

Abstract

With the rapid pace of economic globalization and utilization, foreign trade of our country has gained great development, which brings enormous increase of container transportation. However, the inadequate capacity of most container terminals in our country can not meet the demand of increasing import/export commodities. As an indispensable part connecting land and sea transportation, container transport has set up new requests for port managers to deploy logistic resources, optimize communication channels, update logistic information system and improve the efficiency of logistic networks.

Container terminal yard is a major component of port. Its resource deployment level greatly influences the total efficiency of a port. Thus this thesis takes the yard resource deployment as the main research content and further explores the theories and methods of container terminals deployment on the basis of optimization theory and modern logistics.

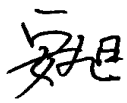
In the thesis, the hierarchy of terminal resource optimization is firstly analysed, emphasizing the yard resource deployment methods. Then a RTG deployment model and its corresponding heuristics are proposed, supposing the total work is certain and the RTG efficiency is variable. By comparing the data from different situations, the effectiveness of the heuristics is tested. Further more, a simulation model of yard assembling procedures with Flexsim platform is developed. The whole procedure of export containers transported from the gate and assembled by the RTG is demonstrated in this simulation.

The research also takes the factual state of a container terminal in Tianjin into consideration, analyzing its present yard resource deployment and applies the simulation model and heuristics to its operation of yard resource deployment, providing some feasible conclusions and suggestions.

Key words: container terminal, yard, RTG, heuristics, 3Dsimulation

南开大学学位论文版权使用授权书

本人完全了解南开大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名： 

2007年5月27日

经指导教师同意，本学位论文属于保密，在 _____ 年解密后适用本授权书。

指导教师签名：		学位论文作者签名：	
解 密 时 间：		年	月 日

各密级的最长保密年限及书写格式规定如下：

内部 5年（最长5年，可少于5年）
秘密★10年（最长10年，可少于10年）
机密★20年（最长20年，可少于20年）

南开大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：安旭

2007年5月27日

第一章 绪论

第一节 研究背景及研究意义

1.1.1 研究背景

1.1.1.1 现代物流的发展

由于科学技术不断进步和经济不断发展,全球化信息网络和全球化市场形成以及客户需求的多样化,市场竞争日益激烈。在传统的资源领域和人力资源领域的利润潜力越来越小、竞争优势越来越弱的情况下,面对激烈市场竞争,企业开始转向在物流领域内挖掘潜力、培养新的竞争优势。

在我国,产品从生产到销往用户手中,95%的时间耗在存储、装卸、等待加工和运输方面,费用平均占到总成本的50%。95%的消耗时间与50%以上的成本,便是物流业巨大的“利润源泉”之所在。中国物流业市场规模有望从2004年的2900亿美元增长至2010年的5000亿美元。根据摩根斯坦利报告,中国每年的物流费用超过2000亿美元(折合人民币约1.7万亿元),预期未来10年内物流服务的收入将有每年20%的增长幅度。

以采购、生产、运输、装卸、包装、仓储的合理化和系统化、加工配送一体化及信息管理网络化为主要特征的现代物流,不仅成为了企业竞争的主要因素,还是一个国家综合国力的重要标志。现代物流的发展要求货物能够在不同运输方式、各货运站之间实现无缝链接,以最小的费用、最短的时间,准确、安全地实现时间和空间的转移。

港口作为物流系统中的重要节点,是远洋、内河船舶以及内陆运输(卡车和火车)的枢纽。港口地区汇集有货主、货运代理、船东、船舶代理、商品批发零售、包装公司、海关、商检等各种机构。港口不仅是不同运输方式汇集的关键节点,而且也是各种信息、经济和技术的汇集点。

现代物流的不断发展以及港口本身在现代物流中的重要地位,给作为物流平台的港口带来的压力日益增大。为了实现海路、陆路运输方式之间的无缝链接,集装箱码头需按照现代物流的要求,合理配置港口内部作业物流资源,优化物流资源的运作,以不断提高港口内部物流网络运作效率,缩短船舶在港时间,

1.1.1.2 集装箱吞吐量的快速增加

自从 1957 年美国第一艘集装箱船投入运营以来，集装箱运输方式便以其装卸效率高、港口操作简单、货损率低等优点在全世界范围内得到了快速发展。集装箱运量在运输总量中的比重也不断提高。相关资料表明目前全世界每天流动的集装箱达 7000 万之多，如果没有这些流动的集装箱，原材料和产品在全球范围内迅速流通将是一件不可思议的事情，也就不会有现今的贸易全球化和经济一体化的发展潮流。

全球化和经济一体化的快速发展，促进了我国国内运输量和国际运输量的快速增长，快速增加的运输总量使港口集装箱吞吐量不断增加。与此同时，为了适应全球航运市场的竞争形势，集装箱船舶也出现了大型化趋势。快速增加的集装箱吞吐量和集装箱船舶大型化，使不少集装箱码头出现了满负荷、超负荷运营的现象。为了在激烈的竞争中取胜，港口管理者除了要从中长期规划码头扩建计划外，更关键的一个问题就是要优化现有资源的配置，从而提高港口的运作效率，降低营运成本。

国际集装箱运输在过去 40 年中，以每年 7% 的增长速度增长，已经成为目前海上主要的运输方式之一。据预测，到 2012 年世界的集装箱吞吐量将从 188 百万 TEU 增加到 417~491 百万 TEU，而这部分增长主要来自亚洲国家，这就对亚洲国家尤其是作为世界工厂的中国的集装箱码头提出了更高的要求。

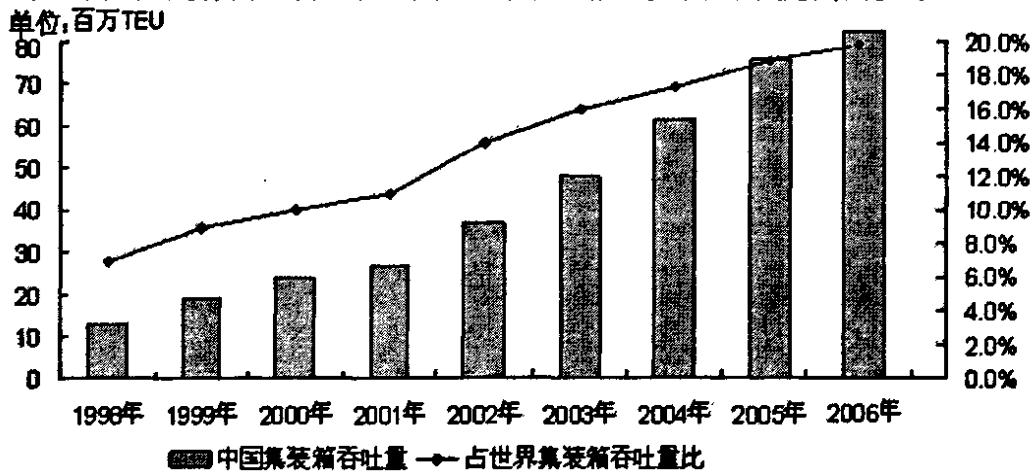


图 1.1 1998-2006 年我国港口集装箱吞吐量及占世界比重

1.1.2 研究意义

集装箱运输的不断发展，导致目前国内许多集装箱码头在高任务量的情况下

1.1.2 研究意义

集装箱运输的不断发展,导致目前国内许多集装箱码头在高任务量的情况下运行。集装箱码头的高任务量运行给码头运营管理人员的日常决策带来了许多困难。为缓解集装箱运输业的发展所带来的压力,国内许多港口及港口城市竞相规划和建设大型集装箱深水港,其规模和投资都十分巨大,这些设施的建设 and 投入使用无疑对我国区域经济和发展有着重要的推动作用。

诚然,增加投入和新码头的建设可以缓解对码头资源需求的压力,但从根本上讲提高现有设备和新建设备的使用效率才是解决问题的途径。码头经营者为了缓解这种不断增长的需求压力,在不断规划新建码头以及泊位设施的同时,还不断通过提高集装箱码头运作管理来提高现有设施的能力以及服务水平。由于目前大部分的集装箱码头的规划及设计与集装箱码头管理企业的实际运营产生矛盾,造成了集装箱码头操作、管理中的困难性,形成了集装箱码头物流系统的瓶颈。解决或缓解这种瓶颈问题,提高码头的物流运作水平是本论文研究的目的之一。

集装箱港口堆场是港口中用于堆存集装箱的专设区域,其作为港口主要的组成部分,在集装箱港口作业物流流程中起着很重要的作用,堆场资源配置的优劣将直接影响到港口整体的作业效率。在上述背景下,如何合理高效地配置集装箱港口作业资源尤其是堆场资源就成了一个迫切需要解决的课题。

第二节 集装箱港口堆场资源配置研究综述

堆场资源主要涉及两部分的资源配置问题,一部分是堆场空间资源配置问题,一部分是堆场设备资源配置问题。简单的说这里所讲的堆场资源包括堆场的堆位资源和场桥资源。

1.2.1 堆场的堆位资源优化研究现状

Mcdowell 等^[1]讨论了集装箱港口的作业流程,在考虑了各作业流程所发生成本的基础上,建立了一个成本模型来解决堆场堆存问题。在这种成本模型下,虽然可以降低总的作业成本,但是并没有考虑港口设备作业效率的问题。Castilho 和 Daganzo^[2]研究了两种策略下的进口集装箱的堆存问题,一种策略是按照集装箱大小分类堆放,另一种策略是按照到达时间依次堆放。Kim 和 Kim^[3]文中研究了在隔离原则下,进口箱的堆存策略。文章要决定堆存高度,提出了堆存高度

堆场空间分配时考虑了集卡因素,以避免集卡太集中而引起堆场交通堵塞。Kim 等^[5]建立了一系列费用的模型来决策进口堆场的堆存空间分配和场桥数量。费用模型考虑了堆存空间费用,场桥费用和外部集卡的费用。文章从码头管理者的角度最小化码头运行的费用。Kim 等^[6]研究了集港箱具体堆存位置的确定问题,提出了解决该问题的动态规划方法和决策树方法,以最小化装船作业时间(出口箱)的期望来优化总倒箱次数。Preston 和 Koran^[7]应用平行机加工问题的理论和方法,研究了出口混放模式下出口箱具体堆放位置的确定问题,建立了该问题的混合整数规划模型,并利用遗传算法对不同装船顺序的情况进行求解。Cordeau 等^[8]研究了集装箱堆场配置问题,并建立了整数规划模型,目标函数是使集装箱从堆场场区到船舶的运输距离最小,并用禁忌搜索方法和遗传算法求解。在这个模型下,堆场设备工作量不均衡,会降低堆场设备的利用率。Chen 等^[9]讨论了集装箱堆场空间分配问题,文中提出用多种算法解决这个问题,包括禁忌搜索方法,模拟退火算法,遗传算法以及“squeaky wheel”优化方法,最后结合禁忌搜索方法和“squeaky wheel”优化方法的特点,提出了一种混合方法来求解。Bish^[10]将进口箱堆场空间配置问题同岸桥调度问题整体考虑。并把这一问题分成三个子问题并分别进行考虑:(1)为每个卸载的集装箱确定在堆场的堆存位置;(2)为每个集装箱分配集卡;(3)对每个岸桥进行装卸作业优化以实现船舶的在港时间最短。最后,作者采用一个 TLS 启发式规则对大型问题进行求解并进行了最坏情形分析。Kim^[11]给出了计算取得任意的一个箱子所需要的倒箱数的期望的方法;还给出对于一个排列规则给定的贝提走所有的集装箱的总倒箱数的计算方法。

对于堆场堆位资源研究的问题来讲,堆场堆位资源的分配问题又分成两个部分,首先是堆场空间策划问题;进一步是集装箱具体堆存位置分配问题。对于堆场空间策划,目标是合理安排能够分配给每艘船舶的场区数量;合理安排每艘船舶在每个场区中能堆存的集装箱数量。并不涉及到具体的堆放操作。而下一步的集装箱具体堆存位置分配问题正是为了解决这个问题而提出的。在得到对每艘船舶分配的场区号后,具体堆存位置分配问题主要决策集装箱在堆场中的具体位置,可以具体到贝号、列号、层号等,具体考虑到每个集装箱在堆位某一个位置的堆放操作。

在模型建立时考虑的内容,进口箱和出口箱可能有所不同。对于出口箱,主要考虑的因素包括每艘船舶所属集装箱的分港、箱型(20 或者 40)、重量。而对

于进口箱，为了卸船的快速，一般是在进口场区中直接堆高。

综上所述，对于出口箱，堆场问题的两个层次都要研究，特别是存储位置分配问题，直接影响到集港的效果；具体堆存位置的分配则与装船时的倒箱量密切相关。而对于进口箱来说，一般只研究存储位置分配的问题。

1.2.2 关于场桥配置问题的研究

场桥配置问题也有两个层次，一个是规划层的数量分配问题，涉及到在场区中分配和使用的场桥数量的确定。另一个是操作层面的问题，涉及的是场桥的跑位，既路径问题。

Chung 等^[12]最早提出了场桥路径选择问题，目的是减少场桥的不必要移动，提高场桥的工作效率。Lai 和 Lam^[13]比较了不同配置策略下场桥的使用效率、作业量及等待时间。Kim 和 Kim^[14]建立了一个费用模型，包括堆场的费用，场桥的固定费用(考虑投资)，场桥的变动费用，外部车辆相关费用，给出了一个简单的计算方法。Kim 和 Kim^[15]研究了单个场桥的最优路径问题，建立混合整数规划模型，用场桥与场区间总移动时间最小来解决配置问题。Zhang^[16]研究场桥配置问题。假设场桥能力用时间衡量，只能在午夜移动，一个场区中最多两个场桥，计划周期开始时每个场区都有一个场桥。根据网络模型得到混合整数规划模型，然后用启发式方法求解。Ng^[17,18]建立混合整数模型规划，然后用启发式方法和分支值定界法求解。Kozan 和 Prscton^[19]建立整数规划模型，使场桥的各场区总工作时间最大化来解决场桥的配置问题，采用遗传算法求解。Linn 和 Zhang^[20]研究了几个计划周期的场桥配置问题。文中假定，在每一个周期内都有一定的工作量，场桥可以在场区之间相互移动。文中给出了一个两阶段模型，首先考虑堆场机械的作业均衡，将到达集装箱按类型分配到场区；然后再考虑最大限度地降低倒箱数，将集装箱具体放到某一个堆存位置。假设在每个计划周期内场桥的移动次数不能超过 1 次。Gambardella 等^[21]运用网络流的方法对整个港口的装卸资源进行了仿真研究。在模型中，将每个工作日分为三个计划周期，同时假设所有的岸桥工作能力均相同，船舶在哪个周期到达为已知，所靠船舶的装卸箱量根据船舶的抵港预报也为已知。需要决定的就是每个计划周期所需配置的岸桥数量、场桥配置数量以及各船每个周期装卸箱量，最后将得到一张计划周期内的资源配置计划表。Zhang 等^[22]通过一个混合整数规划模型研究了场桥的工作任务分派问题。在假设已知若干个计划周期的工作任务量的条件

下,通过合理地安排场桥在某周期内的工作任务和不同场区之间的移动顺序,达到在某若干个计划周期内场桥未完成的任务量最小。模型采用两阶段的拉格朗日松弛启发式算法进行了求解。文中假定场桥的配置数量已知。Zhang 等^[23]通过建立一个整数规划模型研究了场桥的工作任务分配问题。在假设已知若干个计划周期的工作任务量的条件下,通过合理地安排场桥在某计划周期内的工作任务和不同场区之间的移动顺序对场桥配置进行优化。该模型是在给定场桥台数基础上给出的配置方案。Kim 等^[24]讨论了单个场桥在提箱时的作业顺序排列问题,其目标是降低外部集卡等待时间,提高设备利用率。对于静态问题提出动态规划算法,对于动态问题提出了基于各种启发式规则的强化学习算法。

关于场桥研究现状的总结:

一、场桥模型研究中用到的目标函数,有些是最小等待时间,有些是最小化未完成工作量。目标函数并不唯一,应根据港口的具体情况和模型偏重考虑的方面来决定。

二、目前对堆场资源的研究中,对堆位资源的研究比较多,但是对场桥的配置研究比较少,尤其是如何确定装卸作业中的场桥配置数量则更少。对于场桥的研究,多数是和堆场资源,集卡资源等资源联合考虑。已有研究在解决堆场、场桥、集卡的联合配置问题上取得了许多成果。因为在有些情况下特别注重场桥的配置问题,而对于场桥的配置单独研究的论文不多,所以本文研究场桥的配置问题。本文针对堆场分配已经给出,场桥效率存在不同,且考虑场桥维修的情况优化场桥配置。

第三节 集装箱码头仿真研究综述

系统仿真技术作为一门独立的科学已经有 50 多年的发展历史,在航天、航空、电力、交通运输、通信、化工、核能各个领域得到了广泛的应用。特别是近 20 年来,随着系统工程与科学的迅速发展,系统仿真技术在港口物流系统规划、设计、运营、分析及改造的各个阶段,都得到许多成功的应用。系统仿真技术在港口物流系统中的运用不仅能够帮助规划人员提高规划的质量、节约规划成本而且能够帮助港口管理部门提高物流系统运作效率,从而提高码头服务质量。

1.3.1 集装箱码头仿真研究现状

建模与仿真技术在港口码头系统上的应用,是伴随着仿真技术本身的发展和港口码头机械化、自动化水平的提高而深入的。近年来越来越多的建模与仿真成功地被应用于为集装箱码头系统的规划设计和营运管理提供决策信息。

Sculli 和 Hui^[25]通过仿真的方法研究了堆场堆高、堆场利用率和倒箱率之间的关系。Taleb^[26]采用仿真的方法讨论了出口场区不同安排原则下堆高、堆场利用率和倒箱率之间的关系。Duinkerken 等^[27]运用仿真的方法对港口堆存方式进行了研究,分析了不同情况下最优的堆存方案。Gambardella 等^[28]讨论了仿真模型在港口资源配置中的应用。模型对岸桥、场桥等港口资源进行配置。并采用网络流的思想,运用混合整数规划。Legato 和 Mazza^[29]采用了面向过程的 Visual SLAM 语言,运用排队网络模型对集装箱港口泊位计划和装卸资源分配进行了研究。沙梅^[30]利用离散事件系统仿真方法建立集装箱码头系统装卸工艺系统的多级排队论仿真模型,并将仿真模型应用到上海外高桥四期集装箱码头装卸工艺系统中。Daganzo^[31]采用整数规划模型和一个简单的分配策略,分析岸桥的作业效率,计算在高峰期泊位的最大吞吐量,解决静态岸桥调配问题,达到减少船舶在港停泊费用的目的;Peterkofsky 和 Daganzo^[32]认为岸桥调度问题是并行工作的岸桥的“开放的程序站”调配问题。建立整数规划模型来减少船舶待泊费用,并采用分支和跳跃方法来获得优化结果。基于上面的结论,Daganzo^[33]假定船舶的工作量分布与船舶数量分布相同,进一步研究了岸桥的调配策略对码头的吞吐量和船舶等待的长远影响;Tabernacle^[34]将学习理论应用到岸桥分析中以提高岸桥的作业效率。

1.3.2 仿真技术在集装箱码头的研究分类

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。目前国内外计算机仿真技术针对集装箱码头的研究主要有以下几类:

(1)对泊位资源的研究。用排队理论和遗传算法对船舶的到港情况进行仿真分析,从而为港口的投资提供决策依据,并讨论泊位动态分配对港口工作效率的影响^[37]。

(2)对装卸资源的研究。对到港船舶的装、卸箱过程进行仿真,研究了岸桥调度问题,同时通过仿真还可以帮助制定堆场计划以减少倒箱率^[38]。

(3)对堆场资源的仿真研究。对集装箱的进口卸船和出口装船进行模拟,对堆

场内的交通情况进行分析,讨论了港口交通工具配备问题及 AGV 的应用。对集装箱在堆场内的堆放情况进行仿真,分析了对于进口箱和出口箱的处理策略问题,讨论集装箱在堆场内的堆放策略^[39]。

(4)对整个集装箱港口进行模拟分析,讨论了在新的作业方法或者管理模式下集装箱港口通过能力的问题;为集装箱港口的一些计划的制定提供决策支持;对集装箱在港口内部的运输过程进行合理物流规划;对港口的作业流程优化以及港口设备的合理计划;通过模拟对新港口的管理方法进行分析等。

从研究内容上看,国内外研究包含了集装箱码头物流系统的各个方面,相关研究可以概括为两大类:运营环节研究和装卸工艺系统研究。

集装箱码头系统的主要运营环节发生在码头前沿、水平搬运、堆场和道口,因此运营环节研究可归纳为资源配置问题、日常运营管理问题、各种运营环节的局部研究,以及由于各环节运营效率不同而产生的瓶颈问题。国内集装箱码头资源配置问题主要研究运营各环节之间的配机比例及设备配置优化问题。

综上所述,国内外许多学者运用系统仿真以及优化模型针对集装箱码头在运营过程中的许多瓶颈问题做了大量的成功地研究。而将仿真方法以 3D 的形式直观的引入港口物流系统规划及运营决策中的研究在近年来的研究中渐渐兴起,虚拟现实技术目前是与系统仿真相关的最热点的发展方向之一。

1.3.3 仿真中的虚拟实现

虚拟实现(Virtual Reality, 简称 VR)技术是在综合系统仿真技术、计算机图形技术、传感技术、显示技术等多种学科技术的基础上发展起来的,它以仿真的方式使人置身于一个虚拟世界中。三个“I”是虚拟现实的基本特征,即沉浸(Immersion)、交互(Interaction),构思(Imagination)。人们可以沉浸在一个由计算机系统所创造的虚拟环境中,与虚拟环境发生交互作用。

许多仿真软件将虚拟技术融入到软件功能中,使仿真软件的功能更加强大。从软件的角度看,虚拟实现系统的软件主要研究虚拟环境及其中物体的几何、物理及行为仿真,只有很好地解决了这个问题,人与系统的自然交互才有可能实现。

VR 技术目前已经被广泛的应用到军用和民用图形仿真、科学研究和科学计算可视化、娱乐业、地质学等。随着虚拟企业、虚拟制造技术不断深入,虚拟物流系统已经成为企业内部虚拟制造系统一个重要的组成部分,最新的研究趋

势是对物流系统进行多维仿真，使得系统更加接近现实世界，这项研究在大型生产制造业中已开始得到应用。

在 1998 年的国际仿真杂志中，M R Nevins 等人系统地介绍了港口集装箱搬运的离散事件仿真、二维动画及三维可视化过程^[36]，给 VR 技术用于港口物流系统的研究建立了一个良好开端。而目前国内对港口物流系统规划的三维仿真和虚拟现实技术的应用刚刚开始，因此对港口物流系统规划进行三维仿真，不仅可以为港口管理决策者提供合理的规划方案，提高港口的竞争能力，同时也将使港口物流系统设计处于更高的水平，总之，虚拟现实技术在其中的应用研究是保证系统仿真更加接近现实世界所必不可少的。目前仿真领域有许多仿真软件，一些主流的仿真软件如 Witness, Em-Plant 等注重统计分析，提供了强大的数据分析功能。Flexsim 是目前较新的采用了 VR 技术的三维仿真软件，不仅具有强大的数据统计分析功能，还有强大的三维显示功能。

第四节 论文的结构和主要创新点

1.4.1 论文结构

论文以集装箱港口的堆场资源配置为研究目标。第二章介绍码头的运作流程和资源配置问题，结合天津港某集装箱码头的特点，提出层级式决策系统的思想并得出结论，对于这样泊位资源相对宽松的港口，堆场资源和场桥资源的优化管理是提高整个港口管理水平的关键。然后在此基础上分别用建立模型方法和仿真方法对场桥资源和堆场资源进行优化。

本论文共分为五章，如下：

第一章是绪论，主要介绍了国内外研究概况以及论文的目的、意义、主要创新点以及研究内容；

第二章介绍了港口物流运作概况及其特征，总结得到了港口生产作业的流程，具体阐述了港口物流作业中的资源配置问题，明确了堆场资源特别是场桥资源的配置是论文研究的重点；

第三章主要介绍了堆场场桥配置的模型并给出了一个启发式算法来处理大规模问题。对模型的运算结果和启发式的运算结果进行了比较，说明启发式算法的有效性。

第四章研究仿真在集装箱码头中的应用。用仿真的方法分析和研究港口堆场

的作业流程，根据仿真结果分析瓶颈。完成了一个出口集港箱的仿真过程的实例，得到了堆场内最优的集卡数量。

第五章为结论，总结了本论文的研究成果，并对进一步研究工作提出展望。

1.4.2 创新点

论文的主要创新点如下：

(1)对堆场资源配置问题的研究着眼于整个港口的物流运作，运用局部优化必须服从整体优化(即系统化)的思想，研究的目的是为了提高整个港口物流运作效率。

(2)建立模型解决了场桥效率不同的情况下堆场中场桥资源动态配置问题。

(3)提出了解决场桥效率不同情况下堆场场桥资源配置的启发式算法，通过和Lingo最优解的比较，说明该启发式算法的有效性。

(4)3D仿真是仿真研究的方向。运用3D仿真手段模拟堆场的运作过程，通过对港口内部物流作业系统的仿真，可以更加清晰明确的了解港口的运作情况，优化堆场中资源的配置。

本论文的内容和结构见图 1.2 所示。

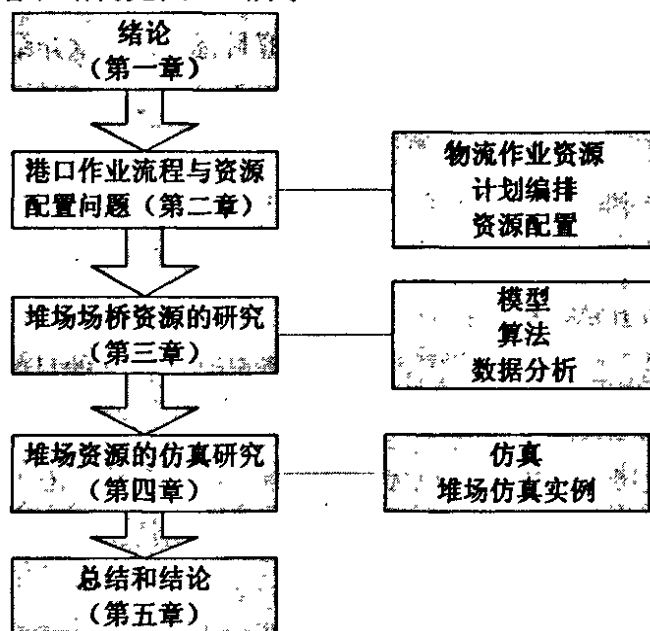


图 1.2 论文内容和结构图

第二章 集装箱港口物流作业中的资源配置问题

集装箱港口是物流链上和交通运输链的重要一环，它承担了集装箱船舶装卸和集装箱集疏港作业。本章首先从集装箱港口的功能和布局、作业资源以及业务流程三个方面介绍了集装箱港口的概况，然后分析了集装箱港口运作中的资源配置问题。

第一节 集装箱港口的概况及作业流程

2.1.1 港口的功能和布局

集装箱港口(Container Terminal)是专供集装箱船舶停靠、装卸集装箱的作业场所，是在集装箱运输过程中水路和陆路运输的连接点，是集装箱多式联运的枢纽。集装箱港口由泊位(Berth)、码头前沿(Apron)、集装箱堆场(Container Yard)、控制室(Control Tower)、检查口(Gate House)、集装箱货运站(Container Freight Station)、集装箱专用机械和其它专用设施组成。

2.1.1.1 集装箱港口的功能

海上集装箱运输从 1956 年在美国兴起至今已有将近 50 年的历史。伴随着集装箱运输的迅速发展，世界各国港口相继建造了大量的集装箱多用途和专用港口。集装箱港口在整个集装箱运输过程中对加速车船周转，提高货运速度，降低整体运输成本等方面，起着十分重要的作用。通常认为，集装箱港口主要有以下职能：

- (1)集装箱运输系统中的集散站；
- (2)提供集装箱堆存，作为转换集装箱运输方式的缓冲地；
- (3)水路集装箱运输和陆路集装箱运输的连接点和枢纽。

当然，随着现代物流的发展，集装箱港口的物流功能远不止上述这三项，集装箱港口可以成为分拨中心、配送中心、流通加工中心等，提供仓储、装卸、包装、运输、加工、配送和信息处理等一系列增值服务。但是，所有这些物流功能的拓展，都是建立在上述三项主要职能的基础之上的。

2.1.1.2 集装箱港口的布局

集装箱港口为了完成装卸、搬运、保管和拆装箱作业等任务，要求集装箱港口同船舶共同形成一个不可分割的有机整体，同时需要港口有一些必要的设备和设施。港口简要的布局图如下。

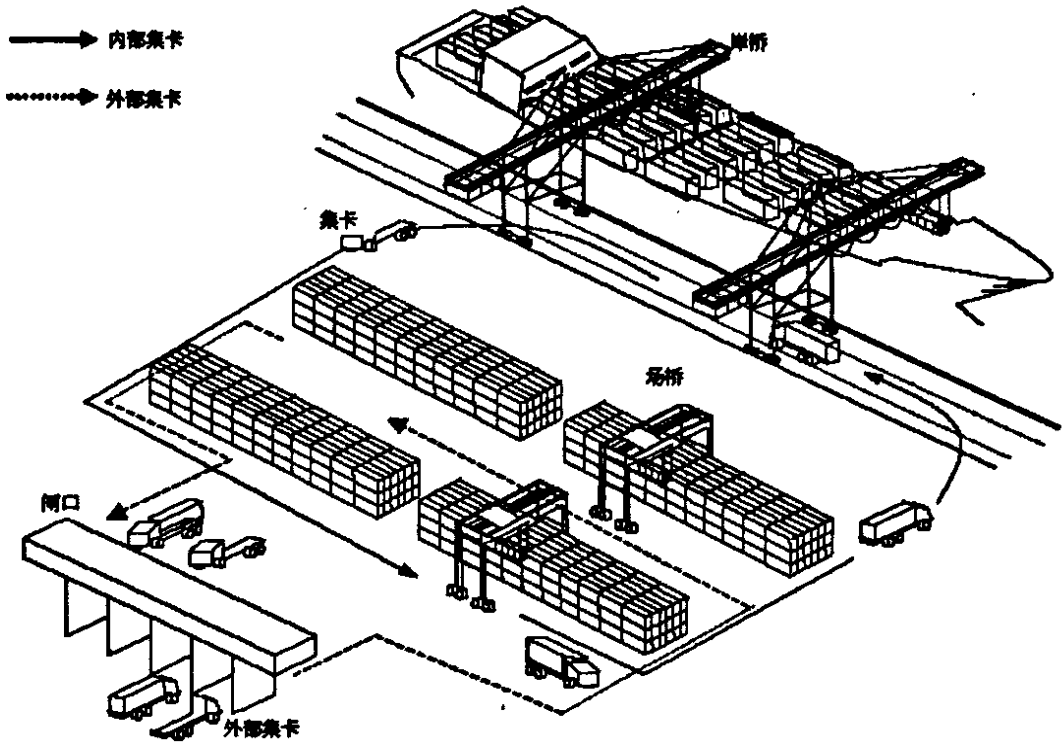


图 2.1 港口简要布局图

(1) 泊位

泊位是指在港内为了进行装卸，给船舶停泊靠岸，并有一定长度岸壁线的地方。泊位岸线长度应该满足船舶装卸和系泊安全的要求，岸边水深应满足船舶的吃水要求。为了满足大型船舶的需求，目前世界上集装箱港口泊位的长度一般都在 300m 左右。在连续泊位岸线较长的集装箱港口中，为了便于定位，习惯将连续的泊位划分为几个逻辑泊位。例如，天津港某集装箱码头的泊位岸线长度是 1137 米，但是在生产作业过程中便于使用和称呼，将 1~300m 定义为 1 号泊位。301~600m 定义为 2 号泊位，601~900m 定义为 3 号泊位，其余定义为 4 号泊位。

船舶停靠时所需的系船设施构成了泊位的岸壁(quay)。这些设施一般包括：系缆桩和碰垫木(橡胶)。

(2) 码头前沿

前沿是指码头岸壁的岸壁线起到码头堆场前的这一部分面积,它是集装箱船舶装卸作业中最重要的一部分面积。前沿上设有集装箱装卸桥(Quay Crane,简称QC),也称岸壁装卸桥(岸桥)。卸船时,岸桥从船上卸下的集装箱是放在前沿上,或放在已在前沿等待的集装箱卡车(简称集卡)上,再由集卡转运到堆场。装船时,集装箱由集卡从堆场运到前沿,再由岸桥把集装箱装到船上。前沿也是堆放集装箱船舱盖的地方。因此,前沿必须要有一定宽度,不能过窄,以免在装卸作业时造成混乱,影响整个集装箱港口的作业效率。

(3) 集装箱堆场

集装箱堆场分为前方堆场和后方堆场两大部分。前方堆场(Marshalling Yard)是存放从集装箱船上卸下或将要装船的集装箱场地。前方堆场是出口场区,为了保证出口装船的速度从而选择了离泊位较近的场区。它与码头前沿邻接,其面积应能堆放泊位上停靠的最大集装箱船装载量2倍的集装箱。

后方堆场(Back-up Yard)一般是指存放与货主进行交接空重箱的场区,是码头中除前方堆场以外的部分。后方堆场是进口场区,堆放的位置离闸口较近,有利于减少集卡在场区内运输的距离,便于进口箱提箱,一般后方堆场由中转箱堆场、进口重箱堆场、空箱堆场、冷藏箱堆场、危险品箱堆场等组成。

事实上,后方堆场同前方堆场并没有严格明显的分界线,仅仅是地理位置上的相对概念。在实际业务中,通常将出口箱放在码头堆场的前方,中间放中转箱,而将进口箱、冷藏箱、危险品箱、空箱放在码头堆场的后方。

堆场上的场地按照区域划分成若干场区。按照集装箱的尺寸,一般场区上都画有存放集装箱的长方形格子,称为“场箱位”(slot)。场箱位编有号码,称之为“场箱位号”(Slot Number)。集装箱在堆场的场箱位号是由行号、列号、层号的六位数字组成的,对堆存的集装箱进行位置标识。

(4) 集装箱货运站

集装箱货运站是指把货物装进集装箱内或从集装箱内取出,并对这些货物进行贮存、防护和收发的作业场所。它主要为分属不同货主的拼箱货提供装拆箱作业场所。

集装箱货运站一般建于集装箱港口后方,侧面靠近港口外公路或铁路的区域。尽可能保证陆运车辆不必进入港口堆场内,而直接进入货运站。随着集装箱港口装卸量的增加,为了充分利用港口的堆场面积,也可将港口内的货运站

移至港外，即有的集装箱港口内并不包含货运站。

(5)控制室

又称控制中心、控制塔，是集装箱港口各项作业的指挥调度中心，是港口作业的中枢机构。其任务是对港口所制订的船舶装卸作业计划和后方堆场上的集装箱配置计划进行监督和指挥。其位置应设在能清楚地看到前方堆场、码头前沿以及码头上所有堆放集装箱的地方。

(6)检查口

俗称道口、闸口，是集装箱港口的出入口，集装箱和集装箱货物的交接点，因而也是区分码头内外责任的分界点。由于道口是集装箱进出港口的必经之处。因此，在道口处不但要检查集装箱的有关单证，而且还要对集装箱的有关证号、铅封号和集装箱的外表状况进行检查。道口一般设置在集装箱码头的后方。

2.1.2 集装箱港口物流作业资源

了解了码头的布局和大概功能后，下面介绍集装箱港口的物流作业资源，集装箱港口的物流作业资源大致包含以下方面，前面布局中提到的部分这里简要介绍：

(1)泊位

泊位是用来供靠港装卸的集装箱船舶停靠使用的，需要足够的深度以满足船舶吃水的要求，宽度也应满足船舶停靠的条件。

(2)堆场

港口堆场是用于集装箱存放和中转的场区，一般前方堆场是存放从集装箱船上卸下或将要装船的出口集装箱的场区，后方堆场一般是指存放与货主进行交接的进口箱和空重箱的场区。

(3)岸壁集装箱装卸桥

岸壁集装箱装卸桥即岸桥，是集装箱港口装卸集装箱的专用机械，世界各集装箱专用码头均采用这种设备装卸集装箱。

岸桥沿着与码头岸线平行的轨道行走。它主要由带行走机构的门架、承担臂架机构的拉杆和臂架等几部分组成。臂架又可分为海侧臂架、陆侧臂架以及门中臂架三部分。海侧臂架和陆侧臂架由门中臂架连接。臂架的主要作用是承受岸桥小车的重量，小车带有升降机构，而升降机构又用来承受集装箱吊具和集装箱的重量。海侧臂架一般设计成为可变幅式，当岸桥移动时，为了船舶或航

道的安全，一般将海侧臂架仰起。岸桥在沿轨道平行移动的过程中，由于受电缆坑和电缆线长度的影响，其活动范围受到一定的限制。



图 2.2 岸壁集装箱装卸桥实物图

岸桥卸船作业过程包括以下几个步骤：

1. 船靠港前，将岸桥移动至码头岸线的大致尺码；
2. 船靠港后，将岸桥移至具体的作业位置；
3. 按照装卸顺序，将小车移至船上待卸箱的正上方，放下吊具；
4. 吊具上的扭锁装置将集装箱锁定后，吊起船上的集装箱；
5. 小车悬臂向陆侧方向移动，将集装箱直接吊至码头前沿等待着的水平运输机械上；
6. 松开扭锁装置，吊具与集装箱分离；
7. 吊具起升，小车向海侧方向移动，进入下一个操作。

(4)堆场装卸机械

在集装箱港口堆场进行装卸、搬运、堆垛作业的专用机械，主要有轮胎式龙门起重机和轨道式龙门起重机两类，一般通称为龙门吊，场桥。轮胎式龙门吊由前后两片门框和底梁组成门架，支撑在橡胶轮胎上。装有集装箱吊具的行走小车沿着门框横梁上的轨道运行，配合底盘车进行集装箱的堆码和装卸作业。轨道式龙门吊由两片悬臂的门架组成，两侧门腿用下横梁连接，门架支撑在行走台上，在轨道上运行。轨道式龙门吊一般比轮胎式龙门吊大，堆垛层数多。

堆场机械除了龙门吊外，还有主要处理空箱的堆垛机和正面吊。集装箱港口

在装卸过程中最主要的堆场装卸机械为龙门吊。下文中提到的堆场装卸机械为轮胎式龙门吊。

(5)水平运输机械

水平运输机械主要用于载运着集装箱在港口内外运动。

自动化港口和半自动化集装箱港口中的水平运输设备为 AGV(Automated Guided Vehicle), AGV 的工作由码头中央控制室生产过程控制系统(PCS)进行管理控制,实现了完全自动化。AGV 上还装有超声波探测装置以及其它辅助安全避碰的装置,能够感知在其由全速行驶到停止运行的减速位移范围内的障碍物,避免碰撞障碍物。

非自动化港口中的水平运输设备为集卡。集卡,一般可以分为牵引车和挂车。集装箱牵引车又称拖头,本身不具备装货平台,必须和集装箱拖挂车连接在一起才能拖带集装箱进行码头内或者公路上的运输。牵引车按照司机室的形式可分为平头式和长头式两种。挂车按照拖带方式可分为半挂车和全挂车。

目前我国集装箱港口都采用集卡水平运输方式,因此本文中的水平运输设备是指集卡。

(6)其它资源

作为一个经济运作实体,集装箱港口作业过程中用到的资源还包括人力资源、信息资源、能源资源等。

2.1.3 集装箱港口的作业流程

集装箱货物的运输流程以及运输方式的组成,是根据国际运输法规和各条航线上的经济地理等条件决定的。是在大规模生产方式的基础上开展起来的,具有明显的规模经济的特点。它必须将分散的小批量货物预先集中起来,组成大批量货物,然后通过内陆、内河运输将集装箱送至集装箱码头堆场,由码头堆场负责货物的装卸作业。

集装箱货物的交接主要有两种不同的形态:一种叫整箱货(Full Container Cargo Load/FCL);一种叫拼箱货(Less than Container Cargo Load/LCL)。整箱货由托运人自行装箱并填写有关单证(装箱单、场站收据等);拼箱货由集装箱货运站负责装箱并定制有关单证。

整箱货货流程序图如下:

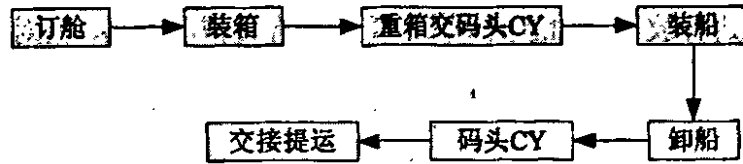


图 2.3 整箱货货流程序图

拼箱货货流程序图如下：

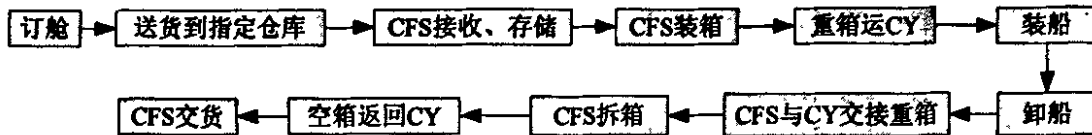


图 2.4 拼箱货货流程图

接下来主要就集装箱码头业务流程进行简单的介绍。其作业流程总的来说可以分为进口流程和出口流程，相对应的可以分成进口箱业务和出口箱业务。

(1) 集装箱港口进口业务流程

在集装箱进口业务中，码头主要负责进口集装箱的卸船，集装箱在码头的堆场作业，货物的交付出场作业。

1. 进口卸船：在集装箱船到达之前，从船公司或船代处取得船舶进口资料(包括船舶积载图、船舶进口舱单和船期计划等)，从船舶积载图(Bay Plan)中获取即将进港船舶装船箱位、集装箱号、集装箱尺寸箱型、积载数量重量、装箱港、卸货港、特种货物积载等信息，根据这些信息编制卸船顺序单与安排卸船场地。再依照船舶进口舱单(Inward Manifest)输入箱内所载货物的信息，如集装箱铅封号、货重、体积、提单号、货类、超限箱的超限范围、联合国编号等。船舶积载图与船舶进口舱单信息吻合后由调度室根据船舶近期计划安排船舶靠泊，并依照卸船堆场计划等安排卸船机械，组织卸船。卸船结束后，根据场区位置进行场地位置确认。

此时完成集装箱从船上卸入港区堆场即进口卸船的过程。

2. 堆场作业：包括安排收箱、移箱、核箱、和提箱计划。其中移箱的情况较为复杂，有安排一关三检的查验移箱，安排修箱的移箱，归位移箱，场地整理的移箱等，主要目的也就是为了提高堆场堆存率，掌握集装箱运转动态，更好地安排下一次装卸作业，提高装卸作业效率。核箱是一种辅助措施，目的是为了提箱作业的准确率。

3. 出场作业：主要是闸口的提箱作业。提空箱一般根据单证上的要求与闸

口已存信息进行放箱，如遇到特殊的情况按有关指示放箱。而对于进口重箱的发放，主要依照海关的放行信息与堆场堆存信息两方面的信息进行放箱，同时在闸口处，审查有效单证与进行箱体状况检验。

集装箱港口的进口业务流程图如所示。

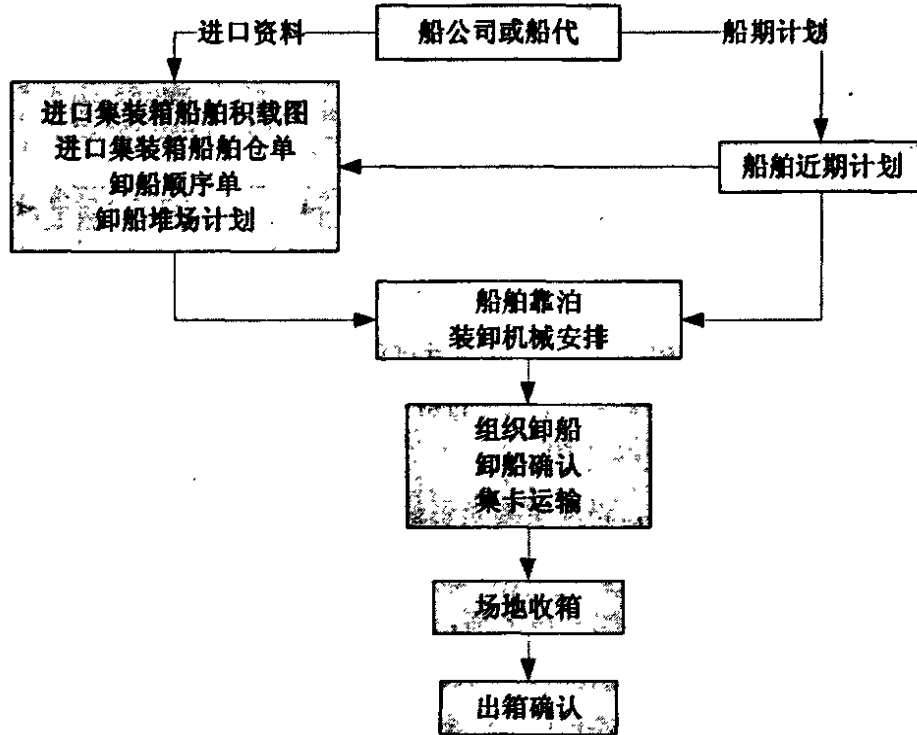


图 2.5 集装箱港口的进口业务流程图

(2) 集装箱港口出口业务流程

在集装箱出口货运业务中，码头主要负责集装箱的进箱作业，堆场作业以及出口装船作业。

1. 进箱作业：管理人员根据船期及船公司或船代的出口预配船图，对在一定期限内预计进港的船舶登记并进行出口场地预安排，集卡凭有效单证在闸口对预备进场的集装箱做进场处理，在进场时也要对进场集装箱进行交接，作好有关记录，处理好在进场时发生的情况。

2. 堆场作业：装船前核箱安排与箱务处理，中转出口箱的联系与归位，拆装箱的调控与归位，安排出口查验，特殊箱的处理、联系与安排等。

3. 出口装船：包含装船前业务上的准备工作与实际装船作业。装船前的准备工作主要是进行码头船舶预配载，首先配载部门按照船公司或船代提供的船舶积载信息，对每一条船进行船舶登记；再按照每一条船每一航次的积载箱量，

凭船代提供的船舶订舱信息与货代提供的海关已放行的集装箱信息同码头堆场内已到港集装箱进行核对；最后根据当班船舶箱位的积载情况，按照集装箱的重量、箱型、尺码、性质、类别、到港先后、场地位置情况、装卸分路作业情况、船舶的稳性等进行配船，并制作装船顺序单，送达有关部门，准备装船作业。实际装卸船作业都由调度室指挥，机械队操作，集装箱由集卡拖运至码头由集装箱装卸桥装船，并进行装船确认。集装箱港口的出口业务流程如下图所示。

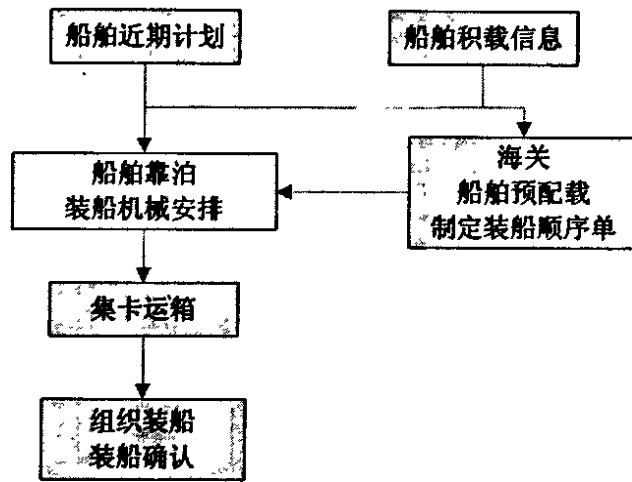


图 2.6 集装箱港口的出口业务流程图

以上是码头进口箱和出口箱业务的基本流程，实际操作中可能还有许多细节，这里不详细介绍。

2.1.4 集装箱港口作业计划编排

船舶综合策划的工作从时间上可以分成四个阶段：月度船舶计划，旬度船舶计划，每周船舶计划和二日滚动船舶计划。对应每个计划时段，分别生成月度船舶计划表，旬度船舶计划表，周生产计划表和航运二日滚动计划表。具体的策划流程细节见下图。

综合策划

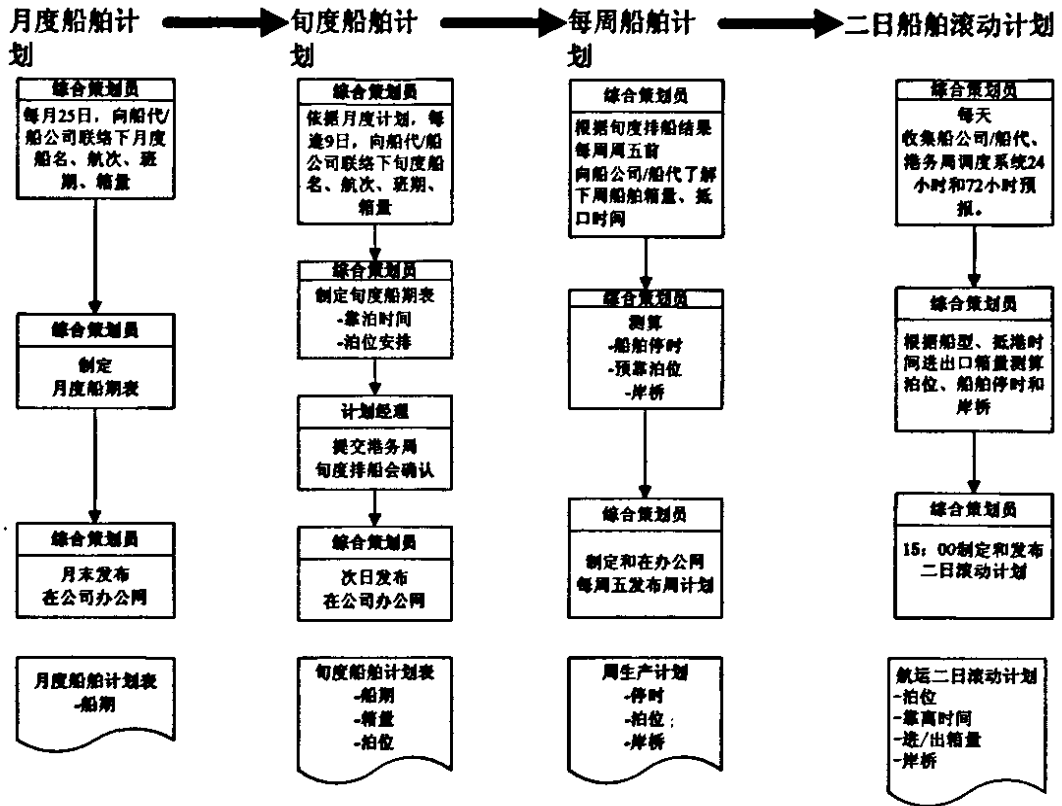


图 2.7 综合策划—船舶计划

下面介绍昼夜作业计划的产生过程，依据天津港某集装箱码头公司的业务生产实际情况，我们总结归纳了昼夜作业计划的产生过程，图中具体描绘了综合策划员在每个阶段的具体工作，最后得到昼夜作业计划表来指导装卸船计划和昼夜场地计划。

综合策划

编制昼夜作业计划

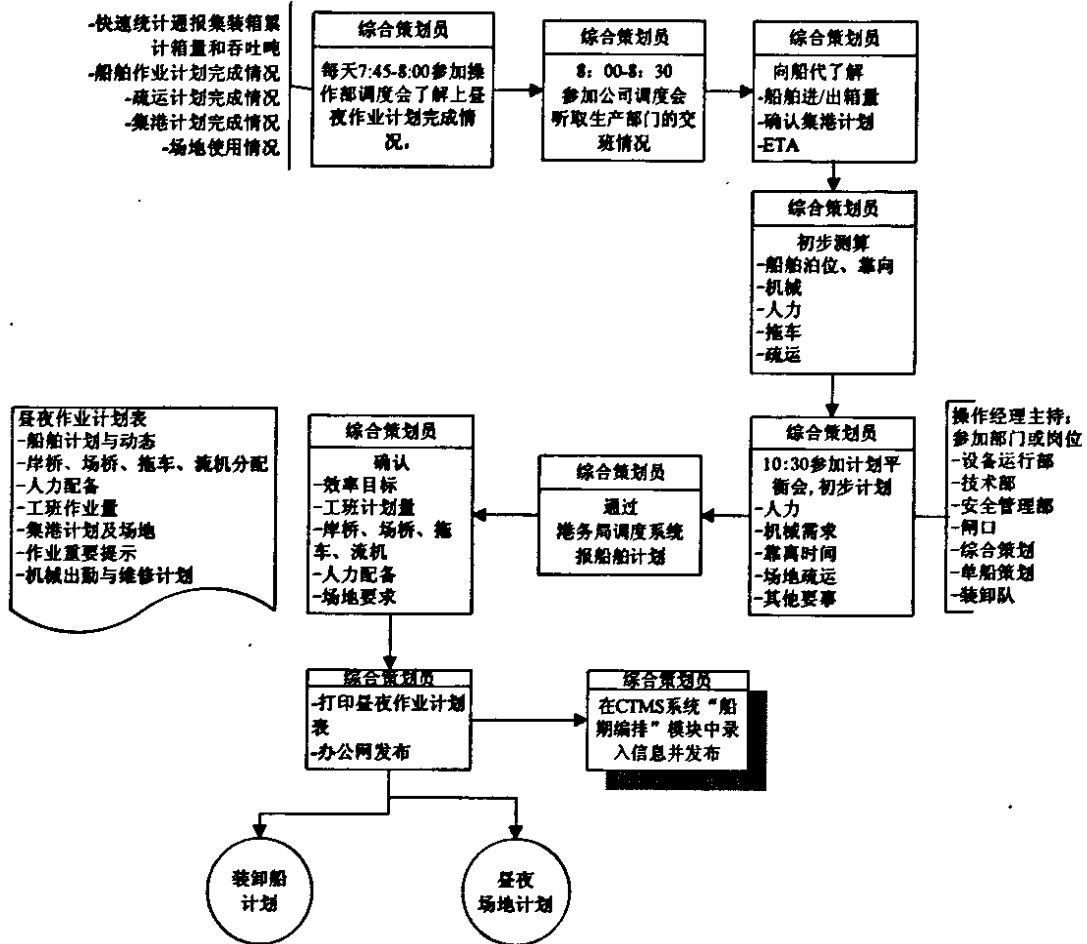


图 2.8 综合策划—昼夜作业计划

昼夜场地计划的制定是场地策划员的工作。场地策划员依据综合策划编制的昼夜作业计划表，结合堆场情况和相关搬运设备的情况以及最新的船舶信息等安排场地计划。经过确认过程后将场地计划添加到昼夜作业计划表，以明确各时段提箱数、集港及进口卸船场地安排等信息。具体流程见图 2.9。

综合策划

编制昼夜场地计划

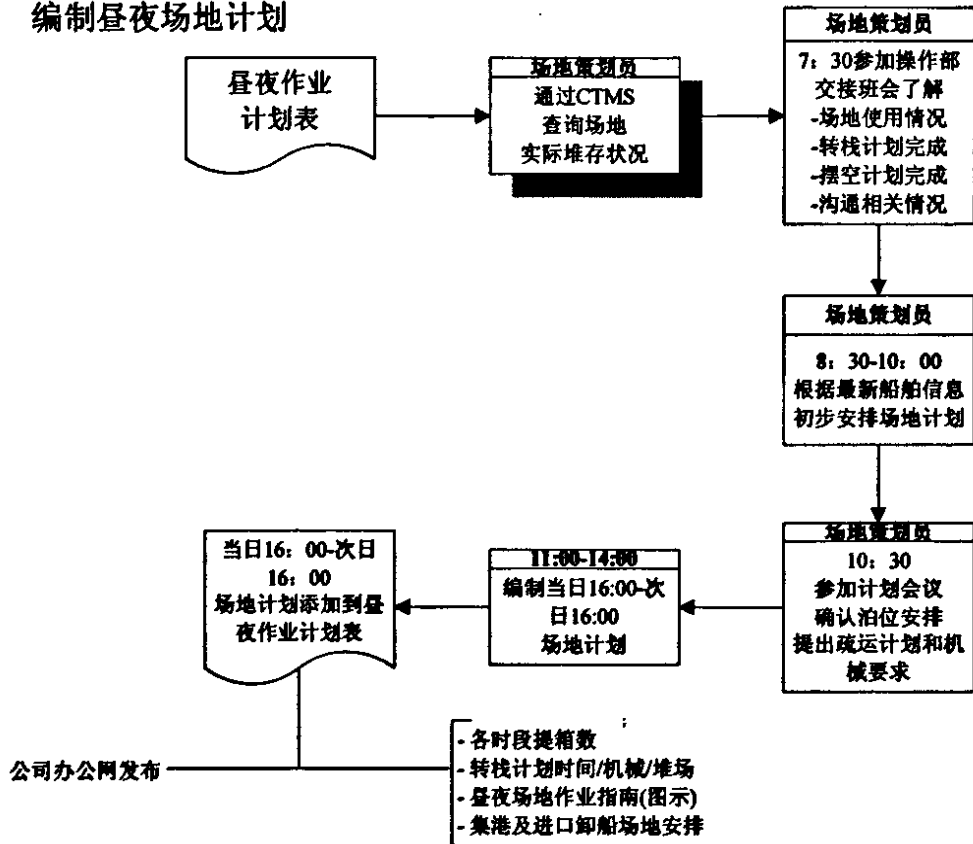


图 2.9 综合策划—昼夜场地计划

场地实时策划是场地策划员的工作，场地策划人员根据昼夜作业计划表，查看堆场的堆存情况，根据场地使用情况，各种计划的完成情况等信息对场地策划进行实时的调整。具体流程见图 2.10。

场地实时策划

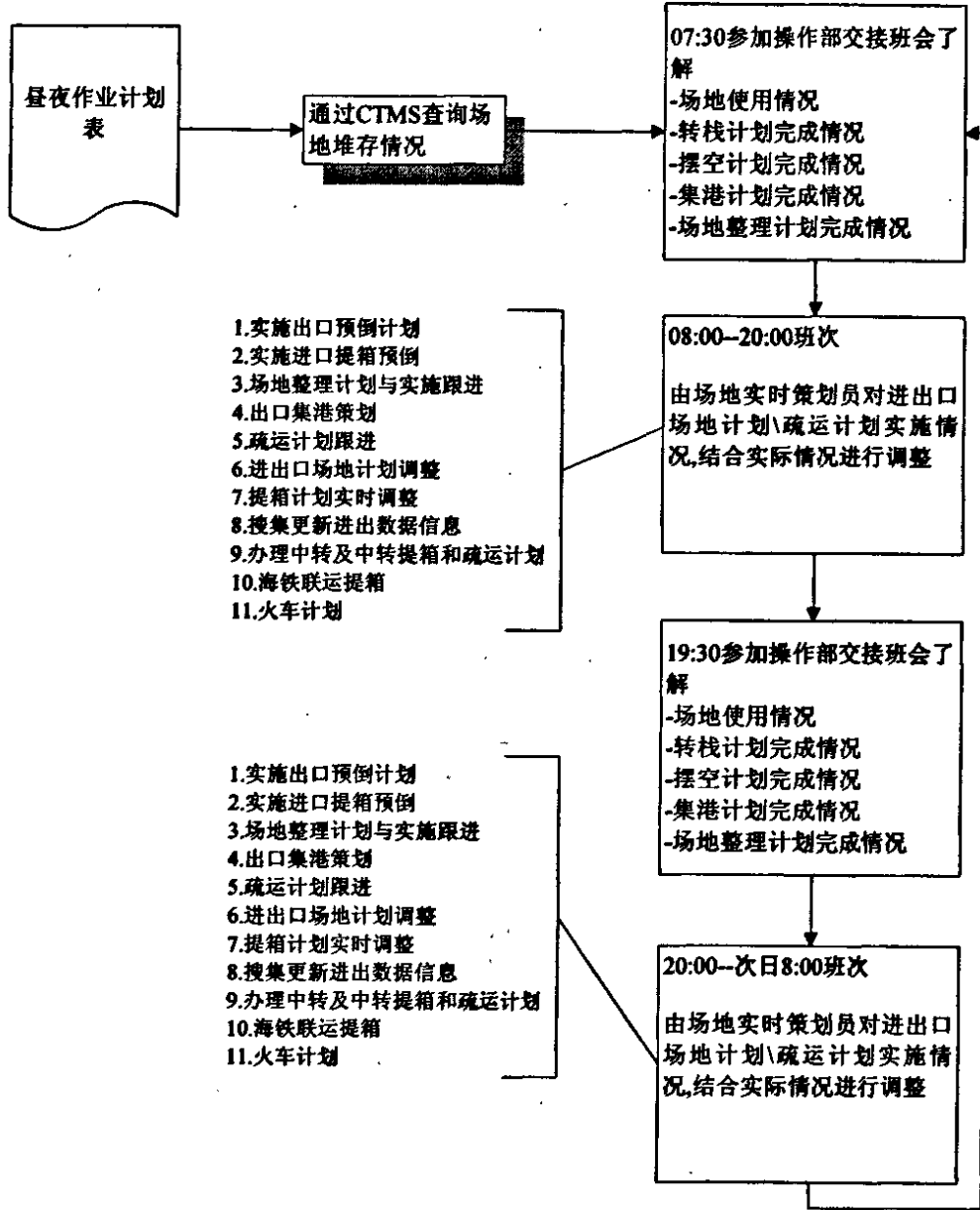


图 2.10 场地实时策划

通过对于以上计划的深入研究和理解，提炼出与码头优化相关的关键部分，总结了集装箱码头运作计划生成流程图。

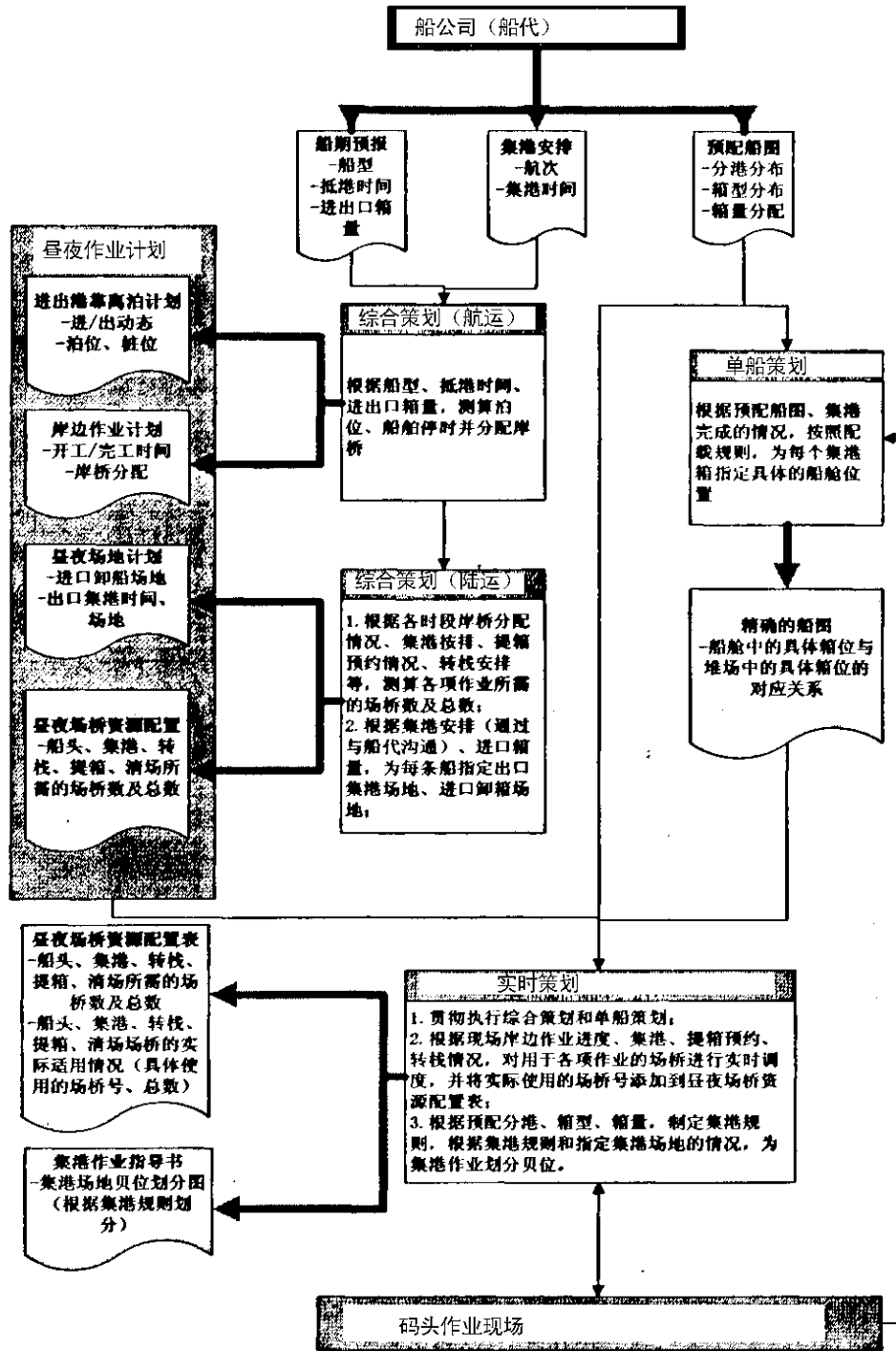


图 2.11 码头各种计划生成过程

第二节 集装箱港口作业资源配置问题

集装箱港口是资本密集型的经济实体,要使港口作业顺利而经济地运行,港口资源的有效配置是其必要保障,而集装箱港口装卸作业中的资源配置更是关系到港口的运作效率及其竞争力。全球集装箱运量的不断上升,更要求港口在作业中对其有限的资源做出科学合理的配置。

2.2.1 港口堆场作业资源配置问题的分类

港口作业可以分为两大类。第一类是船舶作业(ship operations),负责船舶的装卸作业;第二类是交接作业(receiving and delivery operations),负责接收外集卡运抵港口的出口箱,以及将进口箱交付来提箱的外集卡。由于第二类作业牵涉到的是和港口外部集卡的交接作业,外集卡的提箱、交箱作业带有极大的随机性,比如有的货主地处内陆偏远地区,他们的集卡到达时间非常不确定,所以要对这类作业进行优化相对困难。

对于港口装卸作业中的资源配置问题,一般包含了以下三个方面的内容:

第一,对到港船舶进行岸边资源的优化配置。

当集装箱船到港后,需要给其安排码头泊位以便进行装卸作业。由于岸桥资源分布在泊位岸线上,而且由于每台岸桥都有一个作业的物理范围,因此泊位配置过程中总会涉及到岸桥配置问题。泊位和岸桥资源是港口的两种稀缺资源,其成本都非常昂贵,因此泊位和岸桥的配置问题是提高集装箱港口,尤其是亚洲集装箱港口的利用效率的关键点之一。

第二,对船舶装卸过程中的水平运输机械进行配置。

在船舶的装卸过程中,水平运输设备贯穿于岸边和堆场、承担着实现集装箱位置转移的任务。由于国内集装箱码头的自动化水平有限,这里的水平运输设备普遍是指集卡而言。水平运输设备配置不合理将导致岸桥等待,降低岸桥工作效率,甚至使港口的整个作业过程严重脱节,影响集装箱港口的作业效率。

第三,对靠泊船舶进行堆场内资源的优化配置。

在集装箱港口的装卸作业过程中,除了配置一定岸边资源和水平运输设备外,还需要在堆场上配置合适数量的堆场机械,以便与岸边资源和水平运输设备配合共同顺利完成船舶的装卸作业。

由于操作人员总是按照装卸机械设备量依照一定比例进行配置,所以一旦得出装卸机械设备资源的配置,则人力资源的配置也就相应可以获知了,所以本

文将不再对人力资源配置进行单独考虑。

2.2.2 资源配置的层级式结构

整体考虑集装箱码头的全局优化，对整个码头的建模过于复杂，不容易建模和求解。这里的想法是结合目前港口的管理模式设计出一个理想化的码头层级式优化系统，系统模块层层相连，一个层次的输入可以作为下一个层次的输出，帮助港口提高管理效率。从物理位置上来看，泊位资源和岸桥位于集装箱港口的前沿，而且船舶对泊位资源和岸桥的占用具有相对的统一性，将堆场空间资源和装卸机械统称为堆场资源。

水平运输设备穿梭往来于岸边和堆场之间，将其独立称为水平运输设备资源。因此可以将港口资源配置问题大体分成装卸过程中的岸边资源(泊位资源、岸桥资源)配置、堆场资源(堆存位资源、场桥资源)配置和水平运输机械(集卡资源)配置三个问题。

码头资源优化配置问题的层级结构如图 2.12:

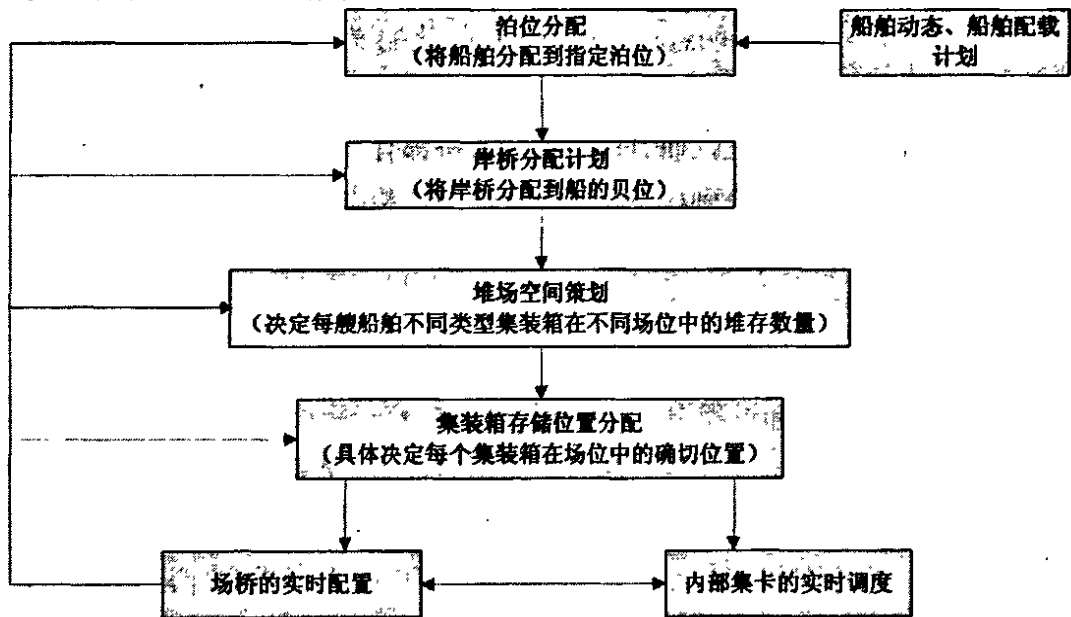


图 2.12 集装箱码头资源优化配置问题的层级结构图

层级结构的最上面一个级别是泊位分配问题，因为船舶停靠的泊位决定了其对应岸桥，决定了船舶距离对应堆场的远近，所以是一个应该优先确定的问题。下一个级别是岸桥的优化，岸边应配备相当数量的岸桥对船舶进行作业，需要

将岸桥分配到船的贝位。再下一个级别是堆场空间策划，决定每个集装箱在堆场中的具体位置，再下面的是场桥的配置和集卡的调度。在这样的层级结构中，上面的每个级别的优化是下个级别优化的基础，可以作为下个阶段资源配置时的已知变量。也有不少的研究是同时对于几个层次的问题联合研究，综合调度得到资源的配置。

2.2.3 层级优化的重点是堆场和场桥

从层级结构中我们可以看出，堆场资源处于层级结构中的中间，上连接着岸桥资源和泊位资源，下对集卡的调度有着很大的影响。且堆场资源的分配问题，是整个集装箱码头最复杂也是最核心的问题。

下面来看看天津港某集装箱码头的具体情况。某码头现有 4 个泊位，分别是 30 段、31 段、31 段东和 32 段。公司年内还将对现有的散货码头进行改造，使其适用于集装箱的作业。码头服务的主要对象以班轮为主，而班轮的动态基本是确定的，由此会得到一个较为固定的码头泊位窗口。当然，也有一些内贸船舶需要进入泊位，而它们是无固定班期的，所以内贸船舶没有固定的泊位窗口。综合来看，码头所拥有的泊位数与其服务的船舶数量相比是充足的。另外，与香港等港口相比，天津港并不是一个天然良港，受人工航道的制约，船舶的进出以 4 个小时为周期，而且对泊位的关注与香港等地也不相同。以此来看，我们认为泊位在现阶段还不是公司资源配置的主要瓶颈。当然，随着公司业务的扩大以及今后泊位的不断增多，我们也需要在泊位分配进行优化决策。

通过调研，我们看到，岸桥是随着泊位计划的制定分配给某个船舶进行装卸作业的，也就是说，岸桥分配计划基本上与泊位分配计划同步进行。提高岸桥的效率可以明显的缩短船舶的在港时间，这也是评价一个码头服务质量的标准之一。码头现有 8 个岸桥，岸桥的分配受很多条件的制约。公司的综合计划员对于岸桥计划已总结出一个较好的编制步骤，并以 excel 表的形式表示出来。岸桥工作效率对于码头服务来说非常重要，但对于码头现阶段的作业来说，岸桥并不是一个主要的资源瓶颈。

在现阶段来说，场桥是制约码头整体资源使用的一个瓶颈。对于年吞吐量达到百万 TEU 的码头来说，码头所拥有的场桥数量是比较少的。码头现有 19 台场桥，由于日常维修、机械故障等因素，实际可使用的场桥数量经常不到 19 台（下一章中按照最多 15 台同时可用考虑）。而这 19 台场桥的型号又不完全一致，有

可以堆高 4 层，也有可以堆高 5 层，有日本、韩国制造的，也有国产的，其性能存在一定的差异。

场桥是码头堆场作业中使用最为频繁的资源，装卸船、集港、提箱、转栈、摆空等作业都需要用到场桥。场桥的效率直接影响到整个堆场作业的效率。根据某码头现有情况来看，场桥的使用常常处在一个紧缺的状态。场桥也是一种非常昂贵的码头资源，购买一个场桥需要花费数百万元。如何充分发挥现有场桥的效率，在场桥消耗尽量小的情况下，使整个堆场作业能够高效，有序的运转，是我们现今的比较紧迫的目标。

由上面我们提出的码头资源配置决策问题的分层模式来看，场桥的优化配置，需要有场地空间策划和集装箱位置分配的优化结果。因此，我们认为要想较好地解决场桥资源对整个码头的制约，得到场桥的最优化配置，需要从得到优化场地决策入手。用已经优化了的堆场分配来优化场桥的配置。下一章研究的场桥配置模型也是在假设场地策划已经优化完成的情况下进行的。

第三章 堆场场桥的资源配置

第一节 堆场场桥资源配置模型

3.1.1 模型描述

在码头堆场中，集装箱装卸等搬运操作都是由场桥完成的。场桥在集装箱港口操作流程中起到至关重要的作用。调查发现，场桥的效率是影响港口效率的主要瓶颈之一，因此合理安排场桥的配置计划是很重要的。场桥根据样式和功能分成多种不同类型，其中最常用的是轮胎式龙门吊。它具有配置灵活等优点，这里我们就以它作为研究对象。

堆场操作是一个十分复杂的环节，包括进口，出口所有的类型，涉及集港，装船，卸船，提箱等等多种操作过程。针对堆场的资源计划配置的论文以前有过一些，Zhang^[16]总结为两种类型：安排集装箱存储位置和分配和配置堆场设备。单独针对场桥的配置研究，以前的文章不是很多。在1994年，Lai和Lam^[13]用仿真方法比较不同设备配置策略下码头的吞吐量，设备利用率，等待时间。1998年Gambardella^[28]讨论了仿真模型在港口资源配置中的应用。模型对岸桥、场桥等港口资源进行配置，并采用网络流的思想，运用混合整数规划建立模型。1999年Kim和Kim^[15]建立混合整数规划模型来建立一个堆场内的场桥模型来最小化场桥的工作时间。

另外，还有一些文章在考虑场桥配置的同时综合考虑了其它操作因素。比如Linn等^[35]研究了几个计划周期的场桥配置问题。文中给出了一个两阶段模型，首先考虑堆场机械的作业均衡；然后再考虑最大限度地降低倒箱率，将集装箱具体放到某一个位置。Gambardella^[21]运用网络流的方法对整个港口的装卸资源进行了仿真研究，在模型中，将每个工作日分为三个计划周期，同时假设所有的岸桥工作能力均相同，船舶在哪个计划周期到达为已知，所靠船舶的装卸箱量根据船舶的抵港预报也为已知。需要决定的就是每个计划周期所需配置的岸桥数量、场桥配置数量以及各船每计划周期装卸箱量，最后将得到一张计划周期内的资源配置计划表。

单独针对场桥的配置进行研究的文章以下两篇比较典型。Linn和Zhang^[20]通过一个混合整数规划模型研究了场桥的工作任务分派问题。在假设已知若干个计划周期的工作任务量的条件下，通过合理地安排场桥在某计划周期内的工

作任务和不同场区之间的移动顺序,达到在某若干个计划周期内场桥未完成的任务量最小。模型采用两阶段的拉格朗日松弛启发式算法进行了求解。文中假定场桥的配置数量已知。Zhang 等^[22]通过建立一个整数规划模型研究了场桥的工作任务分配问题。在假设已知若干个计划周期的工作任务量的条件下,通过合理地安排场桥在某计划周期内的工作任务和不同场区之间的移动顺序对场桥配置进行优化。该模型是在给定场桥台数基础上给出的配置方案,不能优化场桥配制台数,并且假设每台场桥效率相同。

通过文献的总结可以发现,以往对场桥问题的研究有两种方法:仿真的方法和数学模型的方法。以往解决场桥问题的整数规划模型(混合整数规划模型),都是认为每台场桥的效率相同,但实际情况是随着设备的更新换代,机器陈旧导致的机器效率下降,在很多码头中场桥的工作效率存在差异。另外,在不同的计划周期,参与工作的场桥数量应该是可以变化的。基于以上两点,本章建立了数学规划模型,对场桥进行动态配置。

3.1.1.1 问题描述

本文是在已知堆场场区工作量的情况下,即堆场资源分配优化完成后研究场桥的配置问题。

首先对场区的“工作量”这个比较模糊的概念加以说明。以出口集港为例,在场地策划完成后,根据集港策划的结果,可以确定计划周期内每个场区上集港箱数量。这时是用“箱量”作为工作量的单位。在场桥配置阶段,需要考虑场桥在场区上的工作时间。因为综合倒箱、场桥移动等因素以后,场桥完成一个集装箱装卸所使用的时间是不相同的。所以,一般将工作量的统计单位从箱数转变成场桥的工作时间。场桥由于不同时期购买等原因,效率存在差异。在转化时,选择所有场桥中数量最多、工作能力处于中等水平的场桥作为“标准”,设其效率系数为 1,其它场桥的工作能力和它比较,如果效率高,则效率系数大于 1;如果效率低,则效率系数处于 0 到 1 之间。这样,把“标准”场桥完成工作的时间定义为“标准”时间,其它场桥的工作时间通过乘以效率系数转化成“标准”工作时间。最终,对工作量完成情况的统计也用“标准”时间来衡量。

本文研究的问题如下:假设已知若干个计划周期内每个场区的工作任务量,在场桥效率不同的情况下,综合工作量、场桥和场区间的距离等因素对场桥进行配置,计算得到每台场桥的工作场区和工作时间,使得码头堆场的运转效率

达到最高，即总的未完成工作量最少。

3.1.1.2 天津港某集装箱码头的实际情况

天津港某码头有堆场场区 16 块(4*4)如下图：场桥 15 台(编号场 01~场 15)，制造厂商分别为 S(3 台)，H(5 台)，Z(7 台)，在空载时其小车速度相同，大车速度有略微的差异，这里忽略差异不计，认为空载时场桥的移动速度相同。重载时的升起速度三者之比为 15: 18: 23(0.83: 1: 1.28)，以此比率作为其工作效率系数。

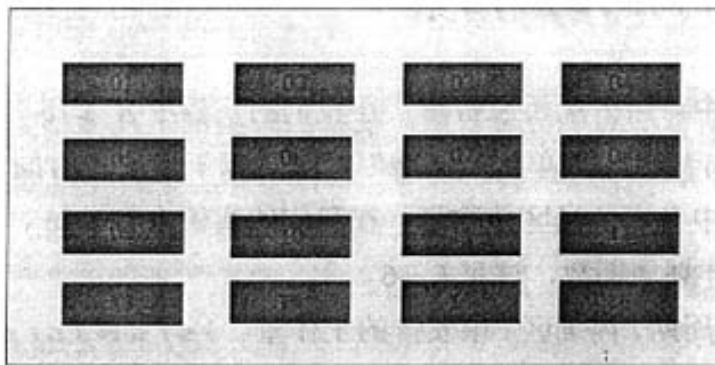


图 3.1 天津港某码头堆场平面示意图

3.1.2 模型建立

每个计划周期为 4 小时，即一天包含六个计划周期。

假设如下：

(1)假设每台场桥的工作效率不同，用效率系数区分。通过效率系数，把每台场桥的工作时间转化成场桥的标准工作时间。标准工作时间的单位用分钟表示，一个计划周期 4 个小时内的标准工作时间是 240 分钟。

(2)由于场区大小的限制，并且为了避免场桥发生碰撞或交通拥堵，规定在各个时刻每个场区上的场桥数量不能超过 2 台。

(3)每台场桥在各个计划周期内最多可以在场区间移动一次。

(4)在各计划周期未完成的工作量将累加在下一计划周期。

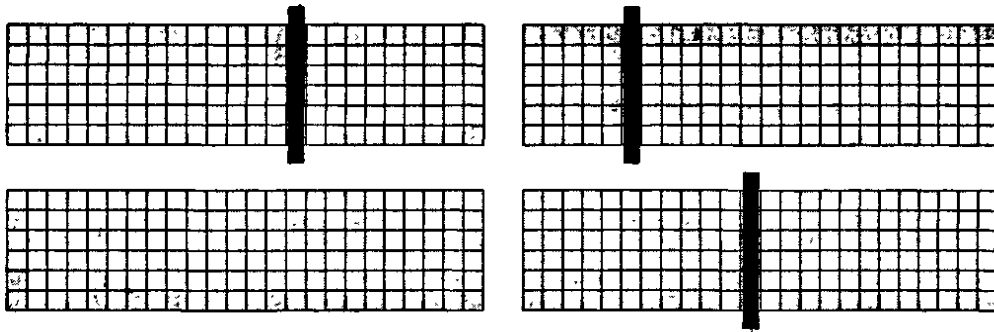


图 3.2 堆场堆位和场桥示意图

下面说明各个符号参数的含义。

已知参数：

R_c ：堆场中可用的场桥总数量，在我们的实例中 $R_c \leq 15$ 。

C ：单位计划周期内单台“标准”场桥可以工作的总时间， $C = 240 \text{ min}$ 。

N ：模型中考虑的场区总数量，在我们的实例中 $N \leq 16$ 。

T ：总的计划周期数，这里 $T = 6$ 。

B_{it} ：计划周期 t 内场区 i 中安排的工作量。 $1 \leq i \leq N, 1 \leq t \leq T$ 。

t_{ij} ：场桥从场区 i 移动到场区 j 的时间，假设所有场桥移动速度相同，令 $t_{ii} = 0$ ， $1 \leq i, j \leq N$ 。

θ_d ：场桥 d 的工作效率系数，通过它把场桥的工作时间转化为标准时间。
 $1 \leq d \leq R_c$ 。

决策变量：

R_{itd} ：计划周期 t ，场桥 d 在场区 i 中的工作时间。

$$X_{itd} = \begin{cases} 1, & \text{计划周期 } t \text{ 开始时场桥 } d \text{ 在场位 } i \text{ 中} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

W_{it} ：计划周期 t 末场区 i 中未完成的工作量。

下面首先讨论所有场桥在计划周期内都可用的情况，使未完成的任务量的和最小。问题是如何调配场桥进行工作。建立的规划模型如下：

目标函数：

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N w_{it}$$

最小化 T 个周期内 N 个场区上未完成的工作量的和。每个计划周期单独统计未完成的工作量，保证每个计划周期内分配的任务都将尽量在计划周期内完成。针对工作量和场桥数量的对比关系，这里分成两种情况：一是工作量大，场桥

数量不足的情况。那么所有的场桥都需要工作来最大化的完成分配到每个场区上的任务，因此不会有场桥的剩余。二是工作量小，场桥充足的情况，在这种情况下，通过求得最优解，计算出某些场桥可以在某个计划周期内停机不工作，节约一部份场桥的工作能力。在第二种情况下，可能有很多组最优解，这些解中只有极少可以得到场桥的工作时间为零，即场桥可以在某个计划周期内停机休息。这是由于目标和约束中没有限制场桥的使用数量造成的，这里决策的目标只是未完成的工作量最少。

约束：

$$\sum_{i=1}^N X_{it} \leq 2, i=1,2,\dots,N; t=1,2,\dots,T; \quad (3.1)$$

每个计划周期的起始时刻每个场区上场桥的数量不多于 2。当 $t=1$ 时， X_{i1} 表示场桥 d 在第一个计划周期开始时所处的场区 i ，即场桥的初始位置。如 X_{i1} 已知，即表示场桥的初始配置分布已知。

$$\sum_{i=1}^N X_{it} = 1, d=1,2,\dots,R_c; t=1,2,\dots,T; \quad (3.2)$$

在计划周期 t 初始时刻，场桥 d 一定被分配在一个场区 i 上，且只能在一个场区上。

通过(3.2)可以推出下面的约束：

$$\sum_{i=1}^N \sum_{d=1}^N X_{it} = R_c, t=1,2,\dots,T; \quad (3.3)$$

约束(3.3)约束在每个周期的开始时刻在所有场区上的场桥总数保持不变。这个约束将导致场桥的数量不能根据时间改变，但它并不意味着场桥在某一个周期内不能停机。

例如求得某可行解 $X_{32t} = 1$ 而 $\sum_{i=1}^N R_{i2t} = 0$ ，说明虽然在周期 t 初始时刻场桥 2 被分配在场区 3 上，但是由于 $\sum_{i=1}^N R_{i2t} = 0$ ，意味着场桥 2 在周期 t 内并没有被分配工作量。这种情况下，场桥 2 就可以停机休息。

$$B_i + w_{i(t-1)} - \sum_{d=1}^R (R_{id} \times \theta_d) - w_i = 0, i=1,2,\dots,N; t=1,2,\dots,T; \quad (3.4)$$

$$w_{i0} = 0, i=1,2,\dots,N; \quad (3.5)$$

约束(3.4)表示工作量的计算关系。第一个计划周期的开始没有未完成的工作量。

$$R_{id} + R_{jd} \leq C - t_y \times (X_{id(t+1)} + X_{jd} - 1),$$

$$i, j = 1, 2, \dots, N; d = 1, 2, \dots, R_c; t = 1, 2, \dots, T-1; \quad (3.6)$$

约束(3.6)说明如果计划周期 t 内场桥从 i 移动到 j , 其在 i 中和 j 中工作时间的和需要小于等于 C 减去场桥从场区 i 到 j 移动所花费的时间。

$$R_{id} \leq C \times (X_{id} + X_{id(t+1)}),$$

$$i, j = 1, 2, \dots, N; d = 1, 2, \dots, R_c; t = 1, 2, \dots, T-1; \quad (3.7)$$

$$R_{id} \leq C \times (2 - \sum_{b=d}^R X_{ib}), \quad i = 1, 2, \dots, N; d = 1, 2, \dots, R_c; t = 1, 2, \dots, T; \quad (3.8)$$

$$R_{id} \leq C \times (2 - \sum_{b=d}^R X_{ib(t+1)}), \quad i = 1, 2, \dots, N; d = 1, 2, \dots, R_c; t = 1, 2, \dots, T-1; \quad (3.9)$$

用这几个约束来限制场桥在场区上的工作时间, 保证在一个计划周期内一台场桥最多只能移动一次, 一台场桥最多只能在两个场区上工作且工作时间受到限制。约束(3.7)用 X_{id} 限制 R_{id} , 表明如果在周期 t 、周期 $t+1$ 的初始时刻场桥 d 都不在场区 i 上, 则周期 t 内场桥 d 在场区 i 上的工作量为零。约束(3.8)和约束(3.9)说明优先让场桥工作这样一个原则, 如果一个堆场内已经存在两个场桥, 即使场桥的效率不高, 工作量不能完成, 也不能调入其它的场桥, 因为堆场内场桥数量已经达到上限。

$$R_{id} \geq 0, w_{it} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N; d = 1, 2, \dots, R_c; t = 1, 2, \dots, T; \quad (3.10)$$

$$X_{id} = \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, N; d = 1, 2, \dots, R_c; t = 1, 2, \dots, T; \quad (3.11)$$

3.1.3 考虑维修因素的情况

下面研究可用场桥数目变化的情况, 即场桥由于维修或其它作业等原因, 不能保证全部场桥在 T 个计划周期内都可以用于堆场的作业。因此, 引入一个新定义的变量 0-1 变量 δ_{dt} :

$$\delta_{dt} = \begin{cases} 1, & \text{场桥 } d \text{ 在计划周期 } t \text{ 可用} \\ 0 & \text{不可用} \end{cases}$$

引入新变量后, 加入一条新约束, 来限制 R_{id} :

$$R_{id} \leq C \times \delta_{dt}, \quad i = 1, 2, \dots, N; d = 1, 2, \dots, R_c; t = 1, 2, \dots, T; \quad (3.12)$$

约束(3.12)表示当某个计划周期内场桥不可用时, 对其工作量的限制。

目标函数和其它约束与前面相同。

由于场桥的维修等情况是提前计划的, 因此 δ_{dt} 是已知的。

3.1.4 Lingo 求解

Lingo 是用来求解线性和非线性优化问题的简易工具。Lingo 内置了一种建立最优化模型的语言，可以简便地在 Lingo 环境中表达大规模问题，利用 Lingo 高效的求解器可快速求解并分析结果。

3.1.5 算例试验

采用天津港某集装箱码头的的数据，考虑六个周期、十六块堆场场区和十五台场桥， $\theta_i = (0.83, 0.83, 0.83, 1, 1, 1, 1.28, 1.28, 1.28, 1.28, 1.28, 1.28, 1.28)$ ， t_{ij} 如表 3.1 所示：

表 3.1 场桥在场区间的移动时间

Blocks	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	10	20	25	20	20	25	30	35	35	40	50	40	45	55	60
2	10	0	10	20	20	20	20	25	35	35	35	40	45	40	45	55
3	20	10	0	10	25	20	20	20	40	35	35	35	55	45	40	45
4	25	20	10	0	30	25	20	20	50	40	35	35	60	55	45	40
5	20	20	25	30	0	10	20	25	20	20	20	30	35	35	40	50
6	20	20	20	25	10	0	10	20	20	20	20	25	35	35	35	40
7	25	20	20	20	20	10	0	10	20	20	20	20	40	35	35	35
8	30	25	20	20	25	20	10	0	30	25	20	20	50	40	40	35
9	35	35	40	50	20	20	20	30	0	10	20	25	20	20	25	30
10	35	35	35	40	20	20	20	25	10	0	10	20	20	20	20	25
11	40	35	35	35	20	20	20	20	20	10	0	10	25	20	20	20
12	50	40	35	35	30	25	20	20	25	20	10	0	30	25	20	20
13	40	45	55	60	35	35	40	50	20	20	25	30	0	10	20	25
14	45	40	45	55	35	35	35	40	20	20	20	25	10	0	10	20
15	55	45	40	45	40	35	35	40	25	20	20	20	20	10	0	10
16	60	55	45	40	50	40	35	35	30	25	20	20	25	20	10	0

为了广泛体现模型在各种情况下的求解效果，选择四类参数：堆场场区的块数，场桥的平均工作量，工作量的分布和场桥的数量。每个参数分成两种或三种级别情况，如下表所示：

表 3.2 各种参数的设置

参数	场区数	平均工作量	工作量分布	场桥数量
1	4	0.6RC	[0.7L, 1.3L]	3
2	8	0.9RC	[0.9L, 1.1L]	7
3	16			15

把各个参数的不同等级组合。在任意组合后可以得到多种不同的情况。既可

第三章 堆场场桥的资源配置

以反映出一个规模比较大, 比较繁忙的集装箱码头堆场情况也可以反映出相对没有那么繁忙, 问题规模较小的情况。对于场区, 4 块场区的情况用图 3.1 中的 01~04 号堆场场区, 8 的情况就用 01~08 号场区, 16 的情况全用。场桥数量是 3 台时选用效率不同的场桥各一台, 7 的情况选用三种效率不同的场桥 2 台、2 台、3 台, 15 的情况场桥全部使用。平均工作量表示了场桥工作的繁忙程度, 0.9RC 意味着对场区内的场桥相当的繁忙, 工作时间占总时间的 90%; 而 0.6RC 代表了场桥较轻闲的工作状态。工作量的两种分布分别表示随机产生的场区工作量是分散和集中的两种情况。综合考虑各种参数得到如下 20 种情况, 每种情况计算 10 个算例, 一共 200 个算例, 计算时间设定为 2 个小时, 如计算不出最优解则停止计算, 具体结果见表 3.3。

表 3.3 各种参数组合以及计算结果

场区数	平均工作量	工作量分布	场桥数量	能否规定时间内求得最优解	计算时间
4	0.6RC	[0.7L, 1.3L]	3	是	1s
4	0.6RC	[0.7L, 1.3L]	7	是	1.9s
4	0.6RC	[0.9L, 1.1L]	3	是	1.2s
4	0.6RC	[0.9L, 1.1L]	7	是	1.4s
4	0.9RC	[0.7L, 1.3L]	7	是	4.1s
4	0.9RC	[0.7L, 1.3L]	3	是	1.5s
4	0.9RC	[0.9L, 1.1L]	7	是	3.9s
4	0.9RC	[0.9L, 1.1L]	3	是	2.1s
8	0.6RC	[0.7L, 1.3L]	7	是	2m4s
8	0.6RC	[0.7L, 1.3L]	15	是	18m35s
8	0.6RC	[0.9L, 1.1L]	7	是	2m1s
8	0.6RC	[0.9L, 1.1L]	15	是	18m20s
8	0.9RC	[0.7L, 1.3L]	15	否, 找到可行解	>2h
8	0.9RC	[0.7L, 1.3L]	7	是	3m59
8	0.9RC	[0.9L, 1.1L]	7	是	3m30
8	0.9RC	[0.9L, 1.1L]	15	否, 找到可行解	>2h
16	0.6RC	[0.7L, 1.3L]	15	否, 找到可行解	>2h
16	0.6RC	[0.9L, 1.1L]	15	否, 找到可行解	>2h
16	0.9RC	[0.7L, 1.3L]	15	否	>2h
16	0.9RC	[0.9L, 1.1L]	15	否	>2h

为了考察加入 δ_{dt} 以后对求解的速度和质量的影响, 我们设计了下面的算例: 选择场区数量为 4 和 8, 场桥数量为 3, 7 和 15 三种情况。每次计算前随机产生两个场桥在某个周期 t 去维修, 即 δ_{dt} 有两个为 0, 其余都为 1。场区内的工作量

相应的根据该周期内的场桥数量产生。平均工作量选择 0.6RC 或 0.9RC，任务量的分布采用[0.7L, 1.3L]。每组计算 10 组数据，取平均结果。计算结果见下表。

表 3.4 加入新参数后的变化

场区数	平均工作量	场桥数量	没有加入 δ_{dt}		加入 δ_{dt}	
			能否在规定时间内求得最优解	计算时间	能否在规定时间内求得最优解	计算时间
4	0.6RC	3	是	1s	是	1s
4	0.6RC	7	是	1.9s	是	1.9s
4	0.9RC	3	是	1.5s	是	1.5s
4	0.9RC	7	是	4.1s	是	4.0s
8	0.6RC	7	是	2m4s	是	2m15s
8	0.6RC	15	是	18m35s	是	16m52s
8	0.9RC	7	是	3m59s	是	3m48s
8	0.9RC	15	否	>2h	否	>2h

3.1.6 结论说明

采用 Lingo8.0 进行计算。对于大多数算例，在一定的时间内可以找到可行解，其中一部分可以找到最优解。

下面分析各个参数对求解的影响：

1. 场区数量。通过上表可以看出，对于场区数量为 4 或 8 规模的问题，Lingo 可以在短时间内找到最优解，而随着场区数量增加到 16，相应的决策变量成倍增加，导致 Lingo 求解困难，在规定时间内不能得到最优解，有些情况甚至不能得到可行解。

2. 平均工作量。这个参数对 Lingo 求解的影响很大，可以发现平均工作量从 0.6RC 变为 0.9RC，在其它条件不变的情况下，求解时间明显变长。这也和实际情况相符合，在任务量不大的情况下，调度场桥是一件轻松的工作；而在任务量大，特别是如果有些场区的工作量超过了场桥的工作能力时，调度场桥是一个比较复杂的过程。

3. 工作量分布。通过观察上面表中的运算时间可以发现这个参数对于模型求解速度影响不大。说明和平均工作量相比，工作量的分布是否集中对于模型求解速度的影响不大。

4. 场桥数量。场桥数量和场区数量有着一定的关系，一般来说，一个场区上会配有一台场桥。所以随着算例中场区数量的增加，场桥的数量也随之增加，

最多达到场区数目的 2 倍。受到决策变量定义因素的影响，场桥数量对求解速度的影响也比较大。

第二节 堆场场桥配置的启发式算法

3.2.1 算法描述

场桥在计划周期内的有效转场，可以完成更多的工作量，使得未完成工作量减少。下面介绍“最小未完成”启发式算法。

在每个计划周期内，在堆场中的场区和场桥一定属于下面三种情况中的一种：

1. “需求场区”，指那些工作量超过场区内场桥工作能力并且场桥的数量少于 2 台的场区。对“需求场区”可以通过增加场桥来使得未完成的工作量减少。

2. “供应场桥”，场桥所在场区的工作量小于场桥的最大工作能力。这种情况下，“供应场桥”可以提供场桥的剩余工作能力。“供应场桥”所在的场区处于“满足状态”，计划周期内的未完成工作量为零。

3. “满负荷场区”，指那些工作量大于或者等于场桥的最大工作能力并且场区中场桥的数量等于 2 的情况。这样的场区不能进行场桥的调整。因此，在算法中不考虑。

在任何一个计划周期内，如果存在工作量未完成的“需求场区”，在可以移动的“供应场桥”中选择一个移动过去，必然可以减少该计划周期内的未完成工作量。

算法规定，在每个计划周期内，所有的场桥无论其工作效率如何，都首先要完成本场区内的的工作。在原来所在的场区的工作量可以完成后，才能转场到其它场区。选择某些“供应场桥”移动到某些“需求场区”，算法要完成的工作就是决定这些移动，以及何时移动，使得所有场区未完成的工作量最小。

下面介绍几个算法中用到的参数：

S_t ：计划周期 t 内“供应场桥”的集合。在周期 t 内所有的“供应场桥”都属于该集合。

D_t ：计划周期 t 内“需求场区”的集合。在周期 t 内所有的“需求场区”都属于该集合。

$W - S_{d,t}$ ：计划周期 t 内“供应场桥” d 减去场区工作量后剩余的工作能力。

$d \in S_t, t = 1, 2, \dots, T;$

$W_{-D_{it}}$: 计划周期 t 内“需求场区” i 上的工作量减去存在场桥能完成工作量后剩余的工作量, 即需求工作量。 $i \in D_t, t = 1, 2, \dots, T;$

$W_{-M_{it}}$: 周期 t 内场桥 d 移动到需求场区 i 后场区 i 上未完成的工作量。
 $i \in D_t, d \in S_t, t = 1, 2, \dots, T;$

$W_{-A_{it}}$: 周期 t 内如果 d 移动到 i 后, 全部“需求场区”未完成工作量的和。
 $i \in D_t, d \in S_t, t = 1, 2, \dots, T;$

$W_{-S_{it}}$: 周期 t 内如果 d 移动到 i 后, 全部“供应场桥”的剩余工作能力的和。 $i \in D_t, d \in S_t, t = 1, 2, \dots, T;$

一个属于“供应场桥”集合的场桥移动到“需求场区”, 必然会使得该场区上的未完成工作量减少, 即 $W_{-M_{it}} = [W_{-D_{it}} - (W_{-S_{it}} - t_{ij})]^+, j$ 是 d 所在的场区。

移动后全部未完成的工作量的和:

$$W_{-A_{it}} = \sum_{j \in D_t} W_{-D_{jt}} + W_{-M_{it}} \quad (3.13)$$

移动后全部有剩余工作能力场桥的剩余工作能力的和:

$$W_{-S_{it}} = \sum_{j \in S_t} W_{-S_{jt}} \quad (3.14)$$

注意对于效率不同的场桥, 在计算的过程中把工作量转化成标准工作量。

根据分析可以知道, 从整个计划周期来看, 并不是所有的移动都会对最后的结果有好的影响。如果移动的场桥所属的场区在下个周期任务繁重同时移动后所属的场区工作量很少, 则这样的移动将会影响场桥在后面周期的有效工作。为了避免这样的移动。提出了以下场桥移动需要满足的条件:

$W_{-SL_{it}}$: 向前看窗口 l 内“供应场桥”集合的场桥 d 所在原场区 j 的工作量总和。

$W_{-DL_{it}}$: 向前看窗口 l 内“需求场区” i 的工作量的总和。

条件 1:

If $(W_{-SL_{it}} - W_{-DL_{it}} < threshold)$, 表示可以移动过去。

这个条件意味着在 l 个计划周期范围内, 场区的工作量的差符合要求, 如果“供应场桥”场区在未来的工作量较大而目标场区的未来的工作量过小则场桥不适合移动到目标场区。这种情况下当前的供应场桥所在的场区可能在将来会变成需求场区。

条件 2:

如果“供应场桥”所在的场区和“需求场区”之间的距离太远，大于设定的值 θ ，则这样的移动是不允许的。因为这样的转场移动会把过多的工作时间浪费在转场上。所以转场要选择在那些距离小于 θ 的场区之间进行。

3.2.2 算法流程

前面周期的未完成工作量对后边周期的影响很大。所以，前面周期内的工作要尽可能的完成，算法是独立从前到后在每个周期内进行计算，再将结果累加。

考虑每个计划周期内的情况，重复的考虑从“供应场桥”到“需求场区”的移动，最后直到“供应场桥”或者“需求场区”的集合为空。对计划周期 t ，首先确定“供应场桥”集合 S_t 和“需求场区”集合 D_t 。根据这两个集合，生成二维矩阵 $W_{M_{tk}}$ ，行对应“需求场区” i ， $i \in D_t$ ，列对应“供应场桥” d ， $d \in S_t$ 。

算法规定，如果在一个场区内有两台场桥，则优先分配效率低的场桥在本场区内工作。优先考虑效率高的场桥考虑转场到其它场区。

接着计算矩阵 $W_{S_{tk}}$ ， $W_{D_{tk}}$ ， $W_{SL_{tk}}$ 和 $W_{DL_{tk}}$ ， $i \in D_t$ ， $d \in S_t$ ，而后计算 $W_{M_{tk}}$ ， $W_{M_{tk}} = [W_{D_{tk}} - (W_{S_{tk}} - t_{ij})^+]$ ， j 是 d 所在的场区，注意将场桥与其所在场区的对应。

同时根据(3.13)计算 $W_{A_{tk}}$ 矩阵。根据(3.14)计算全部剩余工作量矩阵 $W_{S_{tk}}$ 。

当全部的 $W_{A_{tk}}$ 完成后，选择这个矩阵中最小的元素。在场桥移动时，将此位置对应的列代表的场桥移动到对应的行代表的场区，移动后剩余未完成的工作量最少，即“最小未完成”。选择出一个移动后，然后看其是否满足条件。如果不满足移动条件，则再选择“次小”的矩阵元素；如果满足条件则进行移动，然后重复前面的过程，直到到达终止条件。

终止条件包括集合 S_t 或 D_t 为空或者矩阵中所有的元素都不满足移动条件。

在比较 $W_{A_{tk}}$ 矩阵最小元素的过程中，可能遇到某两个元素相等且同时最小的情况。这个时候，就要比较剩余工作量矩阵 $W_{S_{tk}}$ ，在相同的两个中选择那个剩余工作量大的矩阵进行移动，因为剩余工作量大表明在下次场桥移动的时候可以完成更多的工作量。如果剩余工作量矩阵经过比较后，相应位置的值还相同，则选择第一个元素。

算法流程图如下：

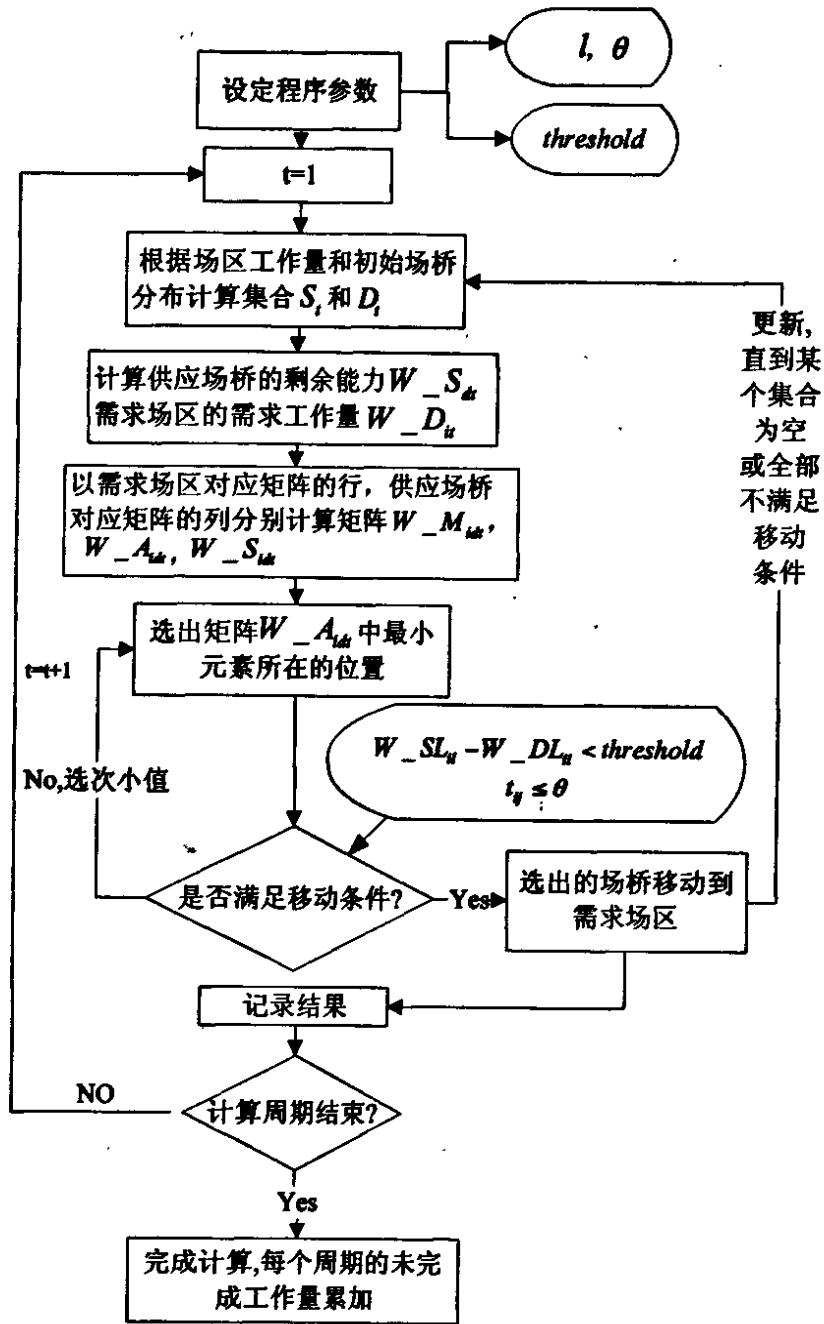


图 3.3 程序流程图

3.2.3 参数分析

在算法中用到了三个参数分别是：向前看窗口 l ，阈值 $threshold$ ，场区间距离的阈值 θ 。

向前看窗口 l 和 $threshold$ 对于求解的影响，体现在限制场桥的移动上。算法中限制当目标场区和场桥所在场区在未来周期内工作量的差过大的时候则限制

移动。从整个周期来看,这样可能有利于避免场桥来回频繁的移动,减少场桥转场所花费的时间。但是对于一个计划周期内而言,这样的限制可能造成周期内移动的无法进行,无法减少未完成工作量。这些工作量将积累到下一个周期,对整体目标函数也造成影响。因此,提前窗口量和 threshold 值,特别是 threshold 值是个重要的因素,需要根据实际情况来选择其值的大小。

场区间距离阈值 θ , 和 threshold 一样,该参数也限制了场桥的移动,它的限制原理是减少长距离的场桥移动。如果 θ 值限定的过紧,也会因场桥无法移动造成完成工作量无法完成。

通过若干次的比较和选择,选择了 $l=2$, threshold=0, $\theta=45$ 。

3.2.4 比较分析

如前一节分析,数学规划模型随着变量数量的增加其求解时间增长得非常迅速。下面比较本节提出的启发式算法和第一节的 Lingo 计算求解的效果和时间长短。表中列出了几组比较的数据,其中前几组代表平均工作量为 0.6RC 的轻松情况,后几组代表平均工作量为 0.9RC 的繁忙情况。工作量分布由于对结果影响不大,考虑随机地在 $[0.7L, 1.3L]$ 产生。场区数选择 8、16 两种情况。场区间距离等均使用上一节的数据。应用随机数进行了多组计算,将比较的结果记录在表 3.5 中。

表 3.5 数学规划方法和启发式算法的比较

场区数	平均工作量	场桥数量	Lingo 最优解	Lingo 结果	Lingo 时间	启发式时间	启发式结果
8	0.6RC	7	是	0	2m4s	<1s	0
8	0.6RC	15	是	0	18m35s	<1s	0
16	0.6RC	15	否	—	>2h	<1s	0
16	0.6RC	15	否	—	>2h	<1s	0
8	0.9RC	7	是	54	3m59	<1s	54
8	0.9RC	7	是	36	3m30	<1s	38
16	0.9RC	15	否	—	>2h	<1s	89
16	0.9RC	15	否	—	>2h	<1s	103

通过表 3.5 可以看出,启发式算法在求解时间上有着出色的表现,可以迅速找到一组可行解。在求解质量上,启发式算法也有着不错的效果。对于小规模问题,在 Lingo 可以得到最优解的情况下,多数情况启发式算法也可以找到最优

解。即使有些情况下启发式算法求得的解比最优解稍大，相对误差也在可以接受的范围内。对于 Lingo 在短时间内不能求解的大规模问题，对于场桥不太繁忙的工作环境下，启发式算法可以得到最优解(此时目标函数为零，所得的解即为最优解)；对于繁忙情况，启发式方法也可以快速的得到一组解且得到的解在可以接受的范围内。为了比较繁忙情况下启发式算法的求解效果，设定 lingo 的计算时间延长到 10 小时。在这样的情况下 lingo 有时可以得到最优解，有时可以得到可行解。启发式算法的求解与最优解的差距不大，但好于 lingo 得到的可行解，说明对于大规模问题，启发式算法也具有出色的求解能力。

第四章 仿真技术在集装箱码头堆场中的应用

随着计算机技术的发展,计算机仿真技术被广泛地应用到港口设计、规划、管理的研究当中并取得了许多成果。本章的研究目的是在 Flexsim 的仿真软件平台上建立一个针对集装箱码头的堆场作业系统仿真,通过出口集港过程的实例,直观的展示了出口箱集港过程的基础上同时对堆场内的集卡数量进行优化。在建立仿真的过程中,对 Flexsim 中的集装箱装卸设备对象库,场桥作业的运动学规律和任务序列等关键技术进行了研究和应用。

第一节 仿真技术在集装箱港口的应用

4.1.1 仿真技术的特点

目前,在系统的规划、设计、运行、分析及改造的各个阶段,系统仿真技术都发挥着重要作用。随着研究对象的规模日益庞大,结构日益复杂,仅仅依靠人的经验及传统技术难以满足愈来愈高的要求。基于现代计算机及其网络的仿真技术,不但能提高效率,缩短研究开发周期,减少训练时间,不受环境及气候限制,而且对保证安全、节约开支、提高质量具有突出的功效。利用仿真技术对集装箱码头进行研究,实质上就是通过编程或利用专用软件在计算机上建立虚拟的集装箱码头,模拟码头运行过程,并通过改变参数输入或码头的运行规则,对某些指标(可能是多个)进行统计,观察,比对或分析,以帮助我们选择对码头运作更有利的运行策略、发现在某些特定条件下存在或可能出现的问题。

传统的解析方法主要是通过建立问题数学模型,利用优化方法,求出问题最优解或满意解来支持或辅助决策的。有时最优解或满意解,只是为了用于与某些简单规则下产生的决策变量对应的目标进行比较,以评价该规则的优劣。仿真分析方法是首先确定运行参数、给定策略,而后通过仿真运行,观察评价目的指标结果的好坏;解析方法则是先确定要达到的目标,而后通过数学方法求解,得到码头所应采取的最优的或理想的运行参数。

此外,仿真方法还具有动态性、可视化,以及可对任意长的时段内的数据进行统计等优点。

仿真的目的在于:在系统研制之前用于规划、评价和研究,通过系统仿真可

以评价系统某一部分的性能，可以估价系统各个部分或各个分系统之间的相互影响，以及它们对整体性能的影响，可以比较各种设计方案，从中获得最佳设计；在系统研制中间用于设计和精密分析，可以对一些新建的理论、假设进行效验；在系统研制成功后则用于考核设计和训练系统的操作人员等。系统仿真技术之所以能够得到广泛的应用，是由于以下几个方面的原因：

(1)系统还处在设计阶段，真实的系统尚未建立，人们需要更准确地了解未来系统的性能，这只能通过对模型的实验来了解。

(2)在真实系统上进行实验可能会引起系统破坏或是发生故障。例如，对于一个真实的化工系统或是电力系统进行没有把握的试验将会冒巨大的风险。

(3)需要进行多次试验时，难以保证多次系统试验的条件都相同，因而无法准确判断试验结果的优劣。

(4)系统试验时间太长或费用昂贵。

4.1.2 仿真技术在集装箱码头中的应用

在港口物流的研究中，优化算法和人工智能得到了良好的应用。在没有实际系统的情况下，把港口物流系统转换成为模型，通过运用模型，评价方案的优劣并修改方案是常用的港口研究方法。由于集装箱港口的作业过程中存在很多的随机性，通过解析方法得到的资源配置方案在实际操作可能会有一定的偏差。而建立集装箱港口装卸作业仿真系统，结合资源配置的解析模型，对装卸过程进行仿真，是一个行之有效的方法。可以实现集装箱港口装卸作业中的整体资源配置协调。

集装箱码头中可以利用仿真技术研究的问题包括：

(1)堆场策划。比如不同堆存策略，对岸边作业效率(L/U 作业效率)、提箱/集港的延迟、场桥的使用、场区利用率等指标的影响。

(2)设备分配和调度。如在码头吞吐量和调度原则固定的条件下，判断码头设备的配置是否合理；又如场桥分配和调度策略，对场桥利用率和空耗时间、岸边作业效率、提箱集港效率等指标的影响。

(3)泊位分配。

(4)集卡路径优化。如通过仿真模拟集卡进入闸口后在堆场内的不同运行路径，找到利于提高整体作业效率的最佳路径。

(5)L/U 作业运作方式。如作业线方式与非作业线方式，对船舶平均作业时间、

码头年吞吐量等的影响。

(6)流量分析。如在码头设施、运行策略固定的前提下，分析码头的最大吞吐能力；

(7)瓶颈分析。如在码头设施和调度原则固定的前提下，当码头吞吐量增大时，整个码头的瓶颈首先出现在哪个环节。

而利用仿真技术研究集装箱码头运作的主要过程如下图：

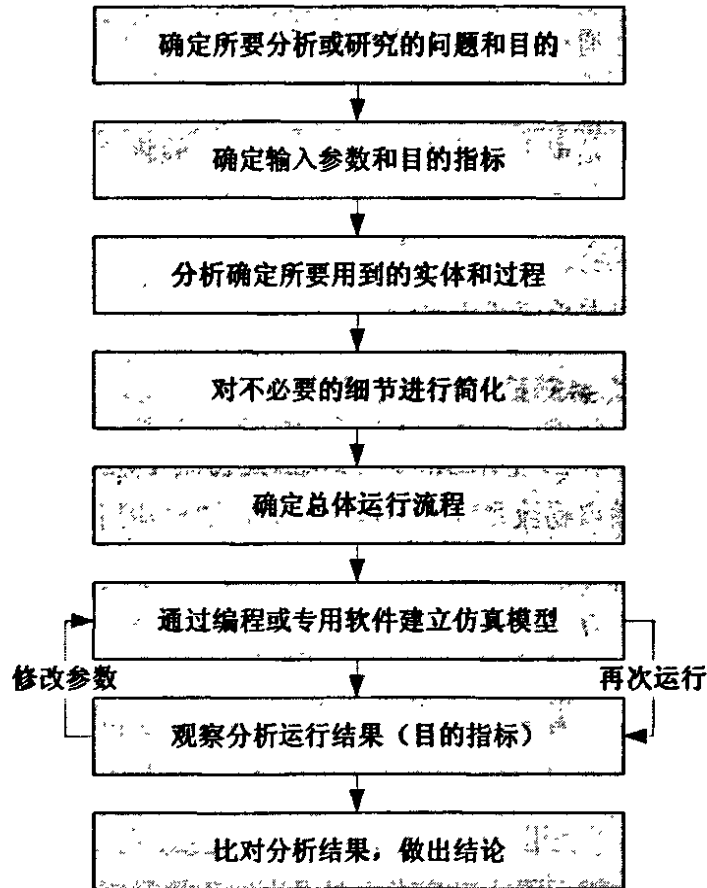


图 4.1 仿真技术研究问题的主要流程

第二节应用 Flexsim 建立仿真

4.2.1 Flexsim 软件的介绍

通过在 Flexsim 仿真平台中建立三维系统仿真模型，可以最大程度的反映真实码头的场景。这区别于其它一些软件所建立的系统仿真模型是平面二维的。过去要建立实际场景模型需要在仿真平台之外的第三方软件上建立三维模型，

这就增加了工作量，并且仿真与场景运行是分离的，这样的仿真结果会大打折扣。将仿真过程与集装箱码头作业动画相结合是系统仿真的一大发展，仿真者不仅可以分析统计仿真的数据，还可以看到真实的作业情况。

Flexsim 仿真模型的基本组成包括：对象(Objects)，在 Flexsim 中采用对象对实际过程中的各元素建模；连接(Connections)，Flexsim 中通过对象之间的连接定义模型的流程；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 采用面向对象的技术，大部分 Flexsim 对象都是 FixedResource 或 TaskExecutor 对象的子对象。由于继承关系，子对象拥有其父对象所有的接口和相应的功能并且用户比较容易很快掌握子对象的使用。

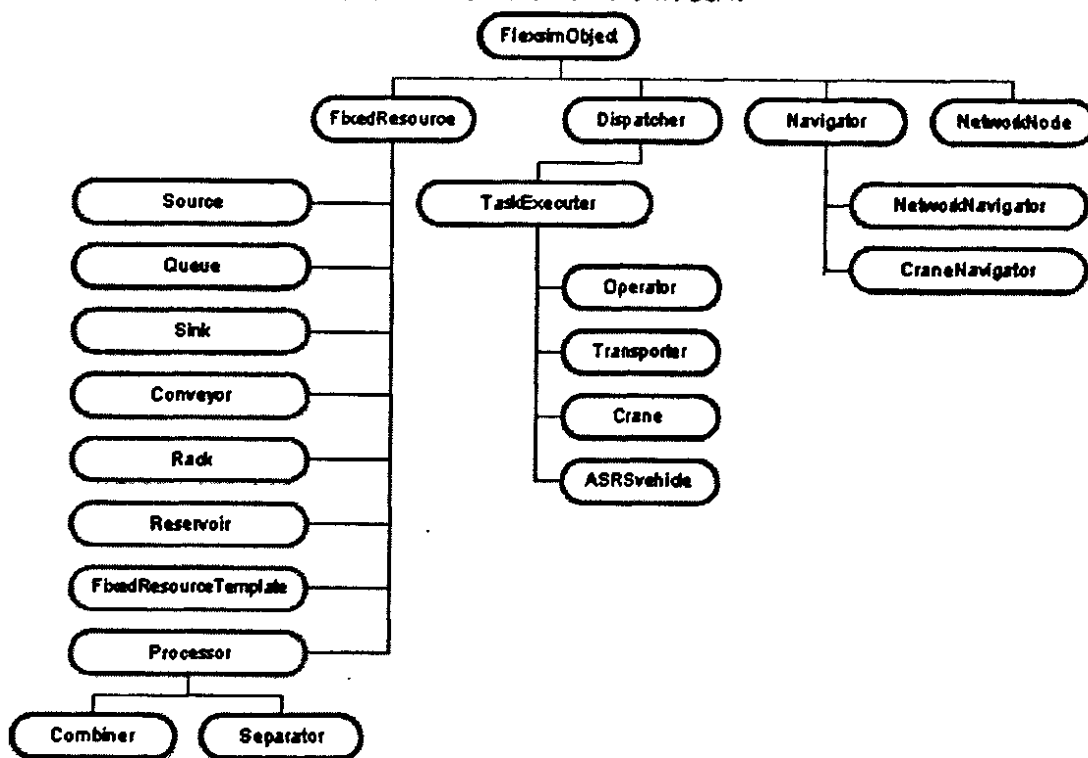


图 4.2 Flexsim 家族树

Flexsim 中建立了对象库的概念，对象库的建立就是为了对象的重复利用，以节约建模时间。对 Flexsim 中对象分类可以分成资源类、执行类、网络类和图示类四种。Flexsim 本身提供了基本的对象库，比如资源类对象库被分为两类：FixedResources 和 mobileResources，这些基本对象可以完成许多仿真工作。也可以创建自己的对象库以针对其所在行业所遇到的问题。针对港口的物流仿真，

为了使仿真模型的建立更加快速,效果更好,现有的基本对象库就不能满足仿真的要求,这时就有必要来创建港口设备对象库,如在第三节的例子中我们就新建立了场桥,集卡对象。

在 Flexsim 中方法是用来完成一项任务的一系列规则集, Flexsim 采用一系列方法集来完成所建模型的作业。并且在 Flexsim 中好的方法应是可以重复使用的。建模方法集包括 Arrival Method、Trigger Method、Flow Method、Navigation Method、FlowItem Bin Method、TaskExecuter Move Method 等等。

应用 Flexsim 建模的基本步骤如下:

- (1)构建模型布局;
- (2)定义物流流程;
- (3)编辑对象参数;
- (4)编译运行仿真;
- (5)分析仿真结果。

4.2.2 应用 Flexsim 建立堆场仿真时的关键技术

4.2.2.1 输入数据

Flexsim 仿真属于离散事件系统仿真。在离散时间系统仿真中进行数字实验时首先需要获得实际系统运行的输入数据。多数实际系统会体现出某种随机特征,不能完全用确定的数学模型来描述,系统的输入数据是一个随机变量。在建立集装箱码头堆场出口集港仿真的过程中,需要获得运送集装箱的集卡到达闸口的时间间隔、集卡在堆场接受服务的时间等数据。在这样一个排队系统中,集卡到达的时间具有某种不确定性,一般认为这个时间间隔满足泊松分布。

建立的系统不可能与实际模型完全相同,即使有实际系统的完整数据也不可能完全导入到模型中。因此数据建模是系统建模仿真中很重要的一步。对于离散事件系统仿真,事件发生的随机性决定了数据建模的必要性。收集实际系统的数据,分析这些数据,并用这些数据建立输入数据模型,并且使得所建立的输入数据模型能够正确反映数据的随机性,是能否得到正确仿真结果的重要前提。

在第三节的例子中,输入数据采用的将数据拟合成某种分布的方法。采用模拟某种分布的方法一个原因是缺少直接的现实数据进行输入,另一原因是拟合某种分布的数据能够比某些小规模数据量的输入更能准确的模拟实际的情况。

在仿真过程中用到了 Flexsim 软件中提供了数据分析建模软件 ExpertFit。使用 ExpertFit 可以对输入数据进行分析，得到最佳的概率分布函数以及相对应的参数值。

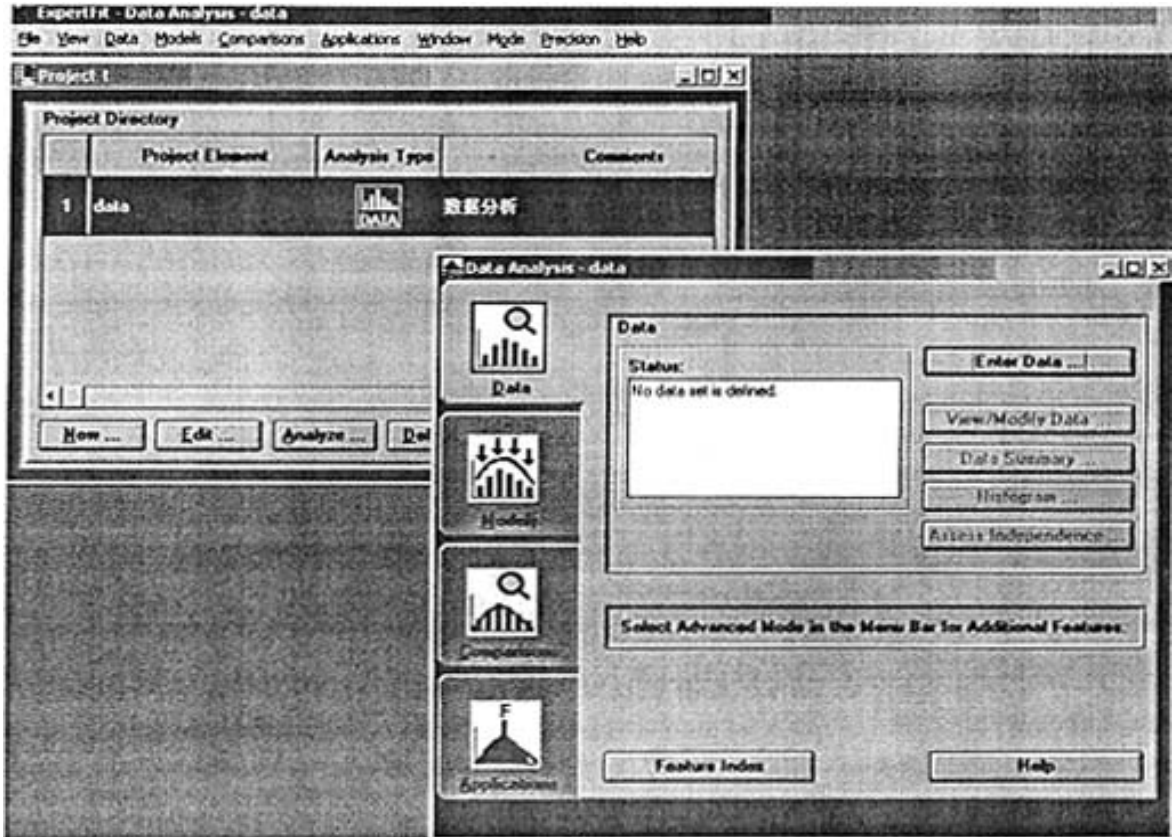


图 4.3 ExpertFit 数据分析界面

通过 ExpertFit 进行的数据分析和参考其它资料，集装箱码头整个作业系统仿真涉及到的输入数据可以拟合成以下分布：

- (1)船舶到港时间，满足泊松分布；
- (2)船舶占用泊位时间分布，满足负指数；
- (3)到港船型及装卸箱量随机分布，满足正态分布；
- (4)到港船舶作业方式(装箱、卸箱、装卸同时进行)，满足离散型的二项分布；
- (5)岸桥、场桥工作时间，满足正态分布。

4.2.2.2 制定集装箱码头设备对象

要在 Flexsim 环境中进行二次开发，除了用系统提供得对象库以外，要自己建立需要的对象。在第三节的仿真中用到的集卡、场桥对象，就需要自己开发。

场桥可以使用 Flexsim 中为用户提供的 BasicTE/BasicFR 对象来开发。在 Flexsim 中，BasicTE 对象的默认外形是一个球体，其外形可以通过在 3DMAX 中绘制并保存后导入。开发的流程是：首先在 3DMAX 中设定场桥的外观，然后把设计好的外观导入 BasicTE/BasicFR 对象，然后在代码段中完成其运动学规律的制定。生成的对象可以保存在系统的对象库中，可以继承使用。场桥导入 3DMAX 外观之后如图 4.4 所示。

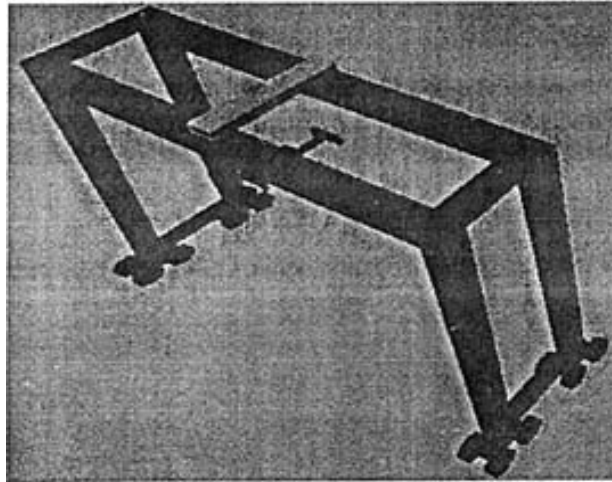


图 4.4 场桥导入 3DMAX 后的外观

BasicTE 是 TaskExecuter 的子类。该对象允许用户为其设定运动功能，实现停止/恢复对象，载入/卸载物件之类等高级功能。场桥设备的实现要涉及到运动学，所以选择 BasicTE 对象。选择 BasicTE 对象进行二次开发就是为了利用它实现对象的运动和任务的分配，因此主要的工作就要在参数对话框 OnBeginOffset/OnUpdateOffset/ OnFinishOffset 中写入相对应的代码。

OnBeginOffset 的功能是在初始时计算出该对象在 X/Y/Z 方向上要运行的距离或要旋转的角度；OnUpdateOffset 的功能是在对象运动的过程中不断地计算位置或旋转的角度；OnFinishOffset 的作用是运动结束后调用该函数。

在设计场桥对象时将场桥对象模型分解为三个主要运动部件：大车运行机构、小车运行机构和吊具。三者之间的关系是：小车和吊具跟随大车运动；吊具跟随小车运动。也就是说大车和小车都相当于容器，小车置于大车容器中，吊具置于小车容器中。

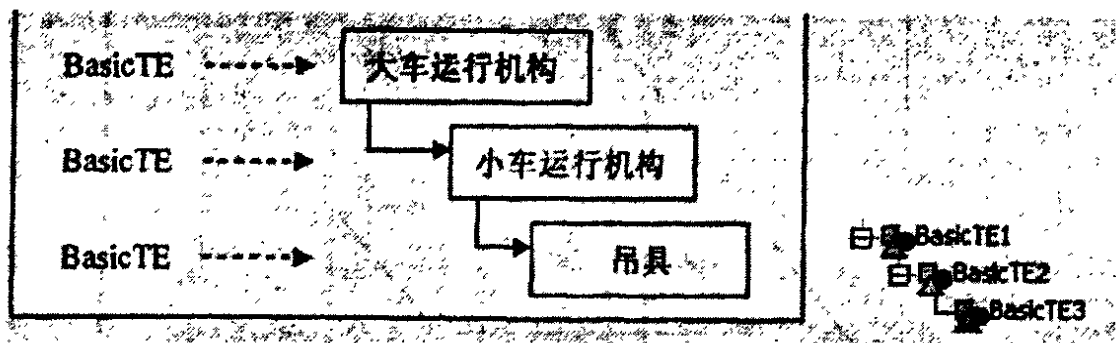


图 4.5 场桥对象的对象分解

需要设定各个对象的运动学规律，首先需要介绍一下 Flexsim 中的坐标。因为运动路线的确定一定少不了坐标。Flexsim 中最常用的坐标空间就是模型空间(model)。用户建立系统模型时，将许多对象放入视图中，根据不同的逻辑关系组成不同的模型。这些对象都处于模型空间中。模型空间是 Flexsim 中最大的坐标空间，系统模型中的所有对象都被包含在这个空间当中。

还有一种容器坐标空间(container)。容器对象就是可以存储物件，举例来说，对象 Rack 的作用是存放物件，此时 Rack 就相当于一个容器。当物件置于 Rack 中时，物件(item)就处于 Rack 的容器空间中。当一个物体处于不同的容器空间中时，它的位置坐标就是它所在容器坐标空间坐标系的值。下图描述了容器空间的概念。

在图 4.6 中，Rack 置于 Model 坐标空间中，其位置坐标是(2, 2)；物件 item 置于 Rack 的容器空间中，其位置坐标是(1, -2)。用户查看对象的属性页面可以得到对象的坐标值。这里需要提示一点的是，在 Flexsim 中每个被选中的对象都有一个黄色的外界矩形框，对象的坐标是以如图所示的位置点来确定的。

可见当场桥需要做的动作相对比较复杂的时，相对运动的坐标关系常常需要在不同的容器坐标系之间作相应的转换工作。Flexsim 也提供了相应的坐标转换函数来实现这个功能。完成了坐标转换，就可以接着确定各种对象的运行路线和运动距离。因为一般来讲场桥大车在堆场上不进行垂直方向的移动，所以不管是什么样的运动线路，都可以将其分解为起始点与目的点之间在 X 方向上的距离和 Y 方向的距离。

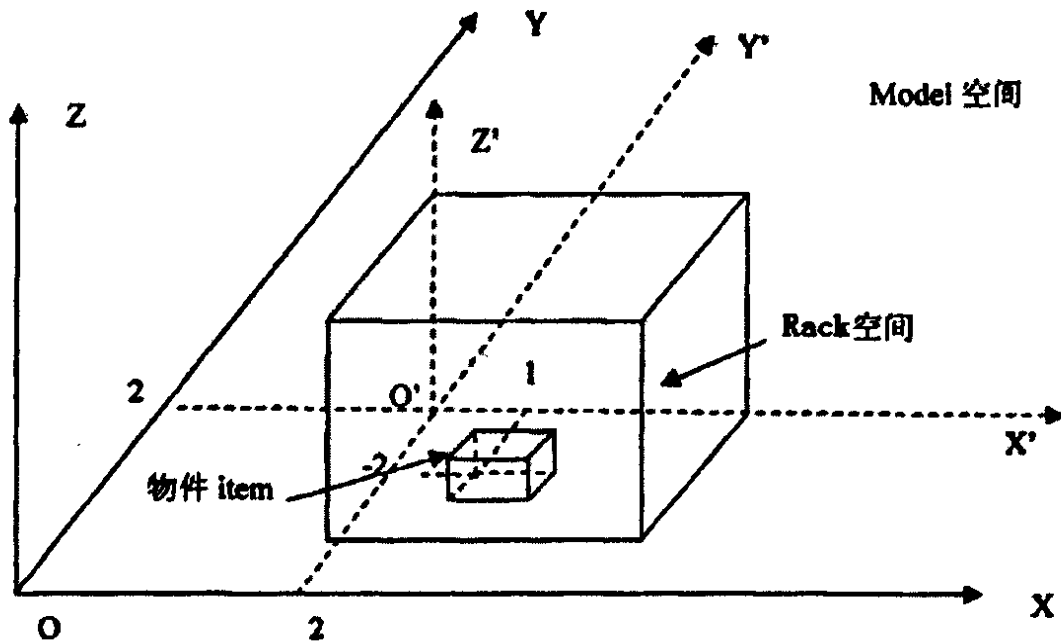


图 4.6 容器空间概念的说明

BasicTE 的参数对话框的“OnBeginOffset” 选项中提供了多个有用的参数值，是系统自动计算的，用户只要明白这些参数的含义直接拿来使用即可。Current: BasicTE 对象本身；x: BasicTE 在 x 方向上的偏移量，其值为 BasicTE 与物件中心坐标在 x 方向的差；y: BasicTE 在 Y 方向上的偏移量，其值为 BasicTE 与物件中心坐标在 Y 方向的差；z: BasicTE 在 z 方向上的偏移量，其值为 BasicTE 与物件中心坐标在 z 方向的差；item: BasicTE 所搬运的物件；endspeed: BasicTE 到达目的点的速度；maxspeed: BasicTE 运动过程中所能达到的最大速度；acceleration: BasicTE 运动过程中的加速度；deceleration: BasicTE 运动过程中的减速度。

假设场桥的大车运动轨迹在 model 坐标空间中沿着 x 方向运动，那么小车在大车的坐标空间中沿着 y 方向运动，吊具在 z 方向上运动。小车和吊具都处于大车的坐标空间中，在大车中实现运动函数时，上面所提到的距离参数需要做一些转换。这里 x/y/z 距离参数都是大车的 BasicTE 对象相对物件的距离，这个距离值只有在 model 坐标空间中才有意义；大车处在 model 的坐标空间中，大车在 x 方向上运动，所以 x 参数值可以直接使用。小车处于大车的坐标空间中，需要将 y 参数转化到同一坐标系下，这样小车才能准确地运动到物件的正上方。吊具运行的距离也同样需要将 z 值转换到同一坐标系下。

在 Flexsim 中可以通过 rank 函数 rank(obj container, num index)建立对 container 的编组索引, 比如把 container 内的第一个对象定义为 1, 第二个对象定义为 2。堆场仿真中对于场桥中定义如下:

```
fsnode* kinlabel = label(current, CRANE_LAB_KINEMATICS);
fsnode* cranekin = rank(kinlabel, 2);
fsnode* trolleykin = rank(kinlabel, 3);
fsnode* grabberkin = rank(kinlabel, 4);
```

在场桥对象中还定义了一个 travel sequence, 其值为 “L>XY>D”, 表明的含义是预先定义了场桥抓取集装箱时吊具、小车、大车的行动顺序。在进行提箱操作时吊具的升高必须首先进行, 完成之后才能进行大车和小车的移动。大车和小车的移动可以同时进行。在大车和小车移动完成后进行吊具下放进行提箱的操作。设定这个序列的原因是为了防止吊具在大车和小车移动过程中因随意摆动而造成事故, 十分符合实际情况。

为了方便, 在场桥参数中定义了一个有关各部分运动速度的表, 如图 4.7 所示, 需要时通过 gettablenum(str/obj table, num row, num col)函数得到对应的值。

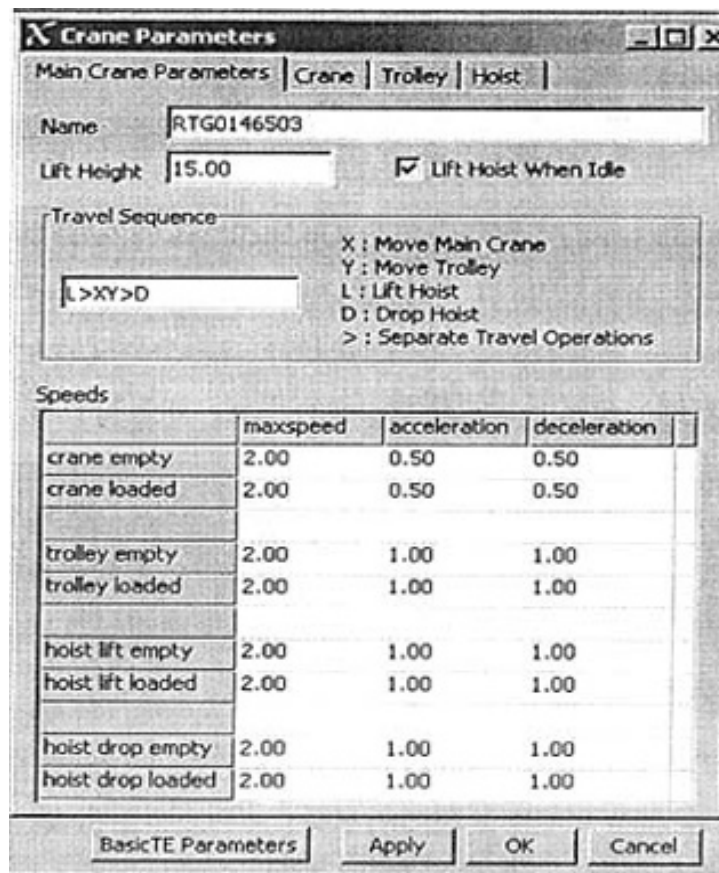


图 4.7 场桥的参数表

在 OnBeginOffset 中具体实现如下：

```
...//初始化运动
initkinematics(cranekin, current, 0, 1);
initkinematics(trolleykin, trolley, 0, 0);
initkinematics(grabberkin, grabber, 0);
....
//添加运动
....
Double opendtime = addkinematic(cranekin, newx,0, 0,
    gettablenum(speedtable, row, CRANE_SPEED_COL) ,
    gettablenum(speedtable, row, CRANE_ACC_COL) ,
    gettablenum(speedtable, row, CRANE_DEC_COL) ,
    0,0, starttime, KINEMATIC_TRAVEL);
.....
```

在 OnUpdateOffset 中的实现不断地更新运动过程即可，主要实现如下：

```
....
if(offsettingnow)
{
    fsnode* kinlabel = label(current, CRANE_LAB_KINEMATICS);
    updatekinematics(rank(kinlabel, 2), current);
    updatekinematics(rank(kinlabel, 3), trolley);
    updatekinematics(rank(kinlabel, 4), grabber);
}
.....
```

在 OnFinishOffset 中的实现代码与 OnUpdateOffset 的主要代码类似。

Addkinematic(...)函数的最后一个参数 KINEMATIC_TRAVEL 定义了平移的运动方式。还有其它一些参数来定义不同的功能，如 KINEMATIC_ROTATE 定义了旋转的运动方式，在第三节的模型中没有用到，如果需要可以查看帮助文档。

完成场桥对象的设计后，可使用“Add to User Library”把其加到对象库中，以方便以后的使用。在集装箱码头中，岸桥的作业特点有着许多和场桥类似的地方，所以岸桥的对象设计也可以参照场桥的运动学规律进行。

4.2.2.3 设定任务序列

在完成对象库的设置后，要设计对象间相互的关系，这就涉及到任务序列。任务序列机制是 Flexsim 环境中最核心的部分。各种复杂的仿真过程很大程度上决定于什么样的任务序列。任务序列是由 taskexecuter 执行的一组任务序列。系统有一些默认的任务序列可以满足一般的仿真工作，对于复杂的仿真，我们需

要自己定义任务序列。

这里介绍两种定制任务序列，第一种是创建最简单的、只分配给一个对象执行的任务序列；第二种是由多个对象协同作业的任务序列。

简单的任务序列使用 3 条命令就可以创立，命令执行的顺序如下：

```
createemptytasksequence(...);  
inserttask(...);  
dispatchtasksequence(...);
```

协同作业的任务序列的情况有很多，因为很多情况下需要多个运动的对象共同完成同一工作，比如场桥的协调调度。在 Flexsim 中场桥、集卡等都是可运动对象，要实现协同作业的任务序列比只对一个对象创建任务序列要复杂许多，调用的函数与前面所讲的函数不同。涉及的函数主要有：

```
createcoordinatedtasksequence(...);  
insertallocatetask(...);  
insertproxytask(...);  
insertsynctask(...);  
insertdeallocatetask(...);  
dispatchcoordinatedtasksequence(...);
```

第三节 出口箱集港过程的堆场仿真实例

针对集装箱码头仿真平台可以建立集装箱码头的主要装卸设备，实现设备装卸过程的运动规律，以及对设备运行速度的控制，最后形成集装箱码头设备对象库。对于集装箱作业的流程，可以制定集装箱的装卸搬运规则。在第二节工作的基础上，本节实现了一个简单的出口集装箱集港的例子。

仿真模拟了 4 个堆场场区，4 台场桥和若干集卡进行集港的过程。用到的运动对象包括集卡，场桥；静态对象包括场区，集港箱，闸口。模拟的流程是：当集港箱到达闸口的时候在闸口外排队等候，在进入闸口的时候安排该集装箱的集港具体堆存位置，并使得场桥在该区域做好准备。当汽车在堆场内沿着指定的车辆路线移动到指定堆存位置的过程中，场桥也在相应的区域做好准备等待装卸集装箱。如果当集卡到达指定堆存位置时场桥也处于该位置，则可马上进行搬运箱子的操作；如果集卡到达后场桥还没有就绪，则集卡在该位置等待直到场桥就绪。完成搬运后，集卡从出港路线离开，闸口外等待的集卡进入堆场，场桥准备进行下一个集装箱的搬运作业。

仿真中用到对象的参数如表 4.1 所示。

表 4.1 仿真中各对象的参数数据

对象 \ 参数	长	宽	高	贝数	贝长	层高	加速度	减速度	最大速度	容量
堆场	130	15	2	10	13	2.5	—	—	—	6层
集卡	14.5	3	3	—	—	—	1	1	3	1
集装箱	12	2.4	2.5	—	—	—	—	—	—	—
场桥—大车	12	39	20	—	—	—	0.5	0.5	2	1
场桥—小车	9	2	0.7	—	—	—	1	1	2	1
场桥—吊具	6	2.5	1	—	—	—	1	1	2	1
堆场内车辆路线(外围)	352	108	—	—	—	—	—	—	—	—

对于集卡在堆场中行使的路线，在仿真中我们采用如下的形式。在平面示意图中码头闸口在堆场的右下部分，集卡从闸口进入后按照图上箭头的指向分别到达四块场区上，场桥搬运完集装箱后，集卡再按照规定的路线离开。图中外围的红线表示线路上可以有多于一辆的集卡且允许集卡超车，内部的蓝色线表示线路上只能有一辆集卡。出口箱集港过程需要集卡和场桥相互配合，实现集卡和场桥之间的无缝衔接，否则会出现场桥等待集卡或集卡等待场桥的现象，浪费港口资源。

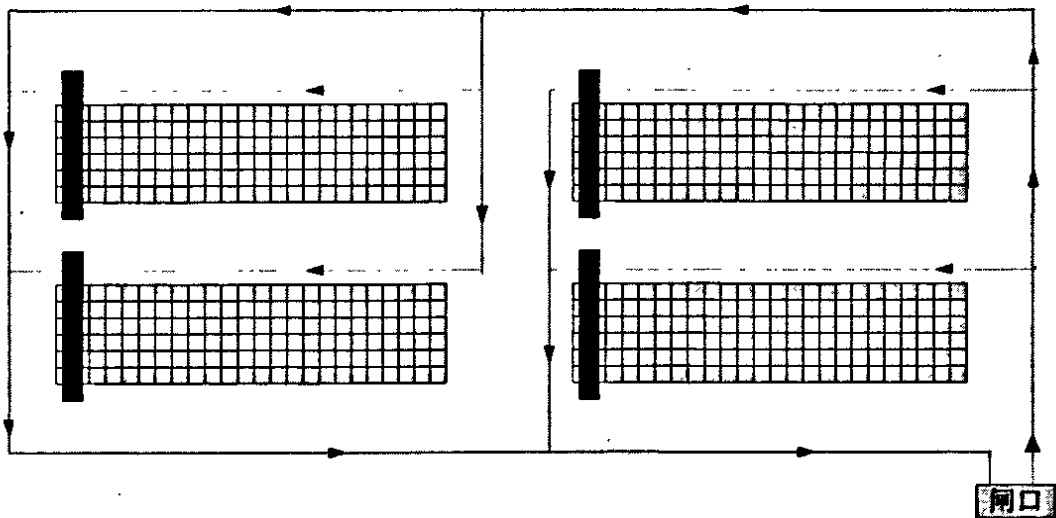


图 4.8 仿真出口集港过程中集卡在堆场内的行动路线图

在仿真中，假设每辆集卡一次运送一个集装箱，假设集装箱大小相同，装载集装箱的集卡到达闸口后在外面等候，每次允许 N 个集卡进入堆场，在通过闸口的时候随机分配堆场的场区和场区中的贝号，然后按照路径到达分配的堆存地点由场桥进行搬运操作，搬运完成后集卡按照指定的路线离开堆场，集卡离开闸口时允许等待的集卡进入。完成仿真后截图如下图 4.9 所示。

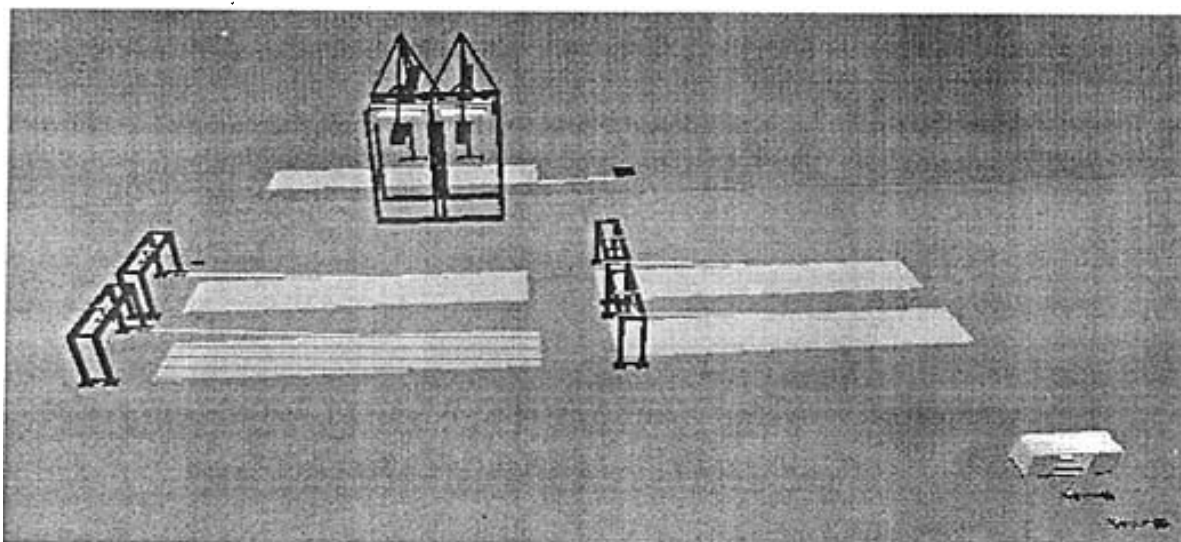


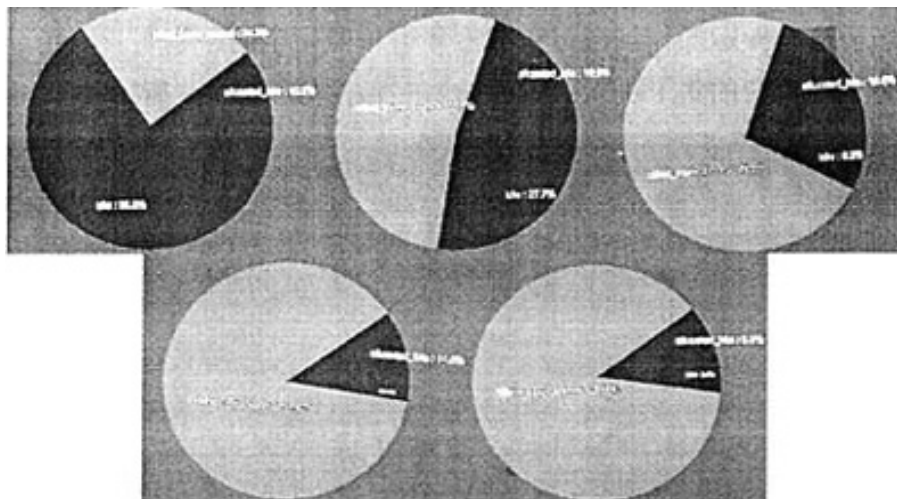
图 4.9 码头集港过程仿真图

3D 仿真的用途，除了通过 3D 仿真可以对码头堆场的操作有一个直观的了解，模拟出堆场的运行情况以外，另一个重要的功能就是数据分析。根据数据的比较对码头作业资源的配置给出合理的建议。下面应用建立的仿真通过一个简单的数据图表来分析场桥最大负荷情况下堆场内最优的集卡数量。

在集港过程中，堆场的搬运作业由场桥完成，所以场桥的使用效率决定着集港的效率。通过改变堆场内集卡 N 的数值，分析场桥的使用情况，可以得到在当前情况下堆场中最大的允许集卡的数量。这里的“当前情况”包括集卡的运动速度，集卡在场地中的路程长度，场桥的搬运效率，场区的大小，场区的多少等诸多因素的影响。

集港过程中，集卡车辆的到来服从参数为 λ 的泊松分布。在仿真中，可以调节 λ 的值来模拟集卡到达闸口的情况。首先设定 λ 为一个非常小的值，这样的含义是在集港过程中，集卡都按照集港时间到达闸口，有闸口安排集卡的进入。闸口外集卡的队列比较长。在这样的情况下，下图 4.10 中分别描绘了堆场内集卡数为 5, 9, 16, 18, 25 的情况下场桥的使用率。因为指定堆场堆位和堆位中

具体的位置是随机生成的，所以场桥使用效率只选择了一台场桥进行衡量。图象采集于仿真运行了一段时间，系统稳定以后。从左上至右下集卡数量依次为 5, 9, 16, 18, 25。



图中蓝色表示等待空闲，绿色表示场桥工作，棕红色表示场桥场区内移动

图 4.10 场桥使用率随着堆场内集卡数量变化情况图

在确定 λ 的前提下，每次改变堆场内集卡的数量 N ，运行仿真衡量场桥的工作效率。从图 4.10 中可以看出在堆场内集卡增加到 18 以前，场桥的使用率随着集卡的增加而增加。堆场内的集卡数量达到 18 以后，场桥基本上就满负荷工作，场桥的搬运能力已经成为瓶颈，再增加堆场内的集卡对于加快集港过程已经没有作用反而会因为堆场内的车辆拥堵而造成效率下降。所以得出结论在 λ 的值很小，大量集卡在闸口等待的情况下，堆场内最优的集卡数量为 18。

下面研究 λ 的值分别为 30, 80 的情况下，堆场内集卡数量的问题，在多次仿真计算后，我们得到了下面的表 4.2。

表 4.2 不同 λ 的情况下场桥使用效率比较

λ 值	集卡数量				
	5	9	16	18	25
1 (很小值)	24.2%	52.7%	72.8%	87.6%	87.4%
30	23.1%	52.5%	71.5%	80.7%	86.8%
80	22.4%	51.7%	71.8%	75.9%	82.5%

通过上面的求解可以看出，随着 λ 值的增加，即集卡的到来速度变慢，堆场中的集卡数量的增加同样导致场桥效率的提高。在其它条件相同的情况下，随

着 λ 的增加,场桥的使用效率下降,这是由于可能存在场桥等待集卡到来造成的。

在其它条件不变的条件下,通过改变堆场内的集卡数量,反复运行仿真程序比较场桥的使用效率,可以得到堆场内的最优的集卡数量。得到的结果是在模拟当前堆场的数据情况下得到的。如果需要研究其它堆场中集港时需要的最优集卡数量,需要重新设定 λ 的值,堆场、场区的大小,集卡的移动速度,集卡行驶线路等参数,这样得到的优化结果才能适合其它堆场的情况。

分析堆场内最优的集卡数量只是应用仿真进行的一个较为简单的工作。通过建立码头堆场以及全部作业流程的仿真,对集装箱码头的实际作业情况进行恰当的模拟,可以再现或预测码头的生产作业情况,为决策者提供有效的决策支持。

第五章 总结和展望

第一节 本文总结

单纯依靠增加设备投入虽然能提高集装箱的装卸速度,但显然不是最经济的方法,提高集装箱的装卸效率更为重要,因此必须合理配置集装箱码头的装卸资源,包括堆场规划、装卸机械调配等来提高效率。

首先,论文运用物流的思想来研究集装箱港口的资源配置问题。从系统的角度出发,在分析了码头资源优化配置问题的层级结构的基础上,着重解决堆场的物流搬运资源的配置问题。

其次,提出了在工作量已知且场桥效率不同情况下场桥的配置模型,在小规模问题上,用 Lingo 求得最优解;为了加快大规模问题的求解速度,研究了一种“最小未完成”的启发式算法,与模型 Lingo 求解的比较证明了算法的有效性。可以应用模型得到的结果对港口码头的实际作业提出指导。

第三,3D 仿真是仿真发展的方向,通过 3D 仿真软件 Flexsim 模拟集装箱码头作业流程。分析了 Flexsim 建模的关键技术以及这些技术在建立集装箱码头模型中的应用。在 Flexsim 仿真平台上开发出模拟码头堆场的出口集港作业流程,直观的展现出从集港箱到港到进入闸口再到运送到指定的场区接着由场桥搬运完成集港的过程,应用仿真对堆场内允许的最大集卡数量进行了优化。

第二节 未来的工作

本文第三章只是对堆场场桥资源进行了优化配置研究,得到了场桥在各个场区上的分布和作业时间的计划。而码头堆场的管理中,对于港口集装箱的堆存计划的管理也是码头生产管理一个薄弱环节。可以在充分考虑堆场中集装箱不同重量级别,在有利于安排装船多条作业线等情况下,优化集装箱的堆存位置的安排。进一步提高堆场在现有资源水平下的优化管理能力。这一问题有待于进一步的研究。

还需要对对第三章第二节的启发式算法中的参数进行系统的分析。用统计学中的方差分析(ANOVA)分析三个参数,科学的确定三个参数的最佳取值。

对第四章仿真方面的工作,进一步对数据统计和数据分析部分进行深入的研究;建立港口全面的仿真过程,充分考虑到大小箱、堆场倒箱等复杂的情况,使得仿真更加和实际贴近。完成从出口集港到装船的全过程三维仿真。

参考文献

- [1] McDowell E D, Martin G, Cho D, et al. A study of maritime container handling. Oregon: Oregon state university, sea grant college program, ads, Corvallis, 1985
- [2] Castilho B D, Daganzo C F. Handling strategies for import containers at marine terminals. *Transportation Research*, 1993, Vol. 27B, No2: 151~166
- [3] Kim K H, Kim H B. Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals. *International Journal of Production Economics*, 1999: 415~423
- [4] Murty K G, Liu J, Wan Y W, et al. DSS for operation in container shipping terminal. Working paper, University of Michigan, Ann Arbor, 2000
- [5] Kim K H, Kim H B. The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers. *Transportation Research-B*, 2002, 36: 821~835
- [6] Kim K H, Park Y M, Ryu K R. Deriving decision rules to locate export containers in container yards. *European journal of Operational Research*, 2000, 124: 89~101
- [7] Preston P, Kozan E. An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals. *Computers & Operations Research*, 2001, 28: 983~995
- [8] Cordeau J F, Gaudioso M, Laporte G, et al. Solving Berth Scheduling and Yard Management Problems at the Gioia Tauro Maritime Terminal. *Odysseus 2003 Second International Workshop on Freight Transportation and Logistics*. Mondello, Italy, 2003
- [9] Chen P, Fu Z H, Lim A. The yard allocation problem. *Eighteenth national conference on artificial intelligence*, 2002: 56~65
- [10] Bish E K. A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal. *European Journal of Operational Research*, 2003, 144(1): 83~107
- [11] Kim K H. Evaluation of the number of rehandles in container yards. *Computers & Industrial Engineering*, 1997, Vol. 32, No. 4: 701~711
- [12] Chung Y G, Randhawa S U, McDowell E D. A simulation analysis for a transtainer-based container handling facility. *Computers & Industrial Engineering*, 1988, 14(2): 113~125
- [13] Lai K 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
- [14] Kim K H, Kim H B. The optimal determination of the space requirement and the number of transfer cranes for import containers. *Computers & Industrial Engineering*, 1998, 35: 427~430
- [15] Kim K H, Kim K Y. An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals. *Transportation Science*, 1999, 33(1): 17~33
- [16] Zhang C Q. Resource planning in container storage yards: [dissertation]. The Hong Kong University of Science and Technology, 2000
- [17] Ng W C. Crane scheduling in container yards with inter-crane interference. *European Journal*

- of Operational Research, 2005, 164: 64~78
- [18] Ng W C, Mak K L. Yard crane scheduling in port container terminals. *Applied Mathematical Modeling*, 2005, 29: 263~276
- [19] Kozan E, Preston P. Genetic algorithm to schedule container transfer at multimodal terminals. *International Transaction in Operational Research*, 1999, 6: 311~328
- [20] Linn R J, Zhang C Q. A heuristic for dynamic yard crane deployment in a container terminal. *IIE Transactions*, 2003, 35: 161~174
- [21] Gambardella L M, Masterolilli M, Rizzoli A E, et al. An optimization methodology for intermodal terminal management. *Journal of intelligent manufacturing*, 2001, 12: 521~534
- [22] Zhang C Q, Wan Y W, Liu J Y. Dynamic crane deployment in container storage yards. *Transportation Research*, 2002, Part B, 6: 537~555
- [23] Zhang C Q, Wan Y W, Liu J Y. Storage space allocation in container terminals. *Transportation Research*, 2003, Part B, 37: 883~903
- [24] Kim K H, Moon K C. Berth scheduling by simulated annealing. *Transportation Research*, 2003, Part B, 37: 541~560
- [25] Sculli D, Hui C F. Three-dimensional stacking of containers. *Omega*, 1998, 16: 585~594
- [26] Taleb I M. Modeling and analysis of container storage in ports: [dissertation]. Berkeley: University of California, 1993
- [27] Duinkerken M B, Evers J J M, Ottjes J A. A simulation model for integrating quay transport and stacking policies on automated container terminals. *Proceeding of the 15th European simulation multi-conference*, 2001
- [28] Gambardella L M, Kizzoli A E, Zaffalon M. Simulation and planning of an inter modal container terminal. *Simulation*, 1998, 71(2): 107~116
- [29] Legato P, Mazza R M. Berth Planning and Resources Optimization at a Container Terminal via Discrete Event Simulation. *European Journal of Operational Research*, 2001, 133: 537~547
- [30] 沙梅. 集装箱码头工艺方案设计建模与仿真. *系统仿真学报*, 2003, 9: 38~42
- [31] Daganzo C F. The Crane Scheduling Problem. *Transportation Research*, 1989, 23(3): 159~175
- [32] Peterkofsky R I, Daganzo C F. A branch and bound solution method for the crane scheduling problem. *Transportation Research*, 1990, 24B(3): 59~172
- [33] Daganzo C F. Crane productivity and ship delay in ports. *Transportation Research Record*, 1990, 1251: 1~9
- [34] Tabernacle J B. A study of the changes in performance of quayside container cranes. *Maritime Policy and Management*, 1995, 22(2): 115~124
- [35] Linn R, Liu J, Wan Y, et al. Rubber tired gantry crane deployment for container yard operation. *Computer & Industrial Engineering*, 2003, 45: 429~442
- [36] Nevins M R. A discrete-event simulation model for seaport operations. *Simulation*, 1998,

参考文献

70(4): 213~223

- [37] 真虹. 港口生产调度优化过程. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1999
- [38] 袁福昌. 集装箱装卸搬运机械. 港口装卸杂志, 1988
- [39] 郑志虹. 堆场计划管理在集装箱码头的应用. 水运管理, 2002, 3: 28~30
- [40] 谢金星, 薛毅. 优化建模与 LINDO/LINGO 软件. 北京: 清华大学出版社, 2005

致谢

本文是在导师陈秋双教授的悉心指导下完成的。三年间，陈老师给了我很多学习和生活上的关心和指导。陈老师严谨的治学态度和孜孜不倦的敬业精神和勤奋的工作的热情为我树立了学习的榜样，并会在以后的日子里一直激励、鞭策着我，使我在以后的学习和工作中不断前进。在我的论文即将完成，即将离开学校之际，向陈老师表示衷心的感谢！

感谢涂攀生老师、贾春福老师和吴民老师，感谢他们在平时的学习生活中给我以指导。

感谢 CIMS 实验室的各位老师和同学们对我在学习和生活上的帮助。特别感谢龙磊和徐亚在学术上对我的帮助。感谢已经毕业的师兄孙鑫，赵鑫，徐海涛，陈晓宇，感谢全雄文，杨鹏，孙国华，杨茹，刘丽芸，郑小亮，杨立志等，与你们共同度过的时光我将终生难忘。在此一并感谢。

我的室友，郝建忠和陈飞，在生活上和工作上给了我很多关照，感谢你们。

感谢我的家人对我的支持和鼓励。

感谢所有帮助过我的老师、同学和朋友。

附录一 图索引

图 1.1 1998-2006 年我国港口集装箱吞吐量及占世界比重	2
图 1.2 论文内容和结构图	10
图 2.1 港口简要布局图	12
图 2.2 岸壁集装箱装卸桥实物图	15
图 2.3 整箱货货流程序图	17
图 2.4 拼箱货货流程图	17
图 2.5 集装箱港口的进口业务流程图	18
图 2.6 集装箱港口的出口业务流程图	19
图 2.7 综合策划—船舶计划	20
图 2.8 综合策划—昼夜作业计划	21
图 2.9 综合策划—昼夜场地计划	22
图 2.10 场地实时策划	23
图 2.11 码头各种计划生成过程	24
图 2.12 集装箱码头资源优化配置问题的层级结构图	26
图 3.1 天津港某码头堆场平面示意图	31
图 3.2 堆场堆位和场桥示意图	32
图 3.3 程序流程图	41
图 4.1 仿真技术研究问题的主要流程	46
图 4.2 Flexsim 家族树	47
图 4.3 ExpertFit 数据分析界面	49
图 4.4 场桥导入 3DMAX 后的外观	50
图 4.5 场桥对象的对象分解	51
图 4.6 容器空间概念的说明	52
图 4.7 场桥的参数表	53
图 4.8 仿真出口集港过程中集卡在堆场内的行动路线图	56
图 4.9 码头集港过程仿真图	57
图 4.10 场桥使用率随着堆场内集卡数量变化情况图	58