

大连理工大学

硕士学位论文

集装箱堆场物流系统规划研究

姓名：张涛

申请学位级别：硕士

专业：工业工程

指导教师：苗明

20061201

摘 要

随着全球经济一体化的发展,集装箱码头作为综合交通运输的枢纽,已成为物流供应链上一个十分重要的节点。集装箱堆场是集装箱码头物流系统的重要环节,当前在集装箱运输要求快捷化、节约化、简单化及标准化的前提下,要求集装箱堆场向自动化、无人化、快捷化方向改进。国内外经验表明,优良的集装箱堆场物流系统管理是集装箱码头生存、发展、竞争的重要因素。因此,做好集装箱堆场物流系统规划,对科学的进行码头建设项目投资,完善集装箱堆场物流系统的调度管理有着十分重要的意义。

大窑湾港区二期,三期集装箱码头是大连港重点规划发展的深水集装箱港区,未来将发展成为国际集装箱干线港和国际区域性物流中心的主要载体。本文从物流系统规划的角度对大窑湾二期,三期集装箱码头堆场进行了深入的研究,旨在优化堆场的集疏运条件,提高堆场的吞吐能力,得出物流系统最优解决方案。

本文首先对大窑湾港区二期工程集装箱堆场物流系统进行了调查分析,得出了物流系统作业流程和技术参数,并且统计分析了一作业年的历史数据,得出了建模所需要的离散分布。在系统分析和调查的基础上,针对堆场物流系统的特殊性,建立了堆场大门系统规划和堆场资源配置的数学优化模型。然后,结合二期堆场集疏运现状及未来发展趋势,本文在 Arena 仿真环境中建立了二期堆场物流系统的仿真模型。在优化运行阶段,依托仿真环境中先进的优化工具 OptQuest,结合建立的数学优化模型和统计的历史数据,对堆场大门系统规划和堆场资源配置问题进行了研究,并且给出了科学的、符合实际的仿真数据和性能参数。仿真优化后得到的结果基本符合二期堆场的实际工况。通过验证这种方法可以用于三期工程堆场物流系统规划。

本文在最后还给出了运用仿真优化得出的大窑湾港区三期工程集装箱堆场物流系统规划的总体方案,并且给出了具体的方案论证。本文所提及的研究方法,具有科学性、可重复性和可发展性,可以作为有机的整体应用于其它集装箱码头的堆场规划项目。

关键词: 集装箱堆场; 资源配置; 大门系统; 仿真优化; Arena

Study on The Logistics System Planning of Container Yard

Abstract

Along with the development of the global economy integrating, the port has become an important node of the transportation and the supply chain. Port container yard, as an important tache of the process of container transportation, is required to be automated, unmanned and shortcuted in the trend of economization, simplification and standardization in container transportation. The internal and overseas experience indicate that the advanced management of container yard logistics system will be the pivotal factor of the port. Therefore, the logistics system planning of the container yard must be paid more attention.

Dayaowan port is an important container port of Dalian, and it will be the international shipping center of the Northeast Asia area in the future. This paper chiefly introduces the logistics system planning on Dayaowan Container Yard Phase II and III . It aims to improve the throughput and optimize the collecting and distributing system of the yard. It can offer the manager the best settlement of the logistics system.

Firstly, the author investigates the actual logistics system of the Container Yard Phase II, and finds out the operation flow of the logistics system and technology parameters. One working year data is analyzed to gain the necessary discrete distributions. Considering the special status of the system, the mathematics optimization models of gate planning and yard resource allocation are built on the base of the system analization and investigation. Then, the author establishes the simulation model of Dayaowan Container Yard Phase II in Arena with regard to the development of the container terrinmal. In the optimal running, depending on the advanced optimation tool OptQuest, in relation to the mathematics optimization models and the analyzed data, the author researchs on the gate system planning and yard resource allocation and get some scientific parameters. The simulation results accord with the actual status of the Yard Phase II. They are scientific proof for the planning on Yard Phase III.

Finally, this paper introduces the total aim of the logistics system planning on Dayaowan container Yard Phase III using simulation and optimization, and also gives some practical advices. The research method of this paper is scientific, repetitive and developmental. As an organic integer, it can be used in other traffic planning projects of the port.

Key Words: Container Yard; Resource Allocation; Gate System; Simulation Optimization; Arena

硕士学位论文

集装箱堆场物流系统规划研究

Research on the Planning of Container Yard Logistics System

(辽宁省自然科学基金项目 项目编号:20062184)

作者姓名: 张 涛

学科、专业: 工业工程

学 号: 20404193

指导教师: 苗 明

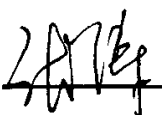
完 成 日 期: 2006 年 12 月

大连理工大学

Dalian University of Technology

独创性说明

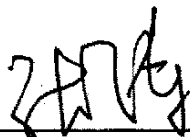
作者郑重声明：本硕士学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得大连理工大学或者其他单位的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

作者签名：  日期： 2006.12.26

大连理工大学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“大连理工大学硕士、博士学位论文版权使用规定”，同意大连理工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。本人授权大连理工大学可以将本学位论文的全部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。

作者签名：



导师签名：



06年12月26日

1 绪论

1.1 集装箱堆场物流系统规划的概念和意义

集装箱堆场物流系统是由集装箱、堆场装卸搬运设备资源、堆场空间资源、通信设施以及人员等若干相互制约的动态要素组成,具有特定功能的有机整体^[1]。集装箱堆场物流系统规划的目的就是设计合理的堆场资源配置和物流设施布局方案,找出现有堆场物流系统的瓶颈,为新码头堆场的规划提供决策支持^[2]。物流系统规划通常包括系统分析,系统建模,仿真优化,方案论证四个步骤如图 1.1 所示。

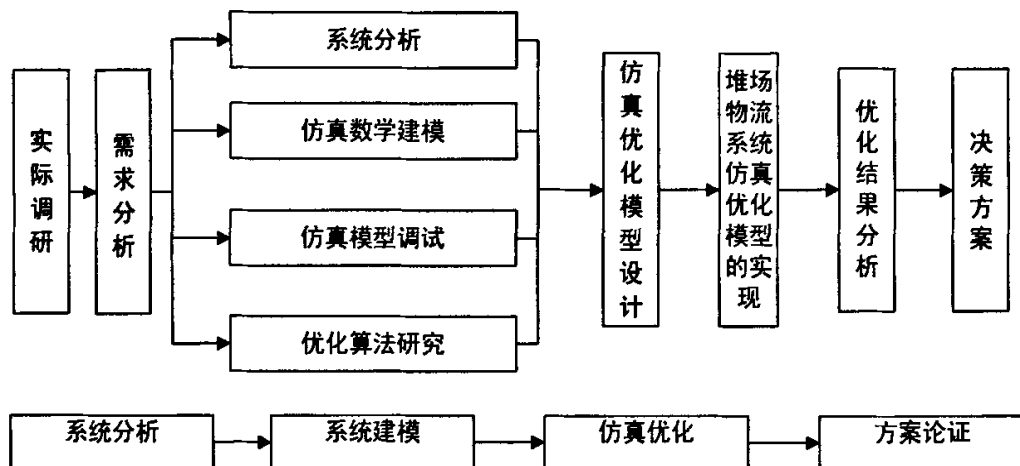


图 1.1 物流系统规划四阶段示意图

Fig.1.1 Four steps of planning on logistics system

堆场物流系统规划的理论意义: 集装箱堆场物流系统作为典型的离散事件动态系统, 是一类比较复杂的系统, 单纯地利用数学分析方法来研究有一定的局限性, 要么不能建立准确的数学模型; 要么建立了数学模型之后, 由于计算时出现的“指数爆炸”问题, 而得不到解析解^[3]。因此, 利用计算机仿真方法, 对集装箱堆场物流系统进行计算机建模, 不仅界面显示更加直观, 而且可以考虑更多随机因素的影响, 通过多次的仿真分析, 从而得到系统的各种性能统计参数, 对系统进行优化分析。

计算机仿真模型可作为观测器, 在系统运行时, 向码头客户提供有关系统过去、现在或者未来的运行信息, 以便堆场管理者能够实时做出正确决策。一方面有助于集装箱码头经营策略方案的决策, 如堆场大门规划, 堆场资源配置、堆场装卸工艺设计、堆场平面布局设计、堆场作业系统优化等; 另一方面有助于系统预测, 可以对拟议中、设计中的尚未

实现的系统的可行性做出正确的评价判断,同时为现实系统提供改进方案,通过预测能够节省大量项目投资,使港口内在的潜能得以发挥。本课题为解决类似港口物流等复杂的离散动态系统的仿真优化进行了进一步的探索和研究。

本课题的应用价值有以下方面:

(1) 在Arena仿真环境中建立堆场物流系统仿真模型,可以实时动态的显示集装箱堆场装卸作业流程,得出堆场生产能力和机械作业性能参数、堆场作业量,集装箱周转率,大门道口利用率,堆场利用率,机械设备利用率,设备故障率,设备出勤率等生产管理的数据;

(2) 在仿真模型的基础上,规划人员可以对规划中的系统进行研究,以便合理配置各有关系统元素,选定各有关要素参数的值,使得系统各个部分完全协调作业和整体效益的充分发挥,减少不必要的项目投资,得出最优物流系统解决方案,提供决策依据;

(3) 对于运营管理人员来说,他们可以对现有系统进行分析,剖析系统的运行过程,分析系统运行过程的合理性,找出系统的瓶颈,为优化系统乃至后期的调度管理提供依据。

1.2 集装箱堆场物流系统研究现状及发展趋势

1.2.1 关于堆场资源的合理配置及调度的研究

在港口集装箱物流作业过程中,堆场是码头作业中最复杂的部分,堆场的资源调配在很大程度上决定了码头的效率,在堆场管理中占有重要地位。集装箱的装卸效率的高低,直接决定了使通过港口的集装箱物流更经济、更合理,决定整个作业过程的效率。因此,对集装箱堆场装卸工艺系统进行优化,选择合适的码头装卸工艺系统是非常必要的。在设备资源的配置和调度优化方面的研究如下:

Ballis 和 Abacounkin 建立了一个包括由于设备不匹配而引起的交通堵塞和延迟的仿真模型,他们使用这个模型来评价一个码头的堆场设计、设备数量、集卡到达、运行规则^[4]。Kozan 研究过利用火车疏运集装箱的码头的吞吐量,他用启发式理论将火车分配给轨道,将起重机、叉车和跨运车分配给集装箱,通过仿真分析不同运作模式对码头集装箱作业的影响^[5]。Ebru K.Bish 还针对某集装箱港口的多个起重机受限的调度问题进行了研究,其主要成果是解决了调度的 NP 难题,开发了一种启发式的算法使每艘船的服务时间达到最小^[6]。C.Q.Zhang 用整数规划模型来研究轮胎式起重机的配置问题,以减少堆场工作的延迟,并通过拉格朗日松弛启发式算法来获得接近最佳解决方案^[7]。在国内,大连理工大学船舶 CAD 中心的林焰建立了以场桥作业时倒箱量最小为目标,运用最小生成树和启发式算法对优化模型进行求解,获得倒箱量最小的优化装船顺序^[8]。张新艳在她的博士论文中,忽略场桥的影响,用基于生物进化策略对堆场上集装箱运送顺序进行优化,实现了基于生物进化策略

的港口集装箱物流系统的优化,并实现了基于面向对象的 Petri 网的仿真模型^[9]。天津大学的杜强安教授,提出了运用循环网络模拟方法将排队论、网络计划技术、计算机模拟技术结合起来,对港口营运过程进行模拟,从而得到港口泊位、仓库等的利用情况,对具体的装卸工艺进行模拟,可以得出合理的调度管理方案^[10]。真虹通过仿真证明,岸桥集中作业时,平均单船作业时间最短,但泊位利用率低。因此,当船舶到港密度较小或码头服务能力较强时,岸桥集中作业时和均匀分配方式相比,更有助于减少船舶在港逗留时间。仿真结果显示,采用自动调配作业方式时,设备利用率最高,船舶等待时间和等待队长最短^[11]。

1.2.2 关于堆场计划及堆放策略的研究

堆场计划是对集装箱在堆场内进行装卸、搬运、贮存、保管的安排。这是为了更能经济合理地使用码头堆场和有计划的进行集装箱装卸工作而制订的。堆场计划主要内容有确定空箱、重箱的堆放位置和堆高层数;装船的集装箱应按先后到港顺序、集装箱的种类、载重的轻重分别堆放;同一货主的集装箱应尽量堆放在一起。堆放策略主要是指集装箱区域的划分。

Chun JIN 用启发式算法进行了集装箱堆场作业优化问题的研究^[12]。Kim 研究了多种数学算法和费用模型以寻找在不同标准的堆放策略^[13]。武汉理工大学物流工程学院计三有运用搜索技术提出了出口箱箱位的合理分配及减少倒箱率的合理措施,进行了集装箱堆场减少倒箱率方法的研究,重点研究了集装箱堆场物流系统的优化^[14]。Kozan 和 Preston 使用整数规划决定优化的堆放策略和相应的堆场起重机分配,以减少用于一艘船的所有起重机的最大工作时间^[15]。

1.2.3 关于集装箱堆场大门的研究

在国内外,主流的集装箱堆场都采用了智能大门,其中大多提供提放箱的优化算法,对于进场放箱要根据当前堆场策略计算出最佳的放箱位置,对于出场提箱要计算出最优的提箱作业计划,由于货主到堆场提箱,提箱的时间是随机的,事先并不能准确获知,具有不确定性。大门的通过速度在一定程度上约束了场站的作业效率,若速度较慢不但容易造成车辆拥挤,交通不畅,而且场地作业也容易处于等待状态,降低场站整体作业效率,因此有必要对提放箱优化算法的效率进行研究。

目前对集装箱码头物流系统规划方面的研究主要集中在泊位与堆场方面,堆场大门系统只是作为附属部分在研究中被涉及到。Legato 和 Mazza 描述了船只在集装箱港口的作业过程,并建立了仿真模型,以及泊位的规划与分配系统^[16]。Kim, Lee 和 Hwang 研究了外卡在集装箱堆场接受服务的作业顺序问题,对几种服务顺序分析比较^[17]。Sgouridis, Angelides 描述了卡车运载进口集装箱的作业过程并建立离散事件仿真模型进行分析^[18]。

1.2.4 问题的提出

通过总结国内外研究概况，不难看出未来集装箱堆场物流系统的研究发展趋势有以下方面：

(1) 堆场大门运营环节研究

在各环节的局部研究中，对堆场—道口环节研究较少，而对该环节的研究也十分重要。因为它不仅可以确定集装箱码头堆场的道口数量，而且可以准确获得堆场机械的配置数量，从而更加准确地获得集装箱码头机械系统的配机比例，因为作为堆场作业的起始点，智能道口自动识别进入堆场箱区的集卡信息和进入堆场箱区的箱号信息，进而实现将进入堆场箱区的集卡车号及装载的箱号信息反馈提交码头生产管理系统，最后根据堆场箱区业务协调系统，指示集卡在堆场的作业目的地。

(2) 堆场物流系统管理研究

为提高港口集装箱物流的主要竞争力，如高效装卸，最短泊港时间，个性化服务实现物流装备与过程自动化和物流管理与控制数字化是很有效的措施。这主要在于集装箱堆放策略规划系统，集装箱堆场仓储管理系统，堆场集装箱卡车交通流的设计及堆场图形化操作管理系统的开发实现。

(3) 机械全场自动调度系统

实现工艺创新，突破作业路的概念。降低集卡空驶率。确保作业平衡。实现就近作业原则，提高生产效率。满足优先作业原则，确保重点作业。实现堆场作业量，集装箱周转率，道口利用率，堆场利用率，后场机械效率，设备故障率，设备出勤率等堆场生产指标的统计评价。

(4) 集装箱堆场资源优化配置研究

利用计算机仿真，整合场桥等主要装卸设备，堆存空间资源和集卡来研究堆场资源置，得出最优资源配置模式的问题已成为提高堆场装卸效率和作业能力的关键所在。应用仿真优化理论对装卸资源的配置规划提供决策支持，通过参数调整，灵活地运用集中与分散等堆场堆存策略，解决在生产过程中遇到的堆场瓶颈问题，提高堆场吞吐能力，改善堆场的集疏运条件。

1.3 大窑湾港区集装箱码头概况及发展展望

大窑湾港区是作为上世纪国家重点项目建设的大连港长远发展的新港区，是大连港规划发展的深水集装箱港区。大窑湾港区二期、三期装箱码头工程如图 1.2。大窑湾港区二期集装箱码头工程目前正在建设，二期工程是为了适应港口集装箱运输发展的需要，继一期工程之后建设的大型深水码头群。二期工程位于一期工程西北侧，东与一期工程 10#泊位相

接。南面是正在建设的大连保税物流园区，二期工程建设内容包括：泊位水深在 14-16 米的 11#-16#大型深水集装箱泊位 6 个，及所有配套的生产、生活辅助设施，管理设施及口岸查验设施。二期工程总设计能力为 280 万 TEU，预计全部工程于 2007 年建成。其中 11#、12#泊位 2005 年建成投产，已组建由中远、马士基等大型航运公司参股的合资公司，筹备经营。

大窑湾港区三期集装箱码头工程是大窑湾南岸港区继二期工程后继续建设的大型深水码头群。三期工程位于正在建设的二期工程西侧，三期工程南临港二号路和将建设的铁路中心站场。三期工程将由大连港和中海航运企业合资合作建设经营，已经开工建设，共建设 6 个 14-16 米水深的 17#-22#大型集装箱泊位及所有生产、生活辅助设施，三期工程要求 2010 年前建成，建成后总通过能力 300 万 TEU。大连国际物流园区工程位于二期工程南侧，占地 1.83 平方公里，目前已正式封关运作。其功能主要有国际中转、国际配送、国际采购和国际转口贸易四大功能。从功能上说，大窑湾所在的大孤山半岛正在向物流半岛发展，大窑湾及周围岸线水域正在向大型深水港口群发展^[19]。大窑湾港区远景规划图参见附录 A。

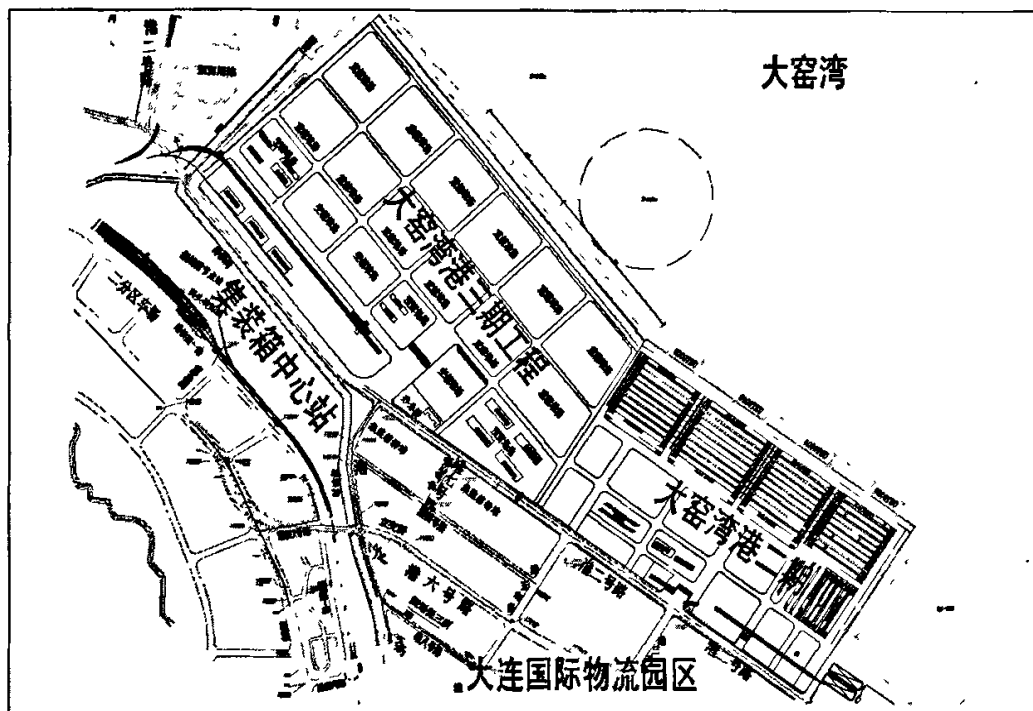


图 1.2 大窑湾港区二期、三期集装箱码头位置图

Fig.1.2 The position of Dayaowan container terminal Phase II and III

1.4 课题的研究背景与研究内容

大连市人民政府对大窑湾集装箱码头物流系统规划项目十分重视，委托大连口岸物流科技有限公司负责进行这个项目。大连理工大学物流研发中心与大连口岸物流科技有限公司合作开发物流决策支持系统，组织了大量的人力物力，共同参与了整个项目的运作与实施。正是在这样的背景下，本课题着手对大窑湾港区二期、三期集装箱码头堆场进行研究，目的即在掌握和分析现状的基础上，进行二期集装箱堆场物流系统评价、规划，更为重点的是，根据现有采集数据和建立的仿真优化模型，完成港区三期工程的堆场物流系统规划，给出物流系统最佳解决方案。

本课题结合复杂系统分析与离散事件动态系统仿真优化技术，基于实际项目，研究港口集装箱堆场物流系统仿真优化方法，对集装箱堆场物流系统的规划与优化分析进行了以下研究：

(1) 集装箱堆场物流系统调查。通过现场调研，明确堆场物流系统的运作情况，明确基本性能参数，统计分析现状年的历史数据，获得建模必须的离散分布和系统参数。

(2) 复杂的离散事件动态系统分析。研究集装箱堆场物流系统的组成和布局、特点和装卸工艺的选择和机械作业原则之后，与实际业务流程结合找出最优的集装箱堆场的工作流程及相关参数。

(3) 集装箱堆场物流系统分析方法。基于离散事件动态系统的研究方法，运用排队网络理论对集装箱堆场大门规划和堆场资源配置问题进行研究，建立相应的数学模型。

(4) 集装箱堆场物流系统仿真。运用 Arena 系统仿真软件，对集装箱堆场的整个生产作业系统进行仿真并实现计算机动画模拟，可以实时动态地显示集装箱堆场的作业过程，并能得到相应的生产性能统计参数。

(5) 系统优化分析。对采集的数据进行数理分析后输入仿真模型，利用集装箱堆场的设计指标参数，运用仿真环境中的优化工具 OptQuest，结合建立的数学模型，对仿真模型进行优化。在此基础之上，分别研究堆场大门的规划，堆场资源的优化配置、堆场作业规则优化、不同工况对堆场作业的影响，以及堆场的极限作业能力和瓶颈分析等问题。

2 集装箱堆场物流系统

2.1 集装箱堆场的基本组成和布局

堆场大门系统为堆场物流系统的一个子功能模块，在外卡进场作业时，需要大门为其提供一个作业成本最低的作业计划。大门的通过速度在一定程度上约束了场站的作业效率，若速度较慢不但容易造成交通不畅，而且场地作业也容易处于等待状态，降低场站整体作业效率，也提高了作业成本。各提箱送箱指令清单都在自动化大门系统办理。

集装箱码头主要包括岸壁、前沿、集装箱堆场、集装箱货运站、指挥塔、维修车间、大门等固定设施。集装箱专用码头堆场主要设备有轮胎式门式起重机、轨道式门式起重机、集装箱半挂车、集装箱牵引车、正面吊、叉车^[20,21]。图 2.1 为集装箱码头堆场布置图。

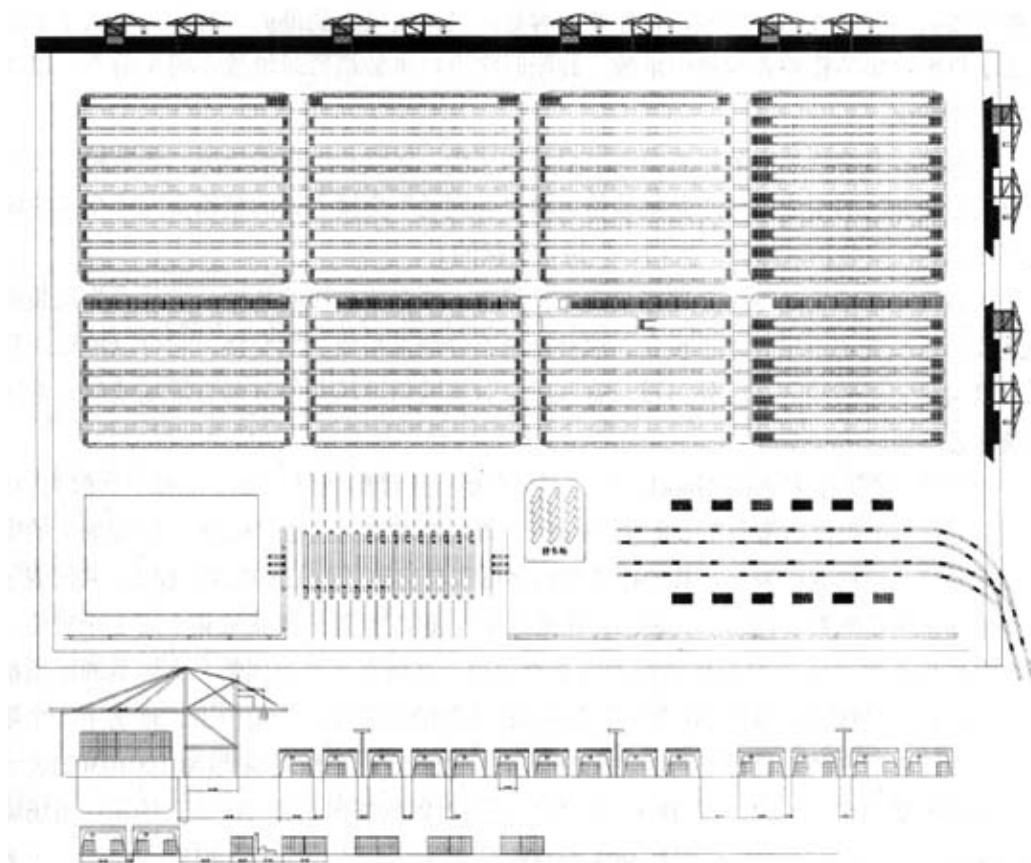


图 2.1 大窑湾集装箱码头二期工程堆场布置图

Fig.2.1 Plane layout of Dayaowan container yard Phase II

2.1.1 集装箱堆场空间资源

集装箱堆场是供装卸船舶堆放集装箱的场所，同时也是临时保管和向货主交接集装箱的地方。在堆场上对集装箱进行分区分类堆放，并按照集装箱的规格尺寸，在堆场上划出“箱位”线，标明号码。尽管业务模式的差异使得各类堆场场站的服务功能不尽相同，但所有业务功能都是在堆场核心服务功能之上发展而来，因此他们的关键业务基本一致，堆场的主要业务工作是办理集装箱的装卸、转运、装箱、拆箱、收发、交接保管、堆存、捆扎、掏载、搬运、以及承揽货源等，此外，还受理集装箱的修理、冲洗、熏蒸和有关衡量等工作^[27]。

港口集装箱堆场通常被分为三个部分：集装箱前方堆场（marshalling yard）、集装箱后方堆场（container yard）、空箱堆场（van pool）。

集装箱前方堆场是指在靠近集装箱码头前沿处，为加速船舶装卸作业，暂时堆放集装箱船直接装卸的集装箱的场地。其作业内容是：当集装箱船到港前，有计划有次序地按积载要求将出口集装箱整齐地集中堆放，卸船时将进口集装箱暂时堆放在码头前方，以加速船舶装卸作业。

集装箱后方堆场是集装箱重箱或空箱进行交接、保管和堆存的场所。集装箱后方堆场是集装箱装卸区的组成部分。是集装箱运输“场到场”交接方式的整箱货办理交接的场所（实际上是在集装箱装卸区“大门口”进行交接的）。

集装箱空箱堆场是专门办理空箱收集、保管、堆存或交接的场地。它是专为集装箱装卸区或转运站堆场不足时才予设立。这种堆场不办理重箱或货物交接。它可以单独经营，也可以由集装箱装卸区在区外另设。有些国家对集装箱堆场并不分前方堆场或后方堆场，而统称为堆场。

一般地，堆场由多个街（block）组成，每个街有连续的贝位（bay）组成（一般为40-60个贝位），每个贝位通常包括6-8行（row）。堆场的堆高为层数（tier）。在堆场上的街贝行层都通过一定的编码表示，其中街通常由字母和自然数（A01,A02,B01,B02）共同表示，贝行层通常由自然数（1,2,3...）表示。在堆场中，通常20英尺的集装箱占用1个贝位，其所在贝号为奇数，40英尺的集装箱占用2个贝位，其所在贝号为偶数。大多数的堆场都不允许集装箱混贝放置，即把20英尺的箱和40英尺的箱放在同一贝位上。堆场中每个箱位都可以通过其所在的街贝行层的编码来唯一确定。如给定一个堆场编码（A010010302）表示该箱位的位置是A01街001贝03行02层，而且可以判断出这是20英尺的箱；堆场编码（B030060504）表示该箱位的位置是B03街006贝05行04层，而且是40英尺的箱。大多数集装箱堆场按功能划分为不同的区域，例如空箱堆存区、拆装箱区、制冷区、残箱区、修

箱区、重箱堆存区、暂存区等，每个堆场区域有相邻的横向的街组成。这样便于场桥移动和减少场桥占用集卡作业线时间。堆场堆放示意图如图 2.2 所示。

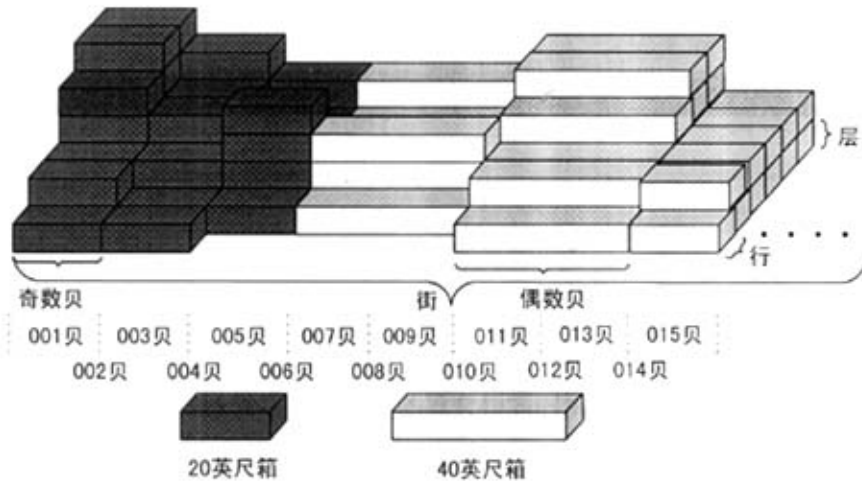


图 2.2 堆场堆放示意图

Fig.2.2 Schematic drawing of terminal stacking

2.1.2 堆场大门概述

大门是集装箱码头的出入口，通过大门交接集装箱、集装箱货物和集装箱货物的各种单据。大门是场站系统管理中最关键的环节之一，是很多场站操作得以顺利进行的前提之一。其管理的核心是对集装箱和货物进出场站进行高效，准确的控制。大门的工作主要是：控制车辆进出场；对于进场的集装箱检查箱体是否完好，若有破损则需要录入破损记录；录入进场车辆和货物信息；对出场的货物和集装箱进行核对；打印入站操作条；打印出场货物交接单等。

堆场自动化大门的主要作业流程如下：

(1) 进场箱作业

对进场的集装箱通过大门时，由地秤自动测定其重量，根据该重量和运输的目的地，靠计算机确定后方堆场内该集装箱应该放置的箱位位置，然后由大门交给卡车司机一张带有箱位号码的门票（slip），卡车司机必须按指示的计划把集装箱放在指定的箱位上。

(2) 出场箱作业

承运人从堆场提取集装重箱时，空卡车到达大门，提交提货单给大门，计算机确定提货单内指定的集装箱的箱位位置，计算最优提箱计划，然后由大门交给卡车司机一张带有

箱位号码的门票，卡车司机必须按指示的计划到指定的箱位位置提取集装箱，提取集装箱后，卡车到大门处经审查放行离开堆场。提空箱一般根据单证上的要求与大门已存信息进行发箱。

2.2 集装箱堆场装卸工艺

2.2.1 集装箱的分类

(1) 按规格尺寸分，目前国际上通常使用的干货柜(DRYCONTAINER)有 20 英尺集装箱、40 英尺集装箱，别外还有应用范围不太广泛的 45 英尺集装箱。本文研究内容主要针对 20 英尺和 40 英尺箱，一般称 20 英尺箱为标箱。

(2) 按总重分有 30 吨集装箱、20 吨集装箱、10 吨集装箱、5 吨集装箱、2.5 吨集装箱等。

(3) 按用途分有干货集装箱、冷冻集装箱(REEFER CONTAINER)、挂衣集装箱(DRESS HANGER CONTAINER)、开顶集装箱(OPENTOP CONTAINER)、框架集装箱(FLAT RACK CONTAINER)、罐式集装箱(TANK CONTAINER)等。

2.2.2 集装箱堆场设备资源

港口集装箱堆场设备资源主要包括底盘车、跨运车、叉车、集装箱卡车、轮胎式门式起重机、轨道式门式起重机，其中一些设备类型可同时用于车辆的装卸作业。

(1) 底盘车 (Chassis)

集装箱堆场的底盘车堆存方式是指将集装箱连同起运输集装箱作用的底盘车一起存放在堆场上，是集卡的拖挂部分。这种堆存方式机动性最大，但是集装箱堆存高度只有一层，而且需要留有较宽的车辆通道，因此需要占用较大的堆场面积，使堆场面积利用率较低。

(2) 跨运车 (Straddle carrier)

跨运车简称跨车，是一种具有搬运、堆垛、换装等多功能的集装箱专用设备。跨运车承担码头前沿与堆场之间的集装箱水平运输。

(3) 集装箱卡车 (Truck)

集装箱卡车简称集卡，包括内卡和外卡，内卡主要是用于堆场和泊位之间的水平运输，而外卡主要来于外围市区经堆场大门到达堆场。内卡一般有集装箱牵引车和集装箱半挂车的形式。

(4) 门式起重机 (Transtainer)

门式起重机简称门式吊或场桥，是一种在集装箱场地上进行集装箱堆垛和车辆装卸的设备。门式起重机有轮胎式和轨道式两种型式。

①轮胎式门式起重机(Rubber-tired transtainer): 轮胎式门式起重机主要特点是机动灵活、通用性强, 可从一个堆场转向另一个堆场进行作业。

②轨道式门式起重机(Railmounted transtainer): 轨道式门式起重机是集装箱码头堆场上进行装卸、搬运和堆垛作业的一种专用设备。一般比轮胎式场桥跨度大, 堆垛层数多。轨道式门式起重机易实现全自动化装卸, 只能限制在所设轨道的某一场地范围内进行作业。

(5) 集装箱叉车(Container forklift)

集装箱叉车是集装箱码头上常用的一种装卸机械, 主要用于吞吐量不大的综合性码头上进行集装箱的装卸、堆垛、短距离的搬运和车辆的装卸作业, 也有用于大型集装箱码头堆场的辅助作业。叉车的通用性强, 可适用于多货种作业, 多用于空箱作业, 设备价格较便宜, 装卸成本较低。

(6) 正面吊(Front-handling mobile crane)

正面吊是一种目前在集装箱码头堆场上得到越来越频繁使用的专用设备。堆箱层数较高, 且可以为多排跨集装箱作业, 可以堆存 3-4 层重箱或 7-9 层空箱, 因此场地利用率较高, 灵活性强, 但是需要占用较宽的通道。

2.2.3 堆场装卸工艺

(1) 集装箱堆场装卸作业

堆场作业的主要方式主要有地盘车方式、跨运车方式、轮胎式门式起重机方式、轨道式门式起重机方式等, 目前最具代表性的是后两种。轮胎式门式起重机方式是当前世界范围内应用最多的一种模式, 使用经验成熟, 无论大小港口使用都比较满意。近几年国内新建及在建的几个大型集装箱码头, 如青岛前湾三期工程、上海外高桥二、三、四期工程、大连大窑湾港区一期工程、宁波北仑三、四期工程以及深圳的几个码头采用这种方式^[19]。

轨道场桥方式是随着箱量的增加和计算机管理水平的提高而出现的一种堆存方式, 在国外有所应用。国内沿海集装箱码头只有烟台港三期集装箱码头采用。

(2) 水平运输

堆场作业采用跨运车的码头基本上还是利用跨运车进行水平运输。其余大多数港口的水平运输是用集装箱牵引车半拖挂车, 为了减少流量, 有些港口采用了成列拖挂车组或拖挂车上装两层箱的方式, 近几年在鹿特丹港还采用自动导向车系统, 可以达到全自动运行。

2.2.4 堆场物流系统事实表示

在堆场的信息管理系统中, 堆场物流系统主要涉及三类事实: 贝属性事实、堆场堆存状态事实、在场箱信息事实。

(1) 贝属性事实指的是堆场中所有贝的自然属性和堆放集装箱的原则的相关定义。包括街名、贝号、最大行数、最大层数、作业模式、作业起始行、作业方向、轻重原则，各属性描述如下：

作业模式。设备在堆场中贝进行作业时的作业方向。包括从小行到大行作业、从大行到小行作业、从中间到两边作业。

作业起始行。当设备从中间到两边作业时，中间行作为划分两边的依据。范围为从 1 行到最大行，取值为 1 行表示从小行到大行作业，取值为最大行号表示从大行到小行作业。

作业方向。设备优先堆放集装箱的方向。取值为优先堆放大行或优先堆放小行。

轻重原则。同一贝同一行的堆垛上堆放集装箱时，上下集装箱堆码的轻重放置原则。取值为重压轻（轻箱在下）或轻压重（重箱在下）。

(2) 堆场堆存状态事实指的是堆场中每个位置的放置状态，位置的状态包括：空位置、已放箱箱号、预分配、封存四种情况。

(3) 在场箱信息事实指当前在场箱的基本信息，包括箱号、尺寸、箱型、空重、重量、目的港、货主、箱公司、运输方式，进出港时间。

事实存放于堆场数据库管理系统中，它们均以关系表的形式存储。如表 2.1、表 2.2、表 2.3 所示，贝属性事实、堆场堆存状态事实和在场箱信息事实，对仿真输入数据的统计和整理较为关键，在规划前的数据统计统计工作中就从大连港大窑湾二期工程的管理系统中调出数据处理统计。

表 2.1 贝属性事实表示

Tab.2.1 Fact Description of Bay Attribute

街号	贝号	最大行数	最大层数	作业模式	作业起始行	作业方向	轻重原则
A01	001	6	5	小到大	1	先大行	重压轻
B01	003	4	4	大到小	4	先小行	轻压重
A02	005	6	5	中间	2	先大行	重压轻

表 2.2 在场箱信息事实表示

Tab.2.2 Fact Depiction of Container Information on a Dtask

箱号	尺寸	箱型	空重	状态	堆场位置	拖车	作业设备	卸船时间	入港时间
WHLU 4084124	20	GP	空	ST	1D 030390400202	连港 B149	TT33	2006-4-20 15:34:05	——
POCU 0289852	40	FR	重	EX	1D 030390400101	PM60	TT37	——	2006-4-20 12:56:02

表 2.3 堆场堆存状态事实表示
Tab.2.3 Fact Depiction of Stack Storing Status

街号	贝号	行号	层号	状态
A01	001	4	2	空位置
A01	003	4	1	T01
A01	005	6	3	预分配
A02	005	6	3	封存

2.3 集装箱堆场资源配置规则

2.3.1 堆场大门调度规则

自动化大门的自动分配箱位问题就是依照堆场管理的各种原则为要进场集装箱分配一个最优落箱箱位，使得随机到达的集装箱的堆垛符合重量等级堆码要求，方便装船作业，同时降低堆场作业的成本。

进场集装箱到达自动化大门时，自动化大门自动分配落箱箱位的作业流程为：


- (1) 集卡到达大门，大门记录集装箱属性信息；
- (2) 大门侧的堆场作业计划系统调用自动分配箱位作业计划算法，得到最优目标箱位；
- (3) 系统打印操作条，给集卡司机；
- (4) 集卡司机按操作条指示到指定位置；
- (5) 设备操作员按操作条指示进行放箱作业，把目标箱放到堆场中；
- (6) 集卡离开堆场。

重车是指载有集装箱的外卡车，空车指没有装载集装箱的外卡车，重车入港接受入口通道服务，把载有的集装箱卸至堆场，变为空车接受出口通道服务，然后离开港口；空车作业与重车相似，不同在于空车在堆场装载集装箱，然后重车离港。如果通道繁忙，外卡将在通道前产生等待队列。通道提供服务时间用随机分布函数表示。此外，由于重车和空车在入口通道接受服务的时间是不相同，所以分别考虑。

2.3.2 堆场计划的概念和规则

对于要装船的集装箱进入堆场后，需要为其分配堆场中的临时放置箱位等待装船，船舱配载对集装箱重量等级有一定的要求。理想情况下，堆场中集装箱按照配载图摆放，设备可以依次将集装箱放入船中。然而，载入期内不同重量等级的集装箱到港时间是随机的，产生完全符合装船配载要求的箱位分配结果较困难^[22]。而通过等待全部集装箱到达后重新分配位置来产生完全符合配载要求的集装箱堆场的方法，由于堆场面积有限，很难给到达

同一目的港的同类箱组划出完整连续的区域堆放，也难以给到达箱预留缓冲区空间，试图累积到一定数量后重新优化堆垛设计，而且从成本角度考虑这样做也是不经济的。


收箱计划表

航线: 东南亚																																							
船名: 柏青																																							
航次: 0245																																							
箱量: 20X109																																							
40X49																																							
45X																																							
入港时间: 22日 13: 00-23日 16: 00																																							

卸货港	干货箱										危险品																										
	20	40	40HC	45	20	40																															
HLI	58	2	4	12																																	
REC	58	2	20	4	13																																
MNS	13	2	1	4																																	
		2																																			

01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40

01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40

堆码要求:

- 1、此船不施加反偷渡封
- 2、重箱三层堆码, 空箱四层堆码.
- 3、冷藏箱场位在A11, 002贝至30贝, 超箱体场位在A10, 002贝至31贝.
- 4、此计划在实际操作过程中将根据现场实际情况做相应的更改.

图 2.3 堆场计划示意图
Fig.2.3 Sketch of yard scheme

大量统计资料表明，大多数港口船舶的到达服从泊松分布，本模型的作业计划和船舶到达有关，当船舶信息通过 EDI 传到码头时，码头就做出堆场作业计划，样例如图所示。在这里，堆场作业计划时间间隔就可以看成类似于船舶到港时间间隔分布，在 t 时段内到达 n 个作业计划的概率为

$$p_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad n = 0, 1, \dots \quad (2.1)$$

式中 λ 为单位时间内平均到港作业计划个数。

令第 i 作业计划到达的时刻为 t_i ($i=1, 2, \dots$)， $t_0 = 0$ ，并令 $\tau_i = t_i - t_{i-1}$ ，则作业计划到达间隔 τ_i 是相互独立、相同分布的，其分布函数为负指数分布

$$A_0(t) = P(T \geq t) = e^{-\lambda t}, t > 0 \quad (2.2)$$

式中 $\lambda = 1/T$ ， T 的数学期望和方差为

$$E[T] = \frac{1}{\lambda}, \text{var}[T] = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.3)$$

在同一批作业计划中，每辆集卡到堆场的时间间隔基本上是均匀的，服从标准正态分布。一般每个作业计划的装卸量是不同的，但是装卸量分布不是连续的，而是集中在几个离散数值附件。在作业计划中，装卸量（TEU）分布为正态分布，其概率密度

$$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2} \quad 0 < x < \infty \tag{2.4}$$

式中， μ 和 σ 分别为箱量 x 的均值和方差。装卸量的概率分布函数为

$$F(x)=P(X > x)=\int_0^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2} d_x \quad 0 < x < \infty \tag{2.5}$$

在本文研究的仿真建模中采用数理统计的方式，对大窑湾集装箱码头二期堆场 2005 年 9 月到 2006 年 9 月一作业年的实际数据统计出模型需要输入的堆场计划随机分布，文中称这一作业年为现状年。图 2.3 大窑湾二期集装箱堆场的收箱的堆场计划表^[25]。

2.3.3 堆场设备资源配置规则

目前大窑湾集装箱码头二期堆场还正在建设中，只发挥了正常作业能力的一半，投入使用的 36 条街配置了 21 台轮胎式门式起重机。由于场桥工作路径的特殊性，为避免场桥行程上的冲突，每条街允许配置的最大场桥数是 3 个。场桥大车速度为 30m/min，小车速度为 240m/min，集卡速度为 20km/h。堆场各主干道为双向四车道，各街之间为单向双车道。总体运行外卡为顺时针绕行，内卡为逆时针绕行。

表 2.4 三种设备作业方式比较
Tab.2.4 Comparison of Operation Mode of Three Operation Equipment

设备类型	正面吊	场桥	叉车
作业方式	可以跨箱作业	直上直下作业	单侧作业
描述	正面吊作业能力通常表示为跨 x 行 y 层是指正面吊最大可以水平方向跨 x 行，垂直方向最高作业 y 层	场桥作业能力通常表示为堆 y 过 $y+1$ ，是指场桥最高可以提着箱从第 $y+1$ 层通过，箱子最高在第 y 层堆放。落箱分配箱位时，只要不超过场桥作业能力的最大高度和贝的属性中规定的最大层数，可以自上而下落在贝内任意位置；提箱时若存在倒箱则只需倒走目标箱上面压着的箱子即可	只能在街的边侧作业，不可跨箱，而且只能直上直下作业。因此要存目标箱的外侧和上面的所有箱移走；落箱时只能放到最外侧且最上面的位置

设备配置规则指的是设备作业时应当遵循设备本身特点的基本原则，主要包括设备初始位置、设备类型、作业能力和设备堆放顺序。三种类型的设备（场桥、正面吊、叉车）

的作业能力和堆放顺序各不相同。设备位置是指设备在堆场中的街贝号，作业能力包括：设备作业的最大高度和宽度。堆放顺序模板包括：模板宽度、模板高度、模板中每一位置的作业顺序号。三种设备由于其机械特点，其作业方式比较如表 3.1 所示。

2.4 集装箱堆场设计指标及经验数据计算

2.4.1 主要设计参数

大窑湾集装箱码头三期堆场的主要设计参数有以下几个方面：

(1) 三期堆场设计年吞吐量，对应总平面布置方案一为 300 万 TEU，对应总平面布置方案二为 350 万 TEU；

(2) 堆场年营运天数 360d；

(3) 港口生产不平衡系数：1.2；

(4) 各种箱所占比例：重箱：72%，空箱 28%，冷藏箱占重箱量：7%，拆装箱占总箱量 7.5%，其中公路 70%，铁路 30%；

(5) 20' 箱占总箱量的比例：37.5%；

(6) 集装箱在堆场的平均堆存期：普通重箱：10d，空箱 7d，冷藏箱 4d，拆装箱中的货物：3d；

(7) 货物入堆场百分比：100%；

(8) 集装箱集疏运比例：公路 87.57%，铁路 12.57%。

2.4.2 大门通道数量计算

大门通道数量规划采用的经验公式^[23]如式(2.6)

$$N = \frac{Q_h (1 - K_b) K_{bv}}{T_{yk} T_d P_d q_c} \quad (2.6)$$

上式中：

N ——集装箱大门所需车道数；

Q_h ——集装箱码头年运量 (TEU)；

K_b ——水运和铁路的集装箱占码头年运量的百分比 (%)；

K_{bv} ——集装箱车辆到港不平衡系数；

P_d ——单车道每小时通过车辆数 (辆/h)；

q_c ——车辆平均载箱量；

T_{yk} ——大门年作业天数 (d)；

T_d ——大门日工作时间 (h)；

根据大连港务局设计院和口岸物流科技有限公司提供的大窑湾集装箱码头经验数据，集装箱码头年运量取三期设计运量 300 万 TEU，水运和铁路的集装箱占码头年运量的百分比，取 10%，集装箱车辆到港不平衡系数，取 2.5，单车道每小时通过车辆数，取 40 辆/h，车辆平均载箱量，取 1.45，大门年作业天数取 360d，大门日工作时间，取 18h，代入公式 2.6 计算三期堆场大门需要 23 个车道。

2.4.3 堆场平面布局

(1) 堆场容量的计算采用的经验公式^[23] 如式(2.7)

$$E_y = \frac{Q_h t_{dc} K_{bk}}{T_{yk}} \quad (2.7)$$

$$N_s = \frac{E_y}{N_l A_s}$$

上式中：

E_y ——集装箱堆场容量 (TEU)；

Q_h ——集装箱码头年运量 (TEU)；

t_{dc} ——到港集装箱平均堆存期 (d)；

K_{bk} ——堆场集装箱不平衡系数；

T_{yk} ——集装箱堆场年工作天数；

N_s ——集装箱码头堆场所需地面箱位数 (TEU)；

N_l ——堆场设备堆箱层数；

A_s ——堆场容量利用率 (%)。

根据大连港务局设计院和口岸物流科技有限公司提供的大窑湾集装箱码头经验数据，三期堆场的通过能力为 300 万 TEU，到港集装箱平均堆存期，空箱、重箱均为 10d，冷藏箱 4d 堆场集装箱不平衡系数，取 1.2，集装箱堆场年工作天数，取 360d，堆场设备堆箱层数，普通重箱 5 层，空箱位 6 层，冷藏箱 4 层，堆场容量利用率取 65%，计算得各类箱所需地面箱位数分配为：普通重箱 20603/24037TEU，冷藏箱 840/980TEU、空箱 7179/8376TEU。

(2) 集装箱拆装箱所需容量及面积的计算采用的经验公式^[23]如式(2.8)和如式(2.9)

$$E_w = \frac{Q_h K_c q_t K_{bw} t_{dc}}{T_{yk}} \quad (2.8)$$

上式中：

Q_h ——集装箱码头年运量 (TEU)；

E_w ——拆装箱所需容量 (TEU)；

K_c ——拆装箱比例 (%)；

q_i ——标准箱平举货物重量；

K_{bw} ——拆装箱货物不平衡系数；

t_{dc} ——货物在库平均堆存期 (d)；

T_{yk} ——拆装箱年工作天数 (d)；

$$A = \frac{E_w}{qK_k} \quad (2.9)$$

A ——仓库总面积 (m^2)；

q ——单位有效面积货物堆存量 (t/m^2)；

K_k ——仓库面积利用率 (%)。

根据大连港务局设计院和口岸物流科技有限公司提供的大窑湾集装箱码头经验数据，集装箱码头年运量为 300 万 TEU，拆装箱比例取 25%，标准箱平举货物重量：8t/TEU，拆装箱货物不平衡系数，取 1.2，货物在库平均堆存期取 3d，拆装箱年工作天数，取 360d，单位有效面积货物堆存量，取 $1t/m^2$ ，仓库面积利用率，取 60%，代入公式 2.8 和 2.9 计算集装箱拆装箱所需容量 18514.3/21600t，其中公路 12960/15120t，铁路 5554.3/6480t，所需面积 30857/36000 m^2 ，其中公路 21600/25200 m^2 ，铁路 9257/10800 m^2 。

3 离散事件动态系统仿真优化理论在堆场物流系统规划中的应用

3.1 离散事件动态系统的概念

离散事件动态系统^[24],是在当今世界一大批高新技术发展的推动下形成和发展起来的,本质上属于人造系统的范畴,简称为 DEDS。在这类系统中,对系统行为进程起决定作用的是一批离散事件,而不是连续变量,所遵循的是一些人为规则,而不是物理学定律。离散事件是指 DEDS 中发生在离散时刻的事件或行为,发生时刻取决于这一时刻前系统行为的深化过程。堆场的“集卡到达”和“集卡离开”就是一些典型的离散事件。在 DEDS 中,一个离散事件的发生驱动系统状态发生变化,同时还会按照系统的运行规则在系统中激发新的离散事件,从而形成系统状态的演化过程。比如,“集卡到达”事件会改变堆场箱位的状态及触发各种装卸运输机械工作,而装卸运输机械工作又会改变堆场、大门的状态。事件持续传递和变换,演绎着堆场物流系统的动态行为。由此可见,堆场物流系统是典型的离散事件动态系统。

3.2 离散事件动态系统仿真原理

3.2.1 基本原理和建模方法

离散事件建模中使用一套术语来描述模型:实体、属性、活动、状态、事件、进程及队列^[25]。在堆场物流系统中,实体主要有集卡,集装箱;事件主要是接受大门通道和场桥等主要资源的服务;状态包括集装箱搬运,堆存等;进程包括集卡到达大门、到达堆场和离开堆场。队列主要有集装箱堆场大门的排队,堆场各主干道上的排队,各条街等待场桥等设备装卸的集卡排队。

在给定的准则下,从诸多可选方案中寻求一个最优的规划方案通常是一个组合优化问题,往往具有层次性、多组合性、动态性以及多约束条件等特点。在规模较小时,此类问题可用传统的运筹学方法如分支定界法、动态规划等方法求得最优解,求解时计算相对复杂,而随着问题规模的增大,求解的复杂度也将呈指数增长,因此利用传统的运筹学优化方法显得无能为力。人工智能方法成为了近年来解决多约束、多规则的复杂优化问题的首选,从第一章介绍的国内外研究现状中可以看出,目前的研究多集中在启发式算法、遗传算法,也有一部分运用专业仿真软件建立了物流系统仿真模型,但是未能对系统作进一步的优化。现采用系统仿真优化方法,来解决堆场大门系统规划和堆场资源配置问题。

集装箱堆场物流系统是典型的离散事件动态系统,到目前为止,研究人员对离散动态系统的建模、分析等方面的研究取得了很大进展。离散系统的建模方法主要有:排队网络

法、Petri网络法、面向对象技术等^[25]。离散系统的建模方法在港口作业研究中也得到广泛应用。本文用离散系统仿真对集装箱堆场物流系统进行模拟。该离散系统仿真的模型建立，是在分析堆场装卸工艺、堆场的生产和现代化管理的基础上，主要根据随机发生的离散事件、代表系统中所描述主要对象的实体流以及仿真时钟的推进机制，按照堆场的作业流程来建立模型。

3.2.2 随机数产生和随机变量生成^[26]

(1) 蒙特卡罗法(Monte-Carlo)

Monte-Carlo法也称统计实验法或随机抽样(Random Sampling)法，主要用于研究不确定性过程。其基本思想是：针对要求解的数学、物理工程技术及生产管理等方面的问题，首先建立一个该问题的概率模型，确定问题解的指标；然后通过对模型或过程的抽样试验或观察，来计算解的统计特征，给出解的近似值和它的精度。Monte-Carl法的思想又可以描述为：当试验次数充分多时，某一事件出现的频率近似于该事件发生的概率，即 $n/N=p$ （当 N 充分大时）式中 p 是某一事件发生的概率； N 是试验次数； n 是在 N 次试验中该事件出现的次数。当所求解的问题是某种事件发生的概率或某一随机变量的数学期望，或其他数字特征时，通过实验方法可以得到该事件发生的样本频率或样本均值等；当试验次数足够多时，通过统计推断，可以获得样本参数代表总体参数的置信度或置信区间。对于复杂的随机系统，很难建立数学模型，或即使建立了数学模型，也很难用解析的方法对模型求解，或为了简化模型而需作过多的假设。从而影响模型对系统的代表性时，采用Monte-Carlo方法，对系统进行必要的试验，求得系统的近似解或一定置信度下的解，是实际工作中一个相对较好的办法。

(2) 伪随机数算法

随机数生成的研究已有很长的历史。随着计算机的广泛应用，利用计算机来生成随机数。目前在计算机生成随机数的方法中，人们越来越趋向于一类使用最广发展较快的方法是数学方法，它具有节省内存、计算速度快和便于复算的优点。用数学方法生成随机数是按照一定的算法(递推公式)来生成随机数列。用户只需任意给定一个初始值(种子值)，当调用该算法时，即可按确定的关系算出下一个随机数。随后，以新生成的随机数来做第二个种子值，在计算出新的随机数。多次调用该算法即可生成一个“随机”数序列，以提供系统仿真的需要。这种用算法生成的随机数，只要给定初始的种子值，则以后所生成的“随机”数都是确定的值，从本质上说并不具有真正的随机性，因此称之为伪随机数。到目前为止已发表了个各种各样的随机数发生器，一个品质优良的随机发生器应当具备如下特征：

① 生成的随机数流要具有均匀总体随机样本的统计性质，如分布的均匀性，抽样的随机性，数列间的独立性等；

② 生成的随机数流要有足够长的周期，以满足仿真计算的需要；

③ 生成随机数流的速度快，占用计算机的内存少，具有完全可重复性。

目前在离散系统仿真中应用广泛的随机数发生器包括：线性同余发生器、陶斯沃斯发生器、组合发生器。组合发生器是把两个独立的发生器以某种方式组合在一起生成随机数，希望能够产生周期更长、性能更优的随机数。

3.2.3 堆场物流系统主要随机变量和随机分布

堆场物流系统的随机变量和随机分布是建立仿真模型的基础，在建模之前要做好这些数据准备，这样才能在仿真器中运用伪随机数算法生成随机数，建立的仿真模型才能更好地描述现实系统。

(1) 堆场系统的随机变量和随机分布如表 3.1。

表 3.1 堆场系统的变量和随机分布
Tab.3.1 Distribution and variable of yard system

所属表	内容具体描述
堆场平面布局参数	大门到各个街的距离
	每条街的具体长度
	各个街的贝数
	对应各个街的箱的码放层数
	每五个或者六个贝的容量（最大堆存量）
集卡的固有参数	空车到达分布及参数（大门端）
	空车到达分布及参数（泊位端）
	重车到达分布及参数（大门端）
	重车到达分布及参数（泊位端）
	堆场中集卡的行进速度
场桥的固有参数	场桥大车速度
	场桥小车速度
	场桥的设备故障率
集装箱的固有参数	普通箱最大堆存期/天
	普通箱堆存期随机分布
	特殊箱最大堆存期/天
	特殊箱堆存期或随机分布
	到港箱量分布
	离港箱量分布
	各种箱型所占的比例

(2) 堆场大门系统的随机变量和随机分布如表 3.2。

表 3.2 堆场大门系统的变量和随机分布

Tab.3.2 Distribution and variable of yard gate system

数据项	数据项的具体描述
空车到达时间分布	空车到达大门的分布情况
重车到达时间分布	重车到达大门的分布情况
重车入口通道服务时间分布	重车在入口通道接受服务的时间分布情况
空车入口通道服务时间分布	空车在入口通道接受服务的时间分布情况
卡车出口通道服务时间分布	卡车（包括重车与空车）在出口通道接受服务的时间分布情况
堆场\停车场服务时间分布	卡车在堆场\停车场接受服务的时间分布情况
卡车在各通道制动延迟时间	卡车在通道前、后停车、启动车辆的延迟时间
Schedule 表的 Arrive Rate 的缩放比例	规划的实体到达数量与给定的历史数据车辆到达数量的比例

3.3 仿真优化方法

3.3.1 启发式算法

启发式算法由于能够提供一个较好的搜索方向，实际计算性能较好，广泛应用于各种领域^[3,25]。在人工智能领域，主要研究启发式算法的普遍适用性，而其他学科主要针对具体问题提出启发式算法。现代优化算法涉及生物进化、人工智能、数学和物理科学、神经系统等概念，都是以一定直观基础而构造的启发式算法。

启发式搜索方法就是利用问题本身的特性信息（启发信息）来指导搜索前进的方向，其基本思想是：在搜索的每一步都按照启发式信息 $f(n)$ 的大小对 OPEN 表中的所有节点进行排序，最佳的节点排在最前面，因此称为最佳优先搜索法。这种方法找到的路径接近于最佳。通常把用来描述待扩展节点在问题求解中的重要性的函数称为评估函数，记为 $f(n)$ ，表示为：

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (3.1)$$

其中， $g(n)$ 表示从初始节点 S 到节点 n 的实际代价， $h(n)$ 表示从 n 经最佳路径到目标节点 S_g 的估计代价，称为启发函数。启发函数的选择在决定搜索算法的启发能力中起着关键作用。 $h(n) \equiv 0$ 时算法类似于广度优先搜索算法，虽然保证了算法的可纳性，但搜索效率较低， $h(n)$ 接近于 $h^*(n)$ 时，所需要扩展的节点越少，其中 $h^*(n)$ 为从节点 n 到目标节点集合的最小代价。算法的可纳性是指只要从初始节点到目标节点的路径存在，就一定能找到一条最佳路径。当 $h(n)$ 等于 $h^*(n)$ 上较低约束的最高可能值时，则所需要扩展的节点最少，并能保持算法的可纳性。当 $h(n)$ 大于 $h^*(n)$ 时，所需要扩展的节点就大为减少，但这时不能保证发现最佳路径。

3.3.2 优化算法简介

常规的优化算法包括：线性规划、动态规划、分支定界法以及树搜索法等。目前，用来解决复杂系统的组合优化问题的启发式优化算法主要有^[3]：模拟退火法（SA）、禁忌搜索法（Tabu）、神经网络法以及遗传算法等。这些算法都是基于问题空间的随机搜索的方法，易于解决组合优化问题。但是由于被研究问题本身的特点，常常不可能搜索整个问题空间，因此，不可能所有的算法都能保证得到问题的最优解。启发式优化算法主要包括：

（1）模拟退火法。将组合优化问题与统计力学的热平衡问题类比，另辟了求解组合优化问题新途径。通过模拟退火过程，可找到全局（或近似）最优解。对于模拟退火方法，可以根据设定的初始温度，如果目标函数与临近的点相连，算法可以找到这个点，否则，以一定的概率减小温度来得出最优解。该算法的缺点是，太快的降温过程容易产生局部最优解。

（2）禁忌搜索法。禁忌搜索法也叫 Tabu 算法，它的重要思想是标记已经得到的局部最优解感求解的过程，并在进一步的迭代中避开这些局部最优解或求解的过程^[3]。它是一种迭代方法，开始于一个初始可行解 S ，然后移动到邻域 $N(S)$ 中最好解 S ，然后从新的开始点重复此法。为避免死循环，禁忌搜索把最近进行的 T 个移动（ T 可固定也可变化）放在一个称作 tabulist 的表中，在目前的迭代中这些移动是被禁止的，在一定数目的迭代后又被释放出来。这样的 tabulist 是一个循环表，它被循环修改，最后定义一个停止准则终止算法。由于 tabulist 的限制，使其在搜索中可能跳出局部极小。

（3）神经网络法。Hopfield神经网络模型的提出为求解各种有约束优化问题开辟了一条新途径，Hopfield网络解决JSP问题就是其在组合优化问题中的最成功的应用之一。其主要思路是通过一个Lyaplmov能量函数构造网络的极值，当网络迭代收敛时，能量函数达到极小，使与能量函数对应的目标函数得到优化。

（4）遗传算法。基本思想是一种基于进化论优胜劣汰、自然选择、适者生存和物种遗传思想的随机优化搜索算法，通过群体的进化来进行全局性优化搜索^[9]。GA 能够成功解决的优化设计问题，在所有的优化算法中，GA 提供了最大的“黑箱”方法，并且对目标函数的要求不高。GA 可以用来解决黑箱优化问题，适合解决仿真领域的优化问题，特别是当仿真的参数越大时，越容易求得全局最优解。

3.4 堆场物流系统排队网络分析

排队网络是由若干个服务中心按一定的网络结构所组成的一个系统^[27]。排队网络可按其所拥有的服务中心的个数加以分类，当排队网络只拥有一个服务中心时，相应地称其为单一服务中心模型。这种模型是一类最简单和最基本的排队网络，是研究更为复杂形式的

排队网络的基础。与DEDS的其它类型的模型相比，排队网络模型的优点是能够考虑系统中的各种随机因素，并能较为细致地描述系统内部的各种复杂关系。基于排队网络模型，易于从概率和统计的角度分析和优化DEDS的过程性能。

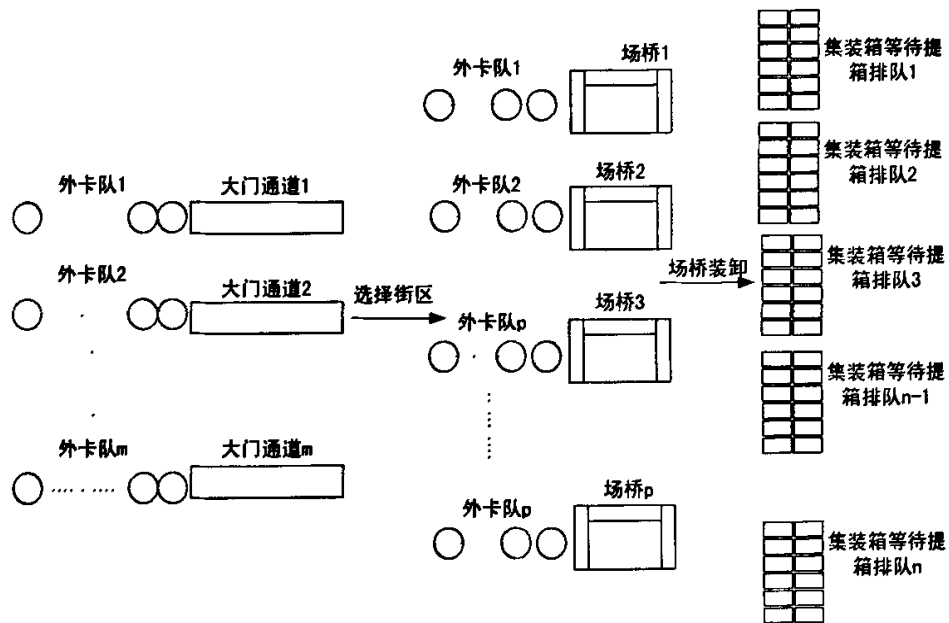


图 3.1 堆场外卡作业多级排队网络

Fig.3.1 Queue network of yard truck operation

堆场物流系统多级排队网络如图3.1。在排队网络中，“顾客”和“服务中心”已经抽掉了具体实体含义的一般性术语，对于不同的实体系统有着不同的含义。例如，在集装箱堆场的仿真系统中顾客和服务中心对应地表示为“等待作业的集卡”和“堆场集装箱装卸点”，而服务则指的是堆场机械对集卡的装卸作业。堆场物流系统的排队主要有集装箱堆场大门的排队，堆场各主干道上的排队，各条街等待场桥等设备装卸的集卡排队。集卡在堆场桥下的排队服务过程是一个典型的多路排队多通路服务的排队系统。

4 基于 Arena 的集装箱堆场大门系统规划

4.1 建立大门系统仿真模型的意义

大门系统的操作性能对于提高整个堆场的服务质量起着非常重要的作用。通过对集装箱堆场大门操作系统的规划不仅可以减少它的建设费用而且可以减少卡车在通道的服务时间,从而提高堆场服务性能。大门是整个堆场系统的咽喉,且与堆场一同建立数学优化模型就变成了多目标优化,在 Arena 环境中实现多目标优化很困难的,而且从作业流程上把大门分离出来也是合理的,正是基于这些考虑,把堆场大门作为一个子系统。下面运用仿真优化方法研究集装箱堆场大门系统的规划问题。

4.2 系统仿真软件 Arena 简介^[28,29]

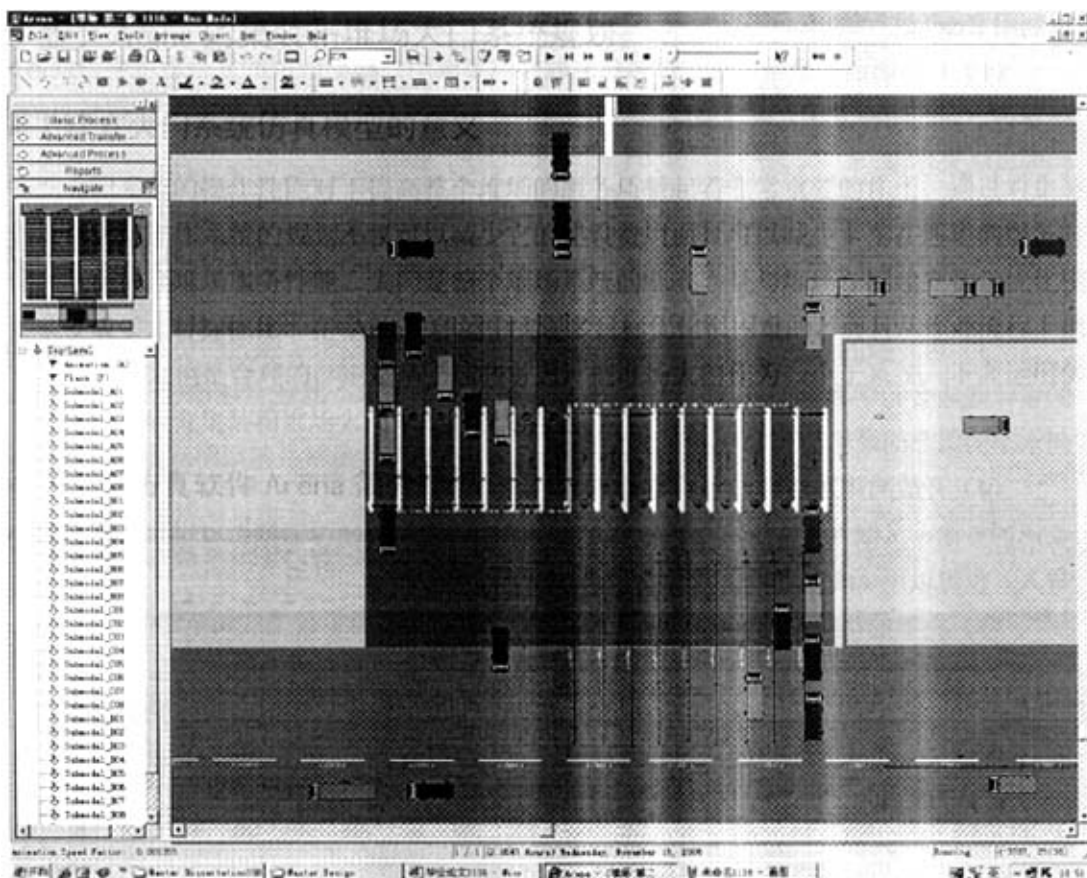


图 4.1 Arena 堆场大门系统仿真界面

Fig.4.1 Simulation interface of yard gate system based on Arena

本研究应用的仿真环境 Arena10.0, 是由 Rockwell 公司开发的面向过程的仿真软件包。它是基于面向对象思想和结构化建模概念的可视化交互集成仿真环境, 主要用于离散事件系统的仿真优化。在国外广泛运用于生产制造, 过程重组, 通信网络领域, 近几年国内部分高校也有引进应用。

Arena 具有输入输出分析器、车间计划进度生成、仿真动画显示功能, 由于简化了编程的过程, 管理和决策人员只要拖动功能模块并连结, 就可以建立仿真的模型, 而且交互性较好, 画面优美, 因此颇受用户的欢迎。Arena 模块共有五个层次。COMMON 是最高层次, 具有最常用的模块功能。SUPPORT 模块是低一级的层次, TRANSFER 模块主要进行运输和物料处理方面的仿真, BLOCKS 模块主要用于停留可延迟等方面的仿真, ELEME NTS 模块是最低层次的模块, 可以利用它进行二次开发。此外, 可以利用 VBA 和 C/C++语言与 Arena 进行接口运算, 结合优化工具 OptQuest 完成流程的优化算法。最后的仿真结果, 可以利用 Excel 进行输出。

(1) 自然协调的建模方法。许多仿真软件包要求用户根据应用的复杂程度学习或者应用各种不同的建模方法, 很容易混淆不清。Arena 不论模型简单或复杂, 都可以用常见的流程图风格来建模。

(2) 可扩张性和用户化。Arena 标准开放的体系结构让用户界面和应用富有创造性。如果一个企业应用仿真技术趋于成熟, Arena 的专业版为创建自己的客户仿真工具提供了发展平台。

(3) 可升级的体系结构。Arena 在自然图形界面下, 提供了强大的仿真软件。Arena 的设计既适合初学者的需求, 又可以满足最高级用户的需求, 既适合建模程序, 也适合任何水平的用户的经验。

(4) 开放的体系结构。为了提高仿真价值和现有的信息资产, Arena 产品提供嵌入的灵活的界面, 又嵌入 VB 应用程序来创建客户界面。比如, 模型的数据可以直接的从 Excel 导入, 也可以用 Arena 的电子数据表数据界面方便的导入。

(5) 完整的仿真工程支持。Arena 提供了一整套完整的工具来从始至终的支持仿真工程, 包括输入数据的统计分析, 观察如何处理工作、与其他系统沟通的动画, 帮助统计对比仿真运行结果并做出决策的输出分析工具, 为选中的情节自动决定最优答案的优化能力等。

4.3 大门系统的作业流程

集装箱堆场大门系统的布局与作业流程如图 4.2 所示, 它包括若干个入口通道和出口通

道。载有集装箱的重车到达堆场大门，如果入口通道空闲，则接受服务，否则排队等待直到有通道空闲；然后运行至集装箱堆场卸载集装箱，之后空车运行至出口通道，如通道空闲则接受服务，否则排队等待直到有通道空闲；服务完毕后，离开大门。到达大门的空车作业过程与重车相似，不同之处在于在堆场装载集装箱，然后重车离开大门。

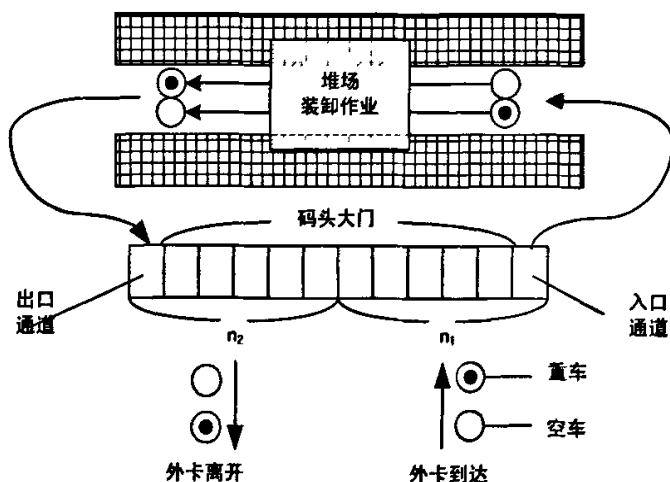


图 4.2 堆场大门系统的布局及作业流程图

Fig.4.2 Operation Mode and layout Diagram of yard gate

4.4 大门系统数学优化模型的建立

4.4.1 大门规划模型的目标函数构造

大门系统规划目标是在满足码头大门系统作业要求的前提下，优化大门入口通道及出口通道数量，最小化大门建设总费用，决策变量组成的向量 X 如式 4.1 所示：

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \quad (4.1)$$

其中：变量 x_1 , x_2 分别表示大门入口通道及出口通道数量； x_3 , x_4 分别表示重车与空车在入口通道接受服务时间的分布函数 $f_1(t)$, $f_2(t)$ 的数学期望值； x_5 表示车辆在出口通道接受服务时间的分布函数 $f_3(t)$ 的数学期望值，这里运用变量 x_3 , x_4 , x_5 表示卡车车辆在大门接受服务时通道的服务效率，本文考虑的影响大门通道服务效率的主要因素为卡车接受通道服务的时间。

大门系统规划的目标函数如式 4.2 所示：

$$\min f(X) = C_1 x_1 + C_2 x_2 \quad (4.2)$$

其中, $f(X)$ 为大门系统建设的总费用; C_1 , C_2 分别表示单个入口通道与出口通道建设总费用, 主要包括土木工程、通道基础设备及其它辅助设施的投资等。

4.4.2 大门规划模型的约束条件构造

大门规划模型的约束条件包括:

(1) 集装箱码头大门系统的年作业量 Q 应等于给定的码头吞吐量 Q_n , 即:

$$Q = Q_n \quad (4.3)$$

(2) 大门入口通道与出口通道的利用率 $\rho_{\text{入口}}$, $\rho_{\text{出口}}$ 应在给定的通道利用率范围 $[\rho_{\min}, \rho_{\max}]$ 内:

$$\rho_{\text{入口min}} \leq \rho_{\text{入口}} \leq \rho_{\text{入口max}} \quad (4.4)$$

$$\rho_{\text{出口min}} \leq \rho_{\text{出口}} \leq \rho_{\text{出口max}} \quad (4.5)$$

(3) 码头最多可建造的大门通道的总数为 N_m :

$$2 \leq x_1 + x_2 \leq N_m, 1 \leq x_1 \leq N_m, 1 \leq x_2 \leq N_m \quad (4.2)$$

(4) 大门入口通道与出口通道最大排队队长 $L_{\text{入口}}$ 、 $L_{\text{出口}}$ 不超过允许的最大排队长度

$L_{\text{入口max}}$ 、 $L_{\text{出口max}}$:

$$L_{\text{入口}} \leq L_{\text{入口max}} \quad (4.6)$$

$$L_{\text{出口}} \leq L_{\text{出口max}} \quad (4.7)$$

(5) 单通道的建设费用与通道的服务效率之间的关系如式(9)和(10)所示:

$$C_1 = g(x_3, x_4) \quad (4.8)$$

$$C_2 = h(x_5) \quad (4.9)$$

式中, 函数 $g(x_3, x_4)$ 和 $h(x_5)$ 为离散函数, 分别用来计算单个入口通道与单个出口通道的建设费用, 通道的建设费用与通道的服务效率有关。

4.5 堆场大门规划仿真模型的建立

4.5.1 大门逻辑流程分析

集装箱堆场大门系统的作业过程是典型的动态多级排队系统。基于排队网络^[26]的大门系统仿真模型如图 4.3 所示, 排队过程的要素包括:

(1) 到达过程: 到达的重车与空车视为顾客, 顾客源是无限的, 且单个到达, 到达是随机事件, 采用随机分布表示;

(2) 排队规则：如服务台被占用顾客就进入队列等待，队列为单队列，服务规则为先到先服务（FIFO）；

(3) 服务过程：大门入口通道、集装箱堆场、出口通道视为服务台，是三级串联的形式，各服务台每次服务一位顾客，服务时间是随机的。

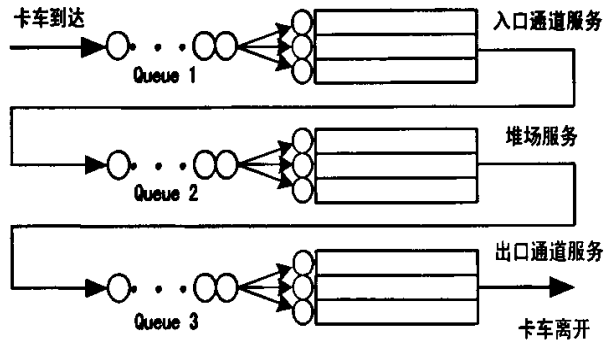


图 4.3 基于排队论的堆场大门系统仿真模型

Fig.4.3 Simulation model of yard gate based on queue theory

顾客到达入口通道（一级服务台），如果有通道空闲则接受服务，否则进入队列 Queue1 按预定排队规则进行排队等待，服务完毕的顾客，进入集装箱堆场（二级服务台）进行装卸服务，装卸完毕后运行至出口通道（三级服务台），如果通道空闲则接受服务，否则进入队列 Queue 3 按预定排队规则进行排队等待，服务完毕后，顾客离开码头大门，实体退出整个服务系统，整个大门系统服务完毕。

大门仿真模型考虑的其它前提因素包括：

- (1) 大门通道每工作日作业时间长度 T_d ；
- (2) 大门通道年工作天数 T_{yd} ；
- (3) 重车与空车在入口通道接受服务的时间是不同的；
- (4) 重车与空车在出口通道接受服务的时间相同；
- (5) 堆场大门模型中集装箱堆场作业不作详细分析

4.5.2 系统主要参数及统计分布

大窑湾二期集装箱堆场堆场大门系统的主要参数如表 4.1 所示。通过对历史数据的统计分析，得出现状年（2005 年 9 月到 2006 年 9 月）二期大门集装箱作业量分布如图 4.4 所示，集装箱数量单位为 TEU。集装箱到达高峰的月份内每天集装箱到达分布情况如图 4.5 所示，该月内某高峰作业工作日每小时外卡到达分布情况如图 4.6 所示。

表 4.1 大门系统主要参数

Tab.4.1 the main parameter of yard gate

参数	参数值	参数	参数值
Q_n (10^3 TEU)	2,800	N_m (lane)	20
ρ_{min} (%)	20	$L_{入口max}$ (number)	5
ρ_{max} (%)	90	$L_{出口max}$ (number)	5
C_1 (10^3 RMB)	1450	T_d (hour)	24
C_2 (10^3 RMB)	1150	T_{y*} (day)	360

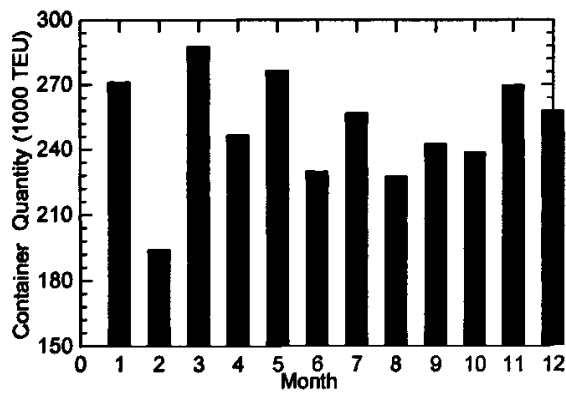


图 4.4 现状年二期大门集装箱作业量分布图

Fig.4.4 Distribution of Phase II Gate container operation volume of the current year

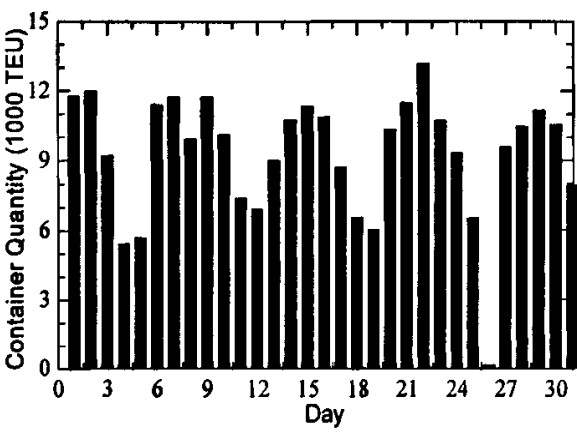


图 4.5 高峰月的二期大门集装箱作业量分布图

Fig.4.5 Distribution of Phase II Gate container operation volume of the max month

大门通道服务时间分布函数 $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$ 服从正态分布函数, 如表 4.2 所示, 参数 μ 、 σ 分别表示正态分布的均值及方差, 分布函数值变化范围为 $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$ 。

外卡在集装箱堆场的装卸时间分布采用经验分布函数 $f_4(t)$, 如式 (4.10) 所示。

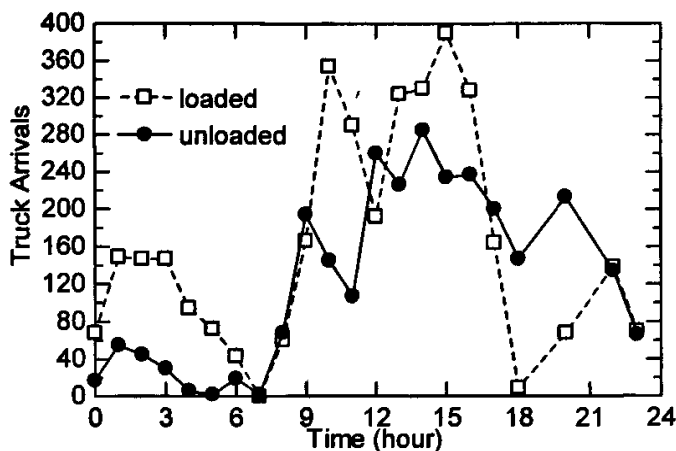
$$f_4(t)=\text{DISC}((0.9,9),(0.95,21),(0.99,36),(1,60)) \quad (4.10)$$


图 4.6 高峰作业日的外卡到达数量分布图

Fig.4.6 Distribution of truck of the max day

表 4.2 大门通道服务时间分布函数

Tab.4.2 Distribution function of gate lane service time

分布函数	分布函数类型	单位	参数	
			μ	σ
$f_1(t)$	Normal	秒	40	4
$f_2(t)$	Normal	秒	30	4
$f_3(t)$	Normal	秒	20	4

$f_4(t)$ 由四组数字组成, 每组由两个数字组成, 分别表示累加的百分比与平均服务时间。例如: 第二组数据(0.95,21)表示一辆卡车在堆场接受服务的平均时间长度为 21 分钟的概率为 5%(0.95- 0.9 = 0.05)。

4.5.3 Arena 环境下数据输入

通过对历史数据的统计分析, 得出不同时间段的入港车辆随时间变化的车辆数量。根据这些数据利用 Create 模块来产生实体, 主要依据 Create 模块实体到达的时间间隔设置为

Schedule, 提箱作业车到达的时间表为 Schd_empin, 送箱作业车到达的时间表为 Schd_fullin, Schedule 形式设为 Arrival。由于 Schedule 的每个时间段即 Duration 内的 value 值指的是每小时的 Arrival rate 的, 所以在下面的表中到达的车量都转化为每天每小时的数量来输入。每个 Schedule 表对应 30 列数据, 每列数据表示每天每小时到达的卡车数量。送箱作业车到达的时间表具体设置如图 4.7。

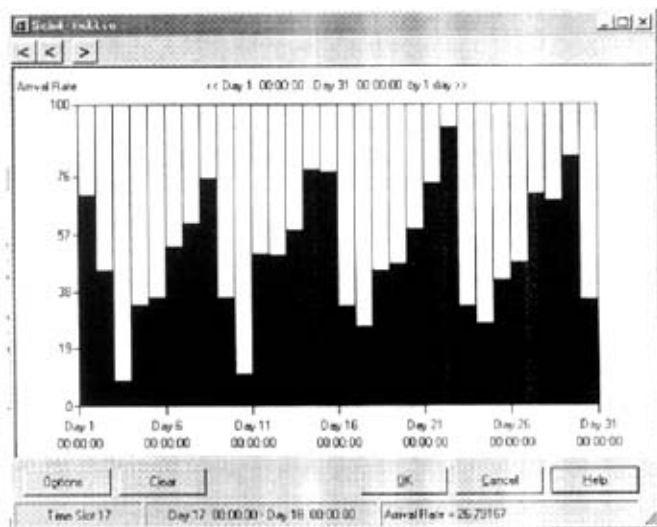


图 4.7 外卡到达分布输入属性文件

Fig.4.7 Truck Arrival file settings

4.6 堆场大门系统模型验证

运用可视化的仿真软件Arena建立仿真模型, 大门系统的逻辑模块相对简单。为了验证该模型, 取某天的每个小时内实际到达的车辆数量与仿真输出的该天内每小时接受大门服务的车辆情况进行了比较, 比较结果如图4.8, 表4.3给出了模型输出结果与实际数据的比较。可见, 该仿真模型是有效的, 能够反映码头大门作业系统的实际情况。在模型上结合建立的大门系统规划的数学模型, 运用OptQuest优化工具对系统进一步优化求解, 获得规划方案。

表 4.3 模型输出结果与实际数据比较

Tab.4.3 Comparison of the simulation result and actual data

参数		实际数据	模拟数据	误差率
外卡平均在港时间(分钟)		32.0	30.8	3.7 %
大门平均利用率(%)	ρ_1	17.80	16.63	6.5 %
	ρ_2	12.96	12.12	6.5 %

表4.3 (续)

外卡平均待时(秒)	入口	6.0	5.8	3.3 %
	出口	3.0	2.8	6.6 %
大门作业车量(辆)	重车	349	349	0.0 %
	空车	239	241	0.8 %
入口通道服务时间(秒)	重车	46.3 ± 5.9	42.9 ± 6.8	7.3 %
	空车	34.3 ± 5.5	32.4 ± 5.6	5.5 %
出口通道服务时间(秒)	外卡	27.7 ± 4.9	25.4 ± 4.6	8.3 %

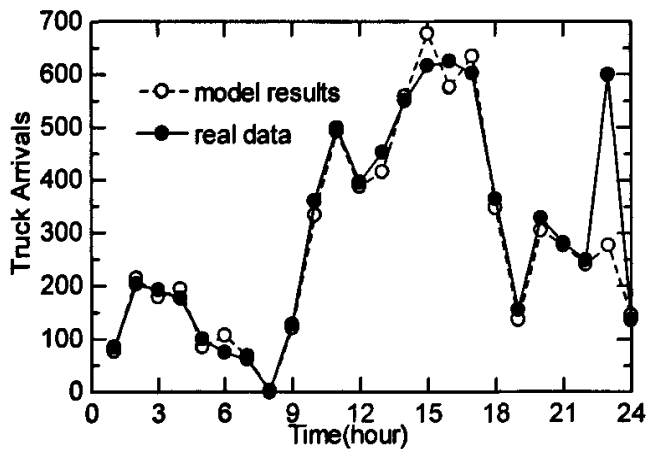


图 4.8 仿真输出结果与实际数据比较

Fig.4.8 Comparison: of simulation results and the actual data

4.6.1 堆场大门系统优化参数设置

本研究采用 Arena 的优化器 OptQuest 作为优化工具结合仿真模型对大门规划模型进行求解。运用第三章介绍的 Tabu 优化算法和仿真方法对大门规划模型进行求解。优化方法使用 Arena 集成的 OptQuest 优化器来实现, 根据规划问题的目标函数及约束条件, 结合大门规划仿真模型的输出, 对 OptQuest 进行相应的设置。OptQuest 是基于 Tabu 算法的^[28,30]运用仿真优化方法规划大门系统, 其原理如图 4.9 所示。优化问题的决策变量 X 作为大门规划模型的输入参数, 通过 OptQuest 对各决策变量取值进行优化组合, 并计算仿真模型的输出 C , C 为仿真优化系统的性能评价函数, 每次仿真模型输出与上一次仿真输出进行比较, 直到满足寻优条件, OptQuest 运行停止时, 输出优化问题的最优解。

OptQuest 优化器的三个关键的部分包括: Controls, Response, Objective, 设置如下:

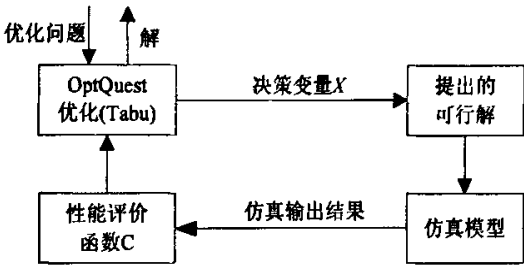


图 4.9 仿真优化方法原理图

Fig.4.9 Principle of simulation and optimization method

(1) 控制变量设置

入口通道服务资源: $x_1 = \text{Resource 1}$, 出口通道服务资源: $x_2 = \text{Resource 2}$

(2) 约束条件设置

$$\begin{cases} \rho_{\min} \leq [\text{Resource 1.ScheduledUtilization}] \leq \rho_{\max} \\ \rho_{\min} \leq [\text{Resource 3.ScheduledUtilization}] \leq \rho_{\max} \\ [\text{Process 1.Queue.NumberInQueue}] \leq L_{\max1} \\ [\text{Process 3.Queue.NumberInQueue}] \leq L_{\max2} \\ 1 \leq x_1 \leq N_m, 1 \leq x_2 \leq N_m \\ 2 \leq x_1 + x_2 \leq N_m \end{cases}$$

(3) 目标函数设置如图 4.10。



图 4.10 目标函数设置界面

Fig.4.10 Objective file settings

4.6.2 堆场大门规划模型仿真运行与检验

仿真时间长度为一个堆场作业年的运行情况。优化得出的最优解 X^* 如式 (4.11)。

$$X^*=(8,6,40,30,20) \tag{4.11}$$

可以得出，大门系统规划的入口通道数量 x_1 等于 8，出口通道数量 x_2 等于 6。根据二期堆场工况，取 $K_b=33\%$ ， $K_{bv}=2.5$ ， $T_{jk}=360$ 天， $T_d=12$ 小时， $P_d=40$ 辆/小时， $q_c=1.45$ ，代入式 2.6 得 $N=20$ ，参数 N 表示大门入口通道数量和出口通道数量的总和。由此得出 $x_1=10$ ， $x_2=10$ ，并把该通道值代入仿真模型中运行检验，仿真输出结果与仿真优化结果进行比较，比较结果如表 4.4 所示。特别指出，二期大门通道设置为九进七出，每个通道利用率不同。可以看出，运用经验计算公式 (Method B) 计算得到总的大门建设费用比运用仿真优化方法 (Method A) 规划得到的总的大门建设费用要多很多，并且运用 Method B 得出的通道数量存在一定的冗余。

表 4.4 两种规划方法的比较
Tab.4.3 Comparison of Operation Mode of Three Operation Equipment

参数			方法		单位
			A	B	
通道数	x_1		8	10	—
	x_2		6	10	—
	N		14	20	—
通道建设总费用			18500.0	26000.0	10 ³ RMB
外卡在码头总的作业时间			26.8	22.0	分钟
利用率	ρ_1	Aver.	23.1	12.7	%
		Max.	100.0	90.0	%
	ρ_2	Aver.	13.2	10.7	%
		Max.	100.0	90.0	%
等待时间	Queue1	Aver.	1.2	0.2	分钟
		Max.	3.0	0.5	分钟
	Queue2	Aver.	1.5	0.3	分钟
		Max.	3.5	0.8	分钟
等待队长	Queue1	Aver.	0.15	0.01	—
		Max.	4.0	1.0	—
	Queue2	Aver.	0.2	0.01	—
		Max.	2.0	1.0	—

4.6.3 敏感度分析

通过改变大门年作业量 Q_n 的值来观察最优解的变化。这里设置的 Q_n 变化范围为 $\pm 20\%$ ，最优解的变化情况如图 4.11 所示。可见，当 Q_n 增加或减少 5% 时，入口通道和出口通道的数量都没有改变；当 Q_n 增加或减少 10% 时，入口通道的数量相应地增加或减少一个通道，而出口通道数量没有变化；当 Q_n 增加或减少 20% 时，出口通道的数量相应地增加或减少了一个通道。

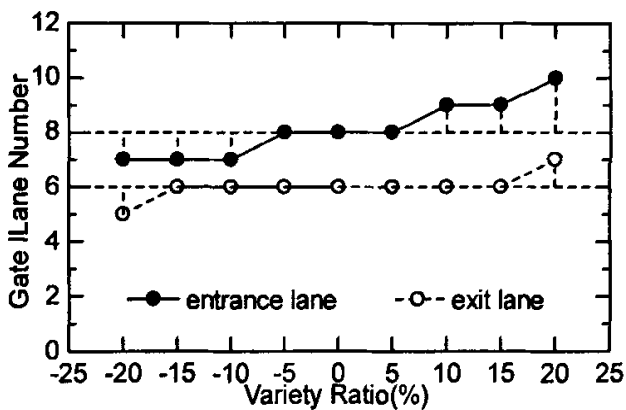


图 4.11 Q_n 值变动时规划通道数量的变化

Fig.4.11 Curve of lane number change following Q_n

5 基于仿真优化的集装箱堆场资源配置

5.1 堆场资源配置问题在堆场物流系统规划中的意义

集装箱堆场是典型的离散动态系统，由于实际堆场资源配置具有复杂性和不可重复性，难以通过简单的数理分析，或者通过与实际过程简单比较来对模型进行验证，因而采用仿真技术进行模型的验证就成为一种有效的研究手段。运用仿真优化方法研究集装箱堆场资源配置问题。首先，建立了堆场资源配置的数学模型和仿真模型；然后，分析了仿真优化方法在模型中的运用；最后，通过案例分析对仿真模型进行验证。经过这些验证后的模型可以改变模型的输入参数，应用于其它堆场的物流系统规划。

5.2 优化基本理论的应用

5.2.1 组合优化

组合优化是用数学方法来寻求离散事件的最优编排、分组、次序或者筛选等^[30]。这类问题要求出最优解非常困难，其主要原因是组合爆炸。组合优化问题 (D, E, f) 通常可以描述为

$$\begin{cases} \min_{x \in F} f(x) \\ s.t. g(x) \geq 0 \\ x \in D \end{cases} \quad (5.1)$$

其中： x 为决策变量， D 决策变量的定义域； $g(x)$ 为约束函数； $F = \{x | x \in D, g(x) \geq 0\}$ 表示可行解区域； $f(x)$ 表示目标函数。组合优化的特点是 F 和 D 都是有限点集。因此组合优化实际是从有限状态中选择最好的一个状态。

5.2.2 仿真优化

仿真优化是研究基于仿真模型的目标优化问题，是结合仿真模型的一种优化技术，即基于仿真模型给出的输入输出关系(性能)通过优化算法得到最佳的输出量。其优化策略利用仿真模型的输出对最优解的搜索过程提出反馈，当产生的输出结果满足寻优条件时，搜索过程停止，优化算法输出问题的最优解^[8,14,31,32,33]。随着仿真优化理论的研究与应用的深入和逐步完善，启发式算法越来越多地被应用到仿真优化方法中^[7,8,11,17]。有关启发式算法基本原理第三章有过介绍。基于启发式算法，仿真优化方法更易于求解具有大量随机参数的组合优化问题，获得合理的全局最优解。

本文运用仿真优化方法进行堆场资源配置问题的研究。优化问题的决策变量 X 作为堆场资源配置模型的输入参数，启发式优化算法对各决策变量的取值进行优化组合，并计算仿真模型的输出 $TC(X)$ ， $TC(X)$ 为系统性能的评价函数，每次仿真模型的输出与上一次的输出进行比较，直到满足寻优条件。式 (5.10) 所示的成本模型的最优化问题，运用仿真优化方法可以表示为最小化目标函数的期望值如式 (5.2) 所示。

$$\min E[TC(X)] \quad (5.2)$$

5.2.3 仿真优化方法的设计

Arena 仿真环境中配置有 OptQuest 优化器，在上一章中的堆场大门系统的优化也运用到了这一工具，具体设置方法图 4.9 有过介绍。OptQuest 内部的优化算法采用的是禁忌搜索法 (Tabu)^[32,33]，运用改进的 Tabu 算法，在状态空间上搜索，得到全局最优解。借助 OptQuest 优化器可以把我们建立的数学优化模型与 Arena 仿真环境下按生产流程建立的仿真模型通过一些参数的设置有机联系起来，达到对规划模型进一步优化的目的。无论是前面的大门规划还是后面的堆场资源配置问题的研究都运用了这种方法。基于 Tabu 算法的仿真优化方法的设计如图 5.1。

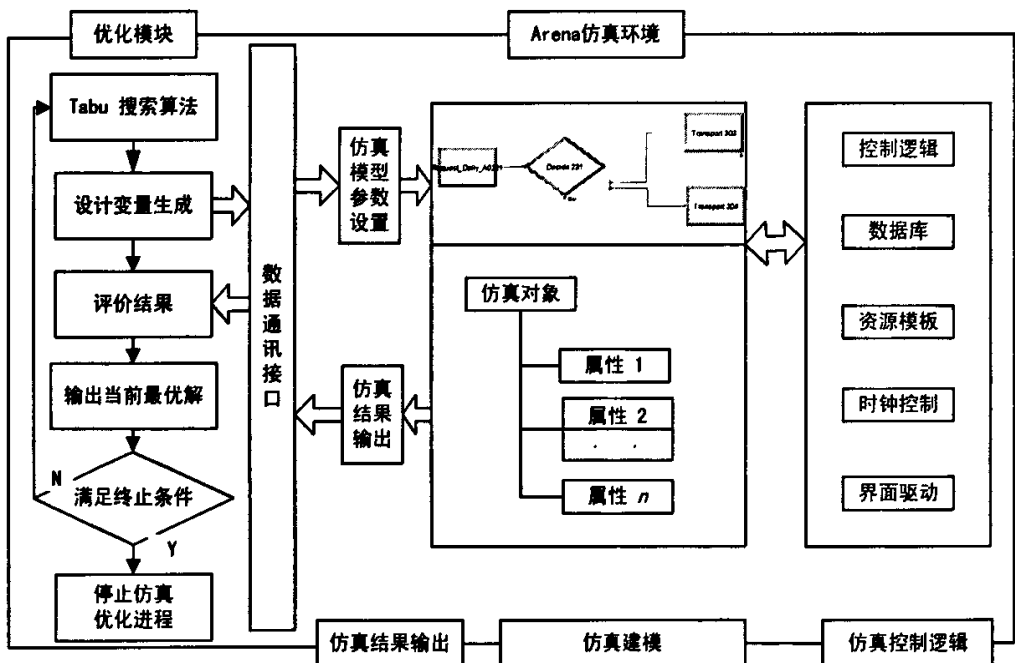


图 5.1 仿真优化方法的设计

Fig.5.1 Design of simulation and optimization approach

5.3.2 堆场资源配置模式

堆场资源配置模式主要有两种：“6+1”模式如图 5.3，“4+1+4”模式如图 5.4，两者的区别在于集卡车道的设置不同，前者多适用于轮胎式门式起重机，相邻街的场桥可以共用集卡车道，提高了堆场空间资源的利用率。后者多用于跨度更大、稳定性更好的轨道式门式起重机，每条街都设置有集卡车道。在研究资源配置问题时对这两种模式分别建模，在建模时的区别不大，主要是场桥小车路径网络和集卡路径网络有一定的区别，在路径网络设计中有详细说明。

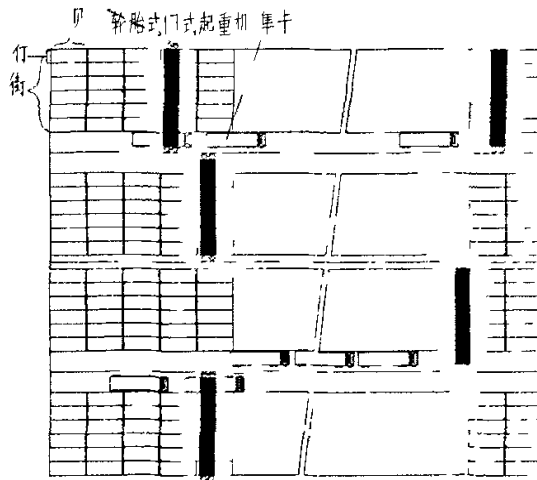


图5.3 “6+1”模式堆场布局示意图

Fig.5.3 Sketch of yard layout in “6+1” mode

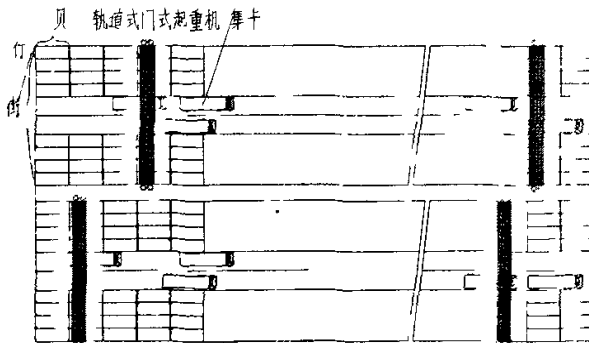


图5.4 “4+1+4”模式堆场布局示意图

Fig.5.4 Sketch of yard layout in “4+1+4” mode

5.3.3 堆场资源配置问题的目标函数构造

堆场资源配置是一个典型的组合优化问题^[30]。对于 n 个场桥 (n 为正整数) 和 m 个箱位 (m 为正整数) 构成的资源配置问题, 堆场系统规划目标是在满足码头堆场系统作业要求的前提下, 场桥的数量和堆存空间配置达到最优, 提高各种资源的利用率。为保证船舶按期离开码头, 在泊位计划时间内完成集装箱堆存区的工作量是很重要, 这就要综合考虑堆存区域的大小, 集卡及码头堆场装卸设备资源等因素。由于场桥设备的特殊性, 不可能每个堆存区都配置一定数量的场桥。因此建立一个成本模型, 综合考虑堆场存储空间成本, 场桥固定成本和可变成本^[31], 集卡运输成本之间的平衡问题, 决策变量组成的向量 X 如式 (5.3) 所示:

$$X = (n, L, t)^T \quad (5.3)$$

其中: 变量 n 表示在某次堆场计划内堆场为集卡装卸集装箱分配场桥的数量; L 堆场中存储在一个贝中的集装箱的数量; t 为堆场的作业时间。相关参数定义:

C_1 : 泊位方面堆场计划作业箱量随机分布函数的数学期望;

C_2 : 提取目标箱时所需要进行的倒箱量分布的数学期望;

C_4 : 堆场大门方面作业箱量随机分布函数的数学期望;

C_7 : 堆场每贝每天空间成本 (元/秒);

C_T : 一台场桥单位时间行驶的可变成本 (元/秒);

C_F : 一台场桥每天固定成本 (元/天);

C_0 : 一台集卡单位时间的成本 (元/秒);

T_0 : 一台场桥移动的固定时间 (秒);

T_1 : 一台场桥移动一行所需要的时间 (秒);

T_2 : 一台场桥操作一个箱所需要的时间 (秒);

T_3 : 一台场桥装载一个箱到集卡上所需要的时间 (秒);

T_4 : 集装箱在堆场堆存时间限制, 堆存期离散分布的数学期望。

在堆场中每台场桥只负责 $(C_1 + C_4)/n$ 箱, 又因为每一贝中最初存有 L 个集装箱, 则每台场桥要负责 $(C_1 + C_4)/(nL)$ 个贝。整个操作时间有定位时间和运输时间组成。下一取箱指令发生在不同贝中的可能性为 $[1 - nL/(C_1 + C_4)]$, 那么场桥作业时每个集装箱预期的定位时间为: $T_0[1 - nL/(C_1 + C_4)]$, 基于随机存储策略^[14], 下一取箱指令发生在另一随机位置

$[1, (C_1 + C_4)/(nL)]$ 中。这一随机分布的概率值接近连续分布值 $(0.5, (C_1 + C_4)/(nL) + 0.5)$ ，则对两个随机位置 X, Y ，它们之间距离的累积分布函数为：

$$F(z) = P(|X - Y| < z) = [nL/(C_1 + C_4)]^2 [2z C_1/(nL) - z^2] \quad (5.4)$$

随机位置 X, Y 间距离的数学期望为：

$$E(z) = \int_0^{(C_1 + C_4)/(nL)} 2z [nL/(C_1 + C_4)]^2 [(C_1 + C_4)/(nL) - z] dz = (C_1 + C_4)/(3nL) \quad (5.5)$$

运输时间成本为：

$$(C_T + C_0) [T_0(1 - nL/(C_1 + C_4)) + T_1(C_1 + C_4)/(3nL)] \quad (5.6)$$

空间成本为：

$$C_r T_4 / L \quad (5.7)$$

平均分配到每个集装箱的场桥固定成本为：

$$C_F T_4 n / L \quad (5.8)$$

取箱成本为：

$$(C_T + C_0) C_2 T_2 \quad (5.9)$$

堆场资源配置问题的目标函数为成本模型总成本最小，如式 (5.11) 所示：

$$\min TC(n, L) = (C_T + C_0) [T_0(1 - nL/(C_1 + C_4)) + T_1(C_1 + C_4)/(3nL)] + C_r T_4 / L + C_F T_4 n / L + (C_T + C_0) C_2 T_2 \quad (5.10)$$

5.3.4 堆场资源配置问题的约束条件构造

堆场资源配置问题具有复杂约束。轮胎式门式起重机和轨道式门式起重机简称场桥，作业特性与堆场作业计划特性组合起来，在加上堆场的空间布局、路径规则等因素构成了约束集合。这里给出其中的一些主要约束的形式化表述，堆场规划模型的约束条件包括：

(1) 场桥利用率 $\rho_{\text{轮胎}}$ ， $\rho_{\text{轨道}}$ 应在给定的设备利用率范围 $[\rho_{\text{场桥min}}, \rho_{\text{场桥max}}]$

$$\rho_{\text{场桥min}} \leq \rho_{\text{轮胎}} \leq \rho_{\text{场桥max}} \quad (5.11)$$

$$\rho_{\text{场桥min}} \leq \rho_{\text{轨道}} \leq \rho_{\text{场桥max}} \quad (5.12)$$

(2) 场桥下最大排队队长 $L_{\text{轮胎}}$ ， $L_{\text{轨道}}$ 不超过允许的最大排队长度 $L_{\text{轮胎max}}$ ， $L_{\text{轨道max}}$

$$L_{\text{轮胎}} \leq L_{\text{轮胎max}} \quad (5.13)$$

$$L_{\text{轨道}} \leq L_{\text{轨道max}} \quad (5.14)$$

(3) 泊位方面堆场作业计划的作业箱量随机分布

$$C_1 = g(t) \quad (5.15)$$

式中, 函数 $g(t)$ 离散函数, 与船舶到港时间分布和在港时间分布有关;

(4) 堆场大门方面作业箱量随机分布

$$C_4 = f(t) \quad (5.15)$$

式中, 函数 $f(t)$ 离散函数, 与外围市区集卡到港时间分布有关;

(5) 场桥提取目标箱时所需要进行的倒箱量的离散分布

$$C_2 = h(L) \quad (5.17)$$

式中, 函数 $h(L)$ 为离散函数, 与堆场的每贝中的存放箱量有关;

(6) 内卡的空驶率 $\rho_{\text{内卡}}$ 应在给定的设备利用率范围 $[\rho_{\text{内卡min}}, \rho_{\text{内卡max}}]$

$$\rho_{\text{内卡min}} \leq \rho_{\text{内卡}} \leq \rho_{\text{内卡max}} \quad (5.18)$$

(7) 每条街允许同时有场桥作业的数量 n 在实际配置数量的范围 $[n_{\text{min}}, n_{\text{max}}]$

$$n_{\text{min}} \leq n \leq n_{\text{max}} \quad (5.19)$$

(8) 集装箱在堆场堆存期的离散分布, 与集装箱的类别和运量比例有关

$$C_3 = \theta(t) \quad (5.20)$$

5.4 堆场资源配置仿真模型的建立

5.4.1 仿真模型的边界

堆场资源配置模型目的在于研究堆场空间资源和设备资源的合理最优配置, 不包括堆场大门和泊位端, 这样就把堆场看作了一个黑箱, 与堆场大门和泊位系统的作用和数据交换如图 5.5。

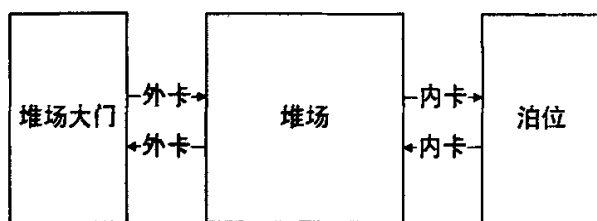


图5.5 堆场系统数据交换示意图

Fig.5.5 Sketch of the yard system data transport

5.4.2 堆场资源配置模型的假设条件

为使模型刻画所研究问题的本质, 引进几个假设:

(1) 有限时段假设。由于堆场物流具有延续性, 不存在明确的初始状态和终止状态, 属于无限动态无限离散系统问题^[30]。这里将考察时段设定为一个堆场作业日, 前一个作业日结束时的场桥分配状态构成当前工作日场桥分配的初始条件。这样, 就把无限离散系统问题转化为有限离散系统问题。

(2) 容量满足假设。假设堆场的作业计划时间间隔随机分布和作业箱量随机分布保持在堆场容量许可的范围内, 对于场桥的分配, 总可以为一个作业计划分配一个或几个场桥。

(3) 信息完备性假设。假设在每个堆场作业日以前, 包括堆场计划, 场桥资源相关信息和资源配置决策所必须的基本信息是完备的, 确定的和已知的。

(4) 虚拟实体假设。假设堆场箱位有一定比例的占用, 空车来提箱时有箱可提, 因为堆场的集装箱由重车送到堆场后要延迟一定的堆存期, 这在仿真时钟上会造成一定的滞后, 因此采用虚拟实体建模的方式。

5.4.3 堆场资源配置模型的模块划分

根据堆场作业的 业务流程图和堆场的平面布局方案, 堆场资源配置仿真模型按功能划分进行模块划分, 如表 5.1。在 Arena 仿真环境中建模时可以依据这些模块的功能, 选用一基本建模元素, 建立堆场系统的仿真模型。

表5.1 堆场模块划分一览表

Tab.5.1 Statistic table for the partition of yard system

模块名称	实现功能	属性特征
堆场平面布置模块	堆场各组成部分的平面布置图	进场道口、出场道口、车道、箱区及其他建筑设施的布局, 含位置、方向、尺寸、数量, 道路限速
集装箱、集卡产生模块	以一定的箱量、箱型、时间间隔等分布规律, 产生不同数量、型号的集装箱, 以一定的时间间隔分布规律产生集卡	集装箱属性包括尺寸、高度、重量、种类、船舶、客户、进/出口; 包括内卡或外卡、容量、轻载/重载速度等。
场桥作业模块	以一定的规则将集装箱从集卡提起或将集装箱装上集卡	场桥的主要尺寸、工作运行参数等; 控制并动态显示场桥的装卸作业情况
箱区作业模块	集装箱在箱区内的堆放和提取作业	动态地显示堆场箱区的占用情况
优化控制模块	作业规则和调度优化	作业计划, 集装箱堆码规则, 场桥调度和作业规则, 场桥, 集卡路径网络
特征量统计输出模块	仿真统计结果输出界面	统计堆场机械设备的各种生产性能参数特征值

5.4.4 堆场资源配置模型的逻辑流程

根据堆场作业流程,运用 Arena 环境中的模块制作出逻辑流程,下面给出外卡进堆场接受场桥服务逻辑流程如图 5.6 和图 5.7。其它比如内卡从泊位进出堆场接受场桥服务逻辑流程和外卡接受场桥服务后从大门出堆场逻辑流程与此类似,不再给出。

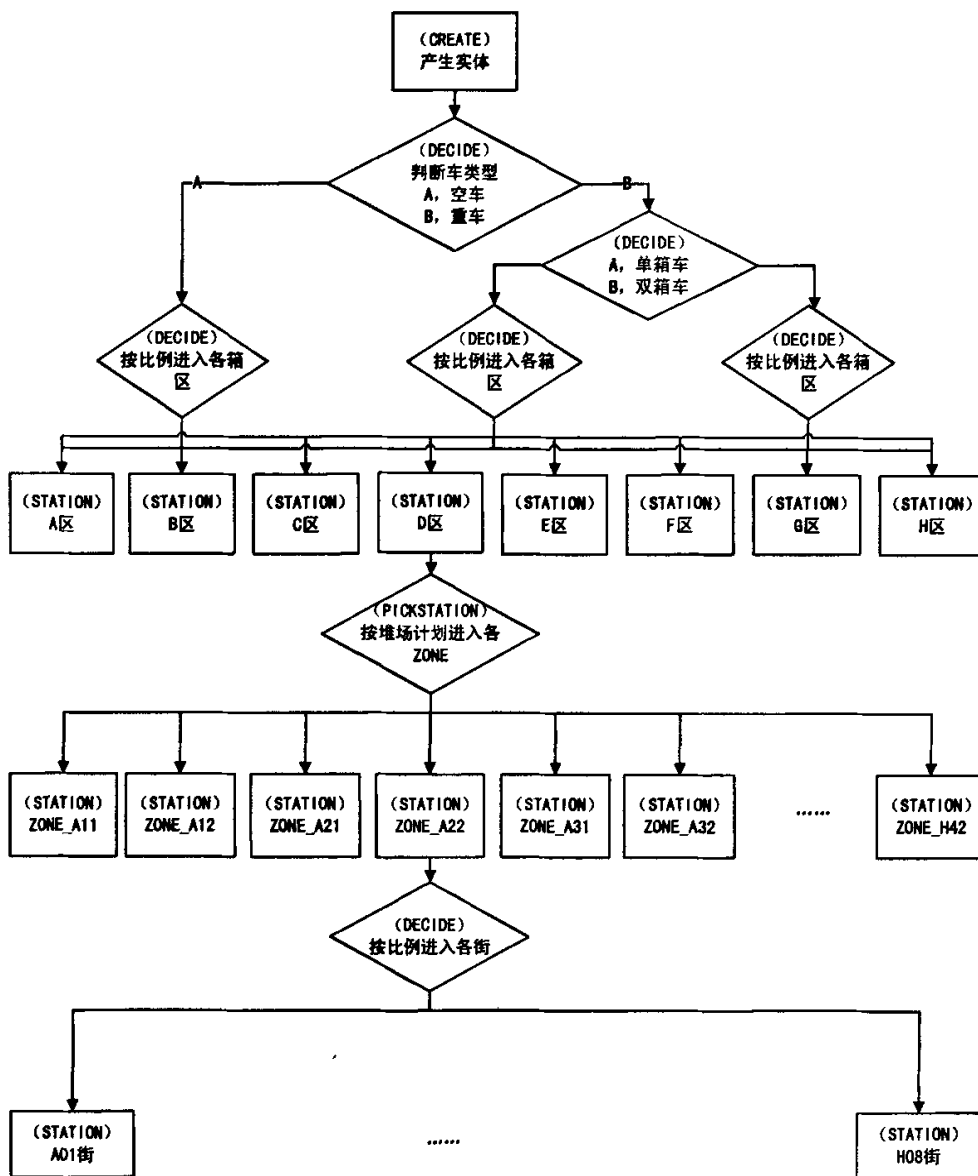


图 5.6 外卡进堆场逻辑流程

Fig.5.6 Logic flow of truck enter yard

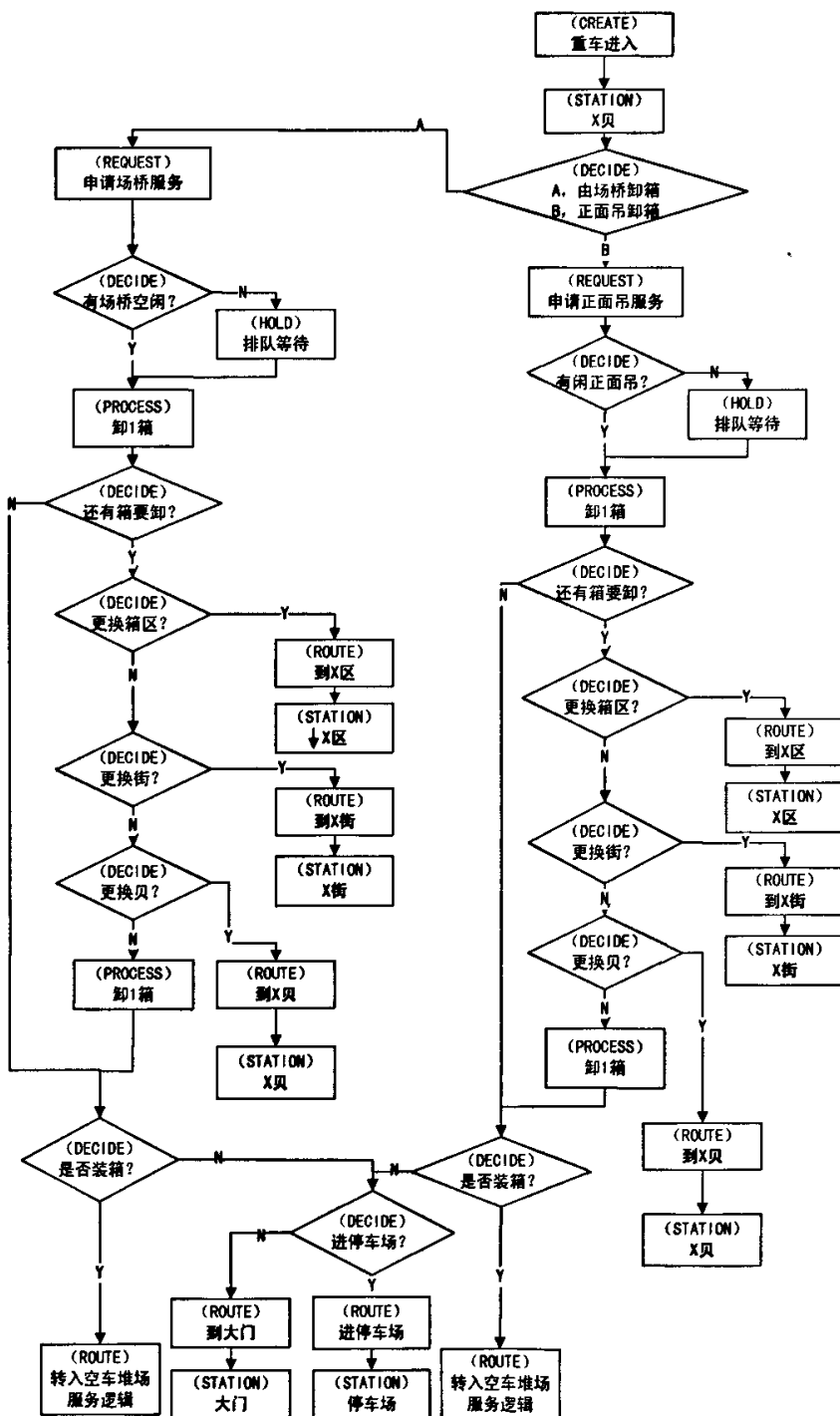


图 5.7 重车堆场服务逻辑流程图

Fig.5.7 Logic flow of truck receive service in yard

5.4.5 路径网络设计

在仿真模型设计时，为了真实地描述堆场物流系统的运作，必须首先设计堆场的路径规则，进行路径网络设计。其中，集卡和场桥的路径网络占有主导地位，要提高堆场的集疏运能力，必须作好二者的路径网络设计。

(1) 集卡路径网络

集卡路径网络根据堆场的平面布局和路径规则决定，到达某条街后则由资源配置模式决定。每条街的长度 ϖ ，一般 50 个贝（300m）左右，集卡车长 η 为 15m 左右。模型设计时定位误差选择在一个集卡车长范围内，因此集卡在每条街的停靠站点可以由下式计算：

$$\lambda = \varpi / 2\eta \quad (5.21)$$

(2) 场桥路径网络

集卡按照堆场计划选择区，街（见图 5.6）之后，在每条街上具体选择那一贝位申请场桥装卸是按照一定的比率随机的，正是有了这种随机性的存在，场桥的移动轨迹构成了一个路径网络。其路径特点为方向性，循环性，被动性。在某条街上循环移动，均为单车道上双向行驶。场桥具体来说可以实现三个方向 x, y, z 的运动，分别对应堆场空间的贝，行，层，是一个三维立体网络如图 5.8。

场桥在贝位间作业时三个动作场桥大车贝位间行使，小车行间移动，场桥提升机构是顺序进行的，因此可以对场桥运动进行分解，设计场桥的路径网路。下面出场桥大车贝位间行使的路径网络设计。

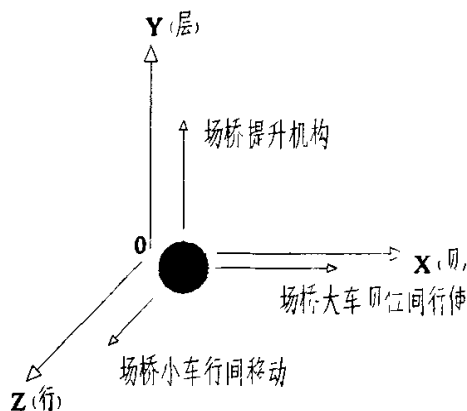


图 5.8 场桥贝位间作业示意图

Fig.5.8 Sketch of stack crane work in street

集卡停靠站点可以由式 5.21 计算，由于每条街一般最多配置 2 台场桥，3 台是特殊情况且不利用机械调度管理，因此每台场桥的活动半径可以确定。场桥贝位间移动的路径网

络节点数 $\mu = \frac{1}{2}\lambda$ ，那么路径条数 ρ 可以由式 5.22 计算，场桥 C01 贝位间路径网络原理如图 5.9，但实际表现形式上是条直线轨迹。

$$\rho = C_{\mu}^2 \quad (5.22)$$

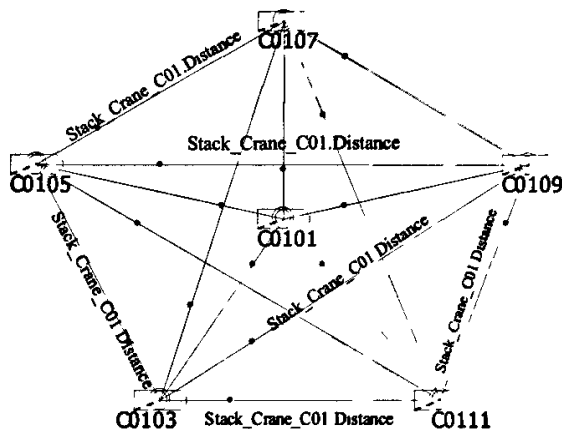


图 5.9 场桥贝位间路径网络原理图

Fig.5.9 Principle of stack crane street road network

(3) Arena 环境下路径网络设计

在 Arena 环境下，设计某两条街的场桥，集卡的路径网络如图 5.10。其中场桥包括大车和小车的运行轨迹，二者的协同运动是设计的关键，基于以上的路径网络设计思想，设计出符合实际作业流程的物流路线。

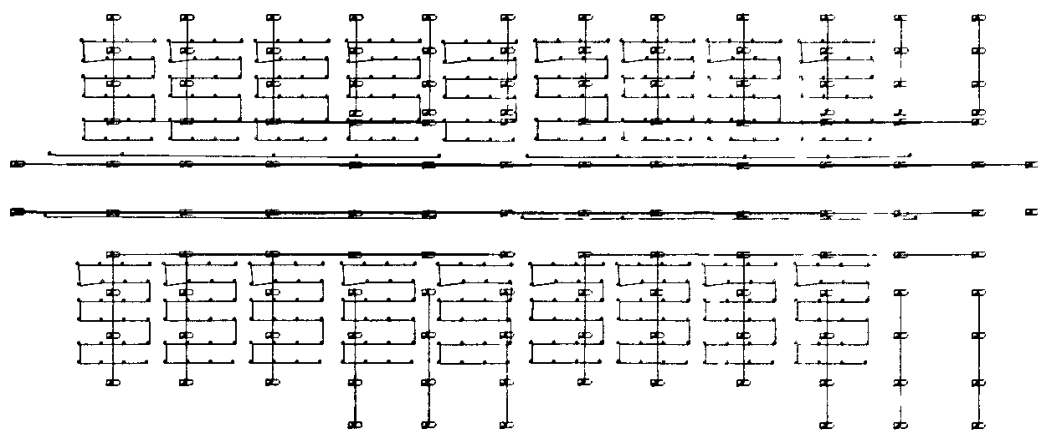


图 5.10 两条街的场桥，集卡路径网络图

Fig.5.10 Road network of stack crane and truck

5.4.6 Arena 环境下仿真模块设计

在 Arena 环境下，按照堆场系统的逻辑流程图，资源配置模式和路径网络的设计方法，运用 Arena 的功能模块，可以进行仿真模型的设计，下面给出以 A01 街子模型为例说明集卡等待场桥服务部分和场桥服务部分两大子模块设计的过程，具体的变量设计过程不再给出，其它模块的设计过程不再赘述。模型中资源、变量的命名规则与所在堆场的街、贝、行、层有关，参见图 2.2 及其说明。

(1) 集卡等待场桥服务部分，逻辑模块如图 5.11 所示：

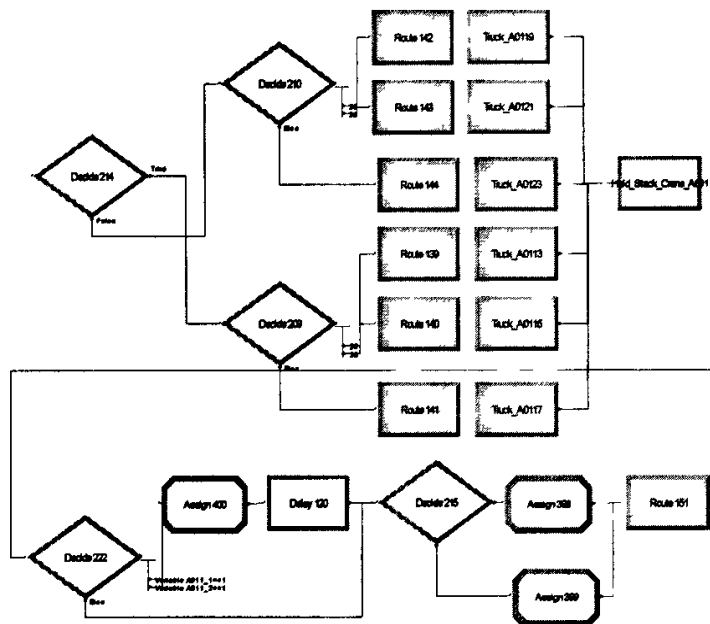


图 5.11 集卡等待场桥服务模块图

Fig.5.11 module of truck hold for stack crane

集卡实体在复制出集装箱实体后，实现了车与箱的分离。那么集卡实体还要等待场桥服务完毕才能离开这条街。这就造成了集卡在场桥下的排队等待。具体说来按下面步骤实现的：

首先在集卡实体复制出来集装箱实体之后，用 Decide 模块按照一定的比例（与集装箱实体选择箱位站点的比例统一）到达街之间的集卡车道等待站点，集卡到达这些站点表明相应的集装箱也将被放置在附近的贝或者在附近的贝提箱，比如 A01 街站点的设计分别是 Truck_A0101, Truck_A0103, Truck_A0105, Truck_A0107, Truck_A0109, Truck_A0111，按此规则一直到 A0123。

在复制出集装箱实体, 实现集卡与集装箱的分离之后, 进入场桥服务部分: 本模型实现了场桥大车, 小车的协同工作。具体实现步骤如下: 仍然以 A01 街的场桥 Stack_Crane_A01 的生产流程为例, 因为为了避免场桥之间的撞车冲突, 每个场桥都限制了一定的行程 (工作范围)。这就是每条街有两条生产作业线的原因。集装箱实体运用 Request 模块向场桥发出申请信号之后, 如果场桥不忙, 就行驶到集装箱实体所在的站点 A0101, A0103, A0105 到 A0111。



图 5.12 场桥服务模块图

下一步要申请场桥小车的动作, 同样运用 Request 模块向场桥小车发出申请信号, 小车 (如 Dolly_A0101) 此时处于空闲状态, 因为 Arena 里面不容易实现两种 Transporter 的协同动作, 本模型中采用了在每个集装箱实体站点设置了一个场桥小车, 这就是说一个场桥大桥对应了 6 个场桥小车, 这样易于实现两车之间行程的绑定。当场桥 Stack_Crane_A01 大桥行驶到相应的贝, 比如 A0101 之后, 下一步小车 Dolly_A0101 把集装箱搬运到相应的行, 层。比如运用 Transport 模块把集装箱送到行 A010101, A010103, A010105。然后运用 Free 模块释放 Dolly_A0101。

集装箱就被小车送到了相应的行, 层。在释放了小车之后, 场桥大桥 Stack_Crane_A01 也应该释放了。同时场桥大桥 Stack_Crane_A01 还是一种资源, 运用 Release 模块释放 R_Stack_Crane_A01 资源。实现以上操作之后, 场桥服务完毕, 运用 Signal 模块向集卡发出可以离开的信号, 集卡在接收到此信号后就不 Hold 了。

5.5 堆场资源配置模型的验证

5.5.1 历史数据统计分布及系统主要参数

从大窑湾二期工程集装箱码头信息管理系统中提取现状年大门作业数据, 船舶到港数据, 再对这些历史数据统计分析, 得出高峰月份到达堆场泊位方面集装箱的月对日的堆场计划作业箱量分布如图 5.13 和大门方面集装箱作业量的分布如图 4.5, 高峰月的二期堆场作业计划时间间隔分布如图 5.14。大窑湾二期工程集装箱码头 4 个泊位的堆场拥有 3.5 万标箱的存储能力, 堆场资源配置模式分别如图 5.3 和 5.4。

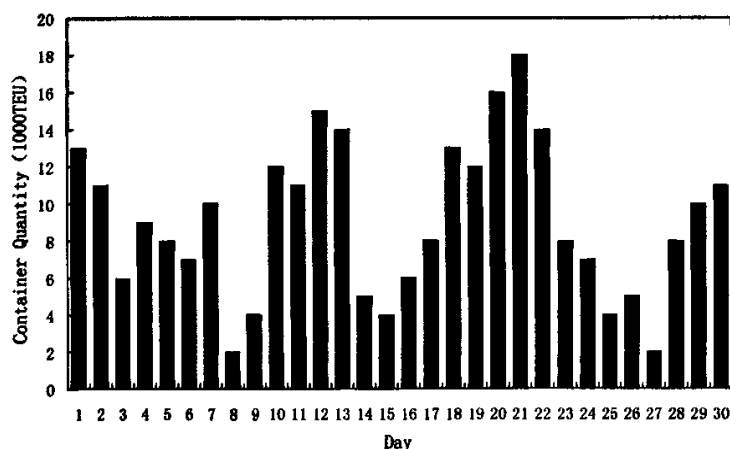


图 5.13 高峰月的二期堆场计划作业箱量分布

Fig.5.13 Distribution of Phase II Yard schedule container operation volume of the max month

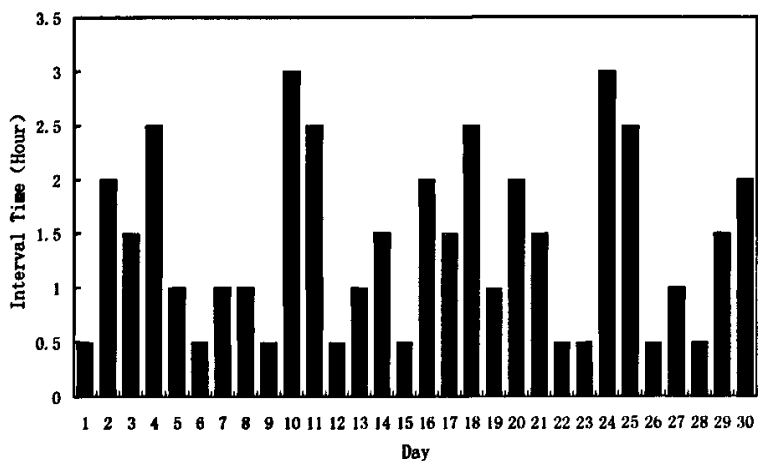


图 5.14 高峰月的二期堆场作业计划时间间隔分布图

Fig.5.14 Distribution of Phase II Yard operation schedule interval of the max month

根据二期堆场布局，堆场工况，现有资源运行成本，得出系统的主要参数如表 1 所示。按堆场中不同种类集装箱所占比例，堆存期的离散分布 $C_3 = \text{DISC}((0.65,2),(0.25,3),(0.1,5))$ ；普通重箱的堆码高度是堆 4 过 5，空箱是堆 5 过 6，而且假定场桥倒箱时都把被倒箱放在相邻的贝位上，那么场桥提取目标箱时所需要进行的倒箱量的离散分布 $C_2 = h(L) = \text{DISC}((0.15,3),(0.1,4),(0.25,2),(0.5,1))$ 。可以在模型中进行以上参数的输入。

表 5.2 堆场资源配置系统主要参数

Tab.5.2 the main parameter of yard resource allocation

参数	参数值	参数	参数值
$\rho_{\text{场桥min}}$ (%)	10	$L_{\text{轮胎max}}$ (number)	10
$\rho_{\text{场桥max}}$ (%)	40	$L_{\text{轨道max}}$ (number)	12
$\rho_{\text{内卡min}}$ (%)	10	T_d (hour)	24
$\rho_{\text{内卡max}}$ (%)	30	T_{y*} (day)	360
n_{min}	0	T_0 (second)	20
n_{max}	3	T_1 (second)	2.8
C_r (元/天)	32	T_2 (second)	80
C_T (元/秒)	0.02	T_3 (second)	85
C_F (元/秒)	1650	C_0 (元/秒)	0.006

5.5.2 仿真优化结果及其分析

优化模型在 Area 环境下，模拟实际堆场作业时间为 30 个堆场作业日，堆场系统优化运行参数设置界面如图 5.15 所示。对两种资源配置模式下对应的两种堆场装卸工艺方案如表 5.3 进行了仿真，在进行仿真时钟设置时，Replicaton 的值设置为 3，即在一次仿真时间内模型连续运行 3 次，仿真输出结果为系统计算的平均值。

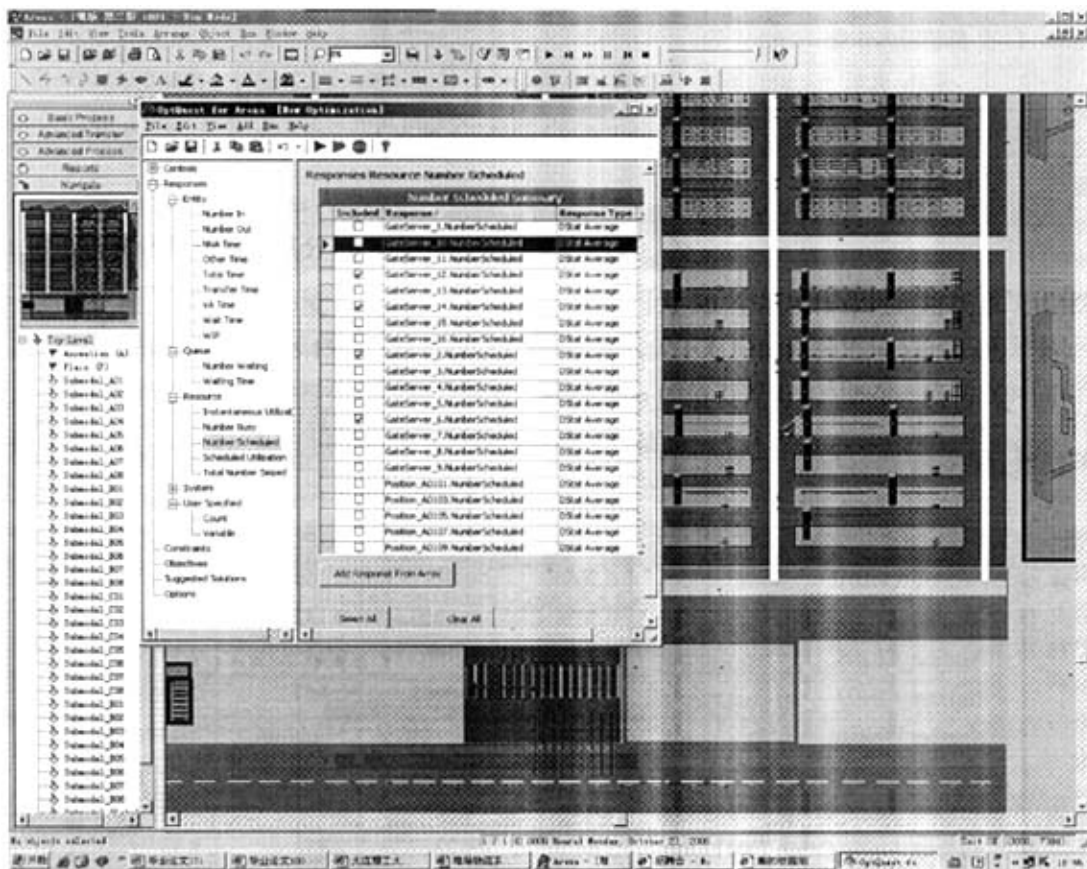


图 5.15 堆场系统优化运行参数设置界面

Fig.5.15 Optimizing and running parameter setting interface of yard system

堆场系统优化输出结果比较表 5.4 给出了部分场桥的利用率，贝位利用率，场桥下集卡排队情况的数据，与经验计算数据相比来看，堆场的设备资源，空间资源发挥了较大的作业能力，并且堆场各条街的集卡排队情况良好，没有超过允许排队的最大集卡数，集卡的排队等待时间也在允许范围内，没有出现集卡在堆场长时间滞留。

表 5.3 堆场装卸工艺方案

Tab.5.3 Scheme for yard load technics

序号	操作工序	工艺流程	
		方案一	方案二
1	船 堆场	岸桥 轮胎场桥 拖挂车 堆场	岸桥 轮胎场桥（轨道场桥） 拖挂车 堆场
2	堆场 货主	轮胎场桥 拖挂车 货主	轮胎场桥（轨道场桥） 拖挂车 货主
3	堆场 拆装箱库	轮胎场桥 拖挂车 拆装箱库	轮胎场桥（轨道场桥） 拖挂车 拆装箱库
4	拆装箱内作业	3t 叉车	
5	堆场 火车	轮胎场桥 拖挂车 轨道场桥	轮胎场桥（轨道场桥） 拖挂车 轨道场桥
6	空箱堆取作业	空箱堆高机	

表 5.4 堆场资源配置系统输出结果比较

Tab.5.4 Compartion between simulation and experience data

参数		工艺方案一		工艺方案二		经验值
	Instantaneous Utilization	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Average	Maximum Average	
场 桥 利 用 率	R_Stack_Crane_A01	0.1907	0.4993	0.1238	0.5632	0.4
	R_Stack_Crane_A011	0.2068	0.4024	0.1326	0.3965	0.4
	R_Stack_Crane_B01	0.1061	0.3091	0.1560	0.4268	0.4
	R_Stack_Crane_B011	0.1524	0.4441	0.1824	0.4641	0.4
堆 场 贝 位 利 用 率	Position_C0101	0.3664	0.8117	0.3664	0.8137	0.8
	Position_C0103	0.3071	0.8960	0.1325	0.9046	0.8
	Position_C0105	0.2004	0.7965	0.4653	0.5023	0.8
	Position_C0107	0.5070	0.8968	0.5070	0.8968	0.8
	Number Waiting	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Average	Maximum Average	
场 桥 下 集 卡 排 队 长 度	Request_Stack_Crane_D01.Queue	2.43	8.56	5.58	9.85	10
	Request_Stack_Crane_D011.Queue	3.64	9.23	2.81	8.33	10
	Request_Stack_Crane_D01.Queue	1.82	7.46	4.32	8.64	10
	Request_Stack_Crane_D011.Queue	2.16	7.92	3.27	9.47	10
	Waiting Time	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Average	Maximum Average	
集 卡 等 待 时 间 (分)	Hold_Stack_Crane_A01.Queue	1.35	36.69	0.44	40.81	
	Hold_Stack_Crane_A011.Queue	0.92	27.31	1.91	34.97	
	Hold_Stack_Crane_A02.Queue	0.82	29.79	1.58	28.89	
	Hold_Stack_Crane_A021.Queue	1.05	40.79	1.27	37.16	

5.5.3 敏感度分析

Arena 优化器分析出的最优组合方案是当堆场容量为 3.5 万标箱时，每一贝位存储 24 个标箱，根据现有高峰月份的堆场计划需要配置 23 台场桥，场桥选用的是轮胎式门式起重机。如图 5.16，随着空间成本 C_r 变化，每一贝位存储集装箱的数量呈阶梯状增大，而场桥数量呈阶梯状递减，这说明空间成本增大使集装箱在堆场的堆存时间减少，加速了集装箱的周转，这就需要配置更多数量的场桥。

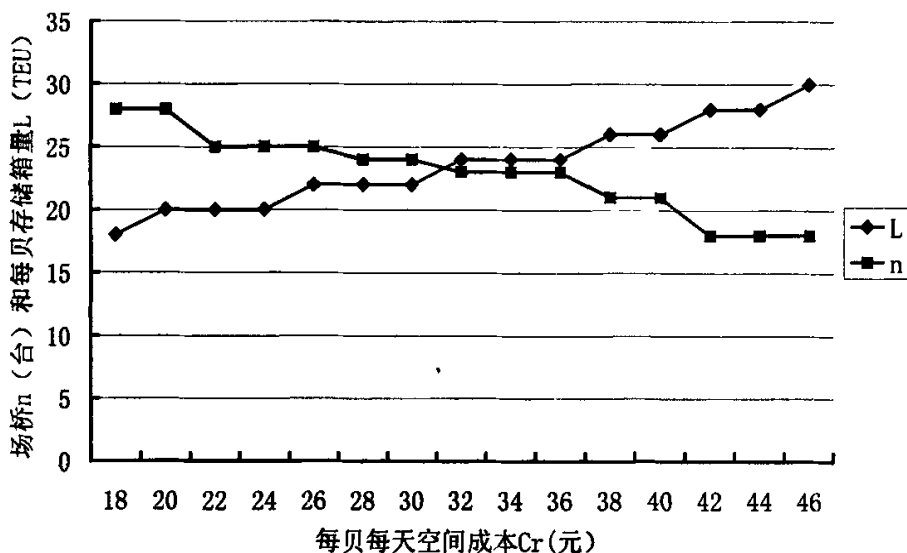


图 5.16 最优解 L 和 n 的敏感度分析

Fig.5.16 Sensitivity analyzation of optimal L and n

5.6 堆场模型自动化设计

5.6.1 VBA 与 Arena 的内部调用

每一个 Arena 仿真模型都包含了其相应的“VBA project”，所有代码和窗口都保存在.doe 模型文件中^[36,37]。而每个“VBA project”又包含多个模块：Arena 对象模块；代码模块；类模块；窗口^[28,38]。其中 Arena 对象模块又包含两类，第一类叫做“Logic”，此类对象是用户不可修改或扩展的，它包含了模型内部的功能、子程序、模块中的变量等，用户的 VBA 代码不存储在此类对象中；第二类叫做“This Document”，它在 Arena 模型中是 VBA 代码和模型之间最基本的连接，此类对象不可修改，但可以由用户来扩展。

堆场仿真模型的自动化需求包括：

- (1) 从外部控制仿真模型多次重复运行并实现最优情况的求解；
- (2) 从内部控制仿真模型自动从数据库写入和修改模型参数；输出自定义运行结果报表。

(3) 由外部生成的界面调用 Arena 并启动模型，并应用 OptQuest for Arena 优化工具实现对模型逻辑的控制、与模型之间的数据交互及对模型参数的优化。

运用模型自动化功能对仿真模型进行参数控制，更易于系统操作。集装箱堆场仿真优化自动化系统的结构示意图如 5.17 所示，堆场模型自动化用户操作界面和部分代码见附录 B。

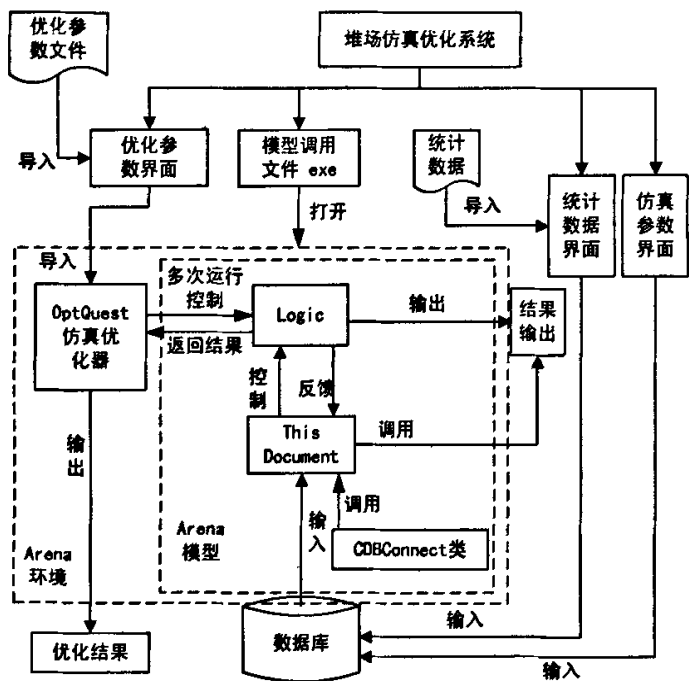


图 5.17 堆场仿真优化系统自动化结构示意图

Fig.5.17 Automatization Structure of yard simulation and optimization system

5.6.2 模型自动化的实现

根据上述需求，本仿真模型的自动化功能从两个方面进行设计。

- (1) 采用 Arena 系统自带的 Add-In 工具 OptQuest 做优化工具，从外部控制大门仿真模型的重复多次运行，模型将每次的运行结果返回给 OptQuest 进行分析，最终得出最优解。

(2) 模型参数的数据库写入及修改、对模型进程中 Events 的响应、自定义结果报表的输出等模型的内部控制工作则由 VBA 来完成。

在模型的运行过程中, 用户会需要通过窗口来了解运行进程或修改模型参数, 因此必须在模型中添加窗口模块, 并在运行过程中的部分“Events”中调用相应的窗口即可; 另外, 模型参数存在于数据库中的不同表内, 模型运行开始之前的初始化过程需要重复打开和关闭不同的表, 因此可以在 VBA project 中加入一个数据库连接类, 每次连接不同的表时只需调用此类即可, 因此大大节省了 VBA 的编码量。集装箱堆场仿真模型的自动化流程如图 5.18 所示。图中描述了仿真模型运行进程中的各事件中模型所实现的自动化功能。

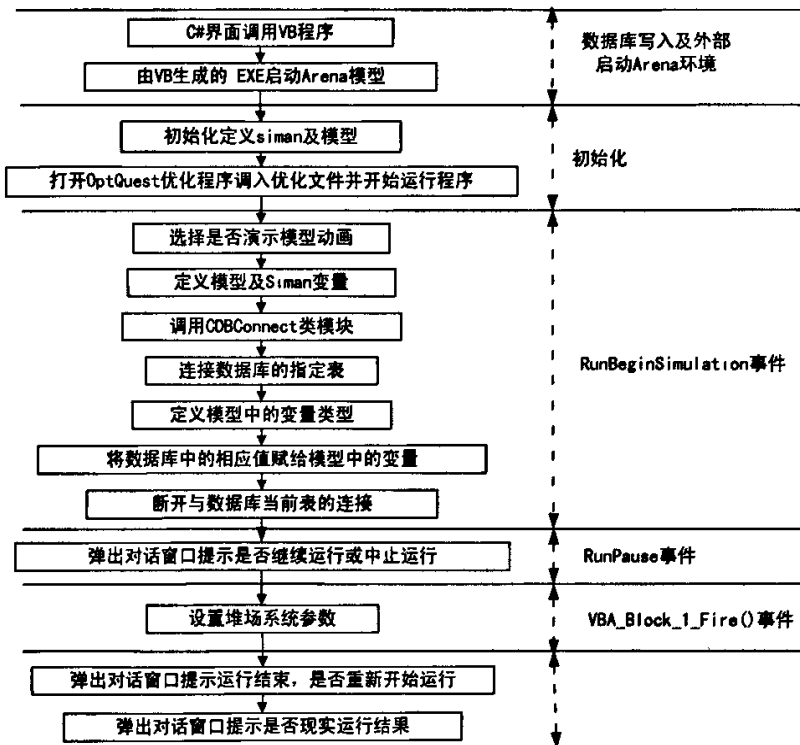


图 5.18 集装箱堆场模型自动化流程图

Fig.5.18 Flow chart of container yard model automatization

6 三期集装箱堆场物流系统规划方案及评价

6.1 三期集装箱堆场物流系统规划方案

根据中交水运规划设计院为大连港大窑湾三期工程设计的总平面设计方案，可以得出三期集装箱堆场的平面布局图，运用前面论述的二期集装箱堆场大门的系统规划和堆场资源优化配置方法，在已经建立的仿真模型中改变部分变量参数和部分路径网络的设计，在 Arena 环境下进行优化仿真，可以得出如下的规划方案：

(1) 堆场大门车道数规划

三期集装箱堆场总平面布置方案一大门按一岛一道设置，布置车道 18 个，总平面布置方案二布置车道 21 个，与运用经验公式 2.6 计算出的规划数据相比，传统的规划方法有一定的保守，造成一定的项目投资浪费。

(2) 堆场资源配置规划

三期集装箱堆场空间布局，如场桥选用轮胎式门式起重机，则采用与二期相同的“6+1”模式，此模式描述见图 5.3，集装箱堆码层数是重箱堆 4 过 5，空箱堆码层数为 5 过 6。如果场桥选用轨道式门式起重机，则采用“4+1+4”模式。比较仿真输出资源利用率指标可见，在不影响堆场正常作业的前提下，最大限度的运用堆场的空间资源和设备资源。三期集装箱堆场主要设备资源配置如表 6.1。

表 6.1 三期堆场主要设备资源配置表

Tab.6.1 The main equipment resource of Yard Phase III

序号	设备名称	技术规格	总平面布置方案一		总平面布置方案二	
			工艺方案一	工艺方案二	工艺方案一	工艺方案二
1	轮胎式门式起重 机	吊具下 40t, 跨距 23.47m	62	30	73	35
2	轨道式门式起重 机	吊具下 40t, 跨距 32m		42		49
3	集装箱牵引车	40'	120		140	
4	集装箱半挂车	40'	140		160	
5	空箱堆高机	堆高 6 层	12		14	
6	正面吊	42t	1		1	
7	箱内叉车	3t	24		26	

6.2 综合方案论证

(1) 从规划的角度看，仿真优化得出的三期堆场主要经济技术指标如表 6.2，与运用第二章计算出的经验数据相比，可以得出：总平面布置方案一和装卸工艺方案一是最佳规划方案，这一方案明显减少了堆场物流系统的项目投资。

(2) 从后期设备调度管理看，由于轮胎式门式起重机相比轨道式门式起重机在行程上有一定的灵活性，但是作业效率略为偏低，综合来看总平面布置方案一和装卸工艺方案一是最佳规划方案。

6.2 三期堆场主要经济技术指标表

Tab.6.2 The main finance and technology criterion of Yard Phase III

项目			单位	指标			
				总平面布置方案一		总平面布置方案二	
设计年吞吐量			万 TEU	300	300	350	350
泊位数			个	6	6	7	7
码头通过能力			万 TEU	304.9	308.2	355.8	359.4
堆场容量	普通重箱	需要容量	TEU	59800	61500	71650	72380
		需要地面箱位数		19513	20687	22820	23415
	空箱	需要容量		26845	27246	31520	32670
		需要地面箱位数		6843	6972	7863	7954
	冷藏箱	需要容量		2016	2016	2236	2236
		需要地面箱位数		840	840	980	980
	合计	需要容量		88661	90762	105406	107286
		需要地面箱位数		27196	28499	31673	32349
拆装箱		需要面积	m ²	公路 21320，铁路 9257		公路 21320，铁路 9257	
铁路		铁路整装作业线长度	m	2570		2765	
装卸设备购置成本			万元	151222	165587	176385	192315
单位直接装卸成本			元/TEU	138.6	139.5	138.3	139.3
堆场大门建设成本			万元	2370		2775	

(3) 下面给出总平面布置方案一的堆场平面布局如图 6.1，由于版面限制，布局图内各大区的资源配置模式无法详细描绘，仅供示意。特别指出重箱堆场和空箱堆场的位置不是固定的，由堆场计划决定。总平面布置方案二与之相比多了一个泊位，堆场内各主干道和排水管道的布置有一定的区别，不再给出。

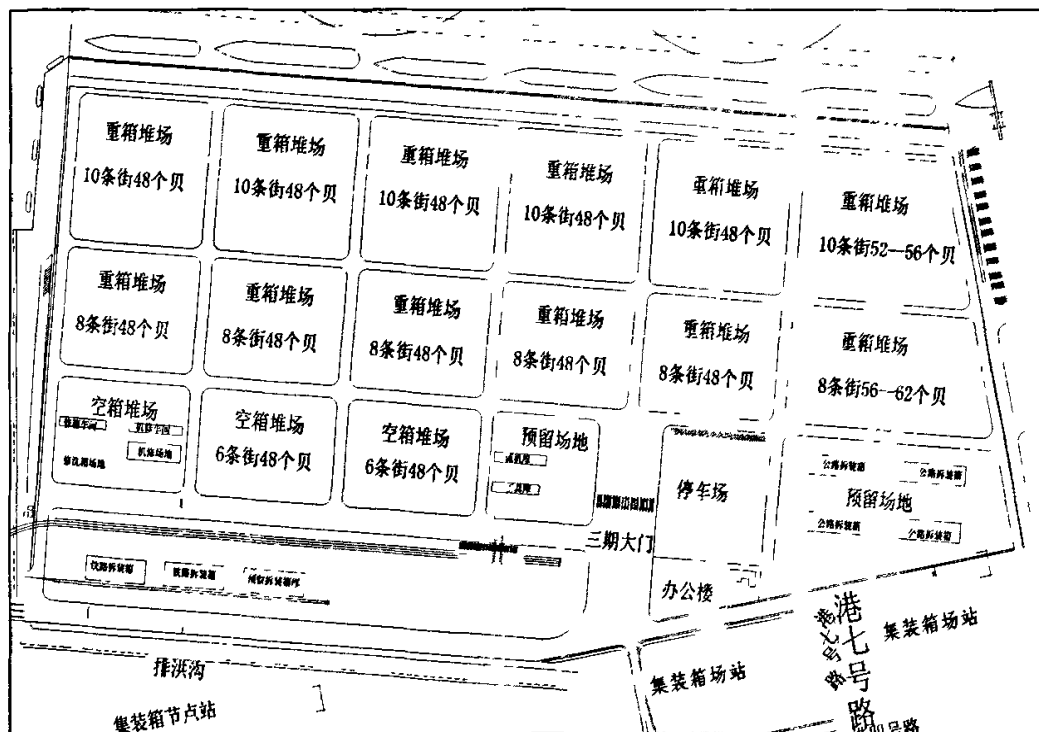


图 6.1 大窑湾集装箱码头三期工程堆场总平面布置方案一

Fig.6.1 Plane layout scheme First of Dayaowan container yard Phase III

结 论

集装箱堆场物流系统规划管理的好坏,决定着码头的前途和命运。码头物流平台的建设,是与堆场物流系统的优化建设密切相关的。对堆场物流系统进行科学地规划、合理地建设,有助于改善码头的集疏运条件,提高堆场的吞吐能力,增强码头的竞争性。本文以建设中的大窑湾集装箱码头堆场为对象,对其物流系统规划方法进行了系统的研究,主要的研究成果如下:

1、根据大窑湾港区二期工程集装箱码头物流系统调查的结果,统计分析了一作业年的历史数据,得出了物流系统作业流程、技术参数和建模所需要的离散分布。。

2、针对堆场物流系统的特殊性,结合规划需要考虑的优化目标,建立了堆场大门系统规划和堆场资源配置的数学优化模型。

3、结合二期堆场物流系统工况及生产作业流程,在 Arena 仿真环境中建立了二期堆场物流系统的仿真模型,对堆场系统作真实的描述和动画演示。

4、依托先进的优化工具 OptQuest, 结合建立的数学优化模型和统计的历史数据,对堆场大门系统规划和堆场资源配置问题分别进行了研究,并且给出了科学的、符合实际的仿真数据和性能参数。

5、运用 Arena 集成的 VBA 工具实现了模型的自动化,设计了用户友好界面,使堆场物流系统仿真模型的使用更加方便。

6、运用仿真优化方法,在已经建立的二期堆场模型的基础上,结合三期堆场的设计指标,得出大窑湾港区三期工程集装箱堆场物流系统规划的总体方案,并且给出了具体的方案论证。

本文的创新之处在于:将仿真优化的理论有针对性地应用到集装箱堆场物流系统规划中来,结合堆场的生产实际,发展出一整套既符合堆场作业特性又行之有效的研究方法。实践证明,采用这种触类旁通、举一反三的研究方式进行堆场的物流系统规划,可以收到事半功倍的效果。

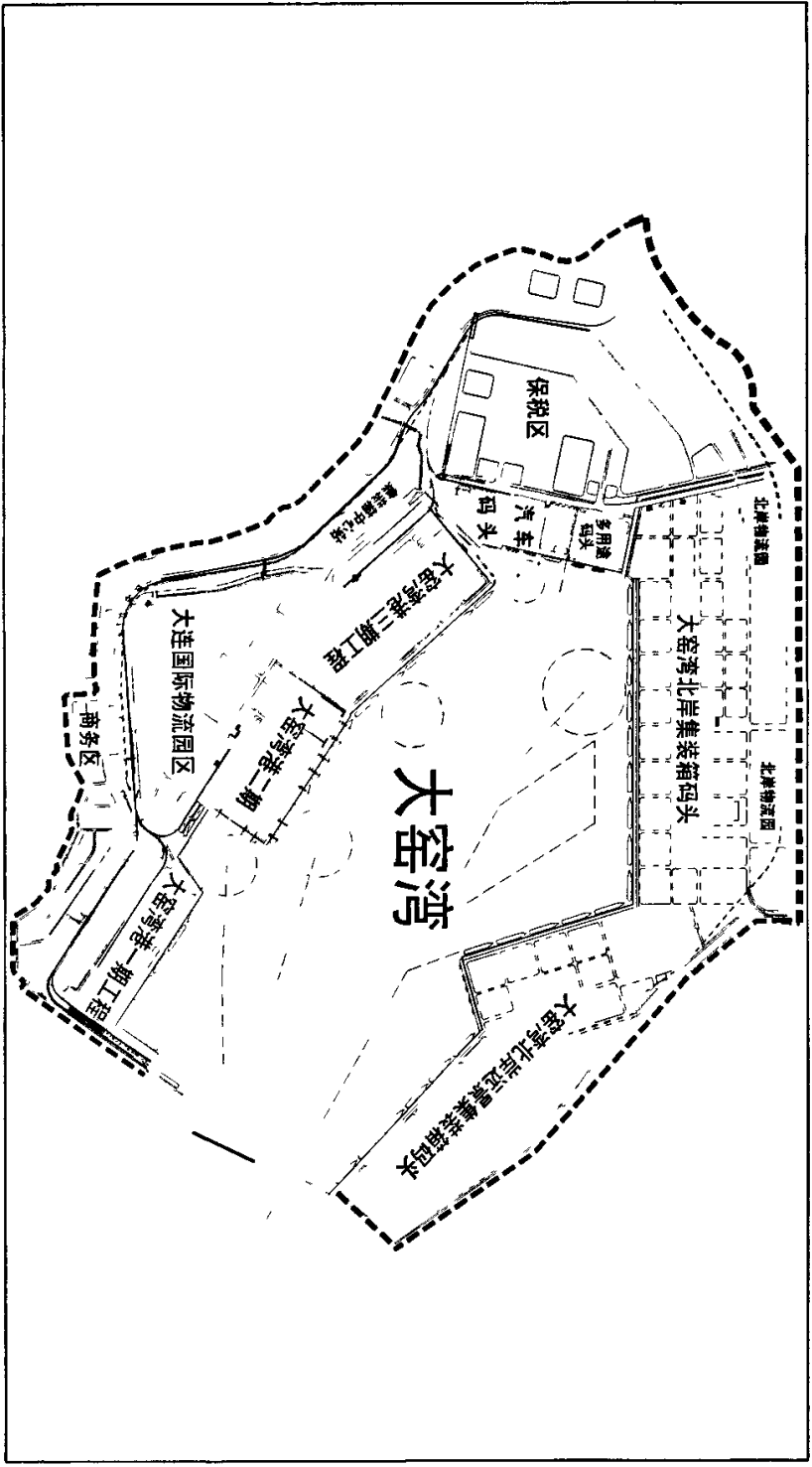
集装箱堆场的物流系统规划是一项系统工程,涉及到码头发展的各个方面,关系到部门、单位和个人的利益,因此,如何切实有效地落实规划将是以后研究的重点内容之一。同时,如何在规划的基础上进行科学的调度,优化堆场的作业管理,也是未来需要开展的重要工作。

参 考 文 献

- [1] 蔡芸. 港口集装箱物流系统仿真和优化方法的研究与应用: (博士学位论文). 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- [2] 程国全, 王华 等物流设施规划与设计. 北京: 中国物资出版社, 2003.9.
- [3] 邢文训, 谢金星 等. 现代优化计算方法. 北京: 清华大学出版社, 2005.9.
- [4] Ballis A, Abacoumkin C. A container terminal simulation model with animation capabilities. *Journal of Advanced Transportation*, 1996, 30(1):37-57.
- [5] Kosan E. Optimizing Container Transfers at Multimodal Terminal. *Mathematical and Computer Modeling*, 2000, 31(10-12): 235-243.
- [6] Ebru K, Bish. A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal. *European Journal of Operational Research*, 2003,144(1):83-107.
- [7] Zhang C. Dynamic crane deployment in container storage yards: [PhD thesis].Hong Kong: Department of Industrial Engineering and Engineering Management, Hong Kong University of Science and Technology, 2000.
- [8] 张维英 林焰 等. 出口集装箱取箱作业优化模型研究. *武汉理工大学学报*. 2006,30(2):314~317..
- [9] 张新艳. 港口集装箱物流系统规则与仿真建模方法的研究与实现: (博士学位论文). 武汉: 武汉理工大学, 2002.
- [10] 杜别安, 孙锡衡. 动态随机循环网络模拟方法及堆石坝体的施工模拟. *水利水电技术*, 1998,(12): 14~16.
- [11] 真虹. 港口生产调度过程优化. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1999.
- [12] Chun JIN, Yongxiang REN, Yoshiyuki HIGUCHI and Hiroshi ITO. Optimum Planning on Material Handling Operation in Container Terminal (3rd Report , Flexible Operation Model on Container Yard). *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1999, Vol.66-642.
- [13] Kim K H, Park K T. A dynamic space allocation method for outbound containers in carrier-direct system. *Proceedings of the 3th Annual International Conference on Industrial Engineering Theories, Applications and practice 2*, 1998: 859-867.
- [14] 计三有,高悦文. 集装箱堆场减少倒箱率方法的研究. *水运工程*. 2006,8(391): 53~60.
- [15] Kozan E, Preston P. Genetic algorithm to schedule container transfers at multimodal terminals. *International Transactions in Operational Research* 6, 1999: 311-329.
- [16] P. Legato, R. M. Mazza, Berth planning and resources optimization at a container terminal via discrete event simulation[J], *European Journal of Operational Research*, vol. 133, 2001, pp. 537-547.
- [17] K. H. Kim, K. M. Lee, H. Hwang. Sequencing delivery and receiving operations for yard cranes in port container terminals [J]. *International Journal of Production Economics*, 2003, 84(3): 283-292.
- [18] S.P. Sgouridis, D.C. Angelides. Simulation-based analysis of handling inbound containers in a terminal. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference [C]*. 1716-1724.
- [19] 大连港设计研究院 编制. 大窑湾港区规划(送审稿). 大连: 2004, 1~4.
- [20] 日本海上集装箱协会,集装箱运输业务手册编委会编.刘鼎铭,王义源译.集装箱运输业务手册(上册). 北京:人民交通出版社,1992.
- [21] 真虹.集装箱运输学. 大连: 大连海事大学出版社, 2002.
- [22] 仲伟仁, 王庚兰. 集装箱码头生产控制系统的设计与实现. *武汉理工大学学报*. 2006. 30(3): 516-519..

- [23] 交通部第一航务工程勘察设计院 编制. 海港工程设计手册.
- [24] 郑大钟, 赵千川. 离散事件动态系统. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [25] 冯允成等. 离散系统仿真. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [26] 吴旭光, 王新民. 计算机仿真技术与应用. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.
- [27] 杨静蕾, 丁以中. 集装箱码头设备配置的模拟研究. 系统仿真学报. 2003,15(8), 1069~1073.
- [28] Publication ARENA-UM001B-ENP. Arena User's Guide. Rockwell Software,2005.
- [29] 赵璐, 金淳, 于越, 可视化交互仿真软件 Arena 的最新进展, 系统仿真技术, 2006, 2(3), 176-180.
- [30] 常刚, 魏生民. 基于组合优化的停机位分配模型研究. 中国民航学院学报. 2006, 24(3), 28~31.
- [31] Pan Yanchun, Zhou Hong, Feng Yuncheng, et al. Modeling and Simulation Optimization Systems Design for Job Shop Problems Based on Arena[C]. Asia Simulation Conf.the 6th Int. Conf. On System Simulation and Scientific Computing (Beijing), 2005, 1393-1397.
- [32] Chun JIN,Y. REN,Y. HIGUCHI and H. ITO, Optimum Planning on Material Handling Operation in Container Terminal (1st Report,Flexible Control and Modeling on Operation Planning), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.65-640,C(1999-12),P4931-4938 (in Japanese).
- [33] Ebru K, Bish et al. Dispatching Vehicles in a Mega Container Terminal. OR Spectrum, 2005, 27(4):491-509.
- [34] 郭媚. 集装箱码头堆场优化管理研究: (硕士学位论文).大连: 大连海事大学, 2006.
- [35] 王剑翔, 孙小明. 集装箱堆场起重机行使成本研究. 起重与运输机械. 2006, (6) :46~49.
- [36] 武振业, 朱连喜. 用 VBA 和 EXCEL 的 ARENA 的仿真输出可视化表达. 计算机应用. 2000, 2(9), 76~78.
- [37] 李涛, 冯允成. 用 Visual Basic 实现对 Arena 仿真模型的控制. 微计算机应用. 2004, 25(7), 503~506.
- [38] 史少华. 集装箱港口物流计算机仿真的研究与应用: (硕士学位论文).北京: 北京航空航天大学, 2003.

附录A 大窑湾港区远景规划图



附录B 堆场模型自动化部分界面与代码

以下是自定义报表输出界面:

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Final Value
Substitute_20Container_WIP	295.14	(Error)	00000	906.00	906.00
Substitute_40Container_WIP	221.08	(Error)	00000	657.00	655.00
Empty Truck_WIP	361.60	(Error)	00000	1061.0	1061.0
20Container_WIP	291.97	(Error)	00000	862.00	862.00
40Container_WIP	218.10	(Error)	00000	564.00	564.00
Full Truck_WIP	326.94	(Error)	00000	967.00	975.00
Position_CD407 NumberBusy	2.0033	(Error)	00000	6.0000	6.0000
Position_CD407 NumberScheduled	100.00	(Error)	100.00	100.00	100.00
Position_CD407 Utilization	0.02003	(Error)	00000	0.0000	0.0000
Tier_CD403 NumberBusy	0.00000	(Error)	00000	0.0000	0.0000
Tier_CD403 NumberScheduled	30.000	(Error)	30.000	30.000	30.000

以下是连接数据库的类代码, 使用 ADO 连接数据库:

```
Public sql As String
Public dbpath As String
Private conn As ADODB.Connection
Public Sub connect()
    Set conn = New ADODB.Connection
    Dim connstring As String
    connstring = "Provider=Microsoft.Jet.OLEDB.4.0;Data Source=" & dbpath & ""
    conn.Open connstring
End Sub
Public Sub exeQuery(rs As ADODB.Recordset)
    rs.CursorType = adOpenKeyset
    rs.LockType = adLockOptimistic
    rs.Open sql, conn, , , adCmdText
End Sub
Public Sub closed()
    conn.Close
End Sub
```

以下是 VBA 内部调用 Arena 的代码:

RunBeginSimulation()事件

该事件为 check 模型之后, 第一次仿真复制之前, 以下编写的代码所实现的功能都在该事件中完成。

设置 create 模块产生实体的最大数量

```
Dim rss As ADODB.Recordset
Set rss = New ADODB.Recordset
```

```
Dim DBCONN As CDBConnect
Set DBCONN = New CDBConnect
```

连接数据库的 distribution 表。

```
DBCONN.dbpath = ".\parameters_in.mdb"
DBCONN.sql = "select * from distribution"
DBCONN.connect
DBCONN.exeQuery rss
```

```
Dim createmod1, createmod2, createmod3, createmod4 As Module
Dim createindex1, createindex2, createindex3, createindex4 As Long
```

"Max_emptin_g" 和 "Max_fullin_g" 是模型中的变量名, 将它们的值赋给已经定义的 Long 型变量 createindex1 和 createindex2; 之后将 distribution 表的第 0 和 1 列的数据分别赋给 createindex1 和 createindex2, 这样就完成了数据库与模型变量之间的数据转换, 以下类似; 最后关闭数据库。

```
createindex1 = g_SIMAN.SymbolNumber("Max_emptin_g")
If Not rss.EOF Then
    g_SIMAN.VariableArrayValue(createindex1) = rss.Fields(0).value
End If
createindex2 = g_SIMAN.SymbolNumber("Max_fullin_g")
If Not rss.EOF Then
    g_SIMAN.VariableArrayValue(createindex2) = rss.Fields(1).value
```

设置实体产生的 Schedule 表。

连接数据库的 schedule_1 表。

```
DBCONN.dbpath = ".\parameters_in.mdb"
DBCONN.sql = "select * from schedule_1"
DBCONN.connect
DBCONN.exeQuery rss
```

定义变量。

```
Dim Schedmod1, Schedmod2, Schedmod3, Schedmod4 As Module
Dim schedindex1, schedindex2, schedindex3, schedindex4 As Long
```

拆分长字符串, 将字符串中的各个值赋给模型中的 Schedule 表, 之后关闭数据库。

```
Dim cnt4 As Integer
Dim sss4 As Integer
sss4 = 0
cnt4 = 0
Do
    sss4 = InStr(sss4 + 1, str4, ",")
    cnt4 = cnt4 + 1
Loop While sss4 > 0
For i4 = 1 To cnt4 - 1
    dura = "Duration(" + Str(i4) + ")"
    Schedmod4.Data(dura) = 1
    endl4 = InStr(start4, str4, ",")
    i4 = endl4 - start4
    capa = "Capacity(" + Str(i4) + ")"
    Schedmod4.Data(capa) = CInt(Mid(str4, start4, i4))
    start4 = endl4 + 1
Next i4
DBCONN.closed
```

各个 decide 的概率率设置、各个 Route 的时间设置、各个 transporter 的速度设置、各个 Delay 的时间设置同上。

攻读硕士学位期间发表学术论文情况

发表论文:

[1] 苗明, 张涛, 宋科. 集装箱港口交通规划研究. 物流技术(中国物资流通学会物流技术经济委员会主办). 2005, 159(12), 23~25

参加项目及研究成果:

1、企业合作项目——大窑湾南岸港区道路交通组织规划, 2005 年 3 月——2005 年 7 月, 主要承担数据采集, 数据分析, 仿真建模等工作

2、企业合作项目——集装箱码头物流决策支持系统开发, 2005 年 11 月——2006 年 9 月, 主要承担堆场系统的数据分析, 仿真建模, 优化分析, 模型自动化等工作

致 谢

感谢导师苗明副教授，本文是在苗老师的悉心指导下完成的。从论文的选题到研究方案的确定，以及在整个论文研究过程中，苗老师都给予了大量的帮助，倾注了大量的心血。苗老师渊博的知识，严谨的治学态度，对学生的循循善诱，谆谆教诲，将成为我人生中最宝贵的财富，使我终生受益。借此机会，谨向苗老师表示衷心的感谢并致以崇高的敬意。

在论文的写作过程中，得到了管理学院系统工程研究所的金淳副教授、大连港设计研究院的邹广陆高级工程师、口岸物流科技公司的曹阳项目经理等相关专家的大力支持与协助，在此表示衷心的感谢。

在论文的写作过程中，还得到了工程机械研究所的屈福政老师、高顺德老师、王欣老师、滕儒民老师以及工程所里其他各位老师的热情帮助，在此一并表示衷心的感谢。

特别要感谢大连理工大学物流研发中心项目组的郭晓霞、霍林、李巍等几位同学，感谢你们对我工作的全力配合，感谢你们为整个项目所付出的辛苦劳动。

感谢在一起学习生活的同学们和朋友们，感谢你们平时对我的真挚关怀和热情帮助，你们也是我人生中最宝贵的财富。

最后，我还要感谢我的父母和妹妹对我生活上和学习上的无微不至的关怀，是他们的爱给予了我无限的动力去勇敢的面对各种挑战。

谨以此文献给所有关心、爱护、帮助我的师长、同学和朋友们！