

分类号: U691.3

密 级: 公开

U D S: 629

单位代码: 11646

# 宁波大学

# 硕士学位论文

论文题目: **集装箱码头堆场出口箱箱位分配优化研究**

学 号: 1511084909

姓 名: 薛浩勇

专 业 名 称: 港航技术与管理工程

学 院: 海运学院

指 导 老 师: 姜桂艳 教授

论文提交日期: 2018 年 6 月 25 日

A Thesis Submitted to Ningbo University for the Master's Degree

**Research on optimization of container location  
allocation for container terminal yard**

Candidate: Xue Haoyong

Supervisor: Professor Jiang Guiyan

Faculty of Maritime and transportation  
Ningbo University  
Ningbo 315211, Zhejiang P.R.CHINA

June 25, 2018

## 独 创 性 声 明

本人郑重声明：所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得宁波大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

## 关于论文使用授权的声明

本人完全了解宁波大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或者部分内容，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵循此规定）

签名：\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

# 集装箱码头堆场出口箱箱位分配优化研究

## 摘 要

国际贸易以较高速度发展,货物运输的需求量也不断增加,作为运输主力的集装箱运输业迎来了快速发展的机遇。码头随着经济增长有了较大发展,同时也面临着码头之间的竞争关系的升级,实力强劲的码头联盟吞并小型码头个体成为常态。受集装箱码头不可变的资源限制,码头现有的堆场规模难以满足快速增长的集装箱吞吐量。因此,合理安排堆场资源,提高堆场集装箱箱位分配的质量,一向都是集装箱码头自动化领域的热门课题。

由于出口箱集港时间存在不确定性,以及堆场堆存情况的多样性,集装箱码头堆场内出口箱堆存作业变得更加复杂。通过合理分配并有效利用堆场内有限的已有资源,提高集装箱码头堆场出口箱的堆存质量,提升集装箱码头在业内的竞争力,本文在以下三个方面取得了相应的研究进展。

第一,提出一种可在出口箱集港前获得静态计划的出口箱箱位分配静态优化模型与算法。在得到航运公司的订舱单信息和码头生产实况的前提下,为各类出口箱制定堆存优先等级的划分方法,以均衡各装船时各作业线之间的作业量、最小化内集卡水平运输距离和预期翻箱数等于零为目标函数,建立出口箱箱位分配静态优化数学规划模型。在出口箱未集港时,不受出口箱到港时间的限制,可以静态圈定各类出口箱允许堆存的空间范围,以此设计整套静态求解算法。实证分析表明,所提出的模型和求解算法能够实现出口箱在码头堆场内的静态箱位分配,其集卡水平运输距离低于对比方法。

第二,提出一种用于出口箱到港后实时确定堆存位置的出口箱箱位分配动态优化模型与算法。在各类出口箱到港时间不确定的情况下,分析影响出口箱箱位分配质量的作业环节及相互关系,综合集卡运输作业、场桥堆存作业和出口箱选择箱位堆存,以最小化装船时的翻箱率为目标函数,建立出口箱箱位分配动态优化数学规划模型,并设计相应的出口箱箱位分配动态求解算法。实证分析表明,所提出的模型与求解算法可以实现出口箱在堆场里实时决策堆存的优化,而且堆存产生的翻箱作业低于对比方法。

第三,提出一种将出口箱箱位分配静态优化和动态优化相结合的作业流程,即为本文的第三章和第四章。以静态最佳计划为基础,在出口箱集港期内采用动态优化方法克服出口箱集港时间不确定因素带来的弊端,为出口箱实时决策堆存箱位。实证分析表明,出口箱箱位分配静态优化和动态优化相结合的优化方法能进一步提高出口箱箱位分配的作业效率。

本文中所涉及到的研究内容、研究方法和研究成果是基于集装箱码头堆场的实际操作环境,是对集装箱码头堆场出口箱箱位分配研究方法的进一步探索和补充,所取得的

研究成果对集装箱码头堆场出口箱箱位分配研究方法具有一定的学术意义，并且对从整体上提高码头的作业效率，全面提升码头竞争力具有一定的实用价值。

本文的主要创新点主要有以下两个方面：

（1）混堆贝位内出口箱箱位分配策略的创新。以预分配方案为导向，设计了箱位分配算法，根据出口箱的到港顺序进行实时动态调整堆存作业，进一步降低了出口箱翻箱率。

（2）出口箱箱位分配优化方法的创新。采用静态优化方法和动态优化方法相结合的方法。首先采用静态优化方法得到静态最佳计划，然后以静态最佳计划为基础，采用动态优化方法对出口箱堆存进行实时堆存作业，达到较好的优化效果。

**关键词：**集装箱码头，出口箱，箱位分配，整数规划，优化

# **Research on optimization of container location allocation for container terminal yard**

## **Abstract**

With the international economy developing at a high speed and the demand for goods transportation increasing, the container transportation industry, as the main transport, is experiencing the opportunity of rapid development. The port enjoys the benefits of economic development, however the port also faces the upgrading of the competition between the ports, that the strong port alliance has become the norm for the annexation of small port individuals. Limited by the inherent space resources of the port, the scale of the port is difficult to meet the increasing container throughput. Therefore, it has always been a hot topic in the automation field of container terminals to arrange the storage resources reasonably and improve the efficiency of yard work.

Due to the uncertainty arriving time of the export container and the diversity of the yard situation, the storage operation in the container terminal yard becomes more complicated. In order to reasonably allocate the limited resources in the yard, improve the storage efficiency of container terminal yard and improve the competitiveness of container terminals in the industry, this paper has made corresponding research progress in the following three aspects.

Firstly, a static optimization model and algorithm is proposed to obtain the static plan before the export containers arriving. By the shipping company booking information and under the premise of port production state, formulate a hierarchy for export containers storage, in order to divide in equilibrium between each line when loading, minimize the level set inside of the transport distance and remove the turnover in yard as the objective functions, export container static space distribution optimization model is established. During export container not coming, without the restriction of arriving time of containers, statically assign storage scope for all kinds of export containers, in order to design a whole set of static algorithm. The empirical analysis shows that the proposed model and algorithm can realize the static container allocation in the dock yard, while ensuring that the optimization objectives are taken into account.

Secondly, this paper presents a dynamic optimization model and algorithm for the location allocation of export boxes for real-time decision-making storage in the whole storage yard. In the case of uncertain arrival time of various export containers, the paper analyzes the operation links

and their relationships that affect the efficiency of export container location allocation, In this paper, a dynamic optimization model of box location allocation for export boxes is established based on the objective function of minimizing the turnover rate when loading, which includes the transportation operation of collecting cards, the stacking operation of field bridges and the selection of box location for export boxes, and the corresponding dynamic solution algorithm is designed. The empirical analysis shows that the proposed model and algorithm can realize the optimization of the real-time decision-making and bit selection stacking of the export boxes in the storage yard, and the turnover operation generated by the stacking is lower than that of the contrast scheme.

Thirdly, this paper presents a job flow which combines static optimization and dynamic optimization of box position allocation in export box, which is combined by the first and second parts. Based on the static optimal plan, dynamic optimization method was used to overcome the disadvantages caused by the uncertain factors in the collection period in the port, so as to make a real-time decision for the export containers. The empirical analysis shows that the optimization method combined with static optimization and dynamic optimization can further improve the efficiency of the distribution of the containers.

Involved in this paper the research content, research methods and results are based on the actual operating environment, are further exploration of the research methods for distribution, and the results obtained have certain academic significance, and have certain practical value for improving the efficiency of terminal operation and the port competitiveness.

The main innovation of this paper mainly has the following two aspects:

(1) Innovation of slot allocation strategy for mixed reactor bay inner outlet box. Based on the pre-allocation scheme, a slot allocation algorithm is designed to dynamically adjust the stacking operation in real time according to the arrival sequence of the outlet boxes, thus further reducing the turnover rate of the outlet boxes.

(2) Innovation of optimization method for box position allocation of export box. The static optimization method and the dynamic optimization method are combined. Firstly, the static optimal plan is obtained by static optimization method, and then the dynamic optimization method is used to carry out real-time stacking operation on the export box stacking based on the static optimal plan, so as to achieve better optimization effect.

**Key Words:** Container terminal, export container, slot allocation, integer programming, optimization

# 目 录

1 绪论.....	1
1.1 背景与研究意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 出口箱箱位分配关键效能指标研究现状.....	2
1.2.2 出口箱箱位分配静态和动态优化研究现状.....	3
1.2.3 出口箱箱位分配优化方法研究现状.....	5
1.3 研究内容与论文结构.....	5
1.4 研究方法与技术路线.....	7
2 出口箱箱位分配的研究基础.....	9
2.1 集装箱码头总体布局.....	9
2.2 集装箱码头堆场资源.....	11
2.2.1 空间资源.....	11
2.2.2 设备资源.....	12
2.3 集装箱码头出口箱作业流程.....	12
2.4 集装箱码头出口箱箱位分配影响因素.....	14
2.5 集装箱码头出口箱箱位分配基础信息.....	16
2.6 本章小结.....	17
3 出口箱箱位分配静态优化研究.....	18
3.1 概述.....	18
3.2 问题描述及基本假设.....	18
3.3 符号说明.....	20
3.4 优化模型建立.....	22
3.5 算法设计.....	23
3.6 实证分析及比较.....	27
3.7 本章小结.....	29
4 出口箱箱位分配动态优化研究.....	30
4.1 概述.....	30
4.2 问题描述及基本假设.....	30
4.3 符号说明.....	32
4.4 优化模型建立.....	33
4.5 算法设计.....	34
4.6 实证分析及比较.....	38
4.7 本章小结.....	58



5 结论与展望.....59

    5.1 本文总结.....59

    5.2 主要创新点.....59

    5.3 本文研究方向的展望.....60

参考文献.....61

附录 A Matlab 编码.....65

附录 B 实证案例原始数据.....74

在 学 研 究 成 果.....79

致    谢.....80

# 1 绪论

## 1.1 背景与研究意义

随着全球经济的发展与蔓延,全球贸易逐渐展现出良好的发展态势与前景。然而受 2008 年全球经融危机和我国近年新常态经济环境的影响下,国民经济发展从高速转为中高速增长。据国家统计局发布的 2016 年国民经济运行情况数据显示,2016 年进出口总额为 243386.46 亿元,同比下降 0.86%<sup>[1]</sup>。但是,据交通运输部公布的数据显示,1-11 月全国规模以上码头累计完成货物吞吐量 118 亿吨,同比增长 3.2%;累计完成 21798 万 TEU 的集装箱吞吐量,同比增长为 3.6%,业务量不减反增<sup>[2]</sup>。集装箱运输以其运价低,速度快,装卸效率高和安全系数高等优点为契机,在经济发展中货物运输中应用广泛。集装箱码头作为集装箱运输中较为重要的中转缓冲环节部分,发挥着不可替代的作用。

集装箱码头堆场是集装箱码头占地面积最大的场所,用于集装箱拼装、检修、缓存,为出口箱集港提供暂存空间,为出口箱疏港提供预备整理空间。堆场内的出口箱堆存优劣直接影响后续作业环节的工作效率和生产成本。随着集装箱吞吐量的大幅增长,加上集装箱船的大型化进程不断推进<sup>[3]</sup>,使得集装箱码头堆场内的作业量剧增,我国码头不得不加快码头建设速度,提高服务水平和作业效率,以满足日益增长的运输需求。

集装箱码头堆场具有高度的机械化水平,其设备设施价格昂贵,在短期内增加设备设施不可取,再有受地域空间资源的限制,增加空间资源来提高堆场内出口箱箱位分配质量显然不切实际。然而,集装箱客户对于码头的服务水平要求高,要求在集装箱运输过程中既安全又高效,导致码头之间的竞争关系相当紧张。在如此严峻的市场环境下,集装箱码头必须加强对现有的资源进行合理有效的管理和分配,提升自身服务水平,提高码头竞争力。集装箱码头堆场内出口箱的堆存质量直接影响到船舶靠泊装卸时间,从而影响到码头码头服务水平,集装箱码头堆场出口箱合理堆存对提高码头综合作业效率具有较大助益。

集装箱码头堆场出口箱箱位分配问题是业内公认的 NP-Hard 问题。集装箱堆场出口箱箱区贝位分配不合理,会影响装船时集卡的运输距离和设备设施使用效率,再者,集装箱堆场出口箱贝位内箱位分配不合理,会影响装船取箱时翻箱作业次数增加,也增加了设施设备作业量,延长了堆场作业时间和船舶靠港装卸时间。出口箱在堆场中的箱位分配质量直接影响出口箱后续作业效率,从而影响整个码头的综合管理水平和码头竞争力。所以,如何合理进行集装箱码头堆场出口箱贝位选择和箱位分配已经成为码头企业关切的问题。

本论文以集装箱堆场出口箱空间资源分配为研究对象,运用一定的科学方法,改善现有的出口箱在堆场中的箱位分配状况,以期顺利实现以下的理论意义和现实意义。

(1) 完善理论研究科学体系。通过对出口箱空间资源分配的研究, 继承前人的研究成果, 同时, 在此基础上对出口箱箱位分配进行更深入的研究, 建立有效的模型, 为出口箱空间资源分配, 提供新的研究思路。

(2) 提高码头企业的竞争力。优化出口箱箱位分配的方案, 可以提高集装箱堆场的空间利用率和码头设备的工作效率, 加快出口箱的流转速度, 降低生产成本, 提升利润空间, 同时提高码头综合竞争力。

(3) 缩短集装箱船舶的靠泊时间。对出口箱进行合理的贝位选择和箱位分配, 缩短出口箱装船时间, 就能减少船舶在港装卸时间, 避免船期延误等不良后果。

(4) 推动区域经济的发展。提高出口箱的集港和疏港效率, 可以保证区域物流的流畅性, 避免在重要节点处发生阻滞现象, 为区域经济的发展打好坚实的基础。

## 1.2 国内外研究现状

面对全球化和集装箱化的迅猛发展, 海运集装箱码头在当今世界贸易中扮演着重要的角色。由于集装箱转运量的不断增长和码头的不断发展, 近几十年专家与学者不断探究许多与自动化和集装箱化有关的课题。在集装箱码头内存储和转运集装箱是这类课题中较为热门的课题之一, 其包括在集装箱到达时确定其在码头存储空间中的确切位置, 同时考虑若干限制并保证集装箱和所有码头的安全。已有文献针对集装箱在码头内堆存的作业问题已取得了较多的成果, 大致可分为关键效能指标、静态和动态优化和求解方法。

### 1.2.1 出口箱箱位分配关键效能指标研究现状

为了提高集装箱码头管理的效率和码头的竞争力, 已有文献一贯采用关键效能指标衡量码头管理水平。随着集装箱码头堆场的空间布局不断革新完善, 设备设施和管理手段更加精密和高效, 不同时期的科研人员研究集装箱堆存作业所取的关键效能指标有所不同, 所涉及的指标可以分为两种: 资源占用型指标和作业效率型指标。

#### (1) 资源占用型指标

在集装箱堆存的研究领域, 早期的国外研究人员在采用资源占用型指标的研究中成果较多, 而当时国内研究人员很少涉足此领域。

现有研究中, 在有限的可用堆场空间内合理规划所占空间的大小(或堆积容量最大化)和其他设备资源的使用量是最常用的资源占用型指标。例如 Talebibrabimi<sup>[5]</sup>将不设置缓冲区和设置缓冲区两种策略进行对比, 以探究出口箱箱位分配问题, 结果表明不设置缓冲区的做法可减少堆场操作量, 而设置缓冲区的做法可提高箱位利用率。Holguinveras<sup>[6]</sup>将集装箱堆场出口箱堆存与出口箱在堆场内的堆存成本作为研究对象, 并根据码头内运输成本的不同将出口箱分为若干等级, 以此确定最优的面积配比方案。Gambardella 等<sup>[7]</sup>使用模拟技术同样解决在码头内集装箱的空间分配问题。Kim 等<sup>[8]</sup>以最

优的堆场面积和设备设施数量为目标建立费用模型，其中费用包括堆存空间成本、场桥作业成本和集卡运输成本，以此得到资源分配方案。同样，Kim 等人<sup>[9]</sup>也开发出一种成本模型为堆存进口箱使用的存储空间和起重机最佳数量方案进行评估。Lim 等人<sup>[10]</sup>利用这种效能指标评估出口箱空间分配的质量。Kim 等人<sup>[11]</sup>为出口箱堆存提出须为每艘船舶预留堆存空间以待将要到港的集装箱堆存。Woo 等人<sup>[12]</sup>进一步介绍了空间保留的概念，以最小化保留的空间大小。然而码头的空间资源较为短缺，将空间资源高效利用是提高码头作业效率的重要保障。

### （2）作业效率型指标

随着集装箱堆存研究领域的不断深入，研究重点逐渐向集装箱码头内作业效率的研究方向转移。在现有的文献中，许多研究工作是在集装箱码头用于集装箱堆存的空间资源和设备资源不可增减的前提下进行的。在这种情况下，提高码头转运集装箱效率，使集装箱可以快速完成点对点运输是码头的目标，即最小化集装箱船完成装卸的总时间。集装箱码头内作业流程复杂，为达到该目标可以通过多种方法实现。

在文献中，最小化装船时的翻箱率<sup>[15,22,55]</sup>是最受关注的作业效率型指标。国内相关文献<sup>[30,43,45,55,59]</sup>也对该指标有所研究。由于集装箱码头内堆存空间资源是较为稀缺的资源，文献<sup>[5,21,24]</sup>对箱区利用率进行了研究，认为在码头中建立缓冲区可以提高箱位利用率<sup>[5]</sup>，并且对集装箱进行合理分类堆存明显优于随机堆存<sup>[24]</sup>。码头除了空间资源，高效利用设备资源也是非常重要的。为高效发挥各区块内设备设施的生产力，均衡箱区之间的作业量在许多文献<sup>[18,20,50,60]</sup>中受到重视。除此之外，充分发挥码头的场桥和集卡的作业效率也能提高码头的作业效率，故文献<sup>[39,54,74]</sup>将最小化装船时集卡运输距离作为研究目标，还有一些文献<sup>[19,34,47,73]</sup>将最小化场桥移动距离作为研究目标。

由于近年来集装箱运输量的大幅上涨，码头内的箱区利用率已达到较高水平，故均衡箱区之间的作业量渐渐失去研究价值。如何在码头箱区利用率较高水平的前提下，保证装船时翻箱率较低和集卡运输距离较短，同时保证场桥移动距离较短成为较为主流的研究方向。

### （3）小结

资源占用型指标是对码头内资源使用数量方案的决策研究，考虑到码头空间资源较难扩张，设备设施资源更新成本较大，码头更倾向于提高现有资源的使用效率来提高码头的作业效率。在作业效率型指标中最受关注的指标是最小化装船时的翻箱率，在保证较小的翻箱率的前提下，降低集卡平均水平运输距离和场桥的移动距离则成为值得关注的指标。

## 1.2.2 出口箱箱位分配静态和动态优化研究现状

码头内出口箱箱位分配的研究可以是静态的，也可以是动态的，其主要是根据所涉

及到的课题内容。出口箱箱位分配静态优化研究主要是指,在各影响因素是已知的情况下,通过研究方法得到一个较优解;而出口箱箱位分配动态优化研究主要是指,在某些因素未知,并且未知因素对研究具有一定的影响,在研究时需保有一定可调空间。如果课题内容利用静态研究方法就能解决则不需要采用动态的研究方法,而如果课题内容中因为一些不确定信息或者其他因素导致静态研究方法无法有效解决,则需要利用动态的研究方法。

从静态的角度来看,集装箱堆存问题是得到一个允许执行过程发生一些微小变化的集装箱堆存方案。不考虑某些意料之外的事情,集装箱到达堆场的事件认为是确定的。在这种情况下,集装箱堆存系统能够预先制定出有效的分配方案可提高码头作业效率。已有文献研究了不同静态角度的集装箱堆存问题,可以区分两种主要类型的静态集装箱堆存问题。第一种类型是静态集装箱堆存数量分配问题,在集装箱集港前根据订舱单上的箱数分配每个箱区的堆存数量。此类问题一般涉及均衡箱区之间作业量和最小化集卡运输距离两个指标。例如 Zhang 等<sup>[20]</sup>采用两阶段方法进行箱位分配,建立数学规划模型,第一阶段以各箱区内分配箱量为决策变量,以平均各箱区之间的出口箱作业量为研究目标;第二阶段以最小化出口箱所在堆存箱位与对应船舶所靠泊位置之间的总距离为研究目标。事实上,集装箱应该尽可能靠近泊位。同样,Chen 等<sup>[55]</sup>为贝位分配出口箱数量,以最小化集卡运输距离和平衡贝位之间的作业量为目标,建立混合整数规划模型进行求解。文献<sup>[33,36]</sup>也进行相似的研究工作。第二种类型是为了最小化在装船过程中翻箱次数进行的预翻箱问题。例如,Forster 等人<sup>[56]</sup>试图通过最小化预翻箱时间来最小化卡车的等待时间。Molins 等人<sup>[57]</sup>也通过尽量减少集装箱的预翻箱次数来处理这个问题,以便将所有优先提取的集装箱放在堆栈顶部。然而,如果在集装箱到港时的堆存策略已经考虑了减少预翻箱的问题,预翻箱次数自然会减少,故预翻箱操作存在被完全取消的可能性。

从动态角度出发,考虑集装箱码头状态的实时变化,问题在于实时确定集装箱堆存具体位置。由于集装箱是猪哥到港,其到达的顺序极为复杂,采用静态研究方法无法保证较低的装船时翻箱率,只能应用动态研究方法对集装箱堆存进行实时决策。例如 Kim 等<sup>[15]</sup>考虑出口箱集港时间的不确定,以最小化翻箱数为目标,按照不同目的港独立贝位堆存和同一目的港允许贝位内重量等级混合堆存的规则,为随机集港的出口箱建立箱位分配动态规划模型,采用实时决策的决策树规则进行求解。范灵芳等<sup>[44]</sup>以最小化翻箱数为目标,采用一种基于重量等级混合堆放的启发式算法在贝位内为出口箱分配箱位,有效减少了装船时出口箱的翻箱率。还有,钟明<sup>[64]</sup>考虑了集装箱重量概率分布变化的因素,建立重量分布概率精确和模糊两种模型,采用翻滚策略实时决策集装箱堆存箱位,由于其需要较大的计算量,需要计算机手段支持其完成具体操作。

综上所述,静态和动态优化方法所适用的研究内容不同,静态优化方法适用于可预先做出规划且能较好履行的情况,而动态研究方法适用于影响因素多变的情况,必须视

具体情况而定。所以本文在出口箱箱位分配的研究中,利用静态优化方法规划出不涉及具体堆存箱位的静态计划,利用动态优化方法实时得到集装箱的具体堆存箱位。

### 1.2.3 出口箱箱位分配优化方法研究现状

关于集装箱堆存的文献提供了大量依赖于问题类型以及问题特征的解决方法。已有文献使用的优化方法可以包括最优化方法和人工智能方法。

较多文献都建立了非线性整数规划模型描述优化方法。还有文献对整数规划模型进行优化,建立多样式的整数规划模型,例如 Ming-Kun Li<sup>[67]</sup>通过层次分析法分解箱位分配计划过程,构建了整数规划两阶段模型,第一阶段均衡箱区之间的作业量,第二阶段以减少箱区数量为目标,提出灵活分配策略进行求解。方波等<sup>[41]</sup>以最小化翻箱量和场桥行驶距离为目标,也建立预分配和实分配两个阶段整数规划模型,其中,预分配阶段根据预约交箱信息和预约时间为基础的预约交箱序列建立,实分配阶段根据实际交箱信息和预分配形成的初始调度方案建立。台伟力<sup>[73]</sup>构建出口箱箱区选择与箱位分配两阶段整数规划模型,利用相对应的双层遗传算法进行求解。

在求解模型的算法方面,所使用的方法基本是基于制定规则的启发式算法。例如, Kim 等人前后两次利用次梯度优化算法来进行求解出口箱箱位分配模型<sup>[13,21]</sup>; Kim 等人<sup>[15]</sup>和 Kim 等人<sup>[19]</sup>利用决策树的规划方法来进行求解; Zhu 等人<sup>[51]</sup>和刘曙光<sup>[65]</sup>利用分支定界法对所建模型进行求解。更多的研究人员采用遗传算法,如 Preston 等人<sup>[17]</sup>、Kozan 等人<sup>[26]</sup>和 W.C.Ng 等人<sup>[27]</sup>都是基于遗传算法进行求解模型。与遗传算法较为接近的方法有邻域搜索算法<sup>[23,35,64]</sup>、模拟退火算法<sup>[25]</sup>和禁忌搜索算法<sup>[40,45,49]</sup>。由于集装箱堆存是个 NP-Hard 问题,这些算法只能得到较优解。为解决降低装船时翻箱率的问题,考虑到翻箱作业与集装箱上下堆叠关系有关,将该问题简化至单个贝位内的集装箱堆存问题,文献<sup>[30,43]</sup>利用直角坐标系内划线的方法堆存集装箱,还有文献<sup>[44,70]</sup>在允许混堆的基础上,利用一种基于规则的堆存策略进行堆存集装箱,有效降低了装船时出口箱的翻箱率。

综上所述,在研究码头内集装箱堆存的已有文献中,大多对所研究的问题通过建立非线性整数规划模型,其模型的形式由研究内容所定。从文献采用的求解方法上看,多数方法其本质是建立具有导向性的规则,关键在于该规则的制定,由于集装箱堆存问题的复杂程度,规则制定地越细致越有助于优化的效果。本文在总结以往研究中的优化方法上,综合出口箱在箱位分配作业环节时的一系列考虑因素,制定整套出口箱箱位分配作业规则。

## 1.3 研究内容与论文结构

本论文的主要研究内容是集装箱码头出口箱箱位分配静态和动态模型的建立与相应的算法研究。通过对现有文献的分析,研究出口箱堆存作业的内容分为以下三个方面:出口箱箱位分配静态优化、出口箱箱位分配动态实时堆存作业环节和出口箱箱位分配静

态计划与动态堆存联合调度。

### （1）出口箱箱位分配静态优化

在出口箱集港之前，运用静态优化方法制定最佳的箱位分配计划，可以预先获知出口箱的总箱数和各类型出口箱的数量与集港期开始时码头堆场空间占用情况，并模拟出口箱堆存结果。在得到航运公司的订舱单信息和码头生产实况的前提下，首先依据制定好的堆存优先等级划分方法为出口箱确定堆存优先等级，以最小化内集卡水平运输距离为目标选择最佳堆存区域指派给各类出口箱，并保证区域空间大小与出口箱空间需求较为相符。然后遵从装船时的设备作业规则，以均衡各装船时各作业线之间的作业量和预期翻箱数等于零为目标函数，为各类出口箱指派至特定堆存空间范围内。依据该思路建立出口箱箱位分配静态优化模型。接着，在出口箱未集港时，不受先来后到的限制，以此设计一种从选择堆存箱区到确定各类出口箱堆存空间范围的整套静态求解算法。最后通过数值实验将该模型算法与已有文献算法进行比较。

### （2）出口箱箱位分配动态优化

出口箱箱位分配动态实时箱位分配是整个出口箱箱位分配过程的重要环节。已有文献采用不同方法对出口箱实时堆存进行优化研究，都取得了预期的效果。但出口箱箱位分配环节涉及到每一个出口箱，不仅需要确定出口箱堆存箱区及贝位，而且需要确定出口箱的具体堆存位置，更重要的是两者存在相互联系的关系，需要进行整体优化研究。因此本文在各类出口箱到港时间不确定的情况下，理清影响出口箱箱位分配作业效率的作业环节及相互关系，分析出口箱产生翻箱作业受出口箱到港时间不确定性的影响程度，结合集卡水平运输调度、场桥取存集装箱调度和出口箱箱位分配作业，以最小化装船时翻箱率最低为目标函数，建立出口箱箱位分配动态优化模型，并设计相应的动态堆存求解算法。最后通过实证分析，验证所提出的模型与求解算法的可行性，同时获得出口箱堆存方案、场桥作业路径方案和翻箱作业方案。

### （3）出口箱箱位分配静态计划与动态堆存联合调度

出口箱箱位分配静态计划与动态堆存联合调度是由第（1）部分和第（2）部分组成，是出口箱堆存实现的重要保障，前者是后者的基础，后者是前者的具体实现。本文全面分析出口箱箱位分配的各个环节，确定各个时段中适合进行的作业环节。首先考虑集装箱码头出口箱业务的复杂性，在出口箱集港前采用静态优化方法得到箱位分配静态最佳计划，然后在出口箱集港期内采用动态优化方法克服出口箱集港时间不确定因素带来的弊端，为出口箱实时决策堆存箱位，最后转化为出口箱箱位分配静态优化模型和动态优化模型。最后通过实证分析验证静态计划和动态堆存两者的切合度，并与对比方案进行比较。

根据本文的研究内容，本文章节安排共分为 5 章，如图 1.1 所示，各章安排如下：

第一章 绪论，对本文课题的背景、研究意义、国内外研究现状等内容进行简要说

明，并陈述本文研究的主要内容、本文章节结构和研究方法及技术路线。

第二章 出口箱箱位分配的研究基础，本章介绍集装箱码头总体布局及功能、堆场空间资源和设备资源、出口箱作业流程、出口箱箱位分配影响因素与基础信息。

第三章 构建出口箱箱位分配静态优化模型，设计模型的静态优化求解算法，并通过实证分析与对比方法进行对比，以证明模型与算法的先进性。

第四章 构建出口箱箱位分配动态优化模型，设计模型的动态优化求解算法，并通过实证分析与对比方法进行对比，以证明模型与算法的先进性。

第五章 结论与展望，对本文所做研究进行总结性说明和陈述，指出在研究过程中所存在的不足，明确后期深入研究的主要方向。

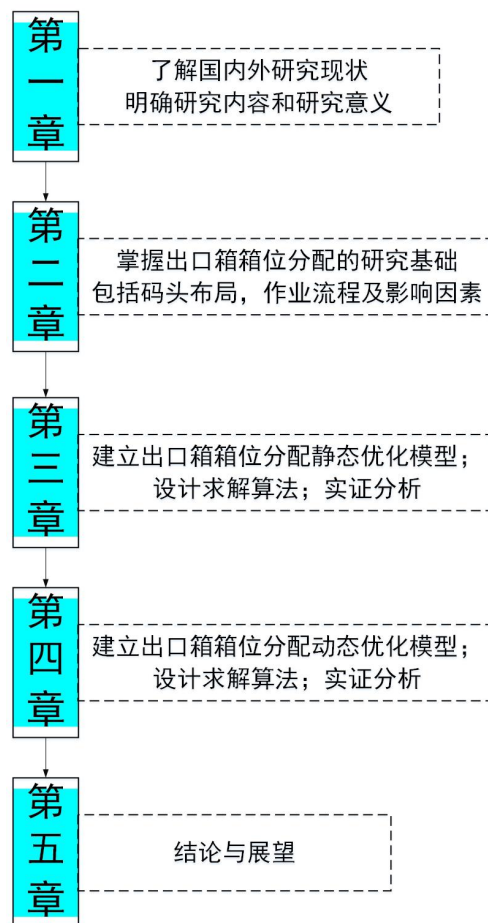


图 1.1 论文结构框图

Fig.1.1 Structure framework of research

## 1.4 研究方法与技术路线

本课题本着结合实际的原则，采用观察法亲自前往集装箱码头进行亲身体验和实地调查。同样遵从理论与实际并重的原则，采用文献研究法对现有文献进行研究阅读，了解已有研究成果。然后，本课题把数学方法和模拟方法相结合的方法，将抽象的抽象模



型转化为直观的数学模型。再次，应用跨学科研究法，为了模型的实现借用计算机技术进行模拟，最后采用定量分析法，使用具体案例进行检验模型算法，证明其有效性。

(1) 文献研究法。查阅国内外专业文献，确定论文研究目的和意义。

(2) 实地调查法。对本地区的中大型码头企业进行实地调研，了解码头内集装箱堆场主要作业流程，坚持理论联系实际的原则。

(3) 数学规划法。利用数学知识建立集装箱码头堆场出口箱位分配模型和贝内箱位分配模型，将复杂的集装箱码头实际情况进行定性处理，方便本文的研究。

(4) 启发式算法。基于传统的启发式算法，设计适用于本论文模型求解的启发式算法。

(5) 仿真验证法。基于所设计的启发式算法编写程序代码，利用 MATLAB 优化软件进行仿真验证。

(6) 比较分析法。选取文献中典型案例，对所建模型进行对比分析。

本研究的技术路线如图 1.2 所示。

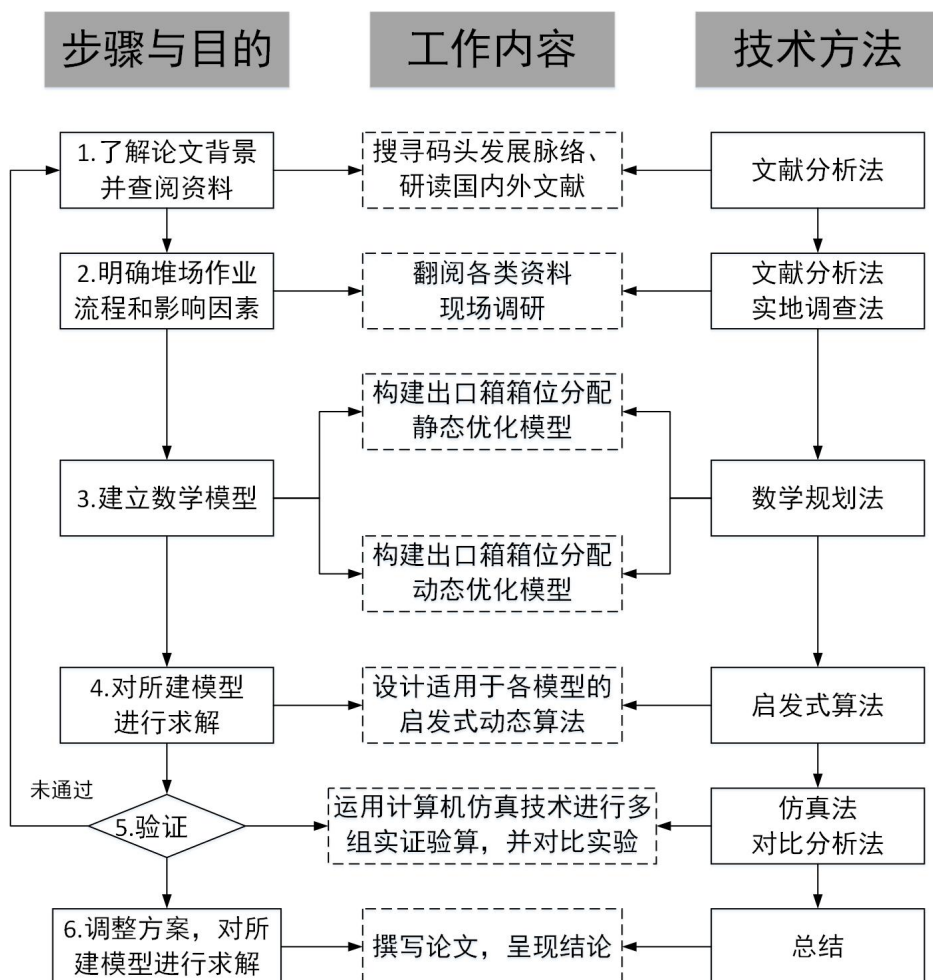


图 1.2 技术路线图

Fig.1.2 Technology roadmap

## 2 出口箱箱位分配的研究基础

集装箱码头是一个时代的产物，在国际远洋航运业的发展中起到了非常重要的作用。被称为海上集装箱之父的美国人 Malcom Mclean 在 1955 年首次提出海洋运输采用集装箱方式，并且提出要把海运和陆运紧密联系起来的观点<sup>[4]</sup>。从那时开始，集装箱运输的发展渐渐展现出自己的优势和广阔的前景。我国的国际集装箱运输业起步稍晚，自 1978 年 9 月 26 日“平乡城”轮从上海首次远航至澳大利亚获得成功以来，也开始发展迅速。世界集装箱吞吐量十大码头排名中我国已经占有 7 个席位<sup>[16]</sup>。在整个集装箱运输过程中，集装箱码头的存在对提高集装箱运输周转、提高货运速度和减少成本等方面，起到了重要的作用。

### 2.1 集装箱码头总体布局

从整体的角度看，集装箱码头是一个具有社会性质的服务型企业，主要的服务对象是集装箱。进出码头的集装箱具有流动性，再加上集装箱进出口业务办理十分复杂，集装箱码头码头的布局需要适应服务对象的特征，才能提高服务质量，提高企业效益。现将集装箱码头的主要几个组成部分分述如下<sup>[32]</sup>。

#### （1）泊位

泊位（Berth）指的是，给靠港船舶提供进行卸装作业的作业区域，由岸壁线与对应水域构成。泊位的设置形式有固定泊位和自由泊位两种。固定泊位是指泊位长度和位置固定，单个泊位内只容许停靠一艘船舶的泊位；自由泊位是指具体泊位长度和位置不固定，允许船舶在整条泊位岸线上停靠的泊位。随着集装箱船的大型化发展，泊位的长度和深度也在不断地增加。现如今，新建的码头泊位长度在 300 米以上，水深在 14m 以上。泊位岸壁上需要设置系缆桩、碰垫木等以供船舶停靠系固。值得注意的是，泊位需要保留有富余长度，保持前后船舶的安全距离，通常泊位富余长度约为船舶长度的 20%。

#### （2）前沿

前沿（Apron）指的是，从用于船舶停靠的泊位岸壁线到前方堆场之间的码头区域，由码头岸壁线围成。前沿区域是出口箱装船和进口箱卸船的作业场所，装备有集装箱岸桥。由于需要提供足够的空间给集装箱卡车进出，前沿的宽度一般控制在 30-70m 之间。该区域还会安装配电箱、岸桥电缆沟、供水设施、船用电话接口等，一些是前沿的辅助设备，另一些是为靠港船舶服务的。

#### （3）堆场

堆场（Container yard, CY）是集装箱码头内可对集装箱进行装卸、堆存、维修、检查、交接、转运的场所，是码头的较为重要的组成部分，也是码头中占地面积最大的场所。堆场的大小并不固定，只要码头有空闲区域都可以被开发改造成堆场的一部分，因为堆场面积是码头最为稀缺的资源之一，其占地面积是衡量一个集装箱码头综合竞争力

高低的重要指标之一<sup>[14]</sup>。作为码头后方与前方的交接区域，堆场内的作业管理形式多样，规范性极高，提高堆场内的作业效率是需要长期研究的课题。

#### （4）集装箱货运站

集装箱货运站（Container freight station, CFS）是集装箱码头对集装箱进行货物拼装和拆分的场所。在集装箱运输过程中，经常会遇到集装箱内货物不满的情况，码头为了节约运输资源，提高运输效率，往往会将合适的不足以装满单个集装箱的货物存放在一个集装箱内，便于运输。然而，有些码头专注于传统码头业务，将这一块的业务迁至码头外进行，特别是对于陆地面积紧张的码头。

#### （5）行政管理楼

行政管理楼（Administrative building）是集装箱码头内部所有行政职能部门和管控部门的集中办公场所。由于码头往往地处偏僻区域，为了方便客户并且提高码头行政服务质量和码头装卸作业效率，很多码头企业会在行政管理楼内专门开辟空间给船公司、理货公司、代理公司、银行、保险公司等相关企业，另外海关、边防、检疫等政府职能部门如有需要也会在此设置办公室。

#### （6）控制室

控制室（Control tower）是集装箱码头发出指挥调度码头各项作业，配置码头各项资源的指令的决策中心。一般控制室位处行政大楼的高层，有利于管理人员观察码头全局和各工作场区。控制室内设备繁杂，除了先进的计算机控制系统，还有通信系统、监控系统、气象预报系统等。智能系统的先进性是码头现代化的重要标志之一<sup>[28]</sup>。

#### （7）维修车间

维修车间（Maintenance shop）是集装箱码头内部用于检查、维修、保养、更新集装箱和机械设备的车间。维修车间一般位于不影响码头正常作业流程的后方堆场区域，内部配备焊接切割设备等专用设备。维修车间的存在是给集装箱物流提供了一个坚实的后盾，解决因运输过程中出现事故所造成的集装箱结构、功能上的问题，保证码头保持高效作业的状态。

#### （8）检查口

检查口（Gate house）又称为“道口”，是集装箱进入码头和离开码头的必经之处，是集装箱和集装箱货物的交接口，因而也是分界码头内外职责的分界点。集装箱在经过检查口时，需要被检查包括箱号、封号、箱体情况等在内的集装箱实时情况，并做好记录备案，同时核实相关的单证办理手续。

除了以上所介绍主要的码头设施和作业区以外，集装箱码头内部还有一些辅助设施，比如与通信、电力、燃料等有关的储存设备和使用设备。集装箱码头的总体布局平面图如图 3.2 所示，各码头的布局可能存在一定的差别。

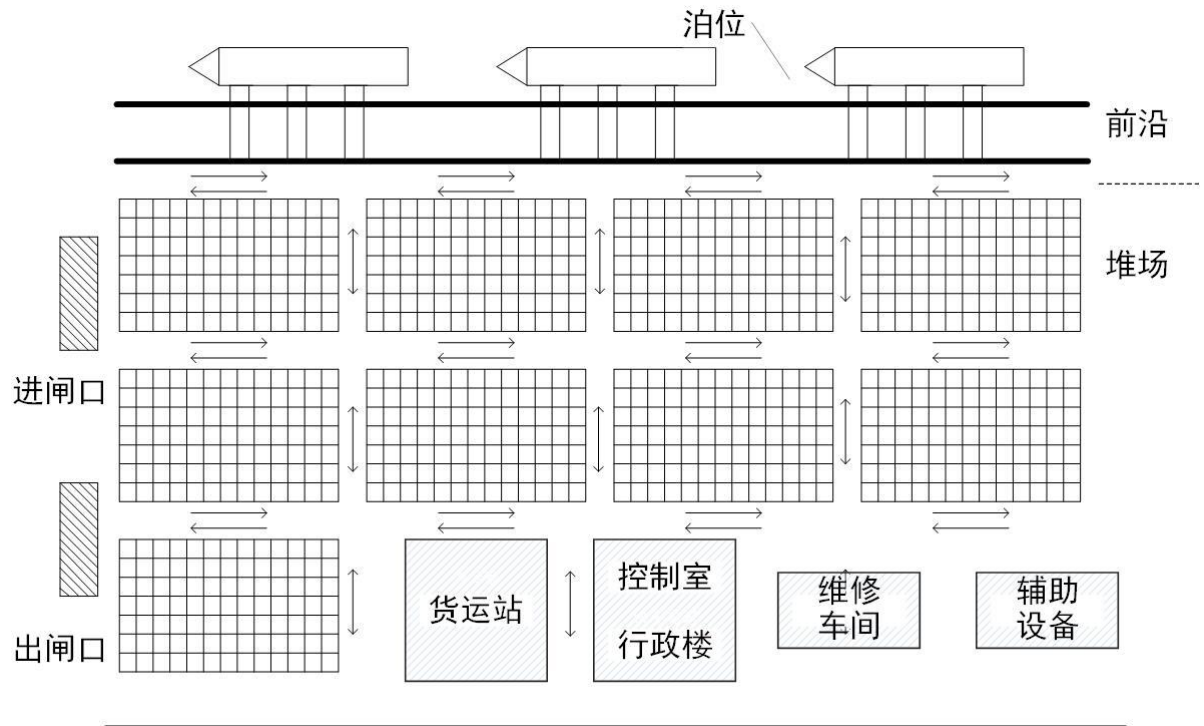


图 2.1 集装箱码头整体布置图

Fig.2.1 Overall layout of container terminal

## 2.2 集装箱码头堆场资源

集装箱码头堆场主要拥有空间资源和设备资源，能有效利用已有资源可以大大提高堆场作业效率，则不需要一味地将增设有限的资源作为提高效率的唯一途径<sup>[29]</sup>。

### 2.2.1 空间资源

集装箱码头堆场的空间资源一般指堆场内所有箱区的空间大小，不仅包括水平面二维空间，还包括垂直方向的三维立体空间。通常，堆场由若干个箱区组成，每个箱区由若干贝位组成，而每个贝位又是由若干排和若干列组成。在堆场空间利用方面应注意不能有太高的利用率，不然会引起卸船准备工作量提高、进口箱提箱时产生倒箱和出口重箱装船时产生倒箱等影响。某箱区的结构示意图如图 2.2 所示。

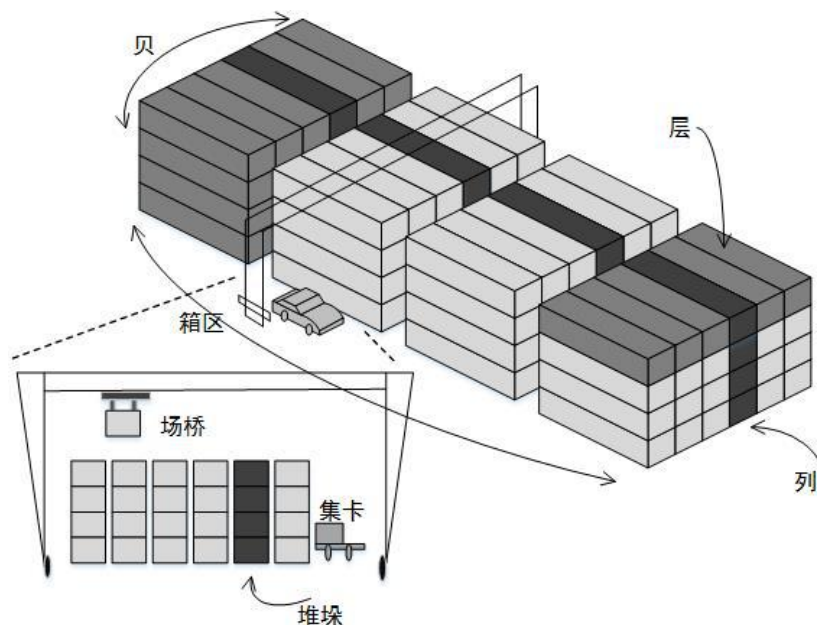


图 2.2 集装箱码头堆场箱区结构示意图

Fig.2.2 Schematic structural diagram of container yard in terminal

### 2.2.2 设备资源

集装箱码头堆场内的设备资源主要包括轮胎式龙门起重机系统、轨道式龙门起重机系统、跨运车系统、底盘车系统和正面吊系统<sup>[47]</sup>。

#### （1）龙门起重机系统

龙门起重机系统负责堆场内的集装箱堆放作业。轮胎式龙门起重机可以跨 6 列箱和一列车道，而轨道式龙门起重机功能更强大，可以跨 14 列集装箱和 1 列车道。跨运车系统负责实现将集装箱在水平方向自由运输的目的，具有灵活机动，不受空间位置的约束等优点，但缺点是结构复杂，维修成本较高，投资成本较大。

#### （2）底盘车系统

底盘车系统的功能与跨运车相同，负责水平运输集装箱。当集装箱需要运输时，将集装箱放置跨运车上，再由集装箱牵引车托运至目的地。

#### （3）正面吊系统

正面吊系统是结合了堆放和提取以及水平运输双重功能的设备。但是正面吊一次只能跨一箱或两箱作业，所以在堆场内需要空留出较多的通道以便正面吊通过，如此不利于提高堆场利用率。

## 2.3 集装箱码头出口箱作业流程

近些年，码头的发展受到经济下行的影响，行业情况不容乐观。码头企业在寻求发展之路的过程中，除了寻找货源以外，需要从码头自身调整盈利结构。有些码头会自主地将盈利空间较大的业务进行着重发展，以求得更好的发展空间。对于我国的大部分码头，出口箱业务是其主要业务，当然还有进口箱业务和中转箱业务等。

出口箱业务的主要流程<sup>[47]</sup>:

(1) 收集出口箱集装箱的单证资料

出口箱要在集装箱码头顺利地完一系列出口流程,必须先将出口箱的单证资料交给集装箱码头的相关部门。所以船公司或者其代理在出口箱装船前八天提供单证资料,包括出口用箱计划、出口装货清单(订舱清单)和预配箱清单。其中,出口装货清单和预配清单交给配载计划员,确认方案的可行性;出口用箱计划交给箱务管理员,方便其提前准备。

(2) 发放空箱

由于用于出口货物的集装箱一般来自于码头,归码头所有,托运人需要向码头管理部门申请集装箱设备提取需求。托运人在收到船公司签发的“集装箱发放通知单”和“集装箱设备交接单”后,凭单证到码头提出申请换取“提箱凭证”。然后,在规定的提运空箱期间派集卡车司机凭“提箱凭证”至码头堆场运回空的集装箱(空箱)以装载出口货物。

(3) 接收重箱

在装船前四天内,凭相关单证将装有货物的集装箱(重箱)运回至码头堆场堆放。

(4) 拼装出口箱

托运人的出口货物按照量的多少会分成拼箱货和整箱货两种。如若是拼箱货,即一批货不足以装满一个集装箱,则会由货运站统一安排若干批货物装入同一个集装箱。出口箱拼装的原则是一般将同一卸货港或者是同一航线上的货物拼装在一起。整箱货指的是达到集装箱容积的 75%或者达到箱重负荷的 95%的货物。

(5) 存放出口箱

无论是重箱、空箱或者拼箱的集装箱,出口集装箱在装船前一般都必须事先由工作人员堆放至码头堆场内的特定位置以等待装船作业。而且为了确保装船作业能按时进行,码头一般会规定所有的出口箱必须在装船前一个小时已经到场堆放,否则码头有理由拒绝出口箱进场<sup>[31]</sup>。

(6) 编制配载图

装船时最重要的是制定配载图。预配载图是由船公司或者其代理在出口箱集港前一天交给码头配载部门。根据装船单、经海关放关的场站收据和预配载图,由码头的配载员制作完成配载图。配载完成之后交由船方签字确认才能实际生产作业,如果船方有所变动,配载员需及时根据实际变动情况调整配载图<sup>[37]</sup>。配载图完成后,配载员需根据配载图和出口箱场箱位情况编制装船顺序单,交给控制室以做指挥装船作业的依据。控制室将装船顺序发送给现场班组分配作业任务。

(7) 发箱装船

当装船作业开始,控制室向堆场内工作人员发出指令,指挥现场的设备设施进行发

箱，并在装船顺序单上对已完成操作的出口箱作注销记录。由集卡或者其他水平运输器械将集装箱运至对应集装箱船舶所在的码头前沿，经验箱员核对出口箱的箱号并检查出口箱的外表状况和铅封，再由桥吊装至船舶上的指定箱位，并做好记录<sup>[38]</sup>。

#### （8）交接工作并处理单证

装船作业结束以后，需要进行作业现场的交接工作。船舶指挥员和外轮理货员核对本次装船作业装船的箱数、箱号以及对应信息，准确无误后在对方的单证上签字。然后船舶指挥员与下一班次的船舶指挥员进行现场交接。

装船作业过程中涉及到了较多单证，装船完成后，码头堆场需要对各类货运单证进行缮制，以便与船舶办理交接手续。需要缮制的单证包括危险品货物清单、冷藏箱清单、装货清单和设备交接单<sup>[42]</sup>。

## 2.4 集装箱码头出口箱箱位分配影响因素

集装箱码头是一个较为复杂的作业操作场所，各作业环节之间具有一定的影响。出口箱箱位分配作为其中业务之一，作业效率受到多方面的影响，现分述如下<sup>[46]</sup>。

#### （1）船舶靠泊计划

船舶靠泊计划主要是指按照船舶的船期确定将要靠泊的泊位。在装船作业和卸船作业中，为了减少集卡的水平运输距离，通常将船舶对应的集装箱堆放在离泊位较近的堆场。在码头堆场资源有限的情况下，集装箱堆放在离泊位较远的箱区，会增加集卡运输距离从而延长了船舶装卸作业时间<sup>[48]</sup>。由此，我们可以看出，堆场内的作业计划需要考虑集装箱对应的船舶将要靠泊的泊位位置，以保证两者之间的距离保持在容许的范围之内。

#### （2）集装箱集港策略

由于进口箱是由船舶同一运至集装箱码头，对堆场作业的影响不大。对于出口箱，集港策略不同，对码头堆场作业的影响力也是不同的。集装箱集中入港策略规定集装箱在指定时间内必须到港堆放。出口箱完成集港作业后，堆场根据码头先前制定的堆存计划进行翻箱整理作业。可以看出集中入港策略会增加堆场的作业量并增加成本，而且还会引起码头附近陆路交通压力增加。集装箱预约入港是码头根据码头堆场的情况向客户发出预约时段和预约箱量，让客户在网上进行预约操作，提前做好集装箱入港数量的调控工作。这种集港策略不会造成短时间内堆场作业强度剧增的情况，有利于堆场有序作业。随机入港策略对客户的交箱时间要求较低，即在集装箱船舶开始装船作业之前，出口箱可随时到达集装箱码头。在这种集港策略下，码头堆场处于一种被动的地位，需要实时观测堆场状态，所以对码堆场的作业提出了很高的要求。

#### （3）岸桥装卸作业模式

岸桥装卸作业模式分先卸后装和同步装卸两种模式<sup>[52]</sup>。先卸后装作业模式方式单一管理方便，但是岸桥将近有一半的时间处于空驶状态，导致设备效率不高，作业效率缓



慢。同步装卸作业模式可以提高岸桥作业效率，也减少了船舶在港时间，但是对集卡的调度和对堆场的作业难度的要求提出了更高的要求。不论运用哪种岸桥作业模式，堆场必须相应做出全局调配以适应岸桥的作业模式。

#### （4）集卡服务路径

集卡服务路径有两种，一种是“作业线”法，同一作业组的集卡在执行集装箱水平搬运任务时，只允许其在特定的岸桥和特定的堆场箱区之间来回行驶运输出口箱。通常码头会把“作业线”法和岸桥相结合。另一种是“作业面”法，集卡为了提高作业效率，会选择前往离自身最近的岸桥去接运进口箱而非等待在原来指定的岸桥下面接装进口箱，即集卡不在固定的岸桥下作业<sup>[53]</sup>。“作业面”法不但给堆场作业提出了更高的要求，而且对集卡调度和码头前沿作业调度在综合管理上提出了巨大挑战。

#### （5）船舶配积载要求

船舶在海上航行时需要保持一定的稳性，防止因稳性不够而导致船舶倾斜或损坏，这要求其重心不得过高和重量分布相对均匀。此外，船舶会在航线上的诸多码头处停靠并有装卸集装箱的任务，为了尽可能减少不必要的翻箱，加快装卸效率，码头需要根据配载图制定装船顺序，并以此为依据进行翻箱整理作业。

#### （6）堆场堆存策略

集装箱堆场内堆存的集装箱有很多，按流向分有出口箱、进口箱和中转箱等。在集装箱堆存和提取的过程中，就会暴露出一个不同类型的集装箱的堆放位置关系问题。主要的堆存策略有进口箱与出口箱分开堆存和进口箱与出口箱混合堆存的两种<sup>[58]</sup>。

##### 1) 进、出口箱分别堆放

为了保证堆场运作顺利而高效，最简便的方法是进口箱和出口箱进行分开堆放，以免两者在作业过程中发生冲突的状况。通常情况下，出口箱在集港后会被运输至前方堆场进行堆放；而进口箱在卸货完毕后会运送至后方堆场。码头采用这样的管理方式可以更好的集中管理不同装卸需求的集装箱，使得码头的管理效率得到了极大的改善。进出口箱分别堆放策略有预先编排策略和分类贮存方法两种<sup>[61]</sup>。

##### 2) 进、出口箱混合堆存

进、出口箱混合堆存适合于场地紧缺的集装箱码头。由于进出口箱逐年剧增，集装箱码头的堆场的容积能力受到严重的挑战。有些码头迫于堆场面积的局限性，不得不采用进、出口箱混合堆存的策略，以提高堆场利用率。然而采用混合堆存策略会引发管理难度的加深，翻箱率也会随之提高。

从上述可以总结出两种堆存策略各自的优缺点，现总结如表 2.1 所示<sup>[62]</sup>。

**表 2.1 堆存方式对比表**

**Tab.2.1 Comparison table of different tacking modes**

优点	缺点
----	----



进、出口箱分别堆放	管理和作业难度较低	需要较多的堆场面积，堆场利
	堆场设备作业效率高，有效降低翻箱率	用率不高，不适用空间资源紧
		缺的集装箱码头
进、出口箱混合堆存	堆场空间资源利用率高	设备作业效率较低，而且翻箱
		率较高

## 2.5 集装箱码头出口箱箱位分配基础信息

出口箱箱位分配的关键在于协调不同属性出口箱在堆场内的位置关系，须为出口箱进行定性分析，使得不同出口箱相互间可以进行区别对待，因此须为出口箱属性信息进行分级<sup>[63]</sup>。

已经堆放在堆场内的出口箱和将会到港并堆放在堆场内的出口箱，在后续装船的作业中具有装船先后次序，为了快速的完成装船取箱作业，出口箱堆存规则是先装船的出口箱须堆放在后装船的出口箱的上方，方便从上方率先提取先装船的出口箱。每两个属性不完全相同的出口箱一般可以判定装船的先后次序，故每个出口箱都拥有在所有出口箱中所处的堆存优先等级。

为出口箱确定堆存优先等级的依据是出口箱的所属船舶、尺寸、目的港和箱重四个因素，已有文献通常会根据所研究的出口箱属性范围选取其中几个进行优先等级的确定。在以上四个因素中，按重要等级排序，首先需考虑出口箱的所属船舶，不同船舶的出口箱一般分箱区堆存，以防出现出口箱装错船的情况发生；然后考虑出口箱的尺寸，堆场内不同尺寸的出口箱不能堆存在同一贝位中，故不会发生重叠的情况；最后是出口箱的目的港和箱重，不同目的港或者不同箱重的出口箱可以进行混合堆存。在堆场内不同船舶或者不同尺寸的出口箱属于分开堆存的位置关系，互不影响，在确定堆存优先等级时只需分开定级即可；所属船舶和尺寸相同但不同目的港或者不同箱重的出口箱在混堆时须注意相互之间的堆存位置关系，相互影响，在确定堆存优先等级时须统一定级。所属船舶和尺寸相同但不同目的港的出口箱在装船时有一定的顺序，避免在下一个码头卸船时产生船上翻箱作业，故出口箱的目的港越远，出口箱的优先等级越高，反之，越低。所属船舶、尺寸和目的港相同但箱重不同的出口箱在装船时亦有一定的顺序，保证装船完毕的船舶重心靠下，使得船舶整体稳性较高易于在海上安全航行，故出口箱的箱重越重，出口箱的优先等级越高，反之，越低。

根据上述的堆存优先等级的确定原则，本文按照出口箱的所属船舶、尺寸、目的港和箱重四个属性进行堆存优先等级的确定。首先按照所属船舶属性将出口箱进行区分确定（Z1-S1）；然后按照尺寸属性将出口箱进行再区分（Z1-S2）；再次按照出口箱目的港的远近进行优先等级的确定（Z2-S1）；最后按照出口箱箱重进行更细致的优先等级确定（Z2-S2）。将出口箱按堆存优先等级排序后，分别用数字表示，数字越高表示优

先等级越高。出口箱堆存优先等级的确定思路如图 2.3 所示。

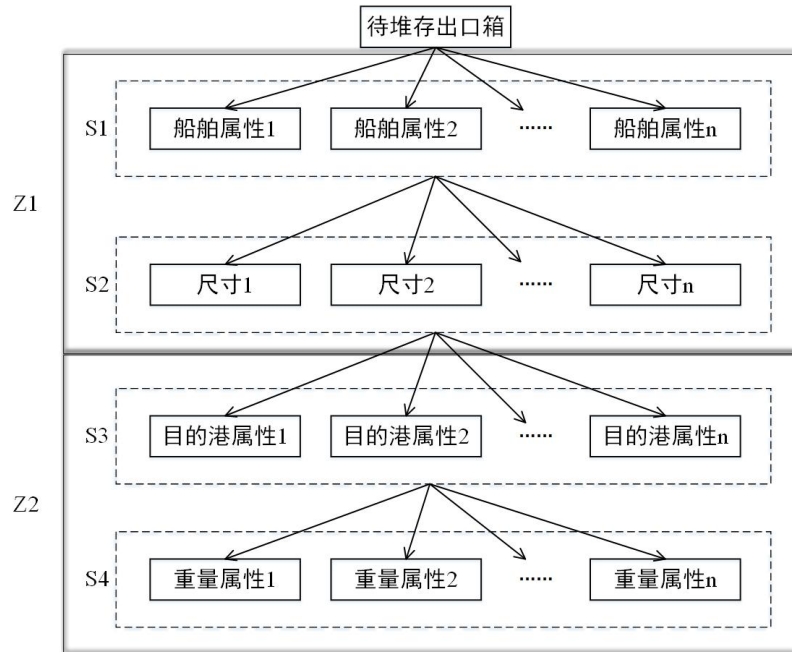


图 2.3 出口箱堆存优先等级确定思路示意图

Fig.2.3 Schematic diagram for determining priority level of export box stacking

出口箱堆存优先等级的确定方法必定可以为每个出口箱确定优先等级。当待堆存出口箱皆属于同一船舶时，则可省略 S1 步骤；当待堆存的同一所属船舶的出口箱数量较少，则可省略 S2 步骤；当待堆存的同一所属船舶某一目的港的出口箱数量相对较少，则可省略 S3 步骤。在特定的前提下省略部分步骤，可以降低出口箱堆存优先等级确定的精细程度，因为有时船舶上的配载要求不高，如此也可以减少装船取箱时的翻箱数，提高整体作业效率。各步骤中的定级方法可以灵活调整，使得各等级的出口箱数量相对均衡，有利于出口箱的堆存作业。

出口箱的堆存优先等级对于出口箱箱位分配具有堆存指导意义，其中，对于堆存在同一贝位的出口箱，在降低翻箱量方面有实质的作用；对于堆存在不同贝位内甚至堆存在不同箱区内的出口箱而言，堆存优先等级在合理操作堆场设备设施方面具有一定的影响，而在降低翻箱量方面并不具有太大意义，因为堆存位置较远，在装船取箱时不存在相互干扰的可能性。

## 2.6 本章小结

本章第一节分析了集装箱码头的整体布局；第二节详细介绍了集装箱码头堆场空间资源和设备资源；第三节介绍了与集装箱码头出口箱业务相关的作业流程；第四节理清了有关出口箱箱位分配的影响因素；第五节阐述了出口箱箱位分配的基础信息，为后续章节的研究提供了较为扎实的基础。

### 3 出口箱箱位分配静态优化研究

#### 3.1 概述

出口箱箱位分配静态优化是出口箱箱位分配的模拟箱位分配过程，在不考虑出口箱的集港顺序的理想状态下，为各属性出口箱分配堆存箱位，使得堆存结果满足后续出口箱操作的必要要求，得到出口箱箱位分配静态最佳计划，为出口箱集港时实际操作过程提供具有导向性的参照作用，是集装箱码头非常重要的计划环节，对出口箱的堆存质量有重要影响。

在出口箱集港前，货主将出口箱的信息提交给货代公司，完成订舱操作，故可以从出口箱订舱单中获取出口箱的货类、尺寸、目的港和箱重信息，为出口箱箱位分配静态优化保证了必要的前提。但从订舱单中获取的出口箱信息与实际集港的出口箱信息可能存在差异，货主为降低出口箱运费，存在将箱重往较轻重量申报的可能性，对出口箱箱位分配造成一定的混乱。

本章将首先对出口箱箱位分配静态优化的原理进行分析并明确出口箱箱位分配静态优化研究的问题本质；然后根据箱位分配的一系列目标和约束条件构建出口箱箱位分配静态优化数学规划模型；接着在模型的基础上设计出口箱箱位分配静态优化算法；最后通过实证分析证明模型与算法的有效性。

#### 3.2 问题描述及基本假设

集装箱码头中，出口箱的业务流程如图 3.1 所示，首先由外集卡从客户所在处将出口箱运向码头，经道口查验后运至堆场；然后由场桥将出口箱堆存至堆场内；再次由内集卡将出口箱转运至岸边；最后由岸桥装上指定船舶内<sup>[66]</sup>。

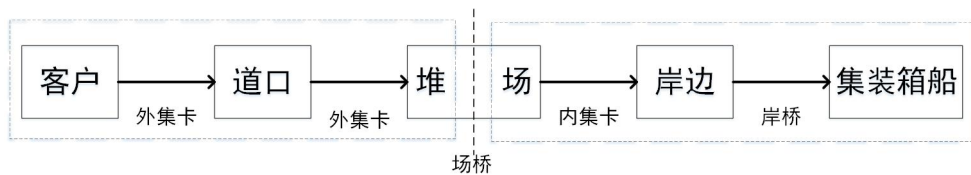


图 3.1 码头内出口箱运行路线图

Fig.3.1 Operation route map of outlet box in wharf

集装箱码头堆场作业涉及到集装箱装船、卸船、集港、提箱等，几乎与集装箱码头的操作均存在相关性。其中，涉及到集港和卸船的堆场作业是为集装箱分配箱位，而与装船和提箱有关的作业是释放箱位，为此，出口箱箱位分配即是合理为出口箱分配箱位。

由于码头堆场内的取存作业都需要堆场内的设备设施来完成，在为出口箱进行箱位分配时，应综合考虑同一时段内，各码头堆场区段内进行的作业量，以均衡各场桥作业

任务。在集港和装船时都须由场桥来进行装卸作业，集港时出口箱是随机到达，而装船时作业任务较为密集，且一般以作业线的方式进行装船，故应更多考虑装船时优化各场桥作业任务，包括均衡各作业线作业量和最小化场桥大车移动距离。同时，由于出口箱在堆场内的堆存时间不长，一般是数天，之后将转化为出场箱，因此在为出口箱到港进行翻箱位分配时应尽量考虑其箱位分配策略产生的结果对将来出口箱出场时堆场作业效率的影响，主要表现为翻箱率的多少。另外，由于出口箱箱位分配的结果直接决定了内集卡运输出口箱的距离，间接影响装船时间，因此缩短内集卡水平运输距离也是一个不容忽视的因素。除此之外，由于堆场的空间资源码头较为短缺的资源，因此提高堆场空间资源利用率也是一个必须考虑的因素。

基于以上出口箱箱位分配的考虑因素，总结出一系列堆存目标，如图 3.2 所示。

第一，优化场桥作业任务，须保证均衡各堆存优先等级的出口箱在作业线内的分配量，而且出口箱的堆存优先等级沿装船作业线逐渐降低；

第二，尽量减少翻箱量，须尽量使堆存优先等级高的出口箱压在堆存优先等级低的上方；

第三，缩短内集卡水平运输距离，须将出口箱堆存在离泊位较近的区域；

第四，提高空间资源利用率，须尽量堆满被利用的堆场空间。

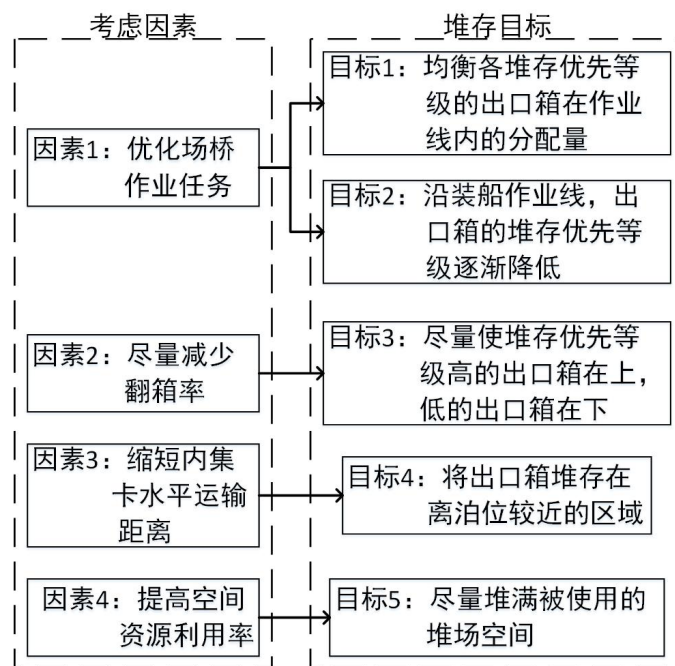


图 3.2 出口箱箱位分配考虑因素明细图

Fig.3.2 Detailed diagram of factors for export box allocation

出口箱箱位分配各目标有其适合被达成的时段，其中，在静态优化阶段中，可以得到实现所有目标的堆存计划，但动态优化阶段中不能确定能否完全执行计划，主要无法完全保证实现堆存计划中翻箱数为零的目标，所以在动态优化阶段主要的优化目标是最

小化翻箱数。各目标的实现阶段如图 3.3 所示。

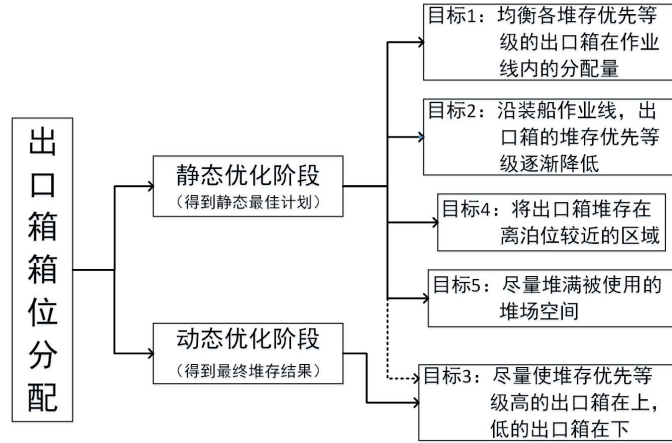


图 3.3 各阶段优化目标示意图

Fig.3.3 Schematic diagram of optimization objectives for each stage

### 3.3 符号说明

本章将构建出口箱箱位分配静态优化模型，相关符号变量如下。

$G_E$  集合,  $G_E = \{1, 2, 3\}$ , 出口箱的货物种类集合, 数字分别表示普通货箱、冷藏货箱和危险品箱,  $E$  为出口箱种类数量;

$G_R$  集合,  $G_R = \{1, 2\}$ , 出口箱的尺寸集合, 数字分别表示 20 尺和 40 尺的出口箱;

$G_P$  集合,  $G_P = \{1, \dots, P\}$ , 出口箱的目的港集合,  $P$  为目的港数量;

$G_W$  集合,  $G_W = \{1, \dots, W\}$ , 出口箱的重量等级集合,  $W$  为重量等级数量;

$G_M$  集合,  $G_M = \{1, \dots, M\}$ , 堆场内箱区集合,  $M$  为堆场中箱区的数量;

$G_N$  集合,  $G_N = \{1, \dots, N\}$ , 箱区内贝位集合,  $N$  为箱区中贝位数量;

$G_L$  集合,  $G_L = \{1, \dots, L\}$ , 贝位内的垛位集合,  $L$  为贝位中垛位数量;

$G_K$  集合,  $G_K = \{1, \dots, K\}$ , 垛位内箱位集合,  $K$  为垛位内箱位数量;

$A_{erpw}$  根据出口箱订舱单信息, 货类为  $e$ 、箱型为  $r$ 、目的港属性为  $p$ 、重量属性为  $w$  (简写为  $erpw$ ) 的出口箱数量,  $e \in G_E$ ,  $r \in G_R$ ,  $p \in G_P$ ,  $w \in G_W$ ;

$D$  出口箱所需堆存区域的箱区数量;

$G_\Gamma^e$  集合,  $G_\Gamma^e = \{1, \dots, \Gamma^e\}$ , 分配给第  $e$  种类出口箱的箱区组集合, 对箱区进行分组,

$\Gamma^e$  为箱区组数量;

$\Upsilon_\tau^e$  集合,  $\Upsilon_\tau^e = \{1, \dots, \Omega_\tau^e\}$ , 分配给第  $e$  种类出口箱的第  $\tau$  个箱区组内的箱区集合,

$\tau \in G_\Gamma^e$ 。一般  $\Omega_\tau^e$  为定值, 由后续装船时作业线数量而确定, 用  $\Omega$  表示;

$d_{\tau\sigma n}$  表示第  $\tau$  个箱区组第  $\sigma$  个箱区的  $n$  个贝位与指定泊位之间的水平运输距离;

$\xi_m^e$  0-1 变量, 若箱区  $m$  中堆存有第  $e$  种类的出口箱, 则为 1, 否则为 0;

$A_{erpw}^\alpha$  货类为  $e$ 、箱型为  $r$ 、目的港属性为  $p$ 、重量属性为  $w$ , 且能够堆成整垛位的出口箱数量;

$A_{erpw}^\beta$  货类为  $e$ 、箱型为  $r$ 、目的港属性为  $p$ 、重量属性为  $w$ , 且不够堆成整垛位的出口箱数量;

$B_{erpw}^\alpha$  货类为  $e$ 、箱型为  $r$ 、目的港属性为  $p$ 、重量属性为  $w$ , 且能够堆成整垛位的出口箱所占用垛位数量;

$\Pi_{mnlk}$  表示第  $m$  个箱区第  $n$  个贝位第  $l$  垛位第  $k$  层 (简写成  $mnlk$ ) 上的出口箱 4 个属性集合, 并表示出口箱的堆存优先等级,  $l \in G_L$ ,  $k \in G_K$ 。种类和箱型相同的出口箱可以进行堆存优先等级比较, 若  $p_1 > p_2$ , 则  $\Pi_1 > \Pi_2$ ; 若  $p_1 = p_2$ ,  $w_1 > w_2$  则  $\Pi_1 > \Pi_2$ ;

$\Pi^{erpw}$  表示货类为  $e$ 、箱型为  $r$ 、目的港属性为  $p$ 、重量属性为  $w$  出口箱的堆存优先等级, 与  $\Pi_{mnlk}$  具有相同的可比较性;

$\kappa_{k_1, k_2}^{mnl}$  0-1 变量, 判断处于同一垛位的两个出口箱是否产生翻箱需求, 若  $\Pi_{mnlk_1} < \Pi_{mnlk_2}$  ( $k_1 > k_2$ ) 则为 1, 表示产生 1 个翻箱需求, 否则为 0;

$h_{n_1 n_2}^m$  在第  $m$  个箱区内, 第  $n_1$  个贝位中比第  $n_2$  个贝位内若干出口箱属性小的出口箱数量 ( $n_1 < n_2$ );

$\mu_{n_1 n_2}^m$  0-1 变量, 在第  $m$  个箱区内, 若  $h_{n_1 n_2}^m \neq 0$ , 为 1, 否则为 0;

$\mathfrak{S}_{\tau\sigma}$  0-1 变量, 若第  $\tau$  箱区组的第  $\sigma$  个箱区规划为出口箱堆存区域, 则为 1, 否则为 0;

$\lambda_{\tau\sigma}^{erpw}$  分配给第  $e$  种类出口箱的第  $\tau$  箱区组的第  $\sigma$  个箱区内, 货类为  $e$ 、箱型为  $r$ 、

目的港属性为  $p$ 、重量属性为  $w$  出口箱的整垛位数量,  $\sigma \in Y_\tau^e$ 。

### 3.4 优化模型建立

目标函数

$$f_1^1 = \min \sum_{e=1}^E \sum_{r=1}^R \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W \sum_{\tau=1}^{\Gamma} (\max \lambda_{\tau\sigma}^{erpw} - \min \lambda_{\tau\sigma}^{erpw}) \times \mathfrak{I}_{\tau\sigma} \quad (\text{公式 3.1})$$

$$f_2^1 = \min \sum_{\tau=1}^{\Gamma} \sum_{\sigma=1}^{\Omega} \frac{\sum_{n=1}^N d_{\tau\sigma n}}{N} \times \mathfrak{I}_{\tau\sigma} \quad (\text{公式 3.2})$$

$$f^1 = \alpha f_1^1 + \beta f_2^1 \quad (\text{公式 3.3})$$

式 (3.1) 表示静态优化阶段的优化目标, 为均衡各目的港出口箱在各箱区组内的作业量; 式 (3.2) 表示静态优化阶段的优化目标, 为最小化内集卡水平运输出口箱的距离; 式 (3.3) 表示两个目标的综合目标函数表达式, 其中  $\alpha$  和  $\beta$  表示比例系数。

约束条件:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L \sum_{k_1=2}^K \sum_{k_2=1}^{k_1-1} \kappa_{k_1, k_2}^{mnl} = 0 \quad (\text{公式 3.4})$$

$$\sum_{\tau=1}^{\Gamma} \sum_{\sigma=1}^{\Omega} \mathfrak{I}_{\tau\sigma} \times N \times L \times K \geq \sum_{e=1}^E \sum_{r=1}^R \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W A_{erpw} \geq (\sum_{\tau=1}^{\Gamma} \sum_{\sigma=1}^{\Omega} \mathfrak{I}_{\tau\sigma} - 1) \times N \times L \times K \quad (\text{公式 3.5})$$

$$A_{erpw}^{\alpha} + A_{erpw}^{\beta} = A_{erpw} \quad (\text{公式 3.6})$$

$$B_{erpw}^{\alpha} = [A_{erpw} / K] \quad (\text{公式 3.7})$$

$$A_{erpw}^{\alpha} = B_{erpw}^{\alpha} \times K \quad (\text{公式 3.8})$$

$$A_{erpw}^{\beta} = A_{erpw} - A_{erpw}^{\alpha} \quad (\text{公式 3.9})$$

$$\sum_{e=1}^3 \Gamma^e \leq M \quad (\text{公式 3.10})$$

$$\sum_{e=1}^3 \xi_m^e = 1 \quad (\text{公式 3.11})$$

$$\sum_{n_1=1}^{N-1} \sum_{n_2=n_1+1}^N \mu_{n_1 n_2}^m = 0 \quad (\text{公式 3.12})$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W \lambda_{\tau\sigma}^{erpw} \leq N \quad (\text{公式 3.13})$$

$$\sum_{\tau=1}^{\Gamma_e} \sum_{\sigma=1}^{\Omega} \lambda_{\tau\sigma}^{erpw} = B_{erpw}^{\alpha} \quad (\text{公式 3.14})$$

式（3.4）表示不产生翻箱需求；式（3.5）表示在空闲箱区中圈定足够的箱区作为出口箱的堆存区域，且保证多于的箱位之和小于一个整箱区内的箱位数量；式（3.6）表示同属性的出口箱在数量上可分为能够堆成整垛位和不够堆成整垛位的出口箱两部分；式（3.7）表示货类为  $e$ 、箱型为  $r$ 、目的港属性为  $p$ 、重量属性为  $w$ ，且能够堆成整垛位的出口箱所占用垛位数量由该类出口箱数量计算得出， $[]$ 表示取整；式（3.8）表示货类为  $e$ 、箱型为  $r$ 、目的港属性为  $p$ 、重量属性为  $w$ ，且能够堆成整垛位的出口箱数量由该类出口箱所占垛位数量计算而得；式（3.9）表示货类为  $e$ 、箱型为  $r$ 、目的港属性为  $p$ 、重量属性为  $w$ ，且不够堆成整垛位的出口箱数量由该类出口箱的总数除去能够堆成整垛位的数量而得；式（3.10）表示分配给每个种类出口箱的箱区总和不大于空箱区的数量；式（3.11）表示每个箱区内只允许堆存一个种类的出口箱；式（3.12）表示在每个箱区内，贝位内出口箱的属性按贝位序号的增加而递减，以保证装船取箱的连续性，减少场桥的移动；式（3.13）表示在每个贝位内，各类出口箱所占垛位数量之和不超过贝位内的垛位总数；式（3.14）表示堆存至箱区内的每类出口箱数量之和等于该类出口箱的总数量。

### 3.5 算法设计

在出口箱箱位分配静态优化阶段，主要制定两个计划，第一，确定出口箱所需堆存的空间大小及其位置，即预堆存区域；第二，在预堆存区域中，为每一堆存优先等级的出口箱确定堆存箱位空间，由一个个具体的箱位组成，即堆存优先等级所对应的堆存箱位空间，称为等级堆存空间。尺寸允许下，空间里每一个箱位都可以分配给该堆存优先等级的出口箱。

#### 1) 预堆存区域的确定方法

在出口箱还未堆存至箱区，箱区内的堆存空间还处于闲置的状态时，每一堆存箱区之间的差别不大，只在箱区与指定泊位之间的距离存在差异。故在确定出口箱预堆存区域时，所需要的信息是每个候选箱区与指定泊位之间的距离和出口箱的数量。由于每一种类出口箱在不同箱区内分别堆存，且确定方法一致，故可以普通箱为例进行研究。

（1）从订舱单中统计出口箱数量，由于不同尺寸的出口箱占用空间大小不同，其



中 20 尺的占用一个贝位宽度，而 40 尺的出口箱占用两个贝位的宽度，故将数量转换为 20 尺的出口箱数量  $\alpha$ ，其计算公式为：

$$\alpha = \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W A_{11pw} + 2 \times \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W A_{12pw} \quad (\text{公式 3.14})$$

(2) 假设每个贝位需要预留  $K-1$  个翻箱位，故需要比出口箱数量更多的堆存空间  $\alpha^*$ ，其计算公式为：

$$\alpha^* = \alpha \times \frac{L \times K}{(L-1) \times K + 1} \quad (\text{公式 3.15})$$

(3) 计算需要出口箱预堆存区域的箱区数量  $D$ ，其计算公式为：

$$D = \left\lceil \frac{\alpha^*}{N \times L \times K} \right\rceil \quad (\text{公式 3.16})$$

其中， $\lceil \cdot \rceil$  表示取整，不足一个箱区按一个箱区计算；

(4) 从码头控制中心得到目标船舶的靠泊泊位信息，据此得到各箱区与靠泊泊位之间的内集卡水平运输距离  $d_{\tau\sigma n}$ ；

(5) 选择  $d_{\tau\sigma n}$  最小的  $D$  个箱区，并兼顾均衡各作业线之间作业量，使得各作业线内的预堆存箱区数量大致相同，将其  $\mathfrak{S}_{\tau\sigma}$  的值设定为 1。

经上述步骤，可得到出口箱的预堆存区域，部分箱区将作为出口箱预堆存的空间。在后续的出口箱箱位分配计划的制定和集港期内堆存作业都将在此区域内进行。如图 3.4 为出口箱箱位分配预堆存区域计划，每个作业线的箱区数量大致相同，每组箱区组内的箱区状态相同，即皆为预堆存箱区或皆不是预堆存箱区。

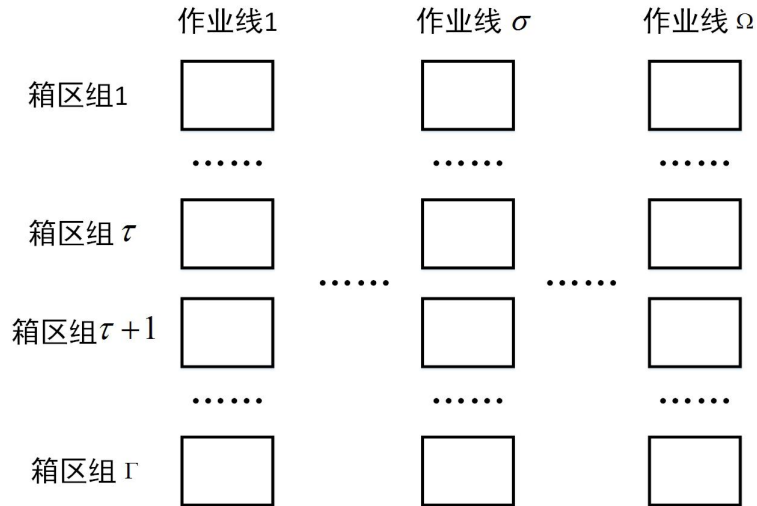


图 3.4 集装箱码头堆场作业线示意图

Fig.3.4 Schematic diagram of container terminal yard operation line

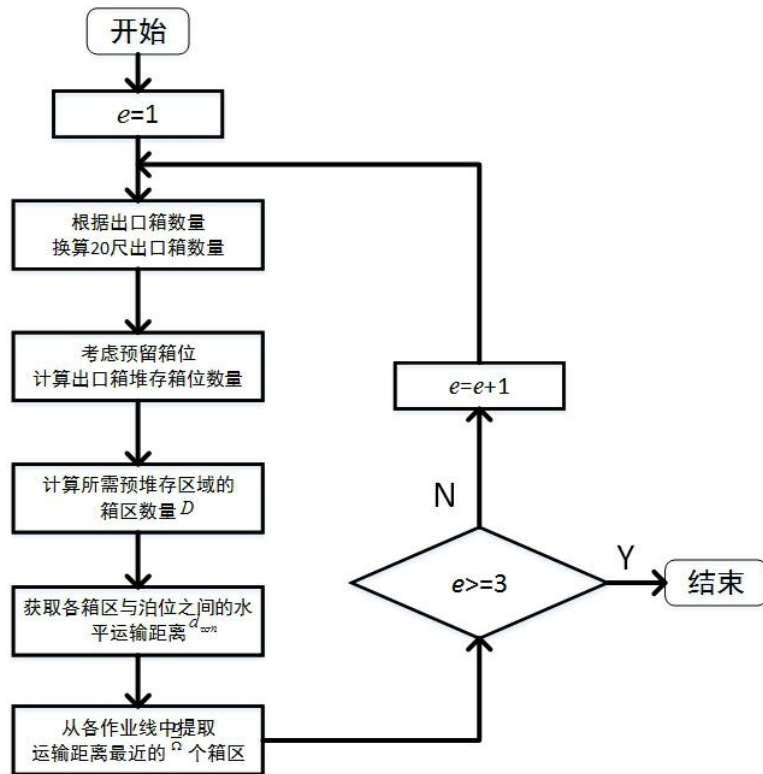


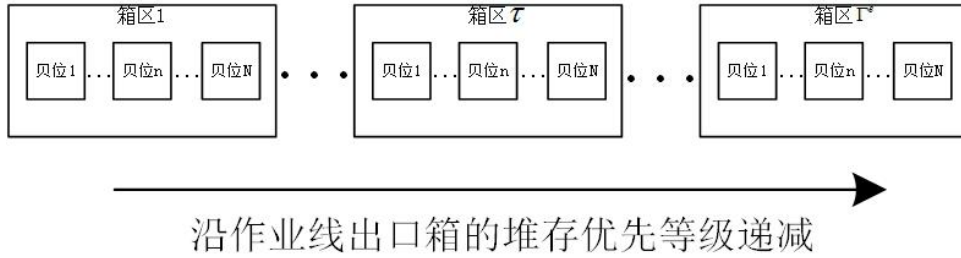
图 3.5 预堆存区域确定流程图

Fig.3.5 Determination flow chart of pre-stack area

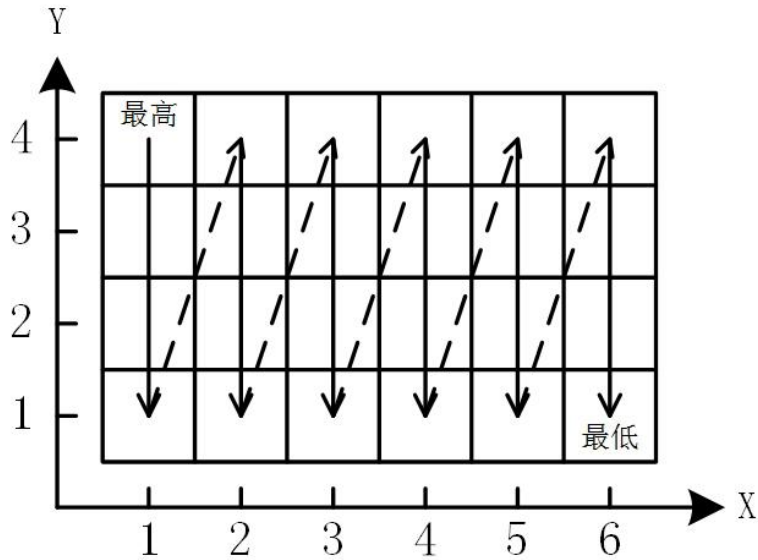
## 2) 箱位分配计划的制定方法

每种类出口箱在不同箱区内分别堆存，且堆存计划的制定方法相同，同预堆存区域的确定方法的论述方法，以普通箱为例进行研究。在已知待集港出口箱的总量及其属性信息和指定堆场的情况下，箱位分配静态优化模型的求解算法步骤如下：

- (1) 根据出口箱的数量  $\sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W A_{l_{rpw}}$  为其分配箱区数量, 并根据作业线数量  $\Omega$  值得到箱区组集合  $G_\tau^l$  和第  $\tau$  箱区组的箱区集合  $\Upsilon_\tau^l$ ;
- (2) 根据出口箱的目的港和箱重等级属性, 将出口箱按照堆存优先等级  $\Pi^{erpw}$  从高到低的顺序排列 (40尺箱排在20尺箱前面);
- (3) 引入一些变量, 方便叙述令  $\tau=1, \sigma=1, i=1, n=1, l=1$ ;
- (4) 按排列顺序, 每  $K$  个出口箱 (尺寸相同; 当须在混堆贝位内预留翻箱位,  $K$  值可适当减小) 为一个组进行计划, 第  $i$  组计划分配到第  $\tau$  箱区组的第  $\sigma$  个箱区的第  $n$  个贝位的第  $l$  个垛位内, 垛位内须满足  $\kappa_{k_1, k_2}^{mnl} = 0$  要求, 所有出口箱计划完毕则循环结束;



a)



b)

图 3.6 静态最佳堆存计划方案

Fig.3.6 Static optimal stack plan scheme

- (5) 进行如下3个程序, 若有一个判断为真, 则令  $i=i+1$  且返回第 (4) 步骤:

- a) 若  $\sigma = \Omega$ , 则  $l=l+1, \sigma=1$ ;

- b) 若  $\sigma = \Omega$ ,  $l = L$ , 则  $n = n + 1$ ,  $\sigma = 1$ ,  $l = 1$ ;
- c) 若  $\sigma = \Omega$ ,  $l = L$ ,  $n = N$ , 则  $\tau = \tau + 1$ ,  $n = 1$ ,  $\sigma = 1$ ,  $l = 1$ ;
- (6)  $\sigma = \sigma + 1$ ,  $i = i + 1$ , 返回第 (4) 步骤。

在由上述步骤得到的最佳箱位分配计划方案中, 沿装船作业线, 各箱区的出口箱堆存优先等级递减, 箱区内各贝位的出口箱堆存优先等级也是递减, 如图 3.6a) 所示, 同时, 贝位内的出口箱堆存优先等级的分布如图 3.6b) 所示。将出口箱的堆存优先等级赋给所在箱位, 称为该箱位的箱位等级, 表示按照堆存计划该箱位应由堆存优先等级等于该箱位等级的出口箱进行堆存。

集装箱码头出口箱静态优化模型的求解算法步骤流程图如图 3.7 所示。

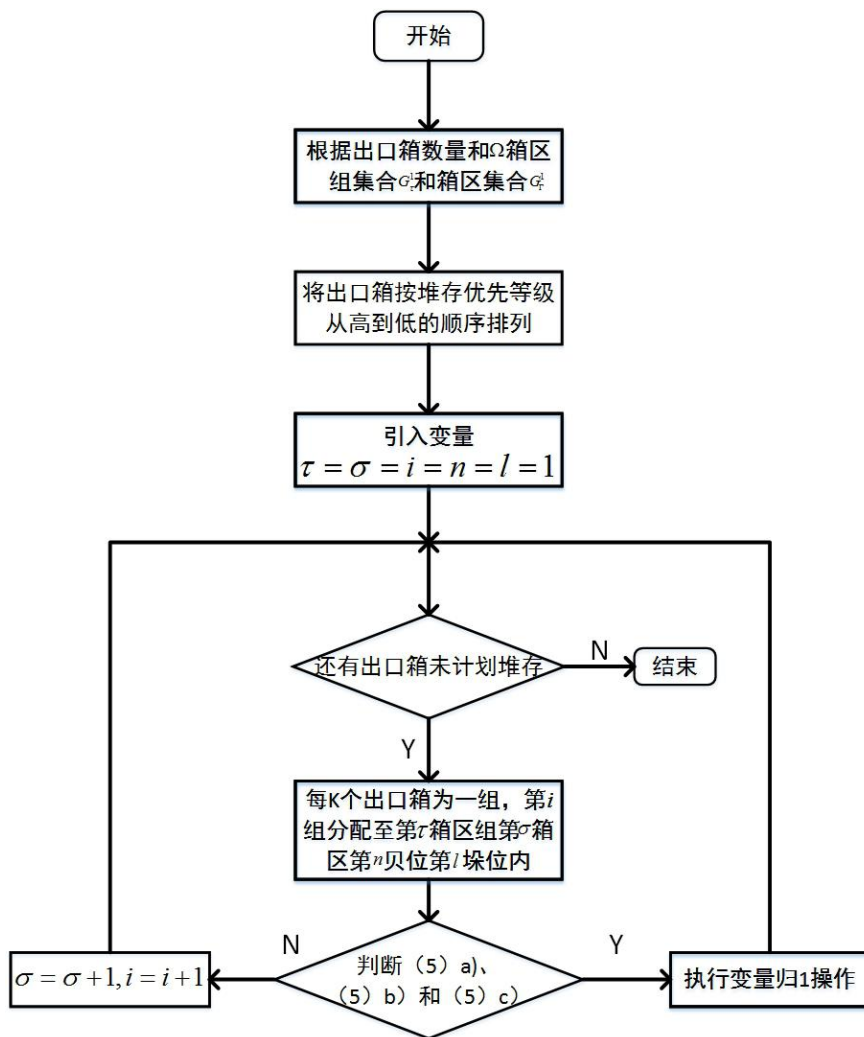


图 3.7 出口箱箱位分配静态计划制定流程图

Fig.3.7 Flow chart of export box allocation static plan

### 3.6 实证分析及比较

#### 1) 实证分析方案设计

为了验证本章提出的多箱区出口箱箱位分配优化模型和启发式算法的有效性和先

进性，设计符合实际情况的实例进行验证。算例借助 matlab2012 版进行编程，在 Intel (R) -32Core (TM) i5-2410M@2.30GHz 计算机上求解。

本次设计的集装箱码头堆场箱区分布情况如图 3.8 所示，共 3 个箱区，每个箱区由 8 个贝位组成，其中每个贝位都是 6 列 4 层的贝位结构。随机到港的出口箱共有 576 个，刚堆满整个堆场，其目的港有 3 个，重量等级分为 9 级，在集港期内将到港并堆存至堆场内，每个目的港的出口箱数量恰好能装满整数个贝位。

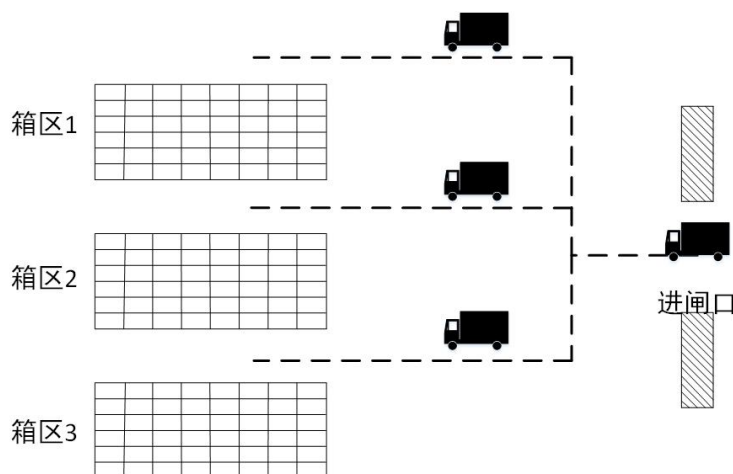


图 3.8 实证案例堆场情况示意图

Fig.3.8 Schematic diagram of demonstration case for storage yard

## 2) 对比方案设计

为了验证出口箱箱位分配静态优化方案的有效性，设计相应的对比方案。对比方案的集装箱码头堆场箱区分布情况与本章方案实证相同，共 3 个箱区，每个箱区由 8 个贝位组成，其中每个贝位都是 6 列 4 层的贝位结构。随机到港的出口箱共有 576 个，刚堆满整个堆场，其目的港有 3 个，重量等级分为 9 级，在集港期内将到港并堆存至堆场内，每个目的港的出口箱数量恰好能装满整数个贝位。

在对比方案中，出口箱堆存方案是较为常见的按贝位顺序进行一一堆存，且不同目的港不得堆存在一个贝位当中，在贝位内出口箱的堆存策略为已有文献<sup>[12]</sup>中所述的策略。经计算机模拟计算在对比方案下的出口箱翻箱情况，并将本章方案实验结果与之对比，对比实验的评价指标为出口箱占用堆垛数量。对于同一船舶的出口箱，码头希望尽量减少占用堆垛数量，以提高堆场的使用率，故占用堆垛数量越少，其堆存方案越佳。

## 3) 实验结果

在静态优化阶段，可以得到装船时翻箱量为零的最佳状态，在实证分析时翻箱量不适合作为评价指标，故可将码头堆场内堆垛占用数量作为不同方案的优劣评价指标。50 组对比实验的结果如表 3.1 所示，每个对比试验中本文方案的占用堆垛数量比对比方案的要少。

**表 3.1 占用堆垛数量实验结果**  
**Tab.3.1 Experimental results of stacking occupancy**

本文方案	对比方案	数量之差	本文方案	对比方案	数量之差	本文方案	对比方案	数量之差
592	607	15	564	573	9	559	571	12
607	617	10	537	550	13	552	563	11
541	554	13	593	606	13	538	549	11
557	568	11	534	547	13	585	597	12
577	590	13	578	587	9	579	590	11
561	576	15	593	603	10	563	573	10
527	539	12	565	579	14	552	565	13
572	586	14	536	548	12	585	595	10
530	543	13	548	562	14	574	584	10
558	567	9	552	562	10	546	561	15
542	556	14	571	583	12	588	600	12
570	583	13	553	565	12	546	558	12
578	589	11	580	594	14	570	580	10
549	559	10	535	545	10	576	589	13
577	587	10	614	624	10	543	556	13
538	552	14	581	591	10	563	576	13
600	612	12	569	583	14			

从表 3.2 的实验数据可以计算出本文方案对出口箱箱位分配静态优化的效果，如表 3.2 所示。从表中可知，相比于对比方案，本文方案可以减少出口箱占用堆垛数量大约 2.07%，进一步提高码头堆场的空间使用效率，节约堆场空间资源。

**表 3.2 对比实验结果**  
**Tab.3.2 Result of comparison experimental**

	本文方案	对比方案
平均占用堆垛数量	563.96	575.88
本文方案优化程度	2.07%	

### 3.7 本章小结

本章在出口箱未集港前，根据出口箱的订舱单信息进行出口箱箱位分配静态优化研究。首先为出口箱进行堆存优先等级确定的信息数据预处理，为后续研究提供基础；然后建立出口箱箱位分配静态优化模型，以均衡各目的港出口箱在各作业线的作业量和最小化内集卡水平运输距离为优化目标，提出相应的约束条件；接着为求解模型，设计了出口箱箱位分配静态优化算法；最后进行静态优化实证分析，得到出口箱堆存堆垛使用数量结果，证明模型与算法可以进一步均衡各作业线的作业量，减少内集卡的水平运输距离，并且减少占用堆垛数量。

## 4 出口箱箱位分配动态优化研究

### 4.1 概述

在集港期内，出口箱随机到达集装箱码头堆场，码头堆场的工作人员需根据随机到达的出口箱信息以及堆场的实时堆存状态为出口箱选择最合适的箱位进行堆存。在集港期结束后，堆场内的出口箱堆存状态的优劣情况直接影响出口箱的装船速度，与船舶的靠泊时间有直接的联系。因此统筹决策在集港期内出口箱的堆存作业是一个非常重要的课题。在堆存时，可以集港前所制定的静态最佳计划为导向进行出口箱箱位分配，即将静态优化研究与动态优化研究相结合，进行联合研究。

由于出口箱订舱单信息是由客户报给船方，其信息在集港时存在进行更改的可能性，所以出口箱在堆存时须克服两大不确定因素，出口箱集港时间的不确定性以及实测重量与申报重量的差异性<sup>[68]</sup>。在集装箱码头堆场内，主要由空间资源和装卸设备资源组成，故不仅需要考虑出口箱的堆存状态的优劣，还需考虑堆场内装卸设备的作业成本。

本章将首先对出口箱箱位分配动态堆存的问题进行分析，理清该问题的主次矛盾；然后以最小化场桥移动距离和最小化装船时翻箱数为目标，建立出口箱箱位分配动态优化模型；接着设计出口箱箱位分配动态优化算法，对模型进行求解；最后进行实证分析证明模型与算法的有效性。

### 4.2 问题描述及基本假设

已有文献的研究方法是将出口箱箱位分配过程分为两个阶段，两阶段的优化内容各有不同，一部分依据箱区分配、贝位分配和箱位分配的思路进行划分，另一部分依据优化目标的不同进行划分，后一阶段的优化比前一阶段更具体和更细致。本文依据此研究方法将出口箱箱位分配过程分为两个阶段，并依据集港前后进行划分。

依据第 4 章的论述，本文将出口箱在码头堆场的箱位分配优化分为两个阶段。第一阶段是在集港前，以订舱单信息为基础，分别用 4 个属性对出口箱进行分类，并据此对箱位分配进行静态优化，在翻箱数为零的条件下，实现各属性出口箱在各作业线内作业量均衡，形成箱位最佳分配计划。第二阶段是在集港期内，以箱位最佳分配计划为导向，对由于集港顺序不确定性以及实测重量与申报重量差异性导致的出口箱箱位分配计划执行受阻的问题进行动态优化，以减少装船过程中的堆场内的出口箱翻箱操作。本文设计的出口箱箱位分配优化两阶段流程如图 4.1 所示。

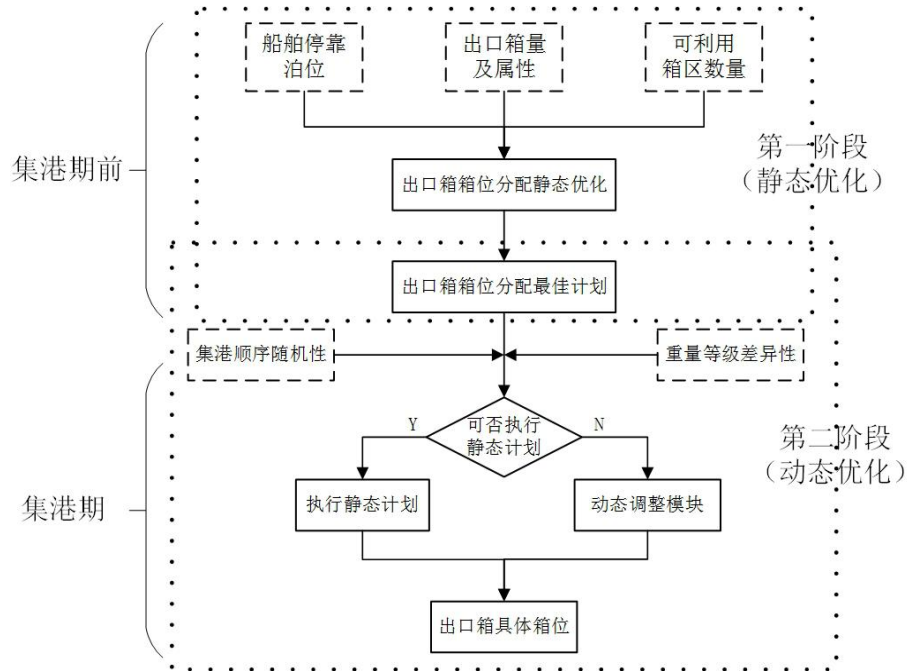


图 4.1 出口箱箱位分配优化两阶段流程图

Fig.4.1 Two-stage flow chart of allocation optimization for export box

出口箱集港时，出口箱在堆场内进行堆存作业，涉及到的装卸设备除了用于运输出口箱的集卡以外，还需要场桥的装卸功能。场桥的作用主要是集港时对出口箱进行堆存作业和装船时对出口箱进行取箱作业。其中，取箱作业时场桥作业效率已在静态优化阶段得到了优化，而堆存作业时场桥作业效率跟每个出口箱的堆存位置有关，故须在动态优化阶段进行优化。由此看来第 3 章的图 3.3 应改为图 4.2。

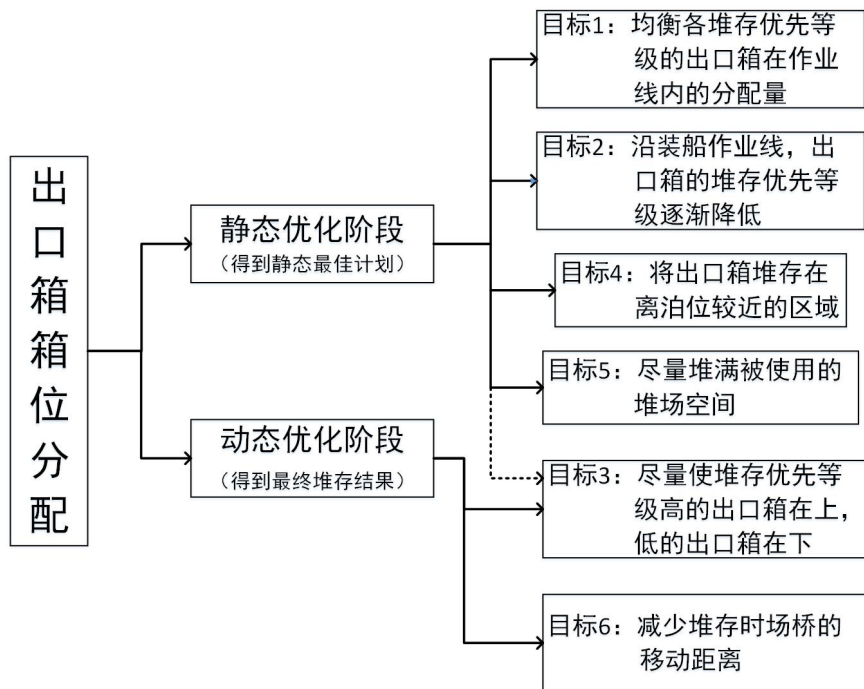


图 4.2 各阶段完整优化目标示意图

Fig.4.2 Complete optimization target diagram for each stage



### 4.3 符号说明

本章将构建出口箱箱位分配动态优化模型，相关符号变量如下。

$G_E$  集合,  $G_E = \{1, 2, 3\}$ , 出口箱的货物种类集合, 数字分别表示普通货箱、冷藏货箱和危险品箱,  $E$  为出口箱种类数量;

$G_R$  集合,  $G_R = \{1, 2\}$ , 出口箱的尺寸集合, 数字分别表示 20 尺和 40 尺的出口箱;

$G_P$  集合,  $G_P = \{1, \dots, P\}$ , 出口箱的目的港集合,  $P$  为目的港数量;

$G_W$  集合,  $G_W = \{1, \dots, W\}$ , 出口箱的重量等级集合,  $W$  为重量等级数量;

$G_M$  集合,  $G_M = \{1, \dots, M\}$ , 堆场内箱区集合,  $M$  为堆场中箱区的数量;

$G_N$  集合,  $G_N = \{1, \dots, N\}$ , 箱区内贝位集合,  $N$  为箱区中贝位数量;

$G_L$  集合,  $G_L = \{1, \dots, L\}$ , 贝位内的垛位集合,  $L$  为贝位中垛位数量;

$G_K$  集合,  $G_K = \{1, \dots, K\}$ , 垛位内箱位集合,  $K$  为垛位内箱位数量;

$G_I$  集合,  $G_I = \{1, \dots, I\}$ , 集港的出口箱集合,  $I$  为出口箱的数量;

$\Pi_i$  表示第  $i$  个集港出口箱的堆存优先等级, 实测属性为  $erpw$ ,  $i \in G_I$ ;

$\Lambda_{mnlk}$  根据堆存计划, 每个箱位各自的箱位等级, 等于按计划堆存入该箱位的出口箱堆存优先等级;

$\varsigma_{mnlk}$  0-1 变量, 根据堆存计划, 若第  $m$  箱区第  $n$  贝位第  $l$  垛位第  $k$  层箱位所在垛位内所有箱位的箱位等级相同, 则为 1, 否则为 0;

$\overline{G_{mn}^{\Pi}}$  集合, 根据堆存计划, 第  $m$  箱区的第  $n$  贝位内出口箱的堆存优先等级集合;

$G_{mn}^{\Pi}$  集合, 根据堆存计划, 第  $m$  箱区的第  $n$  贝位内未堆存出口箱的堆存优先等级集合;

$\Pi_{mn}^{\max}$  表示  $\overline{G_{mn}^{\Pi}}$  中的最大堆存优先等级;

$G_{mnS}$  集合, 第  $m$  箱区的第  $n$  贝位内可堆放箱位的集合, 若未堆满垛位中, 存在箱位, 其下方箱位都已被堆放, 则该箱位视为一个可堆放箱位, 出口箱  $i$  只能从中选取箱位进行堆存;

$\Pi_{mnlk}$  表示集港期完毕后第  $m$  箱区第  $n$  贝位第  $l$  垛位第  $k$  层箱位上的出口箱堆存优先等

级；

$\kappa_{k_1, k_2}^{mnl}$  0-1 变量，堆存入同一垛位内两个箱位的出口箱是否产生翻箱量，若

$\Pi_{mnlk_1} < \Pi_{mnlk_2}$  ( $k_1 > k_2$ ) 则为1，表示产生1个翻箱量，否则为0；

$\delta_i^{mnlk}$  0-1变量，当第*i*个集港出口箱堆存至第*m*箱区第*n*贝位第*l*垛位第*k*层箱位内，则为1，否则为0；

$\dagger^{mnlk}$  0-1变量，当第*m*箱区第*n*贝位第*l*垛位第*k*层箱位已被占用，则为1，否则为0；

$D_i$  第*i*个集港出口箱的堆存箱位，包括箱区号  $m_i$ 、贝位号  $n_i$ 、垛位号  $l_i$  和层号  $k_i$ 。

$s_0^m$  表示在集港开始前第*m*箱区内的场桥的位置；

$s_i^m$  表示在第*i*个集港出口箱堆存后，第*m*箱区内的场桥的位置，

#### 4.4 优化模型建立

目标函数

$$f_1^2 = \min \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L \sum_{k_1=2}^K \sum_{k_2=1}^{k_1-1} \kappa_{k_1, k_2}^{mnl} \quad (\text{公式4.1})$$

$$f_2^2 = \min \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I |s_i^m - s_{i-1}^m| \quad (\text{公式4.2})$$

$$f^2 = f_1^2 * f_2^2 \quad (\text{公式4.3})$$

式（4.1）表示以翻箱量最小为目标对集港期出口箱的箱位分配进行动态优化；式（4.2）表示最小化在集港期内每个箱区的场桥移动距离；式（4.3）表示两个目标的综合目标函数表达式。

约束条件：

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \delta_i^{mnlk} = 1 \quad (\text{公式4.4})$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \delta_i^{mnlk} \leq K \quad (\text{公式4.5})$$

$$\prod_{k=1}^{k_i-1} \dagger^{mnlk} = 1 \quad (\text{公式4.6})$$

$$1 \leq s_i^m \leq N \quad (\text{公式4.7})$$

式 (4.4) 表示每个出口箱只分配一个箱位进行堆存, 且在规划堆场内。其他约束条件如同计划阶段; 式 (4.5) 表示每个垛位的出口箱数量不得超过允许堆存限制; 式 (4.6) 表示每个出口箱堆存的箱位下方的箱位都被占用; 式 (4.7) 表示每个场桥在各自的箱区内来回移动, 不能移到其他箱区进行作业。

## 4.5 算法设计

当每个出口箱集港, 须决策进行单独堆存还是混合堆存, 依据以下步骤选择具体堆存垛位:

- (1) 根据出口箱  $i$  的实测属性确定其堆存优先等级  $\Pi_i$ , 并重置场桥位置;
- (2) 对照堆存计划, 查看各箱区的  $G_{mnS}$  内是否存在可堆放箱位  $D$ , 该箱位满足  $\Lambda_D = \Pi_i$  且  $\zeta_D = 0$ , 存在则  $D_i = D$ , 更新  $G_{mn}^\Pi$ , 若多个贝位内箱位满足条件, 则选择场桥移位成本最低的贝位内的箱位进行堆存, 否则转下一步;
- (3) 对照堆存计划, 查看各箱区的  $G_{mnS}$  内是否存在可堆放箱位  $D$ , 该箱位满足  $\Lambda_D = \Pi_i$  且  $\zeta_D = 1$ , 存在则  $D_i = D$ , 更新  $G_{mn}^\Pi$ , 若多个贝位内箱位满足条件, 则选择场桥移位成本最低的贝位内的箱位进行堆存, 并选择  $k_D$  最小的箱位 (将较高层的箱位留给实测重量与申报重量不同的出口箱), 否则转下一步;
- (4) 对照堆存计划, 查找满足  $\Pi_i \in G_{mn}^\Pi$  的贝位, 将出口箱  $i$  堆存至该贝位内, 若找不到该贝位, 将  $\Pi_i$  调整为  $\Pi_i^*$  ( $\Pi_i^* \in G_{mn}^\Pi$  且与  $\Pi_i$  差距最小) 转第 (2) 步骤。

决策单独堆存或混合堆存的流程图如图4.3所示。

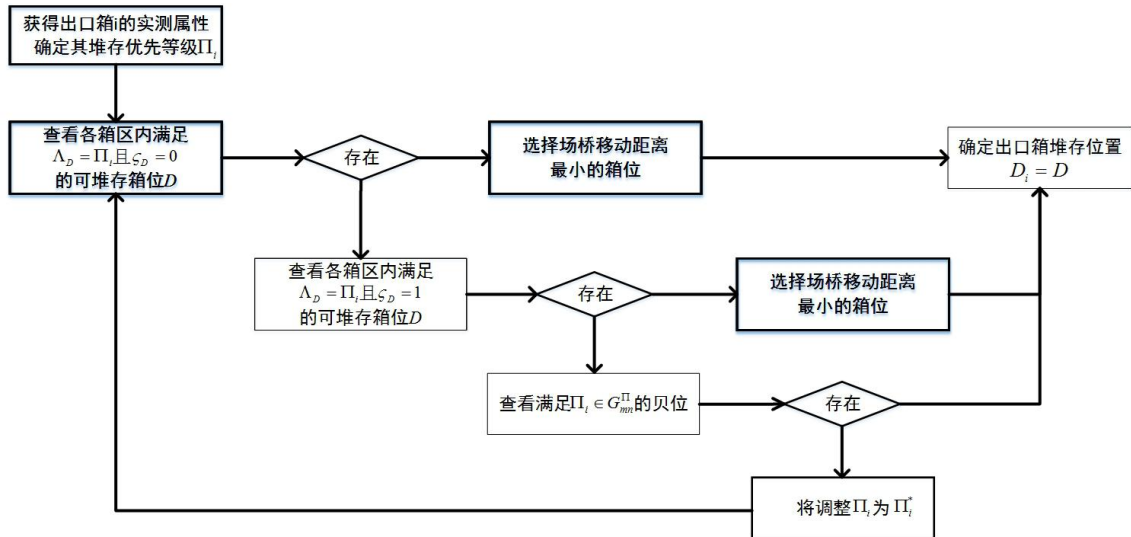


图 4.3 堆存方式决策流程图

Fig.4.3 Flow chart of stacking mode decision

随着出口箱依次到港，贝位内的堆存状态会不断发生变化，直至贝位被堆存满。当一个出口箱到港并分配至某贝位中，在贝位中选择箱位时，需要判断在已经制定理想贝位的贝位中哪个可堆放箱位是最佳的堆放箱位。每个出口箱的堆放箱位所在的堆垛号就可得到整个贝位内的出口箱堆放的方案，也就是解，所以解可以用一串由堆垛号组成的数字来表示，每个出口箱最佳堆放箱位的解成为最优解。

当有出口箱堆放入贝位内的一个堆垛上，堆垛内堆存状态就会改变，贝位的堆存状态也会改变，故每个将堆存入贝位内的出口箱须判断每个堆垛当前状态选择最佳堆放箱位，以此形成最优解。根据理想贝位的介绍，假设待堆存出口箱优先等级为X，贝位内可供出口箱堆存的堆垛状态有以下三类：

为了表达清楚，先说明箱位表示方式，如图4.4所示，边框为虚线的箱位1表示该箱位是个空箱位；边框为点虚线的箱位2表示该箱位可以是空箱位也可以是已用箱位；边框为实线的箱位3表示该箱位是个已用箱位。根据理想贝位，在箱位中标记该箱位的箱位等级，用数字表示。



图 4.4 箱位等级示意图

Fig.4.4 Diagram of box level

(1) 可堆存箱位的箱位等级等于出口箱的优先等级X

存在这样的可堆存箱位是最理想的，能按照理想贝位状态进行堆放。但是如果在可堆放箱位下存在已堆出口箱的优先等级大于出口箱的优先等级，则会产生翻箱作业。上

方空闲箱位的箱位等级大于X的可堆存箱位为更加可堆存箱位，可为优先等级大于X的出口箱提供较佳箱位，如图4.5中，1号箱位比2号箱位更适合出口箱堆存。

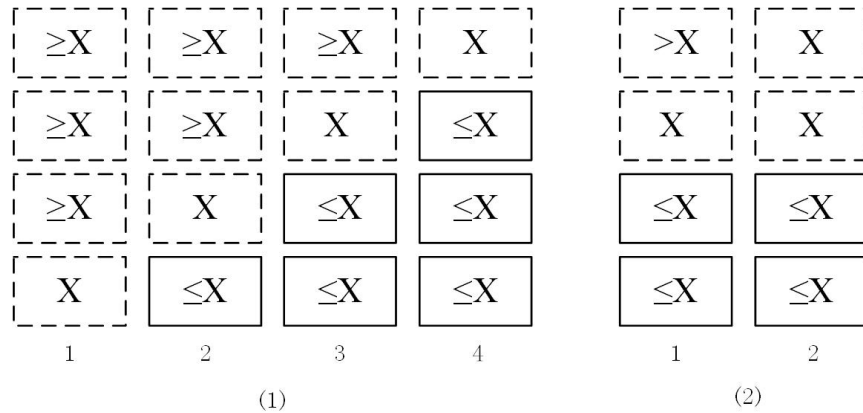


图 4.5 箱位选择情形 1

Fig.4.5 Case 1 of slot selection

(2) 可堆存箱位的箱位等级大于出口箱的优先等级X

存在这样的可堆存箱位，当该箱位所在堆垛中还未有优先等级较高的出口箱堆存时，不会产生翻箱作业。如果已有优先等级较高的出口箱堆存，则产生翻箱作业，但后续出口箱如果按照理想贝位堆存则不再因当前出口箱的堆存产生翻箱作业。如图4.6中，2号箱位比1号箱位更适合出口箱堆存。值得注意的是，每个出口箱到港堆存时都不存在第一类可堆存箱位就寻找箱位等级大于X的可堆存箱位，会出现大量低优先等级的出口箱占据高箱位等级的箱位，则堆存状态与理想贝位相差太大，导致堆存质量大幅下降。

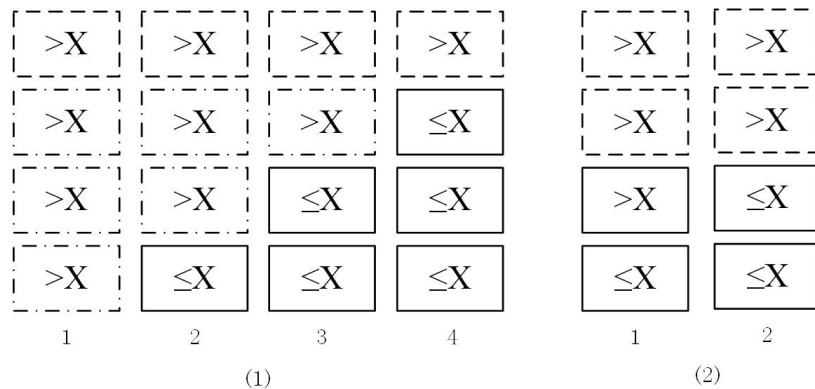


图 4.6 箱位选择情形 2

Fig.4.6 Case 2 of slot selection

(3) 可堆存箱位的箱位等级小于出口箱的优先等级X

当第一、二类的可堆存箱位都不存在，这样的箱位成了唯一的选择。将出口箱堆存在此类箱位中不会产生翻箱作业，下方的已堆存出口箱的优先级别都是小于待堆存出口箱。但是，因为堆垛中堆放入一个较高优先等级的出口箱，后续出口箱按照理想贝位进行堆存则会产生大量翻箱，故在此同类箱位中选择位置较高的箱位进行堆存，以减少产

生翻箱作业的可能性。

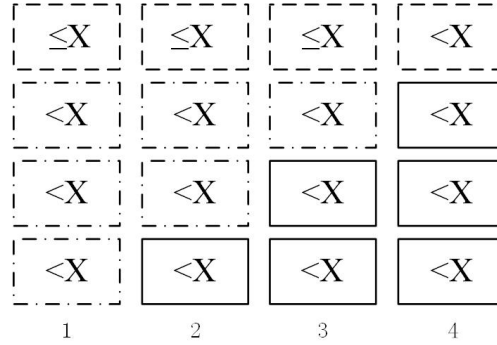


图 4.7 箱位选择情形 3

Fig.4.7 Case 3 of slot selection

出口箱可堆放箱位有以上三种情况并已经进行特点分析，若出口箱 $i$ 执行上述第（4）步骤堆存至第 $m_i$ 箱区第 $n_i$ 个混堆贝位内，须采用基于混堆模式的启发式算法进行堆存，其堆存方法步骤如下：

（1）根据堆存计划方案，获取该贝位的堆存理想贝位，如图4.7b）；

（2）判断在 $G_{m_i n_i S}$ 中是否存在 $\Lambda_{m_i n_i l k} = \Pi_i$ 的可堆存箱位 $D$ ：

① 若存在，则 $D_i = D$ 。若有多个满足条件的箱位，计算每个箱位所在垛位内 $\Lambda_{m_i n_i l k} > \Pi_i$ 的空闲箱位数量，将数值最大的箱位分配给出口箱 $i$ ；

② 若不存在，且 $\Pi_i = \Pi_{m_i n_i}^{\max}$ 则转到步骤（4），否则转到步骤（3）；

（3）将 $\Pi_i$ 提高至邻近等级 $\Pi_i^+$ （ $\Pi_i^+ \in \overline{G_{mn}^{\Pi}}$ ），判断在 $G_{m_i n_i S}$ 中是否存在 $\Lambda_{m_i n_i l k} = \Pi_i^+$ 的可堆存箱位 $D$ ：

① 若存在，则 $D_i = D$ 。若有多个满足条件的箱位，计算每个箱位下方 $\Pi_{mnlk} > \Pi_i^+$ 的已堆存出口箱数量，将数值最小的箱位分配给出口箱 $i$ ；

② 若不存在，转到步骤（4）；

（4）判断在 $G_{m_i n_i S}$ 中是否存在 $\Lambda_{m_i n_i l k} < \Pi_i$ 的可堆存箱位 $D$ ：

① 若存在，计算每个箱位所在垛位内 $\Lambda_{m_i n_i l k} < \Pi_i$ 的空闲箱位数量，将数值最小的箱位分配给出口箱 $i$ ，若存在多个箱位，依次按照 $a+b$ 值最大和层号 $k_D$ 最大的原则进行选位；

② 若不存在，转到步骤（5）；

(5) 查看在  $G_{m_i n_i S}$  中  $\Lambda_{m_i n_i l k} > \Pi_i$  的可堆存箱位  $D$ ，分配给出口箱  $i$ ，若存在多个箱位，依次按照层号  $k_D$  最小和  $a+b$  值最大的原则进行选位。

集港的出口箱须经过算法步骤中的若干步骤完成堆存。算法步骤中涉及到可堆存箱位的  $a$  和  $b$  值的计算方法：当前的贝位状态下，以通过可堆放箱位坐标位置的45度斜线为分界线，统计分界线左上方堆存等级大于  $\Pi_i$  的已堆存出口箱数量，即为  $a$  值；统计分界线右下方堆存等级小于  $\Pi_i$  的已堆存出口箱数量，即为  $b$  值。

混堆贝位内算法流程如图4.8所示。本算法适用于不同贝位结构和不同堆存优先等级数量的出口箱堆存作业。

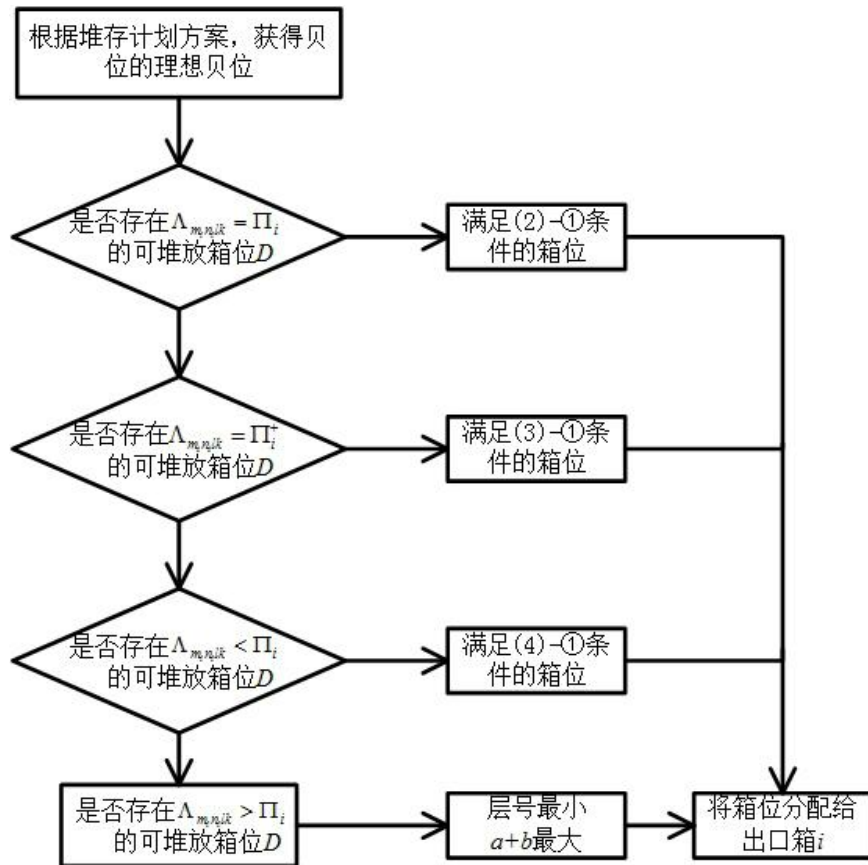


图 4.8 混堆贝位堆存启发式算法逻辑图

Fig.4.8 The heuristic algorithm chart of storage location in hybrid stack bay

## 4.6 实证分析及比较

### 1) 实证分析方案设计

为了验证本章提出的多箱区出口箱箱位分配优化模型和启发式算法的有效性和先进性，设计符合实际情况的实例进行验证。算例借助 matlab2012 版进行编程，在 Intel (R) -32Core (TM) i5-2410M@2.30GHz 计算机上求解。

本次设计的集装箱码头堆场箱区分布情况如图 4.9 所示，共 3 个箱区，每个箱区由 8 个贝位组成，其中每个贝位都是 6 列 4 层的贝位结构。随机到港的出口箱共有 576 个，刚堆满整个堆场，其目的港有 3 个，重量等级分为 9 级，在集港期内将到港并堆存至堆场内，每个目的港的出口箱数量恰好能装满整数个贝位。

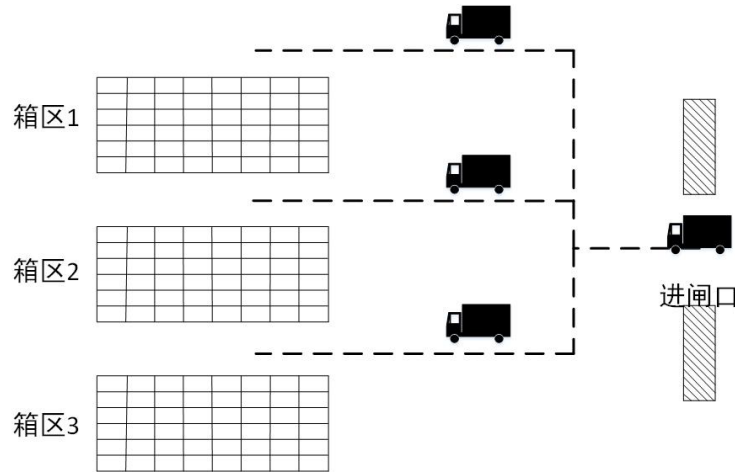


图 4.9 实证案例堆场情况示意图

Fig.4.9 Schematic diagram of demonstration case storage yard

## 2) 实验结果

将上述出口箱按照本章所提出的出口箱堆存模型和算法进行堆存作业，可得到出口箱堆存作业完成后，在整个堆场内产生的后续装船时需翻箱作业次数，并计算翻箱率来表明翻箱数指标的大小。该算例分别对随机产生的 100 组出口箱进行实验，分别记录其翻箱数，结果如图 4.10 所示。



图 4.10 3 箱区 8 贝位结构实验结果

Fig.4.10 Experimental results of 8-bay structure in 3 box areas

从图中可知，翻箱数较小的实验组的翻箱数可低至 5 次以下，翻箱数较多的实验组的翻箱数也不超过 25 次，并且经计算，100 组实验的平均翻箱数为 10.47 次，平均翻箱



率为 1.8%。从数据上可以看出，本章提出的多箱区箱位分配模型及算法能有效降低多箱区内出口箱在装船时的翻箱率，提高出口箱整体装船效率。

为探究多箱区出口箱箱位分配优化模型和算法在不同规模的堆场内的效果，设计 5 种不同规模的堆场进行实验，即 3 箱区 8 贝位、4 箱区 8 贝位、5 箱区 8 贝位、3 箱区 5 贝位和 3 箱区 12 贝位。针对每种规模的堆场进行 100 次实验组，并记录每组实验组的实验结果。针对不同规模的堆场，其 100 组翻箱数实验结果如图 4.10-4.14 所示。



图 4.11 4 箱区 8 贝位结构实验结果  
Fig.4.11 Experimental results of 8-bay structure in 4 box areas

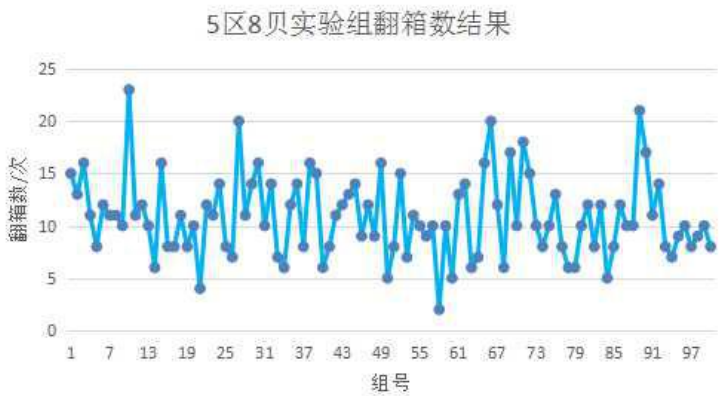


图 4.12 5 箱区 8 贝位结构实验结果  
Fig.4.12 Experimental results of 8-bay structure in 5 box areas



图 4.13 3 箱区 5 贝位结构实验结果

Fig.4.13 Experimental results of 5-bay structure in 3 box areas



图 4.14 3 箱区 12 贝位结构实验结果

Fig.6.7 Experimental results of 12-bay structure in 3 box areas

从不同规模堆场的实验结果可以看出，不同规模堆场的出口箱翻箱数随着出口箱属性和到港顺序的不同呈现出变化不一的结果，但是其变化保持在一定范围之内。经计算，不同规模堆场的平均翻箱数和平均翻箱率如表 4.1 所示。

表 4.1 不同规模堆场出口箱翻箱数实验结果

Tab.4.1 Turnover number results from different size storage yards

	3 箱区	4 箱区	5 箱区	3 箱区	3 箱区
	8 贝位	8 贝位	8 贝位	5 贝位	12 贝位
平均翻箱数	10.47	11.27	10.85	10.26	10.05
平均翻箱率	1.82%	1.47%	1.13%	2.85%	1.16%

从表 5.1 中可以看出，平均翻箱数随着堆场规模的变化不大，其值保持在 10-11.5 之间。平均翻箱率的变化呈现一定规律，根据表中数据可得到平均翻箱率的曲线变化，如图 4.15 与图 4.16，其中图 4.15 为不同箱区数量的堆场中得到的实验结果，图 4.16 为

不同贝位数量的堆场中得到的实验结果。



图 4.15 翻箱数实验结果图

Fig.4.15 Figure of turnover experimental results

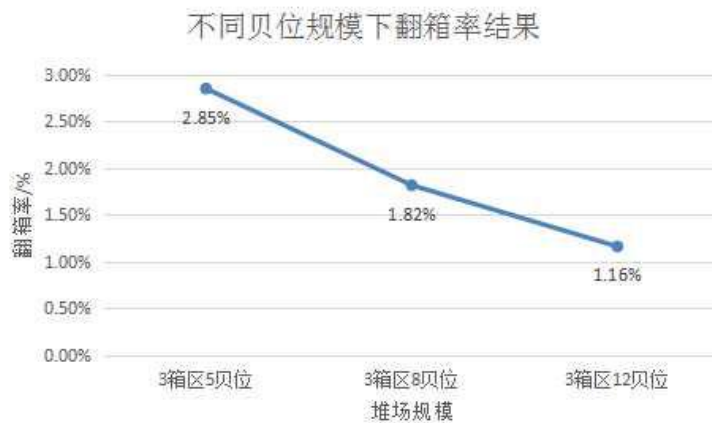


图 4.16 翻箱率实验结果图

Fig.4.16 Figure of turnover experimental results

根据以上数据可以得出，本章提出的多箱区出口箱箱位分配优化模型及其算法，在翻箱数方面针对不同规模的堆场没有太大影响，可以将翻箱数保持在一定的范围之内，有效的控制了翻箱数因出口箱数量的增加而增加的情况发生。因此，出口箱数量越大，其翻箱率则越低，从图中可知，不管是因堆场内贝位数量的增加还是箱区数量的增加而引起的出口箱总数的增加，都应证了这一点。

出口箱在堆场的翻箱水平除了跟堆场的规模有关，还跟出口箱的属性分级有关。为了探究其两者之间的关系，另外设计 4 组不同出口箱属性分级的实验组，即 4 个目的港 9 个重量等级、5 个目的港 9 个重量等级、3 个目的港 7 个重量等级及 3 个目的港 5 个重量等级。各实验组翻箱数的实验结果如图 4.17-4.20 所示。



图 4.17 4 个目的港出口箱翻箱率实验结果图

Fig.4.17 Figure of turnover experimental results for 4 destination ports



图 4.18 5 个目的港出口箱翻箱率实验结果图

Fig.4.18 Figure of turnover experimental results for 5 destination ports

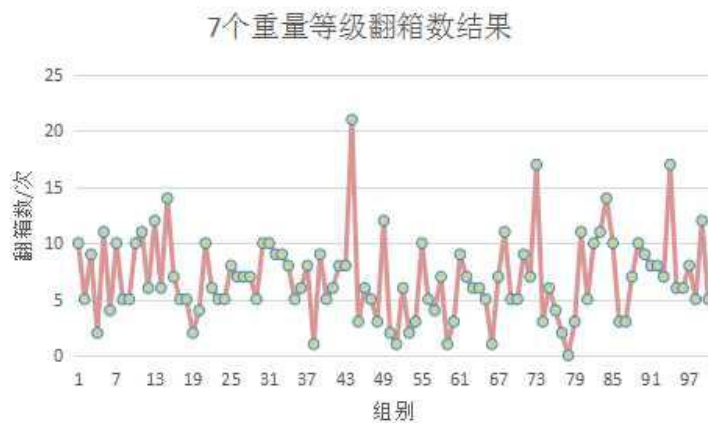


图 4.19 7 个重量等级出口箱翻箱率实验结果图

Fig.4.19 Figure of turnover experimental results for 7 destination ports

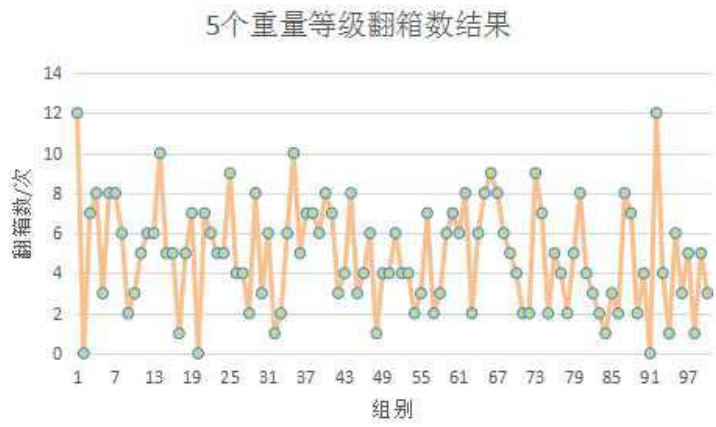


图 4.20 5 个重量等级出口箱翻箱率实验结果图

Fig.4.20 Figure of turnover experimental results for 5 weight classes

从图中可以看出，每组实验组的翻箱数都保持在一定范围之内，经计算，各组实验组的平均翻箱数和平均翻箱率如表 4.2 所示。

表 4.2 不同出口箱分级翻箱数实验结果

Tab.4.2 Turnover experimental results in different explore boxes

	3 目的港 9 重量等级	4 目的港 9 重量等级	5 目的港 9 重量等级	3 目的港 7 重量等级	3 目的港 5 重量等级
平均翻箱数	10. 47	13. 54	16. 41	6. 87	4. 9
平均翻箱率	1. 82%	2. 35%	2. 85%	1. 19%	0. 85%

从表中可以看出，不同的出口箱分级会导致平均翻箱数和平均翻箱率呈有规律的变化，根据表中数据可以绘出如图 4.21-4.22 所示的不同出口箱分级下平均翻箱率折线图。

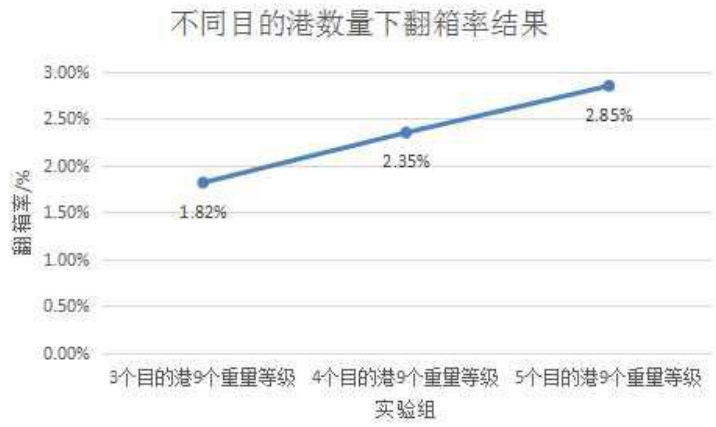


图 4.21 不同目的港数量下翻箱率结果图

Fig.4.21 Results of turnover rate at different destination ports

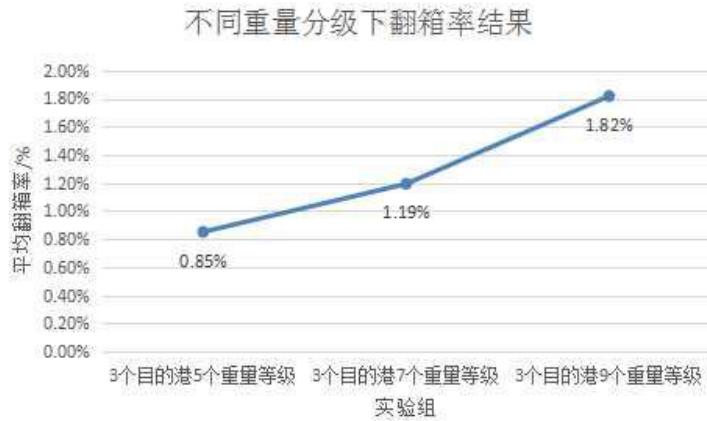


图 4.22 不同重量等级出口箱翻箱率实验结果图

Fig.4.22 Results of turnover rate at different classes

从图中可以看出，出口箱平均翻箱率随着出口箱分级变化呈现出规律性的变化，随着出口箱目的港数量的增多，平均翻箱率随之增加；随着出口箱重量等级的增多，平均翻箱率亦随之增加。当集装箱码头将出口箱的类别分得较为细致，则在堆场内产生的翻箱量会增加。码头应该根据实际需要对其进行分类，过于细化会导致翻箱作业增加，而粗化则可能无法满足装船要求。

### 3) 混堆贝位翻箱量实证分析

#### (1) 实证方案设计

为了验证上节提出的基于混堆模式堆存方法的有效性，采用计算机模拟技术进行算例验证。借助计算机模拟不同重量等级的出口箱到场顺序，依据该顺序对出口箱进行贝位内箱位分配。假设某结构为4层6垛混堆贝位内有24个出口箱将被堆存，出口箱属性相同，重量等级按到场顺序进行排列依次为：1，3，5，6，4，8，7，9，5，3，1，6，8，4，1，3，2，3，4，5，5，8，5，9。经过统计后该组出口箱在贝位内的理想堆存状态如图3a)所示。

#### (2) 实验结果

本算例采用Matlab R2012a版软件编程，在Intel(R)-32Core(TM)i5-2410M@2.30GHz计算机上求解。出口箱按随机顺序到场，首先前6个出口箱到场堆存，皆能找到箱位等级等于出口箱重量等级的可堆放箱位进行堆放，结果如图4.23b)所示。当第7个重量等级为7的出口箱到场，经观察可知不存在箱位等级为7的可堆放箱位，故堆放在箱位等级为8的可堆放箱位上，坐标为（1，2）。



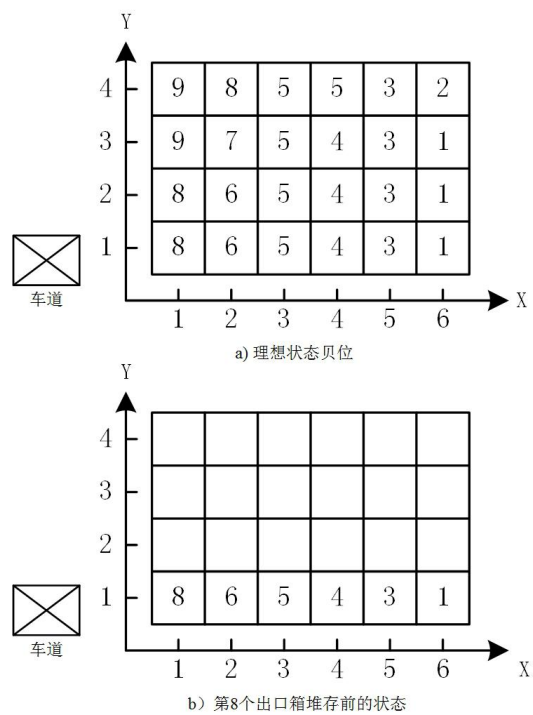


图 4.23 双层启发式算法逻辑图

Fig.4.23 Logic diagram of tow level heuristic algorithm

对于每个出口箱的堆存过程会经过基于混堆模式的堆放算法步骤的1步或几步才完成，完成后的贝位状态如图4.24a)所示。箱位中的数字下标表示该出口箱的装船顺序号，可以明显看出该堆存状态的贝位在装船时只产生2次翻箱，即在装船时下标分别为3和6的出口箱被翻箱。在采用本文提出的基于混堆模式堆放方式对出口箱进行堆场堆放，将其与已有文献<sup>[12]</sup>中的混合序列堆放方式进行比较，评价不同堆放方式对堆场内出口箱堆放的优缺点。依据文献中所提出的堆放方式对此算例进行模拟得到的贝位状态如图4.24b)所示，可以得知翻箱数为6次。

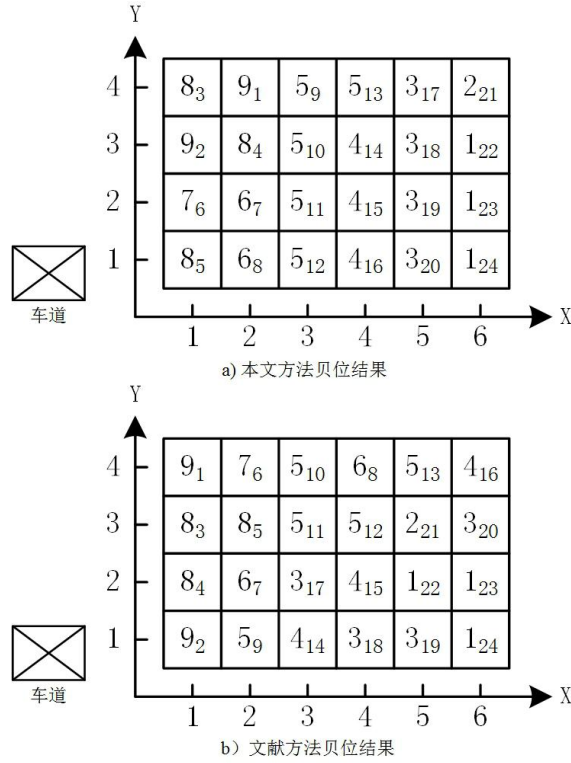


图 4.24 贝位堆存结果示意图

Fig.4.24 Stacking result diagram in bay

出口箱在贝位内的翻箱率与出口箱堆存策略具有直接联系，而且与贝位内的出口箱数量和翻箱率也有关。贝位内的出口箱数量越多，翻箱率则越高，往往在即将堆满的时候翻箱率的增加最快，当贝位被堆满时，翻箱率为最高。此外，贝位结构与翻箱率同样存在联系，从极限的角度考虑问题，若出口箱不能堆叠，则不会产生一个翻箱；若出口箱无限堆叠且第一层的出口箱为堆存优先等级为高，则翻箱率则必定最高。为了验证本章模型与算法在不同贝位结构下的有效性，选取 8 种常见的贝位结构，即 3 列 3 层、5 列 3 层、7 列 3 层、5 列 4 层、6 列 4 层、7 列 4 层、5 列 5 层和 6 列 5 层，并且堆存率取 100%，使空间利用率最大。在每种贝位结构的条件下，随机到港的出口箱进行 100 组出口箱贝位箱位分配模型运算实验，得到实验组的翻箱数及平均翻箱率。

每个贝位箱位分配翻箱率  $\varphi$  的计算公式为：

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^I U_i^i}{K \times L} \quad (\text{公式 4.8})$$

其中， $\sum_{i=1}^I U_i^i$  表示贝位内产生的翻箱数， $K$  表示贝位列数， $L$  表示贝位层数。



堆存优先等级随机产生的出口箱，在不同结构的贝位中，经实验得到共 800 组实验的翻箱数结果，因数据较多，为了绘图清晰，将 2-3 种贝位结构的实验结果绘制在同一张图中，如图 4.25-4.27 所示。

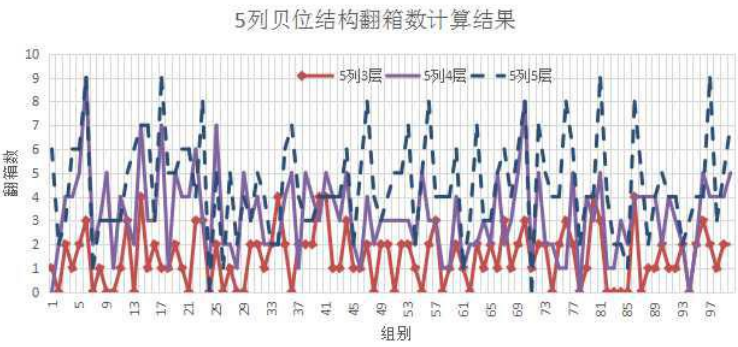


图 4.25 翻箱数结果折线图  
Fig.4.25 Line chart of results of box turnover

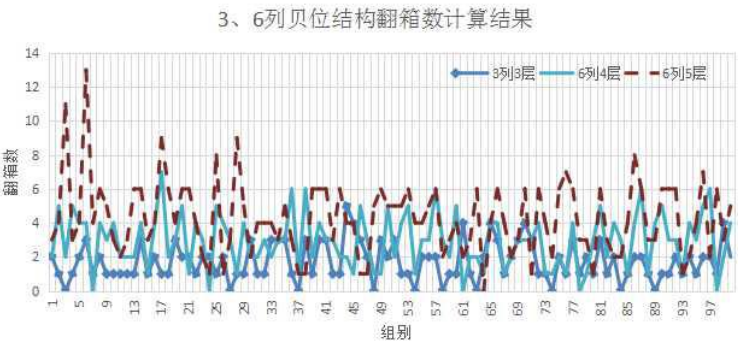


图 4.26 翻箱数结果折线图  
Fig.4.26 Line chart of results of box turnover

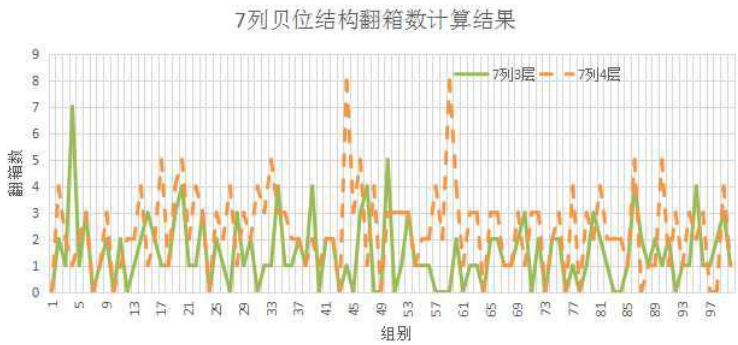


图 4.27 翻箱数结果折线图  
Fig.4.27 Line chart of results of box turnover

各贝位结构实验组的平均翻箱数和平均翻箱率结果如图 4.28 所示。

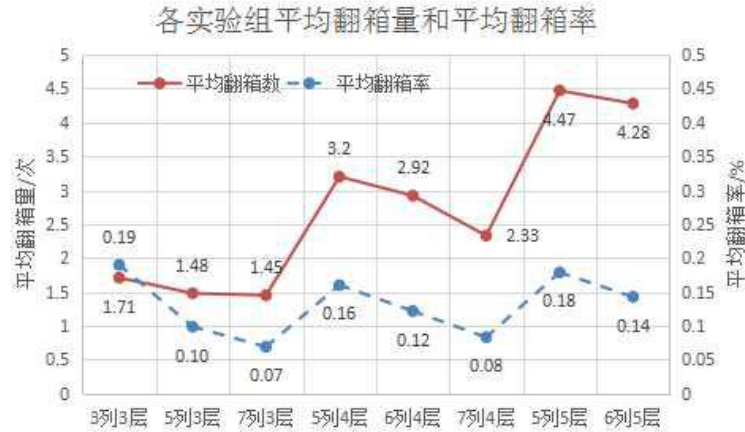


图 4.28 各贝位结构平均翻箱数和翻箱率结果

Fig.4.28 Results of average number and rate of box turnover for each bay structure

为了更清晰地观测出平均翻箱率存在规律，将翻箱率结果按贝位结构层数相等的规则进行绘图，如图 4.29 和图 4.30。

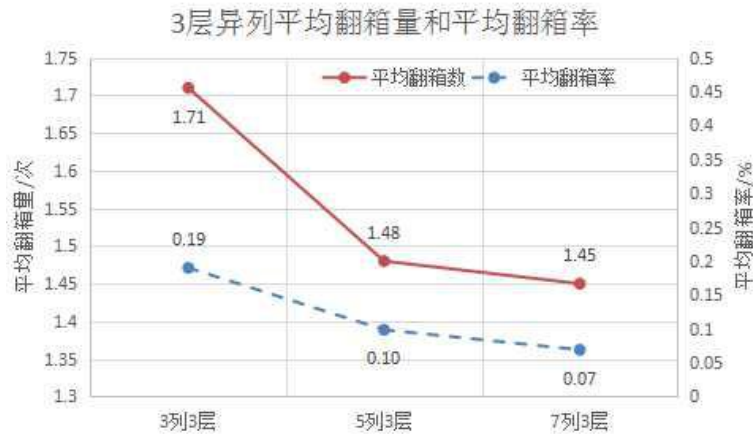


图 4.29 3 层贝位结构平均翻箱数和翻箱率结果

Fig.4.29 Results of average number and rate of box turnover for 3 floor structure

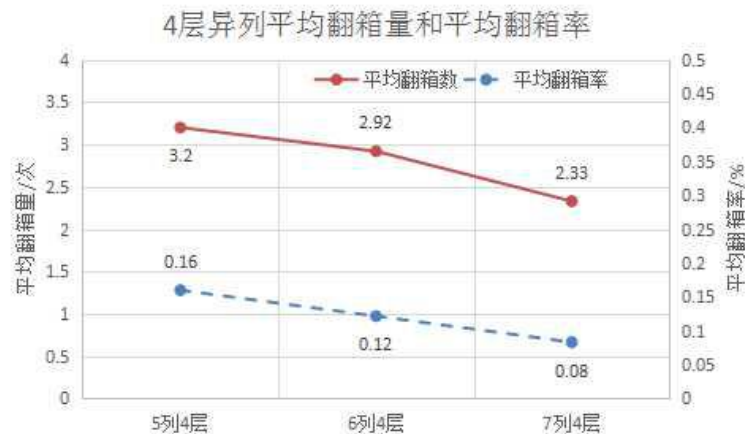


图 4.30 4 层贝位结构平均翻箱数和翻箱率结果

Fig.4.30 Results of average number and rate of box turnover for 4 floor structure

同时，可以将翻箱率按照贝位结构列数相等的规则进行绘图，如图 4.31 所示。

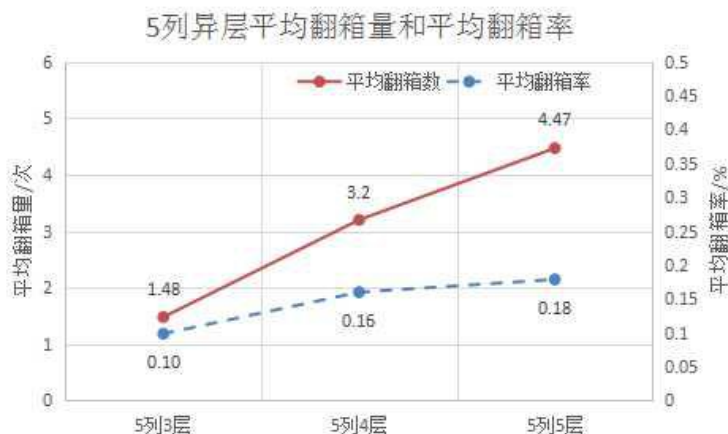


图 4.31 5 层贝位结构平均翻箱数和翻箱率结果

Fig.4.31 Results of average number and rate of box turnover for 5 floor structure

由图 4.29-4.31 可知，出口箱在不同贝位结构的贝位中的翻箱数处于不同的水平中，说明出口箱翻箱数跟贝位结构存在关系。同时，由图 4.28 可知，出口箱在不同贝位结构的贝位中的翻箱率呈现一定规律，说明出口箱的翻箱率与贝位结构存在关系。由图 4.29-4.30 可知，当贝位的层数不变，列数越多，出口箱在贝位内的翻箱率则越低，表明出口箱在列数较多的贝位中可更有效地选择箱位进行堆放。由图 4.31 可知，当贝位的列数不变，层数越多，出口箱在贝位内的翻箱率则越高，表明翻箱数随着出口箱依次堆存而增加。

### （3）对比实验结果

为消除个别实验的影响，利用计算机随机生成100组24个出口箱进场信息，模拟出口箱在100个贝位内的堆放，采用基于混堆模式堆放方式和混合序列堆放方式。图4.32显示了100组实验采用不同堆放方式的翻箱数，明显可以看出基于混堆模式堆放方式要优于混合序列堆放方式，经计算后者的最大翻箱率为41.7%，平均翻箱率为20%，而前者的最大翻箱率为29%，优化了30.5%，平均翻箱率为12.2%，优化了39%。这使得集装箱在装船时的翻箱率进一步降低，提高了装船效率，同时也证明了本文提出的基于混堆模式堆放方法的有效性。

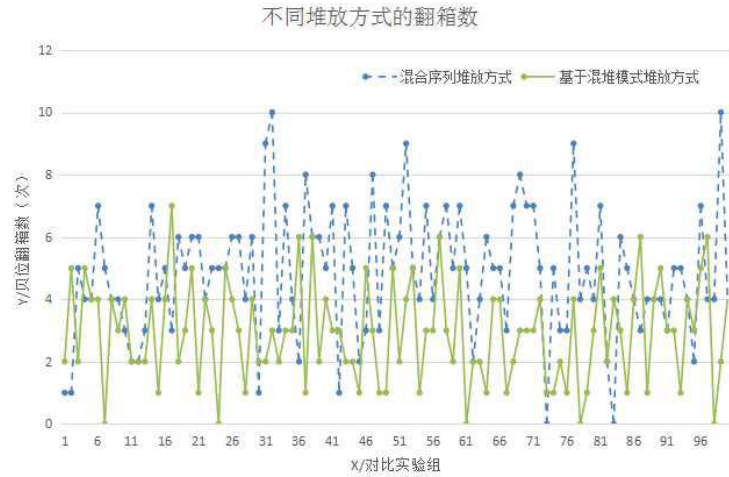


图 4.32 不同堆放方式的翻箱数结果折线图

Fig.4.32 The turnover number chart of different stacking plans

#### 4) 装卸设备效率对比实验

##### (1) 实证方案设计

为了验证本章提出的多箱区出口箱箱位分配综合调度优化模型和启发式算法的有效性和先进性，设计符合实际情况的实例进行验证。算例借助 matlab2012 版进行编程，在 Intel (R) -32Core (TM) i5-2410M@2.30GHz 计算机上求解。

本次设计的集装箱码头堆场箱区分布情况如图 4.33 所示，共 3 个箱区，每个箱区由 8 个贝位组成，其中每个贝位都是 6 列 4 层的贝位结构。随机到港的出口箱共有 576 个，刚堆满整个堆场，其目的港有 3 个，重量等级分为 9 级，在集港期内将到港并堆存至堆场内，每个目的港的出口箱数量恰好能装满整数个贝位，即每个贝位的箱位利用率为 100%。堆场内每个箱区配备一个场桥用于装卸出口箱，场桥相关参数如下：

$$d_{n_1 n_2}^m / (n_2 - n_1) = 6m, \quad d_{mn} = 2.5m, \quad e_{m,r}^0 = 1, \quad v_{m,r}^1 = 0.8m/s, \quad v_{m,r}^2 = 0.6m/s。$$

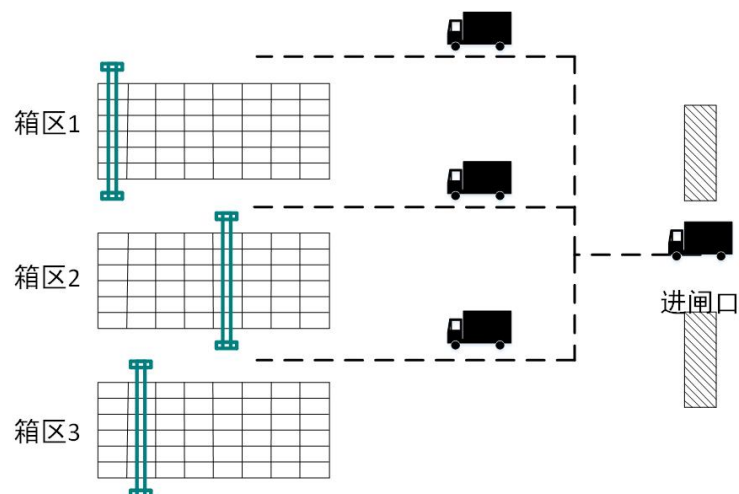


图 4.33 实证案例堆场情况示意图

Fig.4.33 Schematic diagram of demonstration case for storage yard

## （2）实证结果分析

经计算机模拟计算得到若干评价参数，如在整个集港期内场桥大车作业移动距离、完成单个出口箱堆存平均作业时间和翻箱数。其中翻箱数的评价指标在前面已详细分析。图 4.34-4.36 分别表示各场桥在集港期内对出口箱进行堆存作业时所移动的路径，从图中可以看出，场桥的作业位置基本满足从箱区的一侧向另一侧迂回移动，而没有产生大量的远距离移位作业，符合降低装卸设备的作业成本的原则。

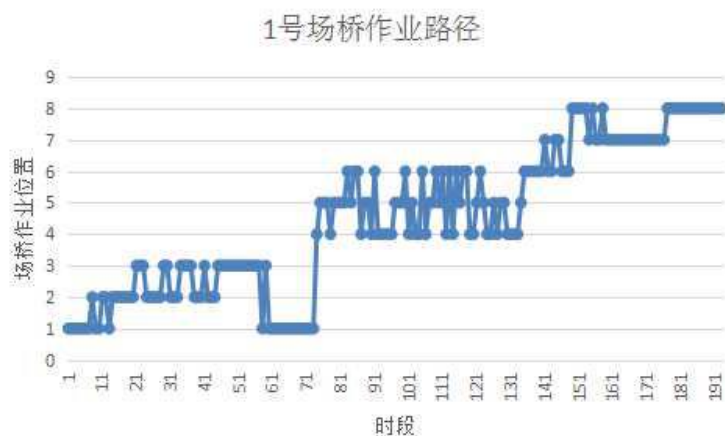


图 4.34 1 号场桥作业路径  
Fig.4.34 Operation path of yard crane 1

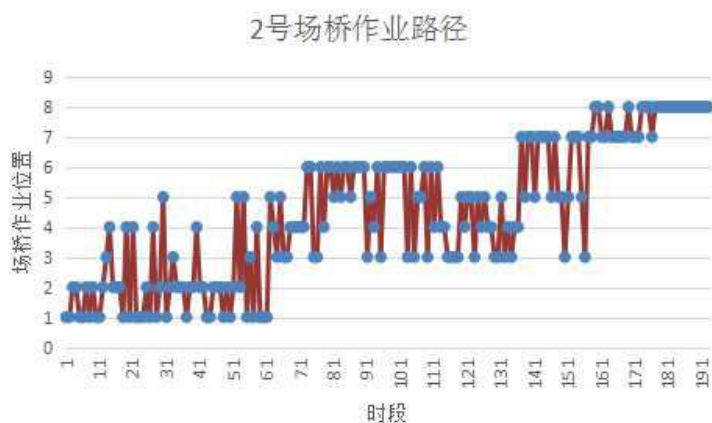


图 4.35 2 号场桥作业路径  
Fig.4.35 Operation path of yard crane 2



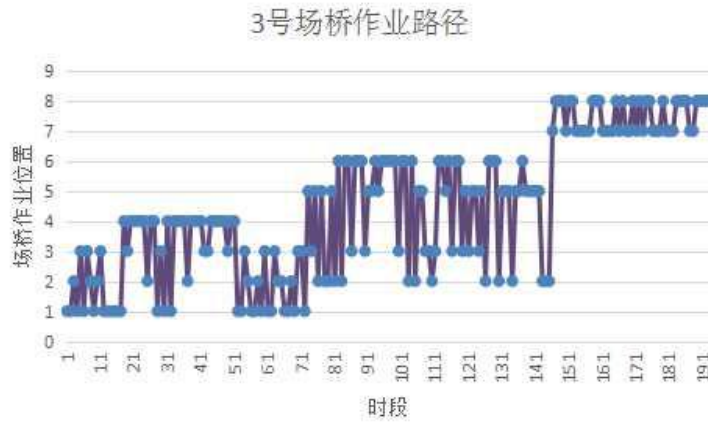


图 4.36 3 号场桥作业路径  
Fig.4.36 Operation path of yard crane 3

如上述的实例重复进行 10 组实验，可以得到类似的实验数据。每个装卸设备都是独立作业的个体，每个场桥大车移动时间代表了场桥无效作业的工作量，如图 4.37-4.39 所示为每组实验中每个场桥大车移动时间。

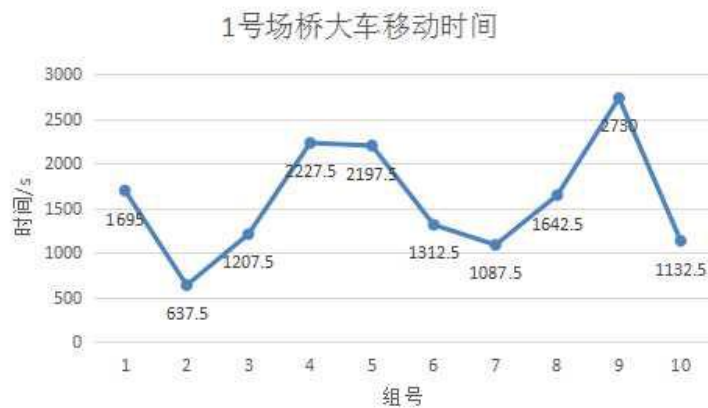


图 4.37 1 号场桥大车移动时间  
Fig.4.37 Operation time of yard crane 1



图 4.38 2 号场桥大车移动时间

Fig.4.38 Operation time of yard crane 2

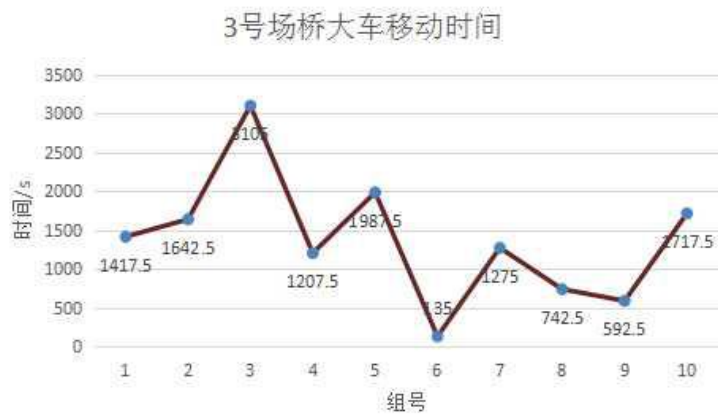


图 4.39 3 号场桥大车移动时间

Fig.4.39 Operation time of yard crane 3

从图中可以看出每个场桥的大车移动时间都在一定范围内变化，最大值不超过 3000s，最小值可以达到 135s，其原因在于出口箱不同的到港顺序，有些到港顺序有利于减少若干个场桥大车的移动时间，而有些到港顺序则不得不增加若干场桥大车的移动时间。出口箱的随机到港时间产生不可预知的到港顺序，集港期内特定场桥大车移动时间的长短也无法预知。

图 4.40 表示十组实验中各场桥大车的平均移动时间，可以看出场桥的大车的平均移动时间在 500s 到 2000s 之间，区间较大。对于堆场内所有场桥，其大车移动时间跟出口箱的到港顺序有关，合理的到港顺序可以大幅度降低场桥的无效作业时间。



图 4.40 场桥大车平均移动时间的十组实验结果

Fig.4.40 Ten experimental results of average moving time of yard crane

表 4.3 表示各实验组中各场桥的移动时间及各场桥的平均移动时间，图 4.41 是依据表中的各场桥大车平均移动时间绘制的饼状图。

表 4.3 十组实验场桥大车移动时间记录表

Tab.4.3 Moving time table of yard crane in ten experiments

实验组	1 号场桥	2 号场桥	3 号场桥
1	1695	3045	1417.5
2	637.5	1537.5	1642.5
3	1207.5	1312.5	3105
4	2227.5	1072.5	1207.5
5	2197.5	1477.5	1987.5
6	1312.5	862.5	135
7	1087.5	2452.5	1275
8	1642.5	390	742.5
9	2730	1402.5	592.5
10	1132.5	2152.5	1717.5
平均移动时间 (s)	1587	1570.5	1382.25

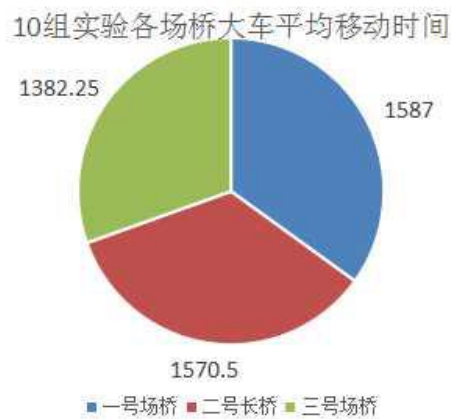


图 4.41 各场桥在十组实验中大车平均移动时间

Fig.4.41 The average travel time of each yard crane in ten group of experiments

从图中可以看出堆场内的各场桥的大车移动时间在某些集港期内存在差距，但从大量实证的结果看，场桥大车平均移动时间相差不大，即场桥的作业量达到了均衡状态。

### （3）对比方案

为了验证本章多箱区出口箱箱位分配方案的有效性，设计相应的对比方案。对比方案的集装箱码头堆场箱区分布情况与本章方案实证相同，共 3 个箱区，每个箱区由 8 个贝位组成，其中每个贝位都是 6 列 4 层的贝位结构。随机到港的出口箱共有 576 个，刚堆满整个堆场，其目的港有 3 个，重量等级分为 9 级，在集港期内将到港并堆存至堆场内，每个目的港的出口箱数量恰好能装满整数个贝位。场桥的配备也与本章方案实证相同。

在对比方案中，出口箱堆存方案是较为常见的按贝位顺序进行一一堆存，且不同目的港不得堆存在一个贝位当中，在贝位内出口箱的堆存策略为已有文献<sup>[70]</sup>中所述的策



略。经计算机模拟计算在对比方案下的出口箱翻箱情况，并将本章方案实验结果与之对比。对比方案的各场桥在集港期内对出口箱进行堆存作业时所移动的路径如图 4.42-4.44 所示。

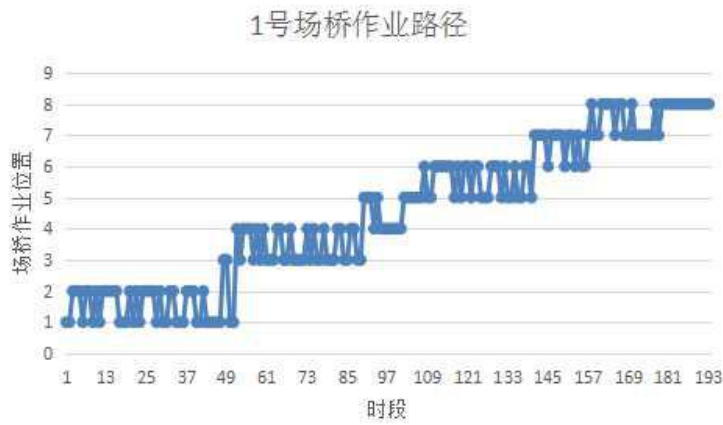


图 4.42 对比实验中 1 号场桥移动路径  
Fig.4.42 Operation path of yard crane 1 in Contrast experiment

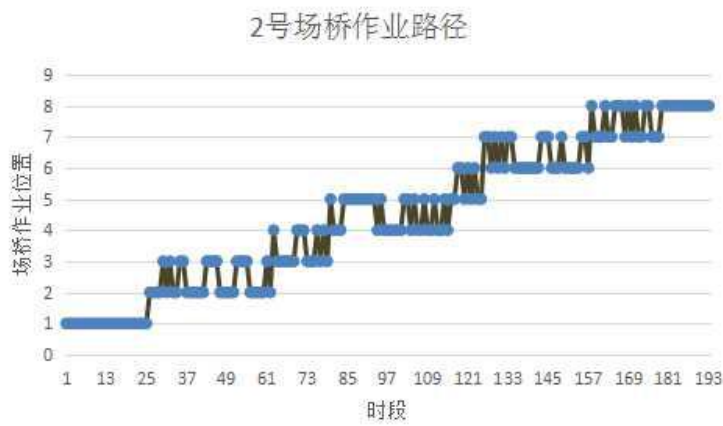


图 4.43 对比实验 2 号场桥移动路径  
Fig.4.43 Operation path of yard crane 2 in Contrast experiment

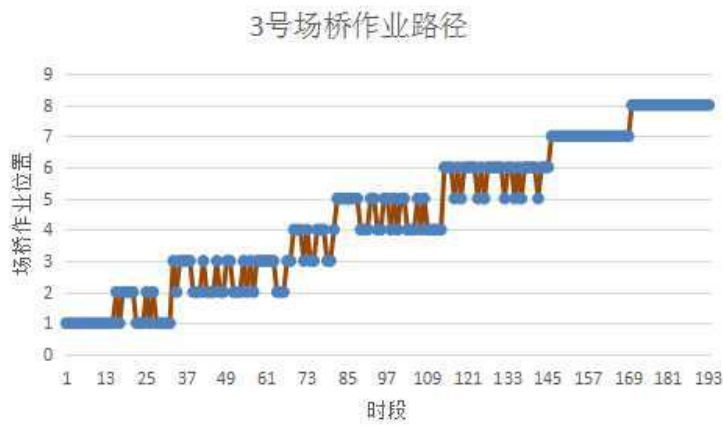


图 4.44 对比实验 3 号场桥移动路径

Fig.4.44 Operation path of yard crane 3 in Contrast experiment

从图中可以看出对比方案的场桥作业路径成爬梯状，不存在超过两个贝位的长距离移位作业的情况发生，作业效率较高。为避免偶然事件对释延能结果的干扰，实验进行 10 次，其结果如表 4.4 所示。

表 4.4 十组对比实验场桥大车移动时间

Tab.4.4 Moving time table of yard crane in ten contrast experiments

实验组	1 号场桥	2 号场桥	3 号场桥
1	712.5	562.5	502.5
2	1297.5	1297.5	697.5
3	1072.5	727.5	382.5
4	1387.5	855	532.5
5	1297.5	1110	52.5
6	1057.5	742.5	547.5
7	847.5	52.5	52.5
8	1297.5	1605	52.5
9	1312.5	1342.5	472.5
10	1372.5	1177.5	1357.5
平均移动时间 (s)	1165.5	947.25	465

本章出口箱箱位分配方案与对比方案的比对情况如表 4.5 所示，对比评价指标为场桥移动时间、出口箱平均翻箱率和出口箱堆存不均衡程度三个。

表 4.5 不同方案指标对比情况表

Tab.4.5 Indicators comparison table of different schemes

场桥	本章方案			对比方案			本章方案占优
	1 号	2 号	3 号	1 号	2 号	3 号	
大车移动时间	1587s	1570.5s	1382.2s	1165.5s	947.2s	465s	
总和		4539.75s			2577.75s		×
翻箱率		1.8%			19.7%		√
不均衡程度		49.44			158.88		√

综上所述，本章考虑出口箱随机到港下，制定了集装箱码头堆场出口箱箱位分配综

合调度方案，与对比方案进行对比，得出综合调度方案在集港期内场桥大车移动时间比对比方案要多，但该方案在后续装船作业过程中翻箱作业和各目的港出口箱在箱区间的作业量不均衡程度比对比方案要少。三个评价指标包含了集港期和装船作业期两个作业时段，完成某个船期的出口箱业务不仅仅考虑某个作业时段即可，应统筹协调研究，两个方案各有长短，对比方案的高翻箱率势必会导致后续装船时场桥的翻箱作业时间增加，从而导致整个装船效率降低，因此本章所提出的方案，适当增加集港期内场桥的作业时间使装船时降低翻箱率并协调各箱区作业量，为可行方案。

#### 4.7 本章小结

本章在出口箱集港时，根据出口箱到港实测属性和集港期前所制定的箱位分配静态最佳计划，为出口箱选择具体堆存箱位。首先为每个到港的出口箱确定其堆存优先等级；然后对照静态最佳计划，兼顾最小化装船时的翻箱数和最小化场桥移动距离目标，建立出口箱箱位分配动态优化模型，并提出相应的约束条件；接着为出口箱选择最优箱位设计求解算法及算法流程；再为不能顺利执行静态最佳计划的出口箱设计动态求解算法及算法步骤，避免因此造成过多的翻箱数；最后通过实证分析，得到出口箱箱位分配的翻箱数结果，证明所建模型和所设计的算法可以进一步减少出口箱在装船时的翻箱数。

## 5 结论与展望

由于集装箱码头出口箱业务日趋繁重,再有堆场空间和设备资源有限的情况下,必然会增加堆场内空间资源利用率和设备资源的有效作业时间,而这也会进一步提高堆场内出口箱堆存的复杂性和设备调度的难度,并且降低方便后续装船的合理性。本文考虑了出口箱到港时间的不确定性,对堆场出口箱堆存效率和堆存质量产生影响,进一步影响装船效率。为了提高出口箱的堆存效率和堆存质量,全面分析出口箱堆存的整个作业流程,合理协调出口箱、空间资源和设备资源三者之间的关系。

### 5.1 本文总结

本文针对研究内容进行了系统的研究,主要的研究成果为三个方面,现总结如下:

#### (1) 完成了出口箱箱位分配静态优化的研究工作

从航运公司的订舱单中获取出口箱信息,为各类出口箱划分堆存优先等级,采用静态规划的方法,以均衡各装船时各作业线之间的作业量、最小化内集卡水平运输距离和预期翻箱数等于零为目标函数,建立了出口箱箱位分配静态优化模型,并设计了整套的出口箱堆存静态求解算法。实证分析及对比实验表明,所提出的模型和求解算法能够实现出口箱在码头堆场内的静态箱位分配,同时保证各优化目标得到兼顾。

#### (2) 完成了出口箱箱位分配动态优化的研究工作

分析在出口箱实时分配堆存时各作业环节受各类出口箱到港时间不确定性的影响程度,综合集卡运输作业、场桥堆存作业和出口箱选择箱位堆存,以最小化装船时翻箱率最低为目标函数,建立了出口箱箱位分配动态优化模型,并设计了相应的动态求解算法。实证分析及对比实验表明,所提出的模型与求解算法可以实现出口箱在堆场里实时决策选位堆存的优化,而且堆存产生的翻箱作业低于对比方案,进一步提高后续装船效率。

#### (3) 完成了出口箱堆存静态与动态联合优化的研究工作

本文在进行出口箱堆存研究中将静态优化方法和动态优化方法相结合。首先考虑集装箱码头出口箱业务的复杂性,在出口箱集港前采用静态优化方法得到箱位分配静态最佳计划,然后在出口箱集港期内采用动态优化方法克服出口箱集港时间不确定因素带来的弊端,以静态最佳计划为基础,为出口箱实时决策堆存箱位。实证分析表明,出口箱箱位分配静态优化和动态优化相结合的优化方法能有效满足出口箱箱位分配的要求。

由于笔者学识的粗浅,论文中必然还存在令人不太满意之处,但这或许会成为进一步深入研究的切入点。

### 5.2 主要创新点

本文在已有文献的研究成果上进行研究,主要的创新点体现在以下2个方面:

#### (1) 混堆贝位内出口箱箱位分配策略的创新

为了提高出口箱堆存质量，减少出口箱在装船时的翻箱率，将箱位分配作业分为静态计划和动态调整两个阶段。静态计划阶段为出口箱在堆场内制定一定程度的预分配，在集港期内以预分配方案为导向，设计了箱位分配算法，根据出口箱的到港顺序进行实时动态调整堆存作业，进一步降低了出口箱翻箱率。

#### （2）出口箱堆存优化方法的创新

为了进一步提高出口箱堆存的效率，采用静态优化方法和动态优化方法相结合的方法。首先采用静态优化方法得到静态最佳计划，然后以静态最佳计划为基础，采用动态优化方法对出口箱堆存进行实时堆存作业，达到较好的优化效果。

### 5.3 本文研究方向的展望

本文通过对集装箱码头堆场出口箱空间资源分配的理论分析和实证研究，得到了些许成果。但是，集装箱码头作业系统是一个系统而复杂的综合系统，涉及面较广，堆场内的出口箱堆存作业系统只是其中的一部分，各作业环节相互影响，在研究单一的作业环节时会忽略其他作业环节对其产生的影响。因此本文的研究尚存在值得更深入研究的价值。

（1）本文的研究是基于进口箱和出口箱分开堆放的条件之下，然而由于集装箱码头空间资源较为缺乏，进、出口箱混合堆放可以提高空间资源的利用率，研究进出口箱混合堆放下堆场堆存问题将是研究的一个方向。

（2）通常情况下，集装箱堆场中贝内堆存的集装箱具有相同的属性，方便统一管理和作业，然而随着集装箱码头的精细化作业的普及，堆场内的集装箱管理可以精细到堆垛。在进行集装箱堆存研究时，可以考虑在贝内堆放不同船舶的集装箱。

（3）作为堆场内最主要的装卸设备之一，场桥的作业模式与堆场的作业效率有着直接的联系，本文假设场桥只允许在一个箱区内进行来回作业。显然，如若某时段某个箱区内作业任务繁重，而其他箱区内场桥比较空闲，将场桥进行跨箱区调度是有利于提高作业效率的举措。因此，打破场桥作业范围的限制，实现场桥进行全堆场调度是后续的一个研究方向。

## 参考文献

- [1] 国家统计局. 往年进出口总额数据统计公报[EB/OL]. <http://data.stats.gov.cn>,2010-2014.
- [2] 交通运输部. 2016年规模以上码头货物数据统计公报. <http://www.mot.gov.cn>,2016,10,6.
- [3] 罗跃华. 集装箱船舶的大型化发展趋势[J]. 水运管理, 2011, 33(7): 37-39.
- [4] 高琴. 码头发展与区域经济关系研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [5] Talebibrahimi M. MODELING AND ANALYSIS OF CONTAINER STORAGE IN PORTS[J]. Journal of Clinical Microbiology, 1989, 47(12):4144-4145.
- [6] Holguinveras J. PRIORITY SYSTEMS FOR MARINE INTERMODAL CONTAINERS[J]. Ports, 1996.
- [7] Gambardella, L. M., Rizzoli, A. E., Zaffalon, M. . Simulation and Planning of an Intermodal Container Terminal, International Conference on Harbour and Maritime Simulation. 1998, 35(3, 4): 427-430.
- [8] Kim K H, Bae J W. Re-marshaling export containers in port container terminals[J]. Computers & Industrial Engineering, 1998, 35(3, 4):655-658.
- [9] Kim, K H, Kim, H B. The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers, Transportation Research Part B, 2002, 36:821-835.
- [10] Lim, A., Xu, Z. A. critical-shaking neighborhood search for the yard allocation problem, European Journal of Operational Research. 2006: 61-99.
- [11] Kim, K. H., Park, Y.M. A crane scheduling method for port container terminals, European Journal of Operational Research, 2004,156:752-768.
- [12] Woo, Y.J., Kim, K.H. Estimating the space requirement for outbound container inventories in port container terminals, International Journal of Production Economics, 2011, 133:293-301.
- [13] Kim K H, Kim H B. The optimal determination of the space requirement and the number of transfer cranes for import containers[J]. Computers and industrial engineering,1998, 35(3, 4): 427-430.
- [14] Kim K H, Hong B K. Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals[J]. International Journal of Production Economics, 1999, 59(59):415-423.
- [15] KIM K H, PARK Y M, RYU K R. Deriving decision rules to locate export containers in container yards[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 124(1): 89-101.
- [16] Zhang C. Resources planning in container storage yard[D]. Department of Industrial Engineering and Engineering Management, Hong Kong University of Science and Technology, 2000: 61-99.
- [17] Preston P, Kozan E. An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals[J]. Computers & Operations Research, 2001, 28(10) : 983-995.
- [18] 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.
- [19] Kim K H , Park K T. A note on a dynamic space allocation method for outbound containers[J]. European Journal Operational Research, 2003,148(1): 92-101.
- [20] ZHANG Chuqian, LIU Jiying, WAN Yat-Wah, et al. Storage space allocation in container

- terminals[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37(10): 883-903.
- [21] Kim K H, Lee K M, Hwang H. Sequencing delivery and receiving operations for yard cranes in port container terminals[J]. International Journal of Production Economics, 2003, 84: 283-292.
- [22] Lee L H, Chew E P, Tan K C, et al. An optimization model for storage yard management in transshipment hubs[J]. Or Spectrum, 2006, 28(4):539-561.
- [23] Lim A, Xu Z. A critical-shaking neighborhood search for the yard allocation problem[J]. European Journal of Operational Research. 2006, 174(2): 1247-1259.
- [24] Dekker R, Voogd P, Asperen E. Advanced methods for container stacking[J]. OR Spectrum, 2006, 28(4): 563-586.
- [25] Kang J, Ryu K R, Kim K H. Deriving stacking strategies for export containers with uncertain weight information[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2006, 17(4): 399-410.
- [26] Kozan E, Preston P. Mathematical modeling of container transfers and storage locations at seaport terminals[J]. OR Spectrum.2006, 28(4): 519-537.
- [27] W.C.Ng, K. L, Mark. Scheduling trucks in container terminals using a genetic algorithm[J]. Engineering Optimization, 2007, 9(1): 33-37.
- [28] 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: 147-153+170.
- [29] Rommert Dekker, Patrick Voogd. Container Terminals and Cargo Systems[M]. Berlin Germany, Springer Berlin Heidelberg, 2007:131-154.
- [30] 陈庆伟, 王继荣. 集装箱堆场出口箱堆存模型及其算法[J]. 物流科技. 2007, 7: 106-108.
- [31] Lee Y, HSU N Y. An optimization model for the container pre-marshalling problem[J]. Computer & Operations Research, 2007, 34: 3295-3313.
- [32] 沈剑峰, 金淳, 高鹏. 基于知识的集装箱堆场箱位分配计划研究[J]. 计算机应用研究. 2007, 24 (9) : 146-148, 151.
- [33] 王孟昌. 集装箱码头堆场箱位动态分配优化策略研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007. [导师: 周强]
- [34] 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.
- [35] Yongbin Han, Loo Hay Lee, Ek Peng Chew, Kok Choon Tan. A yard storage strategy for minimizing traffic congestion in a marine container transshipment hub[J]. Or Spectrum. 2008, 30: 697-720.
- [36] 康海贵, 刘 艳, 周鹏飞. 基于混堆的集装箱堆场动态箱位分配研究[J]. 水运工程. 2009 (8) : 73-77.
- [37] 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.
- [38] Bazzazi M, Safaei N, Javadian N. A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(1): 44-52.
- [39] 刘 艳, 周鹏飞, 康海贵. 集装箱堆场箱位分配模糊优化研究[J]. 水运工程. 2009(11):

- 1-5.
- [40]方波. 不确定条件下的集装箱码头出口箱箱位分配优选研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [41]方波, 周鹏飞. 集装箱堆场箱位启发式分配算法研究[J]. 中国水运(下半月刊). 2010(08).
- [42]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.
- [43]彭少海. 集装箱码头出口箱堆存问题研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010. [导师: 肖青]
- [44]范灵芳, 陈璐. 集装箱码头出口箱堆位分配算法[J]. 系统工程. 2011, 29(10): 80-85.
- [45]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, 26(10).
- [46]Zhang C, Zhang Z, Zheng L, et al. A decision support system for the allocation of yard cranes and blocks in container terminals[J]. Asia-Pacific Journal of Operational Research. 2011, 28(6): 803-829.
- [47]候春霞. 集装箱码头出口箱堆场空间分配研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011. [导师: 肖青]
- [48]江南, 余宏志, 谭周提. 拥堵集装箱堆场箱位分配优化模型与算法[J]. 铁道学报. 2011, 33 (11) : 8-15.
- [49]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.
- [50]周健. 集装箱堆场空间资源分配模型研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012. [导师: 康凯]
- [51]Zhu W, Qin H, Lim A, et al. Iterative deepening A algorithms for the container relocation problem[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2012, 9(4): 710-722.
- [52]倪全慧, 梁承姬. 基于作业量平衡的集装箱堆场堆存策略研究[J]. 武汉理工大学学报. 2012, 34 (3) : 75-79.
- [53]欧仙群. 集装箱码头翻箱问题研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [54]陶莎, 胡志华. 集装箱堆场出口箱箱位分配的多策略集成优化[J]. 大连海事大学学报. 2012, 38 (03) : 59-63.
- [55]Chen L, Lu Z. The storage location assignment problem for outbound containers in a maritime terminal[J]. International Journal of Production Economics, 2012, 135(1): 73-80.
- [56]Forster, F., Bortfeldt, A. A tree search procedure for the container relocation problem, Computers & Operations Research. 2012. 39:147-171.
- [57]Molins, M.R., Salido, M.A., Barber, F. 2012. Intelligent planning for allocating containers in maritime terminals, Expert Systems with Applications, 39, pp 978-989.
- [58]余宏志. 箱位复用型集装箱堆场箱位分配研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012. [导师: 江南]
- [59]黎明, 翟金刚. 基于粒子群算法的出口集装箱堆场箱位分配研究[J]. 水运工程. 2012, 11: 42-45.



- [60]袁学青, 台玉红, 朱鹏宇. 基于矩阵式遗传算法的进出口集装箱堆场箱位分配策略[J]. 数学理论与应用. 2013, 33 (04): 54-64.
- [61]杨超. 进出口集装箱作业时间窗分配和堆区堆位分配研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013. [导师: 陆志强]
- [62]贾皓翔. 集装箱码头堆场出口箱箱位分配优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013. [导师: 黄肖玲]
- [63]Omor Sharif, Nathan Huynh. Storage space allocation at marine container terminals using ant-based control[J]. Expert Systems with Applications. 2013, 40: 2323-2330.
- [64]钟明. 集装箱码头出口集装箱堆场位置分配算法研究[D]. 北京: 清华大学, 2013. [导师: 廖立新]
- [65]刘曙光. 集装箱堆场(预)翻箱问题建模与优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013. [导师: 张煜]
- [66]乐美龙, 于航. 考虑箱区利用率的出口箱资源配置启发式算法[J]. 计算机工程与应用. 2013, 49 (8): 231-235.
- [67]Ming-Kun Li. Yard storage planning for minimizing handling time of export containers[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal. 2014. DOI10. 1007/s10696-014-9193-z.
- [68]HU Wen-bin, WANG Huan, MIN Zhen-yu. A storage allocation algorithm for outbound containers based on the outer - inner cellular automation[J]. Information Sciences, 2014, 281:147-171.
- [69]陈超, 台伟力, 杨逸蓝, 曾庆成. 出口箱随机入港下的箱区选择与箱位分配协调调度[J]. 上海交通大学学报. 2014(04).
- [70]郝振勇, 韩晓龙. 基于随机交箱的堆场出口箱箱位分配研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版). 2014, 38 (01): 157-161.
- [71]赵成. 集装箱码头进口箱堆存优化问题研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014. [导师: 计明军]
- [72]张灿荣, 钟明, 廖立新. 集装箱场地箱位分配问题[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55 (10): 1150-1156.
- [73]台伟力. 出口箱随机入港下的码头箱区选择与箱位分配协调调度[D]. 大连: 大连海事大学, 2015. [导师: 陈超]
- [74]刘禅娟, 胡志华. 集装箱堆场出口箱箱位分配多目标优化模型[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55 (6): 589-596.
- [75]武慧荣, 朱晓宁. “船舶—堆场—列车”混堆堆场箱位分配模型[J]. 交通运输系统工程与信息. 2015, 15 (4): 198-203.
- [76]盛扬, 梁承姬, 丁一. 基于遗传算法的集装箱码头堆场空间动态分配策略[J]. 计算机工程与设计. 2015, 36 (11): 3145-3150.
- [77]刘禅娟, 胡志华. 基于滚动计划的堆场出口箱存储位置分配两阶段模型[J]. 上海大学学报. 2016, 22(X): 1-12.

## 附录 A Matlab 编码

(1) 第 3 章算法 matlab 程序如下:

```
function rr=beiduicun3lc(trait,bey,lixiangbey)
[lie,ceng]=size(bey)
emdoc=[]      %每个堆垛的下一个空箱位位置
for i=1:lie
    me=length(find(bey(i,:)~=0))
    emdoc=[emdoc,i,me+1]
end
eueu=[]      %记录各可行堆位的理想堆放箱子的重量等级
for i=1:lie
    if emdoc(i,2)==ceng+1
        eueu=[eueu,0]  %0 表示这个垛已经堆满
        continue
    end
    ee=lixiangbey(emdoc(i,1),emdoc(i,2))
    eueu=[eueu,ee]
end
[lk,kl]=find(eueu==trait)      %判断是否有箱位等级=重量等级的可堆放箱位
if isempty(lk)==0              %有箱位等级=重量等级的可堆放箱位
    rrg=[rgrg,kl]
    for i=1:length(lk)
        dede=find(lixiangbey(kl(i),emdoc(kl(i),2):end)>trait)
        rrg=[rrg,length(dede)]  %记录其中每个堆垛中属性比箱子属性大的未堆存
箱位的个数
    end
    [de1,de2]=max(rrg)
    rr=kl(de2)
else                             %没有箱位等级=重量等级的可堆放箱位
    trait_=trait+1
    while ismember(trait_,lixiangbey)==0&&trait_~=9&&trait_<10  %且在理想贝中存在
        trait_=trait_+1
    end
end
```

```

[lk,kl]=find(eueu==trait_)
if isempty(lk)==0
    rgrg=[]
    for i=1:length(lk)
        dede=find(lixiangbey(kl(i),1:emdoc(kl(i),2)-1)>trait)
        rgrg=[rgrg,length(dede)]
    end
    [de1,de2]=min(rgrg)
    rr=kl(de2)
else
    wdwd=find(eueu<trait&eueu>0)
    dwdw=find(eueu>trait)
    if isempty(wdwd)==0           %存在箱位等级小于优先等级的可堆存箱位
        rgrg=[]
        for i=1:length(wdwd)
            dede=find(lixiangbey(wdwd(i),emdoc(wdwd(i),2):end)<trait)
            rgrg=[rgrg,length(dede)]
        end
        [de1,de2]=min(rgrg)
        wdwdwd=find(rgrg==de1)
        if length(wdwdwd)==1
            rr=wdwd(de2)
        else
            disdis=abab(trait,bey,wdwd(wdwdwd))
            rr=wdwd(wdwdwd(disdis))
        end
    else
        rgrg=[]           %记录各堆垛的层数
        for i=1:length(dwdw)
            rgrg=[rgrg,emdoc(dwdw(i),2)]
        end
        [de1,de2]=min(rgrg)
        dwdwdw=find(rgrg==de1)
        if length(dwdwdw)==1

```

```

        rr=dwdw(de2)
        else
            disdis=ababab(trait,bey,dwdw(dwdwdw))
            rr=dwdw(dwdwdw(disdis))
        end
    end
end
end
rr=rr

```

(2) 第4章与第5章算法 matlab 程序

```

function fff=trtr(nump,numw)
numqu=3      %箱区数量
numbey=8     %每个箱区的贝位数量
beybox=24    %每个贝位的箱位数量
fr=ones(1,numqu*numbey)
fr=[0,fr,0]
for i=1:nump-1
    numb=rand
    while numb==0
        numb=rand
    end
    frfr=ceil(numb*numqu*numbey)+1
    fr=[fr(1:frfr),0,fr(frfr+1:end)]
end
fi0=find(fr==0)
numpbey=[]   %记录每个目的港的出口箱所占贝位数量
for i=1:nump
    numpbey=[numpbey,fi0(i+1)-fi0(i)-1]
end
numpbox=numpbey*beybox
numeach=[]   %记录每一类出口箱的数量，结构是 numw*nump
for i=1:nump
    tg=ones(1,numpbox(i))
    tg=[0,tg,0]

```

```

for j=1:numw-1
    numb=rand
    while numb==0
        numb=rand
    end
    tgtg=ceil(numb*numpbox(i))+1
    tg=[tg(1:tgtg),0,tg(tgtg+1:end)]
end
fi0=find(tg==0)
numeach1=[]
for k=1:numw
    numeach1=[numeach1;fi0(k+1)-fi0(k)-1]
end
numeach=[numeach,numeach1]
end
numqup=zeros(numqu,nump)
k=1 %从第一个箱区开始进行计划
for i=1:nump
    for j=1:numpbey(i) %此时要分配的目的港的出口箱的贝位数，一直减到 0
        while sum(numqup(k,:))==numpbey
            if k<numqu
                k=k+1
            else
                k=1
            end
        end
        numqup(k,i)=numqup(k,i)+1
        if k==numqu
            k=1
        else
            k=k+1
        end
    end
end
end

```

```

numeachzh=floor(numeach/beybox) %每一类出口箱能组成整贝位数量
numeachsan=numeach-beybox*numeachzh
numbeysan=sum(numeachsan)/beybox
beytaip=zeros(numqu,numbey)
beytaiw=zeros(numqu,numbey)
beytainum=zeros(numqu,numbey)
for i=1:nump
    eval(['y',num2str(i),'=','[]'])
end
changqiao1=[1]
changqiao2=[1]
changqiao3=[1]
for i=1:numqu*numbey*beybox
    [mm,nn]=find(numeach~=0)
    lenmm=length(mm)
    numb=rand
    while numb==0
        numb=rand
    end
    doc=ceil(lenmm*numb)
    numeach(mm(doc),nn(doc))=numeach(mm(doc),nn(doc))-1
    madoc=[] %记录满足条件的贝位编号，第一列是箱区号，第二列是贝位
号
    manum=0 %记录该目的港该重量等级的出口箱已经堆存了多少贝位
    for j=1:numqu
        for k=1:numbey
            if beytaip(j,k)==nn(doc)&&beytaiw(j,k)==mm(doc)
                manum=manum+1
                if beytainum(j,k)<beybox
                    madoc=[madoc;j,k]
                end
            end
        end
    end
end
end
end

```

```

if isempty(madoc)==0
    [cc,vv]=size(madoc)
    numb=rand
    ee=ceil(numb*length(cc))
    beytainum(madoc(ee,1),madoc(ee,2))=beytainum(madoc(ee,1),madoc(ee,2))+1
    if madoc(ee,1)==1
        changqiao1=[changqiao1,madoc(ee,2)]
    elseif madoc(ee,1)==2
        changqiao2=[changqiao2,madoc(ee,2)]
    elseif madoc(ee,1)==3
        changqiao3=[changqiao3,madoc(ee,2)]
    end
elseif isempty(madoc)==1 && manum<numeachzh(mm(doc),nn(doc))
    cc=[]
    ccc=0
    for j=1:numqu
        qa=find(beytaip(j,:)==nn(doc))
        aq=find(beytaip(j,:)==0)
        aqq=isempty(aq)
        if length(qa)<numqup(j,nn(doc))&&aqq==0
            cc=[cc;j,aq(1)]
            ccc=ccc+1
        end
    end
    numb=rand
    qq=ceil(numb*ccc)
    beytaip(cc(qq,1),cc(qq,2))=nn(doc)           %更新
    beytaiw(cc(qq,1),cc(qq,2))=mm(doc)           %更新
    beytainum(cc(qq,1),cc(qq,2))=1               %更新
    if cc(qq,1)==1
        changqiao1=[changqiao1,cc(qq,2)]
    elseif cc(qq,1)==2
        changqiao2=[changqiao2,cc(qq,2)]
    elseif cc(qq,1)==3

```

```

        changqiao3=[changqiao3,cc(qq,2)]
    end
else
    madoc=[]
    manum=0
    for j=1:numqu
        for k=1:numbey
            if beytaip(j,k)==nn(doc)&&beytaiw(j,k)=-nn(doc)
                manum=manum+1
                if beytainum(j,k)<beybox
                    madoc=[madoc;j,k]
                end
            end
        end
    end
    end
    if isempty(madoc)==0
        [cc,vv]=size(madoc)
        numb=rand
        ee=ceil(numb*length(cc))
        beytainum(madoc(ee,1),madoc(ee,2))=beytainum(madoc(ee,1),madoc(ee,2))+1
        if madoc(ee,1)==1
            changqiao1=[changqiao1,madoc(ee,2)]
        elseif madoc(ee,1)==2
            changqiao2=[changqiao2,madoc(ee,2)]
        elseif madoc(ee,1)==3
            changqiao3=[changqiao3,madoc(ee,2)]
        end
    elseif isempty(madoc)==1&&manum<numbeysan(nn(doc))
        cc=[]
        ccc=0
        for j=1:numqu
            qa=find(beytaip(j,:)==nn(doc))
            aq=find(beytaip(j,:)==0)
            aqq=isempty(aq)

```



```

        if length(qa)<numqup(j,nn(doc))&&aqq==0
            cc=[cc;j,aq(1)]
            ccc=ccc+1
        end
    end
    numb=rand
    qq=ceil(numb*ccc)
    beytaip(cc(qq,1),cc(qq,2))=nn(doc)%更新
    beytaiw(cc(qq,1),cc(qq,2))=-nn(doc)
    beytainum(cc(qq,1),cc(qq,2))=1
    if cc(qq,1)==1
        changqiao1=[changqiao1,cc(qq,2)]
    elseif cc(qq,1)==2
        changqiao2=[changqiao2,cc(qq,2)]
    elseif cc(qq,1)==3
        changqiao3=[changqiao3,cc(qq,2)]
    end
end
if nn(doc)==1
    y1=[y1,mm(doc)]
elseif nn(doc)==2
    y2=[y2,mm(doc)]
elseif nn(doc)==3
    y3=[y3,mm(doc)]
elseif nn(doc)==4
    y4=[y4,mm(doc)]
elseif nn(doc)==5
    y5=[y5,mm(doc)]
elseif nn(doc)==6
    y6=[y6,mm(doc)]
end
end
end
turnall=0

```

```

for i=1:length(y1)/beybox
    tt=turn3lc(y1(beybox*i-beybox+1:beybox*i),6,4)
    turnall=turnall+tt
end
for i=1:length(y2)/beybox
    tt=turn3lc(y2(beybox*i-beybox+1:beybox*i),6,4)
    turnall=turnall+tt
end
for i=1:length(y3)/beybox
    tt=turn3lc(y3(beybox*i-beybox+1:beybox*i),6,4)
    turnall=turnall+tt
end
lucheng1=0
for i=1:length(changqiao1)-1
    lucheng1=lucheng1+abs(changqiao1(i+1)-changqiao1(i))
end
lucheng2=0
for i=1:length(changqiao2)-1
    lucheng2=lucheng2+abs(changqiao2(i+1)-changqiao2(i))
end
lucheng3=0
for i=1:length(changqiao3)-1
    lucheng3=lucheng3+abs(changqiao3(i+1)-changqiao3(i))
end

```

附录 B 实证案例原始数据

第 3 章 100 组对比实验中出口箱重量等级原始数据和翻箱数计算结果如表所示。

	随机入港的出口箱																								翻箱数	
组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	本文	对比
01	8	9	2	9	6	1	3	5	9	9	2	9	9	5	8	2	4	9	8	9	6	1	8	9	2	1
02	7	7	7	4	6	2	7	1	3	1	1	8	7	3	9	1	4	4	7	8	2	5	5	6	5	1
03	7	7	3	7	6	2	2	5	9	4	6	3	7	3	5	7	9	9	5	2	2	3	8	3	2	5
04	8	3	9	4	2	3	6	5	4	8	6	5	9	3	7	7	4	6	1	1	5	8	9	2	5	4
05	6	5	1	4	2	8	3	5	2	6	3	6	7	7	5	1	3	9	2	8	5	9	1	4	4	4
06	1	9	1	7	8	8	1	4	3	8	4	9	2	3	2	2	8	6	5	2	8	6	4	5	4	7
07	4	1	3	2	2	3	4	1	9	9	5	5	4	9	4	2	8	4	3	4	1	2	9	9	0	5
08	6	1	3	4	8	1	1	2	6	7	6	5	5	3	7	2	7	2	4	6	8	1	9	7	4	4
09	5	4	5	3	5	5	8	8	6	4	8	5	4	9	8	5	6	6	2	3	5	3	8	2	3	4
10	3	2	3	4	3	9	4	2	9	9	4	2	3	4	6	3	6	7	2	2	3	3	4	5	4	3
11	1	3	8	1	9	7	5	6	3	5	9	5	5	3	5	6	7	4	4	9	1	8	9	8	2	2
12	1	3	4	7	2	7	1	6	5	8	7	9	9	4	7	2	1	7	5	5	9	6	6	8	2	2
13	8	6	2	3	8	1	5	2	9	7	5	5	1	7	1	1	5	1	8	8	7	2	6	5	2	3
14	9	6	8	5	4	8	1	2	2	4	8	8	1	4	5	4	6	6	3	4	1	9	2	1	4	7
15	4	2	5	4	9	9	1	7	3	4	5	9	4	9	3	7	6	5	7	6	2	2	9	2	1	4
16	1	6	8	7	2	4	5	9	2	8	6	4	2	4	5	2	6	3	4	6	3	3	6	3	4	5
17	8	9	7	4	6	1	9	8	8	3	6	1	4	3	2	2	4	1	6	5	7	7	6	1	7	3

1 8	1	3	5	6	4	8	7	9	5	3	1	6	8	4	1	3	2	3	4	5	5	8	5	9	2	6
1 9	6	9	3	7	3	7	7	1	3	3	7	8	4	8	7	1	6	4	9	1	5	4	5	7	3	5
2 0	3	8	5	1	2	7	5	2	4	6	2	7	3	9	3	7	2	3	1	6	7	5	4	6	5	6
2 1	6	7	6	9	2	7	3	2	6	5	5	6	7	4	6	4	8	8	3	6	6	5	8	3	1	6
2 2	3	2	9	6	5	6	5	6	5	7	5	9	2	1	1	1	4	5	4	7	6	7	9	9	4	4
2 3	2	2	7	1	5	5	8	5	4	7	7	5	4	2	6	3	1	7	3	4	7	4	7	4	3	5
2 4	7	7	4	1	3	4	3	2	8	4	8	4	7	4	8	7	4	2	8	9	3	7	4	8	0	5
2 5	7	2	8	9	5	8	6	2	2	4	7	8	8	3	5	1	2	2	7	5	2	5	2	1	5	5
2 6	8	6	9	7	6	8	8	9	1	8	6	9	5	5	8	3	5	9	6	8	7	6	3	6	4	6
2 7	1	6	6	7	9	9	7	6	9	6	1	2	8	5	8	2	5	6	1	6	4	1	5	2	3	6
2 8	2	2	2	2	1	6	3	5	7	5	5	5	2	5	8	8	3	2	6	6	4	2	9	1	1	4
2 9	1	2	2	6	6	1	9	7	7	1	8	9	9	8	8	5	2	4	2	1	9	3	3	3	4	6
3 0	5	6	1	8	6	8	4	5	1	2	6	3	9	2	9	5	7	9	3	4	5	7	8	1	2	1
3 1	2	4	1	5	4	2	2	9	7	5	9	1	7	7	6	2	6	3	2	2	9	1	3	1	2	9
3 2	4	1	9	2	1	3	5	1	9	3	3	1	3	1	5	7	6	1	1	7	9	5	1	8	3	1 0
3 3	4	3	7	1	1	7	6	5	7	7	8	3	7	6	4	1	8	4	6	7	1	2	5	5	2	3
3 4	9	8	7	1	1	1	8	9	7	2	7	1	2	6	3	6	7	6	7	3	7	9	8	1	3	7
3 5	4	4	7	6	8	4	2	1	7	2	4	5	3	6	5	2	8	1	3	3	5	1	4	1	3	4
3 6	2	8	3	6	9	4	7	7	4	6	1	9	2	3	8	5	7	4	3	1	7	4	5	6	6	2
3 7	1	3	7	7	2	2	1	1	4	6	7	5	1	6	2	2	1	2	2	2	3	3	2	3	1	8
3 8	9	7	6	2	2	1	9	7	6	3	2	6	9	2	3	4	1	7	4	9	4	6	2	4	6	6
3 9	2	7	8	4	7	3	5	8	6	4	3	5	4	4	6	7	4	4	2	1	3	3	6	9	2	6

40	9	5	3	7	7	7	7	1	7	5	2	1	8	2	2	6	9	5	7	2	9	5	7	1	4	5
41	8	7	2	5	3	5	4	4	2	3	1	9	6	9	2	9	8	6	4	3	7	3	1	7	3	7
42	7	7	6	4	4	8	3	8	8	8	5	6	9	4	1	8	6	4	9	3	6	6	4	2	3	1
43	1	4	2	7	4	8	7	6	2	9	3	9	3	4	1	6	2	1	7	4	6	4	6	1	2	7
44	9	8	7	8	4	6	6	5	3	3	5	3	8	9	1	5	1	8	9	1	9	1	7	8	2	5
45	5	8	9	6	2	2	2	1	1	6	9	4	4	9	9	7	9	7	4	6	3	3	7	5	1	2
46	4	6	7	6	5	6	5	1	7	9	4	9	4	8	5	4	2	2	3	7	8	7	1	8	5	3
47	9	7	1	4	7	7	3	3	7	5	6	3	2	8	7	9	1	2	1	5	2	9	1	1	3	8
48	6	7	3	2	4	2	5	9	6	1	4	1	5	4	9	8	5	9	2	4	9	9	7	6	1	3
49	4	9	2	7	6	8	4	7	8	3	5	9	5	3	6	4	7	4	5	7	9	3	8	7	1	7
50	9	1	4	6	3	3	7	6	6	6	1	4	5	3	7	8	3	7	2	8	2	6	4	8	5	5
51	5	5	8	4	5	9	1	9	2	7	6	7	4	6	8	1	1	9	6	3	4	2	3	3	2	6
52	3	2	4	2	8	1	9	4	1	4	7	8	5	7	9	1	3	1	2	7	7	8	6	1	4	9
53	9	8	3	5	9	7	8	4	5	6	3	7	5	6	3	2	5	4	8	8	7	2	1	6	5	5
54	3	9	9	3	8	9	6	8	9	5	7	6	1	5	6	5	4	9	8	8	4	6	8	9	1	4
55	7	2	6	1	4	7	9	8	5	7	4	9	9	8	4	5	3	8	8	9	6	6	2	9	3	7
56	5	2	9	7	8	3	7	6	2	4	3	7	3	9	8	4	5	7	8	6	6	3	5	7	3	4
57	8	7	1	7	4	4	2	8	3	3	4	4	5	6	4	4	5	6	9	7	4	8	2	1	6	6
58	1	2	3	3	1	5	1	2	6	8	9	6	9	5	5	3	4	5	1	8	1	4	8	4	3	7
59	6	8	8	9	2	3	9	6	5	6	8	5	2	5	4	9	6	7	7	4	5	6	2	6	2	5
60	7	4	8	7	4	5	4	7	7	4	7	9	8	7	1	4	6	5	1	3	8	1	8	1	5	7
61	7	5	2	6	2	7	6	1	1	2	1	4	8	6	5	8	1	9	1	5	2	6	1	7	0	5

6 2	8	9	9	5	3	1	5	6	7	1	6	5	2	9	6	4	9	6	5	8	5	5	7	4	2	2
6 3	3	6	8	4	2	4	3	4	8	4	4	4	2	3	1	4	3	3	4	2	5	7	3	8	2	4
6 4	1	4	1	2	1	2	2	3	2	2	6	9	9	2	5	4	5	3	1	4	2	1	9	4	1	6
6 5	9	7	1	7	7	6	5	2	7	3	4	9	8	4	3	6	9	9	6	3	8	4	9	1	4	5
6 6	5	7	2	4	2	3	4	5	1	5	3	3	3	2	9	9	8	7	2	4	2	1	3	7	4	5
6 7	6	5	4	3	5	7	7	6	7	6	2	5	4	1	2	2	7	4	7	3	1	5	3	9	1	3
6 8	9	4	1	7	8	9	1	5	6	7	7	6	7	4	6	2	1	9	3	6	9	2	2	4	2	7
6 9	9	4	3	2	4	4	2	4	1	6	1	6	8	3	5	6	1	5	6	2	8	9	8	5	3	8
7 0	3	7	3	9	6	6	2	1	3	8	9	7	7	3	6	8	4	9	1	3	5	1	7	6	3	7
7 1	5	8	8	8	3	5	7	1	1	3	5	9	7	3	3	8	9	6	3	1	8	6	9	1	3	7
7 2	6	3	8	2	4	4	8	7	2	3	2	7	6	2	2	5	9	5	1	1	8	5	4	8	4	5
7 3	4	5	7	8	3	6	9	1	6	4	3	3	7	9	2	8	2	9	8	4	7	5	8	4	1	0
7 4	1	6	9	2	4	7	1	9	7	6	2	5	5	9	8	9	7	4	9	5	3	4	7	6	1	5
7 5	7	9	9	5	9	2	1	3	6	5	9	5	4	5	7	1	8	2	5	3	4	6	2	3	2	3
7 6	2	2	3	8	5	4	2	9	4	8	6	4	8	8	5	8	9	4	4	6	9	7	4	7	1	3
7 7	9	5	5	3	1	2	1	5	1	9	6	1	1	2	5	2	1	7	4	8	4	4	1	1	4	9
7 8	1	6	3	8	8	9	5	2	3	5	7	4	5	6	9	2	7	6	4	8	4	2	6	6	0	4
7 9	3	8	9	9	2	3	1	6	1	4	8	5	4	2	4	9	2	5	8	1	7	9	3	2	1	5
8 0	7	9	6	9	2	7	4	4	2	8	6	7	8	1	9	5	7	7	8	2	5	6	9	8	3	4
8 1	9	6	6	8	1	8	4	1	7	2	2	6	3	3	4	4	4	6	2	2	1	3	7	3	5	7
8 2	7	7	8	8	3	3	5	3	8	8	6	3	7	3	5	4	5	9	7	9	3	5	1	7	2	2
8 3	6	8	9	9	4	1	5	2	2	3	1	7	7	5	4	8	5	9	9	4	5	4	6	8	4	0

8 4	7	2	8	1	4	7	8	4	7	9	3	2	3	4	3	9	1	6	2	8	2	5	9	4	3	6
8 5	1	2	4	4	3	9	7	9	4	9	1	6	8	3	9	7	8	6	8	3	3	3	6	8	1	5
8 6	3	4	8	6	9	2	8	7	3	5	4	6	8	1	8	8	4	4	6	7	7	7	4	4	4	4
8 7	9	6	8	3	6	6	9	1	5	5	1	9	8	4	8	2	6	3	5	8	2	3	5	4	6	3
8 8	8	9	2	3	7	4	9	9	6	8	4	6	9	6	9	7	5	6	8	2	4	9	4	6	1	4
8 9	9	9	6	1	1	6	6	9	7	6	5	3	9	5	1	7	5	1	9	3	3	2	3	3	4	4
9 0	6	1	3	3	8	4	7	6	8	2	9	8	1	5	3	6	3	6	6	6	5	1	5	4	5	4
9 1	1	5	5	5	8	7	8	1	2	5	9	8	5	4	1	7	5	2	4	2	7	4	9	1	3	3
9 2	8	6	5	6	7	1	8	1	3	2	9	1	6	6	6	8	1	8	5	7	2	5	7	9	3	5
9 3	5	1	1	6	8	7	4	9	5	9	1	2	7	9	8	3	2	8	8	3	3	3	8	8	1	5
9 4	6	6	3	7	8	4	5	5	3	7	9	9	7	3	7	2	2	2	2	6	1	8	7	9	4	4
9 5	5	6	9	5	3	9	1	3	9	4	3	2	9	2	3	9	5	6	6	7	1	5	1	8	3	2
9 6	4	8	3	6	9	1	1	1	7	6	2	8	6	1	1	2	8	1	3	3	1	8	7	7	5	7
9 7	6	5	3	6	2	2	1	9	9	2	5	6	3	7	6	4	3	7	9	7	4	9	3	5	6	4
9 8	9	3	3	9	1	3	6	2	6	8	5	6	8	3	6	2	5	8	9	5	3	6	9	5	0	4
9 9	9	2	2	3	4	4	3	7	1	4	3	3	1	6	3	2	1	3	5	8	1	9	2	8	2	1 0
1 0 0	8	9	2	5	4	2	6	6	2	5	9	5	7	4	1	3	8	4	1	5	4	7	5	8	4	4

## 在 学 研 究 成 果

### 一、在学期间取得的科研成果

- [1] 参加导师的交通大数据采集研究工作；
- [2] 参与数届本科生毕业论文指导工作。

### 二、在学期间所获的奖励

- [1] 2015 年研究生学业奖学金三等奖；
- [2] 2015-2016 学年研究生学业奖学金二等奖；
- [3] 2016-2017 学年研究生学业奖学金三等奖。

### 三、在学期间发表的论文

- [1]薛浩勇, 姜桂艳, 赵洪冉,等. 码头堆场出港箱箱位分配两阶段优化模型与算法[J]. 中国物流与采购, 2018, 5:76-77.



## 致 谢

这次的毕业论文撰写是在导师姜桂艳教授亲切关怀和悉心指导下完成的。从毕业设计选题到设计完成，姜教授给予了我耐心指导与细心关怀，有了姜教授耐心指导与细心关怀我才不会在设计的过程中迷失方向，失去前进动力。姜教授有严肃的科学态度，严谨的治学精神和精益求精的工作作风，这些都是我所需要学习的，感谢姜教授给予了我这样一个学习机会。此外，姜教授经常给予生活上的帮助，教授生活上的经验，叮嘱要养成良好的生活习惯，使我终身受益。

感谢与我并肩作战的舍友与同学们，感谢关心我支持我的朋友们，感谢学校领导、老师们，感谢你们给予我的帮助与关怀。

最后，对在百忙之中评审论文的各位专家、学者表示衷心的感谢。

薛浩勇

2018年6月25日