率,建立堆场贝位资源的分配优化模型;然后,建立贝位内箱位资源的分配模型,将集装箱分配到具体的堆存位置,以降低贝位内集装箱的倒箱次数。最后,运用堆场贝位资源的分配优化模型和箱位资源的分配优化模型进行算例分析,并通过 lingo 等软件程序,运算得出优化结果。对堆场空间资源的分配和调度优化,可以减少堆场中集装箱的倒箱次数,降低设备的装卸成本,提高了堆场的利用率和作业效率。

关键词: 堆场, 空间资源, 贝位分配, 箱位分配

RESEARCH ON THE ALLOCATION MODEL OF CONTAINER YARD SPACE RESOURCE

ABSTRACT

At the beginning of the 21st century, as the uninterrupted development of the global economy , it has also reach the peak period of container business , and the global container throughput is increasing growth . The growth has promoted the development of the container port, and the port area and the number of loading and unloading equipment are keep increasing, these require the overall operation of port to become better. The container yard is an important part of the modern port logistics, and the location of the container in the yard will directly affect the efficiency of the port of loading and unloading operations. Therefore, studying and formulating an appropriate strategy for the yard will not only reduce yard loading and unloading time and reduce the down box a container, but also can effectively reduce the cost of related equipment machinery, and enhance the speed of loading and unloading of the port and improve the overall level of the yard at the same time.

Basing on the main influencing factor of the bay and the storage space allocation, this paper established mathematical models to solve the problem of yard space resources allocation, which consider the smallest of the yard operation volume and the times of the container shifting stowage as the objective. Firstly, we deal with the container yard. Through considering the dynamic characteristics and influencing factors of the yard allocation I establish the research question. Secondly, for the purpose of balancing the operation number among the bays and decrease the distance between the bays and quayside, and improve the overall operational efficiency of the yard, we build a model which distribute the optimization and allocation to the container bay resource. Thirdly, in order to reduce the container shift stowage ratio and improve the handing efficiency of the device ,we build the model which distribute the assignment to the location of the container. Finally, we use these models mentioned above and with the help of lingo software program, I calculate the optimization results. Optimizing the allocation and scheduling of yard space resource not only can reduce the number of the container shifting stowage, but also can improve the utilization and operating efficiency of the yard.

KEY WORDS: Container Yard, Space allocation, Container bay allocation, Container slot designation

目录

第一章 绪论	1
§ 1-1 问题的提出与主要研究问题	1
1-1-1 问题的提出	1
1-1-2 主要研究的问题	1
§ 1-2 论文的研究目的与意义	2
1-2-1 研究目的	2
1-2-2 研究意义	2
§ 1-3 研究方法和技术路线	2
§ 1-4 论文的研究内容与框架	3
1-4-1 论文的研究内容	3
1-4-2 论文的框架结构	4
§ 1-5 论文主要创新点	5
第二章 相关研究及文献综述	6
§ 2-1 堆场空间资源分配	6
2-1-1 堆场空间资源	6
2-1-2 堆场资源分配问题的国内外研究现状	6
§ 2-2 堆场倒箱作业	9
2-2-1 集装箱倒箱的概念	9
2-2-2 堆场倒箱产生的原因	9
2-2-3 倒箱作业的国内外研究现状	10
§ 2-3 本章小结	10
第三章 集装箱堆场空间资源分配问题机制研究	12
§ 3-1 堆场空间资源分配问题	12
3-1-1 空间分配问题的概念	12
3-1-2 集装箱堆场空间资源分配问题描述	12
3-1-3 堆场资源分配问题的特性描述	13
§ 3-2 堆场的作业流程	14
§ 3-3 堆场空间资源分配的影响因素	15
§ 3-4 堆场空间资源分配概念模型	18
§ 3-5 本章小结	19
第四章 集装箱堆场贝位资源分配模型研究	20
§ 4-1 引言	20
§ 4-2 集装箱堆场堆存方式的选择	20
4-2-1 进出口集装箱分开堆存方式	20
4-2-2 多种集装箱混合堆存方式	21
4-2-3 堆场中集装箱类型的划分	21
§ 4-3 港口堆场贝位资源的分配模型的建立	23
§ 4-4 本章小结	30

第五章 贝位内箱位资源的分配模型研究.....	31
§ 5-1 贝位内箱位资源的调度分析	31
§ 5-2 贝位内集装箱倒箱作业的相关概述	31
5-2-1 堆场倒箱问题的解决方法	31
5-2-2 堆场倒箱的原则	32
§ 5-3 贝位内箱位资源的分配模型	32
5-3-1 问题的描述	32
5-3-2 模型的建立	34
§ 5-4 基于启发式算法的模型求解	35
§ 5-5 本章小结	37
第六章 集装箱堆场空间资源分配模型的算例分析.....	38
§ 6-1 集装箱堆场贝位资源分配的优化实例	38
6-1-1 相关数据	38
6-1-2 优化结果与分析	41
§ 6-2 贝位内箱位空间资源的调度优化实例	44
6-2-1 相关数据	44
6-2-2 优化结果与分析	44
§ 6-3 本章小结	45
第七章 总结与展望.....	46
§ 7-1 研究总结	46
§ 7-2 研究的局限与不足	46
§ 7-3 研究展望	47
参考文献	48
致谢.....	51
致谢攻读学位期间所取得的相关科研成果.....	52

第一章 绪论

§ 1-1 问题的提出与主要研究问题

1-1-1 问题的提出

随着世界经济的全球化和海洋运输业的发展,世界范围内三分之二以上的贸易运输都是通过海运的方式。近些年,伴随着中国经济的发展,中国的对外贸易量保持了高速的发展。由于集装箱自身的特征和优势,在海洋运输过程中集装箱扮演了重要的角色,这使集装箱的运输业取得了快速的发展。港口集装箱吞吐量的急剧增加,使得港口的集装箱作业量也骤然增长,导致出现了超负荷运营的现象;同时,集装箱的运输量的增加,也推动了船舶行业的发展,使船舶业向着快速化和大型化的趋势发展,但大型船舶的使用虽然加快了集装箱的运输,缩短了流转时间,也给港口造成了一些瓶颈问题。由此可见,集装箱运输的快速发展为我国的经济发展带来机遇的同时,也给港口的运营提出了巨大的挑战,加剧了港口之间的竞争。

港口之间的竞争除了来自港口自身的地理位置、经济条件和腹地经济的发展状况外,港口内部服务的效率、管理能力和技术水平等因素也逐渐成为影响当今港口竞争的核心要素。如果一个港口要想在现代的竞争占据优势,必须进一步改善港口的业务和服务水平,提高港口的整体作业效率,更好的服务于客户。

现代化集装箱港口高度机械化的作业特点决定了港口设备的投资是十分昂贵,因此,港口企业必须考虑企业的投资成本和盈利问题,不可能投入过多的设施设备。此外,港口的规模还要受泊位、堆场等资源的限制,同时还会受到腹地的经济发展水平的影响。因此,通过对现有资源的合理的调度和分配,提高港口设备的装卸效率,是提升港口整体运作效率的根本途径。

随着集装箱港口作业的复杂程度和客户对装卸效率的要求的提高,传统的以人工经验为主的调度分配方式逐渐成为制约港口作业效率提升的一个重要的因素。同时,由于堆场资源的优化分配问题在集装箱港口整体的作业效率中的不可替代的作用,堆场资源的分配问题越来越受到学者和港口企业的重视,因此,开展相应的研究变得愈加重要。

1-1-2 主要研究的问题

随着集装箱吞吐量的急剧的增长,集装箱港口堆场的运作负荷越来越高,甚至一些港口的负荷量已经超过了港口本身的承载能力,因此,针对这些港口,堆场中集装箱的堆存方式需要发生一些改变,从进、出口集装箱分开堆存的方式向多种集装箱混合堆存的模式转变,以便能够提高堆场的空间资源利用效率,减轻堆场过大吞吐量造成的压力。基于此方面的原因,本文通过对堆场中集装箱种类进行划分,以堆场空间资源为研究对象,从贝位分配和箱位分配两个方面,实现堆场空间资源的动态分配,具体可以概括如下:

问题 1: 集装箱堆场空间资源分配机制研究

通过对空间分配问题进行总结分析,结合堆场中不同类型集装箱的作业流程,将堆场的空间资源分配问题划分为贝位资源的分配和箱位资源的分配两个主要问题。通过明晰两者之间的内在关系,构建了堆场空间资源分配的概念模型。

问题 2: 集装箱堆场贝位资源分配模型研究

通过对堆场中集装箱种类的划分,以及集装箱堆场中不同的堆存方式的选择,确定贝位资源分配问题的研究方法;并通过对贝位资源分配问题进行深入研究,提出了多种集装箱混合堆存模式下的堆场贝位资源分配模型。

问题 3: 贝位中箱位资源的分配模型研究

通过对贝位中箱位资源分配问题总结分析,结合堆场中集装箱的倒箱作业过程和倒箱的原则,以分配过程产生的压箱数最小为目标,建立了箱位资源的分配模型。

§ 1-2 论文的研究目的与意义

1-2-1 研究目的

依托相关的理论和方法,结合实际港口的作业情况,本文的研究旨在构建集装箱堆场空间资源分配的优化模型,并结合有关的软件和算法对该问题进行求解,实现堆场空间资源的合理分配,提升港口的运作效率。

国内大多数的港口建立初期,堆场的堆存能力和港口的吞吐量是相互适应的,近几年,由于吞吐量的急剧增加,而场中能够堆存集装箱的面积在有限的时间范围内是不发生变化的,这种“供需”矛盾使空间资源变的愈加紧张;另一方面,堆场中贝位和箱位等空间资源分配不合理,会导致集卡在集装箱的运输过程中出现拥堵现象,增加集卡的等待时间,降低龙门吊等装卸设备的作业效率。堆场空间资源的分配的目的就是在现有堆场空间资源确定的情况下,将即将到达堆场的集装箱分配到各个贝位上,再将集装箱分配到具体的箱位上,从而提高堆场的空间资源的利用效率,提升整个堆场的作业水平。首先,以均衡各个箱区贝位间的作业总量和集卡的运输距离最短为目标,构建贝位资源分配的数学模型;其次,通过箱位分配的影响因素和倒箱规则,建立堆场箱位分配的模型,采用滚动计划的方法,使模型的运算结果具有现实意义。

1-2-2 研究意义

随着近些年全球范围内经济的回暖,特别是我国的经济保持高速发展,港口集装箱的吞吐量也保持了高速发展的势头,并且增长幅度大于国外的港口。吞吐量大幅增长的同时,也给集装箱的运输提出了新的问题和更高的要求。集装箱港口堆场作为港口最重要的作业系统之一,主要的功能是用来存储从各地运输到堆场或者船舶上卸载下的集装箱。堆场作业效率的高低直接影响着岸桥的装卸效率和船舶的在港停泊时间,对港口的经济效益产生巨大的影响。由于到港的船舶和集装箱的复杂性,以及集装箱陆上运输和海洋运输过程中的不确定性,堆场的工作人员必须对到达堆场的集装箱进行科学合理的规划管理。只有堆场的管理者对堆场内部资源进行合理的分配和调度,才能在有限资源的情况下,提高堆场的整体作业水平,使港口的整体运作效率得到改善,提升顾客的满意度。

§ 1-3 研究方法和技术路线

本文首先对堆场的作业流程进行描述,通过对堆场内部的集装箱的分类以及堆存方式的选择,明确

研究的对象,分析并建立集装箱堆场空间资源分配的优化模型,实现堆场空间资源的整体合理分配。本文的技术路线如图 1-1 所示。

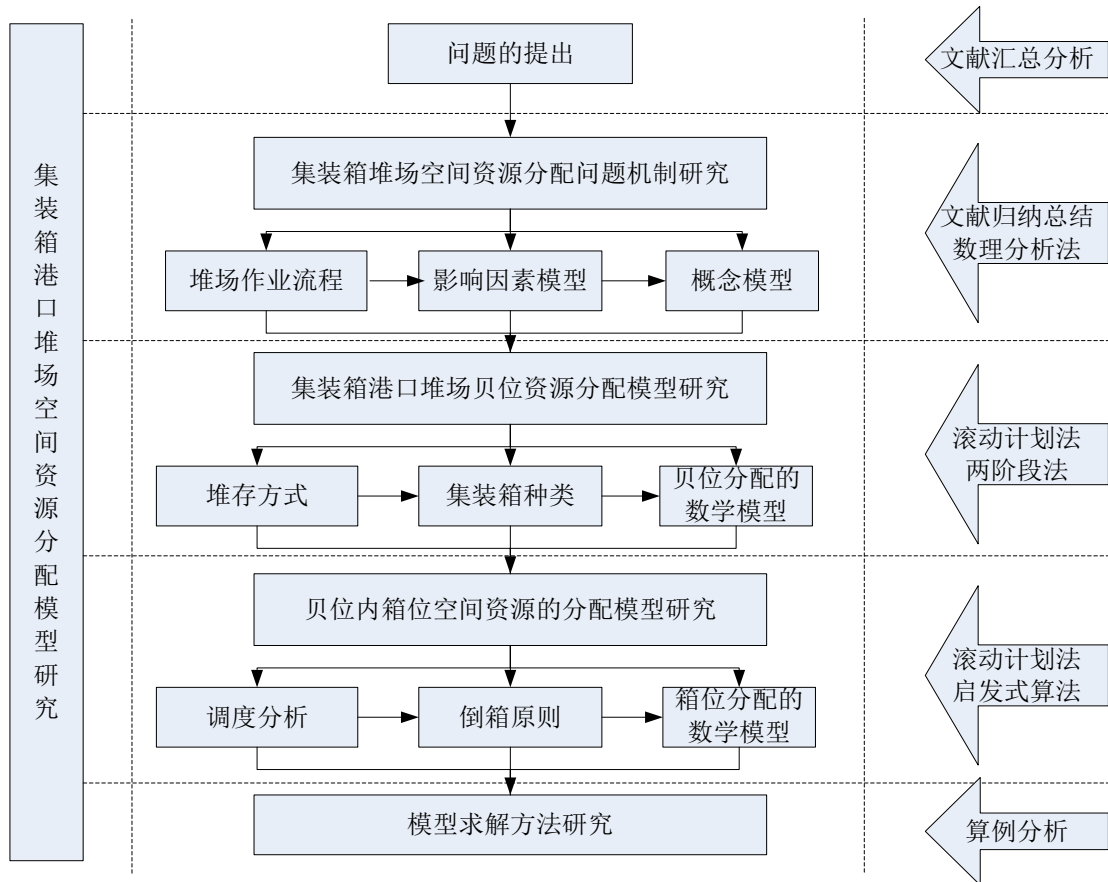


图 1-1 研究方法和技术路线

Fig1.1 The technology route of the dissertation

§ 1-4 论文的研究内容与框架

本研究旨在提出适合集装箱港口堆场空间资源分配的方法,并通过相应的算例验证模型的有效性和可行性。

1-4-1 论文的研究内容

第一章 绪论,主要介绍论文内容和主要研究的问题,明确论文的研究目的和意义,阐述论文的主要的研究内容和技术路线。

第二章 相关研究及文献综述,主要介绍了堆场和集装箱倒箱作业相关概述,针对国内外学者对于堆场资源的分配和倒箱作业的研究现状进行综述,从而引出本文的研究内容。

第三章 集装箱堆场空间资源分配机制研究,主要介绍了空间分配问题的有关概述,并对堆场的资源分配的特性进行论述,结合堆场空间资源分配的影响因素,通过明晰贝位分配和箱位分配之间的内在关系,构建了堆场资源分配问题的概念模型。

第四章 集装箱港口堆场贝位资源分配模型研究,介绍了堆场堆存的策略,并对堆场中集装箱的堆

存方式和集装箱类型进行分析,以贝位内作业量的均衡和集卡的运行距离最短为目标,建立堆场贝位资源的分配模型。

第五章 集装箱港口贝位中箱位资源分配模型研究,通过对贝位中箱位分配问题进行总结分析,结合集装箱的堆存规则和倒箱的作业过程,以贝位中集装箱的压箱数最小为目标,建立了箱位资源的分配模型。

第六章 算例分析,将第四章和第五章的模型应用到算例当中,并对实际算例进行求解,验证模型的有效性。

第七章 结论和展望,总结本文的主要的研究内容,指出本研究存在的不足和需要改进的地方,指出后续的可能的研究方向。

1-4-2 论文的框架结构

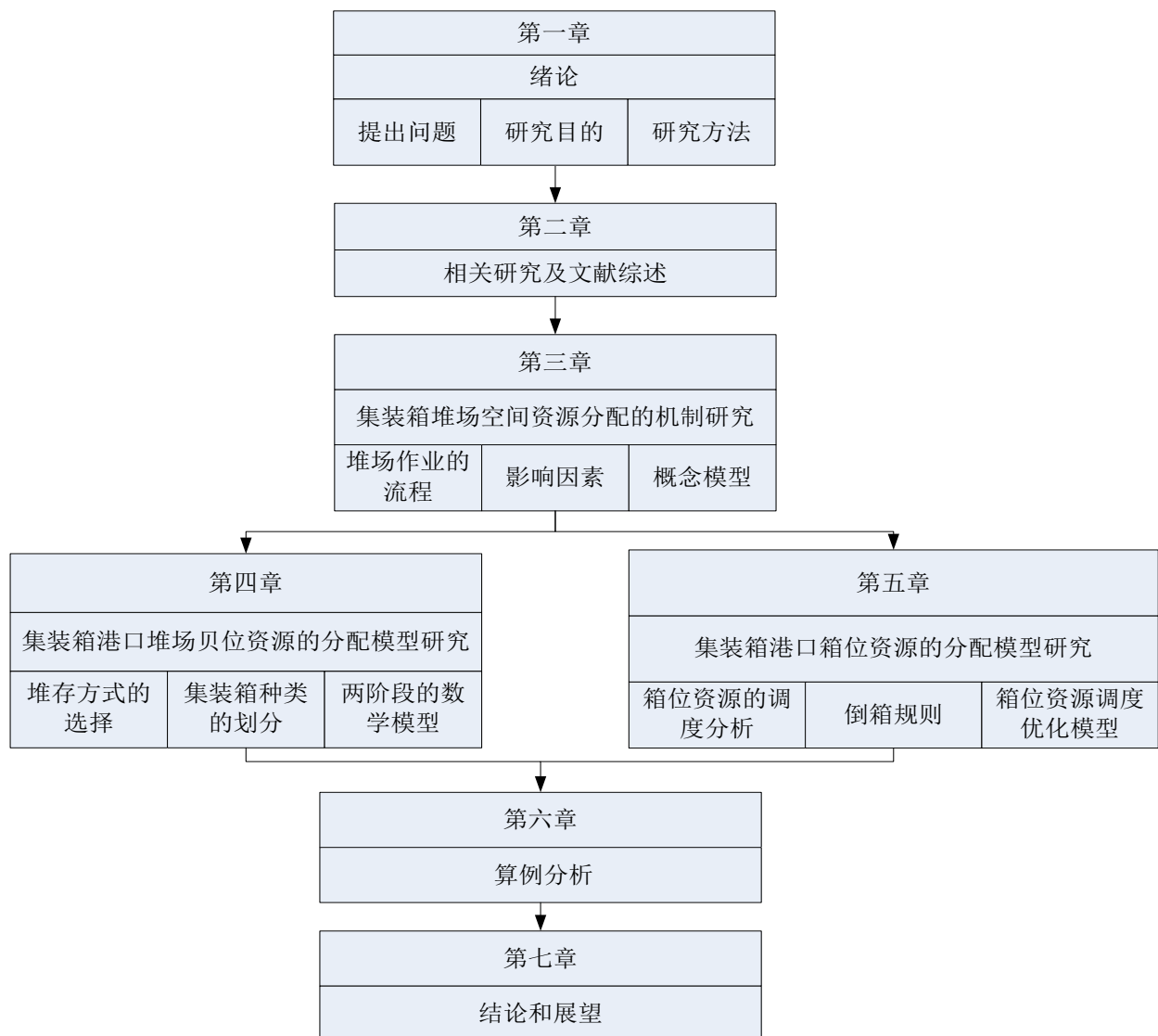


图 1-2 论文的框架结构

Fig1.2 Structure of this thesis

§ 1-5 论文主要创新点

堆场空间资源分配问题的研究,以堆场中贝位资源和箱位资源为研究对象,将资源分配到具体的贝位箱位中,具有重要的意义,能够对港口整体效益产生巨大的影响。目前,对于堆场调度的研究逐渐增多,而对堆场贝位资源和箱位资源的研究较少,本文主要的创新点如下:

(1) 本文结合堆场作业的动态特性及装卸过程的复杂性,通过确定堆场中各种不同类型的集装箱的关系,将堆场空间资源分配问题分为贝位分配和箱位分配两个问题,对堆场空间资源进行分配。

(2) 集装箱堆场空间资源分配概念模型的构建。本文以堆场的作业流程为基础,通过对影响空间资源分配的因素进行归纳分析,将堆场资源分配问题分为贝位分配和箱位分配,通过明晰它们之间的关系,构建了堆场空间资源分配的概念模型。

(3) 提出多种集装箱混合堆放的情况下堆场空间资源的分配问题,并建立了相应的数学模型。通过对已有的相关文献进行总结分析,目前大多数的研究都是针对静态条件下进口集装箱或者出口集装箱的分配调度,而对混合堆放的情况下集装箱和堆存空间的动态变化的研究较少。本文主要研究了多种集装箱混合堆放的情况下堆场空间资源的分配问题,确定分配到各个贝位的集装箱堆存数量,并给出了算例分析。

第二章 相关研究及文献综述

§ 2-1 堆场空间资源分配

2-1-1 堆场空间资源

堆场中的空间资源主要是指堆场中能够放置集装箱的空间位置,在本文主要是指堆场的贝位资源和箱位资源。在日常的堆场作业中,堆场都会划分成多个不同的箱区,根据不同的作用和目的,划分箱区的方法也有很多种:根据港口中的业务类型可以划分为进口箱区和出口箱区;按照货物的类别可以划分为普通箱区、冷冻品箱区、危险品箱区等;按照集装箱承载状态可分为空箱区和重箱区。

在实际的堆场作业中,为了记录集装箱的便利和对集装箱的追踪,堆场都会有相应的堆场编码方式,通过箱位号可以指定具体的集装箱的位置,在一般情况下,箱位号由箱区编号、贝位号、排号和层号组成。

1) 箱区号 (Slot Number)。目前国内的港口最常采用的编码方式是用一个数组表示箱区,该数组由一个字母和数字组成,其中字母通常表示的是泊位号,数字表示的箱区号。

2) 贝位号 (Bay Number)。贝位号的编码一般由两位数字组成。如果在堆场中存在较多的 40ft 集装箱,一般会用偶数 02,04,06,...表示:40ft 箱的贝位。贝位的数量是由箱区的建设长度决定,多个贝位构成一个箱区。

3) 排号 (Lane Number)。每个贝位是由多排(或者堆垛)集装箱组成,排号一般是用一位数字表示,在堆场当中,贝位中的排数是由装卸设备的横向跨度决定的。

4) 层号 (Tier Number)。贝位中排是由多层集装箱组成,层号也是用一位数字表示,堆存层数由装卸设备的高度决定的。

2-1-2 堆场资源分配问题的国内外研究现状

(1) 国外研究现状

国外对于集装箱港口的研究伴随着集装箱运输业务发展而发展,自上世纪八十年代以来,国外很多学者对堆场的空间资源分配问题进行了广泛的研究。

有很多学者针对堆场的布局或堆场设施规划进行研究:McDowell.E 等(1985)通过对各个装卸作业过程中产生成本消耗的流程进行分析,以成本最小为目标,建立相应的数学模型,通过求解该模型可以达到降低成本的目标,但是没有涉及龙门吊的作业过程^[1]。Dagan 等(1993)以提高堆场的经济效益为目标,对进入堆场的集装箱基本信息进行分析,由此确定出堆场堆层高度的函数,使堆场中集装箱堆垛层数、堆场的空间利用率和装卸效率间达到一种均衡状态^[2]。Taleb-Ibrahimi 等(1993)介绍了进、出口集装箱在码头的装卸和存储策略,文章利用模拟仿真的方式对堆场中的出口集装箱箱区进行模拟,建立了相应的模型,并讨论了在不同的堆存原则下,通过求解得出堆垛的高度、资源利用率和倒箱率三者间的关系^[3]。Mosca 等(2000)利用人工智能的方法对码头前沿和堆场的空间问题进行研究分析,并根据相关假设和已知条件建立了相应的数学模型,通过对模型的求解验证港口当前的布局是否合理。Kim Hwan 等(2001)以自动化码头的装卸作业时间最小,整体的作业效率最高为目标,通过预先确定自动

化集装箱码头堆场的布局和码头设备性能,对堆场空间分配问题进行研究,提出了垂直型的集装箱堆场空间分配模型^[4]。Kap 和 Lee (2010) 指出块区是集装箱码头的基本的存储单位,本文通过起重机的性能和块区存储的要求优化块区的面积大小^[5]。

有很多的学者在堆存位置的选择或堆存策略的选择上进行了较多的研究: Dagano 和 De (1993) 以进口集装箱为研究对象,讨论了两种不同的集装箱堆存策略:一种是根据集装箱的尺寸堆存;另一种是根据先到先堆的原则,依据集装箱的到场时间逐次堆存^[2]。Kim 和 Bae (1998) 在当前堆场的配载计划和贝位布局都确定的情况下,将配位问题分解成为:贝位的匹配,计划的制定和任务分配三个问题,并以集装箱的移动次数最小为目标建立相应的模型^[6]。Kim 等 (2000) 通过考虑集装箱的重量、贝位内的堆存情况和现存的集装箱的重量三个因素,以装船作业过程中的集装箱倒箱次数最小为目标,利用加权的方法,建立倒箱问题的动态规划模型^[7]。Preston 和 Kozan (2001) 在先到先服务 (FCFS)、后到先服务 (LCFS) 和随机服务三种不同的集装箱班轮装卸作业顺序模式下,以船舶在港时间 (等待时间和作业时间总和) 最短为目标,将如何确定集装箱最优位置的问题转变成一个 NP-Hard 的混合整数规划模型 (MIP),通过 GA 进行求解。结合案例分析表明,如果堆场的设施设备布置合理,三种策略的船舶作业时间相差不大;当堆场的整体作业效率为 10%-15% 时,船舶的等待时间会随着堆场的作业效率线性变化^[8]。Ebru (2003) 以跨运车为研究对象,对跨运车运载计划的制定问题进行深入分析,以进口集装箱为研究主体,对堆场空间资源的分配问题进行研究,以船舶在港时间最短为目标,将该问题与岸桥调度相结合并将两者的集成问题划分成三部分:(1) 为每个到场集装箱分配合适的堆存空间;(2) 为每个到场集装箱分配合适的运输设备;(3) 岸桥作业的调度优化过程^[9]。Lim 和 Xu (2006) 以新加坡港为研究背景,利用启发式算法对港口堆场分配问题进行研究,建立了关键邻域搜索算法,该算法可以为港口的运输作业提供解决方案^[10]。Lee 等 (2006) 以堆场的装卸设备和运输设备的最大能力在上限,采用条件约束的方法,解决出口集装箱的箱位分配问题,达到装卸作业效率最高的目标^[11]。Kim 和 Hark 等 (2003) 通过对集卡进入堆场后产生的阻塞问题进行研究,以集卡的等待时间最短为目标,通过建立动力学模型对新进入堆场的集卡进行位置分配,并利用启发式算法对模型求解分析并得到预定的结果^[12]。Der-Horng Lee 和 Jin Xin Cao 等 (2009) 研究了集卡的调度和存储空间分配问题,并提出了一种新的方法将这两个问题集成在一起,目标是最小化集卡的总运行时间,并通过启发式算法验证方法的有效性^[13]。Der-Horng Lee 和 Jiang Hang 等 (2011) 以码头上总的运转成本最小为目的,建立了码头和堆场的空间分配问题并建立了相关的整数规划模型,该模型有两个主要的研究问题:码头上船舶的分配和堆场的分配问题,并通过两阶段的启发式算法获得可行解^[14]。

有很多国外学者从堆场装卸资源的角度对堆场的调度或分配问题进行研究: Chung 等 (1998) 首次提出了龙门吊的路径选择优化问题,以增加装卸设备的利用率、减少总的集装箱装卸时间为目的,建立相应的优化方法,并结合 Portland 港的相关数据验证理论的有效性^[15]。Kim 等 (1999) 以龙门吊为研究对象,通过对装卸服务区域进行限制 (只在一个箱区进行装卸作业) 研究龙门吊的路径优化问题。以集装箱的尺寸、重量等级和目的地为划分标准,对到达贝位的集装箱进行分类,并且假定同一种类型的集装箱可以分配到不同的贝位中,以龙门吊的总的作业时间 (准备时间和运行时间) 最短为目标建立相应的混合整数规划模型,并给出了相应的求解方法^[16]。W.C.Ng 等 (2005) 研究了在双向行驶车道下,给定一系列不同准备时间的作业的情况下多台堆场龙门吊的调度问题。通过考虑起重机干扰、车道共享等

因素,将调度问题转化为一个整数规划问题并且是一个 NP-Complete 问题,并通过基于动态规划的启发式算法来验证算法的有效性^[17]。W.C.Ng 和 K.L.Mark (2007) 以最小化装卸任务的总等待时间为目标,研究了不同准备时间的装卸作业任务下场桥的调度问题,并建立相应的数学模型,通过分支定界算法对模型进行求解并给出了算法的上下限^[18]。Henry Y.K.Lau 和 Zhao 等 (2008) 以自动化集装箱码头为研究对象,对多种自动化设备的集成调度进行研究,通过考虑集成作业的多种约束条件,建立相应的混合整数规划模型,并通过多层基因的算法 (MLGA) 获取到问题的近似最优解^[19]。

还有一部分学者从模拟仿真的角度对堆场的分配调度问题进行研究:Thiessen Doug 和 Santa Anna Jin 等 (1995) 利用仿真技术对堆场内的运输车辆建模,模拟在不同的状态下集装箱运输工具的运作模型,为建立洛杉矶港的港口设施设备提供理论依据^[20]。Ambroski 等 (2002) 利用仿真技术检测集装箱港口上装卸和运输环境是否存在瓶颈环节,并可以提供有效地可视化的结果^[21]。Katta G 等 (2005) 以港口装卸设备的利用率最小为目标,为了提升堆场的整体堆存效率和作业水平,建立集装箱后方堆场生产运作的决策支持系统,并建立相应的数学模型,通过对算法进行求解得出模型的最优解^[22]。Dekker (2007) 等利用模拟技术,对自动化码头上堆场的堆存策略进行研究,模拟的实验结果表明,分类堆放明显优于随机的堆放^[23]。Sannen 等 (2006) 将问题的研究进一步深化,对集装箱码头进行模拟,分析了在不同的堆存的策略下,影响轮胎式龙门吊的装卸作业效率的因素,结果表明影响最大的因素是龙门吊在贝位间移动的次数^[24]。

(2) 国内的研究现状

国内的集装箱运输起步于上世纪八十年代,而相关的研究则会更晚些,近些年来,随着集装箱业务的发展,特别是国内众多港口的吞吐量连续多年居世界的前十位,更引起了国内学者的关注。

从空间资源的角度看:张维英等 (2006) 以龙门吊的倒箱作业次数最小为目标,通过已知假设条件建立倒箱作业优化调度的数学模型,利用最小生成树法和启发式算法对数学模型进行求解,并对结果进行分析得出,模型可以获得理想的作业顺序,使港口的作业水平获得大幅提升^[25]。王斌 (2007) 以堆场的整体装卸效率最高为目标,通过滚动计划的方法,对堆场中集装箱的存储问题进行研究,以便能够将船舶上的集装箱分配到贝位当中,龙门吊仅需到预定的贝位中进行装卸作业即可^[26]。周鹏飞、方波 (2011) 以客户提取的集装箱为研究对象,通过对箱位的分配和优选,提出了在不确定条件下随机交箱序列的箱位分配方法,并利用启发式算法对问题进行求解,通过仿真模拟验证算法能够改善箱位的分配的效果^[27]。

从装卸资源的角度看:韩晓龙 (2005) 以龙门吊为研究对象,以龙门吊的分配数量和龙门吊的运行时间最短为目标建立相关的龙门吊路径优化和分配模型^[28]。李建忠 (2005) 以龙门吊的未完成作业的装卸时间和空闲时间最小为目标建立龙门吊的调度分配模型,通过拉格朗日算法对模型进行求解分析并得到预定的分配方案,并得出^[29]。苏君利 (2006) 以目前集装箱港口堆场应用最广泛的装卸设备 (轨道式龙门吊和轮胎式龙门吊) 为研究对象,从设备自身的性能、需求的硬件条件以及供电等方面对两种设备进行比较分析,为堆场设备的选取提供了依据^[30]。李斌 (2009) 通过哈佛体系结构和 Agent 技术建立集装箱港口的物流系统,基于混合流水车间的集装箱港口装卸作业调度的模型下,构建堆场起重机的动态调度优化模型,通过磁盘臂调度算法求解模型,并得出了有效的调度计划^[31]。

从模拟仿真的角度看:真虹 (1999) 应用并行工程的思想,利用相关的编程软件和绘图软件,设计

出可以适用于港口计划调度的动态仿真模拟系统，并可以对港口生产调度过程进行评价分析^[32]。张姝婕（2005）利用离散仿真的思想，提出了适用于各种装卸工艺的建模和仿真理论，并以港口的物流运营过程为基准建立了港口调度仿真优化模型^[33]。胡艳红（2011）以集装箱港口堆场的实际运作为研究背景，结合轨道式龙门吊和轮胎式龙门吊各自不同的作业特征，利用 Arena 仿真软件对运作过程进行模拟，研究比较不同的装卸设备对港口效率的影响^[34]。

§ 2-2 堆场倒箱作业

2-2-1 集装箱倒箱的概念

在堆场中，贝位是由若干个集装箱栈（stack）组成，在很多的文献中也称为“排”^[27]，每个栈是由一系列集装箱堆垛而成。当进行集装箱取箱作业时，如果目标集装箱的上方压有别的集装箱（我们称之为阻塞箱），就需要将压在目标箱上方的阻塞箱转移到其他堆垛的箱位上，这个作业过程称为一次倒箱。在实际的堆场作业当中，倒箱作业花费的时间很长，有时甚至超过了集装箱的装卸作业所需时间。因此，减少集装箱的倒箱时间，降低倒箱的次数是进行堆场空间资源分配需要考虑的关键因素之一。

2-2-2 堆场倒箱产生的原因

造成堆场中的集装箱出现倒箱现象的原因有很多，涉及到集装箱海洋运输的多个方面。但是经过归纳总结主要有三个方面的原因：1. 船公司或船公司的代理产生的原因；2. 港口自身或客户的因素；3. 其他的不确定性因素。

1. 船公司或船公司的代理产生的原因

（1）船公司在航行的过程当中，更改运输船舶，或者在某一个港口的挂靠时间过长或太短，就不可避免打乱港口和堆场的作业计划，造成预定任务的延缓或后续任务的提前，是堆场不得不进行后续的任务，从而产生集装箱的倒箱作业。

（2）船公司的代理在正常的工作中，与有关部分缺乏有效、及时的信息传递和沟通，使船公司在船舶舱位的安排和港口堆场的箱位的指派上缺乏计划性，不能均衡两者之间的关系，间接的造成堆场倒箱。

2. 港口堆场自身或客户的因素

（1）港口堆场的空间能力有限，不得不将集装箱堆放在预留给其他船舶的集装箱的位置，造成集装箱堆放的混乱产生倒箱作业。

（2）港口在办理进出口箱业务过程中，由于多种原因导致堆场不能得到详细的集装箱信息，堆场只能按照当前有限信息制定堆场作业计划，这就造成了堆场的计划往往不能满足船舶配载的要求或者客户提箱要求，造成集装箱的倒箱。

（3）客户或者托运人不能够提供准确的提箱时间，使堆场不能够合理的安排集装箱的放置顺序和堆放位置，在作业的协调上出现脱节，造成倒箱的作业。

（4）港口不能制定根据自身的情况制定合理的堆放规则，不同重量的集装箱不能按照优先级堆放。由于堆场接收客户或者托运人运送的集装箱的时间是随机的，从而导致堆场中轻箱压重箱的现象，导致倒箱作业的发生。

3. 其他的不确定性因素

这一方面主要是指在集装箱的运输过程当中，遇到突发、不可抗力情况造成的集装箱的倒箱。这些情况的发生大多数是不可避免的，但是也可以在一定程度上进行改善。

(1) 海关、有关检验检疫部门等国家的有关部门依据国家的法定程度，对集装箱进行检查，可能会造成装卸时间的延长，而产生倒箱，这种因素具有随机性，是不可避免的。

(2) 由于世界范围内的意外因素，在一定程度上对区域的经济造成影响，造成集装箱的滞留港口的时间增加，造成倒箱作业。

2-2-3 倒箱作业的国内外研究现状

(1) 国外研究现状

目前，国外的学者对于倒箱作业的研究主要集中在集装箱位置已知的情况下或者集装箱的装卸作业顺序已知的情况下，对集装箱进行堆存位置的分配。

Kim 等 (1999) 以进口集装箱为研究对象，建立了计算集装箱倒箱量的预测方法，通过对堆场中堆垛高度和倒箱次数之间关系的分析，以倒箱次数最小为目标建立相应的优化模型，并利用拉格朗日和次梯度优化算法对问题进行求解^[35]。

Kap 和 Young 等 (2000) 通过考虑堆场的配置和集装箱的重量两个因素，对到港的集装箱进行位置的分配，以堆场中集装箱的装卸作业过程产生的倒箱次数最小为目标，建立相应的动态规划模型并对模型进行求解分析^[36]。

Yusin Lee 和 Nai-Yun Hsu (2007) 研究了在确定堆场的布局和装船顺序已知的前提下堆场的倒箱问题，并建立相应的数学模型，该模型是一个整数规划模型，模型的目标是倒箱的次数最小^[37]。

Christopher 和 Belen 等 (2012) 以倒箱次数最小为目标，研究了堆场集装箱的倒箱问题并利用启发式算法对模型进行求解分析^[38]。

(2) 国内研究现状

杨淑芹和张运杰等 (2002) 研究了在给定规则条件下，如何堆存才能使集装箱倒箱次数最小的问题。通过分析给定的规则是：先到先放，轻箱压重箱，并通过启发式算法求解该问题^[39]。谢尘、何军良 (2004) 等通过对出口集装箱箱位问题的研究，以集装箱的压箱数最少为目标，根据多种箱混堆方式下集装箱箱位选择的分配策略，建立该问题的整数规划模型，并通过对模型的求解，结合仿真案例验证模型和算法的可行性^[40]。计三有和刘德鹏等 (2006) 首先对集装箱堆场倒箱原因进行分析，通过对堆存方式的优化处理，得出减少倒箱率的方法—搜索技术^[41]。徐骁勇和丁燕艳等 (2012) 通过对倒箱问题进行分析，论述倒箱问题属于 NP-Hard 问题，基本的蚁群算法求解该问题存在一定的难度，从概率决策机制和解的重构等几个方面对算法进行改进，文章最后通过与其他算法的比较，验证模型和算法的有效性和可行性^[42]。

§ 2-3 本章小结

本章通过对堆场空间资源和集装箱倒箱作业及其研究现状等进行综述，通过分析总结可以得出，我国在集装箱港口堆场空间资源的分配问题的研究较国外起步较晚，堆场方面的研究还很不充分。目前对

堆场空间资源的分配优化问题的研究,大多数是对进出口集装箱分开进行研究,而对集装箱混合堆放情况下的空间资源分配研究较少。另外,堆场中资源的分配过程都是动态变化的,而目前大多的研究都是在静态条件下对资源分配问题进行研究。此外,堆场系统是港口整体物流运作系统的一个重要组成部分,堆场空间资源的分配必须以提高港口整体的绩效水平为主要目标。但是现有很多的文献研究将问题集中到港口某一个子问题上,以个体的调度优化为目标,而忽视了港口整体的运营目标。

堆场空间资源的分配是对进入堆场的集装箱进行装卸作业的预排定,能够减少集卡的行驶距离,提高整个堆场的装卸作业效率;倒箱作业是进行空间分配时必须考虑的问题,倒箱次数减少,能够有效的减少龙门吊的作业。

第三章 集装箱堆场空间资源分配问题机制研究

§ 3-1 堆场空间资源分配问题

3-1-1 空间分配问题的概念

空间分配问题就是计划制定者根据当前空间的分配情况,依据设定的目标和企业的经营理念,按照事先确定的规则,对确定的空间进行合理有效的分配,实现资源与空间的有效结合。科学合理的空间分配计划可以有效的提高空间的利用效率,降低企业成本,大幅提升企业的效益。例如,在货运仓库的使用过程中,空间合理的分配利用不仅能够提高仓库空间的利用率,还可以使仓库内货物的位置更加合理,加快货物的流转速率,在一定程度上减少了库存率;在设施设备的布局选址问题上,科学合理的空间分配可以有效的提高生产和运输的效率。例如,对企业厂区的规划来说,首先需要考虑的问题就是对厂区进行科学合理的布局,企业各个子系统的布局的有效性直接决定了在企业正常运转时,物流和信息流的周转的流畅性,而对于企业而言,物流和信息流能否流畅的运转,将会直接影响企业的生产效率和产品成本,企业建设初期,布局方案的好坏可能对建设费用不会有很大的影响,但是到建设完成后,布局的好坏就会严重影响到企业的正常运作。

企业或管理者在进行空间分配时,往往会考虑很多方面的因素,而这其中最主要的因素就是时间,根据分配过程是否受时间的影响,我们可以将空间分配问题分为:(1)静态空间分配问题;(2)动态空间分配问题。

(1) 静态空间分配问题

静态空间分配问题就是说对某些变化的量进行限定,假设成为已知的量再进行空间的分配,在这个过程当中,时间不会影响到分配结果的选择。比如总的分配空间的大小都已知的情况下制定的分配方案,这种空间分配方案的制定的过程仅仅需要一次决策就可以。在现实当中,工厂设施设备的布局和总体的规划,物流运输过程中配送中心的选址问题都是比较典型的静态空间分配问题,这种类型的分配问题不受时间因素的影响。

(2) 动态空间分配问题

动态空间分配问题在分配时,充分考虑了时间因素对整个分配方案的影响,通过对某些特定量的限制,完成空间的分配。动态的空间分配问题,主要是指随着时间的推移,空间的供应和需求也会发生变化,因此,在进行这方面的分配时,分配方案的制定和实时更新都要跟随时间的变化。比如说集装箱港口堆场的堆存过程,堆存位置的确定都会受时间的影响。在进行空间分配时,时间的选取也有一定的规则,往往会选择一个特定的时间段,这个时间段的时间跨度必须合适,如果太短,就会使时间段数过多,降低预测的准确定;如果时间过长,就会增加分配过程中的不确定性因素,使方案的适应度降低。

3-1-2 集装箱堆场空间资源分配问题描述

港口的作业过程是围绕装卸船舶进行的,港口的设施设备的布置也必须以能够加快装卸船舶的进度为宗旨,才能有效提高港口的整体运作效率。为了降低船舶的等待时间和加快装卸船速率,集装箱港口除了有相应配套的设施设备外,对各种资源的有效合理的调度也是非常重要的,在这个过程当中,堆场

的资源优化调度起到了关键的作用。鉴于堆场在港口的角色和所起的作用，堆场业务中最基础的就是堆场空间资源的分配问题，它在一定程度上能够提高装卸船舶的作业效率。

集装箱堆场由多个箱区组成，箱区的大小根据港口的布局，可能会出现不同。每个箱区是由贝和栈（列或排）组成的，堆场箱区中贝位数和堆叠的层数不同，采取的装卸工艺和设备都会不同。如图 3-1 所示，表示的是一个堆场内部的装卸作业图。

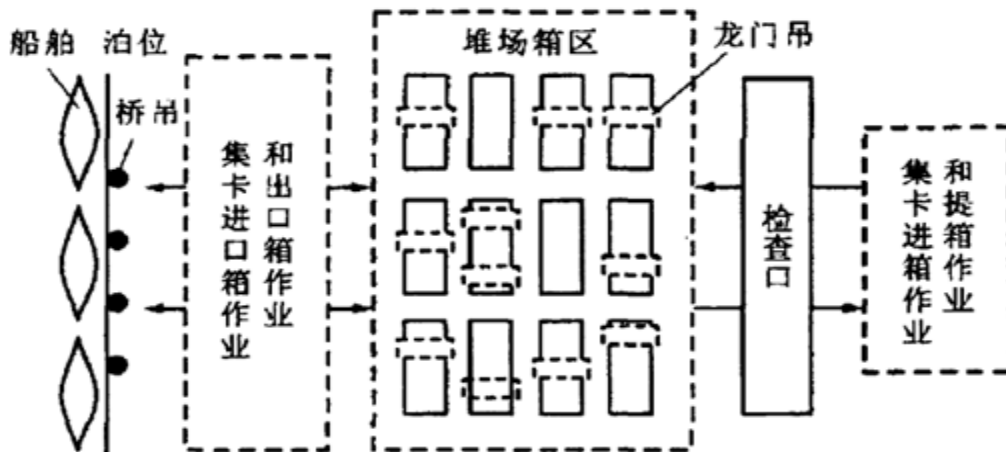


图 3-1 堆场内部装卸作业图

Fig3.1 The figure of the yard operation

目前，集装箱堆场的空间资源分配问题主要包含两方面的内容：箱区内贝位资源的分配和各个贝位中箱位资源的分配。这两方面的内容存在先后顺序，必须先进行贝位资源的分配，再进行箱位的分配。集装箱堆场空间资源的分配目的是合理分配贝位资源和箱位资源，减少装卸设备和运输设备的行驶距离，提高堆场的装卸效率。在进行箱区内贝位资源的分配和各个贝位中箱位资源的分配时，需要考虑多方面的因素，优化的目标也可能会存在多个。对于集装箱堆场空间资源分配这两个子问题，每个问题的优化目标都不相同。

堆场空间资源的合理的分配是以提高港口装卸效率和减少船舶的等待时间为目标，为了实现这个目标，可以采取的途径主要有：

- （1）减少堆场内部各种运输设备（主要是集卡）的运行距离；
- （2）均衡各个贝位在特定时间段内的作业量；
- （3）减少贝位内箱位分配时产生的倒箱量。目前港口上普遍接受和采取的方法是集装箱尽量放在靠近岸桥的箱区内。当然，减少堆场内龙门吊的行驶距离也是需要考虑的因素。

3-1-3 堆场资源分配问题的特性描述

（1）动态性

在集装箱港口上，装卸运输作业每天都在进行，每天都会有不同航线上的集装箱船舶到达港口，而装卸一艘船舶也需要一定的时间，这样就导致了港口上不间断的集装箱装卸作业。当船舶到达港口后，按照计划进行装卸船舶作业，集装箱经过运输，到达堆场进行堆存作业，然后再根据客户或货代下一步的计划，将集装箱运走，完成疏港作业，根据不同的客户或船代的不同的要求，即使是同艘船舶上的集装箱，在堆场中装卸作业的时间也会不同。由此可以看出，堆场空间资源的分配问题受时间的影响，是一个比较典型的动态空间分配问题。目前，世界范围内的集装箱海上运输都会采用班轮装载，班轮的特

性决定了船舶到达港口的时间是基本确定的，进入堆场的集装箱运输总量也是可以提前知道的。在这些条件的影响下，可以提前制定堆场的空间分配计划。

（2）依赖性

港口上与集装箱的装卸相关的作业过程有泊位分配、岸桥的调度、集卡的调度和堆场资源的分配等几个主要的环节。在堆场中，为了完成集装箱的装卸作业，需要将总任务分解，以均衡各个贝位间的作业量为目标，将任务分配到各个贝位中，贝位通过相互的协调完成整个堆场的装卸作业。堆场中贝位资源的分配和箱位资源的分配构成堆场空间资源分配问题，两者相互依赖。在实际作业中，先将集装箱运输到堆场的各个贝位上，然后再进行箱位的分配。由此，贝位分配输出的结果是箱位分配的输入数据，两者是“串行”的关系，并且存在严格先后顺序的约束。

§ 3-2 堆场的作业流程

港口集装箱装卸作业系统的主要构成要素有：到港船舶、泊位、岸桥、集卡和堆场装卸设备等。港口上集装箱的运输流动过程以这些要素作为节点，在节点间运输流动。其中，主要的流动过程包括：岸桥的装卸船作业、集卡的运输作业、堆场装卸作业、堆场中集装箱的堆存提取作业等。堆场中集装箱的作业流程如图 3-2 所示。

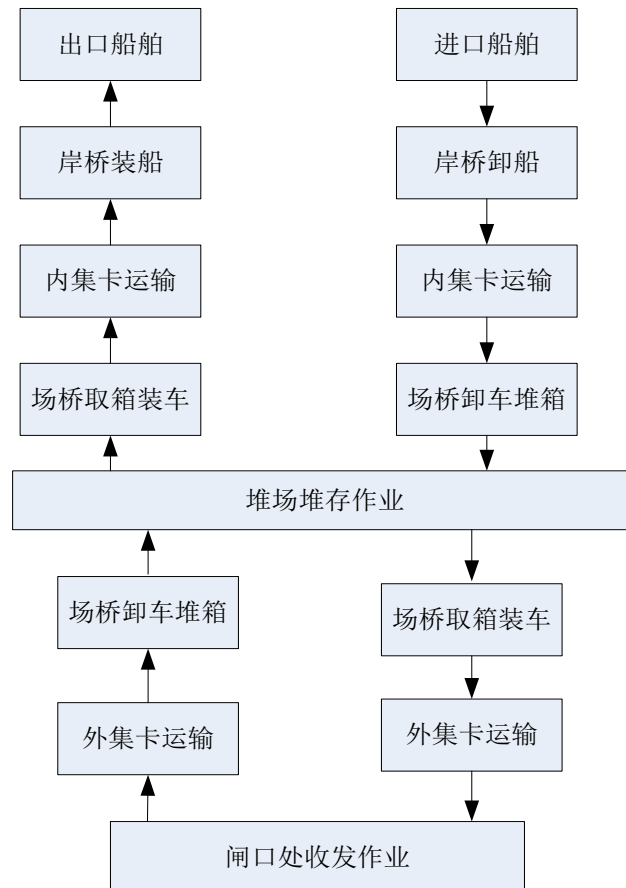


图 3-2 堆场的作业流程图

Fig3.2 The operation process of the yard

根据堆场中集装箱的作业流程，可以将流程细化为以下四种：

（1）出口集装箱的作业流程：堆场内的装卸设备将准备出口的集装箱吊到内集卡上，经由内集卡的运输，将出口箱运送至岸桥处，再由岸桥完成集装箱的装船作业。

（2）进口集装箱的作业流程：卸载集装箱的船舶预先停留在泊位处，装卸作业时岸桥将船舶上的集装箱吊取，放置到内集卡上，经由内集卡的运输将集装箱运送到堆场具体的贝位处，堆场装卸设备再将集装箱吊取，放置到预先确定的堆场箱位上。

（3）客户提取集装箱的作业流程：客户向港口提交提箱时间表，到达预定时间，外集卡运输到目的贝位处，场桥将要提取的目标集装箱吊上集卡，外集卡经过运输，送至闸口处并出港，运送到客户处。

（4）客户送入集装箱的作业流程：客户根据港口的送箱提前期，确定自己的送箱时间，之后客户将集装箱装载的集卡上，集卡运送至闸口处，完成进场的相关手续后，运送至贝位处，场桥再将集装箱吊取卸载到预定的箱位上。

§ 3-3 堆场空间资源分配的影响因素

根据对相关文献和国内几个大型的集装箱港口相关数据资料的分析，对堆场空间资源的分配主要的影响因素有两方面：从外部环境看，主要影响因素有：（1）集装箱属性；（2）船舶的相关信息；（3）港口其他属性；（4）客户信息。从堆场自身看，主要的影响因素是堆场自身的属性，主要包括：（1）相关设备的行驶距离；（2）倒箱率。构建的堆场空间资源分配问题的影响因素模型如图 3-3 所示。

（1）从外部环境的角度看：

1) 集装箱属性

在本文的研究中，集装箱的属性一般包括集装箱的重量、数量、种类和装卸作业时间等，而种类和装卸作业时间是受客户和船舶的影响，因此将装卸作业时间视为船舶和客户的影响因素，本研究中集装箱属性指集装箱的装卸总量和重量。随着现代通信技术的发展和进步，以及港口与船舶或者港口与船公司之间交流的深入，集装箱的属性往往在船舶到达港口之前就已经确定了。到港船舶上的集装箱数量决定了港口作业的各个环节中设备的使用数量和堆场中集装箱占用空间的大小。集装箱的数量越多，分配的岸桥也就越多，如果在给定的时间内不能完成装卸任务，那么就需要调用别的岸桥。与此同时，运输集装箱的集卡的数量也会增加，堆场空间分配问题的难度也会随之增加。集装箱的重量对集装箱在堆场中的位置产生重要的影响，如果分配不合理，会增加倒箱作业的次数，增加装卸设备的作业时间，延长集卡在场的等待时间。

2) 船舶信息

本研究中船舶的信息主要包括船舶的到港时间、船舶离港时间和船舶装卸集装箱总量等。由于海洋运输过程中的不确定性，以及运输过程中，船舶临时更改挂靠时间或挂靠港，集装箱船舶往往不能按照预定的时间到达港口，这样不仅仅会延误船舶的装卸时间，而且还会导致整个港口，尤其是堆场的作业次序的混乱，对港口整体的作业效率产生不良影响。船舶上集装箱的数量也会对港口的调度产生巨大的影响，集装箱越多需求的装卸和运输设备越多，这样产生的不确定性就会增加。

3) 港口其他属性

港口的其他属性主要是指港口除堆场外其他的作业系统，主要有泊位、岸桥和集卡等。这些设施设备大多数是不能在短时间内增加的，因此它们的调度优化方式是影响港口装卸作业效率的主要因素，同时随着港口的发展，港口设备之间的依赖性逐渐增加，它们之间的协同调度优化方式也会是以后的研究重点。

4) 客户信息

客户信息主要包括客户或货代提箱的时间、数量和客户或货代送箱的时间和数量。由于装船时间相对确定，堆场中往往会设置送箱的截止时间，所以客户的送箱的时间和数量往往能够按照计划进行；但是客户的提箱时间由于集装箱已经到达港口，虽然堆场也设置了最大的堆存时间，但是强制性较低，很多的客户或者船代往往不能够按照计划时间进行取箱，提取集装箱的时间具有随机性，这会造成堆场作业的混乱，同时这也是造成堆场倒箱的主要因素之一。

(2) 从堆场自身角度看：

堆场的信息主要包括箱区的位置，箱区贝位的数量，堆层的高度和贝位的堆存能力等。这些因素是对贝位和箱位的分配造成影响的主要因素，也是直接因素。这些因素往往在堆场的建设的初期就已经确定，因此它们之间的合理的调度是主要考虑的因素，在调度过程中主要考虑使装卸过程产生的倒箱率和作业设备之间的行驶距离最小。

1) 倒箱率

倒箱作业是集装箱港口上一个常见的作业环节，也是一个不可避免的作业环节，它存在于堆场的装船和客户提箱等多个作业环节。在进行装船或者客户提箱作业时，如果要提取的目标箱的上方还压有另外的集装箱，这个状态就是集装箱间的压箱情况。为了提取下方的目标集装箱，必须先将上方的集装箱通过龙门吊吊取到贝位别的栈的箱位上去，因此就需要进行倒箱作业。堆场内倒箱率的高低会直接影响龙门吊的装卸效率，对装船的效率和客户提箱的效率产生影响，从而间接影响港口的整体作业效率。例如，在装船的过程中，如果堆场的倒箱率过高，就会增大集卡在堆场贝位上的等待时间，进而一段时间后，等待运输集装箱的集卡的数量过多，这样不仅会增加堆场内交通运输的压力，还会增加岸桥的等待时间，增大了船舶在港的等待时间。因此，为了提高港口的装卸船效率，提升港口的整体竞争力，必须尽可能的减少堆场内倒箱现象的发生。

(2) 作业设备的行驶距离

在堆场中主要的作业设备主要有两种：运输车辆和装卸设备。

运输车辆可以分为两种，第一种是不能垂直“吊取”集装箱。这种车辆的装卸作业主要由门式起重机或者是岸边吊桥完成。这种主要有集卡，拖车，AGV等。AGV是一个能在公路上行驶的自动化运输车辆，由电线和异频雷达接收器组成。AGV运输系统的实施需要相应系统搭配，需要高额的投资，它们仅仅应用在人工成本较高的地方。如鹿特丹的ECT港和汉堡的HHLA港都应用了AGV。第二种类型的运输车辆是能够“吊取”集装箱。这种类型主要有跨运车(SC)、叉车和正面吊。这种类型的运输车辆不仅可以运输集装箱，还可以在堆场内堆积集装箱。因此，在某些情况下，它们可以充当起重机使用。跨运车可以运输或堆积两个20TEU或者一个40TEU的集装箱。由于自身的这些性能，最近几年，自动化跨运车也开始起步。目前，在澳大利亚的Patrick港和Brisbane港都应用了自动化跨运车系统。目前我国使用范围最广的还是集卡系统，由于集卡数量众多，在集装箱运输量比较大时，集卡的运输距离过大，

不可避免的会降低运输效率，从而降低岸桥的装卸效率，使船舶的等待时间和装卸时间增加，影响港口整体的运营效率，因此应该尽量减少集卡的行驶距离。

集装箱港口堆场的装卸设备也存在多种，大多数港口主要以轮胎式龙门吊和轨道式龙门吊为主，部分港口还会以正面吊作为主要的装卸设备，目前我国的集装箱堆场普遍采用的是轮胎式龙门吊。堆场中，由于龙门吊设备比较庞大，移动过程花费的时间很多，因此造成的移动成本也比较昂贵。当在集装箱进港的数量比较多时，龙门吊的频繁移动不仅会增加龙门吊自身的成本，还会增大集卡的等待时间，造成集卡排队的状况。因此，龙门吊在进行装卸作业时，应该尽量减少龙门吊的移动距离。在堆场的调度优化中，装卸设备的性能和作业效率也会影响到堆场的调度，但受限于本文的研究内容，在此不对装卸设备的进行过多详细的阐述。

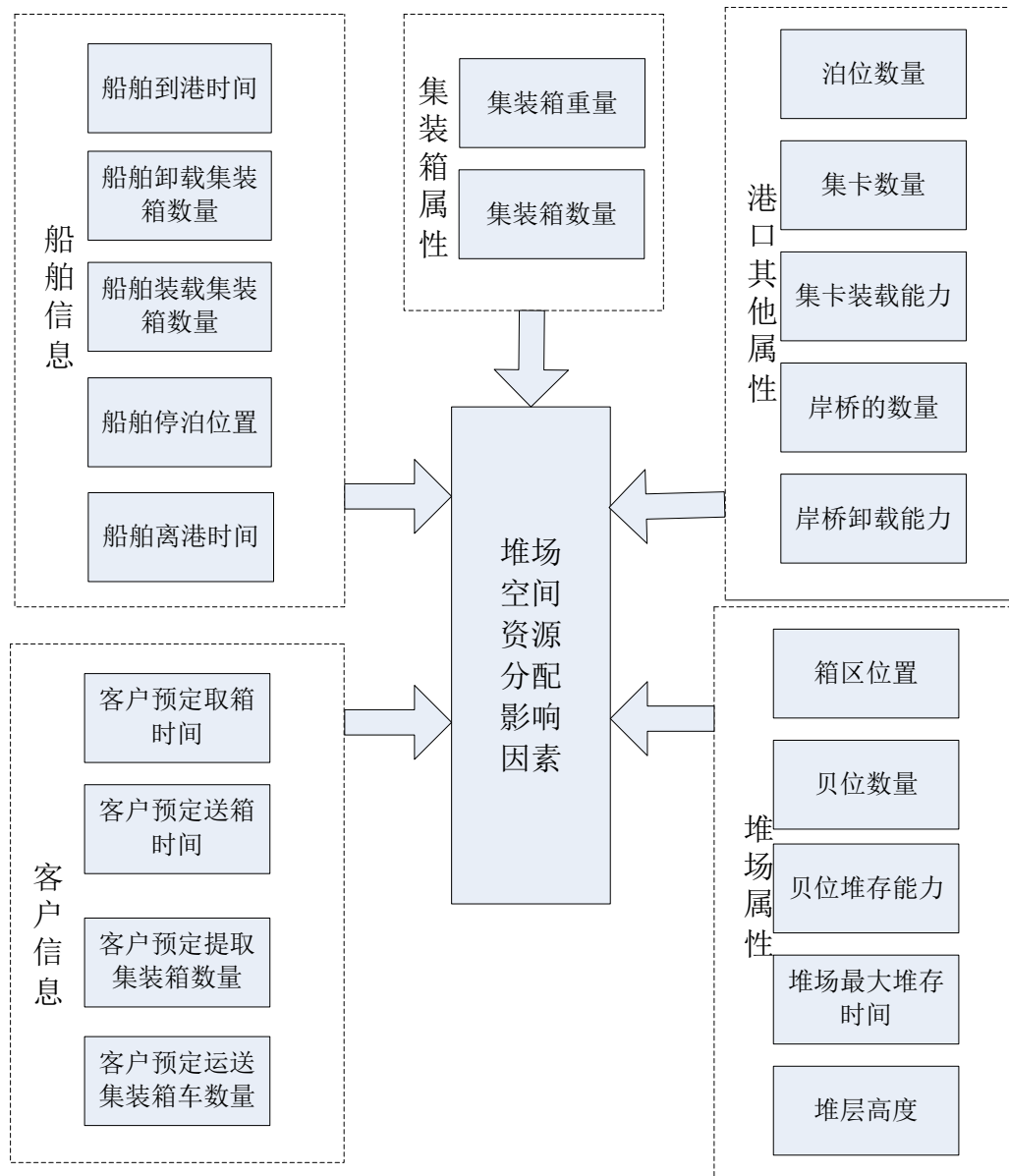


图 3-3 堆场空间资源分配问题的影响因素模型

Fig3.3 The factor of the resource allocation problem of the yard space

§ 3-4 堆场空间资源分配概念模型

堆场空间资源的分配是为了提高堆场的装卸效率，减少装卸作业时间，对进入堆场的集装箱的分配合适的空间资源。堆场空间资源分配主要由贝位资源分配和箱位资源分配两部分组成。

(1) 贝位资源分配

首先确定需要进行装卸船作业的集装箱的数量和到达堆场的时间以及客户需要进行提送箱作业的集装箱的数量和到达堆场的时间，然后确定能够满足装卸要求的贝位，再根据船舶停靠泊位到贝位的距离，为船舶分配贝位。

(2) 箱位资源分配

在确定分配给贝位的集装箱数量后，需要根据进入堆场的集装箱的装卸作业时间和集装箱的重量，以及离开堆场的集装箱的作业时间，以集装箱的倒箱次数最小为目标，确定集装箱具体的堆放位置。

由于堆场资源分配问题的复杂性，对贝位资源分配和箱位资源的分配影响要素的选择以其基本的约束条件为主；然而在实际中两者是相互影响相互制约的，因此通过对贝位资源的分配和箱位资源分配两个问题的影响因素进行分析，以作业量的均衡、运行距离最短和倒箱次数最小为目标，建立了两者之间的因素影响表如表 2-1 所示。

表 3-1 堆场空间资源分配影响因素表

堆场空间资源分配影响因素		
分配问题类型	贝位资源分配	箱位资源分配
问题描述	为到达堆场的各种不同种类的集装箱分配合适的贝位	为到达贝位的集装箱分配合适的箱位
影响要素	船舶：船舶到港时间和装卸时间 船舶停靠泊位的位置 客户：客户送箱和提箱时间 堆场：贝位的容量、贝位的位置、贝位	集装箱装卸作业时间 集装箱的重量
约束条件	贝位最大堆存能力的约束 集卡运输能力的约束	堆垛高度的限制 相邻堆垛高度差限制
目标	各个贝位间作业总量的均衡 运输设备和装卸设备的行驶距离最短	倒箱次数最小 减少装卸设备的作业时间

通过从外部环境和堆场自身两方面分析对堆场空间资源的分配造成的影响，构建了堆场空间资源分配问题的概念模型，如图 3-4 所示。

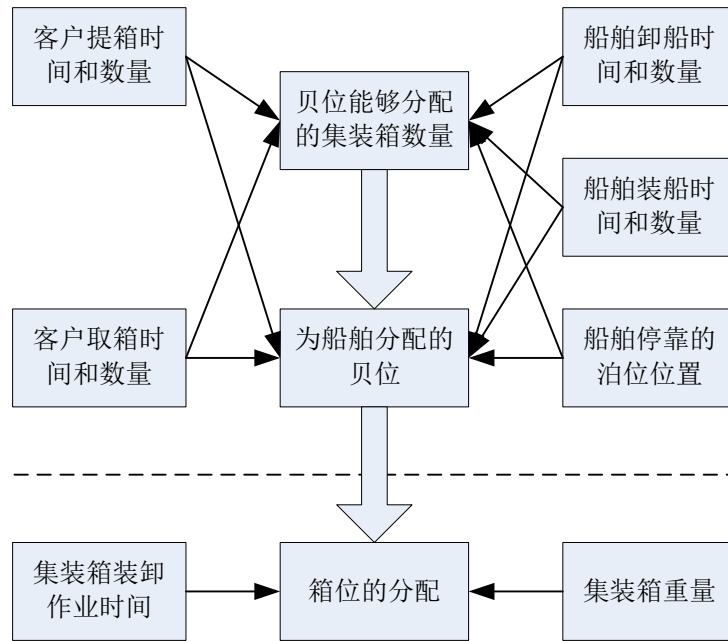


图 3-4 堆场空间资源分配问题的概念模型

Fig3.4 The concept model of the resource allocation problem of the yard space

§ 3-5 本章小结

本文首先对堆场空间资源分配问题进行描述，确定堆场空间分配问题的主要研究内容及动态性特征。第二节主要介绍堆场中集装箱作业的流程，从出口箱装船、进口箱卸船、客户送箱和客户取箱四个方面进行阐述；然后总结归纳影响堆场空间资源分配问题的因素，从外部环境和堆场自身两个角度对因素进行分析总结；最后通过对贝位资源分配和箱位资源分配两者直接的关系进行描述和分析，将问题抽象简化并构建堆场空间资源分配问题的概念模型。

第四章 集装箱堆场贝位资源分配模型研究

§ 4-1 引言

随着近些年世界范围内经济的复苏,集装箱的吞吐量也迎来了新的发展高峰,面对港口上集装箱装卸量的大幅增加,对港口堆场空间资源的需求也大幅上升。如果船舶到港后,卸载的集装箱没有一个科学合理的堆场空间分配计划,势必会大幅增加船舶的等待时间,而如果不按照原来的计划装卸船舶,必然会导致堆场内集卡的阻塞现象,进而影响港口接下来的一系列的装卸作业过程,对整体的运作效率造成巨大的影响。由此可见,集装箱船舶到达港口后,为了确保船舶能够正常快速的装卸,港口除了配置合理的泊位、岸桥和集卡等设施设备外,还需要对堆场内的空间资源进行合理的优化调度,才能确保港口高效的装卸作业水平。

本文根据现有相关的文献的研究,对堆场中贝位资源的分配问题进行深入研究,以均衡各个箱区贝位间的装卸作业总量为目标,对港口上的贝位资源进行合理的分配调度,旨在建立一个科学合理高效的集装箱贝位资源分配模型。

§ 4-2 集装箱堆场堆存方式的选择

根据堆场中集装箱的作业特点,可以将集装箱分成进口箱、出口箱和中转箱三种类型。目前,在堆场中,使用的比较多的港口堆场空间资源的调度方式主要有两类:(1)进口箱和出口箱分开堆存的方式;(2)多种集装箱混合堆放的形式^[44]。在堆场中,还有一类集装箱称为特殊集装箱,例如危险品箱和冷冻集装箱等,针对这种类型的集装箱,堆场都会设置专用的箱区和堆存位置,而空箱一般不会堆放在堆场中,也会指定特殊的箱区堆存,因此,本文中对于这种有固定特殊位置的特殊集装箱不做考虑,主要以通用集装箱为研究对象。

4-2-1 进出口集装箱分开堆存方式

进出口集装箱分开堆存的方式是一种较为传统的堆存方式,在 21 世纪前,这种堆存方式是非常普遍的。通过对进入堆场的集装箱进行类型的划分,根据船舶的类型和运行的航线将集装箱分开堆放。在集装箱进入堆场前,为了加快岸桥装卸船舶的速率,进口集装箱大多数堆放在前方堆场;当进入堆场后,为了方便客户提取和运送集装箱,一般进口集装箱就会堆放到后方堆场。当然,随着港口的发展,分开堆存的方式应用范围受到更多的限制,这种方式仅仅在堆场空间特别充裕的港口采用,它的好处是可以降低装卸作业的复杂程度,减少倒箱的次数。

1) 集装箱前方堆场

前方堆场(Marshalling Yard)是指为了加快岸桥装卸集装箱船舶的速率,在堆场中靠近港口前方的位置设定的堆存集装箱的场所^[43]。前方堆场主要的作用是:对于进口箱而言,主要是将卸载的集装箱进行临时的存储,以加快卸船速率;对于出口箱而言,主要是在船舶到港前,将出口箱按照船舶的积载

计划的要求,依照作业的次序,堆放集装箱,在船舶到港后,加快装船的速率。

2) 集装箱后方堆场

集装箱后方堆场(Container Yard)是对集装箱进行保管或者将集装箱交予客户或船代,并可以堆放进出口集装箱的场所,是堆场的一个重要组成部分。世界上很多的国家的港口中,堆场并没有前后之分,只有一个统称的堆场。

进出口箱分开堆存方式对于空间的硬性要求使得这种方式的适用度逐步降低,由于集装箱吞吐量的发展和堆场空间资源的发展并不是成比例的,尤其是我国几个大型港口的发展如上海港、宁波—舟山港等,问题更加突出,很多的堆场都是满负荷的作业。传统的进口箱分开堆存的方式越来越不能满足当前装卸作业的需求。所以,现在的研究重点逐渐从进口集装箱分开堆存的方式转移到多种集装箱混合堆存的方式上来。

4-2-2 多种集装箱混合堆存方式

随着近些年港口吞吐量的飞速发展,港口在扩大堆场的堆存空间和提升装卸水平方面受到了越来越大的压力和挑战,由于集装箱吞吐量的发展和堆场空间的发展并不是成比例的,若采取分开堆存的方式,势必会使实际的需求作业远远大于堆场的装卸能力,这样就会导致堆场成为限制港口发展的主要因素之一。因此,当堆场堆存的面积不能持续扩大时,进出口集装箱分开堆存的方式不能满足现实的需求,进而采取多种集装箱混合堆存的方式。当采取混合堆放的方式时,堆场中并没有设置缓冲区暂存刚刚卸载的集装箱,而是将集装箱直接运输到堆场的贝位中,再堆存到箱位上,多种集装箱混合堆放的方式可以有效地提高空间资源的利用率,在许多的集装箱港口上取得了显著的效果。

多种集装箱混合堆存的方式适应于堆场的空间资源相对比较紧张的港口,这种方式通过充分合理的利用堆场空间资源,提升堆场的整体利用率。但是这种堆存方式也存在缺陷,由于没有设置暂存区域,刚刚到达港口的集装箱就需要直接堆存到堆场中,而且多种集装箱混合堆存的方式设置的堆存高度相对较高,这就不可避免的会增加贝位内集装箱的倒箱作业次数,降低设备的整体装卸效率,进而影响港口的实际作业能力。因此,本文采用多种集装箱混合堆存的方式,为到达堆场的集装箱分配合适的贝位,使贝位间的装卸作业总量到达均衡,提高堆场的整体作业水平。

4-2-3 堆场中集装箱类型的划分

根据堆场中集装箱装卸作业流向的不同,可以将集装箱的作业过程划分为客户送箱的集港作业、客户取箱的疏港作业、卸船集装箱的进场作业和装船集装箱的离港作业。对于进入堆场的集装箱,堆场需要为其分配贝位和箱位,对于出场的集装箱,原来集装箱所占用的箱位就会得到释放。因此,堆场空间资源的分配过程需要综合考虑集装箱的进场作业和出场作业,为进入堆场的集装箱分配合适的贝位和箱位。针对上述装卸作业过程中集装箱所处的不同状态,可以将集装箱划分为以下几种类型:

进口集装箱(VSDS):船舶已经到达港口,进口的集装箱还在船舶上,等待岸桥的卸载,卸载后经由集卡的运输,运至堆场完成堆存作业^[43]。

出口集装箱(VSLD):船舶已经到达港口,出口集装箱还在堆场中,等待龙门吊的装载,装载后经由集卡的运输,运至岸桥处,完成装船作业。

客户进箱(CYGD):客户或货代将集装箱运送至港口,还未分配堆场箱位的出口集装箱,等待外集卡的运输或者已经到达堆场在货运站且完成拼箱作业再运输堆场完成堆存作业即可。

客户提箱 (CYPI)：经过卸载后已经在堆场中放置的进口集装箱，客户或货代还未提取，等待外集卡的运输完成疏港作业。

中转箱 (Tranship Container)：目前堆场中主要有两种类型的中转箱：一种是需要进行卸船作业，然后运输进入堆场堆存的进口中转集装箱 (VSTC)，另一种是已经在堆场中堆存，等待其他的船舶到港后，进行集装箱的转换作业的出口中转箱 (CYCT)。

通过上述的分析，堆场中主要的集装箱类型及作业流动过程如图 4-1 所示：

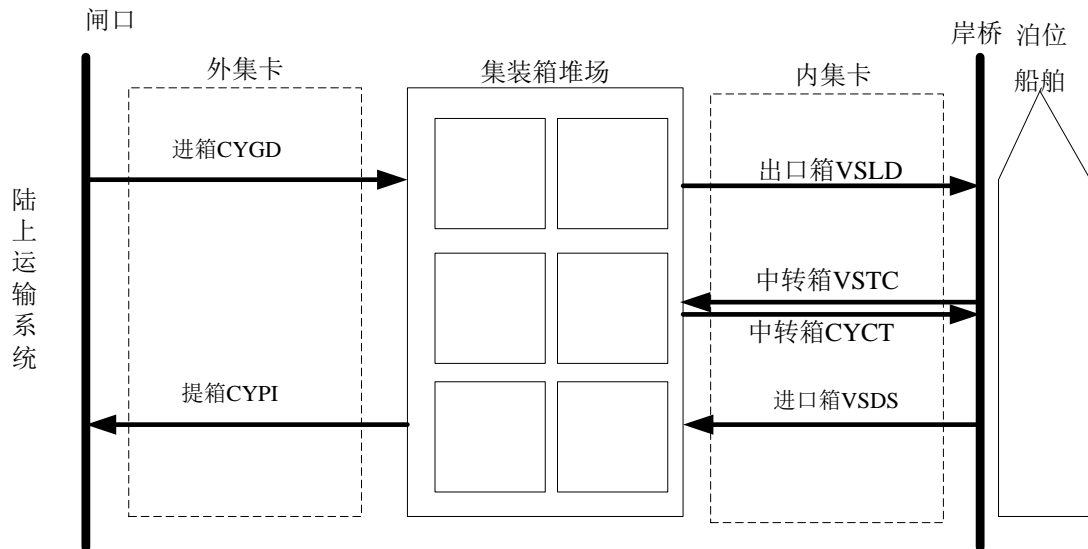


图 4-1 集装箱堆场主要箱型及各自作业流动过程图

Fig4.1 Container type and operation flow in container yard

为了提高空间资源分配的有效性，除了需要考虑堆场当天的进出场集装箱的信息外，还需要结合未来一段时间的集装箱信息。通过对相关文献资料的调查研究以及现实数据的分析，大约 54% 以上的进口箱和大约 75% 以上的出口箱在港口堆放的时间不会超过 3 天，因此，我们选择三天作为作业量分配的决策周期，按照每八个小时或者十二个小时为一个时间段，将一天划分成三个或者两个时段^[26]。此外，港口信息每天不断的变化导致堆场中的信息也需要及时更新，这导致堆场中资源的分配方案也根据作业要求发生改变，因此，本文在进行堆场空间资源分配时采用滚动计划的方式。

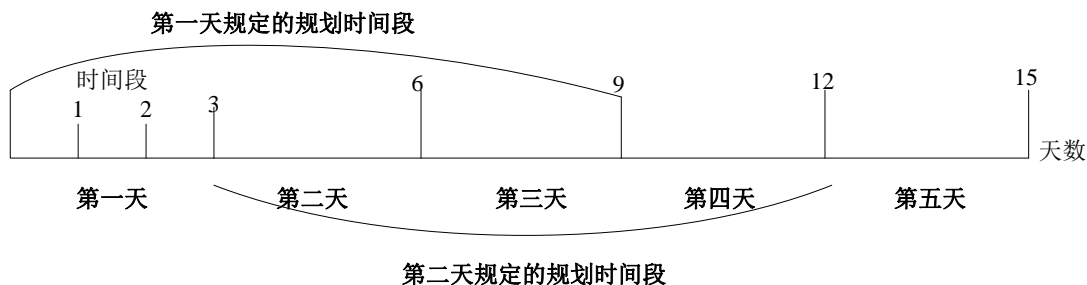


图 4-2 集装箱堆场箱区滚动计划模式图

Fig4.2 Picture of roll-planning model in container terminal

在本章节中，通过采用滚动计划的方法和两阶段的方法，通过建立相应的数学模型均衡各个箱区的装卸作业量，解决到场集装箱的堆场空间资源分配问题，具体的过程步骤如图 4-3 所示。

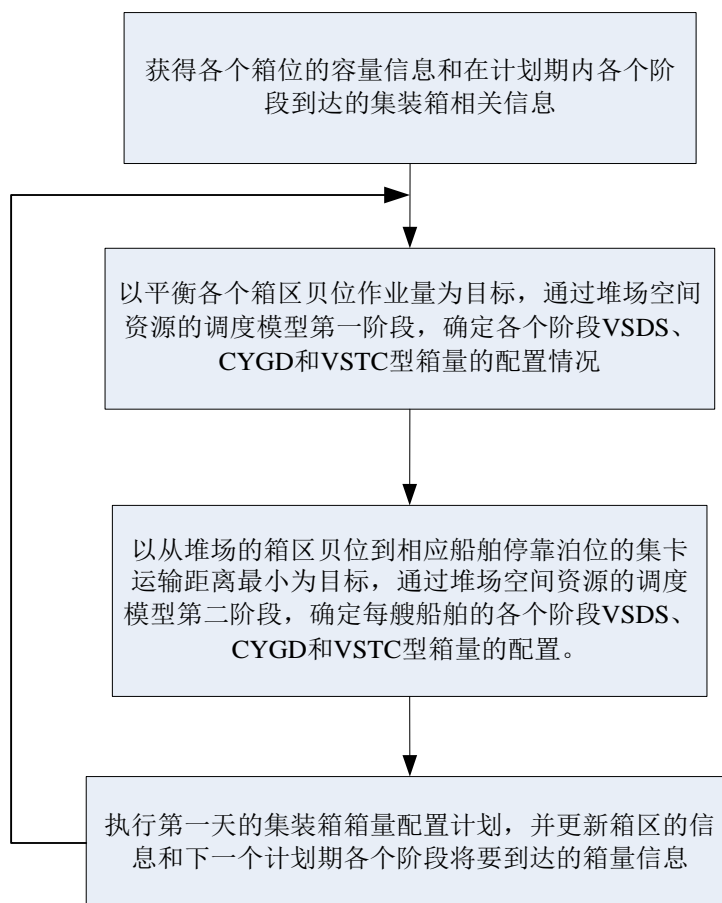


图 4-3 堆场空间资源的分配问题解决方案

Fig4.3 The solution to the problem of the yard space resource allocation

§ 4-3 港口堆场贝位资源的分配模型的建立

本章以堆场的贝位资源为研究对象，进行空间资源分配，并采用两阶段的方法对该问题进行求解，因此，建立的相对应模型也是由两部分组成。第一个阶段：以均衡每个阶段各个贝位的集装箱装卸总量为目标，作业量的均衡可以有效地减少装卸设备的行驶距离，提高设备的利用率。

贝位资源分配模型的第一阶段：

1, 相关符号的说明：

B ：表示计划期内分配的堆存集装箱的箱区数量；

T ：表示每个计划期包含的时间段数；

j ：表示贝位的编号；

i ：表示箱区的编号；

E_i ： $E_i=[1,2,\dots,H_i]$ 表示箱区 i 中贝位数量的集合， $(1 \leq i \leq B)$ 。

C_{ij} ：表示箱区 i 中贝位 j 的集装箱堆存总数(也就是贝位的最大堆存能力) $(1 \leq i \leq B, 1 \leq j \leq H_i)$ ；

V_{ij1} : 表示在滚动计划开始前, 在箱区 i 贝位 j 当中已经堆放的集装箱数量 ($1 \leq i \leq B, 1 \leq j \leq H_i$);

P_{ijt}^0 : 在滚动计划的第 t 阶段开始前, 就已经堆放在箱区 i 贝位 j 当中, 在第 t 阶段客户或船代将要运走的提箱型集装箱 (CYPI) 的数量 ($1 \leq t \leq T, 1 \leq i \leq B, 1 \leq j \leq H_i$);

L_{ijt}^0 : 在滚动计划的第 t 阶段开始前, 就已经堆放在箱区 i 贝位 j 当中, 在第 t 阶段要进行装船作业的出口集装箱 (VSLD) 的数量 ($1 \leq t \leq T, 1 \leq i \leq B, 1 \leq j \leq H_i$);

CT_{ijt}^0 : 在滚动计划的第 t 阶段开始前, 就已经堆放在箱区 i 贝位 j 当中, 在第 t 阶段要重新进行装船作业的中转集装箱 (CYCT) 的数量 ($1 \leq t \leq T, 1 \leq i \leq B, 1 \leq j \leq H_i$);

G_{ik} : 在滚动计划的第 t 阶段从货代、顾客或者陆港处将集装箱运输到港口, 在第 $t+k$ 阶段进行装船作业的进箱型集装箱 (CYGD) 的数量 ($1 \leq t \leq T, 0 \leq k \leq T-t$);

D_{ik} : 在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并进入堆场, 在第 $t+k$ 阶段客户或船代将要运走的进口集装箱 (VSDS) 的数量 ($1 \leq t \leq T, 0 \leq k \leq T-t$);

TC_{ik} : 在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并进入堆场, 在第 $t+k$ 阶段重新进行装船作业的中转集装箱 (VSTC) 的数量 ($1 \leq t \leq T, 0 \leq k \leq T-t$);

G_t : 在滚动计划的第 t 阶段从货代、顾客或者陆港处将集装箱运输到港口, 在计划期外进行装船作业的进箱型集装箱 (CYGD) 的数量 ($1 \leq t \leq T$);

D_t : 在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并进入堆场, 在计划期外客户或船代将要运走的进口集装箱 (VSDS) 的数量 ($1 \leq t \leq T$);

TC_t : 在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并进入堆场, 在计划期外重新进行装船作业的中转集装箱 (VSTC) 的箱数量 ($1 \leq t \leq T$);

相关的决策变量描述如下:

α_{ijt} : 在滚动计划的第 t 阶段从货代、顾客或者陆港处将集装箱运输到港口并堆存在箱区 i 贝位 j 中, 在计划期外进行装船作业的进箱型集装箱 (CYGD) 的数量 ($1 \leq t \leq T, 1 \leq i \leq B, 1 \leq j \leq H_i$);

β_{ijt} : 在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并运输到堆场且堆存在箱区 i 贝位 j 中, 在计划期外客户或船代将要运走的进口集装箱 (VSDS) 的数量 ($1 \leq t \leq T, 1 \leq i \leq B, 1 \leq j \leq H_i$);

γ_{ijt} ：在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并运输到堆场且堆存在箱区 i 贝位 j 中，在计划期外重新进行装船作业的中转集装箱（ $VSTC$ ）的数量（ $1 \leq t \leq T$ ， $1 \leq i \leq B$ ， $1 \leq j \leq H_i$ ）；

G_{ijk} ：在滚动计划的第 t 阶段从货代、顾客或者陆港处将集装箱运输到港口并堆存在箱区 i 贝位 j 中，在第 $t+k$ 阶段进行装船作业的进箱型集装箱（ $CYGD$ ）的数量（ $1 \leq t \leq T$ ， $1 \leq i \leq B$ ， $1 \leq j \leq H_i$ ， $0 \leq k \leq T-t$ ）；

G_{ijt} ：在滚动计划的第 t 阶段从货代、顾客或者陆港处将集装箱运输到港口，并堆存在箱区 i 贝位 j 中的进箱集装箱（ $CYGD$ ）的数量（ $1 \leq t \leq T$ ， $1 \leq i \leq B$ ， $1 \leq j \leq H_i$ ）；

D_{ijk} ：在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并运输到堆场且堆存在箱区 i 贝位 j 中，在第 $t+k$ 阶段客户或船代将要运走的进口集装箱（ $VSDS$ ）的数量（ $1 \leq t \leq T$ ， $1 \leq i \leq B$ ， $1 \leq j \leq H_i$ ， $0 \leq k \leq T-t$ ）；

D_{ijt} ：在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并运输到堆场且堆存在箱区 i 贝位 j 中的进口集装箱（ $VSDS$ ）的数量（ $1 \leq t \leq T$ ， $1 \leq i \leq B$ ， $1 \leq j \leq H_i$ ）；

TC_{ijk} ：在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并运输到堆场且堆存在箱区 i 贝位 j 中，在第 $t+k$ 阶段重新进行装船作业的中转集装箱（ $VSTC$ ）的数量（ $1 \leq t \leq T$ ， $1 \leq i \leq B$ ， $1 \leq j \leq H_i$ ， $0 \leq k \leq T-t$ ）；

TC_{ijt} ：在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并运输到堆场且堆存在箱区 i 贝位 j 中的中转集装箱（ $VSTC$ ）的数量（ $1 \leq t \leq T$ ， $1 \leq i \leq B$ ， $1 \leq j \leq H_i$ ）；

L_{ijt} ：在装卸作业过程中已经堆放在箱区 i 贝位 j 中，在滚动计划的第 t 阶段内要进行装船作业的出口集装箱（ $VSLD$ ）的数量（ $1 \leq t \leq T$ ， $1 \leq i \leq B$ ， $1 \leq j \leq H_i$ ）

P_{ijt} ：在装卸作业过程中已经堆放在箱区 i 贝位 j 中，在滚动计划的第 t 阶段内客户或船代将要运走的提箱型集装箱（ $CYPI$ ）的数量（ $1 \leq t \leq T$ ， $1 \leq i \leq B$ ， $1 \leq j \leq H_i$ ）；

CT_{ijt} ：在装卸作业过程中已经堆放在箱区 i 贝位 j 中，在滚动计划的第 t 阶段内要重新进行装船作业的中转集装箱（ $CYCT$ ）的数量（ $1 \leq t \leq T$ ， $1 \leq i \leq B$ ， $1 \leq j \leq H_i$ ）；

V_{ijt} ：在滚动计划的第 t 阶段开始时刻，就已经堆放在箱区 i 的贝位 j 中的集装箱总量（ $1 \leq t \leq T$ ， $1 \leq i \leq B$ ， $1 \leq j \leq H_i$ ）；

Y_{ijt} : 在滚动计划的第 t 阶段, 港口在箱区 i 的贝位 j 中要进行的装卸作业的集装箱总量, ($1 \leq t \leq T$, $1 \leq i \leq B$, $1 \leq j \leq H_i$), 其中 $Y_{ijt} = D_{ijt} + P_{ijt} + G_{ijt} + L_{ijt} + TC_{ijt}$ 。

2, 模型建立如下:

通过综合考到场的多种集装箱, 以均衡贝位间的装卸总量为目标, 建立如下的数学模型:

$$\text{Min}\{\text{Max}(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^{H_i} Y_{ijt}) - \text{Min}(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^{H_i} Y_{ijt})\}$$

模型的约束条件:

(1) 集装箱装卸数量的约束限制:

$$D_{tk} = \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^{H_i} D_{ijtk}, \quad t=1,2,\dots,T, \quad k=0,1,2,\dots,T-t \quad (1)$$

约束条件(1)保证了在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并进入堆场, 在第 $t+k$ 阶段客户或船代将要运走的进口集装箱 ($VSDS$) 的数量等于在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并运输到堆场且堆存在箱区 i 贝位 j 中的同种集装箱的数量总和。

$$G_{tk} = \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^{H_i} G_{ijtk}, \quad t=1,2,\dots,T, \quad k=0,1,2,\dots,T-t \quad (2)$$

约束条件(2)保证了在滚动计划的第 t 阶段从货代、顾客或者陆港处将集装箱运输到港口, 在第 $t+k$ 阶段进行装船作业的进箱型集装箱 ($CYGD$) 的数量等于在滚动计划的第 t 阶段从货代、顾客或者陆港处将集装箱运输到港口并堆存在箱区 i 贝位 j 中的同种集装箱的数量总和。

$$TC_{tk} = \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^{H_i} TC_{ijtk}, \quad t=1,2,\dots,T, \quad k=0,1,2,\dots,T-t \quad (3)$$

约束条件(3)保证了在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并进入堆场, 在第 $t+k$ 阶段客户或船代将要运走的进口集装箱 ($VSDS$) 的数量等于在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并运输到堆场且堆存在箱区 i 贝位 j 中的同种集装箱的数量总和。

$$D_{ijt} = \sum_{k=0}^{T-t} D_{ijtk} + \beta_{ijt}, \quad i=1,\dots,B, \quad t=1,\dots,T, \quad j=1,\dots,H_i \quad (4)$$

约束条件(4)保证了在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并运输到堆场且堆存在箱区 i 贝位 j 中的进口集装箱 ($VSDS$) 的数量等于在滚动计划的第 t 阶段内分配到相同的贝位, 在 T 计划期内客户或船代将要运走的进口集装箱 ($VSDS$) 的数量与计划期外客户或船代将要运走的进口集装箱 ($VSDS$) 的数量之和。

$$G_{ijt} = \sum_{k=0}^{T-t} G_{ijtk} + \alpha_{ijt}, \quad i=1,\dots,B, \quad t=1,\dots,T, \quad j=1,\dots,H_i \quad (5)$$

约束条件(5)保证了在滚动计划的第 t 阶段从货代、顾客或者陆港处将集装箱运输到港口, 并堆

存在箱区 i 贝位 j 中的进箱集装箱 (CYGD) 的数量等于在滚动计划的第 t 阶段分配到相同的贝位, 在 T 计划期内将要进行装船作业的进箱型集装箱 (CYGD) 的数量与计划期外将要进行装船作业的进箱型集装箱 (CYGD) 的数量之和。

$$TC_{ijt} = \sum_{k=0}^{T-t} TC_{ijk} + \gamma_{ijt}, \quad i=1, \dots, B, \quad t=1, \dots, T, \quad j=1, \dots, H_i \quad (6)$$

约束条件 (6) 保证了在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并运输到堆场且堆存在箱区 i 贝位 j 中的中转集装箱 (VSTC) 的数量等于在滚动计划的第 t 阶段分配到相同的贝位, 在 T 计划期内将要重新进行装船作业的中转集装箱 (VSTC) 的数量与计划期外重新进行装船作业的中转集装箱 (VSTC) 的数量之和。

$$D_t = \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^{H_i} \beta_{ijt}, \quad t=1, 2, \dots, T \quad (7)$$

约束条件 (7) 保证了在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并进入堆场, 在计划期外客户或船代将要运走的进口集装箱 (VSDS) 的数量等于在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并运输到堆场且堆存到各个箱区的各个贝位中, 在计划期外客户或船代将要运走的进口集装箱 (VSDS) 的数量总和。

$$G_t = \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^{H_i} \alpha_{ijt}, \quad t=1, 2, \dots, T \quad (8)$$

约束条件 (8) 保证了在滚动计划的第 t 阶段从货代、顾客或者陆港处将集装箱运输到港口, 在计划期外进行装船作业的进箱型集装箱 (CYGD) 的数量等于在滚动计划的第 t 阶段从货代、顾客或者陆港处将集装箱运输到港口并堆存到各个箱区的各个贝位中, 在计划期外进行装船作业的进箱型集装箱 (CYGD) 的数量总和。

$$TC_t = \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^{H_i} \gamma_{ijt}, \quad t=1, 2, \dots, T \quad (9)$$

约束条件 (9) 保证了在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并进入堆场, 在计划期外重新进行装船作业的中转集装箱 (VSTC) 的箱数量等于在滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并运输到堆场且堆存到各个箱区的各个贝位中, 在计划期外将要重新进行装船作业的中转集装箱 (VSTC) 的数量总和。

(2) 对存储在堆场中的 CYPI, VSLD 和 CYTC 型集装箱的约束:

$$L_{ijt} = L_{ijt}^0 + \sum_{k=0}^{t-1} G_{ij(t-k)k}, \quad i=1, \dots, B, \quad t=1, \dots, T, \quad j=1, \dots, H_i \quad (10)$$

约束条件 (10) 表示在装卸作业过程中已经堆放在箱区 i 贝位 j 中, 在滚动计划的第 t 阶段内要进行装船作业的出口集装箱 (VSLD) 的数量由两部分集装箱组成: 第一部分是在滚动计划的第 t 阶段开始前, 就已经堆放在箱区 i 贝位 j 当中的出口集装箱 (VSLD); 另一部分是在时间段 t 到达前, 但要在第 t 阶段进行装船作业的进箱型集装箱 (CYGD)。

$$P_{ijt} = P_{ijt}^0 + \sum_{k=0}^{t-1} D_{ij(t-k)k}, \quad i=1, \dots, B, \quad t=1, \dots, T, \quad j=1, \dots, H_i \quad (11)$$

约束条件 (11) 表示在装卸作业过程中已经堆放在箱区 i 贝位 j 中, 在滚动计划的第 t 阶段内客户或船代将要运走的提箱型集装箱 (CYPI) 的数量是由两部分集装箱组成: 第一部分是在滚动计划的第 t 阶段开始前, 就已经堆放在箱区 i 贝位 j 当中的提箱型集装箱 (CYPI); 第二部分是在时间段 t 到达前, 但要在第 t 阶段进行卸船作业的进口集装箱 (VSDS)。

$$CT_{ijt} = CT_{ijt}^0 + \sum_{k=0}^{t-1} TC_{ij(t-k)k}, \quad i=1, \dots, B, \quad t=1, \dots, T, \quad j=1, \dots, H_i \quad (12)$$

约束条件 (12) 表示在装卸作业过程中已经堆放在箱区 i 贝位 j 中, 在滚动计划的第 t 阶段内要重新进行装船作业的中转集装箱 (CYCT) 的数量是由两部分集装箱组成: 第一部分是在滚动计划的第 t 阶段开始前, 就已经堆放在箱区 i 贝位 j 当中的中转集装箱 (CYCT); 第二部分是在时间段 t 到达前, 但要在第 t 阶段重新进行装船作业的中转集装箱 (VSTC)。

(3) 堆场箱区中贝位的总容量的约束限制:

$$V_{ij(t+1)} = V_{ijt} + [(G_{ijt} + D_{ijt} + TC_{ijt}) - (P_{ijt} + L_{ijt} + CT_{ijt})], \quad i=1, \dots, B, \quad t=1, \dots, T, \quad j=1, \dots, H_i \quad (13)$$

约束条件 (13) 表示各个箱区的贝位前后时间段的集装箱数量的等量关系;

$$V_{ijt} \leq C_{ij}, \quad i=1, \dots, B, \quad t=1, \dots, T, \quad j=1, \dots, H_i \quad (14)$$

约束条件 (14) 表示每个阶段箱区贝位的总的集装箱堆存量不能超过它的容量上限。

(4) 需要满足整数的要求:

决策变量 α_{ijt} , β_{ijt} , γ_{ijt} , G_{ijtk} , G_{ijt} , D_{ijtk} , D_{ijt} , TC_{ijtk} , D_{ijtk} , L_{ijt} , P_{ijt} , CT_{ijt} , V_{ijt} 均为非负整数。

贝位资源分配模型的第二阶段:

本阶段将靠泊的船舶上的集装箱总量分配到堆场的具体的贝位中, 目标函数是使集卡 (主要是内集卡) 的运输距离最小化, 也就是集卡从岸桥到贝位行驶的距离最小, 从而使集卡从码头前沿到堆场的运输成本最小。

通过上述模型的分析求解, 可以得到各个时段各个贝位上的客户或船代送箱的数量、进口箱数量和从船舶上卸载下的中转箱的数量, 在本小节的模型构建过程中, 这些集装箱的数量都成为了已知的量。

相关的参数和变量的含义如下:

N : 表示泊位的数量;

d_{ijl} : 表示箱区 i 的贝位 j 与泊位 l 的距离 (以集卡的行驶距离为准);

针对不同的集装箱的类型, 部分参数的说明如表 4-1 所示:

表 4-1 参数说明

参数说明	VSDS 型箱	CYGD 型	VSTC 型
M_{lt}	在滚动计划的第 t 阶段从分配到泊位 l 处的船舶上卸载下的 VSDS 型集装箱的数量总和	在滚动计划的第 t 阶段到达港口, 并将集装箱装载到泊位 l 的船舶上的 CYGD 型集装箱的数量总和	在滚动计划的第 t 阶段从分配到泊位 l 处的船舶上卸载下的 VSTC 型集装箱的数量总和
X_{ijlt}	在滚动计划的第 t 阶段从泊位 l 处的船舶上卸下并堆放在箱区 i 的贝位 j 中的 VSDS 型箱量	在滚动计划的第 t 阶段到达港口, 存放到箱区 i 的贝位 j 中, 并通过停靠在泊位 l 处的船舶装上船的 CYGD 型箱的数量	在滚动计划的第 t 阶段从泊位 l 处的船舶上卸下堆放在箱区 i 的贝位 j 中的 VSTC 型箱量

这个阶段当中, 求解的问题可以看成是一个运输问题, 建立模型如图所示:

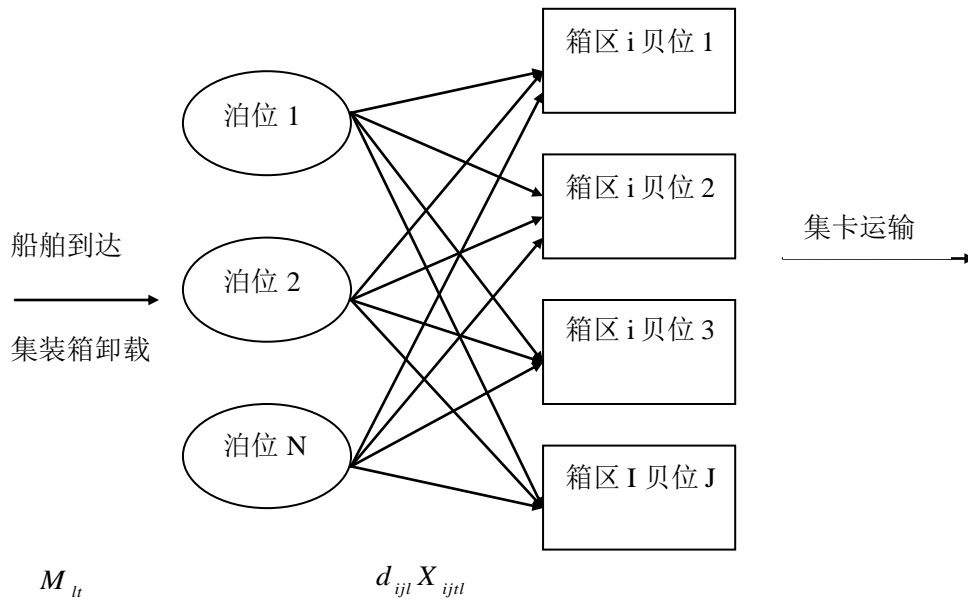


图 4-4 模型的分解

Fig4.4 Decomposition of the model

这一阶段建立的堆场贝位资源的空间分配数学模型如下:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^{H_i} \sum_{l=1}^N d_{ijl} X_{ijlt} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^{H_i} X_{ijlt} = M_{lt}, \quad l=1,2,\cdots,N \quad (2)$$

$$\text{对于 } VSDS \text{ 型箱来说: } \sum_{l=1}^N X_{ijlt} = D_{ijt}; \quad i=1,2,\cdots,B; j=1,2,\cdots,H_i \quad (3)$$

$$\text{对于 } CYGD \text{ 型箱来说: } \sum_{l=1}^N X_{ijlt} = G_{ijt}; \quad i=1,2,\cdots,B; j=1,2,\cdots,H_i \quad (4)$$

$$\text{对于 } VSTC \text{ 型箱来说: } \sum_{l=1}^N X_{ijlt} = TC_{ijt}; \quad i=1,2,\cdots,B; j=1,2,\cdots,H_i \quad (5)$$

变量 X_{ijlt} 是非负整数。

目标函数把滚动计划的每个时段将要装载的 $VSDS$ 、 $CYGD$ 和 $VSTC$ 等多种类型的集装箱分配到堆场贝位中，使集卡从码头前沿到堆场不同贝位间的行驶距离总和最小。

约束条件（2）船舶装卸量的限制，分配到堆场箱区各个贝位的不同类型的集装箱的数量的总和等于在第 t 阶段， $VSDS$ 、 $CYGD$ 和 $VSTC$ 等各种类型的箱的总箱量。约束条件（3）（4）（5）表示堆场中贝位内部的装卸作业总量的约束限制，如对于 $VSDS$ 型箱来说，约束条件（3）表示的是分配到各个箱区的贝位上的 $VSDS$ 型集装箱的数量等于从各个泊位的船舶上卸载并分配到各个贝位上的 $VSDS$ 型箱量的总和。

§ 4-4 本章小结

本章对堆场中贝位资源分配的相关问题进行分析，介绍了集装箱堆场堆存的策略，分析了堆场中集装箱的不同堆存方式的优缺点，并对堆场中的主要的集装箱类型进行划分，通过各种类型集装箱的不同的作业流动过程，建立了堆场中贝位资源的分配模型，将某一个时间段到达的堆场的集装箱分配到各个箱区的贝位中。

本章的贝位资源的分配模型以多种集装箱混合堆放为基础，以滚动计划法和两阶段法为解决方法，将每个计划周期的贝位资源分配问题分解成两个阶段的问题，且每一个阶段都有相对应的数学模型。在第一个阶段的模型中，可以均衡各个箱区贝位的集装箱装卸作业总量；第二个阶段的模型，可以使集卡从船舶停靠的泊位到堆场的贝位的运输距离最短。

第五章 贝位内箱位资源的分配模型研究

§ 5-1 贝位内箱位资源的调度分析

由于堆场空间有限,目前很多港口采用增加堆垛高度的方法来增加堆场的库存容量。但是随着堆存高度的增加,龙门吊吊取集装箱时产生的翻箱次数也会随之增加,堆场的装卸业务的难度也会增加。同时,由于堆场的布局和装卸设备都是相对固定的,堆场的翻箱次数成为了影响堆场中集装箱装卸作业时间的主要因素之一。

根据以往的研究,目前很多的研究集中在进出口集装箱分开堆放的情况下,对到场的集装箱进行箱位的分配。本章是在混合堆放的模式下,通过对贝位内各种集装箱的合理的分配,降低集装箱间的压箱的数目,建立贝位内箱位资源的分配模型,提高贝位中设备的装卸作业效率。

§ 5-2 贝位内集装箱倒箱作业的相关概述

5-2-1 堆场倒箱问题的解决方法

倒箱作业主要的发生地点是堆场的贝位中,但是从 2-2-2 的影响因素分析可以看出,堆场要想减少倒箱作业的次数,就必须对集装箱运输的整个流程进行全面的协调控制,其中,各个部门除了要做好自己的本职工作外,还要改善与其他部门的信息沟通的方式,加强部门间信息传递的效率和传输的质量。

1. 从船公司的角度:

(1) 船公司应加强与港口相关部门之间的信息沟通和传递,增强集装箱班轮的运营过程的计划性,严格按照船期表进行运输。

(2) 船公司代理与有关部门共同协商舱位的分配、船舶运载能力和总运载量之间的关系,尽量避免盲目接受订舱。船公司要提高信息的准确度,向港口的相关部门提供详细的集装箱装载数据。同时,船公司代理要根据货物托运人的货物到港情况,在船舶到达港口之前,合理确定班轮舱位。

(3) 船公司或船代理在船舶到港之前向港口提交一份详细的货物清单,包括订舱单和装卸船清单等单据。只有在船舶舱位信息和集装箱各项信息完整的情况下,港口的有关部门制定更加合理的装卸作业顺序和堆存箱位。

2. 港口或堆场自身角度:

堆场根据船公司或船代等有关部门提供的货运资料制定合理的堆存计划,这个计划能够确定集装箱的堆放位置和装卸作业的顺序,以及附带的装卸作业要求和编制堆存计划的要求,这种要求的执行程度将影响堆场中集装箱的倒箱次数。

堆场仅仅制定合理的堆存作业计划还是不够的,在出口集装箱的作业过程当中,集装箱的具体的堆存位置要与船舶的配载计划的编制相协调;在进口集装箱的作业过程当中,港口必须制定作业计划,使装卸船的作业过程严格按照具体的船舶配载计划进行,使堆场能够在有限的时间范围内,完成集装箱箱

位的分配。

5-2-2 堆场倒箱的原则

堆场中的倒箱过程不可避免，在进行相关作业时需要遵循一定的原则，主要有：

（1）倒箱作业只发生在贝位内部，也就是说龙门吊进行倒箱作业的时候，只在同一个贝位内进行，不能吊往其他的贝位。因为在龙门吊作业过程中，吊着集装箱行走是非常危险的，因此，跨贝位倒箱作业过程只能采取这样的方式：龙门吊将目标箱上方的集装箱吊起，移动小车，将吊取的集装箱放置到集卡上，集卡将集装箱运输到预先确定的其他贝位上，然后龙门吊再行驶到该贝位上，小车将集卡上的集装箱吊取，放在箱位上。这样的作业过程，对时间和资源都造成了很大的浪费，所以选择采取贝位内部倒箱。

（2）就近原则，也就是说，倒箱时倒箱位置的选择尽量离龙门吊停留的堆垛较近的位置，以便减少龙门吊小车的运行距离，提高取箱的速率，降低集卡的等待作业时间。

（3）相邻堆垛的高度差不要过大，也就是说倒箱作业结束后时，堆栈的高度不仅要小于堆场的最大的堆存的高度，两个相邻的堆垛高度差也不要过大，一般情况下，这个高度差不要相差 3 个 TEU 以上标准的高度。

§ 5-3 贝位内箱位资源的分配模型

5-3-1 问题的描述

（1）衡量集装箱倒箱问题评价指标的选取

在堆场内部的集装箱的装卸作业过程中，由于各方面的原因，集装箱优先级低的压优先级高的现象时有发生，这就导致了产生多余的提取和放箱作业，这也是现实当中不可避免的情况。但是为了提高堆场整体的作业效率，我们可以通过减少压箱数的方法来降低倒箱率^[44]。

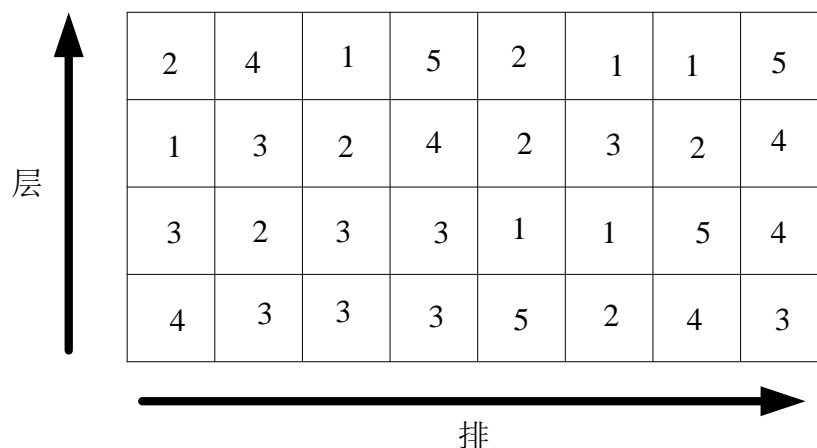


图 5-1 贝位内集装箱压箱情况描述

Fig5.1 The shift stowage sketch map of the container mixed stockpiling

压箱数表示通过对集装箱进行优先级的划分，优先级低的集装箱堆放在优先级高的箱子的数量。如

图 5-1 所示, 是一个贝位内集装箱的压箱情况, 图中的数字代表集装箱的假定优先级, 数字越小表示集装箱的优先级别越高, 即该集装箱需要优先作业。第一排的压箱数为 1, 第二排的压箱数是 2, 依次的压箱数为 0、2、2、1、1、3^[44]。

(2) 集装箱优先等级的划分标准

根据集装箱的装卸作业时间和集装箱的重量进行优先等级的划分, 首先根据各种集装箱的先后作业时间划分优先等级, 集装箱的装卸时间越靠前, 它的优先等级就越高。本文当中选取十二个小时为一个时间段, 这样一天就可以划分成两个时段, 假定堆场中集装箱的最大堆存时间 T 为一个滚动计划的周期 (T 为一个整数), 这样, 每个周期就会有 $2T$ 个时间段; 在每一个滚动计划周期内, 将在第一个时间段进行装卸作业的集装箱的优先级设为 1, 在第二个时间段进行装卸作业的集装箱优先级设为 2, 其他以此类推, 最后一个时间段作业的集装箱的优先级为定为 $2T$, 当滚动计划的第一个时间段作业完成后, 开始时段转移到计划的第二个时间段, 其余的时间段往后顺延一个时段, 并同时更新各个时间段的优先级^[44]。

其次, 当集装箱的作业时间段相同时, 选取集装箱的重量作为优先级划分的第二个标准。集装箱的重量越大, 确定的优先级也越大。目前, 港口较为普遍的集装箱的重量的变化范围从几吨到几十吨不等, 根据集装箱的重量变化范围, 本文将集装箱的重量等级划分为 5 级, 分别为: 1 级 (20 吨以上)、2 级 (15-20 吨)、3 级 (10-15 吨)、4 级 (5-10 吨)、5 级 (0-5 吨)^[26]。

由此, 可以确定集装箱优先级的划分方式, 一般用“作业时间段——重量级别”划分, 例如“01-3”表示装卸作业时间在第一个时间段, 集装箱的重量等级是 3 级。假定在贝位中, 存在一批集装箱, 它们的优先级依次是 05-2, 03-3, 03-2, 01-5, 07-4, 那么这些集装箱的优先级排序为 01-5, 03-2, 03-3, 05-2, 07-4。根据集装箱的作业时间段和重量等级, 划分的集装箱的最终优先级如表 5-1 所示。

表 5-1 集装箱优先级划分的标准

重量 \ 作业时段	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	6	7	8	9	10
3	11	12	13	14	15
4	16	17	18	19	20
5	21	22	23	24	25
6	26	27	28	29	30
7	31	32	33	34	35
8	36	37	38	39	40
9	41	42	43	44	45
10	46	47	48	49	50
11	51	52	53	54	55
12	56	57	58	59	60

在实际的港口堆场作业过程中, 作业的相对集中的性质, 决定在某一个时间段可能需要装卸多个集

装箱，而且这样集装箱的类型也是不确定，如何确定这些集装箱的堆存位置，使接下来的集装箱装卸作业产生的倒箱次数最小，是堆场管理者面临的一个严峻的问题。本章针对在某一个特定时间段内对贝位上需要堆存的集装箱进行箱位的分配，确定具体的堆存位置，以集装箱分配后产生的压箱数最小为目标建立贝位内箱位资源的分配模型。

5-3-2 模型的建立

(1) 前提假设

1. 在某一时段集装箱已经分配到各个箱区的贝位当中，这里取其中的任意的某一个具体的贝位作为研究对象，将到达贝位的集装箱分配到具体的位置上；
2. 集装箱的相关属性（主要指装卸作业时间和重量等级）都是已知的；
3. 假定堆场中各种类型的集装箱均为普通标准箱（20TEU）；
4. 倒箱作业过程只能发生在同一个贝位中。
5. 对于新进入贝位的集装箱，为其安排箱位时候，对于已经在堆场中堆存的集装箱不进行倒箱作业。

(2) 模型的符号

R ：表示贝位的排数；

r ：表示贝位的排编号 $1, 2, 3 \dots R$ ；

$Total$ ：表示在贝位中，集装箱分配后产生的压箱数；

H ：表示贝位上的最大的堆垛层数，在本模型中，假定所有堆垛的最大堆存高度都是一致的；

P ：表示贝位中第 r 列中的集装箱的优先等级（ $P = 1, 2, 3 \dots$ ）；

N ：表示到达贝位的各种类型的集装箱箱的总和；

n ：表示贝位中将要进行装卸作业的集装箱的编号；

X_{rn} ：表示贝位中，将第 n 个集装箱的箱位分配到第 r 列后的层编号（层编号的编制规则：从下往上依次是 $1, 2, 3 \dots$ ）；

Y_{rn} ：表示对第 n 个集装箱分配箱位之前，第 r 列的堆存高度；

Z_{rn} ：表示对第 n 个集装箱分配箱位之后，第 r 列的堆存高度；

L_{rnp} ：表示将第 n 个集装箱分配到第 r 列后贝位中该列第 p 优先级的集装箱所在的最小层数的编号，其中， $L_{rn1}=1, 2, 3 \dots H$ ， $L_{rn2}=1, 2, 3 \dots, H-1 \dots$ ， $L_{rnp}=1, 2, 3 \dots, H-(p-1)$ ；

M_{rnp} ：表示贝位中第 n 个集装箱分配到第 r 列后，该列第 p 优先级的集装箱的总和；

$DSTC_m$ ：表示贝位中第 n 个集装箱分配到第 r 列后增加的压箱数；

(3) 模型的变量说明：

$$H_{1n} = \begin{cases} 1 \cdots \text{当 } X_{rn} \geq 2; \\ 0 \cdots \text{当 } X_{rn} \leq 2; \end{cases}$$

$$H_{pn} = \begin{cases} 1 \cdots \text{当 } L_{rn(p-1)} - 1 \geq 2; \\ 0 \cdots \text{当 } L_{rn(p-1)} - 1 < 2; \end{cases} \cdots p=2,3,4,\dots;$$

$$E_n = \begin{cases} 1 \cdots \text{当 } X_{rn} - Z_{(r+1)n} \leq 3, r=1,2,3,\dots, R, Z_{(R+1)n} = 0 \text{ 时} \\ 0 \cdots \text{当 } X_{rn} - Z_{(r+1)n} \geq 3, r=1,2,3,\dots, R, Z_{(R+1)n} = 0 \text{ 时} \end{cases}$$

$$F_n = \begin{cases} 1 \cdots \text{当 } X_{rn} - Z_{(r-1)n} \leq 3, r=1,2,3,\dots, R, Z_{0n} = 0 \text{ 时} \\ 0 \cdots \text{当 } X_{rn} - Z_{(r-1)n} \geq 3, r=1,2,3,\dots, R, Z_{0n} = 0 \text{ 时} \end{cases}$$

(4) 目标函数

集装箱堆场贝位内箱位资源分配模型的目标函数为：

$$Total = \min \sum_{n=1}^N DSTC_n$$

(5) 约束条件

$$DSTC_n = \min \left\{ H_{1n} [X_{rn} - M_{rn1} - (L_{rn1} - 1)] + \sum_{p=1}^u H_{pn} * [(L_{rnp} - 1) - M_{rnp} - (L_{rnp} - 1)] \right\}, r=1,2,3,\dots,R; \quad (1)$$

$$X_{rn} = Y_{rn} + 1; \quad (2)$$

$$X_{rn} \leq H; \quad (3)$$

$$E_n + F_n \geq 1; \quad (4)$$

$$\sum_{r=1}^R Z_{rn} \leq R \times H - (H-1), r=1,2,3,\dots, R \quad (5)$$

约束条件(1)表示第 n 个集装箱被分配到第 r 列堆存后，增加的最小的压箱数的计算公式；约束条件(2)表示贝位中对第 n 个集装箱箱位分配的位置没有集装箱存在，且不能悬空；约束条件(3)表示对第 n 个集装箱分配作业完成后，集装箱所在堆垛的高度不能超过堆场中堆垛的最大堆存高度；约束条件(4)表示分配集装箱的堆垛的层高与相邻列堆垛的高度之差不能大于三^[44]；约束条件(5)表示每个贝位都会预留一些箱位，以方便集装箱倒箱时使用。

§ 5-4 基于启发式算法的模型求解

(1) 符号的定义

P_n : 表示在贝位进行装卸作业的第 n 个箱子的优先等级；

n : 表示在贝位内进行装卸作业的集装箱的编号;

a : 表示为集装箱分配箱位时第 n 个集装箱经过运算搜索能够获得的可行解编号;

DS_a : 表示如果将集装箱分配到搜索得到的第 a 个可行解确定的位置所增加的压箱数;

(2) 算法的步骤

Step 1: 某一个时间段内根据优先级标准表, 确定需要进行装卸作业的各个集装箱的优先等级 (1-60), 结合堆场贝位上已经在场的集装箱的堆存情况和优先等级, 对各种类型的集装箱进行优先级的大小排序, 这样可以确保新进场的集装箱间不会产生倒箱作业;

Step 2: 确定箱位资源分配问题的开始的搜索状态, 其中 $n = 1$, $r = 1$, $a = 1$, 转 **Step 3**;

Step 3: 将到达堆场的集装箱分配到第 r 列, 首先确定是否存在可行解, 如果存在, 就将该过程产生的可行解 DS_a 与上一个分配过程产生的解 DS_{a-1} 比较, 若 $DS_a \geq DS_{a-1}$, 那么不进行解的替换即 $DSTC_m = DS_{a-1}$, 如果 $DS_a < DS_{a-1}$, 则进行最优解的替换 $DSTC_m = DS_a$, 同时可行解的编号变为 $a = a + 1$; 否则, 转 **Step 4**;

Step 4: 先对列的编号进行变换操作即 $r = r + 1$, 将变更后的列编号与最大的列号进行比较, 若小于最大列号, 则转 **Step 4** 重新进行求解寻优运算; 若大于最大列号, 则该运算的过程结束, $DSTC_m$ 为该过程的最优解, 输出该过程确定的列编号和最优解 $DSTC_m$, 第 n 个箱子箱位分配过程结束, 转 **Step 5**;

Step 5: 将已经完成箱位资源分配作业的 n 个集装箱的 $DSTC_m$ 值进行加总处理, 可以得到所有集装箱的箱位分配过程产生的总的压箱数, 也就是 $T = \sum_{n=1}^N DSTC_m$, 转 **Step 6**;

Step 6: 将要进行装卸作业的集装箱的编号进行变更操作 $n = n + 1$, 判断变更后集装箱的编号是否超过了设定的最大值, 如果超过则 T 为算法求解的最优解, 输出 T 算法结束, 否则转 **Step 3**。

(3) 逻辑流程

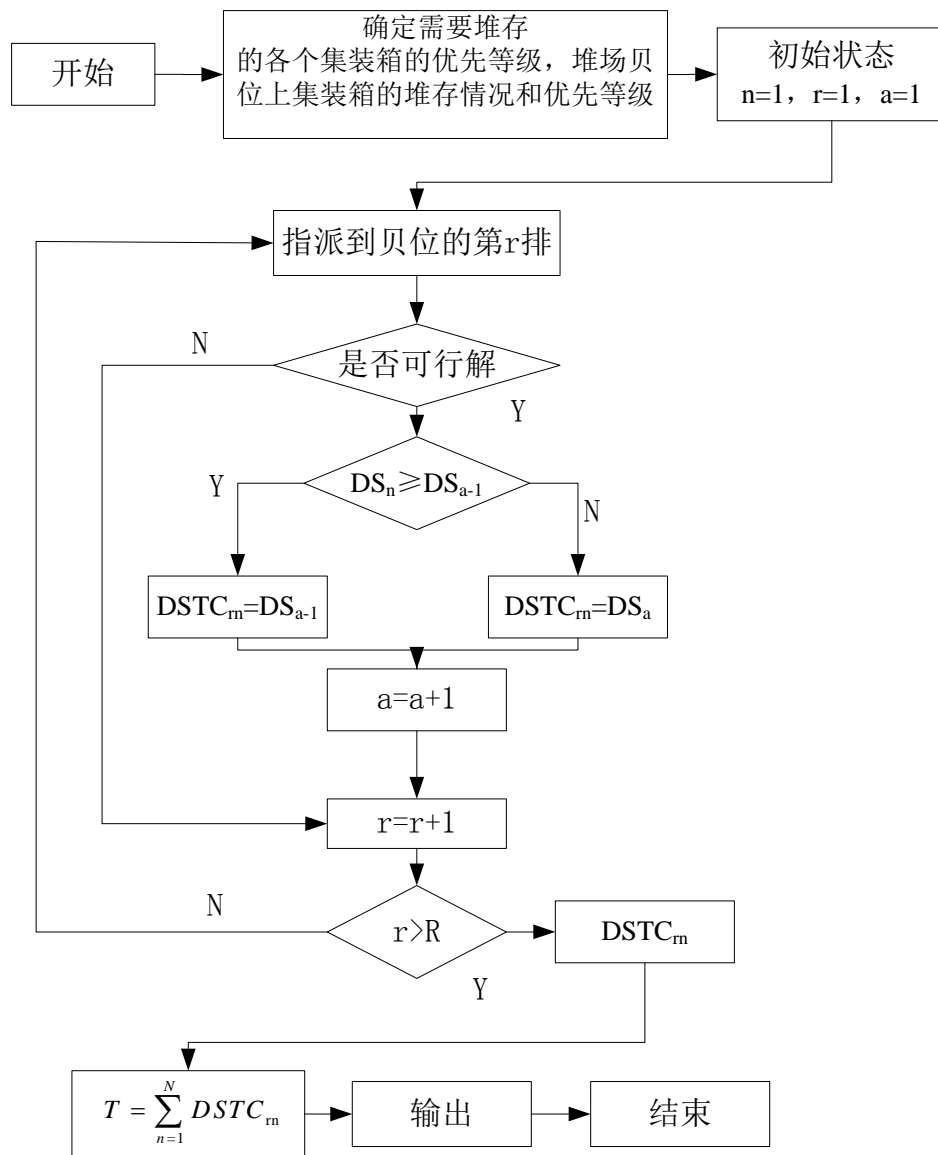


图 5-2 箱位分配问题的启发式算法逻辑流程图

Fig5.2 The heuristic algorithm logical chart of container space designation

§ 5-5 本章小结

本章对集装箱堆场贝位内箱位资源的分配的相关问题总结分析,介绍了堆场中集装箱的堆放规则和倒箱的作业过程,并给出了减少倒箱作业的方法和集装箱优先级确定的方法,以分配过程产生的压箱数最小为目标,建立了贝位内箱位资源的分配模型,降低堆场中集装箱的倒箱次数,将集装箱分配贝位具体的箱位中,并利用启发式算法对模型进行求解分析。

第六章 集装箱堆场空间资源分配模型的算例分析

§ 6-1 集装箱堆场贝位资源分配的优化实例

6-1-1 相关数据

在本算例中，为了计算的方便，假定 $B = 1$ ，也就是堆场中仅有一个箱区；假定箱区中有 5 个贝位，每个贝位有 12 列，堆垛高度为 5，也就是贝位的最大的集装箱堆存量 C_{ij} 为 $12 \times 5 = 60$ ；假定有两个泊位，根据之前的滚动计划确定的计划周期确定 $T = 6$ ，假定其他的已知的集装箱的数量和相关的变量如下表 6-1 所示：

表 6-1 在滚动计划开始前箱区 i 贝位 j 当中已经堆放的集装箱数量

V_{ij1}	V_{111}	V_{121}	V_{131}	V_{141}	V_{151}
数量	5	5	6	6	6

表 6-2 滚动计划的第 t 阶段开始前，就已经堆放在箱区 i 贝位 j 当中，在第 t 阶段客户或船代将要运走的提箱型集装箱（ $CYPI$ ）的数量

P_{ijt}^0	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
i=1,j=1	2	0	0	0	2	0
i=1,j=2	0	2	0	0	0	0
i=1,j=3	0	0	0	0	2	0
i=1,j=4	2	0	0	0	0	2
i=1,j=5	0	0	0	0	0	0

表 6-3 滚动计划的第 t 阶段开始前，就已经堆放在箱区 i 贝位 j 当中，在第 t 阶段要进行装船作业的出口集装箱（ $VSLD$ ）的数量

L_{ijt}^0	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
i=1,j=1	0	0	0	0	0	0
i=1,j=2	0	2	0	0	0	0
i=1,j=3	0	0	0	0	3	0
i=1,j=4	0	0	0	0	0	1
i=1,j=5	0	2	0	0	0	0

表 6-4 滚动计划的第 t 阶段开始前, 就已经堆放在箱区 i 贝位 j 当中, 在第 t 阶段要重新进行装船作业的中转集装箱 (CYCT) 的数量

CT_{ijt}^0	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
i=1,j=1	0	0	0	0	0	0
i=1,j=2	0	0	0	0	0	0
i=1,j=3	0	0	0	0	0	0
i=1,j=4	0	0	0	0	0	0
i=1,j=5	0	0	0	0	0	0

表 6-5 在滚动计划的第 t 阶段从货代、顾客或者陆港处将集装箱运输到港口, 在第 $t+k$ 阶段进行装船作业的进箱型集装箱 (CYGD) 的数量

G_{tk}	K=0	K=1	K=2	K=3	K=4	K=5
t=1	10	9	8	7	7	9
t=2	9	6	8	7	8	——
t=3	9	7	7	9	——	——
t=4	10	9	8	——	——	——
t=5	9	8	——	——	——	——
t=6	9	——	——	——	——	——

表 6-6 滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并进入堆场, 在第 $t+k$ 阶段客户或船代将要运走的进口集装箱 (VS DS) 的数量

D_{tk}	K=0	K=1	K=2	K=3	K=4	K=5
t=1	8	7	7	7	6	6
t=2	7	6	5	7	7	——
t=3	16	5	7	4	——	——
t=4	5	8	6	——	——	——
t=5	8	7	——	——	——	——
t=6	18	——	——	——	——	——

表 6-7 滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并进入堆场, 在第 $t+k$ 阶段重新进行装船作业的中转集

装箱（ $VSTC$ ）的数量

TC_{ik}	K=0	K=1	K=2	K=3	K=4	K=5
t=1	1	1	1	1	1	1
t=2	1	1	1	1	1	——
t=3	1	1	1	1	——	——
t=4	1	1	1	——	——	——
t=5	1	1	——	——	——	——
t=6	1	——	——	——	——	——

表 6-8 滚动计划的第 t 阶段从货代、顾客或者陆港处将集装箱运输到港口，在计划期外将进行装船作业的进箱型集装箱（ $CYGD$ ）的数量

G_t	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
箱量	4	3	9	8	8	5

表 6-9 滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并进入堆场，在计划期外客户或船代将要运走的进口集装箱（ $VSDS$ ）的数量

D_t	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
箱量	1	0	2	8	6	5

表 6-10 滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并进入堆场，在计划期外重新进行装船作业的中转集装箱（ $VSTC$ ）的箱数量

TC_t	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
箱量	0	0	0	0	0	0

表 6-11 箱区 i 贝位 j 与船舶停靠的泊位 l 之间的距离

d_{ijl}	i=1,j=1	i=1,j=2	i=1,j=3	i=1,j=4	i=1,j=5
l=1	200	150	200	250	300
l=2	300	250	200	150	200

表 6-12 滚动计划的第 t 阶段从停靠在泊位 l 处的船上卸载下的进口集装箱（ $VSDS$ ）的数量

$M_{lt}(D)$	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
l=1	27	22	20	16	14	13
l=2	15	10	14	11	9	10

表 6-13 滚动计划的第 t 阶段从货代、顾客或者陆港处将集装箱运输到港口，并将装载到泊位 l 的船舶上的进箱型集装箱（ $CYGD$ ）的数量

$M_{lt}(G)$	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
l=1	26	22	19	30	13	9
l=2	28	19	22	5	12	5

表 6-14 滚动计划的第 t 阶段从泊位 l 处的船上卸载下的中转集装箱（ $VSTC$ ）的箱数量

$M_{lt}(TC)$	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
l=1	3	2	2	2	0	1
l=2	3	3	2	1	2	0

6-1-2 优化结果与分析

根据集装箱堆场贝位资源分配模型两个阶段的数学模型和上述算例中的相关数据，利用 Lingo12 对问题进行求解，得到的结果如下：

- （1）滚动计划的第 t 阶段从货代、顾客或者陆港处将集装箱运输到港口，并堆存到箱区 i 贝位 j 中的进箱集装箱（ $CYGD$ ）的数量 G_{ijt} ，具体如下表 6-15 所示：

表 6-15 箱区 i 的贝位 j 的进箱型集装箱（ $CYGD$ ）的数量

G_{ijt}	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
i=1,j=1	11	3	17	2	3	0
i=1,j=2	2	8	0	11	12	5
i=1,j=3	16	10	6	12	3	1
i=1,j=4	8	12	17	3	0	0
i=1,j=5	17	8	1	7	7	8

- （2）滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并运输到堆场且堆存在箱区 i 贝位 j 中的进口集装箱（ $VSDS$ ）

的数量 D_{ijt} ，具体如下表所示：

表 6-16 箱区 i 的贝位 j 中进口集装箱（ $VSDS$ ）的数量

D_{ijt}	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
i=1,j=1	7	11	0	10	8	4
i=1,j=2	17	9	12	2	0	0
i=1,j=3	1	10	7	0	5	11
i=1,j=4	11	2	0	8	8	7
i=1,j=5	6	0	15	7	0	1

(3) 滚动计划的第 t 阶段从船舶上卸载并运输到堆场且堆存在箱区 i 贝位 j 中的中转集装箱 (VSTC) 的数量 TC_{ijt} ，具体如下表所示

表 6-17 箱区 i 的贝位 j 的中转集装箱 (VSTC) 的数量

TC_{ijt}	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
i=1,j=1	1	2	0	1	1	0
i=1,j=2	2	1	1	0	0	0
i=1,j=3	1	1	1	0	0	1
i=1,j=4	1	1	1	1	1	0
i=1,j=5	1	0	1	1	0	0

(4) 滚动计划的第 t 阶段从泊位 l 处的船舶上卸下并堆放在箱区 i 的贝位 j 中的进口集装箱 (VSDS) 的数量 X_{ijlt} ，具体如下表所示：

表 6-18 箱区 i 的贝位 j 中的进口集装箱 (VSDS) 的数量

X_{ijlt}	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
i=1,j=1,l=1	7	12	0	10	8	4
i=1,j=2,l=1	17	9	12	1	0	0
i=1,j=3,l=1	1	0	7	0	5	9
i=1,j=4,l=1	0	0	0	0	0	0
i=1,j=5,l=1	0	0	1	5	0	0
i=1,j=1,l=2	0	0	0	0	0	0
i=1,j=2,l=2	0	0	0	0	0	0
i=1,j=3,l=2	0	9	0	0	0	02
i=1,j=4,l=2	10	2	0	8	8	7
i=1,j=5,l=2	6	0	14	3	0	1

(5) 滚动计划的第 t 阶段到达港口，将集装箱堆存在箱区 i 的贝位 j 中并在泊位 l 处的船舶将集装箱装上船的客户或船代运送的进箱型集装箱 (CYGD) 的数量 X_{ijlt} ，具体如下表 6-19 示：

表 6-19 箱区 i 的贝位 j 中的进箱集装箱 (CYGD) 的数量

X_{ijlt}	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
i=1,j=1,l=1	11	3	17	2	3	0
i=1,j=2,l=1	2	8	0	11	10	5
i=1,j=3,l=1	13	10	2	12	0	1
i=1,j=4,l=1	0	1	0	3	0	0
i=1,j=5,l=1	0	0	0	2	0	3
i=1,j=1,l=2	0	0	0	0	0	0
i=1,j=2,l=2	0	0	0	0	2	0
i=1,j=3,l=2	3	0	4	0	3	0
i=1,j=4,l=2	8	11	17	0	0	0
i=1,j=5,l=2	17	8	1	5	7	5

(6) 滚动计划的第 t 阶段从泊位 l 处的船上卸下堆放在箱区 i 的贝位 j 中的中转集装箱 (VSTC) 的数量 X_{ijlt} ，具体如下表所示：

表 6-20 箱区 i 的贝位 j 中的中转集装箱 (VSTC) 的数量

X_{ijlt}	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
i=1,j=1,l=1	1	1	0	1	1	0
i=1,j=2,l=1	2	1	1	1	0	0
i=1,j=3,l=1	1	1	1	0	0	1
i=1,j=4,l=1	1	0	0	0	0	0
i=1,j=5,l=1	0	0	0	0	0	0
i=1,j=1,l=2	0	0	0	0	0	0
i=1,j=2,l=2	0	0	0	0	0	0
i=1,j=3,l=2	0	1	0	0	0	0
i=1,j=4,l=2	1	1	1	1	1	0
i=1,j=5,l=2	1	0	1	0	0	0

第一阶段的算例的目标函数的结果为 2，也就是说，各个箱区的总的作业不平衡度量为 2，每个阶段各个箱区贝位上的作业总量如下表 6-21 所示，可以看出本文建立的第一个阶段的贝位资源分配的数学模型可以均衡贝位间装卸作业的总量。

表 6-21 各个箱区贝位上集装箱的装卸作业总量

Y_{ijt}	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
i=1,j=1	24	23	26	24	27	29
i=1,j=2	24	22	26	24	27	29
i=1,j=3	24	23	26	24	27	29
i=1,j=4	24	23	26	24	27	29
i=1,j=5	23	22	26	24	27	29

第二阶段的模型优化的结果为 77100 米，现在通过对到场的集装箱总量进行随机的分配，得到 8 次随机分配的结果如下表 6-22 所示：

表 6-22 8 次随机分配的结果

随机顺序	1	2	3	4	5	6	7	8
距离 (m)	89050	98150	88000	97550	95050	82150	99550	90250

通过表 6-22 可以看出在这 8 次随机的实验当中，平均的集卡行驶距离都比模型得到的结果大，因此，利用贝位资源分配模型的第二阶段建立的数学模型，可以有效的减少集卡的运输距离。

总之，通过本算例总结分析得到本文建立的两阶段的贝位资源的分配模型是有效的。

§ 6-2 贝位内箱位空间资源的调度优化实例

6-2-1 相关数据

设定集装箱在堆场中最大的堆存周期为 6 天。假设在一个 4 层 10 排的贝位中，贝位的初始状态如图所示，一个贝位中，最大的堆存量为 40 个集装箱，最高的堆存高度为 4 层，目前在堆场中的有 16 个集装箱，还剩有 24 个空闲的箱位。

表 6-23 贝位的初始状态

	1			54			34
	5		51	14		51	7
53	54	21	20	56	14	51	38

假定现在到来一批集装箱的优先级为 $[34, 26, 42, 29, 32, 52, 15, 31, 19, 35, 51, 25]$ ，为这 12 个到达堆场的集装箱分配合适的堆存位置，使倒箱数的最小。

6-2-2 优化结果与分析

(1) 优化结果

利用本文建立的启发式算法，采用 *MATLAB* 语言进行编程运算，通过对运算得出的各个集装箱的分配的堆存位置如表 6-24 所示：

表 6-24 集装箱分配的堆存位置

0	0	0	0	0	0	25	0	0	0
32	0	1	0	35	54	26	34	0	34
52	51	5	19	51	14	29	51	15	7
53	54	21	20	56	14	42	51	31	38

产生的翻箱次数为 2。

(2) 优化结果分析

从上述运算可以看出,利用本文的第五章建立的集装箱堆场贝位内箱位资源分配模型进行箱位的分配,可以将到场的集装箱分配到具体的位置上,并且使装卸作业过程中产生的压箱数最小。

§ 6-3 本章小结

本章主要是利用贝位资源的分配模型和箱位资源的分配模型进行算例分析,结合相关的软件和算法,得到优化的结果,并对优化的结果进行总结分析,得出预定的优化结果,验证构建的空间资源分配模型的有效性。

第七章 总结与展望

§ 7-1 研究总结

集装箱堆场空间资源的分配问题,会对堆场作业设备的运行距离和装卸效率产生巨大的影响,作为堆场最重要的资源之一,空间资源分配的合理程度决定着堆场的运营水平。因此,对堆场空间资源进行合理的分配,不仅能够提高资源分配的有效性,还能够改善堆场的运营状况,提高港口的作业效率,增加港口的集装箱吞吐量。本文按照提出的问题解决思路,通过建立相关的模型和算法对问题进行求解。

本文以堆场的空间资源为研究对象,构建了空间资源的分配问题的概念模型,在此基础上通过对空间资源分配问题的影响因素进行分析,构建了贝位资源的分配模型和箱位资源的优化模型,并通过相关软件和算法验证了方法的有效性,具体的过程如下:

(1) 本文根据相关的理论和文献综述,对堆场的空间资源分配问题的机制进行研究。贝位资源的分配和箱位资源的分配问题均是堆场的空间资源分配问题,通过对堆场作业流程的描述以及对影响因素的分析,构建了堆场空间资源分配问题的概念模型。

(2) 本文通过堆场空间资源分配问题的概念模型基础上,构建了堆场贝位资源的分配模型。通过对堆存方式的分析研究,确定本文的堆场堆存方式以及与堆场作业相关的集装箱类型,在此基础上,构建了贝位资源分配问题的数学模型。

(3) 以贝位内倒箱次数最小为目标,构建了贝位内箱位资源的分配模型。结合堆场倒箱作业的相关研究,以及贝位资源的分配结果,根据倒箱的原则,构建了箱位资源分配问题的数学模型,并通过算例研究验证了该模型能够将集装箱分配各个箱位上去,且产生的倒箱次数最少,降低贝位内的倒箱率。

总之,通过本文构建的堆场空间资源分配模型,可以对堆场的贝位资源和箱位资源进行合理的分配,提高设备的装卸利用率,提升港口的作业水平。

§ 7-2 研究的局限与不足

堆场的空间资源分配甚是复杂,尽管本文研究的内容取得了预想中的结论,但是由于受本文研究水平、研究视角和研究时间的限制,论文当中还存在一些局限和不足,主要有以下几个方面:

(1) 由于港口堆场调度的复杂性,堆场空间资源分配问题的机制研究还不完善。本文中界定的资源分配问题的机制是根据堆场中集装箱的运作流程和分配问题的影响因素构建的概念模型,并没有考虑堆场资源分配的全部细节和影响因素。

(2) 由于堆场空间资源的分配比较复杂,需要考虑的因素比较多,本文以堆场空间资源分配时的基本问题为要点,将视角限定在堆场内部,构建问题的数学模型,这个过程还需进一步深化和完善。

(3) 算例验证方面仅仅用算例验证模型的有效性,并未从算法的选择、方案设计等方面形成一个完整的求解方案。

§ 7-3 研究展望

针对本文在研究过程中的局限和不足,结合论文研究过程中发现的问题,本节对未来的研究做如下的展望:

(1) 堆场空间和装卸资源的集成调度研究

堆场中空间资源和装卸资源的协作运营构成了完整的堆场调度过程,目前,对两方面的研究趋于成熟,但是将两者结合进行一体化的调度还处于起步阶段。

(2) 堆场资源分配和设备调度等问题的求解方案研究

针对这些问题求解方案的研究,各国学者都做了大量的研究,但目前还没有理论确定和证明某一个算法解决这类问题更具优势,大量的研究都是用求解方案验证模型和算法的有效性,因此,有关此方面的研究是以后研究的重点。

参考文献

- [1] Mc Dowell. E , Martin, A study of maritime container handing[J]. Oregon State University, Sea Grant College Program Ads, 1985:110-115.
- [2] Daganzo C F. Handing Strategies for Import Container at Marine Terminals [J]. Transportation Research B, 1993:151-166
- [3] Taleb-Ibrahimi, Bernardo de Castilho. Storage space vs handing work in container terminals[J]. Transportation Research Part B:Methodological, 1993,27(1):13-32.
- [4] Kim Hwan- Seong, Lee Sang-Hun, Kwak Kyu-Seok. Allocation model of container yard for effectiveness of ATC work in automated container terminal [J]. Automation and Systems,2002:1947-1950.
- [5] Kap Hwan Kim, Byung Kwon Lee. Optimizing the block size in container yards[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010,46(1):120-135.
- [6] Kap Hwan Kim, Hong Bae Kim. The optimal determination of the space requirement and number of transfer cranes for import containers[J]. Computers Industrial Engineering, 1998,35(3):427-430.
- [7] Kap Hwan Kim , Young Man Park. Deriving decision rules to locate export containers in container yards[J]. European Journal of Operation Research, 2000,124(1):89-101.
- [8] Peter Preston, Erhan Kozan. Genetic algorithms to schedule container transfers at multimodal terminals[J]. International Transactions in Operation Research, 1999,6(3):311-329.
- [9] Ebru, K,bish. A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal[J]. European Journal of Operational Research, 2003,144(1):83-107.
- [10] Andrew Lim, Zhou Xu. A critical- shaking neighborhood search for the yard allocation problem[J]. European Journal of Operational Research, 2006,174(2):1247-1259.
- [11] Lee D-H, Wang HQ Quay crane scheduling with non-interference constraints in pory container terminals[J]. Transport Research Part E: Logistics and Transportation Review,2008,44(1):124-135.
- [12] Kap K Y, Kim K H. Heuristic algorithms for routing yard-side equipment for minimizing loading times in container terminals[J]. Naval Research Logistics, 2003,50:498-514.
- [13] Der-Horng Lee, Jin Xin Cao, Qixin Shi. A heuristic algorithm for yard truck scheduling and storage allocation problems[J].Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review ,2009,45(5):810-820.
- [14] Der-Horng Lee, Jiang Hang Chen. Heuristics for quay crane scheduling at indented berth[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2011,47(6):1005-1020.
- [15] Chung Y.G, Randhawa S.U. A simulation analysis of a tearstained-based container handing facility[J]. computer &Industrial Engineering ,1988,14(2):113-125.

- [16] Kim Hwan Kim. An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals[J]. Transportation Science, 1999,33(1):17-33.
- [17] W.C.Ng, K.L.Mark, Yard crane scheduling in port container terminals[J]. Applied Mathematical Modeling, 2005:263-276.
- [18] W.C.Ng, K.L, Mark. Scheduling trucks in container terminals using a genetic algorithm[J]. Engineering Optimization, 2007,9(1):33-37.
- [19] Henry Y K Lau, Ying Zhao. Integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals[J]. International Journal of Production Economics, 2008,112(2):665-682.
- [20] Thiessen Doug, Santa Ana Jim. Design of a major container terminal at port of Los Angeles[C]. Proceeding of the Ports 95 Conference on Port Engineering and Development for the 21st century,1995
- [21] Amborski Krzysztof. Simulation of container terminal-a general approach modeling and simulation[C]. 16th European Simulation Multi conference, 2002
- [22] Katta G, Murty, Jiyin Liu, A decision support system for operations in a container terminals[J]. Decision Support Systems, 2005:309-332.
- [23] Rommert Dekker, Patrick Voogd, Container Terminals and Cargo Systems[M]. Berlin Germany, Springer Berlin Heidelberg, 2007:131-154.
- [24] Saanen YA. Intelligent stacking as way out of congested yards[J]. Part1 Port Technology, 2006,31(87-92).
- [25] 张维英, 林焰.出口集装箱堆场取箱作业优化模型研究[J].武汉: 武汉理工大学学报.2006,2:314-317.
- [26] 王斌.集装箱码头堆场的一种动态随机堆存方法[J]. 系统工程理论与实践.2007,4(7):147-170.
- [27] 周鹏飞, 方波.动态环境下集装箱码头堆场出口箱箱位分配建模与算法研究[J].控制与决策, 2011, 10 (26) :1571-1576.
- [28] 韩晓龙.集装箱港口装卸作业资源配置研究[D].上海: 上海海事大学, 2005.
- [29] 李建忠, 韩晓龙.集装箱港口堆场轮胎式龙门吊起重机的动态优化配置[J]. 上海海事大学学报, 2005, 26 (3): 44-48.
- [30] 苏君利.大型集装箱码头堆场装卸工艺研究[J].水运工程 2006,10:86-90.
- [31] 李斌.基于哈佛体系结构的集装箱码头物流系统建模仿真研究[D].武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [32] 真虹.集装箱码头生产过程动态图形仿真优化的研究[J].中国图像图形学报.1999,4 (6): 502-507.
- [33] 张婕姝.港口生产调度仿真模型[J].上海海事大学学报.2005, 26(2):42—46.
- [34] 胡艳红.集装箱码头堆场物流系统的仿真与优化[D].天津: 天津理工大学, 2011.
- [35] Kap Hwan Kim, Hong Bae Kim. Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals[J]. International Journal of Production Economics,1999,59(1):415-423.
- [36] Kap Hwan Kim. Young Man Park. Deriving decision rules to locate export container in container yards. European Journal of Operational Research. 2000.1(124).89-101.
- [37] Yusin Lee 和 Nai-Yun Hsu. An optimization model for the container pre-marshalling problem. computer& operation research. 2007.11(34).3295-3313.

- [38] Christopher Exposito-lzquierdo, Belen Melian Batista. Pre-Marshalling Problem :Heuristic solution method and instances generator. Expert Systems with Application.2012.39(9).8337-8349.
- [39] 杨淑芹, 张运杰, 王志强.集装箱堆场问题的一个数学模型及其算法[J].大连海事大学学报, 2002, S1: 73-76.
- [40] 谢尘, 何军良.基于混堆模式的集装箱码头出口箱选为策略[J].上海海事大学学报.2008.29(4).70-75.
- [41] 计三有, 刘德鹏.集装箱码头交通运输组织建模及仿真技术研究[J].水运工程, 2006, 388(5): 22—25.
- [42] 徐骁勇, 潘郁, 丁燕艳.集装箱翻箱问题的蚁群算法改进[J].运筹与管理, 2012, 21(4): 249-255.
- [43] 李建忠.集装箱港口堆场资源配置问题研究[D].上海: 上海海事大学, 2005.
- [44] 董键.混堆模式下集装箱堆场关键资源调度优化研究[D].大连: 大连海事大学, 2011.

致谢

两年半的时光如同白驹过隙，伴随着毕业答辩的到来研究生的学习生涯也即将结束。回首往事，在这个过程中有笑有泪有苦有甜，虽觉压力颇大但也收获硕果累累。课程的学习和科研能力的培养都使我受益匪浅，这些都离不开对我谆谆教诲的老师和同学。

首先，感谢我的恩师康凯教授这几年来对我关怀和指导。从论文的选题、文献收集、问题界定、论文写作等各个方面，康老师都给予了我耐心的指导。在整个研究生期间，康老师始终对我关怀备至，引导我不断的开拓视野，不断向更高的阶段努力发展。康老师严谨的治学态度，精湛的学术造诣以及以身作则的为人处世之道，都是我学习的榜样。能够成为康老师学术研究团队中的成员，我倍感骄傲和荣幸。

我还要感谢张敬师姐、魏旭光师姐和韩永老师，他们在学习方法和阅读技巧方面都给予了指导，通过定期的学术交流报告会，不仅增加了我的领域知识，也增强了语言表达能力。

感谢同门的兄弟姐妹们，杨晓旭、纪璐、樊竹君、高聪、沙涛、郭凌云、苗凤娜、尚倩等，我们一起探讨，一起学习，有了他们的鼓励，研究生的生活变得充实。感谢师弟师妹刘菊、陈晨、杨潇等，有了他们的帮助，研究生的生活美好而幸福，这份友情我将铭记终生。

感谢我的室友杨希瑾、王西更、沈建国和李运超，虽是短短两年半的相处，但我们却如同家人，很庆幸在如此年华认识他们，祝福我的兄弟们能够有一个锦绣的前程。

在此，特别感谢我的家人对我一如既往的理解和支持，感谢我的女朋友对我无尽的关怀和鼓励。他们是我不断前进的动力，在今后的人生道路上我将更加奋进，争取实现他们对我的殷切期望。

最后，衷心感谢各位百忙之中对我的论文进行评审的专家学者们，不当之处恳请提出宝贵的意见和建议。

致谢攻读学位期间所取得的相关科研成果

临港物流园区的信息集成与配送系统关键技术研究，2009-2011，河北省科技支撑计划项目（项目编号：09215603D）。