

分 类 号 _____
U D C _____

密 级 _____
单位代码 10151 _____

集装箱堆场布局与场桥调度优化研究

李丽丽

指导教师 郑红星 职称 副教授

学位授予单位 大 连 海 事 大 学

申请学位级别 工学硕士 学科与专业 物流工程与管理

论文完成日期 2011 年 5 月 论文答辩日期 2011 年 6 月

答辩委员会主席 李 工 亮



**A study on container yard's layout and crane scheduling
optimization**

**A thesis Submitted to
Dalian Maritime University
In partial fulfillment of the requirements for the degree of
Master of engineering**

**By
Li LiLi
(logistics Engineering & Managemen)**

Thesis Supervisor: Professor Zheng HongXing

May 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，撰写成硕士学位论文“集装箱堆场布局与场桥调度优化研究”。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表或未公开发表的成果。本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名： 李丽丽

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。同意学校有权将本学位论文加入全国优秀硕士学位论文共建单位数据库。保密的论文在解密后遵守此规定。

保密☐，在_____年解密后适用本授权书。

本学位论文属于： 保密☐

不保密☒（请在以上方框内打“√”）

论文作者签名： 李丽丽 导师签名： 孙峰

日期： 2011 年 6 月 25 日

摘 要

随着经济全球化和世界一体化的发展,集装箱港口的节点作用越来越重要,集装箱码头的装卸效率、日常运作效率和效益引起了越来越多的社会关注。而在集装箱码头的日常运营中,集装箱堆场又是集装箱码头的重中之重。因此,集装箱码头堆场的有效管理和控制成为目前研究集装箱港口的热点之一。本文主要从集装箱堆场布局和场桥调度两个关键问题进行了优化研究,并采用flexsim仿真软件构建了仿真模型来进行验证,主要内容如下:

首先,在详细阅读相关国内外文献的基础上,确定了论文的主要研究思路。其次,在详细分析了集装箱堆场管理和控制相关影响因素的基础上,确定了以集装箱堆场布局和场桥调度为研究的主要问题。接着,在分析历史数据的基础上,重新划分了堆场的功能区,预测了堆场中各功能区所需的面积,建立了堆场布局的优化模型,给出了基于SLP方法和遗传算法的模型求解算法。随后,针对场桥调度问题,提出了利用最短路法和动态规划法的结合路径优化求解算法,并建立了场桥调配优化模型,给出了基于遗传算法的求解过程。然后,提出了用Flexsim仿真软件仿真评价指标和仿真过程,来验证上述问题的优化结果。最后,针对某集装箱码头的实例来进行优化研究。

本文的目的在于构建集装箱码头堆场布局优化模型和场桥调度的优化模型,并给出相应模型求解的优化算法。通过上述模型可以提高码头堆场的利用率、设备的利用率以及适当的降低倒箱率,而且也提高了码头的运作效益降低了码头堆场的作业成本,并为集装箱码头堆场的日常作业提供了一定的理论价值和实践的指导。

关键词:堆场布局;遗传算法;场桥调度;动态规划;仿真

Abstract

With the globalization of economy and the development of world integration, container ports play a more and more important role in container transportation. Handling efficiency, daily operation efficiency and benefits of container terminals attract more and more social attention. In the daily operation of the container terminal, container yard is the most important in container terminal. Therefore, the effective management and control for container terminals is the hotspot for the present study of the container port. This article mainly optimizes two key problems, including the container yard layout and crane scheduling, uses the simulation model constructed by flexsim simulation software to test the result. Main contents are as follows.

Firstly, based on a lot of the correlative references at home and abroad, the train of thought of the article is explicated. Secondly, according to analyzing deeply factors impacting management and control of the container yard, this paper puts forward the two key problems including the container yard layout and crane scheduling. Thirdly, on the basis of analysis of the historical data of the yard, the paper re-divides of function, forecast each function areas of the container yard, gives the layout optimization model, and solution based on the SLP method and genetic algorithm to solve algorithm. Fourthly, in view of the crane scheduling problem, the paper puts forward the solution of path optimization by the shortest path method and the dynamic programming, and sets up the crane deployment model and gives out the deployment optimization solution based on genetic algorithm. Then, the paper puts forward evaluation index and process by flexsim simulation software to verify the above mentioned problems optimized result. Finally, taking a container terminal for example, the paper does optimization research using the above methods.

The purpose of this article is to construct container terminal yard's layout and the crane scheduling optimization model, and gives corresponding optimization algorithm of solving the model. Through the above model, the paper can improve the container yard's utilization and equipment utilization, appropriately reduce rate for the movement of container. Meanwhile, the article provides theoretical value and practical guidance

for the daily operation of container terminals yard.

Key words: the container terminals yard's layout; genetic algorithm; crane scheduling; dynamic programming; simulation

目录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 国际集装箱运输的发展历史综述	1
1.1.2 我国集装箱运输及重要性综述	2
1.1.3 目前国内外研究的现状	3
1.2 研究的目的和意义	5
1.2.1 研究的目的	5
1.2.2 研究的意义	6
1.3 论文的整体结构	6
第2章 问题概述	8
2.1 相关概念综述	8
2.2 影响堆场作业效率的主要问题和解决途径	9
2.3 集装箱码头堆场优化的难点	13
2.4 研究的具体思路	13
第3章 堆场布局优化模型的建立及求解	15
3.1 布局的设计的要求和原则	15
3.2 堆场布局优化模型	17
3.2.1 功能区划分	18
3.2.2 功能区面积估算	19
3.2.3 布局建模	21
3.3 模型求解	27
第4章 场桥调度优化模型及算法	31
4.1 场桥调度的原则	31
4.2 场桥路径优化建模与求解	32
4.3 场桥调配优化建模与求解	35
第5章 堆场仿真的模块选择及评价指标建立	38
5.1 堆场仿真模块选择	39

目录

5.1.1 模型的抽象和简化.....	41
5.1.2 模块的划分和参数设定.....	41
5.2 仿真的主要评价指标	43
第6章 实例验证	46
6.1 A 集装箱堆场的概况	46
6.2 堆场布局优化	47
6.3 场桥调度优化.....	50
6.4 仿真验证	52
结论与展望	56
参考文献	57
攻读学位期间发表的论文	61
致谢	62
研究生履历	63

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

随着经济一体化、全球化趋势的发展和市场经济的不断完善,我国国民经济和对外贸易迅速增加,集装箱运输日益成为一种主要的运输方式。特别是对我国来说,自从加入WTO后,国际货物的进出口将主要以集装箱运输的方式来完成。在这种情况下,如何使自己的集装箱运输在所有的集装箱运输中脱颖而出就是一个集装箱码头经营者亟需解决的问题。

集装箱码头堆场的作业在码头日常作业中占有极其重要的地位,其运营是码头日常运营中的一个重要部分。现代集装箱码头之间的竞争从根本上来讲就是效率的竞争,任何一个码头若想要提升核心竞争力,打造成为世界一流的集装箱码头,就必须提高装卸效率,而装卸效率的提高很大程度上取决于集装箱堆场是否运行合理。合理安排堆场作业,不仅能减少翻箱率,提高码头装卸速度,而且还能最大限度的提高码头堆场利用率和码头通过能力。为此对集装箱码头堆场进行研究是有一定的理论价值和实践意义的。本文将集装箱码头堆场的优化研究分两部分来进行具体的分析,包括:堆场布局优化和场桥调度优化。

研究集装箱码头堆场,必须要了解集装箱运输在我国经济发展中的地位,以及集装箱运输的发展历程。下面首先简单阐述一下集装箱运输发展的历史以及国内外研究现状。

1.1.1 国际集装箱运输的发展历史综述

两个世纪以来国际集装箱运输的发展大体经历了萌芽期、开创期、成长期、成熟期4个阶段^[1]。

(1)萌芽期(1801-1955)

1801-1955年一个半世纪是国际集装箱运输发展的萌芽期。该时期欧美等发达国家在其国内开始尝试陆上短距离集装箱运输,后来在欧洲各国之间进行陆上集装箱运输的合并。

(2)开创期(1955-1966)

1955-1966年为集装箱运输发展的开创期。该时期美国首先用油船、件杂货

船改装成集装箱船舶,在美国沿海从事海上集装箱运输,并获得良好的经济效益。海上集装箱运输的成功,为实现国际远洋航线海上集装箱运输打下了良好基础。

(3)成长期(1966-20 世纪 80 年代末)

1966-20 世纪 80 年代末为国际集装箱运输发展的成长期。这一时期,集装箱船舶向大型化、专业化发展;集装箱也逐渐向标准化、现代化发展。这一时期,世界上的各大主要航线都将集装箱运输运用于自己的码头,集装箱专用泊位经历了从无到有,港口装卸设施也逐渐的现代化和专业化,而且集装箱运输也日益被货主、港口以及轮船公司所接受,国际集装箱运输发展的如火如荼。

(4)成熟期(20 世纪 80 年代末至今)

20 世纪 80 年代末以来,国际集装箱运输的发展进入成熟期。从 20 世纪 80 年代末以来,世界集装箱码头将船舶的运力大量的增加,而且船舶规模越来越大,由扩展期形成的第二代集装箱船逐渐经过了第三、第四和第五代,发展到现今的第六代及第六代以上的超大型集装箱船。在集装箱的日常运营管理中,各种现代化技术已被广泛采用,如 EDI 来实现动态跟踪,集装箱周转。港口集装箱码头的技术和设施设备也日趋完善,深水化、信息化进程、规模化、枢纽化以及多功能不断加快。国际集装箱运输的发展已进入一个崭新的阶段。

1.1.2 我国集装箱运输及重要性综述

同世界集装性运输相比,我国国际集装箱运输发展缓慢。我国国际集装箱运输业开始于 20 世纪 70 年代,1978 年时我国大陆开展国际集装箱运输的仅有 3 个港口。但是近 30 多年来,我国的集装箱运输一直保持着高速发展的形势。我国集装箱运输的发展大致经历了如下几个阶段:

(1)萌芽期。

20 世纪 70 年代,我国才开始有了集装箱港口码头,但是其作用仅仅是进行单一的集装箱货物的装卸与堆存。至 80 年代初已有所发展,但是大多数港口还是采用件杂货码头兼做集装箱业务,利用岸上设备或船上吊机以件杂货人工操作方式进行装卸船,以件杂货方式组织生产管理集装箱业务,带有很浓的件杂货作业的痕迹。

(2)开创期。

20 世纪 80 年代后期 90 年代末,我国集装箱码头已初具规模,功能迅速提升,设施和设备不断完善,布局不断合理,门类不断齐全,现代化程度也越来越高。

(3)成长期。

21 世纪,我国的主要港口码头及其集装箱码头已具备了接纳大型集装箱船的能力,少数港口的集装箱码头已经具备了接纳超大型集装箱船的能力,码头装卸效率、倒班能力、综合集疏运能力、辐射功能、聚集功能大大提高,主要集装箱码头已普遍采用先进信息技术,其生产、管理、控制实现自动化、可控化、数字化,部分港口功能正逐步向全球或区域性资源配置中心方向发展。

目前,我国现有沿海主要港口 40 多个(含长江南京及以下港口),且港口及集装箱码以趋于去完善,主题多元化的局面形成,呈现初规模化、集约化、现代化发展趋势。

总之,集装箱码头在我国经济发展中的地位日益提升,作为国民经济的重要基础设施,为我国经济和社会发展起到了重要的支撑作用,具体体现在:

(1)支持国家贸易稳定发展。

(2)在激烈的国际航运市场竞争中提升我国航运业的竞争力和经济安全保障能力。

(3)促进与世界的接轨和联系,促进国家经济好社会的发展。

1.1.3 目前国内外研究的现状

集装箱码头堆场的研究分很多方面,国内外很多研究者都针对其不同方面进行了一定的研究。其研究主要集中在关于运输作业和堆场作业中,运输作业为集卡的作业;堆场作业又分为堆场堆放策略、装卸设备资源的合理配置及调度两个方面。下面本文从以下几点来进行具体的阐述。

(1)集装箱堆场运输作业

Wong, Leung 在考虑时间窗和集卡的随机运输时间的情况下,提出了集卡路径优化的优化模型^[2]。李磊研究了集卡的路径优化问题,并提出了模型的求解算法^[3]。W.C.Ng 研究了集装箱码头堆场作业中的内集卡调度问题,并对模型采用遗传算法进行了求解^[4]。钱永兴研究了集装箱码头集卡调度的问题^[5]。Ko 研究了集装箱码头作业中的集卡运输问题,并运用启发式的优化算法对问题进行了求解

[6]。吕显强和张宏伟研究了堆场集卡的分配问题,并建立整数规划模型[7]。严政和陶德馨研究了堆场集卡的调度问题,并采用动态优化组合方法对模型进行求解[8]。靳志宏,朴慧淑和杨华龙研究了集装箱多联运拼箱集运的优化模型[9]。

(2)集装箱堆场作业

郝聚民在图搜索技术和模式识别理论的基础上,建立了随机条件下的混合顺序作业堆场BAY优化模型[10]。扬扬对集装箱码头堆场使用率的问题进行了研究[11]。葛明研究了集装箱堆场的运作管理[12]。刘鸣华提出了集装箱堆场管理中存在的问题,并提出了所需的管理策略[13]。张艳,韩晖定义了3种类型的翻箱,分别为装船翻箱、提箱翻箱和移箱的翻箱,并对不同的翻箱提出了各自的控制方法[14]。K.Y.Kim研究了场桥行走路径的优化问题[15][16]。谢尘,何军良和茆道方研究了基于混堆模式的集装箱码头出口箱进场选位策略[17]。张维英,林焰和纪卓尚等针对出口箱提箱作业进行了优化研究[18]。王梦昌提出了堆场中箱位的动态分配策略[19]。严伟,谢尘和茆道方研究了集装箱堆场出口箱分配问题,运用目标规划方法建立了滚动式计划的出口集装箱堆场分配模型,并采用基于并行遗传算法和启发式算法的优化算法对模型进行求解[20]。K.H.Kim等针对出口集装箱的堆放以及将倒箱率最小化的问题进行了研究[21]。杨淑芹,张运杰和王志强研究了集装箱堆场中存在的常见的问题,并采用启发式算法进行求解[22]。张涛对集装箱堆场物流系统进行了研究[23]。严伟,宓为建和何军良等研究了场桥调度的优化算法[24]。李建忠,丁以中和王斌对堆场的空间动态配置建模并进行了求解[25]。王维圳采用启发式方法对堆场分配问题进行了研究[26]。杨玫针对青岛前湾的堆场管理进行了具体的堆场策略的研究[27]。江南,钱迈和史峰等对堆场作业计划进行了建模并求解[28]。陈庆伟研究了集装箱堆场贝位分配的问题,并用遗传算法对模型进行了求解[29]。侯彤璋对堆场的通过能力进行了研究[30]。

(3)模拟仿真技术

计算机仿真技术目前已被广泛地应用到集装箱码头的研究中,国内外很多学者都采用仿真对所要求解的问题进行了研究。高鹏对集装箱堆场作业调度的问题进行了优化研究[31]。施梅超,张婕姝和许健对集装箱堆场闸口的通过能力进行了研究,并通过 Extend 软件进行了仿真优化[32]。马振新采用 Witness 仿真软件对秦皇

岛港口煤炭堆场作业进行了优化研究^[33]。舒帆提出了利用虚拟现实技术实现集装箱堆场可视化的问题,并开发了软件^[34]。徐伟利用 EM-plant 软件对码头装卸搬运作业系统和集装箱码头布局方案进行了仿真研究^[35]。田颖辉提出研究集装箱码头布局规划的重要性,开发了集装箱码头虚拟仿真软件进行了仿真研究^[36]。郑鑫在考虑物流因素、非物流因素以及地基的情况下,构建了码头堆场布局的模型,并用 Flexsim 软件进行了仿真研究^[37]。于越,金淳和霍琳对集装箱堆场大门系统规划问题进行了仿真优化研究^[38]。吕征对码头堆场能力进行了研究^[39]。M.KIA 等对港口装卸技术采用进行仿真评价研究^[40]。杨静蕾对码头的物流网络进行了仿真研究^[41]。P.Legato 等在考虑不同待到达的船舶等级的泊位分配规划问题,并建立了离散事件仿真模型^[42]。

虽然国内外学者做了不少研究,但是仍然存在一些不足:(1)只是对堆场优化中的某一个问题进行了研究。(2)与实际操作有一定的出入,得出的结果不是很符合实际操作。(3)集装箱码头堆场是一个复杂的系统,受各种因素条件的影响和制约,如闸口和船舶到港时间和频率等。(4)必须根据具体情况采用具体的求解模型的方法,否则计算量大。

为此,本文从堆场布局优化和场桥调度优化两个关键问题对集装箱码头堆场的有效管理和控制进行分析研究,并给出了各自的求解方法。随后,采用 Flexsim 仿真软件来验证优化结果。最后,配以某集装箱码头的实例,验证文章研究的实用性,同时也增加文章的可读性,使研究更具有意义。

1.2 研究的目的和意义

1.2.1 研究的目的

鉴于集装箱码头堆场是一个复杂的系统,本文拟从如下几个角度来研究该集装箱码头的堆场。首先,码头堆场的平面布局是一个很大的问题,如果布局不合理,将会影响码头日后的作业,为此对码头堆场布局进行研究很有必要。

其次,在堆场内部,如何进行资源规划(如场桥行走路径和场桥调配),减少运作成本、降低耗能、提高效率以及效益,是当前研究的热点课题之一。

最后,如何检验得出结果的优劣也是一个重要的问题。本文采用仿真软件检

验结果的好坏,充分利用仿真的可视性,使结果一目了然。

本文拟从以上的三个方面出发,研究我国的集装箱码头堆场优化,并给出相应的解决方案。

1.2.2 研究的意义

在集装箱运输过程中,集装箱码头是一个非常重要的节点。而集装箱码头堆场又是集装箱码头各个要素中的关键的要素之一。良好的堆场作业,可以降低堆场作业成本,提高效率和码头的运营效益。那么如何优化集装箱码头堆场就是一个需要深入解决的问题,研究它有一定的理论价值和实践指导意义。

(1)理论价值

研究集装箱码头堆场的优化问题,可以提升码头堆场日常作业的理论水平,也可以进一步完善集装箱码头操作系统的体系结构,同时为集装箱码头管理人员进行科学决策、管理以及日常作业提供了理论基础。

(2)现实意义

现在,我国很多的集装箱码头存在堆场管理混乱的问题,这样不仅影响码头目前的日常作业,也将成为其日后自身发展的瓶颈。如果不进行合理的堆场优化研究,将会降低码头的竞争力,使其在失去发展机会的同时也会承受一定的经济损失。

显而易见,集装箱码头的堆场作业效率直接影响码头前沿的作业生产率及后续节点的运输质量与效率。因此,研究集装箱码头堆场优化问题不仅具有重要的理论价值,还具有一定的实践指导意义。

1.3 论文的整体结构

首先,本文回顾了集装箱运输在我国的发展历程以及对我国经济的作用,分析了国内外关于集装箱码头堆场各种问题的研究现状,明确了课题的研究意义和研究目的。

其次,给出了研究问题的概述,指出了影响堆场作业效率的主要内容和提高效率的途径。在上述基础上,提出了以堆场布局优化和场桥调度优化为两个关键问题来进行堆场有效管理和控制优化的思路。

接着,文中第三章建立了集装箱堆场布局优化模型,并给出了基于 SLP 和遗

传算法的求解算法。

随后，第四章构建了场桥调度的优化模型，并给出了解决方法。

然后，文中第六章基于离散系统仿真的思想，提出了集装箱码头堆场仿真过程和评价指标，来对上文优化模型求得的结果进行验证评价。

最后，结合实例来对文章的各个模型进行更好的诠释和阐述，使文章更为完整，更具实用性和可读性。

研究思路可以用图 1.1 来阐述：

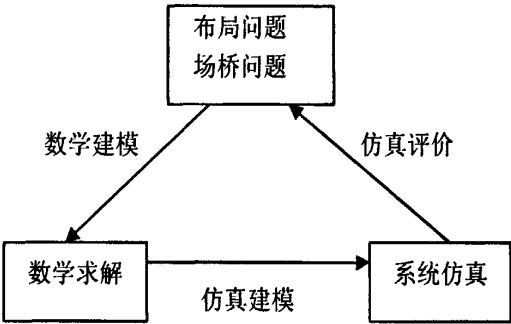


图 1.1 论文研究思路

Fig1.1 The train of thought about the paper

第2章 问题概述

2.1 相关概念综述

集装箱堆场是一个复杂的系统，它是整个码头运营的中心，在码头的运作中占据着核心地位。集装箱堆场的核心地位是与其主要功能分不开的。它的主要功能有集装箱堆存、集装箱交接、集装箱货运、集装箱检验和修理等功能。

(1) 集装箱堆存功能

集装箱堆场顾名思义就必须具有堆放集装箱的功能。因此，集装箱的堆存功能是集装箱堆场的主要功能之一。设立该功能的目的是进行进口箱的堆存、出口箱的堆场和中转箱的堆存。而且，在货运淡季，船公司往往会在堆场内堆存大量的空箱，以满足货运旺季的需要。

(2) 集装箱交接功能

集装箱交接是集装箱运输中一个重要的环节。集装箱堆场交接过程一般是集装箱承运人或集装箱所有人与集装箱托运人或收货人责任的转接过程。

(3) 集装箱货运功能

在集装箱堆场的业务中，有一部分作业是进行集装箱的拆、装箱作业。这一作业就要求码头堆场具有货运功能。这一功能也是码头堆场中的主要功能，有了它可以提高码头的经营范围，提高码头的吞吐量。

(4) 集装箱检验和修理功能

集装箱码头为了保证集装箱运输的顺利进行，必须购置或租用一定数量的集装箱，因此，对集装箱进行必要的检验和修理是很有必要的。一方面，检验和修理可以确保集装箱的破损或者污损及时得到修复，提高箱子的再利用率、另一方面，当租赁集装箱时，其成本是很大的。如果将其有了破损或者污损，影响集装箱设备交接单通行，码头将会承受重大的影响。为此，码头为了保证集装箱的安全，对其进行必要的集装箱检验和修理是很有必要的。

集装箱码头堆场优化研究是指在堆场的整体安排要求指导下，在码头正常作业为前提的要求下，以提高堆场作业效率为目标的一系列堆场优化的工作。它是码头堆场日常作业中的一个关键环节，研究内容主要有运输作业和堆场作业。但

是在上述这些研究内容中,我国集装箱码头仍然存在一些不足,需要进行合理的改进和研究。在进行优化研究之前,首先需要了解影响堆场作业效率的主要问题,并对其提出解决途径。

2.2 影响堆场作业效率的主要问题和解决途径

近几年,随着我国经济和对外贸易的增长,带动了国内港口集装箱吞吐量的快速增长。吞吐量的快速增长的同时也带来了码头作业的难度。当码头的设备设施条件基本确定后,堆场作业成为码头公司面临的主要难题。码头公司不仅要解决堆场瓶颈,同时还要兼顾效率。因此,首先分析一下码头堆场中各种影响效率的问题。

(1)翻箱率的问题

翻箱是指对某一集装箱进行作业时,将压在其上的其他集装箱转移到同一位的其他排的操作。在集装箱堆场中产生翻箱的原因有:

①随着集装箱运输的普及,集装箱吞吐量也在大幅的增加。当堆场容量固定不变时,会在一定程度上增大堆场的利用率。此时,如果没有及时有效的进行集装箱堆场的整理,就会使堆场翻箱率随之上升。

②在实际的堆场作业时,会发生船舶到达而舱单还未接收的情况,这时大多数码头会自己建舱单来进行收放箱,等实际的舱单到达后再覆盖自己建的舱单。而堆场在进行收箱时是按照第一次的舱单进行了,因此箱子的存放位置会与实际的舱单要求的箱子的位置存在偏差,这样就会导致一些不必要的倒箱作业,影响堆场作业效率。因此,翻箱率的问题是影响堆场作业效率的主要问题之一。

(2)场桥调度的问题

在堆场的实际操作中,经常会看到场桥的利用率很低下的问题。有些码头,场桥开很多台,以至于某些场桥的利用率很低,几乎处于闲置的状态;有些码头,场桥只开有限的几台,最终导致场桥跨越箱区来回跑。这两种情形,对场桥在堆场的利用率都是有害无利的。场桥开着却没有集装箱可操作,这样不仅浪费了燃油费,同时也浪费了人力等各种成本;场桥开着却因为太多的箱子需要作业导致场桥疲于奔命,这样也是不好的。因此,在堆场的日常作业中,场桥调度也是一个很重要的问题,也是影响集装箱码头堆场作业效率的主要问题之一。

(3)堆场利用率的问题

$$\text{堆场利用率}(\%) = (\text{平均堆场堆存货物量} / \text{平均堆存能力}) \times 100\%$$

从上述公式,可以看出在平均堆存能力不变的情况下,平均堆存货物量决定着堆场的利用率。因此,要想提高堆场利用率就需要提高堆场的平均堆存能力。而现在很多的码头,由于货源不足、管理不善、经营不合理以及服务不好等原因,堆场利用率很低。堆场利用率是衡量堆场是否合理作业的有效指标,因此堆场的利用率问题也是影响集装箱码头堆场作业效率的主要问题之一。

(4)堆场作业繁忙而机械的利用率低下

随着现在集装箱码头吞吐量的日益,场地机械配置的利用率也得到了一定的提高,但是如果没有将两者很好的进行匹配和跟进的话,就会出现一些适得其反的结果。如在安排堆场作业时,不考虑实际作业而是采用理论情况,这样将很容易出现堆场需要作业的箱子很多而设备利用率却低下的问题。这一现象不仅影响了堆场的作业效率,而且提高了码头作业成本。而码头的作业成本和作业效率是码头立足的根本问题之一,高的作业成本和低的作业效率将会使码头失去竞争力,被其它码头所淘汰。所以,堆场作业繁忙而机械利用率低下的问题也是需要考虑的问题之一。

(5)闸口的问题

码头堆场的闸口的作用有:对要进入堆场的集装箱进行单据核对,如核对码头收据、收箱单据和装箱单证等;检查即将进入堆场的集装箱的数量等与场站所有的收据记载相一致的情况;检查集装箱外表是否有破损以及铅封情况是否完好,如无异常,进行正常的收放箱并做好收放的记录;如有异常,相关人员应在码头收据栏内标明;如发生异常严重并会影响集装箱的正常运输作业,则码头作业人员应与有关方进行联系,并做好协商处理。当集装箱可以进入堆场时,堆场人员出具设备收据应向发货人、运箱人,做好记录,以备日后查证。堆场的闸口在堆场的日常管理中起到很重要的作用。闸口的多少以及管理的好坏也直接影响堆场的作业效率,良好的闸口管理可以提高集卡的通过率,也有利于提高堆场中场桥的利用率,降低集卡在箱区内等待时间过长,同时在避免闸口外拥堵外,也有效的避免了堆场内拥堵的问题。所有闸口的问题也是一个需要考虑的问题之一。

找到上述存在的各种问题,下面是一些解决上述问题的途径:

第一：合理的安排堆场的布局

在上述影响集装箱堆场作业效率的问题中，翻箱率问题、场桥调度问题以及机械利用率的问题，归根结底都或多获少的与堆场的布局有关。好的堆场布局可以有效的缓解这些问题，可以减少堆场中的倒箱作业，降低装船以及堆场内的箱子的移动次数，同时提高装船效率以及提高堆场资源的利用率。合理的堆场布局，还可以降低场桥跨箱区行走的次数，提高场桥的有效行走路径，减少耗油量，最终降低堆场作业成本。在堆场布局中，考虑将重点航线以及出口量、进口量大的箱子优先安排在前方堆场，靠近泊位的地方；并将同一条船上的进出口箱子进行相对集中的安排，都是为了提高设备的利用率。

第二：提高堆场内设备的利用率

提高堆场内设备利用率的优点是显而易见的，特别是提高堆场内场桥的利用率更是至关重要的。提高场桥、岸桥的设备利用率，在提高自身设备利用率的同时也提高装卸船效率，进而提高整体码头的效益而降低成本。

第三：选择合适的闸口数量和设立合适的缓冲区，减少闸口的拥堵的作业

①选择合适的闸口通道数量

闸口是集卡进入堆场内的通道，是影响进入量的一个明显的节点，需要对其进行合理的控制，以及设定合理的闸口数量。本文将闸口通道分为进口通道和出口通道，两个通道的利用率公式如下：

$$U_{img} = \left(\sum_{i=1}^{M_{img}} (N_{img}^1 + N_{img}^2) \right) / (N_{img}^3 \times M_{img}) \quad (2.1)$$

$$U_{exg} = \left(\sum_{i=1}^{M_{exg}} (N_{exg}^1 + N_{exg}^2) \right) / (N_{exg}^3 \times M_{exg}) \quad (2.2)$$

其中， U_{img} 和 U_{exg} 分别表示进口通道和出口通道的利用率； N_{img}^1 和 N_{exg}^1 分别表示进口通道和出口通道的空载的集卡数量，若 i 通道未开，则为0； N_{img}^2 和 N_{exg}^2 分别表示进口通道和出口通道的重载的集卡数量，若 i 通道未开，则为0； M_{img} 和 M_{exg} 分别表示进口通道和出口通道的总的通道数量； N_{img}^3 和 N_{exg}^3 分别表示进口通道和出口通道的设计的通道通过集卡的能力。

通过上述计算，如果 U_{img} 和 U_{exg} 较小时，说明当前通道的作业量较小，考虑

关闭若干通道；如果 U_{img} 和 U_{exg} 较大时，说明作业量较大，考虑增加新通道。

②设立缓冲区

为了提高闸口的通过能力，避免堆场或者大门外发生拥堵的问题，在有能力的情况下，在进闸口与码头堆场间设立缓冲区就很有必要了。设立缓冲区的目的是：缓解闸口外拥堵的问题；缓解堆场内拥堵的问题；降低外集卡司机由于等待产生的烦躁感。如果堆场内已达到最大的外集卡作业数量不能容纳更多的集卡时，可以将外集卡司机安置于缓冲区进行暂时等待，直到可以作业的集卡数量的指令数下降到预先设定好的允许进入数时，方可进场作业。同时，这样还可以提高作业效率，提高顾客满意度。

设立缓冲区，还可以缓解机械设备不能均衡利用的问题，缓解堆场内拥堵问题。它也可以有效的缓解装卸船与进提箱的作业产生的冲突，更好的提高装卸船的效率。

第四：对人员进行适当的培训，提高堆场作业人员的业务水平

人是作业的必不可少的因素之一，也在提高作业效率的过程中起着至关重要的作用。对堆场作业的员工进行适当的专业技能培训，提高其业务知识对码头的日常作业是很重要的。可以定期邀请国内外知名专家来进行专业的讲座以及培训，同时，也可以派骨干去其它先进企业进行学习和交流。同时，还建议码头多与船公司、箱公司等进行沟通与交流，尽量避免由于沟通不畅而造成的问题的发生。

第五：进行适当的自动化，提高作业效率

随着现代信息化技术的飞速发展，各个行业都在顺应时代的要求进行自动化管理，不断的提高自己的自动化水平，通过提高自己的作业效率来提升自己的竞争力。对于集装箱码头堆场来说，也是很有必要的，进行适当的自动化，不仅可以提高作业效率，也会提升服务质量和能力，进而可以吸引更多的客源，从长远来说有利于增加利润水平。如现在流行的 DGPS (Difference Global Positioning System) 差分全球定位系统，它的应用可是增加集装箱堆场堆码的高度，有利于增加堆场的作业量，也提高场地的利用率。具体引进何种自动化，各个码头可根据自身以及竞争者的需要来进行具体的分析。

通过对上述存在的问题以及解决途径的分析发现：在所有的中，其中主要的问题是堆场布局和场桥调度，如果将这两方面进行了优化，可以有效的缓解

其它的几个问题。为此,本文就以堆场布局和场桥调度作为研究堆场作业优化的关键途径,并以此来组织文章的结构。在文章中,为了更好的进行场桥调度优化问题的研究,将其分为路径优化和场桥调配两方面来进行。路径优化是以场桥行走路径最短为初始目的,最终达到耗油量减少、效率提高和成本降低的目的。场桥调配是为了合理的安排运营的场桥数量,特别是处于热备状态的场桥数量。因为对于场桥这种大型的设备而言,启动是很耗油和浪费成本的,不能随意的关闭或开启场桥,当场桥启动后一般要将其一直作业。

2.3 集装箱码头堆场优化的难点

集装箱码头堆场作业繁琐并且复杂,合理的堆场作业影响着码头的作业效率以及运营效益。因此进行集装箱码头堆场研究是很有必要的,也是很有意义的。为了使文章更具有实用性,本文从布局优化、场桥调度优化两方面着手来进行,研究存在很大的难度,具体表现在如下方面:

(1)本文在固定闸口的情况下来研究集装箱码头堆场。这样使文章更切合实际,但由于增加了限制因素,也增加了研究的难度。

(2)本文不光纯粹的考虑集装箱堆场的布局优化,也进行了场桥调度优化的研究,使文章的难度大大的增加。

(3)问题的建模和求解也是难点。本文需针对具体问题采用具体的方法进行求解,并且要求求解的方法不仅适用而且实用。

(4)本文采用 Flexsim 仿真软件来对所建立的集装箱堆场模型以及所得到的优化结果来进行评价。集装箱码头堆场是一个庞大的复杂的系统,对其进行仿真建模需要大量的时间来进行,同时也是很困难的。

2.4 研究的具体思路

通过分析国内外学者的研究结果,并在进行实际调研的基础上,发现只有应用现代化的管理思想,从集装箱码头堆场的整体出发来优化才与可能达到令人满意的结果,那种只通过优化码头局部环节,或者仅凭经验的作业模式已经不能满足集装箱码头堆场的实际需要。

因此,本文为系统的研究集装箱码头堆场,从提出问题,建立模型,求解问

题和实例验证几个方面来进行。具体研究内容分为如下几部分:

(1)通过分析历史数据,预测出堆场中不同功能区所需的面积,通过 SLP 方法并结合遗传算法来求解堆场的布局。

(2)场桥调度的优化,其中包括路径优化和场桥调配,利用最短路法和动态规划法的结合来求解路径优化问题;利用遗传算法来求解运力调配问题。

(3)用 Flexsim 仿真软件来进行布局优化和场桥调度优化的评价和检验。

(4)应用某集装箱码头的实例来进行具体方法和模型的阐述。

第3章 堆场布局优化模型的建立及求解

集装箱堆场是各种集装箱的集散场所,堆场运作效率的高低,直接影响到整个港口的经营状况。因此,对于堆场布局进行研究是很有必要的。下面先就布局的要求和原则进行阐述,然后再给出布局的建模和具体的求解。

3.1 布局的设计的要求和原则

(1)采取“区域定位、相对集中”的堆场布局原则。

“区域定位”指在堆场布局里,对相对货物多、重点客户和重点船舶的进、出口集装箱进行优先安排,将其安排在靠船泊位最近的箱区中,减少装船和卸船距离,提高该次的装船效率;而将相对不是很重要航线的集装箱则安排相对远离泊位的箱区中。“相对集中”指对某一条船的出口箱进箱要相对集中安排,避免装船时长桥和岸桥的频繁移动而影响装船效率。实行“区域定位”原则,一方面可以确保重点航线的作业效率;另一方面可以提高设备利用率,也可留住原有客户,稳定客户源,提高服务水平。实行“相对集中”原则,可以缩短场桥在作业过程中的移动距离,以及随便跑的情况,利于装船效率的提高。同时,采取进口重箱大票(大票是指一个提单号下超过指定箱子数量的一次提单)集中堆放原则,因为一个提单号的货为统一货主的货物,这样堆放,提高效率且减少倒翻。

(2)对不同的箱子实行不同的安排方案。

码头作业的集装箱从类别上区分,主要有三大类:进口箱、出口箱、中转箱。为了合理有效地利用堆场资源,可以根据集装箱类别实行不同的安排方案。对于出口重箱按航线、到港、重量进行区分;对于空箱,按箱型尺寸、控箱公司进行区分;对于中转箱,由于船公司在装船前的临时转船转港较多,为了降低装船时产生的翻箱率和提高装船效率,可以集中堆放,以确保装船效率。

(3)平面布局要尽量紧凑,空间利用要充分合理,这样可以避免浪费,节省空间资源。同时,这样也可以尽量地降低机械设备的移动距离。布局要立足现在,并也要考虑将来的发展需要,为将来吞吐量的增大留出一定的余地。

(4)重、空箱要有区别的对待,做到重箱不在空箱上面。在集装箱堆码时不允许超过集装箱堆场所规划的箱位线,堆码时只允许由集装箱的4个底角件支撑,

上下层集装箱的角件应充分接触且要对其，上面各层与最低层角件间的最大偏离量纵向不应大于 38.00mm，横向不应大于 25.4mm。相邻两排高度相差两层以上的，较高一排的最上层箱子吊到较低一排上。同垛里最高层箱子排数大于等于 2。双排以上箱子必须通过添、补等方式，确保排数大于层数。靠近集卡通道的一排以允许放箱。

(5)不同尺寸的箱子相互间不混堆（20 尺、40 尺和 45 尺）。空、重箱和尺寸不同的集装箱不能进行同贝混放，且同贝中不能进行同排混放。不允许出现单排最高层高的堆码，在作业过程中出现此类情况需要及时放高。

(6)危险品箱子进行单独堆码。对于堆码为三层高的集装箱堆场，易燃易爆危险货物集装箱最高只许堆码两层，其它危险货物集装箱（含空箱）不超过三层。在满足危险货物隔离要求的情况下，应尽量将危险品集装箱平铺。不同类别的危险品摆放间隔要求也不同，应根据不同的类别进行区别处理。在场地理位置允许的情况下，计划员可以对危险品集装箱的计划位置进行调整，但要满足危险货物间隔要求。危险品货物集装箱采取及时疏港措施，防风暴潮时，要采取箱脚加锁垫高等防水侵入箱内的措施。

(7)中转箱子和特殊箱子进行单独堆码。中转箱区应布置在便于集装箱能顺利地由一辆车直接换装到另一辆车的交通方便处。不同类型的特殊箱子不能同排混放，如场位允许，也不能同贝混放。靠近集卡通道的一排不允许放罐箱。

(8)冷藏箱放在冷藏箱箱区，并进行单独堆放。对于堆三层高的堆场，冷藏重箱堆码不允许超过两层高，冷藏空箱堆码不超过三层高。冷藏重箱堆码要求机组一侧与插屏相邻。在堆码时两层高、三层高、四层高的箱子达到满垛、垛型要求时，其形状应如图 3.1 所示：

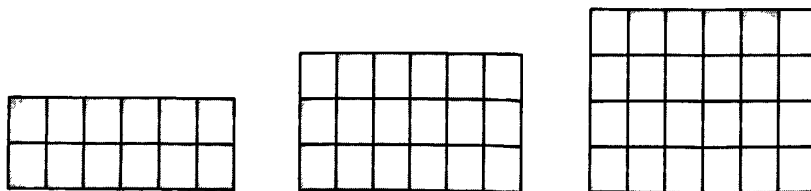


图 3.1 两层、三层和四层满垛、垛型的要求

Fig 3.1 The requirement about different type

(9)周转、维修箱区应布置在作业区外围，靠近维修车间一侧，以便于取送和维修，减少以正常作业的干扰合理布置箱位。

(10)道路的布置应使机动车辆都能单方向行驶。

(11)集装箱各作业区的划分应使各项作业互不干扰。集装箱的放置方向应便于起重机的起吊作业。

3.2 堆场布局优化模型

集装箱堆场是进行集装箱堆存、交接和保管等的场所，对其进行布局优化是很有必要的。在进行布局优化时，需要先进行一定的准备工作。需要先进行集装箱码头堆场功能区的划分，之后求解出各功能区的面积。在得到面积之后，就可以进行布局的优化了。

建立堆场布局的具体优化流程图（图 3.2）如下：

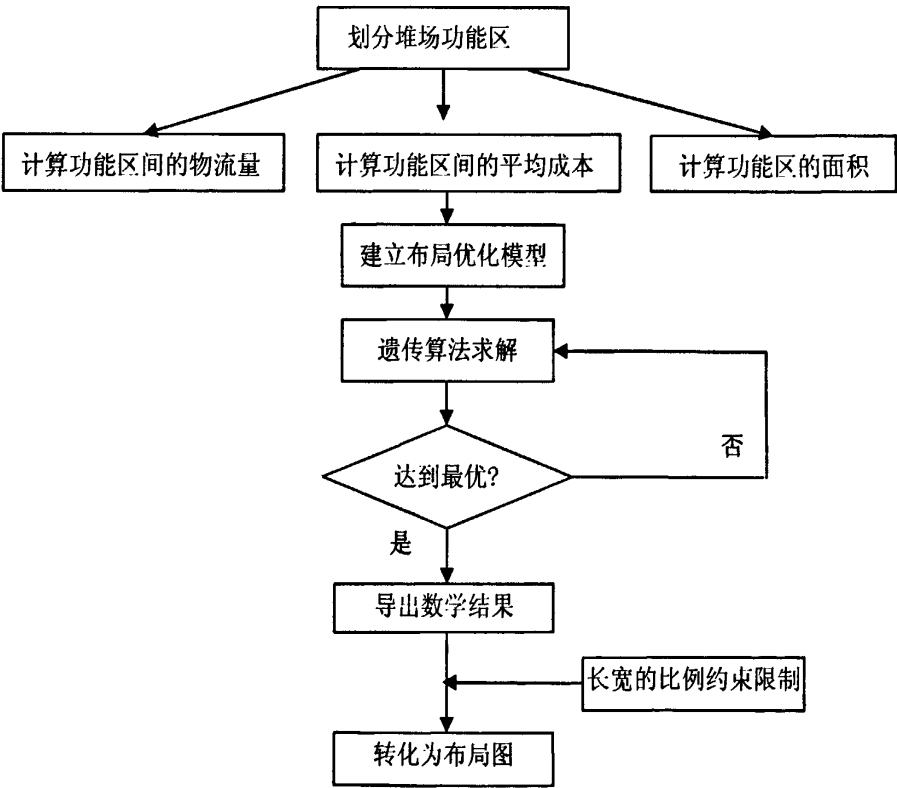


图 3.2 堆场布局优化的流程图

Fig 3.2 The flowchart about the optimaion of container yard

3.2.1 功能区划分

企业生产的产品种类的多少以及每种产品的数量的高低，决定了工厂的生产类型，直接影响着工厂的总体布局及生产设备的布置形式。集装箱码头堆场也是一样的，功能区的划分，以及功能区的面积大小决定着堆场运行的好坏。为此，合理的划分的堆场的功能区是堆场布局优化的先决条件。

传统的集装箱码头在划分堆场布局时，一般划分为出口箱区、进口箱区、中转箱区、特种箱区等几大功能区，并且要求在自个的功能区堆放同种性质的集装箱。这种模式由于立足于全局规划，操作简单，同时也在避免集装箱管理上的混乱有一定的作用，因此该模式也为绝大多数集装箱码头在进行堆场布局时应用。但是这种方式有时也会造成一定的弊端，特别是现在作业箱量逐步上升的情况下，会造成各项作业之间的冲突，影响了码头作业效率。

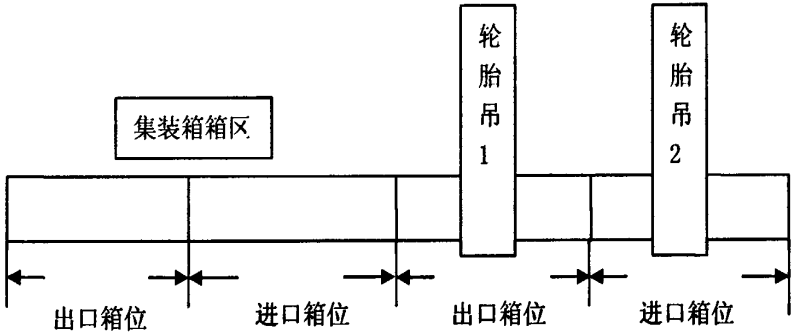


图 3.3 传统的集装箱堆场布局
Fig 3.2 The traditional container yard layout

为此，需要突破传统的集装箱码头堆场的管理模式，应将每块箱区分为若干个区域。显然，集装箱堆场需要具备集装箱运输、集装箱货运、集装箱堆存、集装箱检验和修理、集装箱交接、信息处理等几大功能。因此，为了满足集装箱堆场的各种功能的需求，本文将堆场内的功能区设置为重箱堆存区、空箱堆存区、拆装箱区、缓冲区、查验区、特种箱区、工具箱区共 7 个功能区。

(1)重箱堆存区

专门堆放集装箱重箱的区域。重箱堆场区又可以进一步的划分更细的堆存区，一般码头堆场会按照目的港、进口重箱、出口重箱、重量等级等来进行划分。

(2)空箱堆存区

专门堆放空箱的区域。空箱一般不需要进一步的划分,但有些码头为了更好的区分集装箱空箱的类型,会按照船公司、箱公司等来将其进行进一步的细分,这样更好的进行箱子的分类。

(3)拆、装箱区

拆、装箱区是专门进行拆装箱的场所。如果某些集装箱码头不进行此项操作,可以不设该功能区。该功能区的位置要尽量放置在码头前沿,并要运输距离,且避免与堆场内集装箱运输进行干扰。

(4)缓冲区

缓冲区是在集装箱到达高峰期,由于集装箱堆场内货流不通畅,导致进场集装箱不能及时被运到指定货位时,需要一定的区域方便集装箱等待。

(5)查验区

专门负责集装箱箱体的检验、交接、单证的审核等的区域。

(6)特种箱区

专门放置特殊集装箱的区域。如冷藏箱、危险品箱、熏蒸区,残污区等,集装箱码头可根据自己箱子的不同需求将其进行设置。

(7)工具箱

专门进行集装箱工具的区域,同时也可进行损坏集装箱的维修。根据维修的需要具体包括修箱区、洗箱区、机修车间等。

3.2.2 功能区面积估算

功能区的划分是进行集装箱堆场布局优化的关键点之一。但在进行布局优化时,还是需要知道一些其它的数据,如堆场中各功能区的面积等。为此,本文在进行布局建模之前先介绍堆场各功能区的面积的计算。

集装箱码头堆场的面积可分为两个部分,分别为:集装箱占用的实际面积、通道宽度和辅助作业面积。下面分别介绍两种面积的计算。

(1)集装箱占用的实际面积

集装箱占用的实际面积即集装箱堆场中各功能区的面积。集装箱堆场中各功能区的面积的大小,主要取决于集装箱作业量的大小。计算集装箱堆场各功能区

的面积,除去考虑作业量外,还需要考虑集装箱堆码的高度、集装箱在堆场占用箱位时间和堆存时间等。

集装箱堆场中各功能区的面积 MJ_m^1 可按下列公式计算:

$$MJ_m^1 = \frac{Q_m \times G \times S}{H \times H_g} \times B \times \frac{1}{\omega} (m^2) \quad (3.1)$$

$$B = \frac{T}{t_m} \quad (3.2)$$

其中:

Q_m : 表示第 m 功能区的日作业集装箱的箱数量, 单位为 TEU/d;

G : 表示集装箱子的平均重量, t/TEU;

S : 表示堆存的集装箱每吨所需面积值, m^2/t ;

H : 表示堆码高度, 一般为四层堆码(根据具体的堆场布置而定);

H_g : 表示堆码高度的利用系数, 一般为 0.75~0.95 之间;

ω : 表示面积利用系数;

B : 表示集装箱的堆存时间;

T : 表示集装箱平均堆存期;

t_m : 表示年工作天数。

(2)通道宽度和辅助作业面积

①通道宽度

通道宽度(D_{mn}^2)有具体可以分为功能箱区的主通道和供场桥行走和转弯的通道,但是两者之间会有一定的重复和重叠。宽度的计算与具体工作的设备有关,需要考虑各个设备的转弯半径、设备的长度和宽度等因素。

由于集装箱堆场中,一般集装箱子为纵向紧密堆放,堆场中通道的长度利用率较高,一般为每隔 100 米左右留有 25 米的通道,主要是为车辆的正常出入。但是也需要根据具体的情形而定。

②辅助作业面积

功能区的辅助作业面积=功能区的面积 \times 辅助作业面积占功能区的比例系数

$$MJ_m^2 = MJ_m^1 \times \mu \quad (3.3)$$

通过上述公式，就可以求解出集装箱堆场中各功能区的面积。在计算求得面积了之后，就可以进行堆场布局。

3.2.3 布局建模

目前布局问题的求解主要采用 SLP(Systematic layout planning 系统布局设计)方法来进行求解^[43]。SLP 是 20 世纪 60 年代由美国 Richard Muther 提出的，它是对工业设施传统布置经验设计方法的重要挑战，在世界范围内对设施布局都有较大的影响。一项布置设计中必须了解三个最基本的要素，即：①各作业单位之间的关系。②各一个作业单位应有的空间的数量和种类。③做出调整使符合布置设计要求。它的工作程序如图 3.4:

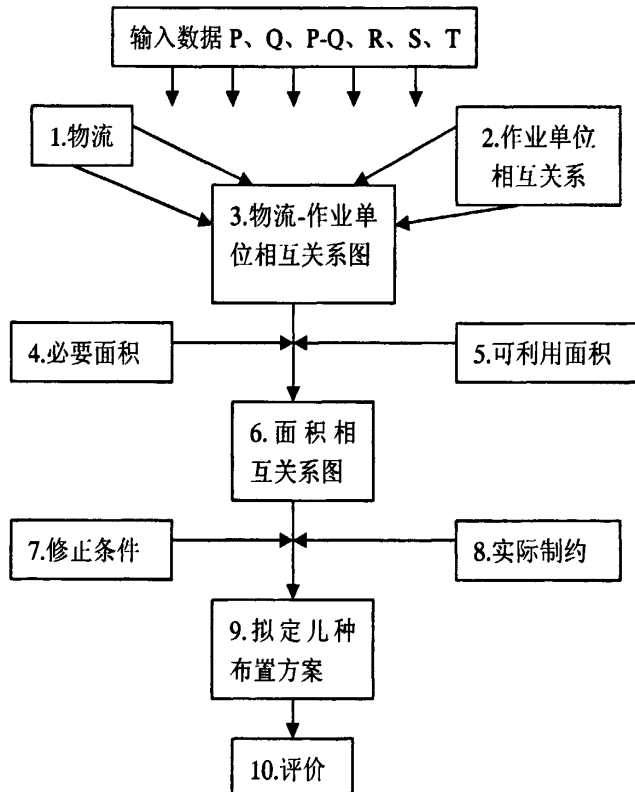


图 3.4 SLP 的工作程序
Fig3.4 The procedures about SLP

本文将 SLP 加以改进应用到堆场布局上来求解堆场布局。布局的求解通过两种途径实现，一种是物流因素对堆场布局的影响；另一种是非物流因素对堆场布

局的影响。本文在实际需要的情况下，也考虑了对集装箱堆场影响较大的另一个因素，即集卡作业时间的影响。

(1)物流因素对堆场布局的影响

集装箱堆场的作业中包括大量的物流作业，如集卡的运输作业，场桥调度时的搬运作业，装卸作业以及拆装箱作业等，因此必须要分析物流作业对堆场布局的影响。根据 SLP 方法，本文采用从至表来进行物流分析，其目的就是确定集装箱堆场中功能区之间的物流量。从至表是一个矩阵，通过它既能发现问题，又是解决问题的良好手段。从至表是一张方格图，左边是“从”边，从上到下安排各个功能区；上边是“至”边，从左到右安排各个功能区，此表表示从一个功能区到另一个功能区的物流量，

(2)非物流因素对堆场布局的影响

功能区之间的相互关系除了受到上述因素的影响以外，还会受到诸如作业相互间的联系、管理、流程等非物流因素的影响。各个功能区之间关系的密切或者疏远可以通过区域之间活动的频繁程度来表达。根据 SLP 方法，本文也采用相互关系图来表示各功能区之间的密切程度。其“密切程度”的代码如表 3.1 所示：

表 3.1 密切程度代码
Tab3.1 The code about the closely degree

密切程度 代码	A	E	I	O	U	X
实际含义	绝对必要	特别重要	重要	一般	不重要	不要靠近

相互关系分析就是指对各个功能区之间的相互关系的密切程度进行分析。相互关系图表以定性因素为基础，清楚的标注了集装箱堆场中各功能区之间的密切关系的程度。

在建立模型之前，不是所有的条件都必须考虑的，对一些不是很重要的可以忽略的条件，或者对建模不具有影响的条件，可以适当的进行一定的假设。本文对建模的假设如下：

①闸口的数量的确定的；

- ②功能区形状是成矩形的，并为横向排列的若干行；
- ③各个功能区布局于堆场时不会跨越多个不同的规划地分区；
- ④功能区之间不能叠加。
- ⑤以功能区的横向边长的方向为x轴，以其纵向边的方向为y轴建立直角坐标系；
- ⑥功能区的箱子之间的宽度忽略不计。

目标包括两个方面：物流作业成本最少；功能区之间的相关性最大。为此建立目标函数以及约束条件如下：

$$\min F_1 = \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N Q_{mn} C_{mn} d_{mn}^1 \quad (3.4)$$

$$\max F_2 = \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N R(d_{mn})_{mn} V_{mn} \quad (3.5)$$

约束条件如下：

$$d_{mn}^1 = |x_m - x_n| + |y_m - y_n| \quad (3.6)$$

$$Q_{mn} = \frac{Q_{mn}}{Q_{C_{mn}}} \quad (3.7)$$

$$C_{mn} = \frac{(\frac{GC_j}{ZJC_j} \times QC_{mn} + WXC_j) \frac{1}{D_1} + \frac{GZC_j}{D_2}}{D_3 \times 3600} + EC_j \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (3.8)$$

$$|x_m - x_n| \geq \frac{1}{2} (L_m + L_n) + dL_{mn}^3 \quad m = 1, 2, \dots, N, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3.9)$$

$$DL - \frac{1}{2} L_m \geq x_m \geq \frac{1}{2} L_m \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (3.10)$$

$$|y_m - y_n| \geq \frac{1}{2} (P_m + P_n) + dP_{mn}^3 \quad m = 1, 2, \dots, N, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3.11)$$

$$DP - \frac{1}{2} P_m \geq y_m \geq \frac{1}{2} P_m \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (3.12)$$

$$dL_{mn}^3 = \begin{cases} |x_m - x_n| - \frac{1}{2} (L_m + L_n) & |x_m - x_n| > \frac{1}{2} (L_m + L_n) \\ \frac{1}{2} (L_m + L_n) - |x_m - x_n| & |x_m - x_n| \leq \frac{1}{2} (L_m + L_n) \end{cases} \quad (3.13)$$

$$dP_{mn}^3 = \begin{cases} |y_m - y_n| - \frac{1}{2} (P_m + P_n) & y_m \neq y_n \\ 0 & y_m = y_n \end{cases} \quad (3.14)$$

$$|x_m - x_n| + \frac{1}{2} (a_m + a_n) \leq DL \quad m = 1, 2, \dots, N, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3.15)$$

$|y_m - y_n| + \frac{1}{2}(b_m + b_n) \leq DP \quad m = 1,2,\dots,N, \quad n = 1,2,\dots,N \tag{3.16}$

$\sum_{m=1}^N [MJ_m^1(1 + \mu)] \leq ZS \tag{3.17}$

$L_m \cdot P_m = M_m^1(1 + \mu) \quad m = 1,2,\dots,N \tag{3.18}$

$DD_m = \frac{L_m}{P_m} \tag{3.19}$

$DD_{mmin} \leq DD_m \leq DD_{mmax} \tag{3.20}$

$x_m \geq 0, \quad y_m \geq 0 \quad m = 1,2,\dots,N \tag{3.21}$

式中：

R_{mn} ：表示功能区 m 与功能区 n 之间的排列位置临近的程度，它的值与距离有关。

$$R_{mn} = \begin{cases} 1 & d_{mn} \in \left[0, \frac{d_{max}}{6}\right] \\ 0.8 & d_{mn} \in \left[\frac{d_{max}}{6}, \frac{d_{max}}{3}\right] \\ 0.6 & d_{mn} \in \left[\frac{d_{max}}{3}, \frac{d_{max}}{2}\right] \\ 0.4 & d_{mn} \in \left[\frac{d_{max}}{2}, \frac{2d_{max}}{3}\right] \\ 0.2 & d_{mn} \in \left[\frac{2d_{max}}{3}, \frac{5d_{max}}{6}\right] \\ 0 & d_{mn} \in \left[\frac{5d_{max}}{6}, d_{max}\right] \end{cases}$$

V_{mn} ：表示功能区 m 与功能区 n 之间的关系紧密程度，本文中该等级的划分依据 SLP 中的相关等级来划分，具体如表 3.2。

表 3.2 相关等级的划分
Tab3.2 The division of the related level

功能关系	字母表示	V_{mn}
绝对重要	A	1
非常重要	E	0.8
重要	I	0.6
普通	O	0.4
不重要	U	0.2
没关系	X	0

Q_{mn} : 表示功能区 m 与功能区 n 间的平均物流作业的数量;

C_{mn} : 表示功能区 m 与功能区 n 间的平均物流作业的成本;

QQ_{mn} : 表示功能区 m 与功能区 n 之间每天的物流量;

QC_{mn} : 表示作业于功能区 m 与功能区 n 之间的场桥的数量;

GC_j : 表示场桥的购买价格;

ZJD_j : 表示场桥的折旧年限;

D_1 : 表示场桥的年可作业天数;

D_2 : 表示场桥作业人员的月工作天数;

D_3 : 表示场桥一天可作业的时间;

EC_j : 表示场桥作业产生的单位耗油成本;

WXC_j : 表示场桥的维修成本;

GZC_j : 表示作业人员的月工资;

x_m : 表示功能区 m 在堆场布局中重心的横坐标;

y_m : 表示功能区 m 在堆场布局中重心的纵坐标;

x_n : 表示功能区 n 在堆场布局中重心的横坐标;

y_n : 表示功能区 n 在堆场布局中重心的纵坐标;

L_m : 表示功能区 m 的横向长度;

P_m : 表示功能区 m 的纵向长度;

L_n : 表示功能区 n 的横向长度;

P_n : 表示功能区 n 的纵向长度;

d_{mn}^1 : 表示功能区 m 与功能区 n 之间的距离;

dL_{mn}^3 : 表示功能区 m 与功能区 n 之间的水平方向的距离;

dP_{mn}^3 : 表示功能区 m 与功能区 n 之间的垂直方向的距离;

DD_m : 表示功能区 m 的长宽比例系数, 其中 DD_{mmin} 为比例的下限值, DD_{mmax} 为比例的上限值;

DL : 表示集装箱堆场的实际的长度;

DP: 表示集装箱堆场的实际的宽度;

ZS: 表示集装箱堆场的实际面积的大小。

(3.1) 表示: 堆场中各功能区的面积;

(3.2) 表示: 堆场中各功能区的集装箱的堆存期;

(3.3) 表示: 堆场中各功能区的辅助作业面积;

(3.4) 表示: 集装箱堆场内物流作业的总成本函数;

(3.5) 表示: 堆场内各功能区之间的相互关系的函数;

(3.6) 表示: 距离的求解方式;

(3.7) 表示: 功能区 m 与功能区 n 之间的平均物流作业量的求解公式;

(3.8) 表示: 表示功能区之间的平均物流作业成本的计算公式;

(3.9) 表示: 任意两功能区之间不能重叠;

(3.10) 表示: 功能区位于堆场的边界之内;

(3.11) 表示: 任意两功能区之间不能重叠;

(3.12) 表示: 功能区位于堆场的边界之内;

(3.13) 表示: 功能区间水平方向的距离的求解方式;

(3.14) 表示: 功能区间垂直方向的距离的求解方式;

(3.15) 表示: 功能区不能超过堆场的长度限制;

(3.16) 表示: 功能区不能超过堆场的宽度限制;

(3.17) 表示: 功能区面积之和小于堆场总面积;

(3.18) 表示: 功能区的面积表示方式;

(3.19) 表示: 功能区的长宽的比例系数;

(3.20) 表示: 功能区的长宽比例的限制范围, 目的是最后得出优化结果后, 将其转为为布局图的条件;

(3.21) 表示功能区重心的范围。

由于上述模型多目标的优化问题, 需要将其转化为单一目标的问题, 方便于模型的求解。本文采用赋权值的方法来将其进行转化, 分别将 W_1 赋予 F_1 , 将 W_2 赋予 F_2 。具体权值的值是多少, 需要根据具体的情形而定, 并且要求 $W_1 + W_2 = 1$, 它的确定可以根据各个目标的优先级来进行确定, 也可由专家进行确定。 W_1 和

W_2 代表的是物流和非物流相互关系的相对重要性,通常这一相对重要性的比值不应超过 1:3~3:1。比值越大代表物流关系占据着主导地位,比值小表示非物流关系占据着主导。根据现实情况按照物流和非物流相互关系的相对重要性,将比值可设为 1:2, 2:1, 1:1, 1:3, 3:1 等。同时由于存在不同量纲的问题,需要将其转化为统一的尺度进行综合决策。本文分别在 F_1 和 F_2 前引入 Z_1 和 Z_2 , 具体的值的确定在后面进行具体的阐述。

最后得到的总的目标函数如下:

$$\begin{aligned} \min F &= Z_1 W_1 F_1 + Z_2 W_2 F_2 \\ &= Z_1 \times W_1 \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N [Q_{mn} \times (\frac{GC_j}{Z_j C_j} \times QC_{mn} + WXC_j) \frac{1}{D_1} + \frac{GZC_j}{D_2} \\ &\quad + EC_j) \times (|x_m - x_n| + |y_m - y_n|)] \\ &\quad + Z_2 \times W_2 \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N (1 - R_{mn} V_{mn}) \end{aligned}$$

3.3 模型求解

GA (遗传算法) [44-50], 是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法, 非常适用于处理传统搜索方法难以解决的复杂和非线性优化问题。遗传算法的核心是遗传理论中的染色体的遗传、变异和交叉, 其中关键是针对特定问题的染色体进行编码。

遗传算法中包含了五个基本要素, 分别为: 参数编码、初始群体的设定、适应度函数的设计、遗传操作设计和控制参数设定。

在遗传算法的求解时, 染色体是求解的基础, 它是繁殖和进化的基本单元。染色体的编码形式不少, 可以进行直接编码 (直接采用对子任务的执行状态进行编码), 或者采用简介编码的方式。编码方法可以分为四大类: 二进制编码法、格雷码、浮点编码法、符号编码法。上述的编码方式在遗传算法的求解时, 需要根据问题的具体情况进行具体与实际的选用。编好码以后, 就可以来进行遗传算法中种群大小和适应度值的确定。

群体大小是遗传算法中一个重要的部分。它与遗传后代数决定了如何做广泛

而全面的努力搜索。一般说来,所取这些参数越大,被探索的空间就愈全面。然而在大规模的问题中,随机搜索过程也对搜索算法的质量有很大的影响。

适应度值是评价染色体优劣的,遗传算法用适应度评价后优者保留,劣者将被淘汰。一般遗传算法中,适应度函数由目标函数来确定。在适应度函数的表达中,将目标函数映射成最大值形式且函数值非负是必要的。并且在遗传算法求解时仅依靠目标函数的变形来评估和引导搜索,并不能将所有固定的约束条件明确的表示出来,需要采用一定的惩罚方法。该方法的思想是设法对个体违背约束条件的情况进行惩罚,并将此惩罚体现在适应度函数的设计中,称为带惩罚函数项的目标函数式的适应度函数。

遗传算法中经常用到三个遗传算子,即选择、交叉和变异。

选择是在同代中从不太适应着中间区别较为合适的染色体的过程。选出一代中较为合适的染色体目的是为繁殖染色体的下一代。最不合适的染色体将被淘汰,而用最适应的染色体进行置换,方法是在遗传过程中将给最合适的染色体更多的机会。选择的方式一般采用蒙特卡罗来进行。设群体的大小为 n , 其中个体 i 的适应度值为 f_i , 则 i 被选择的概率 p_{si} 为 $p_{si} = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^M f_j}$; 显然, 概率 p_{si} 反映了个体 i 的适应度在整个群体的个体适应度总和中所占的比例。个体适应度越大, 其被选择的概率就越大。

交叉是遗传算法中最重要的遗传算子。有两个父代染色体彼此交换体节, 结果将产生两个子染色体。交叉算子又包括部分匹配交叉和指令交叉两种。

变异是为了解决陡峭下降成对交换过程时求解快速集中于一局部优化点的问题。在遗传算法中应用一个称之为变异的遗传算子就能避免这一问题。如用随机改变基因值的办法就能做到, 并由此产生新的染色体。遗传算法中变异算子用的并不是那么频繁, 它的发生有概率决定。

遗传算法的求解一般步骤:

Step1 使用随机方法或者其他方法, 产生一个有 N 个染色体的初始群体 $\text{pop}(1)$, $t=1$ 。

Step2 对群体 $\text{pop}(t)$ 中的每一个染色体 $\text{pop}_i(t)$, 计算它的适应度值 $f_i = \text{fitness}(\text{pop}_i(t))$ 。

Step3 若满足停止条件，则算法停止；否则，以概率 $p_i = f_i / \sum_{j=1}^N f_j$ 从 $\text{pop}(t)$ 中随机选择一些染色体构成新种群 $\text{newpop}(t+1) = \{\text{pop}_j(t) \mid j=1,2,\dots,N\}$ 。

Step4 以概率 p_c 进行交叉产生一个新的染色体，得到一个新的群体 $\text{crosspop}(t+1)$ 。

Step5 以一个较小的概率 p_m 使染色体的一个基因发生变异，形成 $\text{mutpop}(t+1)$ ； $t = t+1$ ，成为一个新的群体 $\text{pop}(t) = \text{mutpop}(t+1)$ ；返回 step2。

遗传算法的基本流程如图 3.5：

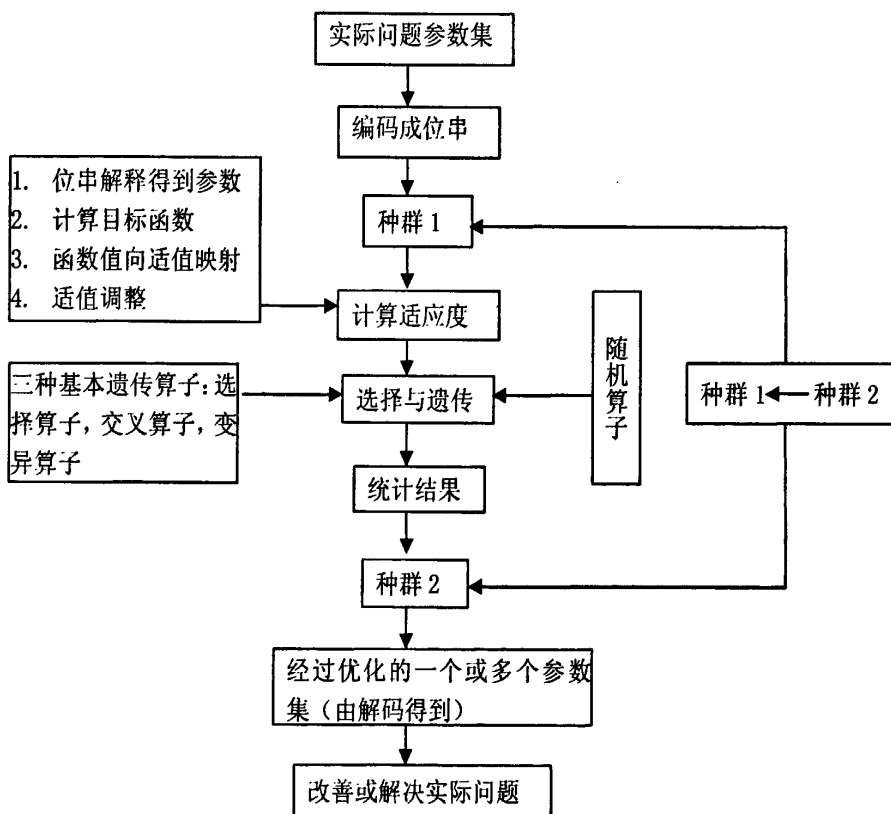


图 3.5 遗传算法的基本流程

Fig3.5 The basic process of genetic algorithm

总的来说，先构造初始种群，它可通过特定的方法来生成。初始种群产生后，需要将所有染色体相应的适应度值都计算出。在算法的迭代过程中必须对染色体进行选择、交叉和变异。选择可以基于染色体的适应度值来进行，选择的方法可以有多种，比如说基于轮盘赌的选择法的策略，选择的最终目的是为了保留最

优的个体。对染色体进行交叉是为了生成更好的个体，而变异操作能丰富种群中个体的多样性。鉴于上述模型的特点，本文采用遗传算法进行求解。

在遗传算法进行求解过程中，种群数 N ，初始计算对于函数 F_i ($i = 1, 2$)，每个都会有 N 个取值，令 $Z_i = 1/\max(F_{iN})$ ，这样将目标函数转化为取值范围在 $[0, 1]$ 的目标函数。

该模型的初始的已知数据为 Q_{mn} 、 C_{mn} 、 DD_m 、 ZS 、 DL 、 DP 。决策变量为 (x_m, y_m, L_m) 。在进行求解之前，本文在变量（出去一些固定的量 Q_{mn} 、 C_{mn} 、 DD_m 、 ZS 、 DL 、 DP 以外）上加入一个下标 i ，以此来标记遗传算法求解的优化次数。如 x_{mi} 表示第 i 次优化后功能区 n 在堆场布局中重心的横坐标； L_i 表示第 i 次优化后表示集装箱堆场的横向长度，其它以此类推。初始的横纵坐标以及长宽均设为 0。文章设置 $a = \max[|x_m - x_n| + \frac{1}{2}(a_m + a_n)]$ 和 $b = \max[|y_m - y_n| + \frac{1}{2}(b_m + b_n)]$ ， $MJ_i^3 = a \times b$ ，它的目的是：进行优化求解时，判断是否得到最优解和求解结束的条件。求解的逻辑流程为：

(1) 利用各功能区的初始面积的计算公式 3.1、3.2 和功能区之间的平均物流作业量和平均物流作业成本的计算公式 3.7、3.8 求出相应的数据。在集装箱堆场实际面积、堆场长度和宽度的限制条件下，得出各功能区初始状态重心坐标以及长度 (x_{m1}, y_{m1}, L_{m1}) ，利用面积公式 3.1、3.2 求解出 P_{m1} ；并得到长 L_1 与宽 P_1 ，以及初始状态需要的堆场的面积 MJ_0^3 。然后以此类推进行求解。

(2) 根据上述模型的求解公式，得出第 $i-1$ 次和第 i 次优化的各功能区的横坐标、纵坐标以及面积。将第 $i-1$ 次优化得出面积与第 i 次优化得出的面积进行比较：

如果 $MJ_{i+1}^3 \leq MJ_i^3$ ，继续循环；

如果 $MJ_{i+1}^3 \geq MJ_i^3$ ，优化结束，输出结果。

上述建模以及模型的求解，给出了布局的具体的求解描述。在研究集装箱码头堆场的有效管理和控制时，除了布局优化是一个很重要的部分之外，场桥调度优化也是必不可少的。下文就研究场桥调度优化，具体的包括路径优化和场桥调配的优化。

第4章 场桥调度优化模型及算法

在集装箱码头堆场优化中,堆场布局是很重要的一方面。好的堆场布局可以为码头日后的运营创造很好的条件。但是只考虑堆场布局还是不够的,如果想要进一步的降低堆场作业成本,还需要进行场桥调度优化的研究。因为场桥调度的好坏关系着船舶在港时间、外集卡在场作业时间等各种码头服务质量的问题。但是,现在很多研究中对场桥调度优化的研究还是比较少的。并且,对于该问题,更多的是采用整数规划模型来进行求解,可能与实际情况不符。

因此,本文采用下述步骤对场桥调度进行优化。具体将其分为两个方面,即路径优化和场桥调配两方面,这样不仅很好的解决了实际问题,而且也便于问题的求解。同时,也更好的指导了实践。

4.1 场桥调度的原则

在对场桥调度进行优化之前,首先需要明确场桥调度时作业的原则,具体如下:

(1)场桥需要进行合理的调度和优化作业,否则不仅会加长内集卡在堆场内的等待时间,同时也影响岸桥,延长岸桥等待内集卡的时间;也会延长外集卡进入堆场中的装卸时间,导致堆场内部和闸口的拥堵。

(2)在一般情况下,不能让外集卡的司机在堆场内等候时间超过 60min,过长的等待时间可能会招致投诉,也影响码头的信誉。为此,一般情况下,堆场需要在 30min 之内完成外集卡的装卸工作。

(3)在一般情况下,要知道外集卡到达堆场的时间是很难,也是不切实际的。但是可以通过分析历史数据对其到达的时间做一个大致的分析,以概率的形式对外集卡到达的时间段和数量做一个描述。

一般情况下,集装箱码头在实际操作时,为了改善由于外集卡进入不确定性而造成的场桥分配数量困难的情况,大多数码头采用以 4h 为一个单位来分配场桥数量。同时在可能的情况下,对即将进入堆场的外集卡进行一行预约控制,以达到改善场桥空耗的情况。

(4)场桥数量不能任意分配,一方面是作业于场桥的司机有固定的工作班次;

另一方面是,场桥一旦被分配工作就一直处于热备状态,即使不进行作业也不能频繁关闭,否则会损伤发动机。这样要求不进行作业的设备一直处于热备状态中,增加了设备的磨损和电力的浪费。如何来合理的确定处于热备状态的场桥数量,是一个需要研究的问题。

(5)尽量缩短场桥的移动距离,减少场桥的移动次数。场桥在不同功能区的移动,尤其是在不同行的功能区的移动时,需要进行旋转,而其轮胎进行旋转会占用大量的时间,同时也会产生不必要的成本损耗。这些无效作业以及产生的无效成本,是码头日常作业需要尽量避免的。

4.2 场桥路径优化建模与求解

场桥调度优化是集装箱堆场优化研究的一个很重要的方面,因此对其进行很好的研究是非常有意义的。本文为了很好的研究场桥调度的问题,将其分为两个方面来进行优化研究,下面首先研究场桥行走路径的优化。

场桥的路径优化与车辆路径问题(VRP)类似,VRP一般指对一系列的客户点,组织适当的行车路线。在满足一定约束条件(如货物需求量、车辆容量限制和时间窗限制等)下,达到一定的目标(如运距最短、费用最少、车辆数尽量少和客户满意度最佳等)。场桥的路径优化问题,指在场桥在堆场中的各功能区间进行运行时,达到运行路径最短的问题。

在实际的场桥路径优化时,首先需要将实际问题进行抽象。文章中,将堆场中的各个功能区抽象为一个节点,并建立各个功能区之间的强连通图。问题的数学描述如下所述:

对堆场中各功能区进行抽象,并建立强连通图。在抽象的强连通图中,用数组 $F[0, N]$ 表示存在数目有限的功能区节点,其中 $F[0]$ 表示源节点,数组的值等于各个节点的物流作业量;用 $D[m, n]$ 表示用功能区 m 与功能区 n 之间的距离长度 d_{mn} ,由于第三章已经布局好了堆场,因此各个功能区之间的距离基本是固定的。由于考虑到堆场中通道的存在(主箱区的通道和供场桥运行的通道)以及正在进行作业的存在,功能区之间并不是总是可以直接到达的,为此本文引入阻尼系数的进行限制这种不可到达的情况。本论文中用 $Z(m, n, t)$ 表示箱区间不通畅的时间阻尼系数,具体理解为在 t 时间时,因作业以及通道引起的对功能区 m 与

功能区 n 之间的通道顺畅的影响程度。因此, $D[m, n] \times Z[i, j, t]$ 表示在 t 时间时, 功能区 m 与功能区 n 之间的加权之后的距离的长度。

在明确了上述的定义之后, 就可以来进行路径优化的求解了。在进行求解之前, 需要知道在阻尼系数的影响下, 任意功能区之间在每个时点下的最短距离, 具体的求解本文采用 Dijkstra 来进行。其伪代码如下:

```
Shortest-path (intcost[][N], intv, intn, intdist[], intpath[])
{
    inti, N, count, pos[n];
    for(i=0; m<N; m++){
        S[m]=0;           /x 标记数组置 0x/
        dist[m]=cost[v][m]; /将邻接矩阵第 v 行元素依次送 dist 数组 x/
        path[m][0]=v;     /x 源点 v 到个顶点的路径置初值/
        pos[m]=0;         /第 m 条路径的位置计数器置初值 x/
    }                    /x 对辅助数组进行初始化/
    S[v]=1;
    count=1;             /x 计数器赋初值 1x/
    while (count<N) {    /以下执行程序 n-1 次 x/
        u=misdist(s, dist); /x 利用 s 和 dist 在尚未找到最短路的顶点中确定一个与 v
                           最近的顶点 u/
        S[u]=1;          /置 u 的标记为 1/
        path[u]c++pos[u]=u; /x 将 u 添加到 v 到 u 的最短路径中/
        count++;         /计算器累计 n1x/
        while(1) {       /根据 n 更新 v 到所有尚未确定最短路径的顶点的路径长度/
            if ((w=search_ver(s, dist, u))==-1);
                /找到通过 u 可以直接到达, 且尚未确定最短路径的一个顶点/
            break;       /x 未找到, 路径长度更新过程结束/
            else {
                if (dist[u]+cost[u][w]<dist[w]) {
                    dist[N]=dist[u]+cost[u][w]; /x 更新路径长度/
```

```

for(i=0;m<pos[u];m++)
path[w][m]=path[u][m]; /用源点 v 到顶点 u 的路径替换源点 v 到 w 的路径/
}
}}

```

运行 Shortest-path () 函数可以获得任意两点在某时段的最短路径。

由于堆场布局较为复杂,各功能区之间的网络很是复杂,不利于直接进行遍历,故现将网络图进行抽象,获得仅有源节点和目的地节点的拓扑网络图。通过对 24 个时点的运算,可以获得所需的强连通拓扑图,并用 $RWM[m, n, t]$, 它表示 t 时点下,功能区 m 与功能区 n 两节点间的最短路径。

在获取了拓扑网络图后,该问题就转化为旅行商问题 (TSP)。旅行商问题是多个节点的无缺遍历问题,目标是让其费用最少。

解决旅行商问题方法很多,如禁忌搜索法、动态研究、蚁群算法、遗传算法等。但是鉴于禁忌搜索法效率较低,蚁群算法和遗传算法虽计算效率高但是几率选优算法,一般求得的结果为近似最优解而非最优解。动态研究算法虽然效率不及蚁群算法、遗传算法效率高,却高于禁忌搜索法,但对于数量不是很大的问题来说已足够,同时,所求的结果是最优解。因此,本文采用动态研究算法来进行求解。

(1)阶段 k : 已经经历的结点个数,包括当前所在的节点, $k = 1, 2, \dots, n, n+1$, 其中 $k=1$ 表示出发时位于起点, $k=n+1$ 表述结束回到终点。

(2)状态变量: $x_k = (i, S_k)$, 其中 i 表示当前所在的节点, S_k 表示尚未访问过的节点的集合。显然, $S_1 = (2, 3, \dots, n)$, $S_n = S_{n+1} = F$, $F \in \varphi$, 为空集。并有 $x_n = (n, F)$, $x_{n+1} = (1, F)$ 。

(3)决策变量: $d_k = (i, j)$, 其中 i 为当前所在节点, j 为下一个将要达到的节点。

(4)状态转移方程: 若当前的状态为 $x_k = (i, S_k)$, 决策变量 $d_k = (i, j)$, 则下一步到达的状态为: $x_{k+1} = T(x_k, d_k) = (j, S_k/j)$, 其中 $S_k/j = (j+1, j+2, \dots, n, n+1)$ 。

(5)阶段指标: $V(x_k, d_k) = C_{ij}$ 。

(6)最优指标函数: $f_k(x_k) = f_k = (i, S_k)$, 表示从节点 i 出发, 经过 S_k 中每个节点一次且仅一次, 最终返回终点的最短距离。

(7)终端条件: $f_{n+1}(X_{n+1}) = f_{n+1} = (1, F) = 0$ 。

本文中对场桥路径的优化, 由于阻尼系数的存在, 将原强连通拓扑图从时间上断开。并且, 由于在堆场内作业时, 场桥可以开启多台同时进行, 因此问题可以理解成为多个 TSP 问题。为此, 本文对路径的优化, 采用下步骤:

(1)设定时点状态变量 $\text{TimeFlag}[1, \dots, n]$, 初始化为全真; 设定节点状态变量为 $\text{NodeFlag}[1, \dots, N]$, 初始化为全真。

(2)构建拓扑图, 使用 NodeFlag 中的非假节点和源节点。使用所有可见路径, 取其状态为真的所有时点下的最小权值。

(3)采用 TSP 问题的动态研究解法, 求解当前拓扑图中的最优遍历路径 Path 。

(4)循环所有非假状态的时点状态变量, 比较 Path 中选用当前时点路权时所能联通的节点数目, 选取节点数目最大的节点, 记录 Path , 更改此节点时点状态为假, 更新所联通的节点 NodeFlag 为假。

(5)循环, 执行第二步, 结束条件为所有节点的 NodeFlag 都为假。最终可以求得 U 条不同时点的遍历路线。

4.3 场桥调配优化建模与求解

有些码头在确定场桥的需求数量时, 会采用下述简单的计算公式:

$$N = \frac{Q \times (U_1 \cdot K_1 + U_2 \cdot K_2)}{V \times \gamma \times D_1 \times D_3}$$

其中:

Q : 表示集装箱堆场的年作业箱量;

U_1 : 表示集装箱堆场的年作业箱量中重箱的比例;

U_2 : 表示集装箱堆场的年作业箱量中空箱的比例;

K_1 : 表示重箱中由场桥作业的比例;

K_2 : 表示空箱中由场桥作业的比例;

V : 表示堆场中场桥的平均天作业箱量;

γ : 表示场桥的使用率;

D_1 : 表示场桥的年可作业天数;

D_3 : 表示场桥的天可作业的时间。

场桥的作业箱量会受到工作人员的作业水平、场地条件、集港和提箱流量分布均匀性等的影响。同时,场桥活动空间比较大,一般其使用率可以为 70%~80%。并且,一般的集装箱码头堆场中,重箱 100%由场桥操作,空箱 60%由场桥操作,剩余的空箱由堆高机等其他辅助机械完成。

上述方法,对于一般的码头进行简单的日常计算还是比较简单实用的。但是,该方法计算过于粗略,如果要进行精确的计算,则是不可取的。为此,下文对场桥调配优化进行详细的研究。

在上一小节中,给出了场桥行走路径的求解。经过上述的路径优化求解后,可以获得优化后的某个任务序列的遍历功能区的顺序和最短路径。在此基础上,就进行场桥需求数量的求解。具体的求解方式如下:

目标函数:

$$\min C = \sum_{k=1}^L FC(j) + VC(i, j, k, u) \quad (i = 1, 2, \dots, m, \dots, n, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, K; u = 1, 2, \dots, U) \quad (4.1)$$

$$FC(j) = \left(\frac{GC_j}{D_1 \times D_3} + \frac{GZC_j}{D_2 \times D_3} + \frac{WXC_j}{D_1 \times D_3} \right) \times T \quad (4.2)$$

$$VC(i, j, k, u) = EC_j \times \left[\min \left(\sum_m^k \sum_n^{k-m} (RWM_{(m,n)}^{ku}, V_j \times T_{(m,n)}^{ku}) \right) \right] \times M_{ijk}^u \times T \quad (4.3)$$

约束条件:

$$T_{(m,n)}^{ku} = \frac{\min(d_{mn}^1)}{V_j} \quad (4.4)$$

$$0 < T^{uk} \leq T^u \quad (4.5)$$

$$\sum_{k=1}^K (T - T^{uk}) \leq \min \sum_{k=1}^K T^{uk} \quad (4.6)$$

$$\sum_{j=1}^M M_{ijk}^u \leq h \quad (4.7)$$

$$\sum_{i=1}^M M_{ijk}^u = 1 \quad (4.8)$$

$$L \leq M \quad (4.9)$$

其中:

$FC(j)$: 表示场桥在研究期 T 运行产生的固定成本;

$VC(i, j, k, u)$: 表示场桥在研究期 T 运行产生的可变成本;

i : 表示第 i 功能区, $i = 1, 2, \dots, m, \dots, n, \dots, N$; j : 表示某场桥的标号, $j = 1, 2, \dots, M$; k : 表

示某个任务序列的标号, $k = 1, 2, \dots, K$; u : 表示路径优化求出的某个遍历方案,

$u = 1, 2, \dots, U$;

T : 表示研究期 T ;

V_j : 表示场桥的平均行走速度;

$T_{(m,n)}^{ku}$: 表示任务序列 k 采用 u 方案时, 任务序列中的功能区 m 与功能区 n 之间任务完成作业所用的时间;

T^{uk} : 表示表示任务序列 k 采用 u 方案完成作业所需的时间;

T^u : 表示要求任务完成的最长时间的限制;

$RWM_{(m,n)}^{ku}$: 表示任务序列 k 采用 u 方案时, 在路径优化中求出的最短路径;

$M_{ijk}^u \begin{cases} 0 & \text{在 } u \text{ 方案中, 场桥 } j \text{ 在功能区 } i \text{ 有任务序列 } k \\ 1 & \text{在 } u \text{ 方案中, 场桥 } j \text{ 在功能区 } i \text{ 无任务序列 } k \end{cases}$

h : 表示功能区 i 最多可作业的场桥数量;

L : 表示作业中选用场桥的数量。

其中, 目标函数为场桥运营的总成本, 分别包括可变成本和固定成本。约束 (4.3) 表示: 表示任务序列 k 采用 u 方案时, 任务序列中的功能区 m 与功能区 n 之间任务完成作业所用的时间; (4.4) 表示: 确保任务按时完成; (4.5) 表示: 研究期内, 所有场桥的总非作业时间小于总作业时间, 否则多开一台场桥; (4.6) 表示: 功能区 i 最多有 h 台场桥同时作业, 一般要求最多两台; (4.7) 表示: 场桥 j 有任务且一次只能执行一个任务; (4.8) 表示: 作业时, 场桥需求数量小于场桥总量。

上述模型的求解, 本文采用遗传算法来进行求解。具体的关于遗传算法的介绍, 在第三章已有详细的讲解, 本章中不再赘述。

第5章 堆场仿真的模块选择及评价指标建立

Flexsim 由美国 Flexsim Software Products 公司出品, 是一款商业化离散事件系统仿真软件, 是目前世界上唯一拥有 C++IDE 接口及编译器的图形仿真环境的软件。Flexsim 软件提供了原始数据拟合、输入建模、图形化的模型构建、虚拟显示、运行模型进行仿真实验、对结果进行优化, 和生成 3D 动画影像文件等功能, 也提供了与其他工具软件的接口。Flexsim 软件的特点主要体现在采用面向对象技术和 3D 显示效果。

Flexsim 提供了一系列用于构建系统仿真模型的 Element (元素), 这些基本元素可分为 Discreteelement (离散元素)、Logical element (逻辑元素)、Graphical modeling element (图形建模元素) 等。Flexsim 仿真模型的基本组成有:

- (1)对象 (Objects)。Flexsim 采用对象对实际过程中的各元素建模。
- (2)连接 (Connections)。Flexsim 中通过对象之间的连接定义模型的流程。
- (3)方法 (Methods)。对象中的方法定义了模型中各对象所需要完成的作业。Flexsim 有丰富的对象库, 其中实体也是灵活方便, 可以满足客户个性需求, 且可以自定义实体并保存, 方便以后调用。对象可分为离散类和连续类, 离散类包括资源类、执行类、网络类、图示类。离散时间仿真^[51-53]的一般步骤:

Step1 定义问题: 清楚定义问题和说明研究的意义。

Step2 定义系统: 根据现有资源定义系统的边界和约束。

Step3 建立概念模型: 开发一个图形模型来定义组成这一系统的各个组成要素。

Step4 初步设计: 决定和挑选一些认为对系统性能关键的因素, 并将这些因素设置在一个和研究相应的水平上。

Step5 准备输入数据: 识别与收集仿真模型所需要的数据。

Step6 模型转换: 将模型语言转化为仿真语言。

Step7 验证和确认: 保证输出代表真实系统。

Step8 试验: 修正参数和长期的影响。

Step9 分析与解释: 从产生的数据进行推理。

Step10 实施和整理文件。

以上仿真步骤表达成仿真模型流程图^[54-56]图 5.1) 为：

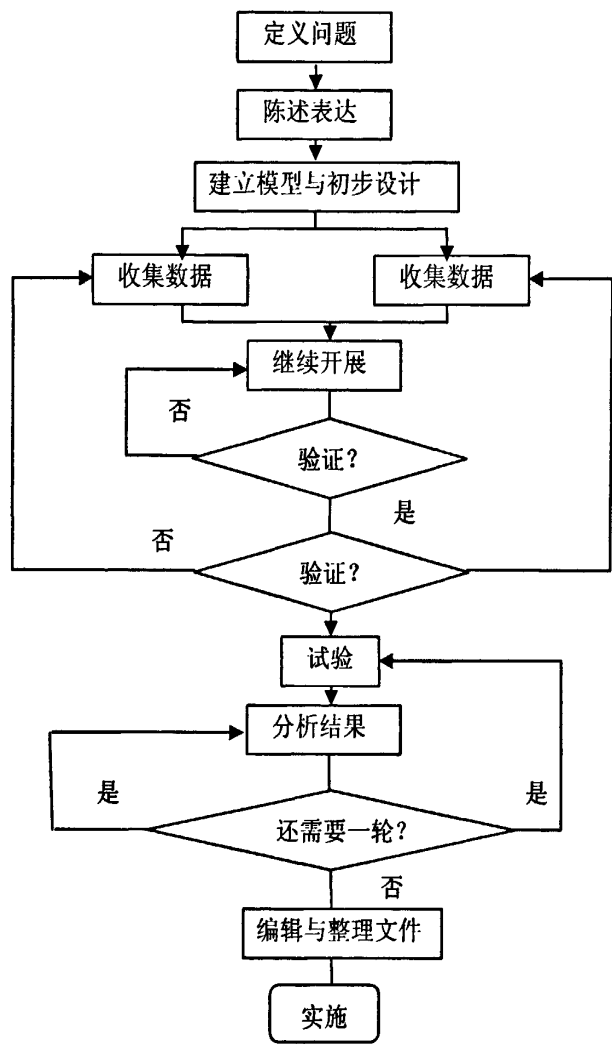


图 5.1 仿真模型流程步骤
Fig 5.1 The basic process of simulation

5.1 堆场仿真模块选择

集装箱码头堆场系统的仿真有 7 个基本组成，分别为闸口、堆场、集卡、场桥、岸桥和船舶。这 7 个部分共同关系的堆场的优化研究。在进行堆场系统建模之前，需要对堆场的作业流程进行一定的研究。本文以箱子的作业种类来对流程进行表述。集装箱码头堆场中的集装箱可分为进口箱和出口箱，其中各自又分为重箱和空箱。具体的流程图如图 5.2 和图 5.3：

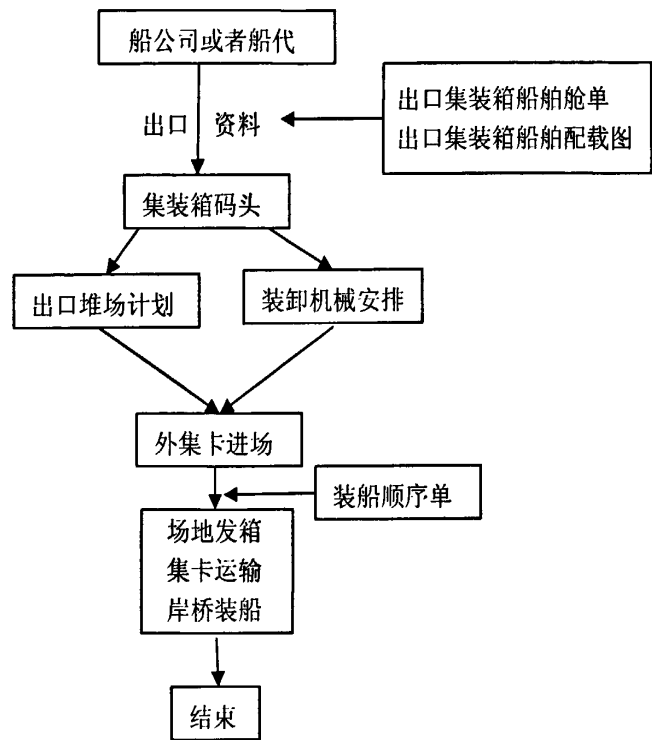


图 5.2 出口箱的码头作业流程
Fig The process about the export box of yard

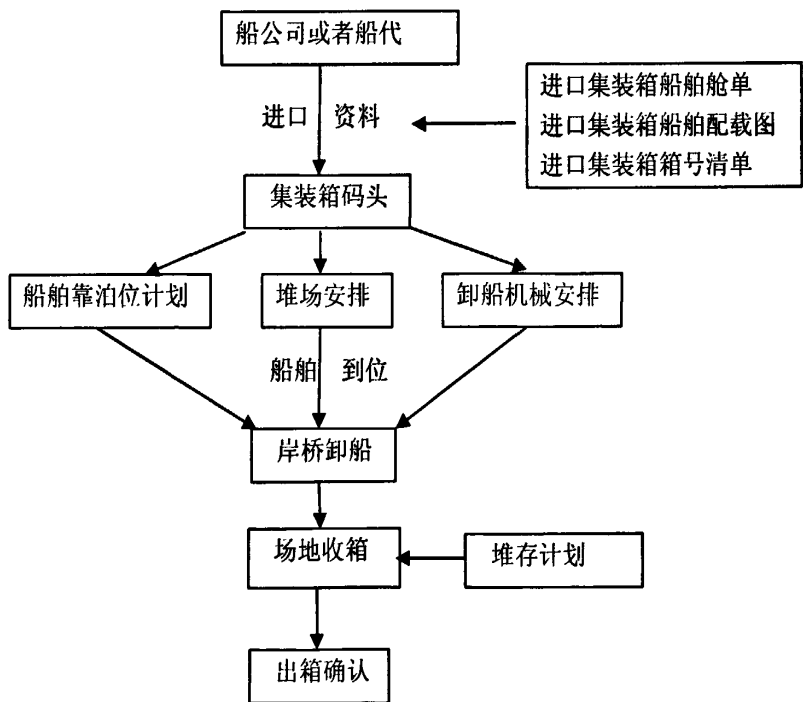


图 5.3 进口箱的码头作业流程
Fig The process about the import box of yard

有了上述的进、出口箱的作业流程就可以应用仿真软件将其虚拟化,进行仿真研究。在进行仿真研究之前,需要进行模型的抽象和简化、仿真模块的划分以及必要的参数设定。

5.1.1 模型的抽象和简化

基于 Flexsim 的集装箱码头堆场的作业系统仿真模型的抽象和简化如下:

- (1) 模型中闸口数量一定,闸口中集装箱的进入服从一定的分布函数。
- (2) 模型中堆场的初始集装箱随机产生。
- (3) 模型中集卡分为外集卡和内集卡两种,内集卡负责集装箱由闸口进入堆场的部分,内集卡负责从岸桥上卸下集装箱进入堆场的部分。
- (4) 模型中设定场桥和岸桥装卸作业时间服从一定的分布函数。
- (5) 模型中集装箱箱型为一定的标准集装箱,不考虑特种箱的影响。但是对重、空箱箱型的比例进行设定。
- (6) 模型中在堆场作业中忽略移箱、翻箱等作业。
- (7) 模型中集卡的行走速度进行规定。
- (8) 模型中场桥的行走速度和转弯速度进行确定。

5.1.2 模块的划分和参数设定

(1) 模块的划分

模块化是进行 Flexsim 仿真的一个很重要的部分,进行模块化也要遵循一定的原则:模块独立性最大的原则,这个最重要也是最基础的原则;恰当的掌握模块的大小;尽可能的把相关的部分放置在一个模块中的原则;尽可能的消除重复的工作,减少冗余的原则。通过模块化的划分将一个复杂的系统划分为若干个单一功能、相对独立的模块,从而将复杂的问题简单化。同时,通过模块的划分,把每个模块要解决的问题局限在有限的范围之内,处理一个模块的问题时不必考虑模块边界外的问题,减少出错的机会。模块化也可使问题简单明了,易于理解,使程序看起来更清晰和有条理。根据集装箱码头堆场的组成,本文仿真模型分为以下几个模块:

①堆场模块。按照堆场中各个功能区,将堆场模块又可分为各自的子模块,分别为:重箱堆存区、空箱堆存区、拆装箱区、缓冲区、查验区、特殊箱区、工

具箱区共7个功能区模块。各个功能区又会有自己的小模块，如特种箱区又可以根据码头的具体情况分为冷藏箱，熏蒸区，危险品等。

②集装箱产生模块。集装箱堆场中的初始化情况可随机产生。集装箱箱子的产生按照一定的分布函数进行，并且轻箱和重箱的产生比例严格按照一定的比例进行。这里的集装箱产生模块的作用相当于进行了内集卡的产生模块，可以理解为是外集卡的进入堆场的情况。

③集卡模块。集卡在堆场内部的运行。集卡分为外集卡和内集卡两种，内集卡负责集装箱由闸口进入堆场的部分，内集卡负责从岸桥上卸下集装箱进入堆场的部分。这里的集卡模块只负责内集卡的部分。

④岸桥模块。负责岸桥的作业。岸桥的数量的确定，需要考虑船舶的型号、船舶的长度大小、船舶的装载量和需要作业的集装箱装卸量，还需要预计船舶的离港时间。下面给予岸桥数量确定的公式：

$$N_{gc}^i = \frac{N_{ct}^i}{C_{gc} \times T_{gc}^i}$$

其中： N_{gc}^i 表示为第 i 船舶分配的岸桥的数量； N_{ct}^i 表示 i 船舶装载的需要岸桥作业的集装箱数量； C_{gc} 表示岸桥的平均作业效率； T_{gc}^i 表示岸桥为船舶服务的最长时间。

⑤场桥模块。设有一个控制器，该控制器达到控制着场桥使用台数。控制器根据场桥需要作业量的情况，适当的决定开几台场桥。一旦场桥处于热备状态时，在工作天内就不能轻易随意的进行场桥的开启和关闭设置，尽可能减少场桥的耗电和耗损率。

⑥船舶模块。船舶的到达时间以及集装箱的数量的多少的情况确定。

(2)输入参数

仿真模型的输入参数有：仿真模型的初始化中集装箱堆场的集装箱数量以及比例情况，集装箱和外集卡到达时间间隔分布、箱型比例，到港船舶的时间、数量分布和载箱量分布，岸桥装卸速度以及岸桥其它作业参数，场桥的装卸速度，场桥的行走速度，场桥的转弯速度，集卡行走速度，场桥行走路径原则以及距离计算时参数的设定等。以及堆场的实际总面积，通道的宽度，闸口的数量等。

5.2 仿真的主要评价指标

集装箱码头堆场的主要评价指标有：

(1) 堆场利用率 (U_y)

集装箱按照流向可以分为进口集装箱、出口集装箱和中转的集装箱三种。衡量堆场作业的优劣，免不了要利用集装箱箱区中的每个箱位被利用的长短来进行，即堆场利用率的指标。

$$U_y = \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{Q_i} T_{ij}^s \right) / [T_{st} \times (k_{exp} + k_{imp})] \quad (5.1)$$

$$T_{ij}^s \leq T_{ct} \quad (5.2)$$

$$T_{ij}^s \leq T_{dt} \quad (5.3)$$

其中：

U_y ：表示集装箱码头在 T_{st} 内的堆场利用率；

T_{ij}^s ：表示功能区的单个集装箱在堆场时的堆存时间；

T_{st} ：表示堆场箱位的研究期，一般以月、季度或年作为单位；

T_{ct} ：表示码头规定的出口集装箱可以进入堆场的时间（一般为 5~10 天不等）；

T_{dt} ：表示码头规定的进口集装箱可以在堆场堆存的免收费用的这段时间（一般为 3~7 天）；

k_{exp} ：表示集装箱码头的需要进行出口作业的所有集装箱的数量；

k_{imp} ：表示集装箱码头的需要进行进口作业的所有集装箱的数量；

Q_i ：表示第 i 功能区的总的集装箱箱量。

(5.2) 和 (5.3) 表示分别为集装箱时间的限制。

在上述的目标中，未考虑特种箱，一则是因为特种箱的数量较少，在堆场中的箱位数也较少；二是因为特种箱有不少采用直提的方式。

其中，堆场的利用率又可分为重箱堆存区利用率、空箱堆存区利用率以及拆装箱堆存区利用率等。为了更好的评价堆场中各个功能区的利用率，文章可通过上述公式来进行具体的分析。

(2) 场桥的利用率 (U_{yc})

场桥的主要任务就是将需要进行出口作业的集装箱从堆场放置到集卡上，将

需要进行堆场作业的集装箱从集卡上卸载到堆场中,即在集装箱堆场内进行集装箱装卸的设备。它的主要目标是:在完成分配的堆场作业的同时,将场桥的行走路径和转弯次数最小化,以及需求数量最小化。

$$U_{yc} = \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{Q_i} (T_{ij}^{sc} + T_{ij}^{rc}) \right) / (T_{yst} \times N) \quad (5.4)$$

$$T_{yst} = T_{ij}^{sc} + T_{ij}^{rc} + T_{ij}^{mv} + T_{ij}^{id} + T_{ij}^{mt} \quad (5.5)$$

其中:

T_{yst} : 表示一定研究期,一般将 $T_{yt} = T_{yst}$;

T_{ij}^{sc} : 表示在堆场的作业于集装箱的时间;

T_{ij}^{rc} : 表示倒箱作业产生的时间;

T_{ij}^{mv} : 表示移动产生的时间;

T_{ij}^{id} : 表示空闲时间;

T_{ij}^{mt} : 表示维修时间。

在本文的模型中,由于在 T_{yst} 内, T_{ij}^{sc} 和 T_{ij}^{mt} 时间很短,可以不计入时间求解的计算之内。同时,当求解结果出现 U_{yc} 偏小时,可以考虑停止部分场桥的使用,将其进行租赁,这样可以有效的减少码头的运营成本,将原本浪费的成本转变成收益;当 U_{yc} 较高时,说明场桥的使用已经接近饱和,可以考虑增加场桥的数量,保证码头未来的发展。

(3) 吞吐量

它是指在研究期内,在堆场完成的作业的集装箱数量,它能够反映出码头系统的作业效率。

(4) 堆场容量(S)

它是同一时间内最大安全堆存箱量。

$$S = \frac{Q \times t}{T \times \sigma} \text{ (TEU)} \quad (5.6)$$

其中,

Q : 表示堆场的年通过能力;

t : 表示堆场平均堆存期;

T: 表示堆场一年的经营总天数;

α : 表示堆场容量的利用系数。 α 的取值受很多条件的影响, 如管理水平、机械设备等, 是一个经验值, 各个集装箱堆场可能不同, 其变化范围通常为 0.75~0.85 之间。

(5) 平均堆存期 (t)

它是指集装箱进入堆场到集装箱离开堆场的堆存天数, 它是集装箱在堆场内滞留时间的反映, 即堆存时间长短的平均指标。

$$t = \frac{M_m}{M_n} \quad (5.7)$$

其中:

M_m : 表示堆存箱天数;

M_n : 表示堆存箱数。

在对其进行计算时, 计算时间的跨度应适当扩大, 一般至少为三个月; 否则当集装箱的堆存时间刚好处在跨度时期时, 计算的结果会比实际的堆存时间要短, 影响计算结果的实用性。平均堆存期短, 说明箱的流转快, 滞留时间短。

(6) 平均每天堆存箱数 (M_c)

它是指计算期内平均每天堆存的集装箱数量, 单位为 TEU。计算公式为:

$$M_c = \frac{M_m}{D_4} \quad (5.8)$$

其中:

M_m : 表示堆存箱天数;

D_4 : 表示日历天数。

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, 但还需结合平均堆存期的指标综合分析, 如果平均堆存期长, 则虽堆场的利用率高, 但有可能导致堆场积压, 影响码头通过能力。

通过上述研究 (仿真模块的选择以及主要评价指标的建立), 接下来就可以进行集装箱堆场的仿真研究。下文以某集装箱码头堆场的为例, 以具体的数据进行研究。

第 6 章 实例验证

通过对上述堆场功能区布局问题建模、求解，场桥调度的建模求解以及仿真的研究，初步确定了进行集装箱码头堆场优化研究的方法。下面以某集装箱码头堆场为例，采用上文模型进行堆场布局以及场桥调度的优化，并通过 flexsim 建立仿真模型来验证上述模型的结果。

6.1 A 集装箱堆场的概况

A 集装箱堆场的业务范围包括内外贸集装箱货物、大件散杂货、滚装货物的装卸业务；集装箱中转、堆存、保管、拆装、修洗、冷藏箱预检业务；保税仓储及港内短途运输业务。A 集装箱码头拥有集装箱专业泊位 2 个，码头岸线 730 米，前沿水深—14 米，码头总面积 28.2 万平方米，堆场面积 24 万平方米，年通过能力 120 万 TEU 以上。该码头的码头设备如表 6.1：

表 6.1 A 码头设备资源一览表

Tab6.1 Equipment resource list about A terminal yard		
设备名称	数量	主要技术参数
岸桥	6	吊具下最大起重量 65 吨，最大外伸距 60 米
场桥	8	吊具下最大起重量 40.5 吨，跨距 23.47 米，堆码标准箱 6 层， 超高箱 5 层
正面吊	3	最大起重量 40.5 吨、堆高 4 层
铲车	13	2 吨铲车 5 辆，3 吨铲车 4 辆，5 吨铲车 3 辆，20 吨铲车 1 辆
堆高机	1	起重量 13.6 吨，堆码标准箱 7 层，超高箱 6 层

A 集装箱码头拥有高效的信息系统以及先进的集装箱码头生管理产系统，如船舶到达的管理系统、集装箱码头的实时控制系统、堆场箱位以及堆区的控制系统、CFS 管理系统、集卡以及集装箱业务的受理系统、统计查询系统、收费以及记录系统等，通过这些能够充分满足客户的各种各样的需求。下面本文就以 A 集装箱码头来进行模型的具体阐述，具体包括布局优化、场桥调度优化和仿真对结果的验证。

6.2 堆场布局优化

在了解上述基本情况之后，下文在进行具体的集装箱码头堆场优化研究，首先进行布局优化的研究。

(1)功能区面积估算

根据对历史资料的统计，并结合第三章的面积求解公式，本文对 A 码头堆场的所需的功能区的面积进行了一定的估算，具体结果如表 6.2，并且各个功能区的长宽比例的上下限值见表 6.3。

表 6.2 集装箱码头各功能区的面积

Tab. 6.2 The area of container terminal each function

功能区编号	功能区名称	面积（10 ⁴ 平方米）
1	重箱堆存区	2.63
2	空箱堆存区	2.15
3	拆、装箱区	1.02
4	缓冲区	0.36
5	查验区	0.66
6	特种箱区	0.2
7	工具箱	0.1
合计		7.12

表 6.3 功能区的长宽上下限值参数表

Tab. 6.3 Parameter table with the upper and width limit of functional areas

功能区 编号	1	2	3	4	5	6	7
λ_{mmax}	2	2	4	3	3	2	3
λ_{mmin}	1	1	1	2	2	1	2

(2)功能区之间非物流相互关系图

根据从至表的物流量（表 6.4），计算出平均物流作业量和平均物流作业成本。根据历史数据找出各个功能区之间的相互关系，如图 6.1。利用图 6.1 就可以根据第三章的表 3.2 得出各个功能区之间的关联度值。

表 6.4 功能区之间的作业量（单位：10⁴TEU）

Tab6.4 The quantity between function areas(Unit: 10⁴TEU)

名称	重箱堆 存区	空箱堆存 区	拆、装箱区	缓冲区	查验区	特种箱区	工具箱
重箱堆存 区	0	0	1.85	1.21	0	0	0
空箱堆存 区	0	0	0.73	0	0	0	0
拆、装箱 区	0.3	0.12	0	0	0	0	0.21
缓冲区	1.21	0	0	0	0	0	0
查验区	3.0	1.97	3.27	0	0	0	0
特种箱区	0	0	0	0	0	0	0
工具箱	0	0	0.21	0	0	0	0

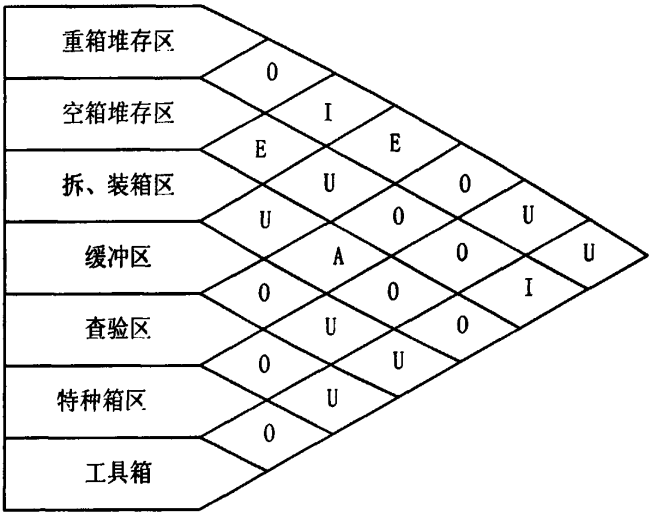


图6.1 堆场功能区之间的相互关系
Fig6.1The relationship about function areas

(3)算法的求解

在进行上述参数的基础上就可以采用遗传算法的来进行模型的求解了。本文采用 matlab2010b 的遗传算法的工具箱来进行求解。文中遗传算法的参数设置为：种群数为 200；交叉率为 0.4；变异率为 0.02；权重分别设置W₁和W₂为 0.75 和 0.25。

将求的结果中利用表 6.3 进行布局的修改, 并将布局中为填充满的空间进行填充。

通过 matlab 环境运行遗传算法程序, 图 6.2 为遗传算法的迭代图。

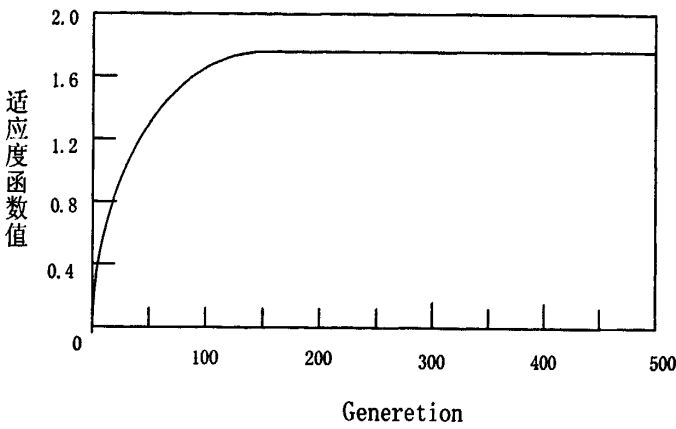


图 6.2 遗传算法迭代图

Fig6.2 Genetic algorithm running iterative image

从图中可以看出当运行到 150 代的时候适应度函数趋于收敛, 这时得到了最优解。将其转化为布局图, 得出的堆场布局图 (图 6.3) 为:

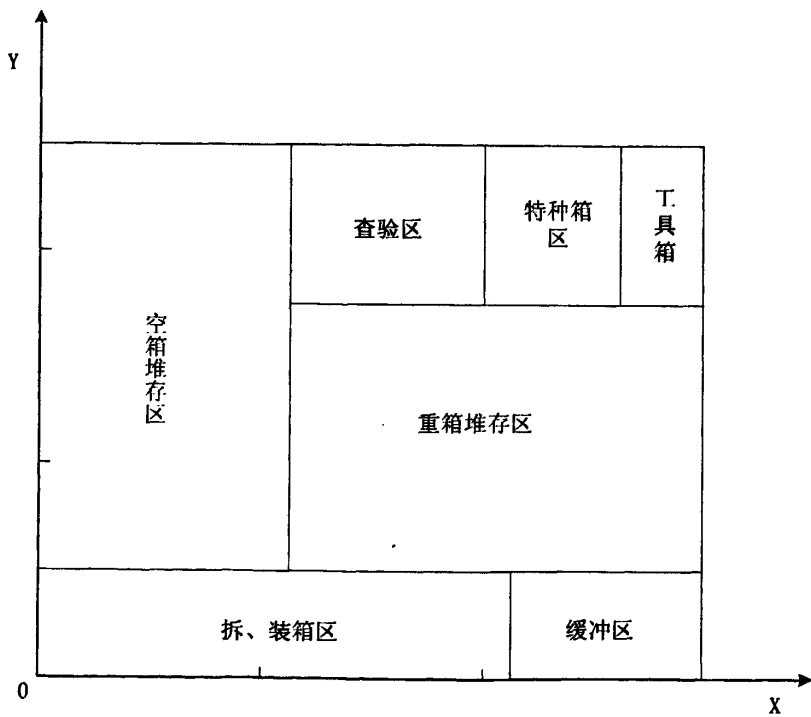


图 6.3 集装箱堆场布局图

Fig6.3 The layout of the container yard

6.3 场桥调度优化

在上一小节中，求出了堆场的布局，在此布局的基础上，接下来进行堆场作业的场桥的路径优化和场桥调配。

对 A 集装箱码头堆场中的场桥进行路径优化时，首先需要根据第四章中提及的最短路的算法求出各功能区之间的最短的邻接矩阵，如表示如下：

$$\begin{pmatrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 1 & 0 & 23 & 22 & 15 & 15 & 10 & 18 \\ 2 & 23 & 0 & 20 & 33 & 18 & 23 & 30 \\ 3 & 22 & 20 & 0 & 15 & 25 & 30 & 38 \\ 4 & 15 & 33 & 15 & 0 & 30 & 25 & 23 \\ 5 & 15 & 18 & 25 & 30 & 0 & 5 & 13 \\ 6 & 10 & 23 & 30 & 25 & 5 & 0 & 8 \\ 7 & 18 & 30 & 38 & 23 & 13 & 8 & 0 \end{pmatrix}$$

由于堆场中功能区的数目有限，且在 A 码头的研究发现，一般在堆场作业中，周三上午的 11 和 12 时点为堆场作业量最大的两个时间点。因此，以 11 和 12 时点为具体的研究时点，并结合阻尼系数之后的堆场中的各功能区之间的最短路径邻接矩阵为（左边为 11 时点，右边为 12 时点）：

$$\begin{pmatrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 1 & 0 & 23 & 22 & 18 & 15 & 10 & 18 \\ 2 & 23 & 0 & 20 & 33 & 18 & 23 & 30 \\ 3 & 22 & 20 & 0 & 15 & 27 & 30 & 38 \\ 4 & 18 & 33 & 15 & 0 & 30 & 25 & 23 \\ 5 & 15 & 18 & 27 & 30 & 0 & 5 & 13 \\ 6 & 10 & 23 & 30 & 25 & 5 & 0 & 8 \\ 7 & 18 & 30 & 38 & 23 & 13 & 8 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 1 & 0 & 23 & 22 & 17 & 15 & 10 & 18 \\ 2 & 23 & 0 & 20 & 33 & 18 & 23 & 30 \\ 3 & 22 & 20 & 0 & 15 & 27 & 30 & 38 \\ 4 & 17 & 33 & 15 & 0 & 30 & 25 & 23 \\ 5 & 15 & 18 & 27 & 30 & 0 & 5 & 13 \\ 6 & 10 & 23 & 30 & 25 & 5 & 0 & 8 \\ 7 & 18 & 30 & 38 & 23 & 13 & 8 & 0 \end{pmatrix}$$

有了上述数据之后，代入程序（见附录）中，获得如下结果：4-3-1、4-3-2、1-3-4 和 5-2（1）。

在进行了场桥的路径优化后，接下来就可以进行场桥调配了。本文中采用 matlab 中的遗传算法工具箱来进行，具体的适应度评价函数以及约束的求解代码见附录，遗传算法工具箱的界面如图 6.4 和 6.5：

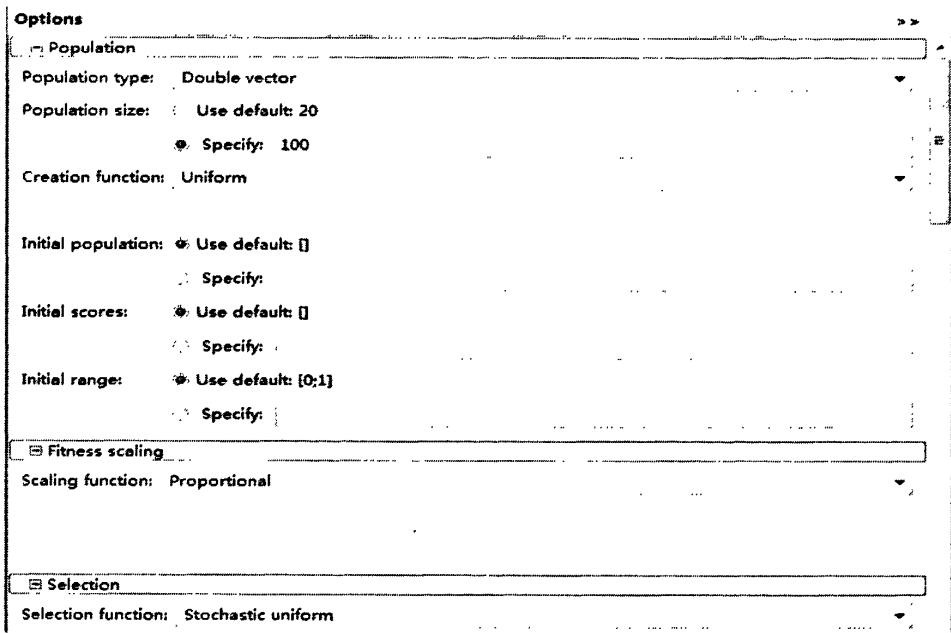


图 6.4 参数的设置

Fig6.4 The parameter of solution

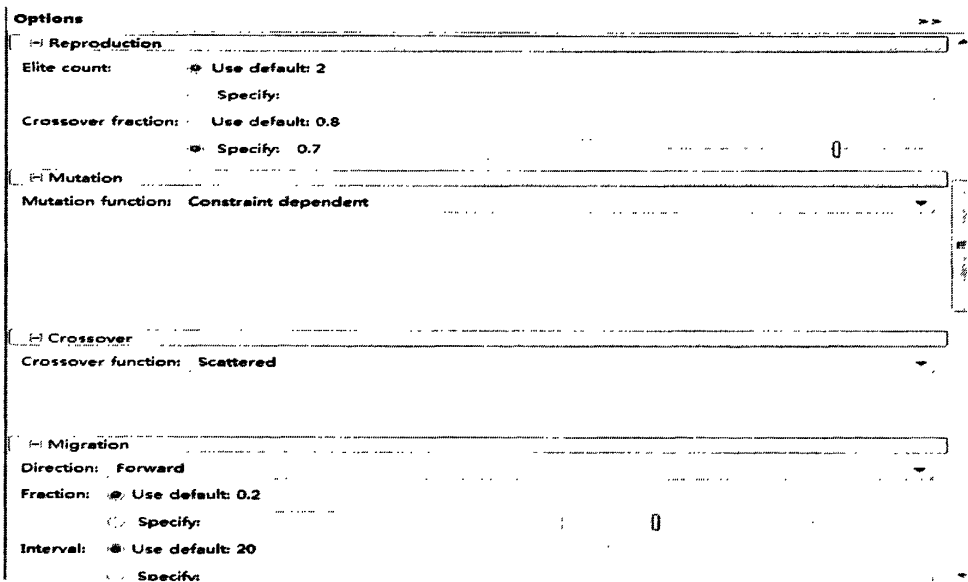


图 6.5 参数的设置

Fig6.5 The parameter of solution

求得结果是：共 4 台场桥。即只是在繁忙的情况下，启用四台场桥是比较节省资源的，也可以减少一定的浪费。

6.4 仿真验证

本案例中,堆场设置了7个箱区。对于岸桥、场桥、堆场的模拟均是三维立体模拟,使显示更为直观。

本案例的仿真目标是评价集装箱码头堆场运作的一些的性能指标,包括总作业量、平均堆存期、平均每天的堆存集装箱数、集卡的有效利用率、集卡行驶路程、岸桥作业效率、场桥的整体作业效率、堆场利用率等,并通过这些指标比较(布局优化和场桥调度优化后与堆场布局与场桥调度优化前的数值比较)的评价与验证布局优化与场桥优化的优劣。

模型的参数设置如下:

初始堆场中,堆场中集装箱的容量占总容量的3%。根据历史数据分析,集装箱到达时间间隔服从负指数分布(2, 5, 1),由于闸口需要进行称重和检查等作业,将其在设置为20m的作业时间。

将堆场中的集装箱分为两种,分别为20TEU和40TEU的,其中:集装箱20TEU的集装箱占到60%,40TEU的集装箱占到40%,并且两者中重箱的比例为65%,空箱为35%。

集卡在堆场内的行走速度为10m/s;场桥移动的平均速度为6m/s,转弯的速度为5m/s,场桥作业完一个集装箱的平均时间为123s。

岸桥的平均装卸速度为95s,平均到每一个集装箱上的时间为77s。模型中的一些重要设施(集卡、场桥和岸桥)的外观图如6.6和6.7。

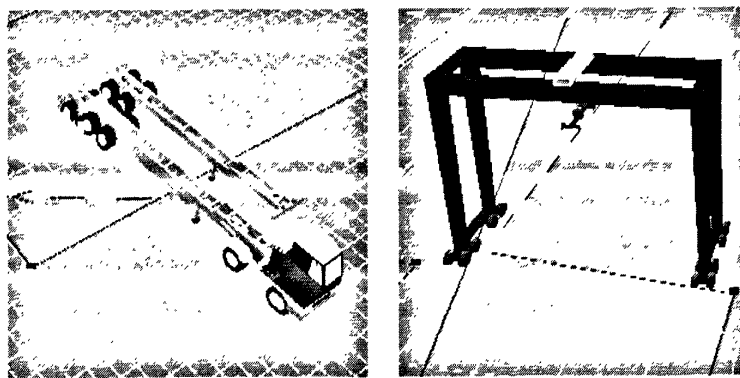


图 6.6 场桥、集卡的三维图

Fig6.6 The 3d map about crane and track

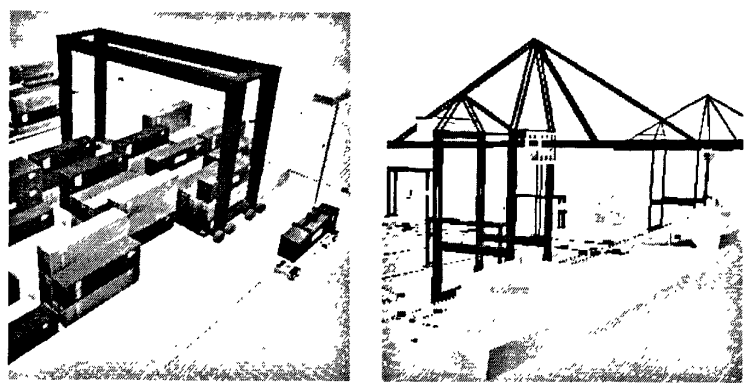


图 6.7 场桥、岸桥的三维图

Fig6.7 The 3d map about crane and gantry crane

综合上述设置与前三小节的结果，给出的集装箱堆场仿真模型如图 6.8 和 6.9。其中，图 6.8 为仿真模型的三维立体图，图 6.9 为仿真模型的平面图，加强直观视觉性。

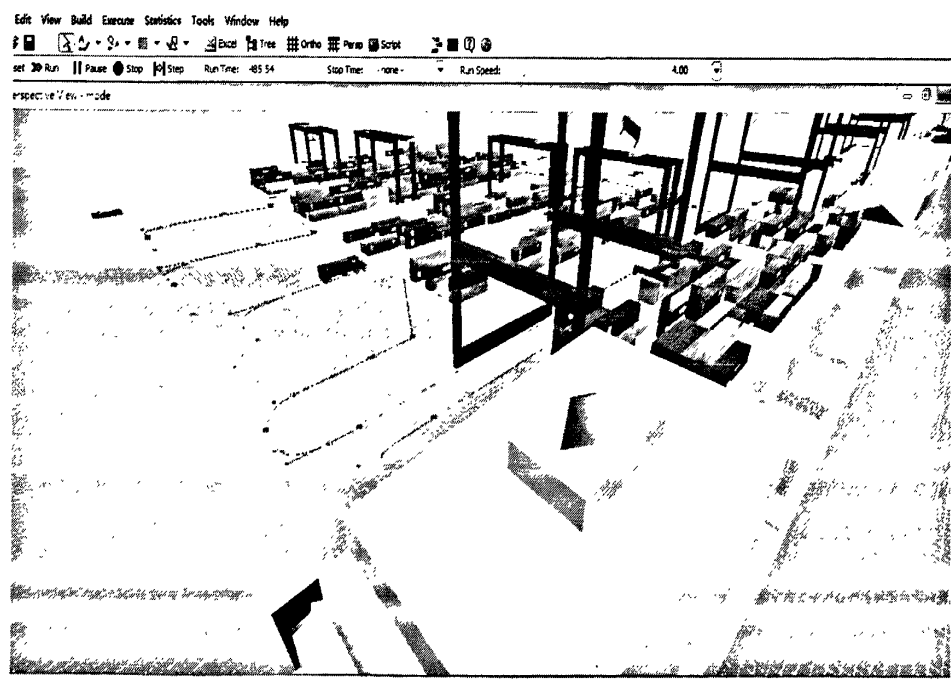


图 6.8 模型仿真的立体图

Fig6.8 The stereo about model simulation

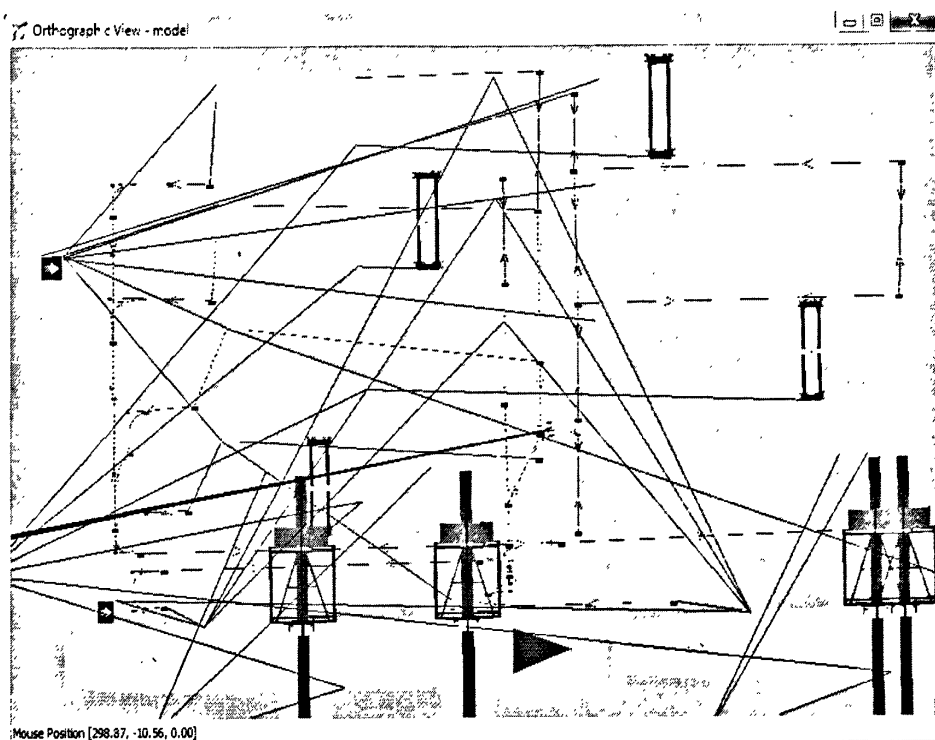


图 6.9 集装箱堆场的仿真模型图
Fig6.9 The model simulation about the container yard

上述模型中:

StackSource 控制集装箱的产生;

ShipSource 控制两个集装箱船以及船上的集装箱的流向和处理,岸桥作业于需要进行装卸船的集装箱,将集装箱放置于集卡上。一个集装箱船对应两个岸桥,**Dispatcher** 控制集装箱船。由一个 **Dispatcher** 协调两个岸桥。因此由 **Dispatcher** 控制集装箱船,而其输出端口为两个岸桥,通过命令两个岸桥作用于集装箱,将集装箱放置于集卡上;

TruckDispatch 调度集卡,将集装箱装载或者卸下至集装箱船或者堆场中,集卡有两条路径:一是将空集卡运至集装箱船处,由岸桥将集装箱装载至集卡上,再由集卡运至堆场,由场桥卸下;二是将集卡运至堆场中,由场桥将集装箱装载至集卡上,再由集卡运至集装箱船处,由岸桥卸下。

运行上述的仿真,模型仿真单位时间为1分钟,仿真时间为 $60 \times 24 \times 90 = 129600$ 。将仿真结果导出 excel 并进行整理,得到表 6.5。

表 6.5 仿真案例的仿真结果

Tab6.5 The simulation results of the case

统计指标	仿真次数		均值	优化前
	1	2		
吞吐量 (TEU× 10 ⁴)	17.830	17.760	17.795	15.842
平均堆存量 (TEU/天)	870.01	862.19	866.10	934.37
堆场利用率 (%)	58.506	51.67	55.088	44.571
场桥利用率 (%)	58.642	55.58	56.611	50.467
重箱堆存区的平均堆存量	396.543	410.821	403.682	489.437
重箱堆存区的利用率 (%)	64.456	34.983	64.7195	60.780
空箱堆存区的平均堆存量	180.346	160.191	170.269	242.429
空箱堆存区的利用率 (%)	54.32	55.01	54.665	50.10
拆、装箱区的利用率 (%)	60.35	59.03	59.685	52.437
拆、装箱区的平均堆存量	46.241	44.75	45.496	55.268

通过对仿真过程的观察和对最终仿真结果的分析，论文得出以下结论：

(1)分析仿真结果，发现各个统计量在一定的范围上下波动，但差异不大，总体趋于平衡，可以认为仿真模型比较稳定，其仿真结果具有一定的可信性和科学性，对其他堆场系统的仿真有一定的适用性。

(2)上述仿真结果发现，与之前未进行布局优化以及场桥调度的堆场相比，进行了优化之后，堆场的吞吐量也得到了一定的提高，堆场中设备的利用率也得到了一定程度的提升。这说明，进行布局以及场桥调度优化研究加快了堆场中处理集装箱的速度，提高了堆场的作业效率，为吸引将来更多的客源打下了一定的基础。

(3)通过上表分析发现堆场的利用率相较之前有了一定的提高，说明进行堆场布局以及场桥调度研究对提高堆场的使用率有一定的帮助。但是堆场的利用率并没有达到很高，原因是 A 码头现在处于刚刚起步阶段，有些方面发展的还不是很健全，此次优化更多的考虑码头未来的发展需要。

(4)上述表中比较了重箱堆存区、空箱堆存区及拆、装箱区的利用率。可发现在经过布局优化和场桥调度优化对提高上述三个功能区的利用率是有一定的帮助。

通过上述分析发现，进行堆场布局优化和场桥调度优化对码头的日常作业是有一定的作用的，而且通过上述数据可知，本文建立的布局优化模型以及场桥调度的模型是合理的。

结论与展望

本文对集装箱码头堆场中的布局与场桥调度两个关键模块进行了优化研究,为堆场日常的作业有一定的指导意义。同时,本文将传统的数学建模方法与模拟仿真技术相结合,用可视化方法来评价理论分析所得的结果。利用仿真的直观性,弥补了数学方法过于抽象的不足,为堆场布局规划者提供更好的决策支持,同时对其它功能区布局也有一定的借鉴意义。本文主要包括以下主要工作:

(1)分析了国内外关于堆场的研究现状,明确了本文所研究问题的重点。

(2)系统分析了堆场布局的影响因素,确定了以考虑物流因素和非物流因素为主线研究堆场布局的思路,构建了堆场布局优化的多目标优化模型,给出了该布局优化模型的具体求解算法。

(3)研究了场桥调度问题,具体包括路径优化和场桥调配两部分,提出了最短路与动态规划结合解决路径优化问题,并构建了场桥调配优化模型,给出了解决该调配模型的遗传算法。

(4)利用 Flexsim 仿真软件对上述问题进行了仿真验证,提出了评价指标,给出了集装箱码头 flexsim 仿真模型中的关键要素,充分的利用了仿真的可行性与直观性,加强了堆场优化研究对实践的意义。

(5)最后利用实例来验证堆场布局和场桥调度模型,给出了 flexsim 仿真模型,并将数学模型优化结果同仿真结果进行了比较分析,使文章更好的指导实践。

但是本文仍存在以下一些不足之处:在建模时不可避免的有一定的假设和抽象,与实际问题有一定的差距;在仿真的研究时,各个模块的划分也进行了一定的抽象,同时,仿真过程中更多的考虑物流因素,没有考虑非物流因素的关系,不能非常完整的展示堆场中的各个细节与实际的作业情况等。这些都是需要在以后的实践和工作中进行深入研究,为日后集装箱码头堆场中的日常作业提供一定的指导意义。

参考文献

- [1] 于汝民. 现代集装箱码头经营管理. 北京: 人民出版社, 2007.
- [2] Wong J C F, Leung J M Y. On a vehicle routing problem with time windows and stochastic travel times. Hong Kong: Chinese University of Hong Kong, 2002.
- [3] 李磊. 集装箱港口堆场资源调度的优化: (硕士学位论文). 天津: 天津理工大学, 2008.
- [4] W C. Ng. Crane scheduling in container with inter-crane interference. European Journal of Operational Research, 2005, 164: 64-78.
- [5] 钱永兴. 集装箱码头集卡调度系统. 水运工程, 2005, 5: 62-66.
- [6] Kozan E. Optimizing container transfers at multimodal terminals. Mathematical and Computer Modeling, 2000, 31: 235-243.
- [7] 吕显强, 张宏伟. 集装箱码头分派车辆的整数规划模型. 大连: 大连水产学院学报, 2004, 19: 105-109.
- [8] 严政, 陶德馨. 基于动态组合优化的集装箱码头集卡调度技术. 武汉: 武汉理工大学学报 (信息与管理工程版), 2006, 28(4): 26-29.
- [9] 靳志宏, 朴惠淑, 杨华龙. 集装箱多式联运系统装卸与运输一体化优化问题. 系统工程. 2005, 23(11): 1-7.
- [10] 郝聚民, 纪卓尚, 林焰. 混合顺序作业堆 BAY 优化模型. 大连: 大连理工大学学报, 2000, 40(1): 102-105.
- [11] 张晓辉. 优化集装箱码头堆场计划模式初探. 技术应用, 2006, 1: 55-57.
- [12] 扬扬. 提高集装箱码头堆场使用率的问题研究. 中国新技术新产品, 2009, 20: 81.
- [13] 刘鸣华. 加强集装箱码头堆场管理的策略. 沿海企业与科技, 2009, 12: 76-79.
- [14] 张艳, 韩晖. 降低集装箱码头堆场翻箱率. 集装箱化, 2008, 4: 8-9.
- [15] Kim K H. An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals. Transportation Science, 1999, 33: 17-33.
- [16] Kim K Y, Kim K H. A routing algorithm for a single straddle carrier to load export container onto a containership. International Journal of Production Economics, 1999, 59: 425-433.
- [17] 谢尘, 何军良, 裴道方. 基于混堆模式的集装箱码头出口箱进场选位策略. 上海: 上海海事

大学学报, 2008, 29(4):70-75.

[18] 张维英, 林焰, 纪卓尚, 吴毅刚. 出口集装箱堆场取箱作业优化模型研究. 武汉: 武汉理工大学学报, 2006. 30(2):314-317.

[19] 王梦昌. 集装箱码头堆场货位动态分配优化策略研究: (硕士学位论文). 武汉: 武汉理工大学, 2007.

[20] 严伟, 谢尘, 茆道方. 基于并行遗传算法的集装箱码头堆场分配策略. 上海: 上海海事大学学报, 2009, 30(2):23-28.

[21] Kap Hwan Kim, Kang Tae Park. A note on a dynamic space-allocation method for outbound container. European Journal of Operational Research, 2003, 148(1):92-101.

[22] 杨淑芹, 张运杰, 王志强. 集装箱堆场问题的一个数学模型及其算法. 大连: 大连海事大学学报, 2002, 28(8):115-117.

[23] 张涛. 集装箱堆场物流系统规划研究: (硕士学位论文). 大连: 大连理工大学, 2006.

[24] 严伟, 宓为建, 茆道方, 何军良. 一种基于最佳优先搜索算法的集装箱堆场场桥调度策略. 中国工程机械学报, 2008, 6(1):95-100.

[25] 李建忠, 丁以中, 王斌. 集装箱堆场空间动态配置模型. 交通运输工程学报, 2007, 7(3):50-55.

[26] 王维圳. 集装箱堆场分配问题的启发式方法研究: (硕士学位论文). 天津: 天津大学, 2008.

[27] 杨玫. 青岛前湾集装箱码头堆场管理策略研究: (硕士学位论文). 大连: 大连海事大学, 2006.

[28] 江南, 钱迈, 渠洪涛, 史峰. 集装箱堆场作业计划模型及算法. 铁道学报, 2009, 31(5):8-16.

[29] 陈庆伟. 基于遗传算法的堆场贝位分配优化问题研究: (硕士学位论文). 青岛: 青岛大学, 2007.

[30] 侯彤璋. 集装箱码头堆场系统通过能力研究: (硕士学位论文). 大连: 大连海事大学, 2009.

[31] 高鹏. 集装箱堆场作业调度优化问题研究: (硕士学位论文). 大连: 大连理工大学, 2005.

[32] 施梅超, 张婕姝, 许健. 仿真在集装箱堆场闸口的应用. 物流工程与管

理, 2009, 31(177):39-40.

[33] 马振新. 基于 witness 秦皇岛港口煤炭堆场作业优化研究: (硕士学位论文). 秦皇岛: 燕山大学, 2009.

[34] 舒帆. 利用虚拟现实技术实现集装箱堆场的可视化: (硕士学位论文). 上海: 上海海运学院, 2003.

[35] 徐伟. 集装箱码头布局方案及作业系统的仿真研究: (硕士学位论文). 武汉: 武汉理工大学, 2006.

[36] 田颖辉. 基于虚拟现实的集装箱码头布局规划仿真系统研究: (硕士学位论文). 武汉: 武汉理工大学, 2005.

[37] 郑鑫. 基于 Flexsim 的集装箱堆场布局优化与仿真研究: (硕士学位论文). 北京: 北京交通大学, 2008.

[38] 于越, 金淳, 霍琳. 基于仿真优化的集装箱堆场大门系统规划研究. 系统仿真学报, 2007, 19(13):134.

[39] 吕征. 码头堆场能力提升问题研究: (硕士学位论文). 大连: 大连海事大学, 2008.

[40] Kia M, Shayan E, Ghotb F. Investigation of Port Capacity under a New Approach by Computer Simulation. Computers industrial Engineering, 2002, 42(24):533-540

[41] 杨静蕾. 集装箱码头物流路径优化研究. 水运工程, 2006(1):32-35.

[42] Pasquale Legato. Berth planning and resources optimization at a Container Terminal via Discrete Event Simulation. European Journal of Operational Research, 2001, 133:537-547.

[43] 朱耀祥, 朱力强. 设施规划与物流. 机械工业出版社, 2003.

[44] 席裕庚, 恽为民. 遗传算法综述. 控制理论与应用, 1996, 13(6):697-708.

[45] 恽为民, 席裕庚. 遗传算法的全局收敛性和计算效率的分析. 控制理论与应用, 1996, 13(4):455-459.

[46] 陈根设, 陈新海. 遗传算法的研究与进展. 信息与控制, 1994, 23(4).

[47] 长谷山美纪, 北岛秀夫. 基于遗传算法的多路径探索方法. 信学论, 1996.

[48] 陈国良. 遗传算法及其应用. 北京: 人民邮电出版社, 1996.

[49] 陈国良, 王煦法, 王东生. 遗传算法及其应用. 北京: 人民邮电出版社, 2001.

- [50] 王万良, 吴启迪. 生产调度智能算法以及应用. 科学出版社, 2007.
- [51] 李文峰, 张煜, 毕娅. 物流系统优化与仿真. 中国标准出版社, 2010.
- [52] 高玮. 基于 WITNESS 的集装箱码头物流系统建模与仿真: (硕士学位论文). 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- [53] 尚晶, 陶德馨. 集装箱码头集卡调度策略的仿真研究. 武汉理工大学学报. 2006, 10 (5): 827-830.
- [54] 张新燕. 基于 WITNESS 的闸口仿真分析. 中国水运, 2007, 10(10): 51-53.
- [55] 武剑. 集装箱码头生产作业系统仿真优化研究: (硕士学位论文). 大连: 大连海事大学, 2008.
- [56] 魏众. 集装箱码头物流作业系统集成优化调度研究: (硕士学位论文). 北京: 北京交通大学, 2007.
- [57] 靳志宏. 物流调度与协调. 中国物资出版社, 2008, 1.

攻读学位期间发表的论文

- [1] Hongxing Zheng, Lili Li. Study on Container Terminal and Production Resources Model, ICLEM2010国际会议, EI检索.
- [2] Hongxing Zheng, Lili Li. Study on the Production Optimization Simulation Platform for the Container Terminal Yard's Operation System, ICLEM2010国际会议, EI检索.

致谢

本文工作自始至终是在恩师郑红星的悉心指导下完成的,倾注了导师大量心血。导师并对论文的修改做了耐心细致的指导。值此论文完成之际,首先谨向尊敬的导师致以最深切诚挚的谢意。导师严谨求实的学术作风、渊博的学识、敏锐的科学眼光和崇高的敬业精神使我终身难忘,并将激励我在今后的工作和生活中克服重重困难,继续前进。正是导师循循善诱的教诲及无微不至的关怀和指导使我最终圆满地完成论文工作。

另外,交通运输管理学院多位老师在教学过程中给予了热情无私的帮助,本文作者在此一并表示衷心的感谢。

借此机会,感谢在百忙中评阅本论文的专家和学者们。

研究生履历

姓 名	李丽丽
性 别	女
出生日期	1988 年 9 月 22 日
获学士学位专业及门类	工学
获学士学位单位	大连海事大学
获硕士学位专业及门类	工学
获硕士学位单位	大连海事大学
通信地址	辽宁省大连市凌海路 1 号
邮政编码	116026
电子邮箱	lililinihaoma@126.com

