

分类号 \_\_\_\_\_

密 级 \_\_\_\_\_

U D C \_\_\_\_\_

单位代码 \_\_\_\_\_ 10151 \_\_\_\_\_

## 集装箱堆场堆存策略的比较研究

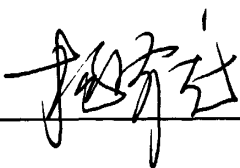
指导教师 \_\_\_\_\_ 靳志宏 \_\_\_\_\_ 职称 \_\_\_\_\_ 教授 \_\_\_\_\_

学位授予单位 \_\_\_\_\_ 大连海事大学 \_\_\_\_\_

申请学位级别 \_\_\_\_\_ 硕士 \_\_\_\_\_ 学科与专业 \_\_\_\_\_ 物流工程与管理 \_\_\_\_\_

论文完成日期 \_\_\_\_\_ 2011 年 6 月 \_\_\_\_\_ 论文答辩日期 \_\_\_\_\_ 2011 年 6 月 \_\_\_\_\_

答辩委员会主席







**Comparative Studies on Different Stacking Strategies of  
Container Yard**

**A thesis Submitted to**

**Dalian Maritime University**

**In partial fulfillment of the requirements for the degree of**

**Master**

**By Wang Xingdong**

**(Logistics Engineering and Management)**

**Thesis Supervisor: Professor Jin Zhihong**

**July 2011**



# 大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

## 原创性声明

本人郑重声明：本论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，撰写成博士/硕士学位论文“集装箱堆场堆存策略的比较研究”。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表或未公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：王兴林 2011年6月25日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解“大连海事大学研究生学位论文提交、版权使用管理办法”，同意大连海事大学保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连海事大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。

本学位论文属于： 保 密 ☐ 在 \_\_\_\_\_ 年解密后适用本授权书。

不保密 ☐ （请在以上方框内打“√”）

论文作者签名：王兴林 导师签名：

日期：2011年6月25日



## 摘要

随着国际贸易的不断发展,各国之间的集装箱运输事业也在飞速的发展。集装箱码头作为集装箱运输时中转的枢纽,其物流效率就整个集装箱运输过程来说十分重要。集装箱堆场是集装箱码头堆存集装箱的场地,集装箱堆场的堆存策略的选择会影响到整个港口的作业水平和物流效率,因此集装箱码头根据自身的地理位置以及集装箱的吞吐量等因素,选择适合的堆场堆存策略就显得十分重要。

目前,国内外对集装箱堆场堆存策略的研究主要以数学建模为主,并依此提出一种堆存策略。但是集装箱堆场堆存策略作为一种实际中的应用,国内外对集装箱堆场堆存策略进行比较的研究很少。在实际操作过程中,如何选择一种合适的堆存策略是码头管理者需要考虑的重要问题。集装箱码头是一个典型的离散事件动态系统,本文中用离散事件系统理论,介绍了排队系统的基本概念和特征,并结合经典的排队理论提取了集装箱码头中的排队模型,集装箱码头排队系统主要由岸桥排队子系统,场桥排队子系统,集卡排队子系统组成。

本文首先根据集装箱码头堆场的实际情况,选择随机堆存原则,按船舶堆存原则和按列优先堆存原则为比较对象,并且提出了一组对堆存策略进行比较的性能指标。然后在一定的翻箱规则的约束下,对三种不同的堆存策略进行了基于Flexsim的模拟仿真。最后依据模拟仿真的数据结果对三种堆存策略进行了简单的比较研究,同时根据模拟仿真所得到的仿真数据的特点,利用模糊评价理论的知识提出了一种基于仿真数据的比较方法,并且给出了相应的算例。

**关键词:**集装箱堆场;堆场堆存策略;排队论;Flexsim





## ABSTRACT

With the continuous development of international trade, the transportation of containers between different countries is also growing rapidly. Container terminal, as a transit hub of Container transportation, its logistics efficiency is very important. The container yard is the place where containers are stacked. The choice of strategies of container yard will affect the level of the port operations and efficiency of logistics. So it is very important to choose a kind of stacking strategy according to the location, throughput capacity and some other factors of the container yard.

At present, the researches on container yard stacking strategy are mainly based on mathematical modeling. By doing this, they present new kinds of strategies. But as a practical application, there are only a few researches on comparison of container yard stacking strategy, but in practical operation, how to choose an appropriate strategy for the container yard is a very important issue that the terminal managers need to consider. Container Terminal is a typical discrete event system. By using discrete event system theory, the basic concept of the queuing system, combined with classical queuing theory, the container terminal queuing model is analyzed. It has Quay crane subsystem, Container truck subsystem, and Stacking crane subsystem.

According to the practice, three principles include random principle, the principle of the ship and column priority principle are compared in certain restacking conditions based on Flexsim. According to the statistics characteristics of Flexsim and evaluation of stacking strategy, a set of performance indicators is established. Finally, a simple analysis is given based on simulation data. Then related to the characteristics of simulation data and the knowledge of evaluation, a method is proposed to solve the problem of comparison of stacking Strategies.

**Keywords:** Container Yard; Stacking Strategy; Queuing Theory; Flexsim



## 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 国内外研究综述 .....	2
1.3 论文内容及结构 .....	3
1.4 论文研究方法与创新点 .....	3
第 2 章 集装箱码头堆场 .....	4
2.1 集装箱码头的布局 .....	4
2.2 集装箱码头堆场的介绍 .....	6
2.2.1 堆场箱区划分及箱位编码方式 .....	6
2.2.2 集装箱堆场作业设备 .....	8
2.2.3 集装箱堆场作业种类 .....	9
2.2.4 集装箱堆场的重要性 .....	11
2.3 影响堆场作业效率的因素 .....	11
第 3 章 排队论在集装箱码头中的应用 .....	13
3.1 集装箱码头排队系统 .....	13
3.1.1 到达模式 .....	14
3.1.2 服务机构 .....	17
3.1.3 排队规则 .....	18
3.2 集装箱码头的排队模型 .....	18
3.3 集装箱码头排队系统的评价分析 .....	20
第 4 章 Flexsim 在码头堆场建模中的应用 .....	23
4.1 Flexsim 简介 .....	23
4.1.1 Flexsim 实体库和方法集 .....	24
4.1.2 Flexsim 控件 .....	25
4.2 Flexsim 3D 媒体的使用 .....	26
4.3 Flexsim 运动学功能 .....	28
第 5 章 基于仿真的堆场堆存策略的比较研究 .....	29
5.1 堆场堆存策略的分析 .....	29
5.1.1 出口箱区堆存策略的选择 .....	31
5.1.2 翻箱原则的选择 .....	31
5.1.3 比较指标的选择 .....	33
5.2 基于 Flexsim 的仿真模型 .....	33
5.2.1 仿真模型的分析 .....	33
5.2.2 仿真模型的建立 .....	34
5.3 仿真模型数据的统计及分析 .....	43
5.4 基于仿真数据的评价方法 .....	46
第 6 章 总结 .....	49
6.1 论文总结 .....	49
6.2 进一步的研究方向 .....	49
参 考 文 献 .....	51
致    谢 .....	54



## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

随着全球经济一体化进程的不断推进,各国之间的贸易往来越来越频繁。由于海运运输具有运量大,运费相对比较便宜,航道可以通往世界各国各个地区的特点,使得海路运输成为国际贸易得以飞速发展的主要交通方式。集装箱码头是来往于各个国家之间的集装箱船停靠的场所,也是集装箱船进行装卸作业的地点,更是实现海路联运的交通枢纽。因此,集装箱码头在整个海运过程中的作用十分重大。我国自改革开放以来,随着经济的高速发展,已经成为世界上最重要的几大海运运输国之一。与此同时,我国也出现了一批集装箱吞吐量名列世界前几位的集装箱港口。

但是,随着海运贸易量的不断增长,集装箱码头集装箱的吞吐量增加的速度甚至超过了集装箱码头自身的发展速度。有时集装箱码头内的作业过度繁忙,比如在码头的所有的泊位内都有集装箱船在进行装卸作业,这样就使得新到来的船舶不能及时的得到服务,从而降低了整个集装箱码头的作业效率。这时,如果对集装箱码头进行扩建来解决这个问题将需要大量的资金和劳力的输出。如果为了减少资金的投入而不进行扩建,那么就只能通过加强对集装箱码头的管理来解决这个问题。经过实际调查,发现造成码头作业效率低下的主要原因之一就是集装箱堆场的管理不当,而集装箱堆场管理的主要内容就是为集装箱堆场选择一个合适的堆存策略。集装箱堆场作为堆存集装箱的场地,是整个集装箱码头物流系统中十分重要的一环,直接影响着在码头前沿进行的集装箱船装卸船作业,同时也影响着集装箱在集装箱码头外的陆路运输。

目前,国内的集装箱堆场管理和国外先进的集装箱码头管理相比,差距还是比较大的。尽管目前国内外有很多学者对集装箱堆场的堆存策略进行了理论研究,但是很少有人提出一种具体的方法来对集装箱码头管理者如何结合码头自身情况,对集装箱堆场的堆存策略进行选择。本文结合集装箱码头的实际情况和相关理论知识,利用模拟仿真的方法对集装箱堆场堆存策略进行了比较的研究,为码头管理人员就如何选择集装箱堆场堆存策略问题提出了一个新的思路。

## 1.2 国内外研究综述

目前对集装箱堆场堆存策略进行比较的研究比较少。但是近几年随着航运市场的不断发展,堆场堆存策略的重要性已经吸引了越来越多的关注。大体来说,人们主要采用两种方法对堆存策略进行研究。一种是利用集装箱的各种数据进行数学分析,然后进行数学建模求解。但是,对这些模型进行求解需要很大的计算量。第二种方法就是利用模拟仿真工具来对集装箱堆存策略进行比较研究。

从国内的研究情况来看,丁以中<sup>[1]</sup>等阐述了港口集装箱流的概念,对港口集装箱流的研究现状进行分析,并探讨了今后的研究方向;陈思云<sup>[2]</sup>等基于 Petri 网的理论知识,对仓储物流系统进行了模拟仿真研究,清楚的反映了仓储物流系统的特性和整个作业流程;张新艳<sup>[3]</sup>在其博士论文中对港口集装箱物流系统进行了详细的研究,并在文中提出了仿真建模方法,最后使用软件进行了模拟仿真实现;朱耀明<sup>[4]</sup>在其硕士论文中,阐述了自动化仓库的作业流程,然后对仓库中的拣选作业线路进行优化设计,最后利用遗传算法对优化设计进行了模拟验证;周瑞<sup>[5]</sup>在其硕士论文中对集装箱码头泊位与岸桥的配置进行了研究,然后对整个集装箱码头进行了模拟仿真研究;靳志宏<sup>[6]</sup>等以减少船舶在港时间为目标,对集装箱码头泊位与岸桥的协调调度进行了研究,并在文中通过遗传算法求解证明了岸桥与泊位的协调调度优于单独调度;康海贵<sup>[7]</sup>等利用两阶段法,研究了基于混堆的集装箱堆场动态箱位分配的研究。

国外方面, Dekker 等<sup>[8]</sup>模拟了在自动化码头情况下,对几种堆场堆存策略进行了比较研究。值得特别指出的是, Dekker 的模拟实验中的集装箱的种类多达 90 多种,研究结果表明了分类堆放明显优于随机堆放; Duinkerken 等<sup>[9]</sup>利用模拟仿真的方法来对分类堆放策略下的几种翻箱策略的比较研究,其中翻箱策略包括随机策略,水平策略,最近原则,以及 RSC 策略,模拟的结果表明 RSC 策略要优于其他三种策略; Saanen 等<sup>[10-11]</sup>将研究进一步具体化,在堆场使用轮胎式龙门吊的情况下,对集装箱码头进行模拟仿真,分析了不同堆存策略下场桥的工作效率,结果表明这两种策略下的工作效率相差不大,影响场桥的工作效率的主要原因是其移动的次数; Park<sup>[12]</sup>等利用了模拟仿真的方法研究了有大量的集装箱和集卡的

集装箱码头，通过寻找集卡调度策略和翻箱策略的最优结合，目标是尽量的减少翻箱操作。

### 1.3 论文内容及结构

本文以集装箱堆场堆存策略为研究目标，对集装箱堆场堆存策略进行了比较研究。在现实约束条件及一定的假设条件下进行模拟仿真，结合模拟仿真得到的数据，计算出几个性能指标的数值，对集装箱堆场堆存策略进行量化了比较。

本文首先详细介绍了集装箱码头和集装箱码头堆场的基本知识。其中详细介绍了堆场中的作业设备；堆场中的作业种类；影响堆场作业效率的主要因素。

其次，依据排队论理论的知识，通过对集装箱码头物流系统进行详细的分析，得到集装箱码头物流系统是由岸桥服务系统，集卡服务系统和场桥服务系统三个子系统组成的。然后在本章中给出了评价集装箱码头物流系统的性能指标。

然后，对 Flexsim 软件进行了简单的介绍，依据集装箱堆场中的实际操作和集装箱堆场相关的理论知识，提出了几种常用的集装箱堆场堆存策略和翻箱策略，为下文的模拟仿真提供了比较的对象。接着使用 Flexsim 软件对集装箱堆场在不同的堆存策略下进行模拟仿真，并且依据得到的数据和进行比较的性能指标，对三种堆存策略进行了比较研究。

最后，在本文的末尾，进行了总结并且提出了进一步的研究方向。

### 1.4 论文研究方法与创新点

集装箱码头是典型的离散事件动态系统<sup>[13]</sup>。由于实际堆场资源配置具有复杂性，难以通过简单的分析得出比较结果。同时考虑到进行实际试验的投资风险高，成本投入过大，研究时间过长，并且系统具有不可逆性，以及考虑到安全性等各方面的因素，使得采用仿真技术进行模拟仿真就成为一种有效的研究手段甚至是唯一的手段。本文依据集装箱堆场的实际情况和相关的理论知识，利用3D仿真软件Flexsim对集装箱堆场堆存策略进行了比较研究。

## 第2章 集装箱码头堆场

自 1979 年改革开放以来，我国的海运事业一直在不断的飞速发展，目前已经有天津，宁波，上海，大连，青岛等 50 多个港口办理集装箱装卸业务，港口吞吐量和集装箱吞吐量分别以每年 16%和 30%的速度高速增长。但是，虽然有先进的技术和机械设备的支撑，目前我国集装箱码头管理水平与世界先进水平依旧有着很大的差距，这给港口的规划和管理带来了新的问题。其中，集装箱堆场管理的不合理是对集装箱码头管理不合理的一个主要方面。

加强对集装箱堆场管理<sup>[34]</sup>的主要一个方面就是为堆场选择一个适当的堆存策略。选择合适的堆存策略的目标是：提高堆场空间的利用率；减少集卡的运输时间和运输距离；避免不必要的翻箱工作。当然，对于不同的港口来说，三个准则的重要程度也不一样。例如新加坡港和香港港<sup>[31-32]</sup>的堆场场地大小有限，因此提高堆场的使用效率对其至关重要。同时值得注意的是，以上的三个目标是相互冲突的，因此同时做到上述三点是不可能的。比如，要实现第三个目标的方法就是保证每个堆场只有一个集装箱的高度，但是这样就降低了堆场的使用效率。这就对集装箱码头的管理者提出了新的要求。本章将对集装箱码头尤其是集装箱堆场做出详细的介绍。

### 2.1 集装箱码头的布局

为了更好的介绍集装箱堆场在集装箱码头作业的重要性，我们首先介绍集装箱码头的基本组成<sup>[33]</sup>。

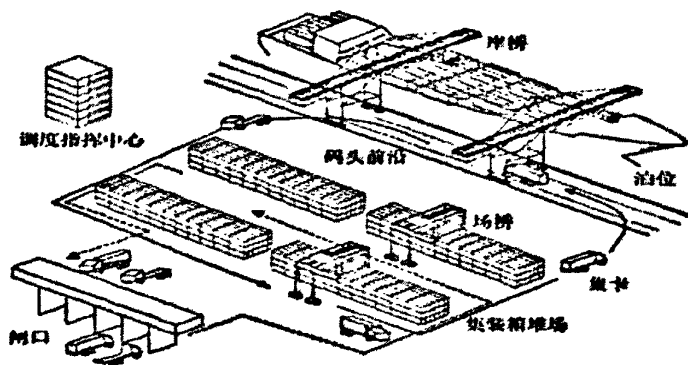


图 2.1 集装箱码头组成图

Fig.2.1 Composition figure of container terminal



下面介绍具体集装箱码头布局的基本构成。

### 1. 码头岸线及泊位

码头岸线及泊位是指供来港装卸的集装箱船舶停靠时使用的设施。其岸线的长度与泊位个数一般取决于港口集装箱吞吐量及装卸机械的数量等,各泊位水深应满足停靠船舶的吃水要求。

### 2. 码头前沿及装卸船,搬运机械

码头前沿是指码头岸线从岸壁到堆场前沿之间的区域。根据配置的装卸机械的不同,其宽度可能不同,码头前沿的宽度必须满足所采用的装卸机械和搬运机械在码头前沿工作时对场地的要求。

码头装卸船作业机械是指能完成装卸船作业的起重机械。目前一般采用岸边集装箱起重机(即集装箱装卸桥),一些吞吐量较小的泊位则配置其他种类的高架起重机。

目前承担集装箱装卸船机械和码头堆场之间的运输任务的机械一般采用拖挂车。根据采用的装卸工艺的不同,拖车和挂车配备数量有较大差别,但其数量一般应满足装卸船机械效率与工艺的需要。

### 3. 集装箱码头堆场及堆场机械

堆场是进出口集装箱堆存等待进一步运输操作的场地,同时也是临时保管集装箱与货主交接的集装箱(包括空箱与重箱)的场所。堆场上根据集装箱的规格尺度和堆场机械的类型设计堆存区,箱位和通道线,一般也设有冷藏箱使用的电源插座,集装箱在堆场中分区,分类堆存。有的集装箱码头受前方堆场面积限制,设有后方堆场。

集装箱堆场配备库场和进行集装箱作业用的机械设备。目前使用的主要设备有轮胎式起重机,正面吊跨运车,集装箱叉车等。这些机械设备主要承担前沿拖挂车,从内陆进入码头的外集卡的集装箱的装卸,堆码,场内掏箱等业务。

### 4. 集装箱货运站

集装箱货运站是拼箱货装箱和拆箱,或货主和船公司交接进行的场所。拼箱货产生的原因是:货主要求其货物使用集装箱运输,但是货物量又不足以达到一个集装箱。这时,集装箱货运站就把有这样要求的货主的货物拼放在一个箱子里。集装箱货运站的主要业务有:负责拼箱货的拼拆作业;进口拼箱货的保管;办理进出口拼箱货的各种单证;当货物外表检查不正常时,对货物做出批注;拼箱货

的装箱计划。

#### 5.维修车间

维修车间是集装箱和码头上各种装卸机械,库站等使用的机械设备进行修理和保养的场所。维修车间配有维修,清洗,熏蒸和各种设备维修保养使用的机械设备。

#### 6.其他设施

包括控制塔,大门,电力站,照明设施等。

### 2.2 集装箱码头堆场的介绍

集装箱是指有一定的强度,刚度和规格的大型容器<sup>[14]</sup>。同时,集装箱也是一种运输设备,可以在很长的一段时间内反复使用。集装箱可以说是人类的一大发明,其主要原因不仅是因为集装箱的生产和制造实现了标准化,并且在集装箱标准化的基础上建立了一整套的运输体系。下面我们着重介绍集装箱堆场的概念。

集装箱码头堆场<sup>[15]</sup>是集装箱码头内堆放从到港船舶上卸载的集装箱的场地,同时也是保管将要和货主交接的集装箱的地方。集装箱堆场根据不同的标准可以有多种划分方法。按照地理位置和用途的区别一般分为前方堆场和后方堆场。

前方堆场位于集装箱码头前沿,靠近码头泊位处,目的是加快船舶装卸的作业速度,暂时进行集装箱堆存的场地。一般来说,前方堆场中主要堆存出口集装箱放。但是,为了加快卸船作业的速度也会将进口箱暂时堆放在前方堆场。前方堆场与码头前沿相邻,它的面积应该至少是泊位上所能停靠的最大集装箱船装载集装箱量的两倍。

后方堆场是指存放进口箱进而与货主进行交接空箱和重箱的场地。后方堆场包括中转箱堆场、冷藏箱堆场、危险箱堆场、进口箱堆场、空箱堆场等。后方堆场对整个集装箱码头的集疏港、集装箱的中转运输、拆装箱的作业的顺利进行提供了保障。

#### 2.2.1 堆场箱区划分及箱位编码方式

##### 1.堆场箱区的编码方式<sup>[39]</sup>

场箱位是指集装箱在码头堆场的物理位置。场箱位号由箱区、位(贝)、排、层组成。如 A10111 表示该箱在: A1 箱区 01 位(贝)第一排第一层;如 A10133 表示该箱在: A1 箱区 01 位(贝)第三排第三层。

## 2.箱位

箱位是根据标准集装箱尺寸的大小在堆场场地上划定的一块区域。一个箱位中堆垛的集装箱的数量称作层(Tier)。贝位是指由多个连续的箱位构成的,一个贝位中纵向的箱位称作排或者列。贝位分为小贝和大贝,堆放 20 英尺标准集装箱的贝位称作小贝;两个横向连续的小贝是用来堆放 40 英尺集装箱,称为大贝。

## 3.街区构造

街区是由多个连续的贝位组成的。街区中还有进行集装箱堆存作业的机械设备,比较常用的包括轨道式龙门吊和轮胎式龙门吊。

## 4.箱区以及箱区的划分

箱区是由多个街区构成的,是按照集装箱的作业功能或自然属性划分出来的区域。按集装箱的种类可以分为危险品箱区,货运站箱区,特种箱区,冷藏箱区,修箱箱区,验关箱区,特种箱区,蒸馏箱区等。

按照集装箱流向属性可以分为:进口箱,出口箱和中转箱。下面对基于集装箱属性的分类进行详细介绍。

1)空箱区。空箱区一般位于码头后方,而且其箱位纵向一般不留间隔,因此空箱区的排数和其他箱区相比较多。空箱区这样的设计不但能够提高堆场的利用率,而且适合堆场中的机械进行连续作业,从而提高了堆场中机械的作业效率。

首先,在空箱区中进行集装箱堆放的基本要求是分箱型和箱主进行堆放。箱主或者箱型的混堆会造成提箱时的大量翻箱操作。其次,箱公司对码头发放空箱一般是先进先出(FIFO),进入箱区时间较短的箱子压着进入箱区时间较长的箱子,也会导致翻箱操作的增加。

2)进口箱区。进口箱区一般位于堆场的中部,主要堆存进口重箱,纵向留有间隔,以便于装卸机械的作业。进口箱区的堆存策略主要有两种。一种是按照卸船作业时的就近原则,在街区中未堆放满的贝位中将进口箱连续的堆放,采用这种堆存模式,使得堆场的利用率较高,但是增加了装卸机械的作业量,影响了进口卸船的效率。第二种是对进口箱区中的集装箱进行不断的整理,尽量的将单独堆存的集装箱归并到某些贝位,使得尚未进场的进口箱有更多的全空贝位。采用第二种模式,使得堆场的利用率比较低,假如堆场面积不能应付作业集装箱的集装箱箱量,那么第二种的缺点就暴露出来了。其次,第二种方式对工作人员的要求较高,需要每天对箱区的整理做出计划。而且对装卸机械的要求更高,在保证

卸船的同时，还要对堆场进行整理。

3)出口箱区。出口箱区大多数被安排在堆场的前部，主要用于出口重箱的堆放，由于装卸机械在出口箱区内取箱装船的时候，堆场中经常会出现翻箱操作，作业冲突等问题，从而使得操作称为整个装船作业的瓶颈问题。如果将出口重箱区安排在堆场前部，就能相对靠近集装箱船舶停靠的泊位，这样就减少集卡的水平运输距离。但是，尽管把出口重箱区安排在堆场的前沿，依旧不能避免作业冲突和不必要的翻箱等问题。

4)箱区的混堆。进口箱区，出口箱区，空箱区在整个集装箱堆场中的位置并不是完全分离的。有时经常为了提高装卸船效率，会把空箱卸载进口箱区，或者直接把进口箱卸在出口箱区，然后再进行下一步运输。当码头中的中转箱量较大时，这个现象表现的则更加明显。

### 2.2.2 集装箱堆场作业设备

集装箱码头堆场装卸搬运设备<sup>[16-17]</sup>是指在堆场中进行集装箱的装卸，堆码以及水平运输的机械设备。堆场中的装卸设备的选择因各个港口堆场的具体情况而异。下面对这些装卸设备进行详细介绍。

#### 1.底盘车

底盘车是集卡的拖挂部分，利用底盘车进行堆存时，首先指将集装箱和底盘车连接到一起，然后底盘车运输至堆场的指定位置，将集装箱存放在堆场上。底盘车是所有集装箱堆存机械中机动性最高的。但是，其缺点也十分明显，就是利用底盘车进行集装箱的堆存时，堆存的高度就只有一层，因而使得堆场的利用率很低。

#### 2.集装箱叉车

集装箱叉车是集装箱码头和堆场中的专用装卸机械，主要用于集装箱年吞吐量小于3万标箱的综合性码头和堆场的短距离运输与堆垛作业。叉车有时也用于大型集装箱码头堆场进行作业。叉车是通用性很强的机械，也可以用于进行空箱的作业。集装箱叉车价格相对其他装卸机械比较便宜，装卸成本也较低。

#### 3.跨运车

跨运车简称为跨车，是集装箱堆场中的主力装卸设备，主要负责码头前沿与堆场之间水平运输作业以及堆场的堆码作业。跨运车的作业效率高，稳定性好，

机动性高，因此得到了广泛的运用。尽管跨运车的维修率较高，但是经过多年的发展，已经成为集装箱码头及堆场的重要设备之一。

#### 4. 龙门吊

龙门吊起重机简称场桥，是集装箱堆场中十分重要的一种机械设备。场桥是一种大型的起重机，横梁和立柱结合在一起成“门”字型。场桥主要有轮胎式和轨道式两种。

1) 轮胎式场桥：轮胎式场桥主要特点是机动性高，能够实现其在不同的集装箱堆场中的作业。

2) 轨道式场桥：和轮胎式场桥相比，轨道式岸桥的跨度大，堆垛层数多。使用轨道式场桥更容易实现装卸的全自动化，但是轨道式场桥只能限制在其轨道所在的某一堆场场地范围内进行作业。

此外，集装箱堆场中的机械设备还包括拖车，挂车，托盘等。总之，集装箱堆场中的装卸设备多种多样，集装箱码头堆场的管理者可以根据码头自身的需要，对装卸设备进行多样化的选择。

### 2.2.3 集装箱堆场作业种类

集装箱码头堆场作业<sup>[18]</sup>主要包括集装箱进出场作业包括卸船收箱、装船发箱、进箱收箱、提箱发箱。集装箱在场内的移动转堆、翻箱等。下面按照进口箱，出口箱，中转箱三种情况分别进行介绍。

#### 1. 出口箱作业

进场时，当出口箱由外集卡运输至大门后，经过检查，登记，过磅后，中控室根据集装箱的信息确定集装箱在堆场中的位置，然后外集卡司机根据指示把集装箱运输至堆场，然后由场桥卸下进行堆存。装船时，首先由场桥把集装箱从堆场中取出放在集卡上，由集卡运输至码头前沿，最后由岸桥将集装箱从集卡上卸下装船。

#### 2. 进口箱作业

进口箱收箱时，首先内集卡在岸桥处等待，岸桥把卸载下来的箱子放在内集卡上，由内集卡运输至堆场中，然后场桥把集装箱从集卡上提起堆存在堆场中。取箱时，当外集卡到达大门后，场桥将进口箱从堆场中取出，放在外集卡上，然后外集卡离开码头。进出口箱的具体作业流程如下图所示：

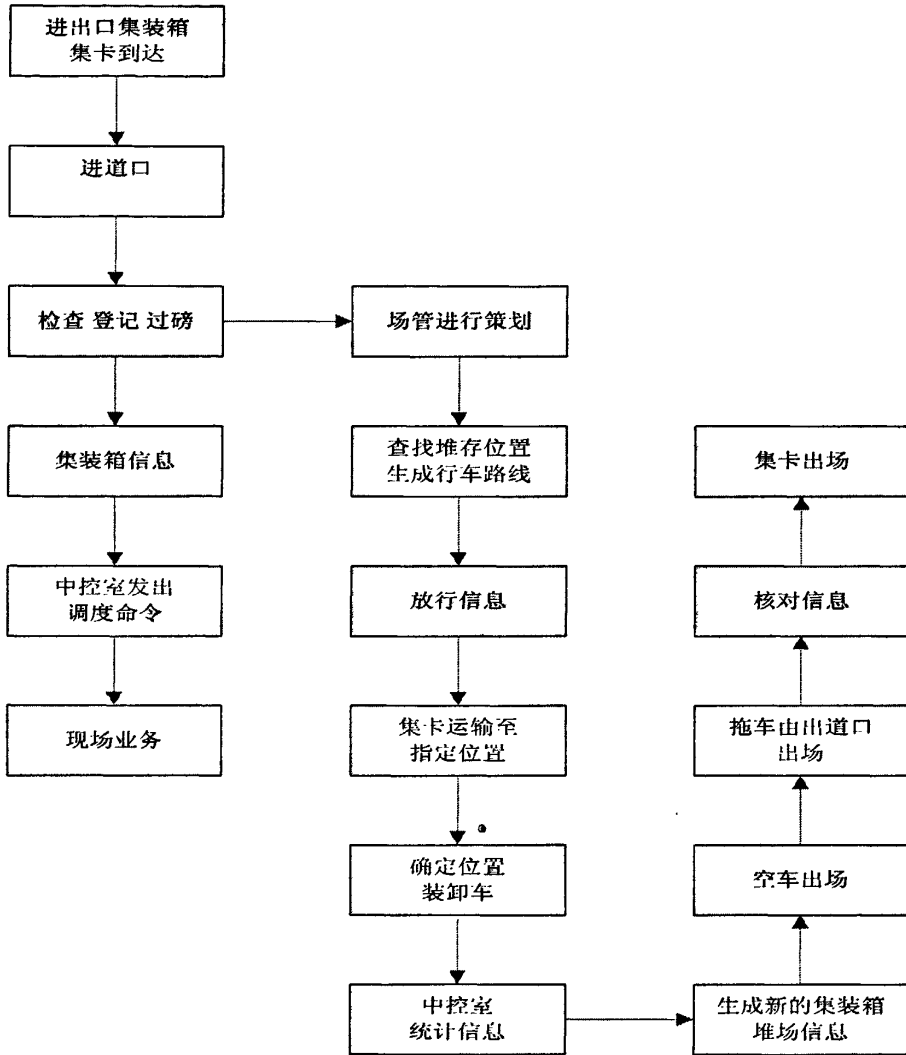


图 2.2 进出口箱作业流程图

Fig.2.2 The flow chart of import and export containers

### 3. 中转箱作业

中转箱包括国内中转箱和国际中转箱。国内中转箱作业是指在境外港口装船，经国内中转卸船后转运到境内其他港口的集装箱，以及在国内装货港已经办理结关手续，船公司出具全程提单，经国内中转到国外目的港。国际中转集装箱作业是指由境外开始起运，经中转港换装国际航线船舶后，继续运往第三国。

### 4. 场内转堆以及翻箱作业

转堆和翻箱是集装箱在场内移动的两种方式：转堆是指将集装箱由堆场上某一箱位转移到其它箱位的操作，包括三个过程：转堆发箱、集卡拖运和转堆收箱。翻箱是指对指定集装箱进行操作时，将压在这个集装箱上面的其他集装箱转移到

其它位置的操作。

## 2.2.4 集装箱堆场的重要性

堆场管理<sup>[19-21]</sup>是码头日常管理的重要组成部分。在一定的条件下,堆场容量是衡量集装箱码头集装箱吞吐水平的重要指标。集装箱堆场作为暂时堆存进出口集装箱的场所,对整个集装箱码头的作业起着承上启下的作用。堆场布局的合理不仅能减少堆场内的作业时间,提高装卸作业的速度,减少翻箱率,而且还能最大限度地提高堆场利用率,码头通过能力,降低码头运营成本;布局的不合理则会提高码头作业成本,降低堆场的利用率,降低码头的服务质量,减少码头的堆存能力,导致码头通过能力的下降。

堆场作为集装箱码头物流系统的重要组成部分,在整个集装箱港口物流系统中起着重要的作用。不管是发货人的出口箱,还是从集装箱船上卸下的进口箱,都必须经过集装箱堆场内等待进一步的操作。集装箱化运输的优势能否发挥作用,关键就在于堆场中的装卸和堆存作业是否顺畅。接下来,我们将对影响集装箱堆场中机械设备作业效率的因素进行分析。

## 2.3 影响堆场作业效率的因素

### 1. 堆场作业时产生的翻箱作业

在集装箱堆场进行出口箱、中转箱的装船作业,进口箱的提箱作业时,会产生大量的翻箱作业<sup>[35-37]</sup>。其中一些不必要的翻箱作业的存在,增加了堆场的作业时间,进而影响了整个集装箱码头堆场的作业效率。

通过对这些翻箱作业长时间的研究发现:其中一类翻箱作业是堆场管理者所不能控制的。主要有以下几点:

1) 有时外集卡到达码头提箱时,需要提出的集装箱的上面还有别的箱子,这是就会造成不必要的翻箱操作。

2) 中装箱的装船信息滞后造成不必要的翻箱操作。

3) 特殊箱型重箱的存在造成的翻箱操作。由于特殊箱子在集装箱堆场中堆存时,必须堆放在堆场中的特殊位置,这就造成翻箱作业。特殊重箱包括冷藏箱、高箱、危险箱、框架箱等。

但是,还有另一类翻箱操作则是因为码头工作人员在安排堆场堆存计划、组织装卸作业的不当造成的。这类的翻箱操作的存在是不合理的,是码头作业中可

以避免的，此类翻箱作业主要由两个方面组成：

1) 出口箱进场时堆存位置与集装箱船的配载要求不一致造成出口箱在装船作业时发生翻箱操作。

2) 进口箱卸船时，新箱压老箱造成进口箱提箱作业时的翻箱操作。

## 2. 堆场作业过程时的作业冲突

集装箱堆场是一个十分复杂的作业系统，其中包括多种多样的作业形式。这些作业之间的相互交叉，相互影响，难免会影响堆场的作业效率。堆场中作业冲突主要表现为以下几点：

1) 出口箱进场与装船之间的冲突。堆场管理人员在安排出口箱进场后在堆场中堆存的具体位置时，不仅要考虑堆场中的出口箱区的堆存情况，还会考虑到出口箱将来的装船信息。但是，船舶可能由于天气等各种各样的因素的影响而不能准时到达港口或者堆场管理人员设计的堆场计划不合理，会造成一段时间内出口箱区既有进场堆箱作业又有出口提箱作业。

2) 进口箱卸船与提箱之间的冲突。一般来说，外集卡进场进行提箱作业时间是随机的。如果在外集卡进入进口箱区提箱的时候，同时又有船舶正在卸载集装箱并送往进口箱区堆存。这样就会造成在一时间段内，进口箱区内既有进口箱的提箱作业同时又有进口箱的卸船作业，这就造成了进口箱提箱与卸船收箱之间产生作业冲突。

3) 中转箱发箱与收箱之间的冲突。由于中转箱作业性质比较特殊，很可能从一艘船上卸下来的中转箱马上会由二程船装运出去，甚至可能一条二程船上装载的中转箱可能是从多条船上卸下来。中转箱卸船与装船作业互相影响，就会使得码头前沿的暂存箱区内既有中转箱装船作业又有卸船作业。



## 第3章 排队论在集装箱码头中的应用

### 3.1 集装箱码头排队系统

排队论<sup>[22-23]</sup>是研究离散系统中的随机现象和随机服务系统运行的数学理论,为运筹学的一个分支,又称随机服务系统理论。日常生活中存在大量排队现象,比如病人到医院看病,顾客到商店购买商品等等都属于排队论的研究对象。排队论的基本思想是基于丹麦电话工程师 A.K.埃尔朗于 1910 年在解决电话设计问题时的研究思想。埃尔朗在热力学统计平衡理论的启发下,建立了电话统计平衡模型,并且得到一组递推状态方程,最后研究出了著名的埃尔朗电话损失率公式。一般说来,在某个时刻系统内要求服务的顾客数超过服务机构的最大容量时,就会出现排队现象。

在大多数排队系统中,顾客到达和接受服务的时间都是不可预知的,而是随着时间与条件的变化而变化。因而,排队系统在某一时刻的状态也是不可预知的。由此可见,排队现象是十分正常和常见的。但是,避免排队现象发生的方法也是存在的。比如可以增加系统内服务设备的数量,但是这样做就要增加投资,也可能在顾客很少时有空闲浪费情况的发生。如果服务设备太少,排队现象就会十分严重,对顾客和服务系统本身都带来十分不利影响。排队系统通常是由一下三个基本组成部分:

1.到达模式:是指动态实体(顾客)到达的规律,到达模式描写了实体到达的统计性质。一般情况下,到达系统服务的顾客是无限的。

2.服务机构:是指同一时刻可以对不同实体进行服务的设备的数量。服务机构也具有一定的统计分布特性。一般情况下,我们假设系统的容量也是无限的。

3.排队规则:是指选择下一个服务对象的选择规则。通常使用的排队规则包括先来先服务(FIFO),随机服务(SIRO),后进先服务(LIFO)等。

集装箱码头是一个离散事件动态系统<sup>[40-42]</sup>。根据排队论的理论知识对集装箱码头进行研究,我们可以清晰的发现,整个集装箱码头中服务的顾客包括:外集卡,到港的船舶,堆场内等待装卸作业的集装箱。服务的机构包括:内集卡,集装箱码头前沿泊位的岸桥,以及集装箱堆场中的场桥。同时,我们也可以发现集装箱码头是一个复杂的排队系统。但是不管一个排队系统有多么的复杂,其基本组成元素也是最基本的排队系统<sup>[38]</sup>。经过分析,集装箱码头排队系统主要由

三部分构成。下面介绍和集装箱堆场密切相关的三个子系统。

### 1. 集卡服务系统

集卡一般为多服务台系统,集卡的服务时间是指集卡在堆场和码头前沿之间的水平运输的行驶时间。对于进口箱是从码头前沿到堆场,对于出口箱是从堆场到码头前沿。影响集卡的服务时间包括集卡行驶的速度、堆场到泊位的距离等因素的影响。集装箱到达集卡的时刻是集装箱被岸桥或场桥从船或者堆场中取出的时刻。对于单个集卡服务系统来说,其服务系统的服务规则是先到先服务规则。

集卡服务系统的功能是完成集装箱在堆场和码头前沿之间的水平运输。但是对于场桥和岸桥服务系统来说,集卡从某种程度上来说也是它们系统中的顾客。

下面分别对场桥服务系统和岸桥服务系统分别进行分析。

### 2. 场桥服务系统

对于大多数集装箱码头来说,其堆场中都有多个场桥进行集装箱的操作。所以,场桥节点的服务时间是场桥操作箱子的时间。场桥吊箱的时间受到翻箱率、机械信号等因素的影响,同时各场桥的服务时间相互独立。顾客在场桥节点的到达率是,内卡到达率与外卡到达率的叠加。内卡在场桥节点具有优先权,场桥按先到先服务规则为集卡吊箱。

### 3. 岸桥服务系统

岸桥服务系统也是多服务台系统。岸桥节点的服务时间为岸桥从集装箱船上进行装卸船的时间。岸桥的作业时间受到船上倒箱,机械操作熟练度等许多因素的影响。顾客的到达率为从船舶上卸箱和集卡运输到泊位等待装船的集装箱的叠加。

下面我们对到达模式,服务机构,排队规则进行详细的分析。

#### 3.1.1 到达模式

排队系统中,要求进行服务顾客到来的方式主要有两种:单个的和成批的。按到达的间隔时间分布可以分成随机型和确定型。顾客到达的过程可以是平稳的,也可以是非平稳的。这里平稳的定义是指描述相继到达间隔时间的统计分布与时间原点无关。

集装箱码头系统的工作有很多种,而且作业的实际操作受到很多随机因素的影响,比如本文中集卡装卸作业的速度,场桥的移动速度,外集卡进入出口箱

区集箱堆箱和到进口箱区提箱的时间,船舶的到港时间以及装卸集装箱的数量等等。因此,在分析集装箱码头时,把随机因素都考虑进去是不现实的,也是没有必要的,通过对港口运作的规律进行总结和分析,我们主要考虑以下随机事件:

- 1.出口箱的到达的随机分布;
- 2.船舶到港时间间隔的随机分布;
- 3.装卸箱量的随机分布。

接下来以集装箱码头出口箱的到场模型为例进行说明。在分析过程中使用了来自某大型集装箱前方堆场的数据。本文中取 96 个小时集装箱进场数量为一个样本进行数理统计<sup>[43]</sup>,那么样本的容量为 96。样本数据如下表所示。

表 3.1 4 天每小时进场箱数量表  
Tab.3.1 The number of per hour's export containers in 4 days

时间	进场箱的数量(单位:TEU)											
1-12 小时	0	0	0	0	0	0	0	0	8	28	39	45
13-24 小时	28	59	43	30	33	38	5	20	0	0	0	0
25-36 小时	0	0	0	0	0	0	0	0	18	38	57	39
37-48 小时	6	41	23	41	22	31	25	24	3	0	0	0
49-60 小时	0	0	0	0	0	0	0	0	14	5	38	56
61-72 小时	16	46	26	37	20	28	11	45	26	1	9	0
73-84 小时	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	33	45
85-96 小时	2	43	63	39	45	10	8	13	5	7	0	0

观察数据会发现,每天 0 点到 8 点和晚上 10 点以后进场的出口箱的数量基本上为 0。然后观察其他样本数据,发现所有样本的数据都符合这条性质。既然出口箱进场的时间大都集中在早上 9 点到晚上 10 点之间,那么我们就可以认为这段时间为堆场的工作时间。这样就把研究对象确定为这个时间段内的数据,也会让检验的结果更加具有实际意义。

接下来,我们取工作时间内的进场出口箱量作、为样本数据,检验样本数据的独立性。样本数据容量为 56,具体样本数据为下表所示。

表 3.2 工作时间每小时进场箱表

Tab.3.2 The number of per hour's export containers at working time

时间	进场箱的数量(单位:TEU)							
1-8 小时	8	28	39	45	28	59	43	30
9-16 小时	33	38	5	20	0	0	18	38
17-24 小时	57	39	6	41	23	41	22	31
25-32 小时	25	24	3	0	14	5	38	56
33-40 小时	16	46	26	37	20	28	11	45
41-48 小时	26	1	0	29	33	45	2	43
49-56 小时	63	39	45	10	8	13	5	7

通过检验发现在工作时间内，出口箱到达的数量具有随机性。通过对其他几个样本的检验，都表明了进口箱的到达是相互独立的。因此，可以近似认为对于大型集装箱堆场来说，不同时间段之间的进场箱数是相互独立的。

接下来，取一个季度共 91 天的进场箱的到达数量为一个样本进行研究。其中，样本容量为 91，每天进场箱数量的最大值为 925。然后采用  $\chi^2$  拟合优度检验法检验该随机样本的分布，样本数据如下表所示。

表 3.3 单季度每天进场箱数量表

Tab.3.3 The number of per day's export containers in a quarter

时间	进场箱的数量(单位:TEU)						
1-7 天	493	374	73	317	832	364	481
8-14 天	453	468	150	496	503	334	353
15-21 天	296	437	45	487	528	293	417
22-28 天	501	272	136	682	531	429	432
29-35 天	537	477	83	285	320	95	12
36-42 天	15	181	298	409	284	565	528
43-49 天	762	538	120	88	543	583	551
50-56 天	499	559	62	346	606	503	560
57-63 天	625	447	190	247	768	677	604
64-70 天	500	363	43	431	725	643	594
71-77 天	361	242	83	118	648	403	492
78-84 天	421	270	135	0	913	627	651
85-91 天	697	381	118	0	926	289	311

样本均值为  $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 401.3407$ ,

样本方差  $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \approx 47892.05$ ,

按组距为 200 进行分组，则组数为  $k = 5$ 。数据分组结果如下表所示：

表 3.4 进场箱数据分析表  
Tab.3.4 analysis of export containers

组	实际频数	实际频率	理论频率
不大于 200	20	0.2197803	0.1481
201-400	21	0.2307695	0.3158
401-600	34	0.3736265	0.3158
601-800	13	0.1428572	0.1483
不小于 801	3	0.032968	0.0719

假设出口箱到达数量符合 *Poisson* 分布, 进而得出理论频率  $P_i$ , 理论频数  $nP_i$ , 分组后的处理数据为

$$V = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - np_i)^2}{np_i} = 8.122546$$

取  $\alpha = 0.05$ , 查  $\chi^2$  分布表得到  $\chi^2(k-r-1) = 10.5970 > 8.122546$ , 因此可以近似认为总体服从 *Poisson* 分布。

通过对国内外大量统计资料的分析, 发现大多数港口的到达服从 *Poisson* 分布, 在  $t$  时段内到达  $n$  艘船的概率为

$$p_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}, \quad n = 0, 1, \dots$$

其中  $\lambda$  代表单位时间内平均到港船舶数。

一般情况下, 到港船舶集装箱的装卸量是不同的, 而且装卸量的分布也不是连续的。但是, 由于船舶运输的特殊性, 船舶的卸载量主要集中在几个离散数字的附近, 本文中假设船舶的装卸量服从正态分布, 其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2}, 0 < x < \infty \tag{3.1}$$

式子中  $\mu$ ,  $\sigma$  分别代表  $x$  的均值和方差。装卸箱量的概率分布函数为

$$F(x) = P\{X \leq x\} = \int_0^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2} dx, 0 < x < \infty \tag{3.2}$$

3.1.2 服务机构

服务机构按机构形式可以分为: 没有服务台, 一个服务台和多个服务台。在有多 个服务台的情况下, 服务台的排列顺序可以是平行排列的, 也可以是前后排列的, 在某些特殊条件下也可以是混合的。按服务时间可以是确定型的, 也可以是随机型的。按服务过程可以是平稳的, 也可以是非平稳的。对非平稳情形的数学分

析是很困难的。因此,非平稳情形下的服务时间分布也可以假定是平稳的。

本文中的集装箱码头物流系统中的服务机构<sup>[24-25]</sup>主要有三种:

1.集卡服务机构。集卡服务系统负责集装箱的运输服务,并且在系统中有多台小车,即集卡服务系统是一个多服务台的系统。

2.场桥服务系统。场桥服务系统负责集装箱堆场中集装箱的作业,并且在系统可能中大多数情况下有多个场桥。因此,场桥系统也是一个多服务台系统。

3.岸桥服务系统。岸桥服务系统负责集装箱船的装卸作业,并且通常港口泊位配备了多个岸桥,因此岸桥系统也是一个多服务系统。

### 3.1.3 排队规则

排队规则是指系统中的顾客按照什么样的次序和规则接受服务。从大体来分主要有如下两种:

1. 损失制是指在顾客到达系统的时,如果所有服务台都在对顾客服务,那么顾客就会离开系统。

2.等待制是指顾客到达系统时,如果所有服务台都在对顾客服务,顾客就会加入队列中等待接受服务。在等待制下,顾客在排队系统中的排队规则主要有以下几种:

1)随机服务:随机服务是指服务台空闲时,从队列中排队等待的顾客中随机地选取进行服务,不考虑顾客到达的先后。

2)先到先服务:先到先服务是指按到达顺序依次进行服务,这是最常用的排队规则。

3)后到先服务:后到先服务是指最后进入系统中的顾客在服务台空闲时最先接受服务。在实际生活中这样的例子也很多。乘坐电梯的顾客通常是后入先出的。国家安全局在进行情报搜集时,往往最后到达的情报是最具价值的,因而常采用后到先服务的规则。

在本文中的装船作业中,采用的是优先权服务(PR)的排队模式,主要原因是集装箱装船的顺序在船舶到达的时候,就应该决定好了装船顺序。

### 3.2 集装箱码头的排队模型

D.G.Kendall根据排队系统的主要特征,提出一种目前已被广泛采用的分类方法。该分类方法只针对服务设备是并列的情形,符号表达形式是

$$X/Y/Z$$

其中,  $X$  表示顾客到达间隔时间的分布;  $Y$  表示服务台进行服务时间的分布;  
 $Z$  表示并列的服务台的数量。

下面列出到达间隔时间和服务时间的各种分布的符号表示:

$M$ : 负指数分布( $M$  是 Markov 的字头, Markov 性即无记忆性, )。

$D$ : 确定性(Deterministic)。

$GI$ : 一般相互独立分布。

$G$ : 一般(General) 随机分布。

$E_k$ :  $k$  阶爱尔朗(Erlang)分布。

一般情况下, 集装箱码头在经过详细的设计建造之后, 在短时间内不可能造出很大的改变, 结合排队论的知识, 也就是说集装箱码头在经过对岸桥, 场桥, 集卡等机械设备的型号和数量做出决策之后, 会在长时间内保持不变。

集装箱码头节点配置是影响码头前沿装卸作业和后方堆场中作业的关键。码头节点设备配置是典型的排队系统, 它根据到港船舶类型和箱量的不同而异, 承担了船舶在港的装卸任务。集卡、场桥、岸桥这三个节点, 每个节点由服务机构、输入过程和排队规则组成。同时, 三个节点之间通过集装箱或集卡的访问互相联系构成排队网络。下面分别从横向和纵向角度分析:

从横向角度分析: 通常情况下, 随着集装箱运输的迅速发展, 集装箱码头泊位处会有多艘船舶在接受装卸船作业, 因此整个码头前沿服务可以认为是多个岸桥基本排队子系统构成的并列式排队网络。而且, 根据岸桥服务时间分布和集卡的到达规律的不同, 各个子系统之间也有着区别。

从纵向角度分析: 以进口箱为例, 当来港船舶在泊位处接受岸桥服务系统的服务时, 岸桥系统把集装箱从船上卸下, 放到集卡上。这时, 集装箱进入集卡服务系统, 集卡将集装箱从码头前沿运输至堆场中, 由场桥从集卡上提起集装箱。这时, 集装箱又进入了场桥服务系统, 最后集装箱由场桥堆存在堆场中的指定位置。因此, 整个集装箱码头也可以看成是由三个子服务系统构成的复杂串联型系统。

### 3.3 集装箱码头排队系统的评价分析

对于随机离散排队系统, 在给定的到达时间间隔和服务条件下, 主要研究系

统的下述运行指标<sup>[50]</sup>:

1. 在系统中顾客停留时间的期望值  $W_s$  , 在队列中顾客等待时间的期望值  $W_q$ 。在对这些指标求解时, 都是以任意时刻系统状态为  $n$  (有  $n$  个顾客) 的概率  $P_n(t)$  为基础的。

2. 系统中顾客数的期望值  $L_s$  , 在系统中等待服务的顾客数(队列长度) 的期望值  $L_q$ ;

下面我们主要介绍本文中使用的多服务台  $M/M/c$  模型。规定各服务台是相互独立且平均服务速率相同  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu$  , 于是整个服务机构的平均服务速率为  $c\mu$  , 只有当  $\lambda/c\mu < 1$  时队列才不会排成无限远, 令

$$\rho = \lambda/c\mu$$

称为这个系统的服务强度或者服务台平均利用率。

对于标准的  $M/M/c$  模型, 表示  $P_n(t)$  的微分差分方程为

$$\begin{aligned}\frac{dP_n(t)}{dt} &= c\mu P_{n+1}(t) - (\lambda + c\mu)P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t), n \geq c \\ \frac{dP_n(t)}{dt} &= (n+1)\mu P_{n+1}(t) - (\lambda + c\mu)P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t), 1 \leq n < c \\ \frac{dP_n(t)}{dt} &= \mu P_1(t) - \lambda P_0(t)\end{aligned}$$

在上式中令导数为0, 可以得到表示稳态的差分方程, 进而使用递推法, 得

$$P_n = \frac{1}{n!} \frac{\lambda^n}{\mu} P_0, n < c$$

最后得到

1) 状态概率

$$P_0 = \sum_{k=0}^{c-1} \frac{1}{k!} \frac{\lambda^k}{\mu} + \frac{1}{c!} \frac{1}{1-\rho} \frac{\lambda^{c-1}}{\mu} \quad (3.3)$$

$$P_n = \begin{cases} \frac{1}{n!} \frac{\lambda^n}{\mu} P_0, n < c \\ \frac{1}{c!} \frac{\lambda^n}{c^{n-c}} \frac{\lambda^{c-1}}{\mu} P_0, n \geq c \end{cases} \quad (3.4)$$



## 2) 平均队长和平均队列长度

$$L_s = L_q + c\rho \quad (3.5)$$

$$L_q = \sum_{n=c+1}^{\infty} (n-c)P_n = \frac{(c\rho)^c \rho}{c!(1-\rho)^2} P_0 \quad (3.6)$$

## 3) 平均等待时间和逗留时间

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (3.7)$$

$$W_s = W_q + \frac{1}{\mu} = \frac{L_s}{\lambda} \quad (3.8)$$

码头物流系统性能的评价是运用一套统计指标进行衡量的。这套性能指标是通过利用包括排队论等知识, 在进行科学的统计、对统计数据进行整理和分析, 最终得到的。统计工作对帮助码头管理者在管理码头运作的各个方面提供了科学依据。集装箱码头的主要统计指标<sup>[26-28]</sup>有:

1. 集装箱吞吐量: 某一港口在某一统计时间段内进口箱和出口箱箱量的总和, 与港口吞吐量不同, 集装箱吞吐量得单位是 TEU。

2. 箱位比: 集装箱堆场内标准箱数与自然箱数的比值, 是反映箱型结构大致的情况指标。其比值越小说明大箱的比重越小, 反之则越大。

3. 船舶停泊总时间: 在某一时间段内, 船舶在港口停泊时间的总和。船舶停泊总时间包括自然因素、生产性、非生产性等各种因素, 单位为“艘时”。

4. 船舶平均每次在港停泊时间: 平均每艘船从进入港口到离开港口的总的停泊时间, 单位是“小时/艘次”。

5. 泊位利用率: 泊位在某一时间段内, 有船舶在泊位的时间占总时间的比例。泊位利用率并非越高越好, 泊位利用率过高会导致压船, 进而导致船舶平均每次在港停留过长。

6. 堆场容量: 某一时间段内集装箱的最大安全堆存箱量, 单位为“TEU”。

7. 堆存箱数: 某一时间段内进入堆场的集装箱箱量的总和。它是衡量堆存工作量的指标, 单位为 TEU。

8. 堆存箱×天数: 某一时间段内, 堆场内的每个集装箱与其堆存天数的乘积的总和。它是反映堆存工作量的指标, 不仅考虑了堆存的集装箱数量, 而且还反映了集装箱堆存的时间。计算单位为 TEU\*天。

9. 平均堆存期: 某一时间段内, 集装箱平均在堆场中堆存的时间。它是反映箱子在堆场内的停留时间, 是堆存时间长短的平均指标, 单位为天。

10. 平均每天堆存箱数。是指在统计期内，平均每天堆存的集装箱的数量。单位为 TEU。一般来说，平均每天堆存箱数越接近平均容量，说明堆场利用相对较好。但是，还要结合平均堆存期指标进行综合分析，如果平均堆存期过长，虽然利用率高，但也有可能导致堆场内集装箱的积压，影响码头的通过能力。

## 第4章 Flexsim 在码头堆场建模中的应用

### 4.1 Flexsim 简介

模拟仿真的研究对象通常是一个物流流程或者一类设施的运动,有时被称为一个系统。为了能够科学对某一个系统进行研究,我们必须通过调查研究分析系统的根本特点,理清要研究的系统里存在的逻辑关系和数学性质。如果模型里的逻辑关系比较简单,同时我们可以得到所有描述该系统性质的数据,我们就可以通过建立简单的数学模型进行数学计算,这样的解通常称为解析解。但是,实际生产活动中的系统往往是很复杂的(比如本文中集装箱堆场中的物流系统),无法使用实际模型来求解,这种情况下,我们必须使用仿真的方法来进行研究。

随着计算机软件 and 硬件的不断发展,出现了诸如Matlab, Arena, Em-Plant, Witness等优秀的仿真软件。Flexsim就是其中一个十分优秀的仿真软件, Flexsim是利用出色的编程语言C++开发出来的产品。利用Flexsim软件<sup>[29]</sup>可以建立一个真实系统的3D计算机仿真模型,花费较短的时间和更低的成本就能完成对实际系统的研究。Flexsim一个基于“what-if”分析的工具, Flexsim可以就多个备选方案提供大量的数据信息,来帮助管理人员从多个方案中迅速的找到最优方案。在Flexsim的逼真3D画面显示和出色的数据统计功能的支持下,使得用户在短时间内识别实际问题的核心所在,并对可选方案做出科学的评估。在新系统建立之前,可以使用Flexsim来建立系统的仿真模型,从而在系统真正实施前试验其运作策略,从而发现系统的问题,从而避免在启动新系统时经常会遇到的很多问题。Flexsim作为一款离散事件仿真软件,意味着它被限制用来对这样离散系统进行建模仿真,离散系统的特点是特定事件发生的结果在离散时间点改变整个系统状态。使用Flexsim可解决的3个基本问题:

1.服务问题 - 通过对整个服务系统进行模拟仿真,根据仿真实验更改系统中的服务设备和其他参数,选择一种最好的方案对实际服务的改变进行指导。

2.制造问题 - 通过对整个制造流程和制造机械的仿真,发现整个生产制造过程中出现的瓶颈问题,为制造流程的改变提供解决的办法。

3.物流问题 - 对整个物流过程进行了模拟,使得系统中的顾客能在合适的时间,合适的地点,接受合适的服务。

由于 Flexsim 软件出色的性能,目前人们已经利用该软件解决了很多实际生

活和生产中的问题,其中主要包括:提高了工厂中设备的利用率;减少了在机场、车站等排队系统中的等待时间和队列的长度;优化了整个物流中心的作业,使得资源的分配更加有效;通过对工厂中的流水线进行全面的仿真,发现了整个生产线的瓶颈问题等等。

#### 4.1.1 Flexsim 实体库和方法集

Flexsim库由实体组成,这些实体之间可进行方便易懂的交互。这些实体是采用面向对象的方法构建的,具有父类/子类的层次结构。子类实体继承父类实体的属性和默认行为,同时又特别指定了适用于特定情形的行为。下图为Flexsim 4.0中的实体库。

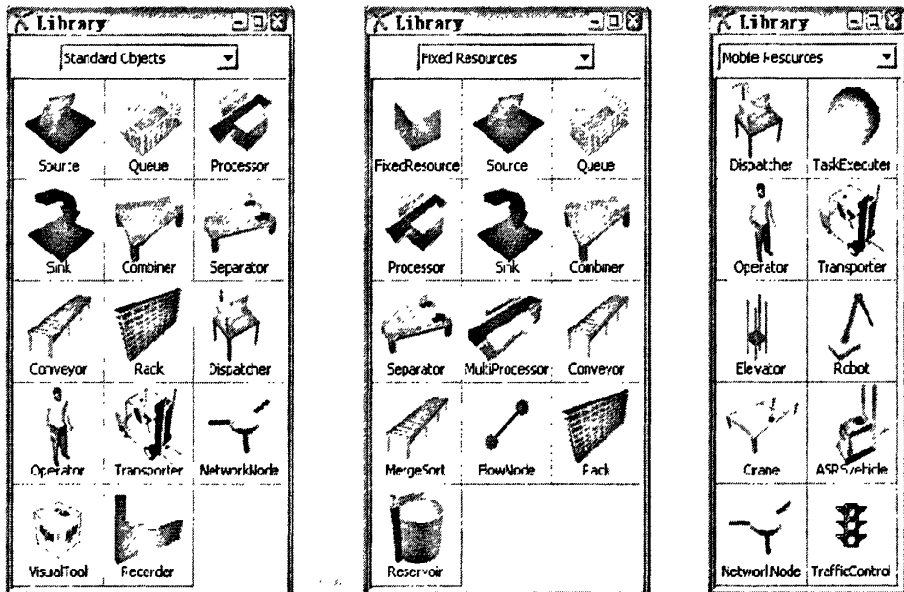


图 4.1 Flexsim 实体库

Fig.4.1 Source library of flexsim

##### 1.资源类(Fixed Resources)

Fixed Resource 类对象一般是仿真模型中的主干对象,此类对象决定了模型的流程。主要包括Source, Queue, Processor, Sink, Combiner, Multi-Processor, Conveyor, MergeSort, FlowNode, Rack, Reservoir。

##### 2.执行类(Task Executer)

Task Executer对象可从Fixed Resource对象中获取并执行任务,如物料搬运或生产操作等。一个Task Executer对象可以向其他Task Executer对象指派任务,或者管理模型中所有的Task Executors对象。Task Executors对象不参与模型中的流

程指派。主要包括: Dispatcher, Operator, Transporter, Elevator, Robot, Crane, ASRS Vehicle。

### 3.网络类(Node)

网络类对象Network Node对象一般用来设定Task Executor对象的行动路线。包括Network Node, Traffic Control。

方法是用来完成一项任务的一系列规则的集合.好的方法应是可以重复使用的.Flexsim采用一系列方法集来完成所建模型的作业。

### 4.图示类对象(Visual Object)

图示类对象可用在仿真模型中显示各种信息、标识、图片或图表等Visual Tool和Recorder对象可用来提高仿真模型的直观感,同时可用来实时显示和搜集模型的输出数据。

### 5.迁移实体(Flowitem)

迁移实体指模型中存在迁移的对象。迁移实体可用来表示生产或服务中的原料、产品或产品集,如零件、部件、托盘、容器等;也可以是任务执行者。迁移实体可点击工具栏按钮Flowitem定义。可对每个迁移实体定义对象类(Itemtype)。方法是用来完成一项任务的一系列规则集合。好的方法应是可以重复使用的。Flexsim采用一系列方法集来完成所建模型的作业。主要的方法有以下几种:

1)Arrival Method: 决定迁移实体在何时以及以什么样的方式进入仿真模型。

2)Trigger Method: 决定在何时,何地,对迁移实体进行分配操作的信息。

3)Flow Method: 决定在何时,何地,迁移实体以怎样的方式在模型中运动。

4)Task Executer Move Method: 决定在何时,何地把一个迁移实体从一个资源类转移到另外一个资源类。

#### 4.1.2 Flexsim 控件

Flexsim 软件不仅有着丰富的实体库,而且有专门的工具栏对仿真模型进行控制。其中,最常使用的控件有如下几种:

重置(Reset): 将模型重置。每次新打开一次保存的模型或者对模型中的逻辑关系进行了修改的时候,在完成模型的编译后,运行模型之前,要先将模型进行重置。

运行(Run): 运行模拟模型知道模型中的所有操作都完成,或者到达设置的

模型运行结束时间。

**暂停(Pause):** 使仿真模型暂时停止运行, 但不改变模型中各实体的状态, 按运行键后, 模型继续运行。

**停止(Stop):** 仿真模型停止运行, 同时更新仿真模型中所以实体的状态。

## 4.2 Flexsim 3D 媒体的使用

由于不同实际系统的不同, 系统中实体的形状不同, 为了更好的模拟实际系统, 最好在模拟中使用的实体也具有和实际系统中的实体有相似的外观形状, 在本文中就需要实现岸桥, 场桥, 集装箱等实体的3D模型的实现。为了介绍Flexsim中3D媒体的使用, 首先介绍帧的概念。

### 1. 使用帧

一组帧是指用一个共用名称绑定在一起的多个3D 形状画面。例如file.3ds/fileFRAME1.3ds。如果一个实体使用包含多个帧的3D 形状, 则此实体的形状的显示可以setframe()命令改变。其中0是基础帧, 表示为file.3ds; 1是第一个帧, 表示为fileFRAME1.3ds; 2是第二个帧, 表示为fileFRAME2.3ds; 以此类推, N是第N个帧, 表示为fileFRAMEn.3ds。帧可用来表示固定资源的不同状态, 也可以用来表示临时实体生命周期里的不同阶段(包括原材料, 中间产品, 成品)。当一个实体需要显示不同3D形状时, 可以简化实体形状变化过程, 直接利用帧准备一组3D表示其形状的改变, 具体实现步骤如下:

- 1) 收集两个或更多需要用于同一实体的帧的形状;
- 2) 将帧保存为同类型的文件, 3ds或者wrl格式;
- 3) 确保每个帧都使用了基本文件的.xds文件, 或者至少没有被它损坏(每一帧可以有自己的.yds文件);
- 4) 给帧文件进行适当命名。第一个文件名字是name.3ds或name.wrl, 每个继承文件是nameFRAME#.3ds或者nameFRAME#.wrl。

采用导入3D媒体部分中的步骤可以导入帧。使用基本实体作为选中文件的名称。然后在仿真中, 使用setframe()和getframe()命令设定想要展示哪个帧。

### 2. 导入3D媒体

Flexsim 可以导入几种类型的3D 媒体, 包括3ds、wrl、dxf和stl文件。导入方法有两种: 第一种, 也是最普遍的一种, 从实体的可视化属性页选中一个3D

文件即可导入；第二种，如果有一些未被任何模型实体默认使用的3D 媒体文件，但需要在模型运行过程中使用这些3D 媒体文件来动态改变模型实体的3D显示。按如下步骤将3D文件导入到Flexsim中：

- 1)建立可视化工具；
- 2)为视景显示选择导入形状；
- 3)在文件名/域段中选择想要导入的3D 文件；
- 4)设定最小放大倍数(通常为0，除非希望在确定放大倍数下看不到图形)；
- 5)设定最大距离(通常100000，除非希望在图中移动视图时看不见图形)。

但是在进行3D媒体的导入和制作并像描述那样的简单。进过总结，我们提出一些导入3D媒体的建议，主要有以下5条：

1)使用形状因子.每一个导入的媒体文件都有特定的缩放比例和偏移量设置，这可能导致所导入的3D 模型与实体的边界不符。这种情况下，从可视化属性页视窗中编辑实体的3D 形状因子，使它在实体黄色边界框内。

2)使3D实体显示Flexsim定义的颜色。当你自己设计，或者从互联网上获取3D 文件时，它们常常可能在3D 模型中预先定义颜色和素材。

3)如果导入到Flexsim中的3D实体上定义了素材，则将显示这些素材，而不是在Flexsim中定义的颜色。如果需要实体的Flexsim 颜色显示在3D 实体上，则需要改变3D 文件的顺序。在3D 文件中，多边形的颜色显示必须在定义任何素材之前定义。这需要技巧来完成，并取决于所使用的3D 建模程序。

4)使用3D帧使实体更栩栩如生。对于任何3D 文件均可为其指定帧，可通过创建不同的3D 模型，然后将其存储为<原始文件名> FRAME<帧号>.3ds来实现。比方说，操作员的原始3D文件是Operator.3ds。如果用命令setframe(current,0)设定其帧为0，就会绘制这个图形。它的其它帧的定义在OperatorFRAME1.3ds、OperatorFRAME2.3ds等中。如果调用setframe(current, 3)命令，操作员将绘制<原始文件名>FRAME3.3ds 中指定的3D 文件。细节层次可以为给定的3D 文件指定多个层次的细节。这能够明显地增加模型绘制速度。离实体越远，绘制的细节越少，这样可以提高速度。

5)细节的层次.LOD 文件是由一个共用名称绑定在一起的逐步简化的3D 形状，这个名称是：file.3ds / fileLOD1.3ds.如果一个实体使用有LOD的3D形状，则此实体显示的3D形状取决于实体到视图镜头位置的距离.0是基本LOD-file.3ds；1

是第一个 LOD-fileLOD1.3ds；2 是第二个 LOD-fileLOD2.3ds；N 是第 N 个 LOD-fileLODn.3ds。LOD 文件用来显示实体的不同层次，观察者近时显示较高层次的实体，观察者远时显示较低层次的实体。LOD 提高模型在视图视窗中的显示速度。LOD 通过在给定时间上仅仅显示少数几个高层次的重要多边形形状，可以使模型采用更多的多边形增强 3D 形状。

### 4.3 Flexsim 运动学功能

在上一节中我们介绍了如何在 Flexsim 中导入 3D 媒体，但是仅仅导入 3D 媒体是没有用的。Flexsim 中的实体需要具有各种各样的动作来完成不同作业的操作。因此，我们需要对导入系统的场桥，岸桥，集卡等 3D 媒体进行动作的设计，使其具有一定的运动动作。

利用 Flexsim 中的运动学可以使一个实体同时执行多个运动操作，并且该实体的每个运动都具有不同的运动属性。如果不使用运动学功能，模拟运动行为的最简单的方法是在模型树中定义不同层次的实体顺序，每个实体分别去模拟一种动作，但是这样的解决方法不是很好，会使得整个模型显得不友好而且枯燥。运动学功能则允许一个实体同时实现几种运动。

下面介绍进行运动学操作的简单步骤。首先要调用 `initkinematics` 命令，初始化运动数据，保存类似起始位置和实体转角等所需要完成的动作的数据。在初始化完成之后，然后使用 `addkinematic` 命令给出实体后面的行进/旋转操作。比如实体处于平面坐标之中，我们可以假设实体在第 3 秒钟开始在  $x$  轴方向行进 10 单位。然后，假设实体在第 4 秒开始在  $y$  轴方向行进 10 单位，并且实体在该方向的运动具有初始速度和加速度等一系列参数。这两个运动的结果是实体在第 3 秒开始时沿  $x$  轴方向行进，然后从第 4 秒开始同时也开始沿  $y$  轴方向运动，以一个抛物线的运动轨迹到达目的地。这里需要特别强调的是每一个独立的运动都用 `addkinematic` 命令添加。然后，可以调用 `updatekinematics` 命令来在运动执行动作过程中刷新视图。

本文中制作的岸桥等运动实体是以 Flexsim 中提供的 BasicTE 类为基础，根据岸桥等的动作要求开发我们需要的类。然后，把相应的 3D 媒体导入我们制作的类，就形成了在下文中进行集装箱堆场堆存策略比较研究的模型中使用的实体。



## 第5章 基于仿真的堆场堆存策略的比较研究

### 5.1 堆场堆存策略的分析

按照决策时间和决策内容, Rommert Dekker<sup>[30]</sup>将堆存策略划分为如下4个阶段:

1.长期的战略规划:具体的决策包括装卸设备的选择,码头堆场的整体划分和设计,堆场箱区的分布等问题。

2.中期的规划决策:战略决策可能是一年或者几个月的一段时间内对集装箱码头实行管理的策略。包括堆存场地规划,堆场中场桥数量的配备等等。

3.短期的操作决策:决策内容包括如何在堆场中为即将到港的船舶预留集装箱堆存箱区,确定集装箱的堆放位置等比较具体的决策。

4.全自动化操作:该阶段主要是与全自动码头出现而提出的。全自动码头是指在集装箱码头使用自动化作业机械。比如水平运输设备使用自动引导车,堆场中的装卸机械使用自动场桥。

堆场的堆存容量是由集装箱码头所处的位置以及港口的集装箱吞吐量共同决定的。堆场中的堆存策略则是堆场管理人员根据码头中的集装箱的构成特点进行选择。根据集装箱在整个码头的物流系统中的流向,我们可以把集装箱分为三种:进口箱,出口箱以及中转箱。由于三种箱在集装箱码头中的流向不同,造成其作业要求也不尽相同。因此就要对三类箱子安排不同的堆存策略和堆存位置。比如对于出口箱来说,因为出口箱的到达具有随机性,因此堆场管理人员会在堆场中为进口箱预留一定的位置,并且在进行进口箱的堆存时,还要考虑到装船时船舶的稳定性,尽量把出口箱在堆场中按重箱压轻箱的原则堆存。下面按以上的分类进行具体分析<sup>[44-45]</sup>。

#### 1.进口重箱堆存策略的分析

为了更好的进行进口重箱堆存策略的分析,有必要介绍一下进口重箱的作业流程。进口重箱的作业流程分为进场和出场两个部分。首先介绍进场作业:当集装箱船到达泊位时,首先由泊位上的岸桥将进口重箱从船上卸下,放在在岸桥处等待的水平运输设备,然后由水平运输设备将进口重箱运至堆场,最后由场桥将其放置在指定的箱位。其次介绍出场作业:首先外集卡进入堆场中进口箱的指定位置时,然后场桥将要提取的集装箱从堆场中取出将其放置在外集卡上,最后由

外集卡车托运出闸口。经总结，进口箱作业有如下特点：

1)外集卡进场取箱时间的不可预知性。为了避免进口重箱的提箱作业与其他作业冲突，进口重箱通常会采取整贝堆放，也就是说堆放进口重箱的贝位中不会出现出口箱和中转箱。

2)按提单进行进口箱的提箱。根据这个特点，在实际操作时将同一提单号的进口重箱堆存在同一贝位。首先，通过与货主或承运人进行沟通协商，确定提箱的顺序。然后，规定外集卡按照制定提箱顺序按顺序进入码头堆场提箱，这样就能明显的提高提箱服务的质量，而且为码头自身节约大量作业成本。这种堆存规则的缺点是：堆场贝位和平面箱位的使用过多；提箱顺序的优化需要码头和货主以及承运人之间进行协商，实际操作起来难度很大。

## 2.出口重箱和中转箱堆存策略的分析

为了更好的进行出口重箱和中转箱堆存策略的分析，有必要介绍一下进口重箱和中转箱的作业流程。出口重箱的操作流程也包括进场和出场两部分。首先介绍进场部分：首先外集卡将出口重箱运输至堆场中指定的贝位，然后由堆场中的场桥将出口重箱放置在指定的箱位。其次介绍出场作业：首先由场桥将出口重箱放置在内集卡上，然后运送到指定的岸桥处等待装船，最后通过岸桥将出口重箱装到船舶上指定的位置。中转箱操作主要包括卸船和装船两部分。卸船操作时，首先把船舶上的中转箱由岸桥卸下，然后通过内集卡将中转箱运至堆场中的指定位置，场桥将中转箱放置在堆场中指定的位置；装船作业时，首先由场桥将出口重箱放置在内集卡上，然后由内机卡将中转箱运至指定的岸桥处，最后由岸桥将出口重箱装堆存在集装箱船的指定位置。出口重箱及中转箱的堆存策略主要需要考虑以下几点：

1)保证船舶安全性和堆场的作业效率。出口箱在集装箱堆场内进行堆存时，不但要考虑出口箱在进场作业的作业效率，同时也要考虑装船作业的作业情况。如果集装箱在堆场中的堆存和船舶的配载相差较大，要么造成大量的翻箱作业，要么集装箱的装船顺序和原计划不一致，可能导致船舶的稳性变差，对于集装箱船舶和集装箱在海上的运输带来不利的影响。

2)进行精确地配载方案的制作，同时制定备用方案来应对各种突发状况，尽量减少船舶上的倒箱操作。充分利用某些港口倒箱免费的有利条件，降低作业成本。如果危险品箱、空箱、冷藏箱的数量比较多，或者由于船舶结构限制等原因

导致倒箱操作不可避免时，应该合理安排倒箱。

5.1.1 出口箱区堆存策略的选择

集装箱堆场的堆存策略很多，主要分为分堆和混堆，由于混堆的堆存策略很多而且很复杂，并且在实际中的应用不多，所以我们主要考虑一下三种基于分堆堆存策略的三种堆存策略<sup>[46]</sup>：

1.列优先原则。即优先安排列进行集装箱的堆存，首先堆满远离车道的列，然后堆满相对靠近车道的列，如下图所示。和列优先原则相似的有排优先原则。

4	8	12	16	20	
3	7	11	15	19	23
2	6	10	14	18	22
1	5	9	13	17	21

图 5.1 列优先原则示意图  
Fig.5.1 Table of column priority principle

2.随机堆存原则。随机堆存原则是集装箱在堆场中进行堆存的一种最直接的方法。随机堆放的计划性较差，但可根据作业的繁忙程度随时调整集装箱的位置，采用随机原则堆存时，收箱作业速度较快。

	13		14		
12	11	3	7	10	15
2	5	1	4	8	6

图 5.2 随机原则示意图  
Fig.5.2 Table of random principle

3.按船舶堆存原则。将要装载到同一艘船的集装箱同贝堆放，数量较多的时候甚至可以堆放在一个街区之内。按船舶堆存的好处是：减少了集卡的水平运输距离，提高了装船作业的效率。

5.1.2 翻箱原则的选择

翻箱作业是堆场中不可避免的现象，同时翻箱作业对于集装箱的运营来说没有任何的价值。因此，减少堆场翻箱作业，改进翻箱策略，可以有效的降低码头作业成本，提高码头作业效率。在集装箱码头堆场操作中，由于各种原因导致的翻箱作业主要包括以下三种：移箱翻箱，提箱翻箱，装船翻箱。其中移箱翻箱发

生的概率很小，即使引发堆场中无用功作业，一般情况下也不会对港口服务效率产生过大影响。提箱翻箱出现的原因是进口箱区中集装箱堆存的顺序和客户提箱顺序不一致。提箱操作对码头的提箱作业效率有一定影响，造成了提箱作业成本的提高。装船翻箱产生的主要原因是由出口箱区中集装箱堆存位置安排的不合理或这配载计划不合理等原因造成的。装船翻箱操作不仅影响了港口装卸船的服务效率，更导致了码头运营成本的提高。

本文主要考虑最主要的翻箱类型-装船翻箱，通过对国内外相关文献的学习和翻箱技术在实操中使用情况的调查，着重介绍几种主要的翻箱原则<sup>[47-49]</sup>：

- 1.贝内翻箱原则：即同一贝位的集装箱不翻往其他贝位，这样就缩短移箱距离，提高发箱和翻箱作业效率。
- 2.就近翻箱原则：即将集装箱翻向最近的可用列中的较矮的列上，以减小移箱距离，加快发箱速度，缩短集卡等待时间。具体操作如下图所示：

4	8	12	16	20	
3	7	11	15	19	23
2	6	10	14	18	22
1	5	9	13	17	21

图 5.3 就近翻箱原则

Fig.5.3 Closest position restacking principle

比如要对14号箱子进行操作，则10号箱按照就近翻箱原则就要翻到9号箱的上面。

- 3.最矮翻箱原则：即在翻箱时，将集装箱翻向同一贝内最矮的一列，尽量平衡贝位内的平均堆存高度。如下图中，若集卡要提取19号箱，按照最矮原则，20号箱将翻向最右侧的空列。

4	8	12	16	20		
3	7	11	15	19	23	
2	6	10	14	18	22	
1	5	9	13	17	21	

图 5.4 最矮翻箱原则

Fig.5.4 lowest column restacking principle

翻箱作业的适用原则还有远离车道原则和随机原则,本文在不同的集装箱堆场堆存策略下,选择就近翻箱原则和最矮列原则,对不同的集装箱堆场堆存策略进行比较。

### 5.1.3 比较指标的选择

选择不同的堆存策略进行比较时,要对仿真的结果进行比较,需要确立主要的几个性能指标,才能更好的认识具体每个堆存策略的优缺点。由于集装箱堆场是一个复杂的系统,影响系统的因素也很多,但是其中的一些指标是比较重要的,因此我们选择如下几个指标对相应的堆存策略进行比较。

- 1.岸桥利用率:岸桥平均作业时间占总时间的百分比;
- 2.场桥利用率:场桥平均作业时间占总时间的百分比;
- 3.集卡利用率:集卡平均作业时间占总时间的百分比,集卡有等待状态,空闲状态和作业状态;
- 4.集卡的运输距离:单位时间内平均每个集卡的运输距离总和;
- 5.集装箱的作业量:单位时间内平均被操作的集装箱的数量。

本文中主要考虑的是出口箱区的堆存策略,所以考虑的作业箱量,也是作业的出口箱量。

## 5.2 基于 Flexsim 的仿真模型

### 5.2.1 仿真模型的分析

由于集装箱堆场是一个十分复杂的离散模型,因此会受到很多随机事件的影响,而要把所有的随机事件在仿真模型中去讨论,就不很现实。因此,为了更好的突出是对集装箱堆场堆存策略的比较研究,我们对本文中的堆场模型作出以下设计及假设:

1.本文中的集装箱码头中,码头前沿共有两个泊位,每个泊位各分配一个岸桥。出口箱区和进口箱暂存区。其中进口箱暂存区在前,有两个街构成,主要目的是加快卸船作业,提高对船舶的服务效率。出口箱区在后,共两个街区,每个街区中有一个场桥进行集装箱作业。同时我们假设内集卡的数量为 8。

2.集装箱堆场系统中的集装箱对象均统一规格为 20 英尺,并且一辆集卡上只能装有一个 20 英尺的集装箱,相应的箱位规定为堆存 20 英尺集装箱的箱位。

3.集装箱在堆场中的位置用街、贝、行、层四个参数来表示,模块名称以及

变量命名规则和堆场技术参数保持一致。

4.岸桥和场桥以及集卡的参数设定。岸桥和场桥是集装箱码头主要的两种装卸设备，集卡怎是主要的运输设备，其作业效率直接影响到码头的作业效率，因此也是模拟仿真系统的重要输入参数之一，因此在设置参数的时候将按照一定比例进行设计。

6.每天的进出口集装箱量。本文中选择一天为模拟时间，对集装箱堆场的堆存策略进行比较研究。假设每天的进口箱量为 400 个 20 英尺的标准箱。

7.堆场堆存策略的选择。根据第四章的内容选择列优先堆存原则，随机堆存原则以及按船舶堆存原则。

8.翻箱策略的选择。在第四章中我们介绍了，贝内翻箱原则，就近翻箱原则和最矮列翻箱原则，在仿真模型中采用最矮列翻箱原则的条件下，对三种不同的集装箱堆场堆存策略进行比较。

9.本文中的进口箱暂存区采用的堆存方式是随机堆存策略，因为这样最能减少卸船作业时间，从而加快出口箱子的装船作业。

10.本文中堆场的利用率统一为 75%。

5. 2. 2 仿真模型的建立

Flexsim采用面向对象的技术，大部分Flexsim对象都是FixedResource或Task-Executor对象的子对象，对象拥有其父对象所有的接口和相应的功能，用户相对比较容易很快掌握子对象的使用。下图详细表了Flexsim的家族树。

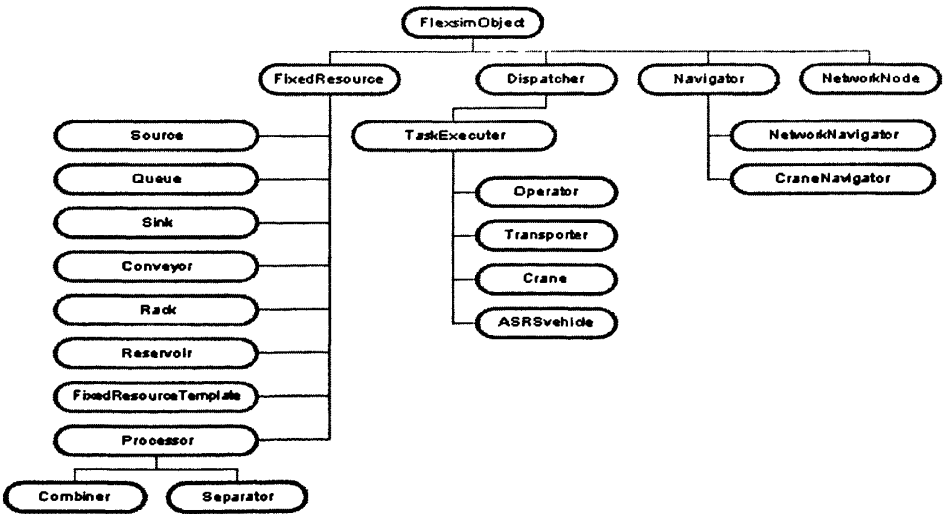


图 5.5 Flexsim 家族树

Fig.5.5 Flexsim family tree

本文使用的是 Flexsim 的 4.0 版本，由于 Flexsim 是处理生产物流流程的软件，所以实体具有通用性，并不针对某一特殊领域。因此，本文在进行集装箱堆场堆存策略的比较研究时，很多的实体外观形状并不符合集装箱码头的各个实体的外观。但是为了更好的进行可视化，我们及利用 Flexsim 中对象可以继承的特殊性质，就在 Flexsim 中导入新的 3D 模型,具体步骤如下：

- 1.建立可视化工具；
- 2.为视景显示选择导入形状；
- 3.在文件名/域段中选择想要导入的3D 文件；
- 4.设定最小放大倍数（通常为0，除非希望在确定放大倍数下看不到图形）；
- 5.设定最大距离（通常 100000，除非希望在图中移动视图时看不见图形）。

具体的 3D 将在下文中详细介绍。下面按照 Flexsim 的标准仿真过程进行详细介绍。

#### 1.构建模型布局

将仿真所需要的对象模型从对象库中拖拽到仿真视图窗口中的适当位置。下面详细介绍本模型中使用的主要的仿真实体。

1)Source：本文中有两个Source.其中一个负责堆场中集装箱的初始化工作，并且和堆场实体一起决定堆场集装箱的堆存方式。另一个负责对到来船舶中集装箱初始生成。

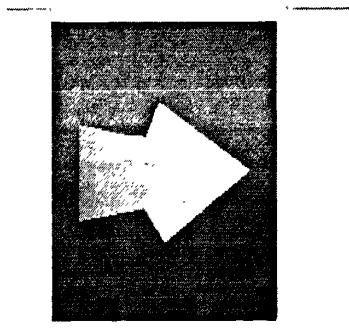


图 5.6 发生器

Fig.5.6 Source

2)堆场：负责模型中集装箱的堆存。

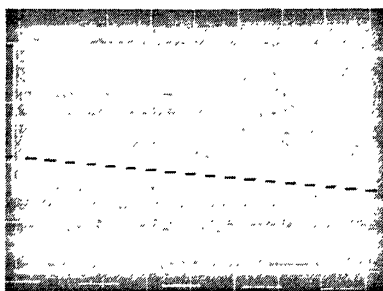


图 5.7 堆场

Fig.5.7 Yard

3)集装箱：集装箱是系统中的流动实体。

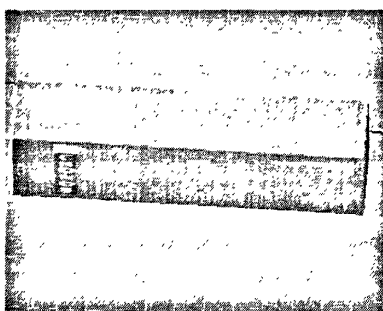


图 5.8 集装箱

Fig.5.8 Container

4)岸桥：负责集装箱船的装卸作业

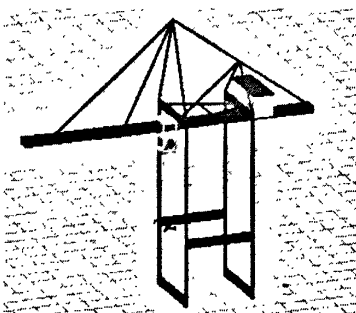


图 5.9 岸桥

Fig.5.9 Quay crane



5)集装箱船：在仿真期间，在泊位接受作业的客户群。

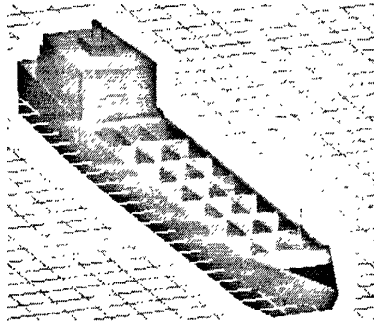


图 5.10 集装箱船

Fig.5.10 Container ship

6)场桥：负责集装箱堆场中的存取集装箱的作业。

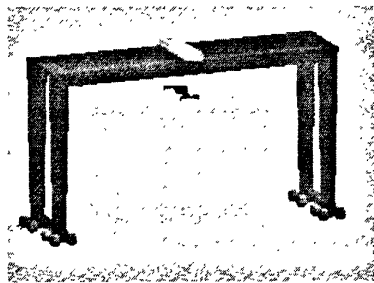


图 5.11 场桥

Fig.5.11 Stacking crane

7)集卡：负责集装箱码头中集装箱的运输。

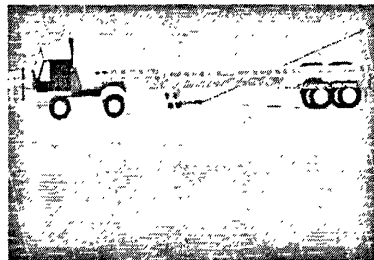


图 5.12 集卡

Fig.5.12 Container truck

将各个实体移到 Flexsim 仿真视图窗口中，并且根据实际中码头的基本布局  
和外观，进行美化后，得到的具体布局如下图所示：

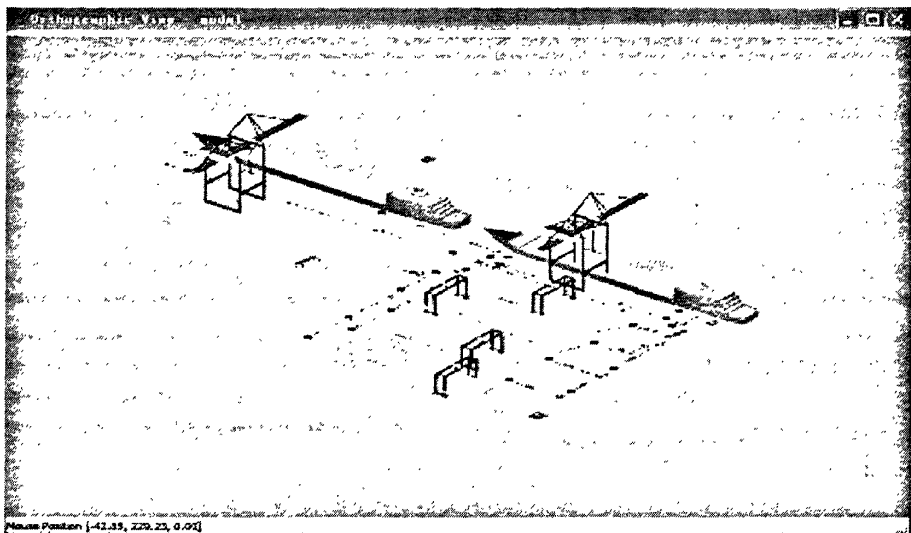


图 5.13 仿真布局图

Fig.5.13 Simulation layout

2.定义物流流程

集装箱在堆场和船之间的运输涉及到三种运输设备：集卡、岸桥和场桥。首先，集装箱的运输由集卡来实现，这样集卡就有这样一个任务序列:Travel->Load-> Travel->Unload。在集装箱装入集卡的作业由岸桥设备完成，卸载放入堆场的作业由场桥设备完成，所以集卡的任务序列中 Load/Unload 的任务就应该由岸桥和场桥来完成。也就是说岸桥和集卡之间，场桥和集卡之间是协同作业的，下图中表示了主任务序列和子任务序列之间的关系。

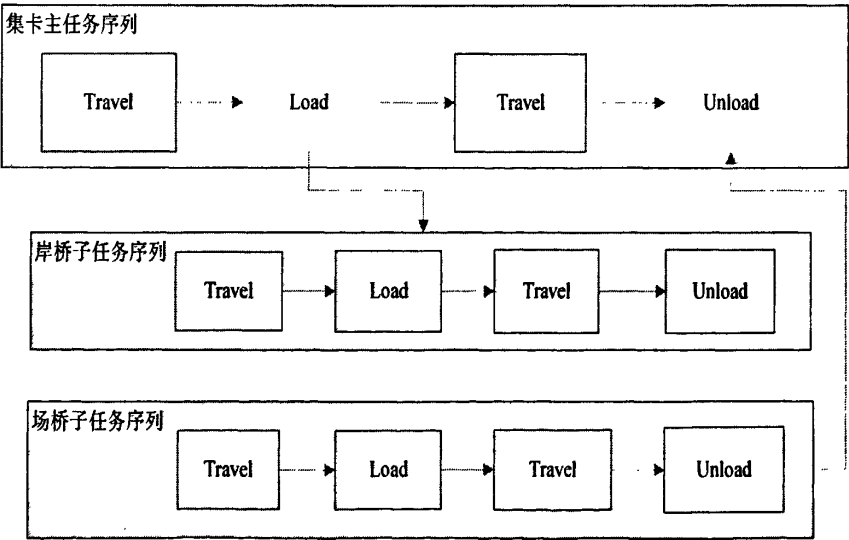


图 5.13 集装箱搬运过程的任务序列图

Fig.5.13 Mission sequence diagram

下面以分别以进口箱和出口箱的作业流程详细说明。对进口箱来说，集卡行驶至岸桥等待装箱，然后岸桥从船上将集装箱卸下装到正在等待的集卡上，装箱后的集卡行驶到堆场，场桥将集装箱从集卡上卸下，堆放到进口箱区中。对于出口箱来说，集卡行驶至出口箱区场桥处等待装箱，然后场桥将集装箱从堆场中取出，放在正在等待的集卡上，装箱后的集卡行驶至泊位处等待装船，岸桥将集装箱从集卡卸下，然后堆到船上。根据进出口箱的详细流程，我们对 Flexsim 中的实体进行连接，效果如下图所示：

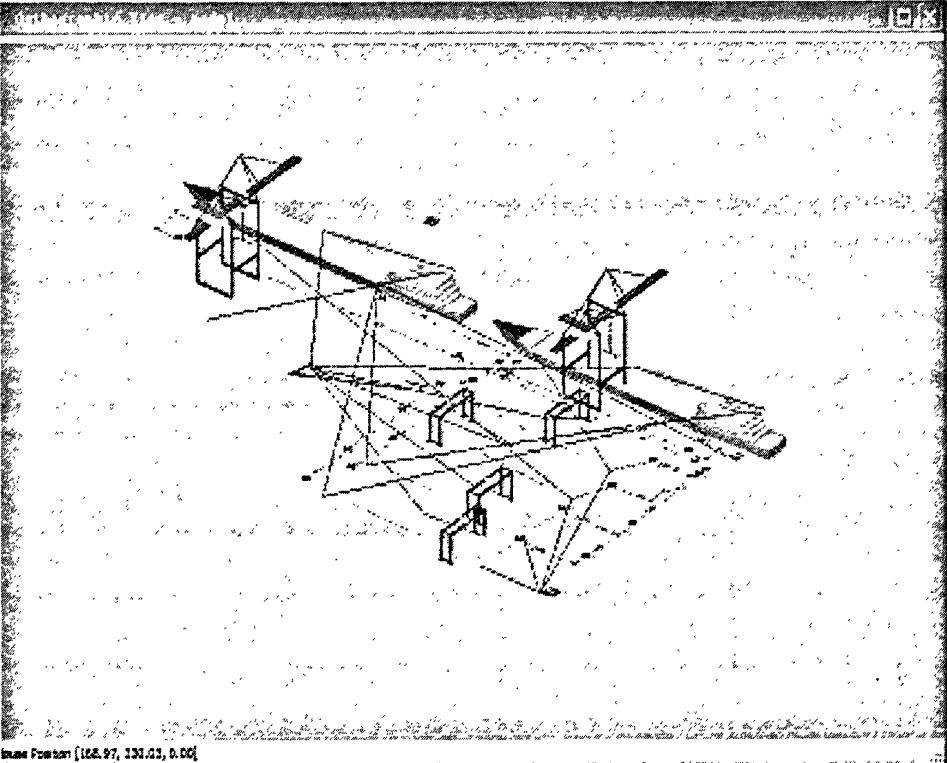


图 5.14 实体连接图

Fig.5.14 Resource connection diagram

3.编辑对象参数

根据前文中的模型的假设和 Flexsim 软件的具体特点，我们对仿真模型中的各个实体进行参数的设置。下面列出比较重要的部分实体的具体设置。

1)场桥

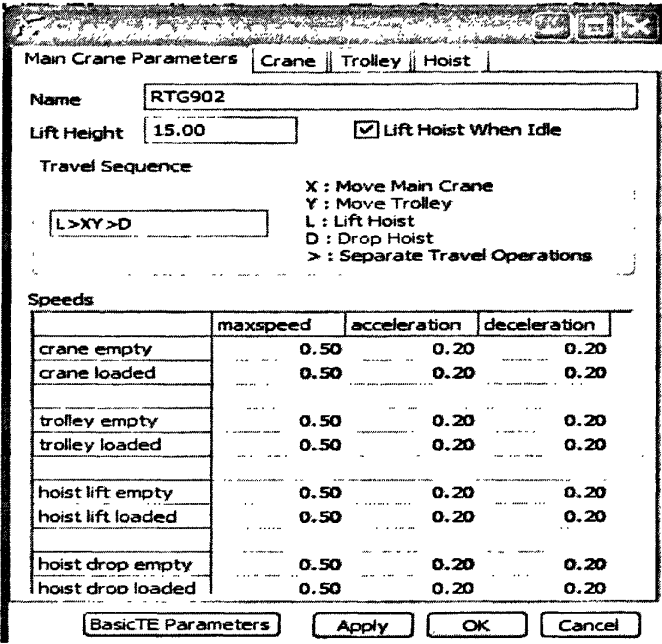


图 5.15 场桥参数图

Fig.5.15 Parameter of stacking crane

点击 BasicTE Parameters，具体设置如下：

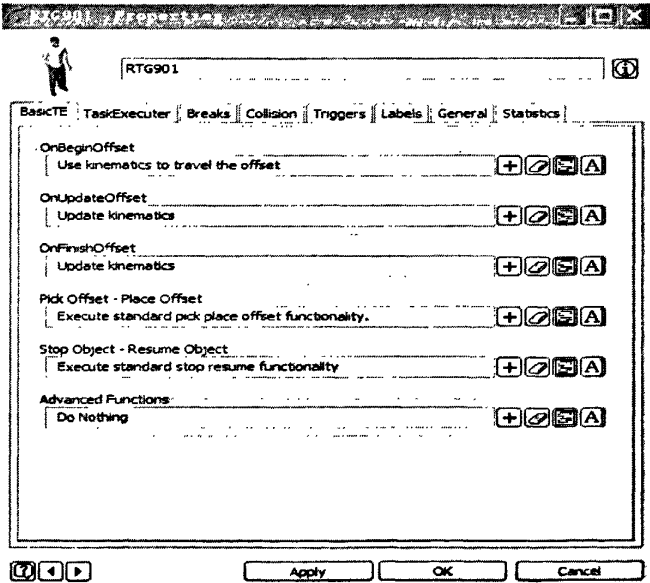


图 5.16 BasicTE 参数图

Fig.5.16 Parameter of BasicTE



3)集卡

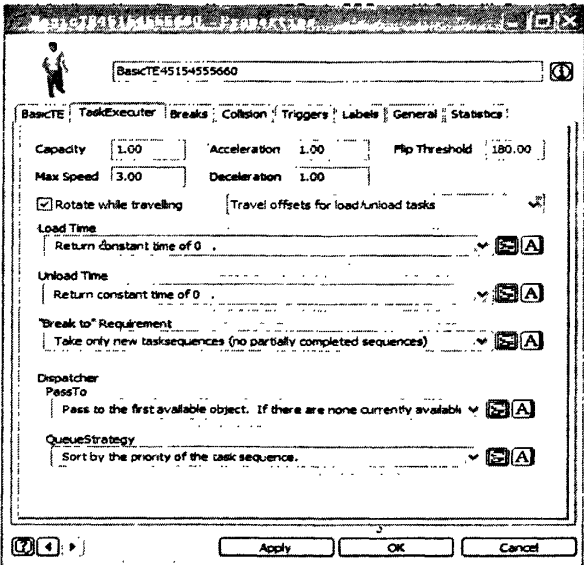


图 5.19 BasicTE 参数图

Fig.5.19 Parameter of BasicTE

4.编译模型。

在整个模型建立完之后，首先按 F2 进行编译，然后按 reset 进行重置，最后点击 run 运行。效果如下图所示：

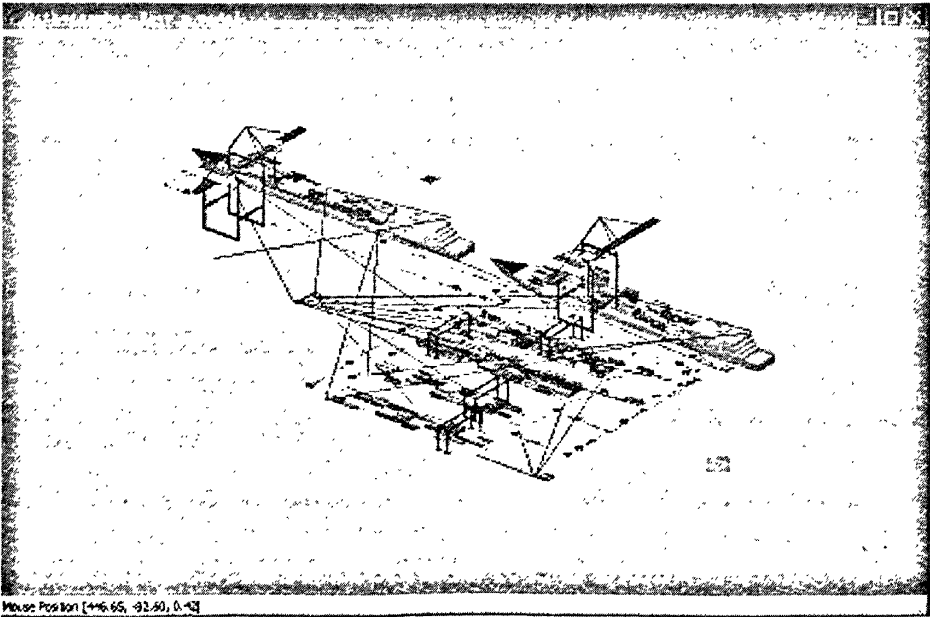


图 5.19 模拟示意图

Fig.5.19 Simulation diagram

### 5.3 仿真模型数据的统计及分析

Flexsim 提供了丰富的统计数据，以方便用户分析仿真系统，进而能更好的发现仿真模型中各个部分的运行状况和作业情况。

要查看仿真报告，当前数量图标和停留时间柱状图，建模人员必须打开实体的 Stats Collecting 选项。由于历史数据存储需要大量的硬盘空间，因此历史记录统计是默认关闭的。需要按照下列步骤打开。

1.在模型视窗中选择进行统计的实体。按住键盘上的 shift 键，拖动鼠标框选择进行统计的实体。按住 Ctrl 键，然后点击一个实体，可以把一个实体从选定集合中删除，也可以讲一个实体添加到选定集合中。

2.要收集选中实体的历史统计数据，点击 Stats/Stats Collecting/Selected Objects on，并确认已选中 Global On。

3.在模型视图上用鼠标右键点击所要统计的实体，在弹出的窗口中选择 Properties 选项。查看窗口中的 Statistics，根据需要可以进行各种操作。

利用以上方法，以随机策略下的岸桥为例，查看其使用情况，如下图所示。

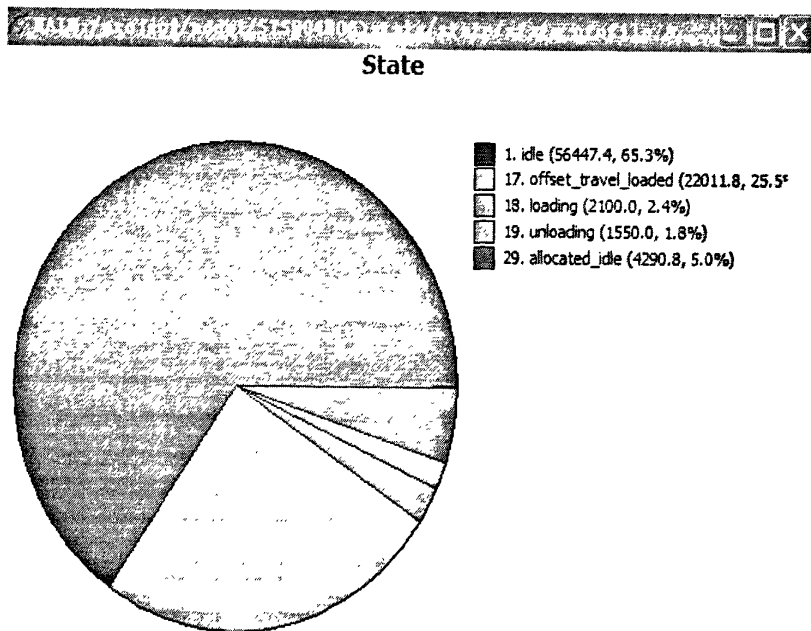


图 5.20 岸桥状态图

Fig.5.20 State of quay crane

接下来，我们在集装箱堆场堆存策略分别为随机堆存策略，按列优先原则，以及按船舶装载策略三种方式下，对第四章中提出的性能指标的数据进行统计。本文对每种策略分别进行十次实验作为一个样本，统计分析结果，得出各性能指标的平均值，其中

$$\bar{X} = \bar{X}_n = \frac{X_1 + X_2 + \cdots + X_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

(5.1)

1.岸桥的使用情况

表 5.1 岸桥状态分析表  
Tab.5.1 State analysis of quay crane

岸桥状态 堆存策略	idle	offset travel-loaded	loading	unloading
随机策略	69.70%	26%	2.60%	1.70%
按船舶策略	60.50%	34.20%	3.20%	2.10%
列优先策略	62.50%	32%	3.20%	2.30%

2.场桥的使用情况

表 5.2 场桥状态分析表  
Tab.5.2 State analysis of stacking crane

场桥状态 堆存策略	idle	offset travel-loaded	loading	unloading
随机策略	53.30%	42.70%	2.50%	1.50%
按船舶策略	55.40%	40.30%	2.60%	1.70%
列优先策略	56.30%	39.00%	2.70%	2.00%



3.集卡使用情况

表 5.3 集卡状态分析表

Tab.5.3 State analysis of container truck

集卡状态 堆存策略	idle	block	travel- loaded	offset travel-loaded	allocated idle
随机策略	0.00%	34.60%	19.80%	3.40%	42.20%
按船舶策略	0.00%	30.10%	25.70%	4.90%	39.30%
列优先策略	0.00%	32.50%	23.90%	4.80%	38.80%

4.集卡的运输距离：单位时间内集卡的运输距离总和。

随机策略： $S_1 = 50422.39$

按船舶策略： $S_2 = 65556.22$

列优先原则： $S_3 = 60882.58$

5.出口箱作业量

随机策略： $Z_1=308$

按船舶策略： $Z_2=396$

列优先策略： $Z_3=352$

对以上得到的数据进行计算和汇总，得到性能指标/堆存策略的联合图表：

表 5.4 堆场策略比较表

Tab.5.4 Comparison of different stacking strategies

集卡状态 堆存策略	岸桥 使用率	场桥 使用率	集卡 使用率	集卡行驶距离	出口箱作业量
随机策略	30.30%	46.70%	23.20%	50422.39	308
按船舶策略	39.50%	44.60%	30.60%	65556.22	396
列优先策略	37.50%	43.70%	28.70%	60882.58	352

下面我们根据上表，对三中堆存策略进行分析。

首先，单独考虑随机堆存策略。在单位时间内，其岸桥使用率最低，集卡使

用率最低,集卡的形式距离最低,作业的出口箱量也最低。其主要原因是:在随机策略中,堆场的堆存策略没有任何的计划性,没有对集装箱进行任何一种分类,因此集装箱的堆存杂乱无章,因此造成了较多的翻箱操作,增加了许多做无用功的时间,这就解释了为什么在随机策略下,尽管场桥使用率在三种堆存策略下最高,而其他四项指标都很低的原因。综合考虑在本模型的情况下,随机堆存策略是最差的一种堆存策略。

然后,我们对按船舶优先策略和列优先策略进行对比,按船舶优先策略下的五个性能指标都优于按列优先原则,因此从仿真模型给出的结果来看,按船舶策略优于按列优先堆存策略。但是,在实际情况中,按船舶堆存具有局限性,因为可能导致堆场的利用率比较低,也可能导致收箱作业的速度比较慢。也就是说考虑到本文模型中不能反映的因素,按船舶堆存策略不一定优于按列优先堆存原则。

#### 5.4 基于仿真的数据的评价方法

在上节中,根据仿真模型的得到数据,对三种堆存策略进行了简单的比较。下面我们根据 Flexsim 仿真数据特点,提出一种对集装箱堆场堆存策略进行比较的方法。

1.评价对象集合:包括随机堆存策略,按船舶堆存策略,按列优先堆存策略。

2.评语的集合:指的是对某种堆存策略某个指标所表现出的数学结果的评价,假设有三种评语:好,中,差。比如对随机策略下集卡的利用率的指标的评价为中。利用数学符号表示如下:

$$V = \{v_1, v_2, v_3\}$$

3.建立评价指标因素集合:本文中的指标上文中提到的 5 个指标。利用数学符号(按岸桥利用率,场桥利用率,集卡利用率,集卡的运输距离,集装箱的作业量的顺序)表示如下:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$$

4.建立评价指标的权重:本文中的权重是对堆场堆存策略进行比较所使用的五个指标赋予权重。比如某专家最看重集卡的利用率,就可以为集卡的利用率赋予最大的权值,这里需要注意的是,所有权值的总和为 1。具体数学表述如下:

$$A = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$$

5.建立评价矩阵：比如对于随机策略下集卡的利用率，请 100 位专家作出评价，给出“好”的评价的有 20 位，“中”的 40，“差”的有 40 位，则对随机堆存策略下的集卡利用率的单因素评价向量为  $R_1 = (0.2, 0.4, 0.4)$ 。某种堆存策略的所有单因素的评价向量构成的矩阵为这种策略的评价矩阵。值得注意的是，本文中的评价矩阵的确立要充分考虑到上一节中通过 Flexsim 的模拟仿真得到的数据和实际操作中的情况来进行确定。评价矩阵的具体数学表示如下：

$$R = (R_1, R_2, R_3, R_4, R_5)^T$$

6.做合成运算，并进行归一处理。具体计算方法如下

$$B = A \circ R \quad (5.2)$$

其中  $\circ$  表示矩阵的合成运算， $\wedge$  代表在几个数中取小， $\vee$  代表在几个数中取大。

举例对按船舶堆存和按列优先堆存原则进行比较，假设评价指标权重向量为

$$A = (0.1, 0.1, 0.2, 0.2, 0.4)$$

1)假设按船舶堆存策略的评价矩阵为

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 \end{pmatrix}$$

则

$$B_1 = A \circ R_1 = (0.4, 0.3, 0.2)$$

进行归一化后

$$B_1 = (0.44, 0.33, 0.23)$$

由最大隶属度原则，按船舶策略为一种“好”的堆存策略，且隶属度为 0.44。

2)假设按列优先堆存原则的评价矩阵为

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 \end{pmatrix}$$

则

$$B_2 = A \circ R_2 = (0.3, 0.4, 0.3)$$

根据最大隶属度原则，按列优先堆存原则属于评价为“中”的堆存策略。通过上述比较，我们发现按船舶堆存原则优于按列优先堆存原则。但是要进行一次特殊情况的说明，当两个策略都得到“好”评价时，就要进行隶属度大小的比较。隶属度相对比较大的则为更加优秀的策略。

## 第6章 总结

### 6.1 论文总结

通过几个月以来对国内外相关文献的阅读和在大连国际集装箱码头的调研,本文对集装箱堆场堆存策略进行了比较研究。总的来说,本次研究取得了以下一些成果:

1.把集装箱堆场问题的研究和码头前沿的装卸船作业联系在一起,更好地表现了堆场存在的现实意义,其目标之一就是为了方便来港船舶的装卸船作业,这样使得整个研究更加具有现实意义。

2.利用排队论的知识对整个集装箱码头进行了全面分析,同时利用实际数据对集装箱出口箱的进场模型进行了分析。通过这些研究为本文的仿真研究做好了准备工作,使得仿真结果更加符合实际情况。

3.开发了基于 Flexsim 可视化系统。由于 Flexsim 出色的 3D 图形表示,使得整个码头前沿的装卸工作的表现更加具体,可以通过仿真模型清楚的看到岸桥,场桥,集卡的工作情况,更好的表现了几种集装箱堆场堆存策略的不同之处。同时,提出了一种基于仿真数据的评价方法,使得本文中对集装箱堆场堆存策略的比较更加系统。

本文以实际需求为目标,对集装箱堆场堆存策略进行比较研究,通过分析整个集装箱码头物流系统,充分运用 Flexsim 软件,对仿真结果进行了数据分析,提出了一种选择堆场堆存策略的决策方式,具有针对性和实用性。

### 6.2 进一步的研究方向

对集装箱堆场堆存策略进行比较是一个很复杂的问题,尤其是和实际情况联系到一起的时候,进行研究的难度就会更大。本文主要考虑了基于 Flexsim 的集装箱堆场出口箱区的堆存策略的比较研究,而从实际应用的角度来说还需要做进一步改进。具体来说,有以下几点。

1.本文是以加快集装箱码头前沿作业为目标,主要考虑前方堆场的出口箱区的整个物流流程。但是为了更加具体的考虑整个码头的物流流程,还应该考虑到后方堆场中的进口箱区。

2.本文中进行比较的堆存策略是实际中比较常见的几种堆存策略。目前国

内外学者对集装箱堆场堆存策略进行了大量的理论研究,因此对这些堆存策略进行比较研究,能使得这些堆存策略在实际生活中得到更好的应用。

3.本文的仿真规模比较小。因此,在某种程度上还是不能准确的反映不同的堆场堆存策略对一个港口的影响,因此,以一个港口的实际配备来进行堆场堆存策略的比较研究,效果会更加显著。

## 参 考 文 献

- [1]丁巳中,费红英,韩晓龙.港口集装箱流研究现状与分析[J].上海海事大学学报,2004,25(2):51-53.
- [2]陈思云,刘天竹.基于 Petri 网的仓储物流系统建模与仿真[J].武汉理工大学学报,2005.29.
- [3]张新艳.港口集装箱物流系统规划与仿真建模方法的研究与实现.武汉理工大学博士学位论文,2002.
- [4]朱耀明.自动化立体仓库优化调度研究.山东大学硕士学位论文,2006.
- [5]周瑞.港口集装箱物流系统建模及仿真相关技术研究.武汉理工大学硕士学位论文,2009.
- [6]靳志宏,韩俊,孙晓娜.集装箱码头泊位与岸桥协调调度优化[J].大连海事大学学报,2008
- [7]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]Dekker R, Voogd P, van Asperen E. Advanced methods for container stacking. OR Spectr 28:563 - 586, 2006.
- [9]Duinkerken MB, Evers JJ, Ottjes JA. A simulation model for integrating quay transport and stacking policies in automated terminals. In: Proceedings of the 15th European simulation multiconference. 2001.
- [10]Saanen YA, Dekker R. Intelligent stacking as way out of congested yards. Part 1. Port Technol Int31:87 - 92. 2006.
- [11]Saanen YA, Dekker R. Intelligent stacking as way out of congested yards. Part 2. Port Technol Int32:80 - 86.
- [12]Park BJ, Choi HR, Kwon HK, et al. Simulation analysis on effective operation of handling equipments in automated container terminal. In: AI 2006: Advances in artificial intelligence, Lecture Notes in Computer Science, vol 4304, Springer, Berlin, pp:1231-1238, 2006
- [13]顾启泰.离散事件系统建模与仿真.北京:清华大学出版社,1999.
- [14]吴永福,杨家其.港口集装箱运输与多式联运.北京人民交通出版社,1998.
- [15]陈戌源.集装箱码头业务管理.大连:大连海事大学出版社,2005.
- [16]刘鼎铭,王义源译.集装箱运输业务手册.北京:人民交通出版社,1992.
- [17]真虹.集装箱运输学.大连:大连海事大学出版社,2002.
- [18]谈超凤.集装箱码头堆场资源管理优化演技[D].大连海事大学,2010.
- [19]王祁培.强化集装箱堆场管理研究[J].中国水运(下半月),2010(01).

- [20]傅红霞. 集装箱码头堆场管理研究[J]. 2007, (04).
- [21]张莉. D 港集装箱码头堆场系统业务流程现状. 问题与对策[J], 2009, (01).
- [22]陆传赓. 排队论. 北京: 北京邮电大学出版社, 2009.
- [23]何选森. 随机过程与排队论. 湖南: 湖南大学出版社, 2010.
- [24]张煜, 王少梅. 集装箱码头前沿三维仿真及其方案优选[J]. 上海海事大学学报, 2006.
- [25]张静, 刘翠莲. 港口泊位服务系统的影响因素及其仿真[J]. 大连海事大学学报, 2008.
- [26]王建华. 企业竞争力评价的系统模型及方法[J]. 上海交通大学学报, 2002.
- [27]陆牡丹. 企业想信息系统成功评价研究[D]. 大连理工大学, 2004.
- [28]曾巧生. 企业竞争力评价指标体系[J]. 江西化工, 2002.
- [29]程光. 工业工程与系统仿真应用. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [30]Rommert Dekker. Online rules for container stacking. OR Spectrum, 2010, Volume 32, Number 3: 687-716.
- [31]肖钟熙. 香港港急需 10 号集装箱码头?[J]. 集装箱化, 2008, [10].
- [32]鲁懿春. 新加坡港在港口操作中的创新[J]. 集装箱化, 2004, (12).
- [33]杨扬. TCT 集装箱码头堆场资源优化研究[D]. 大连海事大学, 2010.
- [34]刘鸣华. 加强集装箱码头堆场管理研究的策略[J], 沿海企业与科技, 2009, (12).
- [35]张艳, 韩晖. 降低集装箱码头堆场翻箱率[J]. 集装箱化, 2008, (04).
- [36]李坤. 集装箱码头堆场翻箱算法研究[J]. 中国储运, 2010, (07).
- [37]刘振宝. 集装箱码头堆场翻箱技术[J]. 集装箱化, 2010, (02).
- [38]吕靖, 杨赞. 集装箱码头物流系统仿真[J]. 大连海事大学学报, 2009, (04).
- [39]郭丽颖. 集装箱运输学. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2008.
- [40]蔡芸, 霍永忠. 集装箱码头物流系统仿真和优化研究综述[J]. 系统仿真学报, 2009, (08).
- [41]魏众, 高月娥. 集装箱码头物流作业系统集成优化研究[J]. 物流技术, 2009, (11).
- [42]李浩渊. 集装箱码头物流系统的基于仿真的优化研究. 东北大学硕士论文, 2010.
- [43]盛骤. 概率论与数理统计. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [44]郝洪山. 环渤海地区国际集装箱港口竞争力研究. 大连海事大学硕士学位论文. 2008. 3
- [45]郭媚. 集装箱码头堆场优化管理研究. 大连海事大学硕士学位论文, 2006.
- [46]丁嵩冰. 集装箱码头堆场进口箱区轮胎吊翻箱作业的蒙特卡罗仿真[J]. 集装箱化, 2007.
- [47]KIM K H. Evaluation of the number of rehandles in container yards[J]. Computers & Industrial Engineering, 1997, 32(4): 701-711.
- [48]KIM K H, PARK Y M. Deriving decision rules to locate export containers in container yards[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 124(1): 89-101.
- [49]白治江, 王晓峰. 集装箱翻箱优化方案设计[J]. 水运工程, 2008(4): 57-61.
- [50]甘应爱, 田丰, 李梅生等. 运筹学. 北京: 清华大学出版社, 2005.



- [51]Taleb-Ibrahimi M, Castilho B De. Storage Space Vs Handling Work in Container Terminals[J]. Transportation Research B, 1993, 27:13-32.
- [52]Kap Hwan Kim. Deriving decision rules to locate export containers in container yards. European Journal of operational Research 124, 2000:89-101.
- [53] Zhang C. Dynamic crane deployment in container storage yards [D]. Hong Kong: Department of Industrial Engineering and Engineering Management, Hong Kong University of Science and Technology, 2000.
- [54]Lai K, Lam K. A study of container yard equipment allocation strategy in Hong Kong. International Journal of Modeling and Simulation. 1994. 14(3):134-138.
- [55]Zhang C Q. Resource planning in container storage yards[D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2000.
- [56] Chun Jin. Optimum Planning on Material Handling Operation in Container Terminal [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers(S0387-5008), 2000, 66(642): 333-340.
- [57] Roux E D. Storage capacity for import containers at seaports[D] . PhD Thesis, University of California, Berkeley, 1996.
- [58]Peter Preston, Erhan Kozan. An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals Computers&Operations Research, 2001:983-995.
- [59]Ping Chen, Zhaohui Fu, Andrew Lim. the yard allocation problem Eighteenth national conference on artificial intelligence, 2002:56-65.
- [60]Chuqian Zhang, Jiyin Liu, Yat-wah Wan, Storage space allocation in container terminals Transportation Research Part B , 2001, 37(2003):883-903.
- [61]Ebru, Bish. A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal, European Journal of Operational Research, 2003, 144(1):83-107.
- [62]Zhang C Q, Liu J, Wan Y W, et al. Storage space allocation in container terminals[J]. Transporting Research Part B, 2003, (37):883-903.



## 致 谢

至此，硕士研究生学位论文完成之际，首先要感谢我的导师靳志宏老师。靳老师从一开始论文方向的选定，到最后的整篇论文的完成，一直非常耐心的对我进行指导，给我提供了宝贵的资料和建议，细心的给我指出论文中的错误，指导我进行论文的修改。靳老师渊博的学识、严谨的治学态度，使我受益匪浅。平易近人的师长风范，给我留下了非常深刻的印象。在此，谨向靳老师致以崇高的敬意和由衷的感谢！

在论文撰写过程中，郑红星老师给予了我很多帮助，在此也要向郑老师表示感谢。另外，对于支持、帮助过我的同学，我也要向他们表示感谢，他们无私的帮助我感受到了同学们的真诚和热心。

