

基于排队论的集装箱码头泊位与装卸 机械配置仿真研究

Simulation on Integrated Berth and Handling Machinery Assignment of Container Terminal Based on Queuing Theory

学科专业：水利工程

研 究 生：王熹芳

指导教师：李世森 副教授

天津大学建筑工程学院

二零一三年十二月

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，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 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 签字日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名： 导师签名：

签字日期： 年 月 日 签字日期： 年 月 日

摘要

在规模经济的推动下，船舶不断朝着大型化发展，港口建设不断朝着深水化发展，集装箱运输量不断地扩大。伴随着港口吞吐量的增加，增加装卸设备数量可以提高泊位装卸效率，减少船舶在港时间，减少船方在港成本，同时增加港口吞吐量，使港方获得更多的经济效益。但是当装卸设备数量达到一定程度后，船舶在港时间将不再继续减少，为了使船舶平均在港时间继续减少，港口只有增加新的泊位，但是装卸设备和泊位的增加意味着港方投资的增加。因此，本文通过确定港口最佳泊位数和最优装卸机械数量，实现了港、船双方综合效益的最大化，为港口的扩容改造，规划新建提供参考。

本文首先简要地介绍了集装箱码头的装卸机械、堆场以及装卸工艺，说明了排队论在集装箱码头装卸系统中的应用，并通过理论推导，求解出装卸系统中的各项评价指标。之后，介绍了计算机仿真技术，并阐述了仿真技术在集装箱码头系统中的应用。本文运用仿真软件 Arena 建立了集装箱码头装卸系统的仿真模型，介绍了建立模型的流程，详细叙述了各个作业系统中的模块，给出了各模块中仿真参数的确定方法以及最终结果。通过对仿真模型进行试验，得出了以下结果。

当泊位数固定，单泊位岸桥数为最优岸桥数时，以船舶平均在港时间为主要控制条件，以 AWT/AST 为次要控制因素，通过设计不同的场桥数和集卡数的组合，按照某一特定的选取原则，得到了不同设计年吞吐量情况下的最优场桥数和集卡数，并对该结果进行了分析。当泊位数不定时，在泊位数和单泊位岸桥数最优联合配置的基础上，进一步进行了泊位、岸桥、场桥、集卡的联合配置，从而得到了泊位与装卸机械的最优联合配置结果。

最后阐述了本文研究中存在的一些缺点和不足，并指明了进一步研究的方向。

关键词： 排队论 场桥数 集卡数 泊位与装卸机械联合配置 计算机仿真
船舶平均在港时间 AWT/AST

ABSTRACT

Driven by economies of scale, the ship size enlarges, the container traffic expands, and the deep water channel becomes the trend for large ports' development. With the growth of the terminal throughput, increasing the number of handling machineries will improve the handling ability of single berth, decrease the total stay time for waiting, loading and unloading at berth, thus decrease the cost for ship owners. However, when the number of handling machineries reaches a threshold, the average time of a ship at port will no longer reduce. In order to decrease the stay time of ships, the port has to construct new berths and matching handling machineries, which means a large sum of port's investment. Therefore, this thesis determines the appropriate number of berths and matching handling machineries, so as to maximize the effectiveness for both port and ship, and furthermore provide a reference for the port's renovation, expansion and future planning.

In this thesis, firstly, a brief introduction to the container terminal handling machinery, yard and handling technology is made. The application of queuing theory in the container terminal handling process is detailedly explained. And through theoretical analysis, evaluation criteria for the container terminal handling system are proposed. Secondly, a numerical simulation model is established using the simulation software Arena to research the container terminal handling system. The thesis makes a detailed description of each operating modules, and gives a method for determining simulation parameters. The following conclusions can be drawn by the numerical simulation model.

Assuming that the number of berths is fixed, the quay crane number of single berth is optimal, the average stay time of ships being the primary control factor and AWT/AST the secondary control factor, different combinations of gantry crane number and inner truck number are designed. According to certain selection principle, the thesis figures out the optimal gantry crane number and inner truck number for a given designed annual throughput of the container terminal. When the number of berths is not fixed, based on the appropriate berth number and quay crane number of single berth, the joint configuration of the berth number, the quay crane number, the

yard crane number and the inner truck number is conducted. Thereby, the optimal combination of berth number and handling machinery number is obtained.

At last, the shortcomings in this thesis are expounded, which indicates the direction of subsequent research.

KEY WORDS: queuing theory, yard crane number, inner truck number, integrated berth and handling machinery assignment, computer simulation, the average time of ship at port, AWT/AST

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 问题的提出	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 数学模型领域中该类问题的研究现状	4
1.2.2 计算机仿真领域中该类问题的研究现状	5
1.2.3 存在的问题	6
1.3 论文结构及主要内容	6
第二章 集装箱码头装卸系统概述及其中的排队论理论	8
2.1 集装箱码头装卸系统	8
2.1.1 集装箱码头装卸系统组成	8
2.1.2 集装箱码头装卸工艺	10
2.2 集装箱码头装卸系统中的排队论	11
2.2.1 排队论概述	11
2.2.2 船舶到港规律分布形式	12
2.2.3 船舶排队的服务规则	14
2.2.4 船舶服务时间分布形式	14
2.2.5 集装箱码头装卸系统 $M/M/N$ 模型分析及参量计算.....	15
2.3 集装箱码头装卸系统评价指标	16
第三章 系统仿真技术的基本理论.....	19
3.1 系统仿真技术简介	19
3.2 仿真软件的发展	20
3.3 仿真软件 Arena 简介.....	22
3.4 仿真技术在集装箱码头系统中的应用	24
第四章 集装箱码头装卸系统仿真模型的建立	25
4.1 集装箱码头装卸流程分析	25
4.2 仿真模型作业系统的组成	26
4.3 仿真模型分析	34
4.4 仿真参数的分析和确定	36

4.4.1 船舶到港规律和船型	36
4.4.1.1 到港船舶船型分布	36
4.4.1.2 船舶到港规律	39
4.4.2 天气条件	39
4.4.3 航道条件及通航规律	39
4.4.4 锚地规模	39
4.4.5 车道	40
4.4.6 泊位组合	40
4.4.7 岸桥数量和装卸效率	40
4.4.8 龙门起重机（场桥）数量和装卸效率	40
4.4.9 集装箱卡车	41
4.4.10 堆场容量	41
4.5 仿真运行时间的选取	42
第五章 仿真结果分析.....	43
5.1 仿真结果评价指标的选取	43
5.2 单泊位最优场桥数和最优集卡数仿真结果分析	44
5.2.1 场桥数对船舶平均在港时间的影响分析	51
5.2.2 集卡数对船舶平均在港时间的影响分析	54
5.2.3 AWT/AST 值分析.....	58
5.2.4 最优场桥数和集卡数	59
5.3 泊位、岸桥、场桥、集卡联合配置方法	60
5.4 泊位与装卸机械最优联合配置结果及结果分析	61
第六章 结论与展望.....	63
6.1 结论	63
6.2 展望	63
参考文献.....	65
发表论文情况说明.....	69
致 谢.....	70

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

我国的港口集装箱运输历史迄今已有近 30 年了，1978 年 9 月 25 日，上海至澳大利亚集装箱班轮航线的正式开通，标志着我国国轮没有海上国际集装箱航线运输历史的结束。天津港是我国最早试行国际集装箱运输的港口。天津港集装箱码头，作为我国“六五”和“七五”期间的重点建设项目，至 1985 年底，已建设有 7 个集装箱专用泊位，吞吐量为 70 万国际标准箱（TEU），在当年居全国首位。

上世纪 80 至 90 年代，我国建立了以上海为枢纽的沿海支线（上海至大连、天津、青岛），内河支线（上海至无锡、武汉、南通等），公路支线（上海至苏州、无锡、杭州、嘉兴、常州等），铁路支线（上海至郑州、西安、成都等），完善了国际集装箱集疏运系统，逐渐形成了既符合国际惯例又符合我国基本国情的正规化国际集装箱运输管理体系和现代化信息管理系统。

从 20 世纪末至今，我国集装箱码头的建设得到了快速发展，集装箱运输的软硬件设施快速向世界高水准集装箱码头靠拢，而港口航道水深成为制约港口建成国际枢纽港的瓶颈。因此，为适应集装箱船舶的大型化、深水化，全国各港口都在付诸实际行动攻克制约大型集装箱船舶进出航道的瓶颈问题^[1]。

2011 年 10 月 14 日，上海港外高桥港区六期工程通过国家验收并正式投产使用，上海港外高桥港区是以集装箱运输为主的大型综合港区，是上海国际航运中心的重要组成部分。至 2015 年，上海国际航运中心将初步建成，从而进一步确定上海国际集装箱枢纽港的地位。深圳将与香港合作共筑亚太国际航运中心，香港未来的航运、港口及物流的发展，也将与珠海地区的港口更加紧密地实现优势互补、共创繁荣和发展之路。2011 年 3 月 22—23 日，深圳港大铲湾港区集装箱码头一期工程 1#~3#泊位工程通过国家验收，并正式投产使用，至此深圳港大铲湾港区一期工程建设全部完成。

在我国对外开放的不断深入，全球经济一体化进程加快以及国际贸易日益频繁的大环境中，我国的港口集装箱运输事业得到了又快又稳的发展。2011 年，全国港口全年完成集装箱吞吐量 1.64 亿标箱，比上年增长 12%。其中，沿海港

口完成 1.46 亿标箱，比上年增长 11.3%；内河港口完成 1736 万标箱，比上年增长 18.3%。表 1-1 给出了近 10 年来全国主要沿海地区的港口码头泊位和集装箱吞吐量的情况^[2]。

表 1-1 全国主要沿海地区的港口码头泊位和集装箱吞吐量变化表

地区	统计参数	年份					
		2002 年	2004 年	2006 年	2008 年	2010 年	2011 年
天津	码头泊位数 (万吨级以上/ 合计)	54/94	52/98	65/119	75/128	95/140	98/143
	集装箱吞吐量 (万 TEU)	241	382	595	850	1009	1159
上海	码头泊位数 (万吨级以上/ 合计)	113/330	120/628	129/616	137/600	150/602	150/606
	集装箱吞吐量 (万 TEU)	861	1455	2172	2801	2907	3174
辽宁	码头泊位数 (万吨级以上/ 合计)	88/253	89/275	124/297	139/314	153/334	161/345
	集装箱吞吐量 (万 TEU)	175	299	468	744	969	1200
江苏	码头泊位数 (万吨级以上/ 合计)	26/100	27/100	29/103	31/98	41/118	43/125
	集装箱吞吐量 (万 TEU)	21	51	131	301	391	488
浙江	码头泊位数 (万吨级以上/ 合计)	59/867	71/958	98/1075	128/1042	159/1095	173/1082
	集装箱吞吐量 (万 TEU)	207	433	433	1148	1404	1584
广东	码头泊位数 (万吨级以上/ 合计)	147/1244	168/1108	194/1164	217/1646	245/1764	260/1783
	集装箱吞吐量 (万 TEU)	1210	1990	2838	3620	3868	4103

资料来源：中国交通年鉴

1.1.2 问题的提出

在规模经济的推动下，船舶不断朝着大型化发展，港口建设不断朝着深水化发展，集装箱运输总量不断地扩大，世界集装箱港口吞吐总规模和单港口、单泊位处理量也在不断地扩大之中。一个集装箱港口想要发展成为集装箱国际班轮航线中的干线港，必须保证具有相当规模的集装箱吞吐量，同时，港口自身也有规

模经济方面的要求,因此,集装箱港口都在想法设法地增加自己的集装箱吞吐量。这必然要求港口码头的泊位岸线和装卸设备也随之向大型化发展,与此同时,对港口码头的作业效率也提出了更高的要求。

为了在日益激烈的竞争中取胜,我们在开发深水泊位、增加配套装卸设备的同时,也要合理安排这些资源设备。新建泊位、增加装卸设备等必然导致港口建设费及管理费用的增加,而怎样运用较少的成本获得较多的经济收益才应该是各码头关注的首要问题。这就要求我们准确把握港口的吞吐能力,通过合理安排港口泊位数量和港口配套机械数量,提高单泊位作业能力,提高港口服务质量。目前,为了提高单泊位作业能力,提高港口服务质量,我国的集装箱港口从原先的单纯依靠增加泊位数来扩大规模的粗放型经营状态,转变为以提高单泊位装卸效率为目的,讲求绩效型的集约型经营状态。

伴随着港口吞吐量的增加,增加装卸设备数量可以提高泊位装卸效率,减少船舶在港时间,减少船方在港成本,同时增加港口吞吐量,使港方获得更多的经济效益。但是当装卸设备数量达到一定程度后,船舶在港时间将不再继续减少,为了使船舶平均在港时间继续减少,港口只有增加新的泊位,但是装卸设备和泊位的增加意味着港方投资的增加。因此,本文就装卸机械数量问题展开讨论,研究泊位数固定时集装箱港口装卸机械配置问题,在已知最优单泊位岸桥数的基础上得到最优场桥数和集卡数,以及研究了泊位数和装卸机械数量的联合配置问题。通过确定港口最佳泊位数和最优装卸机械数量,实现了港、船双方综合效益的最大化,为港口的扩容改造,规划新建提供参考。

1.2 国内外研究现状

近年来,如何合理地进行泊位配置、港口装卸机械配置已经得到了越来越多的国内外学者的关注。目前,对于这类问题,主要有以下三种分析方法:一是给出约束条件,选定目标函数,然后运用某种算法建立数学模型,并进行求解;二是根据港口实际情况建立计算机仿真模型,输入模型参数,模拟出泊位利用率、船舶在泊时间、待泊时间、平均在港时间、港口装卸机械的利用率等相关参数,进行分析;三是将数学分析方法和仿真分析方法结合起来分析港口实际问题。数学模型的发展历史要长于计算机仿真技术的发展历史,因此,运用数学模型对港口泊位和装卸机械问题进行的研究要多于使用计算机仿真解决港口泊位和装卸机械问题,研究的深度也更加深入,内容更加完善。Steenken、Stefan 和 Robert 对于过去 40 年集装箱港口作业系统的研究进展和研究成果作了比较全面系统地总结和归纳^[3]。

1.2.1 数学模型领域中该类问题的研究现状

(1) 泊位配置方面

泊位配置问题主要可分为泊位数量问题和泊位分配问题两个研究方向。研究泊位数量问题的主要目的是在已知码头年吞吐量情况下给出最合理的泊位吨级以及各个吨级泊位的数量；研究泊位分配问题的主要目的是为不同载重吨位、不同到港规律的船舶制定泊位分配计划，根据目标函数的不同，寻求最优的分配方案。

Edmond 等人首次利用排队论模型对码头泊位分配和货物处理问题进行了讨论^[4]。采用先到先服务（FCFS）策略，Lai 等人提出了一种针对泊位分配问题的启发算法，以此为基础，对不同的评价标准（船舶平均等待时间最短、平均停靠时间最短和平均泊位利用率最大）下的泊位分配方案进行了评估^[5]。Imai 等人通过有无 FCFS 策略对比分析发现，不考虑 FCFS 策略往往能够获得较优的泊位分配方案；其次，在此基础上，建立了最小化船舶在港时间和船舶靠泊顺序偏离的分配模型^[6]。以上研究均属于静态调度问题，即假设在调度开始时，所有船舶已经到港等待，而事实上，船舶往往在码头生产作业过程中不断地到达，属于动态调度问题。Imai 等人改进了文献[6]中的静态模型为动态模型，其优化目标是 minimized 船舶在港时间，并采用基于启发式算法的拉格朗日进行求解^[7,8]。考虑到部分泊位水深条件不一致，Nishimura 等人进一步拓展了文献[8]中的水深约束条件^[9]。Monaco 等人也研究了类似的问题，只是在模型求解时改进了拉格朗日启发式算法^[10]。赵智帮以船舶、泊位、货物三者天所需费用之和最小为目标函数，用排队理论推算港口最佳泊位数，并用天津港 1980 年件杂货码头统计资料进行了验证^[11]。张一诺从系统的观点出发，运用排队论等原理，结合我国实际情况，以泊位、船舶和船载货物周转的总费用最少为目标，提出了确定港口最佳泊位数的通用计算方法^[12]。张维中以集装箱码头为例，应用排队论理论折中解决了泊位数量和船舶待泊时间之间的矛盾^[13]。

(2) 港口装卸机械配置方面

如何缩短船舶的在港时间，降低码头、船东及货主等的单箱成本，一直都是各港口关注的焦点。国内外众多学者也就这一目的，进行了大量关于港口装卸机械配置问题的研究。目前，关于港口机械配置问题，主要有以下几个研究方向：岸桥调度优化、岸桥分配、装卸机械联合调度优化、装卸机械优化配置等。

Lee 等人在 2008 年对一条船舶内多个船舱之间岸桥调度问题建立了新的模型，证明了在不能交叉约束下的岸桥调度问题是 NP 完全问题，并提出了遗传算法求解^[14]。Meisel 等人在 2010 年研究了当贝位内集装箱需要翻倒时，如何安排

岸桥的作业顺序的优化问题,问题的实质是给集装箱的作业排序,对上述问题建立了数学模型并设计了随机自适应贪婪算法求解,算例结果证明在舱内直接倒箱比应用岸桥吊具双循环能获得更优的解^[15]。徐斌在单船岸桥计划上提出了作业段的概念,一个作业段可以是一个舱、一个贝、也可以是一个贝里的一部分^[16]。赵雪静将作业段进一步明确为贝位内集装箱的一小部分,目的是为了避免当相邻贝位的集装箱共用一个舱盖时,以贝位作为装卸单元的不可操作性;并设计了改进蚁群算法对单船集装箱作业段调度问题进行了求解^[17]。Meisel 等人^[18]在 2011 年对单船岸桥调度问题建立了评价基准问题,以便于不同的模型和算法进行优劣比较。论文按照问题规模,岸桥属性、任务属性等现实因素设计了 400 个算例,通过建立基于贝位区域、贝位和集装箱组的三种调度模型,用分枝定界法^[19]对这些算例进行了求解,验证了算例的可行性。

Daganzo 在 1989 年研究了静态岸桥分配与岸桥调度的集成问题,论文假定有一个船舶的集合,且所有船舶的尺寸相同,提出了如何对这些船舶分配岸桥并对岸桥在各条船舶的贝位间调度的解决方案^[20]。1990 年, Peterkofsky 等人将此问题与并行机调度问题相类比,又提出了分枝定界算法^[21]。2009 年, Tavakkoli 等人对岸桥分配和岸桥调度问题建立了一个新的混合整数规划模型,并设计了遗传算法求解^[22]。

计明军等人考虑了在同时装卸集装箱作业的情况下如何安排集卡运输线路的问题,建立了以集卡的运输时间和岸桥作业时间最短的优化模型,并设计求解此优化模型的进化算法,进行了数值仿真试验,在合理时间内获得了最优数值结果^[23]。Wang 等人在考虑场桥作业量的均衡优化情况下,对一艘船舶上不同任务间的岸桥调度问题提出了模型和算法^[24]。Petering 等人 2009 年通过构建了一个动态离散事件的模拟模型,来研究集装箱堆场箱区的长度和场桥布局系统对岸桥作业效率的影响^[25]。2009 年,陈超等人研究了为单船作业的岸桥、集卡和场桥的装卸机械优化配置问题,以时间为度量,综合考虑了泊位作业收益最大和装卸机械的闲置成本与整体运行费用最低,来确定各类装卸机械的配置数目,并运用数学分析的方法构建了描述集装箱码头泊位系统生产运作的非线性整数优化模型^[26]。

1.2.2 计算机仿真领域中该类问题的研究现状

泊位配置和港口装卸机械配置问题涉及众多的变量和约束条件,传统的解析方法在处理模型和计算的复杂性方面,往往存在模型过于简化、计算过于复杂的问题。因此,部分学者开始利用计算机仿真技术,解决这类问题。

(1) 泊位配置方面

Legato 等人运用可视化的 SLAM 语言, 建立了一个与集装箱船只到达、靠泊和离泊过程相关的排队网络模型, 研究码头泊位规划问题; 但是由于排队机制的复杂性, 资源分配策略的多样性, 通过解析方法很难获得问题的精确解; 他们采用流程图方法建立了一个仿真模型, 进行离散事件仿真, 获得稳态仿真结果, 表明计算机仿真是模拟码头排队系统的有效方法^[27]。Nam 等人采用不同的作业策略, 优化港口泊位和岸桥数量大小^[28]。

(2) 港口装卸机械配置方面

Canonaco 等人基于事件图的方法开发了仿真模型, 在装卸作业分配和岸桥调度的问题中考虑了跨运车与岸桥的协调调度^[29]。Legato 等人在 2010 年研究了一条船舶上的岸桥调度和集卡调度的联合优化问题, 建立了仿真优化模型, 在仿真模型求解中用模拟退火算法寻求最优的调度方案^[30]。杨静蕾等人构建了包括锚地、泊位、岸桥、场桥和集卡的动态多级排队网络, 运用仿真技术来描述集装箱码头装卸系统, 通过对系统输出指标的分析得出上海外高桥集装箱码头的最优机械配比和最优岸桥数^[31]。

1.2.3 存在的问题

从上述的国内外学者们的研究成果中能够看到, 学者们已经就港口泊位和装卸机械的配置问题进行了相当深入的研究, 但是由于这类问题本身具有一定的复杂性, 在某些方面的研究还存在一些不足, 值得进行进一步的研究:

(1) 研究成果的通用性不足, 大部分学者都是就某一具体的港口进行研究, 得出优化结论, 其成果缺乏通用性, 不适用于其他的港口。

(2) 在确定研究规模方面, 大部分学者仅单一研究港口泊位数量或是装卸机械数量问题, 而没有将两者结合起来研究, 综合考虑泊位数和装卸机械数量的联合配置。

(3) 数学模型与计算机仿真结合不够紧密, 只有少数几位学者将数学模型与计算机仿真结合起来进行了研究, 但也只是就某一具体港口。

1.3 论文结构及主要内容

本文通过运用排队论理论和计算机仿真技术, 研究了集装箱码头装卸系统中泊位数和装卸机械数量的配置问题。对于已建港口, 在泊位数固定, 单泊位岸桥数已知的情况下, 继续给出最优的场桥数和集卡数; 对于拟建港口, 研究了泊位数和装卸机械联合配置的问题。本文建立了多种设计年吞吐量情况下的具有通用

性的仿真模型，得出了结论，在集装箱码头的建设和扩建中，能够为管理者提供相应的决策方案。

本文的基本结构及主要内容如下：

第一章：绪论。首先介绍了本文的研究背景、选题意义，之后阐述了港口泊位配置和装卸机械配置方面的国内外研究现状，指出研究中存在的一些不足，最后介绍了本文的结构及研究内容。

第二章：集装箱码头装卸系统概述及其中的排队论理论。本章首先就本文的研究内容，简要地介绍了集装箱码头的装卸机械、堆场以及装卸工艺。之后，阐述了集装箱码头装卸系统中的排队论理论，最后说明了运用排队论理论求解出装卸系统中各项指标的方法，为建立计算机仿真模型奠定了理论基础。

第三章：系统仿真技术的基本理论。本章首先简要介绍了系统仿真的基本理论，之后，阐述了仿真软件的发展历程，并对本文所用的仿真软件 Arena 进行了介绍，最后说明了仿真技术在集装箱码头系统中的应用。

第四章：集装箱码头装卸系统仿真模型的建立。首先对装卸系统流程进行了分析，之后根据分析结果运用 Arena 建立了仿真模型，最后对仿真参数和仿真运行时间进行了分析与确定。

第五章：仿真结果分析。在港口泊位数固定，单泊位岸桥数已知的情况下，通过设计不同的场桥数和集卡数组合，以船舶平均在港时间和 AWT/AST 两个指标值为控制条件，得到了不同设计年吞吐量下的最优场桥数和集卡数，并对结果进行分析。最后进行了泊位数、岸桥数、场桥数、集卡数联合配置的仿真分析，得到了最优的联合配置结果。

第六章：总结与展望。总结了本文中的一些不足之处，指出了进一步研究的方向。

第二章 集装箱码头装卸系统概述及其中的排队论理论

集装箱码头是集装箱物流链中的主要节点,将集装箱海运、集装箱铁路运输、集装箱公路联系起来,是海运与陆运的连接点,是现代集装箱多式联运的枢纽和转换点。一个完备的集装箱码头包含了港池、锚地、进港航道、泊位、装卸机械、堆场、道路、货运站等与码头生产密切相关的设备和设施。其中,泊位、装卸机械、堆场等设备组成了集装箱码头装卸系统。本章首先介绍了集装箱码头装卸系统,主要介绍了装卸机械、堆场和装卸工艺。之后,着重阐述了集装箱码头装卸系统中的排队论理论,最后说明了运用排队论理论求解出装卸系统中各项指标的方法,为建立计算机仿真模型奠定了理论基础。

2.1 集装箱码头装卸系统

2.1.1 集装箱码头装卸系统组成

(一) 泊位 (berth)

泊位是港区内供船舶进行安全停靠和装卸作业所需的水域和相应设施的场所。泊位除了要有足够的水深、岸线长度来供集装箱船停靠及进行装卸作业外,还要有高强度的系缆柱及护轮坎来保证大型集装箱船的安全作业。因此,泊位的主要参数有泊位设计水深、泊位长度、泊位吨级等。

集装箱码头泊位的布置形式主要有突堤式、挖入式和顺岸式三种。突堤式能够充分地利用深水岸线,但码头前沿距后方堆场较远,降低了港区内的水平运输效率。挖入式有利于作业面的展开,但是工程耗资巨大。随着集装箱运输业的快速发展以及集装箱船舶的大型化,集装箱码头必须要有良好的适应性。集装箱码头需要集中布局,并形成规模化经营,同时需要大面积的堆场,因此,现代化集装箱码头一般布置成大顺岸的形式。这种形式岸线长度通常在 1km 以上,能够布置三个及以上的泊位,形成泊位组。这种趋势被称为泊位组化^[32]。

(二) 堆场 (yard)

堆场是集装箱码头堆放集装箱的场地,是一种“通过性堆场”,它的主要作用是作为进口集装箱的短期存放场所以及出口集装箱的货物集中场所,因此集装箱在堆场上不能长期堆存,否则就可能引起码头堆场的堵塞。为了提高码头的作业效率,堆场一般又可以具体地分为前方堆场和后方堆场。

(1) 前方堆场布置在码头前沿与后方堆场之间, 用于出口箱和进口箱的临时堆放, 以加快装卸船的作业效率。

(2) 后方堆场紧靠着前方堆场, 是码头堆存集装箱的主要部分, 用于堆放和保管各种集装箱。按箱物管理和堆场作业要求, 后方堆场通常还可以进一步划分为重箱箱区、空箱箱区、冷藏箱区、特种箱箱区和危险品箱箱区等等。集装箱码头因陆域面积的大小不同, 有的将堆场明确地分为前方堆场和后方堆场, 有的却只是作大致划分, 并无明确分界线。

集装箱在堆场内是按场箱位进行编码的。场箱位可以表示集装箱在堆场内的具体物理位置, 场箱位号由箱区、位(贝)、排(列)、层组成。例如, A10122表示集装箱在 A1 箱区 01 贝位第 2 排第 2 层^[33]。

箱位是根据标准集装箱的大小在集装箱码头堆场上划定的一定的区域, 一个箱位中集装箱堆垛的数量称为层。多个连续的箱位组成了贝位, 一个贝位中纵向的箱位称为排(或列)。一般来说, 堆放 20 英尺标准集装箱的贝位称为小贝, 而两个连续的小贝可以用来堆放 40 英尺的标准集装箱, 称为大贝。多个连续的贝位又组成了街区, 街区中还设有进行集装箱装卸的机械, 包括轨道式龙门起重机及轮胎式龙门起重机等。而多个街区最终组成了集装箱堆场的箱区。

(三) 装卸机械(handling machinery)

集装箱码头装卸机械可以分为岸边装卸机械和场地装卸机械两种。其中, 岸边装卸机械主要包括: 岸桥(集装箱装卸桥)和多用途门机起重机等; 场地装卸机械主要包括: 底盘车、叉车、正面吊运机、集装箱跨运车、集装箱卡车(集卡)以及场桥(轮胎式龙门起重机和轨道式龙门起重机)。这里, 主要介绍岸桥和场桥。

岸桥是集装箱装卸船作业的通用设备, 也是集装箱装卸工艺中的“龙头”设备, 码头泊位能够接纳的最大集装箱船型在很大程度上受到其型号和主要技术参数的限制。岸桥的主要结构组成包括金属结构部分、起升机构部分、小车行走部分、大车行走部分、俯仰结构部分以及机房、司机室。其中, 金属结构部分又包括岸桥的门架、臂架、拉杆等, 臂架部分又包括海侧臂架、陆侧臂架和中间臂架三部分。起升结构部分通常采用简单的卷绕系统, 小车行走部分通常采用全绳索牵引。当岸桥移动时, 为了船舶和航道的安全, 海侧臂架将会仰起, 不同的岸桥之间不能交叉移动。

现行的普通单小车岸桥的台时效率为 25~30 自然箱, 折合为标准箱为 35TEU/h~45TEU/h^[32]。集装箱船舶的日益大型化使得船运公司和集装箱码头公司都对船舶的装卸效率有了更高的要求。为了适应这种高效装船的需求, 双小车岸桥、双 40 英尺岸桥和双 40 英尺双小车岸桥等也应运而生。

场桥是集装箱码头堆场对集装箱进行装卸、搬运和堆垛的专业设备，场桥分为可分为轮胎式龙门起重机和轨道式龙门起重机两种。

轮胎式龙门起重机的主体结构包括大梁、腿柱、底梁。起重机左右两片门框分别安装在底梁上，采用法兰螺栓连接各个部件。主要机械机构有小车行走机构、大车行走机构和起升机构等。轮胎式龙门起重机大车行走时可作 90 度直角转向，转向方式可分为就地轮胎转向和液压支腿转向，为了保证其直线行走采用定向装置。集装箱专用码头轮胎式龙门起重机的起重量一般是 40.5 吨，跨距一般为 6 列集装箱 1 条车道的宽度，起升高度通常取 12 米，即集装箱堆层高度为堆 4 过 3^[34]。

轨道式龙门起重机的主体结构包括（带悬臂或不带悬臂的）门架、门腿以及门腿下的横梁。起重机按悬臂进行划分，一般可分为无悬臂梁式龙门起重机、单悬臂式龙门起重机和双悬臂式龙门起重机三种。其中，以双悬臂式轨道式龙门起重机跨度最大，堆高最高。门架下可跨 10-20 列集装箱，悬臂下可跨 3-4 列集装箱，堆高可达堆 5 过 6。

2.1.2 集装箱码头装卸工艺

所谓集装箱码头装卸工艺是指集装箱码头公司在生产过程中实现集装箱位移的方法或者程序。各个集装箱装卸机械和作业方式的组合体，构成了集装箱装卸工艺方案。集装箱码头的装卸工艺方案主要有底盘车装卸工艺方案、跨运车装卸工艺方案、轮胎式龙门起重机装卸工艺方案和轨道式龙门起重机装卸工艺方案等。

（一）底盘车装卸工艺方案

底盘车装卸工艺方案最早应用于美国海陆公司，是一种集装箱不落地的作业方式。其工艺流程为：船→桥吊→底盘车→堆场，即在岸边用集装箱装卸桥将集装箱卸到底盘车上，底盘车开到场地排放，不卸车。出栈时，底盘车可以将集装箱直接送至客户门上。

底盘车装卸工艺作业环节少，搬运方便，集装箱破损率小，机动性好，但是要求场地面积大，场地利用率低，底盘车在堆场内外都使用，容易损坏。

（二）跨运车装卸工艺方案

美国马特松公司最早采用跨运车装卸工艺方案。其工艺流程为：船→桥吊→码头前沿（落地）→跨运车→堆场，即在岸边用岸桥卸箱，放在码头前沿，然后跨运车将集装箱运至码头堆场，直接进行堆装。

跨运车装卸工艺方案能够一机多用，便于管理，作业环节少，场地利用率高于底盘车工艺，但是跨运车机械结构复杂，易漏油，码头初始投资高。

（三）轮胎式龙门起重机工艺方案

轮胎式龙门起重机在我国使用相当普遍,我国的大型集装箱码头使用的基本都是轮胎式龙门起重机工艺方案。

轮胎式龙门起重机的工艺流程为:船→桥吊→集卡→轮胎吊→堆场,即岸边用岸桥卸箱,放在集卡上,集卡进行水平运输,将集装箱运至码头堆场,然后用轮胎式龙门起重机将集装箱堆存在堆场中,进行堆场作业。

轮胎式龙门起重机工艺方案的优点是装卸效率高、场地利用效率高、机械结构简单,操作维修方便、维修费用低。其缺点是使用机械数量多,码头初始投资大、对码头场地的承载力要求高,行走车道需要进行加固处理。

（四）轨道式龙门起重机工艺方案

轨道式龙门起重机的工艺流程为:船→桥吊→集卡→轮胎吊→堆场,即岸桥从船舶上卸下集装箱,通过集卡水平运输到堆场,然后用轨道式龙门起重机进行堆场作业。

轨道式龙门起重机工艺方案的优点是跨度大、堆层高、结构简单,操作维修方便、易实现作业自动化。其缺点是大跨距对金属结构要求高、自身重量大、作业时间长、翻箱作业多,生产效率下降。

本文建立仿真模型使用的集装箱码头装卸工艺为轮胎式龙门起重机工艺方案。

2.2 集装箱码头装卸系统中的排队论

2.2.1 排队论概述

排队是日常学习、工作、生活中常见的现象。排队现象由两个方面组成,一方有需求,要求得到服务,通常把要求服务的人或设备称为顾客;一方要尽量满足对方的要求给予服务,通常把服务人员和服务机构称为服务员或服务台。顾客与服务台构成了一个排队系统,也称之为随机服务系统。如图 2.1 所示,就是一个最简单的排队系统的流程图。虽然排队系统是多种多样的,但是从决定排队系统的进程的因素来看,它们均由三个基本部分组成,即为输入过程、排队规则及服务机构。



图 2.1 简单排队系统

排队论就是研究排队现象的理论。20 世纪初丹麦工程师爱尔朗用概率方法研究了电话通话问题，从而开创了排队论这门学科。近些年来，排队论得到了越来越广泛的应用，如交通运输管理、码头装卸、工厂的生产作业、服务机构的运营管理等都有排队论的用武之地。排队论的研究目的是要找出各种排队系统的规律性，并使设计人员们掌握这一规律，从而设计出最优的排队系统；使管理人员们掌握这一规律，进而调整与控制排队系统使它处于最佳运营状态，使社会能够得到最大的收益^[35]。

集装箱码头装卸系统是典型的离散随机服务系统，应用排队论可以得到系统的各种数量指标的概率规律，从而优化集装箱码头装卸系统，获得更大的经济效益。

2.2.2 船舶到港规律分布形式

集装箱船舶到达港口是离散的事件。在集装箱港口的设计研究过程中往往需要研究船舶到港的随机规律，即船舶到达港口所遵从的分布函数。因为它是影响码头通过能力的重要因素，泊位数的选取、堆场容量的大小、装卸机械的数量和能力的选取等都与其有关。

经过多年的统计分析得出，船舶的到港规律服从泊松分布^[36]，其概率分布如公式（2-1）所示。

$$P_n(t) = \frac{(\beta t)^n \cdot e^{-\beta t}}{n!} \quad n \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad (2-1)$$

式中：

t ：单位时间；

n ：单位时间内到港的船舶数，其值只能为正整数；

β ：单位时间内平均到港的船舶数，其值为正实数；

当单位时间 $t=1$ 时， β 分别取 1、2、5、10 时，得到有 n 艘船到港的概率，如图 2.2 所示。

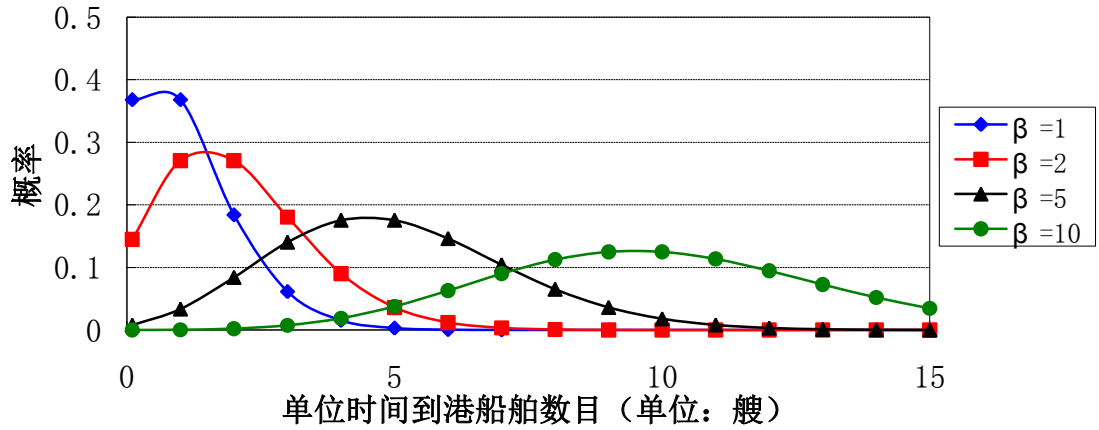


图 2.2 泊松分布图

当船舶到达规律已知时, 可以求出船舶到达的时间间隔分布。用 T 来表示某两艘相继到达港口的船舶的时间间隔, 其分布函数可记为:

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - P(T > t) \quad (t > 0) \quad (2-2)$$

当 $T > t$ 时, 表示两艘船舶到达港口的时间间隔超过 t , 即在时间 t 内没有船舶到达, 则有:

$$F(t) = 1 - \frac{(\beta t)^0 \cdot e^{-\beta t}}{0!} = 1 - e^{-\beta t} \quad (t > 0) \quad (2-3)$$

其概率密度函数为:

$$f(t) = \beta \cdot e^{-\beta t} \quad (t > 0) \quad (2-4)$$

这就是服从负指数分布的概率密度函数。

可知, 该函数的期望和方差为:

$$E(T) = \frac{1}{\beta} \quad D(T) = \frac{1}{\beta^2} \quad (2-5)$$

式中:

t : 到港船舶的时间间隔, 其值为正实数;

$\frac{1}{\beta}$: 单位时间内到港船舶的平均时间间隔, 其值为正实数;

为了方便使用和阐述, 本文中令 $\lambda = \frac{1}{\beta}$, 则公式 (2-4) 可以改写成公式 (2-6) 的形式。概率密度的分布图如图 2.3 所示。

$$f(t) = \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\frac{t}{\lambda}} \quad (t > 0) \quad (2-6)$$

则其期望和方差为

$$E(T) = \lambda \quad D(T) = \lambda^2 \quad (2-7)$$

式中:

λ : 单位时间内到港船舶的平均时间间隔, 其值为正实数。

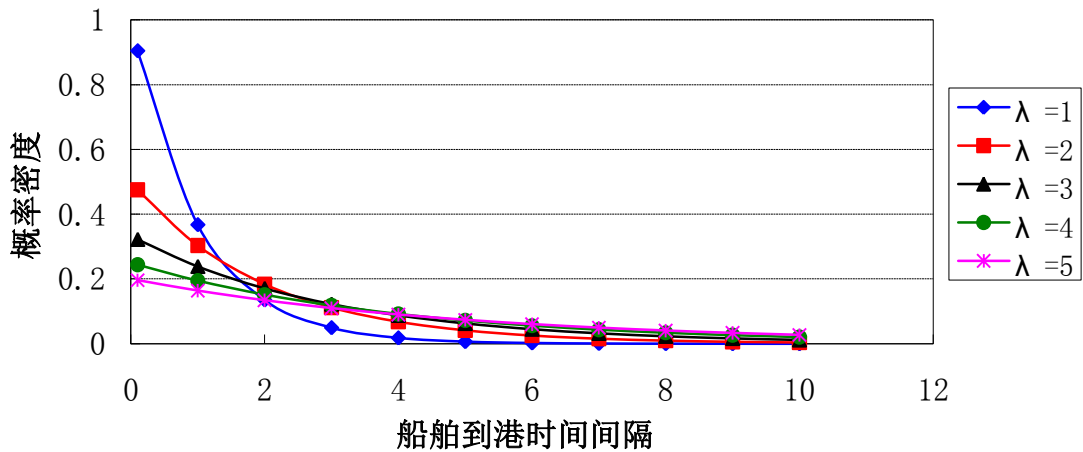


图 2.3 负指数函数概率密度分布图

2.2.3 船舶排队的服务规则

当顾客到达服务机构时，如果所有服务台都被占用没有空闲，这时顾客自动地加入队列排队等待服务，服务完才离开。船舶到港的排队系统就是这种具有等待性质的排队系统，相应的服务规则有以下几种^[35]：

- (1) 先到先服务 (FIFS)：即按顾客到达的先后顺序进行排队，排在前面的优先接受服务，这是最普遍最常见的服务形式；
- (2) 后到先服务 (LIFS)：即服务顺序与到达顺序相反；
- (3) 随机服务 (SIRS)：一个服务结束，服务员从等待的顾客中随机选择一个顾客进行服务；
- (4) 有优先权服务 (PR)：在排队系统中某些顾客有时特别受到重视，在服务顺序上的给以特殊待遇，让他们优先得到服务。

集装箱码头船舶排队系统的服务规则一般为先到先服务：即集装箱船舶到港后，如果码头有空闲泊位就直接进入空闲泊位开始进行装卸作业，如果所有泊位都被占用，就按到达的先后顺序在锚地排队等待泊位，排在前面的优先接受服务。这里假设所有到港船舶不论排队多长也不会中途离港。

2.2.4 船舶服务时间分布形式

船舶停靠在泊位上进行装卸作业时，由于受到天气条件、船舶载箱量、装卸机械的数量以及装卸效率、堆场容量大小、堆场与码头前沿的距离、集卡数量、操作工人的熟练程度等因素的影响，装卸时间的长短具有一定的随机性。而船舶载箱量、装卸机械的数量以及装卸效率则是其中最主要的影响因素。

大多数学者假设集装箱船舶停靠在泊位上,其接受服务的时间服从负指数分布形式,例如董靖运用串联排队网络理论对集装箱码头系统进行分析时,假定船舶在泊位接受服务时间服从负指数分布^[37]。

本文中也假设船舶接受服务时间服从负指数分布,参数设为 μ ,则泊位服务一艘船舶所需时间的分布函数和概率密度函数分别为:

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\mu}} \quad f(t) = \frac{1}{\mu} \cdot e^{-\frac{t}{\mu}} \quad (t > 0) \quad (2-8)$$

其中:

t : 在港船舶接受服务时间,其值为正实数;

μ : 单位时间内泊位完成服船舶数量的均值,即 $E(t) = \mu$ 。

$f(t)$: 在港船舶接受服务时间为 t 的概率密度值。

由上述可知,集装箱码头装卸系统符合 $M/M/N$ 型排队系统,即船舶到港时间间隔服从负指数分布(用第一个 M 表示),占用泊位时间服从负指数分布(用第二个 M 表示),码头泊位数为 N (用 N 表示)。

这里的参数 μ 与装卸机械数目和装卸效率有密切关系,具体关系可以通过实际统计分析得出。

2.2.5 集装箱码头装卸系统 $M/M/N$ 模型分析及参量计算

泊位数为 N 的集装箱码头装卸系统排队模型,如图 2.4 所示。

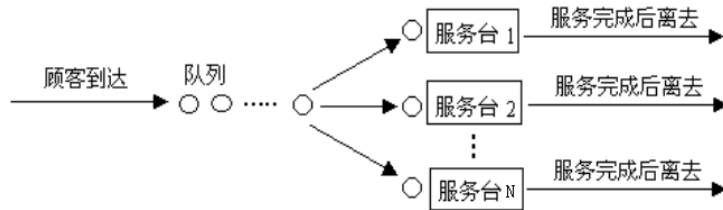


图 2.4 集装箱装卸系统排队模型流程图

码头泊位数为 N ,各泊位的装卸工作互不影响,相互独立,船舶到港时间间隔 λ 服从负指数分布,平均到达率(单位时间到达顾客数)为 β ;各泊位服务时间服从参数为 μ 的负指数分布;则整个系统的平均服务率为 $N\mu$,记

$\rho_1 = \frac{\beta}{\mu}, \rho = \frac{\beta}{N\mu}$,用 k 表示在统计期内到港的船舶数。当 $0 \leq k \leq N$ 时,表示码头上有 k 个泊位正在进行装卸作业, $N-k$ 个泊位处于空闲状态;当 $k > N$ 时,表示码头上的 N 个泊位都在进行装卸作业,而有 $k-N$ 艘船舶在锚地排队待泊。假定锚地只允许排一个队,当有泊位装卸完成后空闲时,锚地中等待的船舶遵循 FIFS(先到先服务)原则进入空闲泊位进行装卸作业。则可以得到以下的目标参量:

(1) 在等待制中, 所有到达港口的船舶迟早会被服务, 所以 $P_{\text{损}} = 0$

(2) 系统的相对通过能力 $Q = 1 - P_{\text{损}} = 1$

(3) 系统的绝对通过能力 $A = \beta Q = \beta$

(4) 平均排队等待队长 (即等待服务的船舶数)

$$\begin{aligned} L_q &= \sum_{k=N}^{\infty} (k-N) p_k = \sum_{l=1}^{\infty} l p_{l+N} = \frac{\rho(N\rho)^N}{N!} p_0 \sum_{l=1}^{\infty} l p^{l-1} \\ &= \frac{\rho \rho_1^N}{N!(1-\rho)^2} p_0 = \frac{P_1^{N+1}}{(N-1)!(n-\rho_1)^2} p_0 \end{aligned} \quad (2-9)$$

(5) 平均忙碌的泊位数

$$\begin{aligned} L_{\text{服}} = \bar{k} &= \sum_{k=0}^N k p_k + N \sum_{k=N+1}^{\infty} p_k = \sum_{k=0}^N k \cdot \frac{N^k}{k!} \rho^k p_0 + \sum_{k=N+1}^{\infty} N \cdot \frac{N^k}{N!} \rho^k p_0 \\ &= N \rho \left[\sum_{k=1}^N \frac{(N\rho)^{k-1}}{(k-1)!} p_0 + \sum_{k=N+1}^{\infty} \frac{N^N \rho^{k-1}}{N!} p_0 \right] = N \rho \left(\sum_{k=0}^N p_k + \sum_{k=N}^{\infty} p_k \right) \\ &= N \rho = \rho_1 \end{aligned} \quad (2-10)$$

(6) 平均系统队长 (即所有在港的船舶数)

$$L_s = L_q + L_{\text{服}} = L_q + \rho_1 = \frac{\rho \rho_1^N p_0}{N!(1-\rho)^2} + \rho_1 \quad (2-11)$$

(7) 根据 Little 公式^[38]: $L_s = \beta W_s$; $L_q = \beta W_q$ 有船舶在港等待时间的均值

$$W_q = \frac{L_q}{\beta} = \frac{\rho_1^N p_0}{\mu N \cdot N!(1-\rho)^2} \quad (2-12)$$

(8) 船舶在港逗留时间 (从进港到出港的总时间) 的均值

$$W_s = \frac{L_s}{\beta} = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (2-13)$$

可以看出, 对于某一实际港口, 当得到统计参数 λ 、 μ 后, 通过上述公式即可得出港口装卸系统中的各性能指标参数。

2.3 集装箱码头装卸系统评价指标

集装箱码头装卸系统的主要评价指标有:

(1) 集装箱吞吐量: 是指某个港口在一段时间内口进和出口的集装箱数量的总和, 单位为 TEU (Twenty-foot Equipment Unit, 集装箱标准箱的简称)。不论是船舶单独装或是卸集装箱, 还是先卸船再装船, 又或是卸船后经过堆场再将集装箱装到另一艘船上, 均分别按进口卸船和出口装船, 各计吞吐量一次。一般以年为统计期。国际标准集装箱是以集装箱的外形尺寸的大小来划分箱型的, 一般分为 20 英尺 (20ft)、30 英尺 (30ft)、40 英尺 (40ft)、45 英尺 (45ft) 等。国际

标准集装箱的换算系数=集装箱自然长度（英尺）/20（英尺），即一个 20ft 箱为 1TEU，一个 40ft 箱为 2TEU。

（2）出港船舶总艘次：是指一段时间内在港口完成装卸作业的船舶总艘次。一艘船舶从进港时起到出港时结束，不论单装、单卸或是先卸后装，是否移泊还是移泊多次，均只计一次。单位为“艘次”。

（3）船舶平均在港时间：是指船舶从进港到离港在港口停泊的总时间的平均值，即用一段时间内所有船舶在港时间的总和去除以在港船舶总艘次，其主要包括船舶装卸时间、待泊时间、等待天气的时间、等待航道的时间、通航时间等。单位为“小时”。

（4）船舶平均待泊时间(AWT)：是用一段时间内船舶等待泊位分配的时间总和除以到港船舶总艘次，即船舶在锚地中等待时间的平均值。单位为“小时”。

（5）船舶平均在泊时间(AST)：是用一段时间内船舶在泊位接受服务时间的总和除以到港船舶总艘次，即船舶在泊位接受服务时间的平均值。单位为“小时”。

（6）AWT/AST：AWT是指船舶平均待泊时间，AST 是指船舶平均在泊时间（（4）和（5）中分别介绍过）。AWT/AST是国际上用来反映泊位系统服务质量高低的指标。一般来说，AWT/AST会随着港口所在国家、地区的经济发展水平不同而不同。联合国贸易和发展会议(UNCTAD)在《发展中国家港口规划手册》(1985)中指出：“通常认为待泊时间不宜超过装卸作业时间的10%~50%”，即它的取值范围应该介于 $0.1 < \text{AWT/AST} < 0.5$ 之间^[38]。

（7）泊位利用率：是指一段时间内船舶在泊位上的装卸时间总和与这段时间的比，反映出泊位的忙碌程度。单位为“%”。泊位利用率并不是越高越好，泊位利用率过高，容易导致船舶平均在港时间过长，降低港口服务水平。

（8）堆场利用率：主要是指某一时间状态下存放在堆场中的集装箱数量和码放状态^[39]，即用当前时间集装箱堆场内堆放的集装箱数量除以集装箱堆场最大安全堆箱数量。单位为“%”。堆场利用率过高，会导致翻箱量和倒箱量的增多，降低装卸效率。

（9）装卸机械利用率：是指一段时间内装卸机械工作总时间与这段时间的比，反映出装卸机械的忙碌程度。单位为“%”。同样的，机械利用率并非越高越好。

（10）船舶在港停留成本：

$$C = \sum_{i=1}^m t_i \cdot f_i \quad (2-14)$$

式中：

t_i ：第 i 艘船舶的在港时间（小时）

f_i ：单位时间第 i 艘船的在港成本（元/小时）

m : 统计期内到港船舶数

通过对航运公司的船舶营运成本的计算或是采用回归估计公式计算可以得到第 i 艘船舶每天的在港费用。通过对世界主要船公司的船舶营运成本进行回归分析, 可以得到不同船型每天的在港成本回归估算公式, 如表 2-1 所示。

表 2-1 船舶在港天成本回归公式

船舶类型	回归估算公式	显著性检验系数 F	相关系数 R
集装箱船按载重量 (国外)	$Y = 53.56X^{0.7838}$	38225.06	0.99982
集装箱船按载重量 (国内)	$Y = 36.06X^{0.8207}$	71928.72	0.99990
集装箱船按载箱量 (国外)	$Y = 471.27X^{0.7821}$	40725.98	0.99980
集装箱船按载箱量 (国内)	$Y = 337.24X^{0.8172}$	284462.64	0.99997

表中:

Y : 船舶在港艘天成本, 元/艘天;

X : 船舶载重量 (t), 或集装箱船载箱量 (TEU)。

资料来源: 参考文献^[40]

注: 表中数据是根据 20 世纪 90 年代统计获得。由于船舶在港艘天成本是港口工程国民经济效益分析的重要参数, 此参数又随社会经济各参数变化, 因此需不断的测算修改。

本文在研究泊位数固定时集装箱港口装卸机械配置问题, 得到最优的场桥数和集卡数, 以及泊位数和装卸机械的联合配置问题时, 是综合考虑各个评价指标, 以船舶平均在港时间 (评价指标 (3)) 为主要控制条件, 以 AWT/AST (评价指标 (6)) 为次要控制条件得出结论的。

第三章 系统仿真技术的基本理论

本章首先简要介绍了系统仿真的基本理论，之后，阐述了仿真软件的发展历程，并对本文所用的仿真软件 Arena 进行了介绍，最后说明了仿真技术在集装箱码头系统中的应用。

3.1 系统仿真技术简介

国内外众多仿真界的专家和学者对仿真下过定义，综合他们的观点，可得到如下定义：系统仿真以控制理论、相似理论，信息处理技术以及计算机技术等为理论基础上的，将计算机和其他专用物理效应设备作为工具，对真实或假想的系统建立模型并进行试验，借助、统计数据、信息资料以及专家们的经验知识对试验结果进行研究分析，进而做出决策的一门综合性和试验性的学科。系统仿真包括三个基本要素：系统、系统模型、计算机^[41]。

一般说来，根据被研究系统的特征可将系统仿真分为两大类，连续系统仿真和离散事件系统仿真。二者之间的区别主要体现在：连续系统仿真研究的系统的状态随着时间持续变化；而离散事件系统仿真研究的系统的状态在某些随机时间点上发生离散变化。

系统仿真建模的求解方法与其他建模方法论的主要区别在于其建模的不确定性以及求解过程的实验性。因此，在对现实系统或未来系统做仿真分析时，必须遵循一定的步骤，才能保证模型的有效性以及仿真结果的正确性。系统仿真步骤的执行顺序和反馈关系如下图所示^[42]。

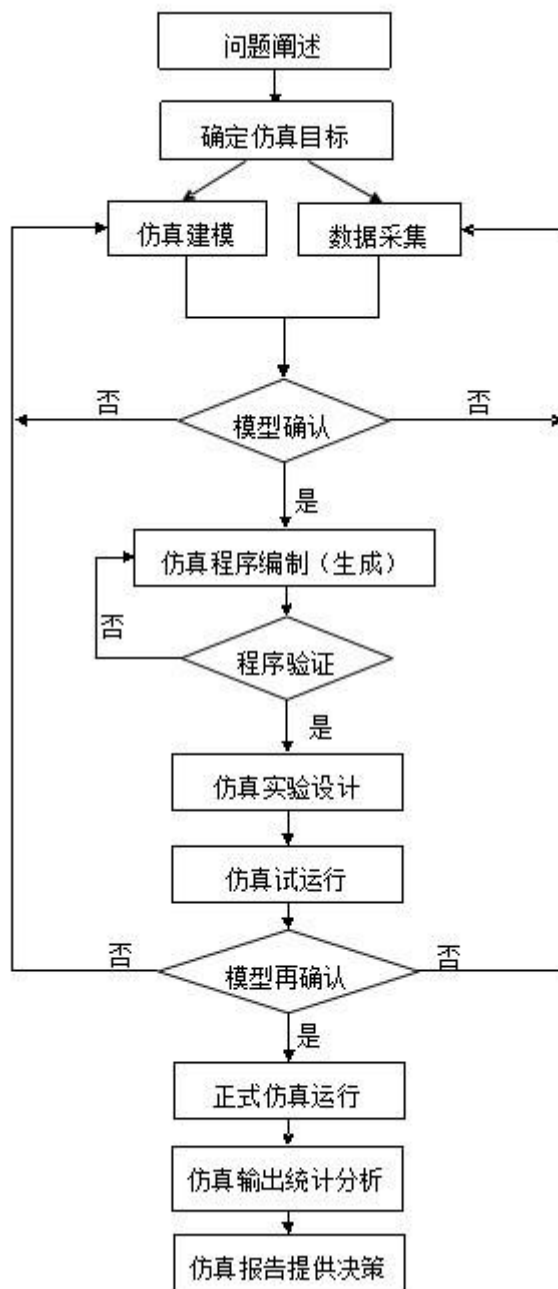


图 3.1 系统仿真步骤

3.2 仿真软件的发展

仿真软件包括仿真程序和仿真语言两部分。仿真程序是仿真软件的初级形式，也是仿真语言的基本组成部分。仿真程序可用于某一些特定问题的仿真，可以提供多种算法；而仿真语言则可以为用户提供更强的仿真功能，可以适用于不同领域的多种系统的仿真。

从上世纪 60 年代初，国外就开始着手研制仿真语言，如连续系统仿真语言有 MIDAS、MIMIC、CSMP、CSSL、ACSL 等；离散系统仿真语言有 GPSS、

SIMSCRIPT II、GPSS IV等。近年来，随着建模方法、可视化编程和虚拟现实技术的快速发展，一些规模强大、可视性好、建模直观的仿真软件相继被开发。有关仿真软件的发展大致可以分为3个阶段^[43]：

(1) 1955—1965年，通用仿真程序GPS，通用仿真语言GPSS、SIMULA以及GASP奠定了当前所使用的仿真软件的基础。

(2) 1966—1978年，出现了第二代仿真语言，它们是GPSS II、III、360、V，NGPSS，SIMSCRIPT II以及SIMULA67。其特点是功能大大加强，如SIMSCRIPT II提出了进程的概念和加进了连续仿真的功能，GPSS语言中增加了链接用户编写FORTRAN程序和PL/I子程序的功能，NGPSS语言中增加了图形处理功能。

(3) 1979年至今，仿真软件开始向连续、离散、混合仿真语言发展；向多种程序结构发展以及向综合化、一体化发展。陆续出现了专用于各领域的仿真软件。例如：Flexsim、Arena、WITNESS、AUTOMOD、Micro Saint、Eurostag等。运用这些软件建立的仿真模型成功地在生产制造企业、军事制造业、汽车制造业、电力系统、物流系统分析、教学实验等方面进行了应用，为决策者做出决策提供了依据。表3-1中给出了一些领域的仿真软件的特点和应用实例。

表 3-1 各仿真软件应用领域及特点对比

软件名称	应用实例	特点
Flexsim	连续、离散系统建模仿真	三维仿真软件，实现流程可视化，具有层次结构以及丰富的模型库
Arena	复杂生产系统、供应链系统、交通网络流系统	基于SLAM、SIMAN语言，可面向流程建模
WITNESS	工业系统、商业流程的动态系统	三维的动态仿真演示，建模与运行在同一界面，有专门的数据分析工具
AUTOMOD	生产控制系统、库存管理系统	三维仿真软件，突出的动画仿真以及拥有强大的数据库
Micro Saint	军事制造业、人类工程学	流程图形式建模
Eurostag	电力系统	优良的计算性能、友好的使用界面，人性化的设计
Vensim	系统开发、分析，供应链系统仿真，应用系统动力学仿真	有较强的数据处理工具、图形建模功能

3.3 仿真软件 Arena 简介

本文中所使用仿真软件的是 Arena 12.0 官方学生版。Arena 是一款主要应用于物流管理系统的仿真软件。它是美国 System Modeling 公司从 1993 年开始研制开发的新一代可视化的通用交互集成模拟环境,很好地实现了计算机模拟技术与可视化技术的有机集成,同时兼备了高级模拟器的易用性以及专用模拟语言的柔性,并且还能够与通过程序语言(VB、Fortran、C、C++等)编写的程序连接运行。Arena 1.0 版本 System Modeling 公司于 1993 年在 SIMAN 语言的基础上推出;至 2006 年, Arena 的版本已升级至 11.0。在同年的美国冬季仿真会议上, 48% 的学术论文引用了 Arena。多位仿真界专家学者在二十多年的研发历程中不断的钻研创新和呕心沥血的努力,成就了 Arena 今天在同类软件中的地位,成为了世界知名的仿真工具。

Arena 兼备了高层仿真器的易用性和仿真语言的灵活性的优点。Arena 提供了多种可用于构建仿真模型的模板(template), 在每一个模板中都有许多用于图形仿真建模和分析的模块(module), 不同的模块组合起来就能构建出各种不同的仿真模型。为了便于组织与显示, 各个模块按类型组合在一个面板(panel)中构成模板, 通过面板间的切换, 可以方便地找到所有的仿真建模的模块。Arena 中的面板有将近二十个, 面板内的模块有二百个之多, 可直接用于构建仿真模型。在绝大多数情况下, 不同面板中的模块可以在同一模型中混合使用。

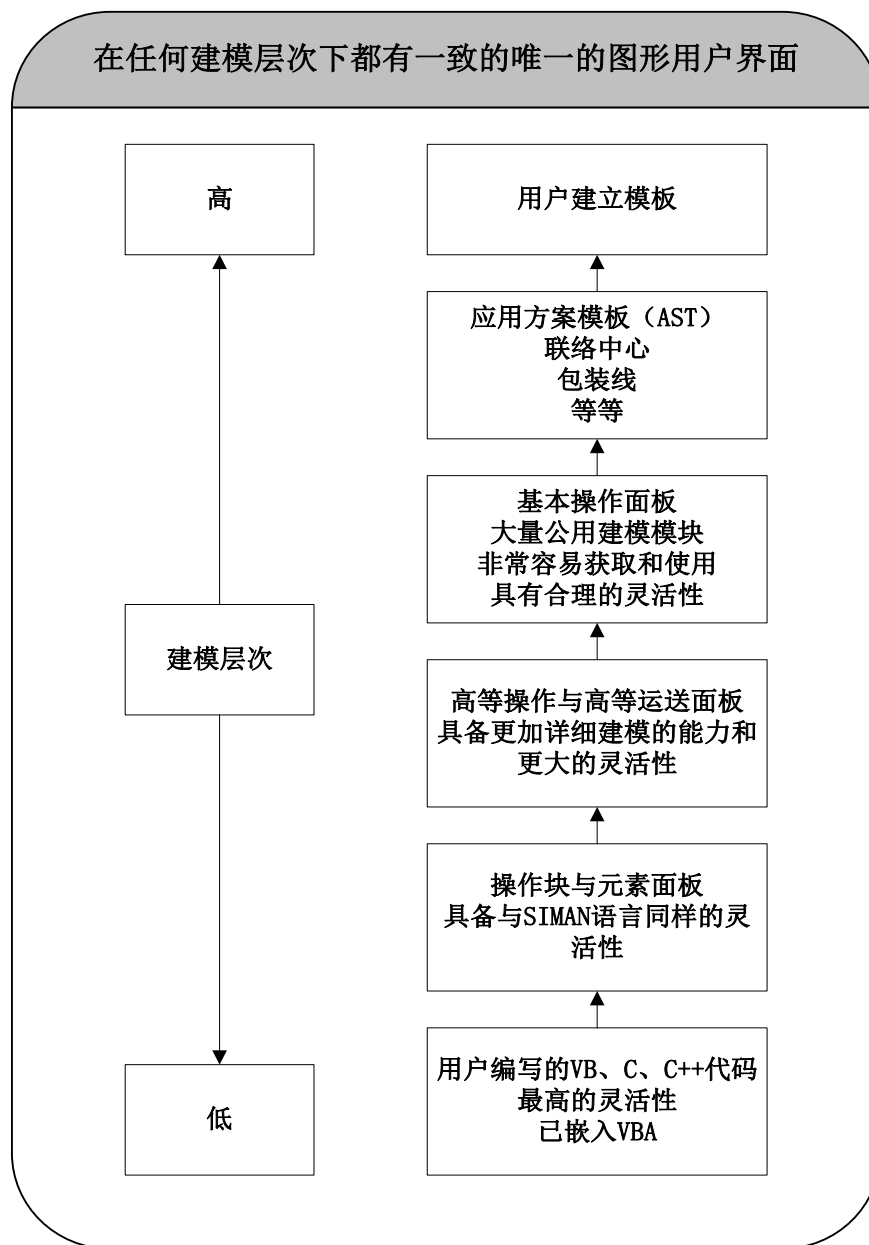


图 3.2 Arena 的层次结构

Arena 具有完整的层次结构（hierarchical），如图 3.2 所示，正是这种完整的层次结构保持了建模的灵活性。Arena 建模层次结构的建模水平由下至上依次提高。在最低层，可以使用通用过程语言（如 VB、C、C++等）来构建模型，用来满足复杂决策规则以及外部数据选取等特别的要求。第二层是基础面板，即为 SIMAN 面板，其中包括 Block 面板和 Element 面板。它们均由 SIMAN 语言编写，具有 SIMAN 语言灵活建模的特点。第三层是通用面板，主要包括 Basic Process 面板、Advanced Process 面板和 Advanced Transfer 面板等多种面板。Basic Process 面板最为基础，而 Advanced Process 面板和 Advanced Transfer 面板等具有更强的灵活性。这些面板中包含了绝大多数情况下常用的模块。第四层是应用方案模板（简称 AST），这些模板是 System Modeling 公司开发的一些常用系统的模板，

如流程再造模板、程控中心模板、先进制造模板以及其他工业模板等。用户可以在 AST 的基础上, 添加模块, 完善模板, 来建立满足自己实际需要的模型。

在实际的建模过程中, 任何时候都可以使用从上述面板中的模块, 如果有需要的话, 还可以通过用户自己编写的程序段并嵌入模型来实现。而所有的这一切, 不管建模层次多高或者多低, 都可以在同一图形用户面下实现。Arena 正是通过可视化的仿真环境将各层次的建模方法交替使用, 获得了不同的建模能力^[44]。

3.4 仿真技术在集装箱码头系统中的应用

集装箱码头系统作为一个大型的生产服务系统, 具有诸多随机因素, 如船舶到港的随机性, 天气的变化情况, 各类装卸机械随时间的变化情况。整个集装箱码头系统是一个随机因素多、多级排队、紧密耦合的动态服务系统, 其生产效率的提高依靠各个子系统之间的相互协调, 任何一个子系统的效率都会影响整个码头系统。这些特点决定了不能单纯依靠数学模型来分析、优化集装箱码头规划、管理与资源配置中的各类问题。因此, 利用计算机仿真技术来研究这类动态随机的复杂系统, 可以为港口规划与管理提供一条有效的途径^[45]。仿真技术已经成为港口物流决策分析中不可或缺的手段。

第四章 集装箱码头装卸系统仿真模型的建立

集装箱码头具有车辆周转快、货运速度快的特点，集装箱要快速顺利地进行装卸和运送，必须对港口内的泊位资源、装卸机械合理地进行配置，使得集装箱码头的装卸系统达到较优的状态。集装箱码头装卸系统以船舶到港为起点，以船舶出港为终点，由锚地、航道、泊位、岸桥、场桥、内外集卡等众多因素构成，具有一定的复杂性和综合性。目前，仿真技术已成为研究港口装卸作业系统的重要手段。本章首先基于仿真时钟进程的角度对集装箱码头的装卸流程进行了分析，之后根据分析结果建立了仿真模型，最后对仿真参数和仿真运行时间进行了分析与确定。

4.1 集装箱码头装卸流程分析

本文主要研究船舶进港的装卸作业，则码头前沿的生产装卸作业过程可大致分为如下几个步骤：

- (1) 进入锚地。船舶到港后，一般需要进入锚地排队等待调度安排，或者等待联检，此时，如果泊位无空闲，则需要在锚地等待泊位。
- (2) 船舶靠泊。当泊位空闲时，水深及天气条件都允许的情况下，接到靠泊的指令后，通过引水员引航到指定泊位进行靠泊，并进行装卸辅助作业。，再由集装箱卡车（外卡）运出堆场。
- (3) 装卸作业。靠泊后，船舶需要按照要求进行边检手续，之后就会进行集装箱装卸船作业，进港集装箱从船上卸到集装箱卡车（内卡）上，并由集装箱卡车（内卡）运到堆场。
- (4) 船舶离港。船舶装卸完成后，即可办理相关手续，然后在港口调度的指导下离港。
- (5) 外卡取箱。收货人得到集装箱到港的通知后，凭借提货单委托集装箱卡车（外卡）司机到码头堆场中进行取箱作业。

集装箱码头的生产装卸作业系统是典型的离散事件系统，根据上面对码头前沿生产装卸作业过程的分析，基于仿真时钟进程的角度建立了集装箱码头装卸作业流程图，如图 4.1 所示。

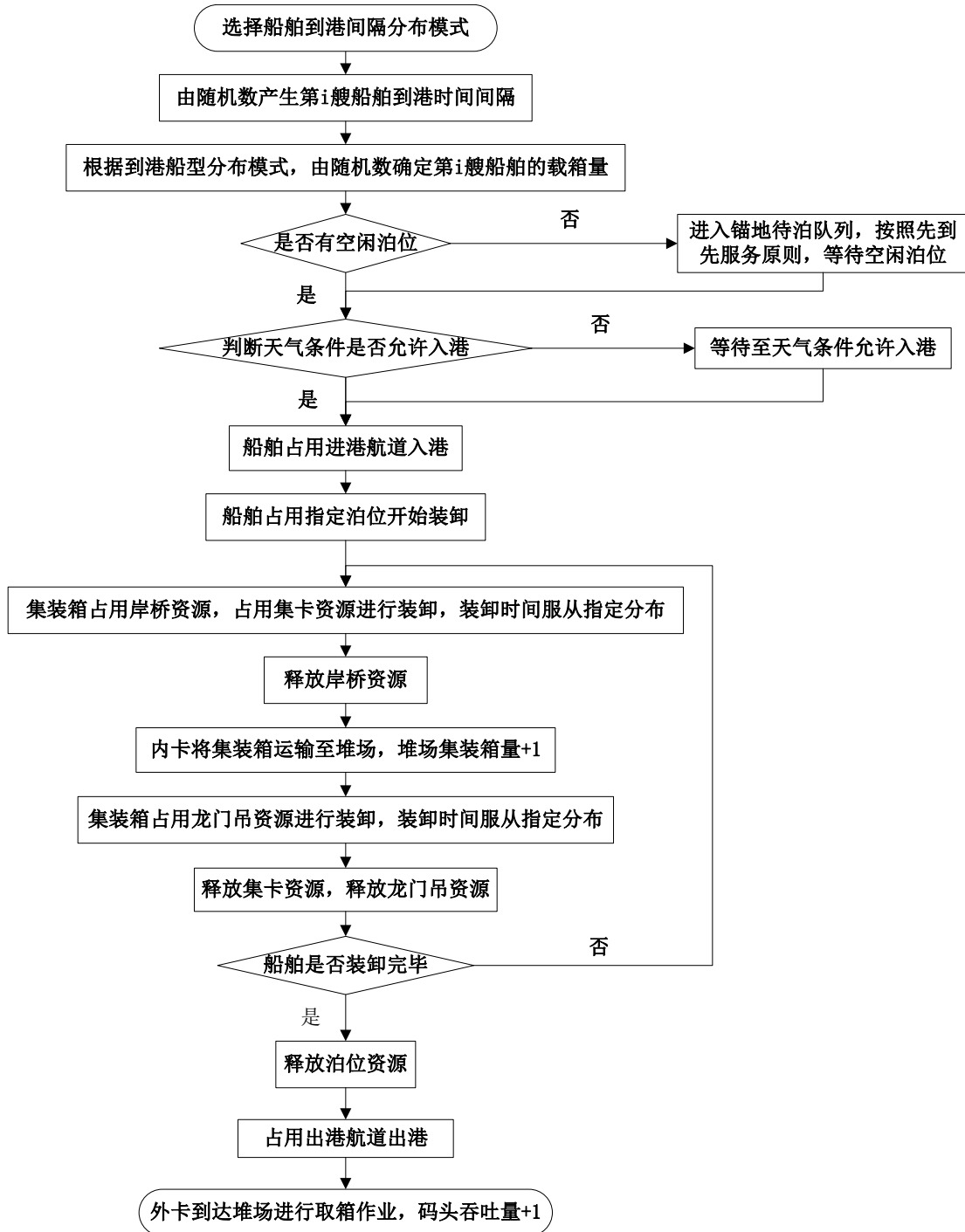


图 4.1 集装箱码头装卸系统流程图

4.2 仿真模型作业系统的组成

通过上文对集装箱码头装卸作业系统流程的分析，基于事件仿真时钟进程的角度，运用 Arena 仿真软件建立集装箱码头装卸系统的仿真模型，可以分为以下三个部分：

（一）船舶靠泊作业系统

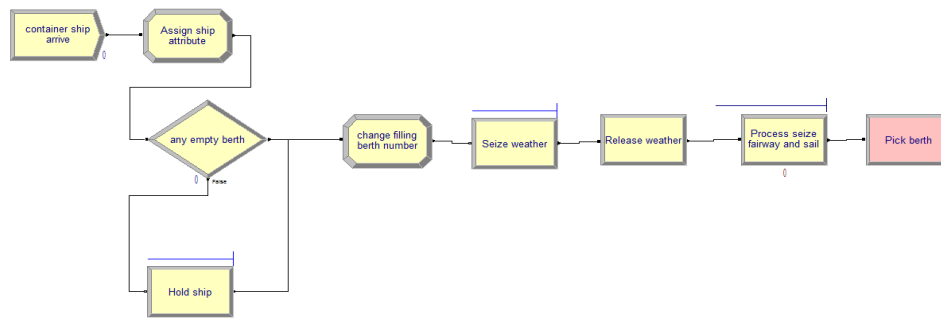


图 4.2 船舶靠泊作业系统仿真模型

上图为船舶靠泊作业系统的仿真模型，该模型可以总结如下：

第一个模块是 **Create** 模块，用以在开始时刻产生船舶实体，并可以在该模型定义模块名称、实体类型以及实体到达间隔时间的概率分布类型。船舶到达时间间隔服从参数为 λ 的负指数分布，以 $\lambda=4$ 为例，输入参数如表 4-1 所示。

表 4-1 Create 模块输入参数

Name	container ship arrive
Entity Type	ship
Time between Arrive	
Type	Random(Expo)
Value	4
Units	hour
Entity per Arrive	1

在第一个 **Assign** 模块中，定义船舶实体的载箱量属性。其分布型式为离散型分布，用 **DISCRETE** 函数来进行描述，以 $AVE(TUE)=1000$ 为例，输入参数如表 4-2 所示。

表 4-2 Assign 模块输入参数

Type	Attribute
Attribute Name	ship TEU
New Value	DISC(0.06,300,0.17,500,0.70,900,1.00,1500)

之后，船舶实体被送到名为 **any empty berth** 的 **Decide** 模块，在 **Type** 栏选择 **2-Way by Condition** 的选项，判断是否有空闲泊位。在这之前需先定义一个名为 **filling berth** 的变量，记录正在进行装卸作业的泊位数，当 $filling\ berth < 5$ 时，判断结果为 **True**，船舶可以驶入泊位，实体将被送入第二个 **Assign** 模块中；当 **filling**

berth=5 时, 判断结果为 False, 船舶驶入锚地排队等待, 实体先进入 Hold 模块, 之后被送入第二个 Assign 模块。Decide 模块输入参数如表 4.3 所示。

表 4-3 Decide 模块输入参数

Name	any empty berth
Type	2 way-by Condition
If	Variable
Named	filling berth
Is	<
Value	5

在 Hold 的模块中, 船舶实体进行排队等待, 直到接收到产生空闲泊位的信号 (该信号由装卸系统模型中的 Signal 模块发出, 信号值设为 2), 再释放队列中的船舶实体。每次接到信号后, 均释放队列中排在第一的船舶实体, 遵循 FIFO (先到先服) 原则。输入参数如表 4-4 所示。

表 4-4 Hold 模块输入参数

Name	Hold ship
Type	Waite for Signal
Waite for Value	2
Limit	1

在第二个 Assign 模块中, 变量 filling berth 加 1, 表示一个泊位被占用。之后, 船舶实体进入 Seize 模块, 占用天气资源, 通过定义天气资源 Failure 的时间段来实现自然资源不允许靠泊, 若船舶在此期间恰巧要驶入泊位, 则需等待天气条件满足条件后, 方能通过。使用 Weather 资源后, 采用 Release 模块释放该资源。Seize 模块和 Release 模块输入参数如表 4-5、4-6 所示。

表 4-5 Seize 模块输入参数

Name	Seize weather
Resources	
Type	Resource
Resource Name	weather
Quantity	1

表 4-6 Release 模块输入参数

Name	Release weather
Resources	
Type	Resource
Resources Name	weather
Quantity	1

然后，船舶实体进入 Process 模块。在 Process 模块中，船舶实体将需要一段时间占用入港航道（Fairway in）资源，占用时间服从三角分布；该资源需要提前定义，数量为 1，即每次只能通过一个船舶，使用过后释放资源。输入参数如表 4.7 所示。

表 4.7 Process 模块输入参数	
Name	Process seize fairway in and sail
Type	standard
Action	Seize Delay Release
Resources	
Type	Resource
Resource Name	fairway in
Quantity	1
Delay Type	Triangle
Units	Minutes
Minimum	15
Value	20
Maximum	25

最后，船舶进入空闲泊位，采用 Pick 模块来实现。在 Pick 模块中，泊位既定义为站点，又定义为资源，通过判断泊位资源是否正在被利用从而进行站点选择，通过表达式 NR(berth 1), NR(berth 2), NR(berth 3), NR(berth 4), NR(berth 5) 判断泊位是否空闲。当五个资源都处于空闲状态时，则依照泊位顺序进入站点。输入参数如表 4-8 所示。

表 4-8 Pick 模块输入参数					
Name	Pick berth				
Stations					
Station Name	station berth1	station berth2	station berth3	station berth4	station berth5
Resource Name	berth1	berth2	berth3	berth4	berth5
Expression	NR(berth1)	NR(berth2)	NR(berth3)	NR(berth4)	NR(berth5)

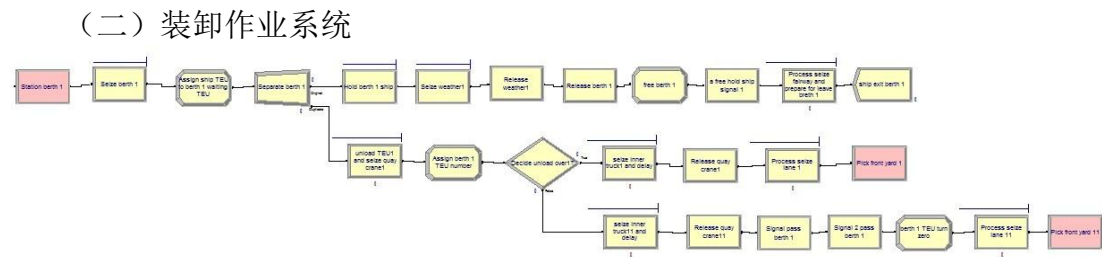


图 4.3 装卸作业系统仿真模型

装卸系统的仿真模型如图 4.3 所示，以 berth 1 为例，则该模型可以总结如下：

船舶实体到达 berth 1 站点，占用 berth 1 泊位资源。Station 模块输入参数如表 4-9 所示。在接下来的 Assign 模块中，把集装箱载箱量 ship TEU 这个属性赋值给一个名为 berth 1 waiting TEU 变量，表示等待装卸的集装箱数，该变量用来统计集装箱装卸是否完成。

表 4-9 Station 模块输入参数

Name	Station berth1
Station Type	Station
Station Name	station berth1

之后，船舶实体进入 Separate 模块，在 Separate 模块中，将创建实体副本。实体主本仍然为之前的船舶，副本为之前作为船舶实体属性的载箱量，副本数量等于载箱量。Separate 模块有两个离开点，实体主本将从上面的点离开，实体副本将从下面的点离开，输入参数如表 4-10 所示。

表 4-10 Separate 模块输入参数

Name	Separate berth 1
Type	Duplicate Original
Cost to Duplicates	100
# of Duplicates	ship TEU

主本进入 Hold 模块，直至接受到全部副本都装卸完毕的信号后，进入 Seize 模块，占用天气资源，待到自然条件允许时，主本将离开泊位，用 Release 模块释放 berth1 泊位资源，并在后面的 Assign 模块中，将变量 filling berth 减 1，同时用 Signal 模块发出有空闲泊位的信号。Signal 模块输入参数如表 4-11 所示。之后，主本进入 Process 模块，占用出港航道 fairway out 资源离港，资源数量仍然为 1，占用情况和占用时间分布同入港航道。最终，主本被送到名为 ship exit berth 1 的 Dispose 模块，表示一艘船舶完全离港。

表 4-11 Signal 模块输入参数

Name	a free hold ship signal 1
Signal Value	2

实体副本即集装箱被送到名为 unload TEU1 and seize quay crane 的 Process 模块，在 Process 模块中，副本需要一段时间占用岸桥资源进行装卸，岸桥资源的数量和装卸效率（即占用时间）作为参数进行输入，具体的分析和确定将在下一节详细叙述。在接下来的 Assign 模块中，对装卸完成的副本进行计数。先定

义一个变量 berth 1 TEU，其初始值为 0，每装卸完一个副本用 Assign 模块将该变量加 1。

之后，实体副本进入 Decide 模块，通过判断语句 berth 1 TEU < berth 1 waiting TEU 来判断装卸是否完成。当判断结果为 True 时，表示装卸没有完成，需继续进行装卸，此时副本进入名为 seize inner truck and delay 的 Process 模块占用内卡资源，岸桥资源已将副本从船上转移到内卡上，用 Release 模块释放岸桥资源。然后，副本继续进入名为 seize lane 的 Process 模块，占用车道资源驶入堆场，运输时间服从三角分布（具体情况将在下节详述），使用过后释放资源。最后，副本进入堆场系统，同样采用 Pick 模块实现。在 Pick 模块中，将堆场的各个街区既定义为站点，又定义为资源，通过判断街区是否正在被利用从而进行站点选择。当所有都处于空闲状态时，则依照街区顺序进入站点。

当 Decide 模块判断结果为 False 时，表示装卸完成。实体副本除了经历上述占用内卡、释放岸桥资源以及占用车道的过程外，还需经历两个 Signal 模块。一个 Signal 发出信号传给主本的 Hold 模块，表示主本此时可以开始离开泊位；一个 Signal 发出信号传给堆场系统中的 Hold 模块，表示外卡此时可以准备进入堆场进行取箱作业。最后，副本进入堆场系统。

（三）堆场作业系统

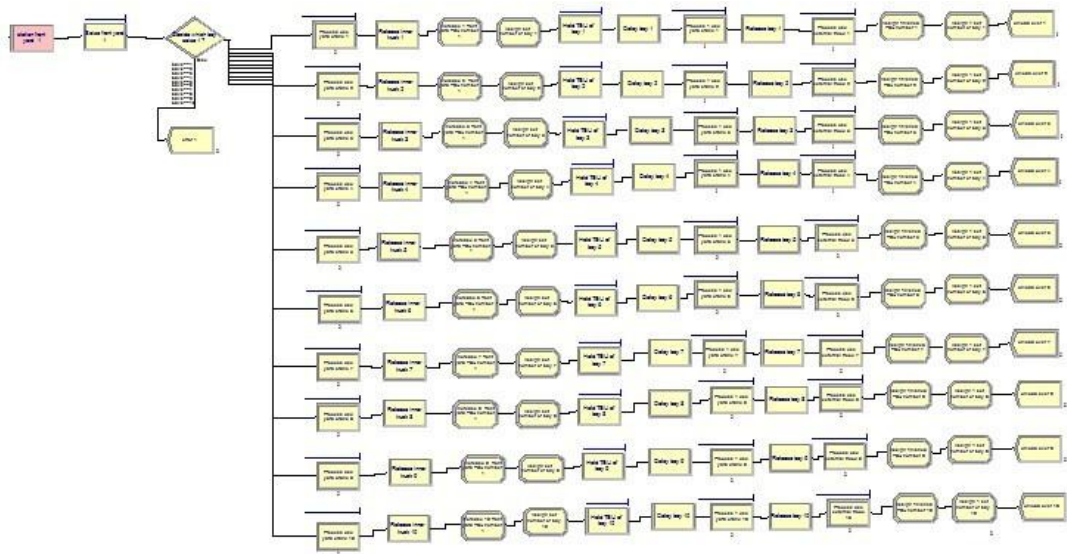


图 4.4 堆场作业系统仿真模型

图 4.4 为堆场作业系统中一个街区的仿真模型，以第一街区为例，该模型可以总结如下：

实体副本即集装箱进入第一街区站点，占用该街区资源。在这之前，需要先定义 bay（贝位）资源，并用 Set 数据模块定义一个集合，将该街区所有的贝位（一个街区含有 10 个 bays）整合到这个集合中，这样实体副本就可以占用该集

合中的成员即占用该街区中的贝位。在这个 **Seize** 模块中，**Selection Rule** 栏的选项下选择 **Preferred Order**（优先顺序规则）选项，即总是会选择序号排在前面的贝位；在 **Save Attribute** 栏中定义一个名为 **bays** 新的属性，并把所占用贝位的编号保存在这个实体副本的属性中。该 **Seize** 模块输入参数如表 4-12 所示。

表 4-12 Seize 模块输入参数

Name	Seize front yard 1
Resources	
Type	Set
Set Name	Set front yard 1
Quantity	1
Selection Rule	Preferred Order
Save Attribute	bays

接着，副本被送到 **Decide** 模块，在 **Decide** 模块中，选择 **N-Way Condition**，通过检验 **bays** 每一个有效值（即保存在 **bays** 中的贝位编号）判断副本所分配到的贝位。输入参数如表 4-13 所示。这里需注意的是，只有表 4-13 中的某一个表达式为真时，副本才会从该表达式对应的离开点离开；当这些表达式的值没有一个为真时，就意味着模型犯了一个错误，因此需增加一个名为 **error** 的 **Dispose** 模块，在此将所有条件均为 **False** 的副本送走。

副本离开 **Decide** 模块后，就表示集装箱已进入所分配的贝位（以贝位 1 为例），这时需要场桥资源继续对副本进行卸箱作业，并在卸箱过后释放场桥资源，该过程采用 **Process** 模块实现。在 **Process** 模块中，场桥资源的数量和装箱效率（即占用时间）作为参数进行输入，具体的分析和确定将在下一节详细叙述。之后，用一个 **Release** 模块释放内卡资源，用两个 **Assign** 模块对变量 **front yard TEU number**（堆存到堆场的集装箱数量）和 **set TEU number of bay 1**（贝位 1 中的集装箱数量）分别加 1，这两个变量需要提前定义。

表 4-13 Decide 模块输入参数

Name	Decide which bay seized 1?
Type	N-way Condition
If	Attribute
Attribute Name	bays
Is	= =
Value	1
If	Attribute
Attribute Name	bays
Is	= =
Value	2
If	Attribute
Attribute Name	bays
Is	= =
Value	3
If	Attribute
Attribute Name	bays
Is	= =
Value	4
If	Attribute
Attribute Name	bays
Is	= =
Value	5
If	Attribute
Attribute Name	bays
Is	= =
Value	6
If	Attribute
Attribute Name	bays
Is	= =
Value	7
If	Attribute
Attribute Name	bays
Is	= =
Value	8
If	Attribute
Attribute Name	bays
Is	= =
Value	9
If	Attribute
Attribute Name	bays
Is	= =
Value	10

然后，副本进入 Hold 模块，直至接收到全部副本都装卸完毕的信号后，释放副本，此时外卡可以准备进入堆场进行取箱作业。外卡进入堆场，驶入具体的贝位需要一定的时间，同时货方可能不会及时来取箱，因此需要先用一个 Delay 模块进行延时，表示外卡已经到达贝位 1。Delay 模块输入参数如表 4-14 所示。之后，需要场桥资源对副本进行装箱作业，其实现过程和所采用的模块与卸箱作业相同，只是场桥的装箱作业效率与卸箱作业效率不同，具体分析确定过程详见下一节。

表 4-14 Delay 模块输入参数

Name	Delay bay 1
Delay time	6
Units	Hours

这时，副本已由贝位转移到外卡上，用 Release 模块释放贝位 1 (bay 1) 资源，并用 Process 模块实现对外卡的占用。在这个 Process 模块中，副本占用外卡 (external car) 资源将其运出堆场，占用时间服从三角分布 TRIA(8, 10, 12)，使用过后释放外卡资源。

最后，用两个 Assign 模块对变量 set TEU number of bay 1 减 1，以及对变量 finished TEU number (完成的集装箱数量) 加 1。finished TEU number 变量仍然需要提前定义，通过对其的累加可得出码头年吞吐量。实体副本进入 Dispose 模块，模型结束。

4.3 仿真模型分析

根据上述分析，运用 Arena 软件可建立集装箱码头装卸动态多级排队系统的完整模型，如图 4.5 所示（堆场作业系统中由于空间的限制，只给出了一个街区的模型）。

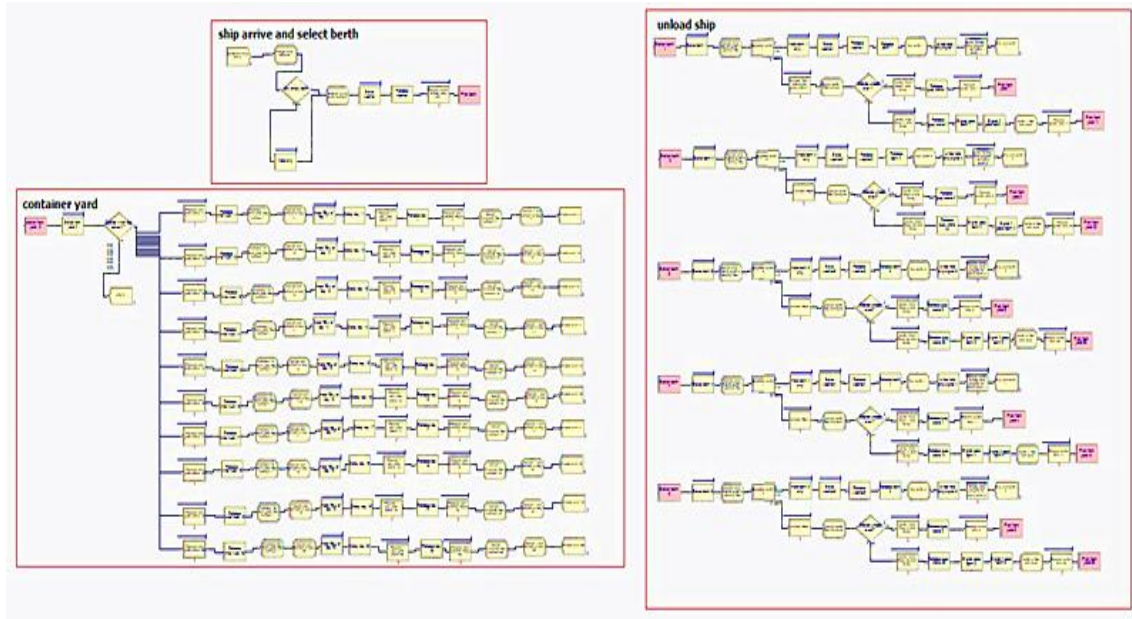


图 4.5 集装箱码头装卸系统仿真模型

由图 4.5 中可以清楚地看到三个作业系统的组成，左侧上部分是船舶靠泊作业系统，下部分为堆场作业系统（一个街区），右侧为装卸作业系统。这三个作业系统通过图中的粉色模块（Pick 模块，Station 模块）进行连接，来实现整个集装箱码头装卸系统仿真模型的建立。

仿真系统中主要包含以下几类元素：

（1）实体。本文仿真系统以到港船舶为实体，以由它衍生出的集装箱为实体副本。在船舶靠泊作业系统中，船舶为唯一实体；在装卸作业系统中，船舶为实体主本，集装箱为副本，副本数量为船舶载箱量；在堆场作业系统中，集装箱为实体。

（2）资源。本文模型中定义了以下八种资源，各个资源的利用率都可以在仿真结果的报告中得到。

①泊位：泊位具有一定长度以及水深条件的约束，且本文仿真模型中无论集装箱船舶的大小，每个泊位均只能停靠一艘船舶；

②岸桥：每个泊位的岸桥数量和单个岸桥的装卸效率是需要输入的参数；

③场桥：与岸桥相同，堆场中的场桥数量以及单个场桥的装卸效率是需要输入的参数；

④天气：将天气设置为资源，通过设置资源故障率来保证由于恶劣天气影响，港口不能作业天数在仿真模型中的考虑；

⑤航道：定义航道为双线航道，分别为进港航道和出港航道；

⑥车道：车道指从集装箱码头前沿至堆场供集卡（内卡）行走的道路，其占有时间和容量是需要输入的参数；

⑦集卡：集卡分为内卡和外卡，在码头前沿和堆场中进行集装箱运输作业，集卡的数量和集卡的运输时间是需要输入的参数；

⑧锚地：指供集装箱船舶进行排队待泊等活动的水域，锚地容量也是需要输入的参数；

（3）属性。本文的仿真系统中把船舶实体的载箱量赋值为属性，仿真时可利用离散分布函数来实现。

（4）队列。本文仿真模型中涉及到的队列有很多，例如在锚地等待靠泊队列，等待岸桥服务队列，等待场桥服务队列，等待使用航道的船舶队列等等。通过对集装箱装卸系统进行仿真，可以得出队列的最大、最小长度、平均长度、最大、最小等待时间以及平均等待时间。本文仿真系统中不限制队列的长度，服从 FIFS（先到先服务）原则。

（5）变量。本文仿真模型中涉及的变量主要有：占有中的泊位数，卸载完成的集装箱箱数，各贝位中的集装箱箱数，存入堆场中的集装箱箱数以及运出堆场的集装箱箱数等。这些值都可以通过对变量进行设置来观测和统计。

（6）事件。系统中的主要事件有：集装箱船舶到达港口、船舶进入锚地待泊、船舶进入泊位、岸桥卸载集装箱、集装箱卡车运输集装箱，场桥装卸集装箱、船舶驶离泊位等。这些事件使系统资源产生了在繁忙与空闲之间的转换。

（7）仿真时钟的推进。在仿真过程中，当前时间值都会被记录在一个特殊的变量中，这个特殊的变量就是仿真时钟，它负责并跟踪记录每个事件开始和结束时间，以及所处的状态，最后输出到仿真结果的报告中。

4.4 仿真参数的分析和确定

4.4.1 船舶到港规律和船型

集装箱船舶到港具有随机性，其主要体现在船舶载箱量以及到港时间间隔分布上。由于本文并不是针对某一特定的港口进行仿真，而是试图建立通用性的仿真模型，所以本文给出多种不同的载箱量和时间间隔分布参数，进行设计组合，力求使仿真结果更具有通用性。

4.4.1.1 到港船舶船型分布

根据我国《海港总平面设计规范》（JTJ211-99）局部修订的规定^[46]，集装箱船舶设计船型分级和各吨级主尺度如表 4-15 所示。

表 4-15 集装箱船设计船型尺度

船舶吨位 DWT (t)	设计船型尺度 (m)				载箱量 (TEU)
	总长 L	型宽 B	型深 H	满载吃水 T	
1000(1000~2500)	90	15.4	6.8	4.8	≤200
3000(2501~4500)	106	17.6	8.7	5.8	201~350
5000 (4501~7500)	121	19.2	9.2	6.9	351~700
10000 (7501~12500)	141	22.6	11.3	8.3	701~1050
20000 (12501~27500)	183	27.6	14.4	10.5	1051~1900
30000(27501~45000)	241	32.3	19.0	12.0	1901~3500
50000(45001~65000)	293	32.3	21.8	13.0	3501~5650
70000(65001~85000)	300	40.3	24.3	14.0	5651~6630
100000 (85001~115000)	346	45.6	24.8	14.5	6631~9500
120000 (115001~1350000)	367	45.6	24.8	15	9501~11000
150000	398	56.4	30.2	16.5	11001~12500

本文设计 4 种到港船舶吨位分布，船舶平均载箱量分别为 1000TEU、2000TEU、3000TEU、4000TEU，如表 4-16 至 4-19 所示。在仿真模型中，用离散函数来实现不同的到港船舶的平均载箱量分布，这一离散函数的分布形式通过 n 个离散值（即 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 表示）和相应的累积概率（即 $a_1, a_1 + a_2, a_1 + a_2 + a_3, \dots, 1$ 表示）来定义，累积分布函数如公式（4-1）所示：

$$F(x) = \begin{cases} a_1 & x = x_1 \\ a_1 + a_2 & x = x_2 \\ a_1 + a_2 + a_3 & x = x_3 \\ a_1 + a_2 + a_3 + a_4 & x = x_4 \\ \dots & x = \dots \\ 1 & x = x_n \end{cases} \quad (4-1)$$

Arena 中的 DISCRETE 函数可以按相应的概率，从这样一个用户自定义的离散型概率分布中返回这 n 个值中的某一个，返回一个船舶地载箱量。

表 4-16 集装箱船设计船型各吨位及比例（平均载箱量为 1000TEU）

船舶吨位 DWT (t)	载箱量 (TEU)	所占比例 (%)	累积概率 (%)
3000	300	6	6
5000	500	11	17
10000	900	53	70
20000	1500	30	100
AVERAGE (TEU)= $300 \times 0.06 + 500 \times 0.11 + 900 \times 0.53 + 1500 \times 0.3 = 1000$ (TEU)			

表 4-17 集装箱船设计船型各吨位及比例（平均载箱量为 2000TEU）

船舶吨位 DWT (t)	载箱量 (TEU)	所占比例 (%)	累积概率 (%)
5000	500	10	10
10000	900	25	35
20000	1500	25	60
30000	3000	30	90
50000	4500	10	100
AVERAGE (TEU)= $500 \times 0.1 + 900 \times 0.25 + 1500 \times 0.25 + 3000 \times 0.3 + 4500 \times 0.1 = 2000$ (TEU)			

表 4-18 集装箱船设计船型各吨位及比例（平均载箱量为 3000TEU）

船舶吨位 DWT (t)	载箱量 (TEU)	所占比例 (%)	累积概率 (%)
10000	900	10	10
20000	1500	22	32
30000	3000	42	74
50000	4500	16	90
70000	6000	10	100
AVERAGE (TEU)= $900 \times 0.1 + 1500 \times 0.22 + 3000 \times 0.42 + 4500 \times 0.16 + 6000 \times 0.1 = 3000$ (TEU)			

表 4-19 集装箱船设计船型各吨位及比例（平均载箱量为 4000TEU）

船舶吨位 DWT (t)	载箱量 (TEU)	所占比例 (%)	累积概率 (%)
20000	1500	12	12
30000	3000	34	46
50000	4500	32	78
70000	6000	20	98
100000	8000	2	100
AVERAGE (TEU)= $1500 \times 0.12 + 3000 \times 0.34 + 4500 \times 0.32 + 6000 \times 0.2 + 8000 \times 0.02 = 4000$ (TEU)			

4.4.1.2 船舶到港规律

本文仿真模型中假定到港规律符合泊松分布,即到港船舶的时间间隔分布符合负指数分布,单位为小时,对于参数 λ 的选取,本文仿真模型中分别选取了 $\lambda=4$ 、 $\lambda=5$ 、 $\lambda=6$ 三组进行模拟,即船舶平均到港时间间隔为4h、5h、6h,和4种到港船舶平均载箱量分布组成了12种船舶到港时间间隔及平均载箱量的组合。

4.4.2 天气条件

天气情况直接影响着船舶能否通过航道进出泊位以及岸桥能否安全作业等,从而影响着整个港口的生产作业。导致港口不能正常作业、影响港口作业天数的主要情况有大雾天气、7级以上的大风天气、持续低温寒潮引起的结冰现象,以及台风、潮汐的变化等。在本文的仿真模型中,港口一年中作业时间为340天,不能作业天数为25天,将港口不能作业的天数平均分布到一年中,即模型每作业13.6天(326.4小时),停止作业1天(24小时),不考虑船舶乘潮进、出港的情况。在模型中将Weather设为Resource并添加failure row,在Advanced Process的Failure块中设置Up Time为326.4hours,Down Time为24hours。

4.4.3 航道条件及通航规律

在本文的仿真模型中对集装箱船舶的通航规则进行了简化处理,采用双向航道,一条进港航道一条出港航道,二者互不影响,每条航道只允许一条船舶占用。设航道满足本文中到达的最大集装箱船舶的满载吃水深度,满足通航条件。在本文中,航道不作为制约港口装卸的因素,故而不考虑航道长度和船舶通航航速,而是只考虑通航历时这一个参数,取通航历时服从三角分布,最短通航时间为15分钟,最有可能的通航时间为20分钟,最长的通航时间为25分钟,采用先到先服务的服务规则^[47]。在模型中,将Fairway in和Fairway out添加到Resource,其占用时间服从TRIA(15, 20, 25)。

4.4.4 锚地规模

锚地是指水域中供船舶进行停泊、掉头、编组、解编等活动的场所,通常选在避风条件好、水深适宜、海底平坦的水域。当船舶密集到港时,如果锚地规模充足,船舶到港后就能够顺利进入锚地待泊;如果锚地规模不足,部分船舶就不能进入锚地而滞留在港外,易造成生拥堵,并且不能进入锚地的船舶可能会发生一定的危险,如造成在浅水区搁浅现象等。因此,需要根据到港船舶的密度规律

以及到港船型来确定港口锚地的规模。在本文的仿真模型中对锚地的容量不设限,即假设锚地可以同时容纳无数艘集装箱船待泊。

4.4.5 车道

车道指集装箱码头陆域中供集装箱卡车运输集装箱行驶的道路,在本文的仿真模型中,车道指供集装箱卡车(内卡)从码头前沿到集装箱堆场运输集装箱行驶的道路。如果车道容量不足,则会造成内卡拥堵现象,影响港口装卸效率。由于车道不作为制约港口装卸的主要因素,在本文的仿真模型中对车道的容量不设上限,即假设可以同时容纳无数辆集卡行驶;且不考虑码头前沿到集装箱堆场各个街区的距离(即车道的长度)以及内卡的行驶速度,而是只考虑内卡对车道的占用时间这一参数,取占用时间服从三角分布,最短占用时间为3分钟,最有可能的占用时间为5分钟,最长的占用时间为7分钟,采用先到先服务的服务规则。

4.4.6 泊位组合

泊位是供船舶进行停靠作业的场所,泊位的数量和水深是衡量一个码头规模的重要指标。在本文的仿真模型中对集装箱码头的泊位吨级组合进行了简化处理,在泊位数固定的情况下,假定泊位数为5;靠泊方式采用的是固定式靠泊。固定式靠泊即为有几个泊位就停靠几艘船,泊位数等于最多停靠的船舶数量。在模型中分别将5个泊位设为 berth1 到 berth5,并添加到 Resource 栏中。

4.4.7 岸桥数量和装卸效率

集装箱装卸桥,简称岸桥,其主要功能是在码头前沿与船舶之间的装卸集装箱,是集装箱码头最重要的,也是最昂贵的装卸机械。在本文的仿真模型中岸桥均采用 20ft 箱岸桥,平均作业效率为 40TEU/h;当泊位数固定和变化时,在各种船舶平均载箱量和船流密度情况下,单泊位岸桥数量均取最优单泊位岸桥数量,具体数量将在下一章给出。

4.4.8 龙门起重机(场桥)数量和装卸效率

场桥是集装箱堆场主要的装卸设备,其主要功能是在集装箱卡车和堆场之间转移集装箱。在本文的仿真中,场桥作为主要的研究对象,采用的均为轮胎式龙门起重机。一般场桥的技术生产率为 25TEU/h~30 TEU/h,在场桥实际的装卸作业中,堆箱作业的生产率约等于技术生产率,而在取箱作业中由于翻箱和倒箱的存在,大车移动较多,生产率约为 15TEU/h^[48]。在模型中,设定场桥堆箱作业

的平均效率为 25TEU/h，作业时间服从三角分布， $TRIA(1, 2.5, 4)$ ；场桥取箱作业的平均效率为 15TEU/h，作业时间服从三角分布， $TRIA(2, 4, 6)$ 。场桥在堆场中按照街区进行布置，布置方法及各个设计年吞吐量情况下的各组场桥数将在下一章中进行讨论。

4.4.9 集装箱卡车

集装箱卡车又称集装箱拖挂车，其主要功能是负责集装箱的水平运输。按使用场所的不同，集装箱卡车又分为货场用集装箱卡车和公路用集装箱卡车，简称内卡和外卡。在本文的仿真中，一辆集卡一次只能运输一个标准集装箱（TEU）。内卡是主要的研究对象，本文中提到的集卡除特殊说明外，均指的是内卡，在各个设计年吞吐量情况下的各组内卡数量同样将在下一章中进行讨论。外卡不作为本文仿真的制约因素，故将外卡的数量设为足够大的数，在本文仿真模型中设定为 2000。

4.4.10 堆场容量

堆场容量的大小直接影响着泊位的装卸效率和港口吞吐量。当船舶到港密集时，如果堆场容量足够大，船舶入泊后就顺利装卸货物；如果堆场容量不足，部分船舶就需要在泊位等待装卸集装箱，造成船舶在泊时间过长。因此，需要根据船舶的到港规律以及船舶的载箱量来设定足够大的堆场容量，从一个泊位来说，其容量应能堆放泊位上停靠的最大集装箱船舶的载箱量的两倍^[48]。在本文仿真中，由于不考虑翻箱和倒箱作业对堆场容量的占用，且假设外卡在集装箱装卸完成后的六小时就即刻来取箱，堆场容量按照略小于所有泊位上停靠的集装箱船舶平均载箱量的两倍来选取；堆场不区分前后堆场，又由于集装箱只考虑进口重箱，故不需要对堆场进行箱区的划分；堆场按照街区进行布置，一个街区中含 60 个贝位，一个贝位可存放 6 列集装箱，最大堆高为 4 层，即一个贝位最多可容纳 24（6*4）个集装箱。在具体的建模仿真过程中，由于受到空间的限制，在各个街区中将每 6 个贝位合成一个大的贝位来考虑，即在具体模型中一个街区只含有 10 个贝位。各个船舶平均载箱量和泊位数下，堆场的街区数以及最多可容纳的集装箱量如表 4-16 所示。

表 4-16 各个船舶平均载箱量和泊位数下的堆场容量

船舶平均载箱量 (TEU)	泊位数	堆场中的街区数	最多可容纳的集装量 (TEU)
1000	3	4	5760
	5	6	8640
2000	3	8	11520
	4	10	14400
	5	12	17280
3000	4	16	23040
	5	18	25920
	6	24	34560
	7	28	40320
4000	5	24	34560
	7	36	51840

4.5 仿真运行时间的选取

在本文仿真模型中, 集装箱码头装卸系统开始时没有实体, 所有的资源都是空闲的, 这种“空且闲”的状态会引起系统的误差; Create 模块随机产生船舶实体, 导致同一个模型进行多次仿真得到的仿真结果也不同。为了消除上述两种系统误差, 本文将仿真模型运行足够长的时间。由于本文仿真模型运行达到稳定状态的时间为 2 天, 故在本文的仿真模型中将仿真运行时间设定为 1 年, 进行数据分析统计时误差可以忽略不计。

第五章 仿真结果分析

5.1 仿真结果评价指标的选取

本文综合考虑了港船双方的在港利益，以 2.3 节中评价指标（3）船舶平均在港时间为主要控制条件，评价指标（6）AWT/AST 为次要控制条件，通过下述选取原则，得出泊位数固定时，最优场桥数和集卡（内卡）数，以及泊位数、单泊位岸桥数、场桥数和集卡数的最优联合配置。

选取原则如下：当泊位数（ $N=5$ ）固定时，各设计年吞吐量下单泊位最优岸桥数量已知，如表 5-1 所示；在最优岸桥数量的基础上，通过设计不同组合的场桥数和内卡数，找到各组船舶平均在港时间曲线图的拐点处（船舶平均在港时间最短）对应的场桥数和集卡数，同时还需保证 $0.1 < \text{AWT/AST} < 0.5$ 。若船舶平均在港时间曲线图的拐点处对应场桥数（或集卡数）的 $\text{AWT/AST} > 0.5$ 或 < 0.1 ，则取满足 $0.1 < \text{AWT/AST} < 0.5$ 且船舶平均在港时间相对较短处对应的场桥数（或集卡数）。再将得到的各组场桥数和集卡数分别取平均值，则为最优的场桥数和集卡数，即集装箱码头装卸系统在相同装卸量情况下装卸时间最短，此时岸桥的单机装卸效率也最大。在进行泊位数、岸桥数、场桥数和集卡数的联合配置时，也是在已知泊位数和岸桥数的最优联合配置结果情况下，设计不同组合的场桥数和集卡数，采用上述选取原则得到最优的场桥数和集卡数，从而得到泊位数、岸桥数、场桥数和集卡数的最优联合配置结果。

表 5-1 $N=5$ 时，单泊位最优岸桥数目

船舶平均载箱量 (TEU)	船流密度参数 (h)		
	$\lambda=4$	$\lambda=5$	$\lambda=6$
1000	2	2	2
2000	4	3	3
3000	—	4	4
4000	—	5	5

资料来源：参考文献^[47]

这里在选择最优场桥数和最优集卡数时没有考虑港方对装卸机械的投资，因为对于港方来说，虽然投资为一次性的巨大投资，但装卸机械的使用寿命较长，且能够带来巨大的收益；而对于船方而言，一次港口装卸就是一次任务，在港时间过长会导致的船舶在港成本大大的增加，这是一次性的巨大浪费，会对船舶造

成巨大的损失，因此，本文中主要考虑船舶平均在港时间和待泊时间和在泊时间的比值为控制因素，同时兼顾港方成本。

5.2 单泊位最优场桥数和最优集卡数仿真结果分析

由于仿真情况较多，这里给出设计吞吐量（设计年吞吐量指仿真模型中一年内所有到港集装箱的总量）为 438 万 TEU（ $AVE(TEU)=2000$ ， $\lambda=4$ ），单泊位岸桥数为 4 时，各组场桥数和集卡数的设计组合的完整结果，如表 5-2 至 5-7 所示，其他仿真结果将以图表的形式给出。其中各街区场桥的数量按街区编号顺序由大到小进行布置（例如，街区数为 12，场桥数为 80 时，第一至第八街区的场桥数量为 7，其他四个街区场桥数量为 6）。表 5-8 至 5-10 给出了部分设计年吞吐量，各种场桥数和集卡数组合情况下年吞吐量的仿真结果。

表 5-2 设计吞吐量为 438（万 TEU），岸桥数为 4，集卡数为 105 时仿真结果统计

统计参数	场桥数				
	M=72	M=80	M=88	M=96	M=104
年吞吐量（万 TEU）	355.86	365.86	380.76	403.71	419.03
到港船舶艘次	2213	2209	2179	2055	2150
出港船舶艘次	1775	1863	1902	2040	2100
AST（h）	4.25	3.67	3.84	3.8	3.9
AWT（h）	25	22.72	22.2	20.05	19.8
泊位 1 岸桥平均利用率	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94
泊位 2 岸桥平均利用率	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93
泊位 3 岸桥平均利用率	0.94	0.94	0.94	0.91	0.93
泊位 4 岸桥平均利用率	0.95	0.93	0.93	0.91	0.92
泊位 5 岸桥平均利用率	0.94	0.94	0.93	0.89	0.91
街区 1 场桥平均利用率	0.66	0.61	0.55	0.55	0.51
街区 2 场桥平均利用率	0.66	0.61	0.55	0.55	0.5
街区 3 场桥平均利用率	0.66	0.61	0.54	0.54	0.5
街区 4 场桥平均利用率	0.66	0.61	0.54	0.54	0.49
街区 5 场桥平均利用率	0.65	0.6	0.64	0.54	0.49
街区 6 场桥平均利用率	0.64	0.53	0.64	0.55	0.47
街区 7 场桥平均利用率	0.64	0.52	0.64	0.55	0.44
街区 8 场桥平均利用率	0.62	0.51	0.6	0.52	0.42
街区 9 场桥平均利用率	0.6	0.71	0.58	0.5	0.57
街区 10 场桥平均利用率	0.57	0.71	0.55	0.48	0.57
街区 11 场桥平均利用率	0.57	0.68	0.53	0.47	0.54
街区 12 场桥平均利用率	0.55	0.65	0.53	0.46	0.52
集卡平均利用率	0.95	0.97	0.96	0.93	0.93
堆场平均利用率（%）	31.26	30.02	32.21	31.53	32.22
AWT/AST	0.17	0.1615	0.173	0.1895	0.197
船舶平均在港时间（h）	29.92	27.06	26.71	24.52	24.37

表 5-3 设计吞吐量为 438（万 TEU），岸桥数为 4，集卡数为 135 时仿真结果统计

统计参数	场桥数				
	M=72	M=80	M=88	M=96	M=104
年吞吐量（万 TEU）	364.15	384.15	398.78	418.73	429.96
到港船舶艘次	2140	2152	2098	2118	2191
出港船舶艘次	1823	1923	1992	2107	2149
AST（h）	4.05	3.8	3.75	3.75	3.45
AWT（h）	23.45	22	20.45	18.48	18.92
泊位 1 岸桥平均利用率	0.94	0.95	0.95	0.95	0.93
泊位 2 岸桥平均利用率	0.94	0.95	0.95	0.95	0.93
泊位 3 岸桥平均利用率	0.94	0.95	0.93	0.93	0.93
泊位 4 岸桥平均利用率	0.94	0.95	0.92	0.92	0.91
泊位 5 岸桥平均利用率	0.93	0.94	0.91	0.91	0.92
街区 1 场桥平均利用率	0.71	0.65	0.59	0.62	0.53
街区 2 场桥平均利用率	0.71	0.63	0.58	0.62	0.52
街区 3 场桥平均利用率	0.71	0.63	0.57	0.62	0.51
街区 4 场桥平均利用率	0.7	0.63	0.57	0.62	0.51
街区 5 场桥平均利用率	0.7	0.63	0.67	0.6	0.51
街区 6 场桥平均利用率	0.69	0.58	0.67	0.6	0.45
街区 7 场桥平均利用率	0.68	0.56	0.67	0.6	0.45
街区 8 场桥平均利用率	0.67	0.53	0.62	0.58	0.43
街区 9 场桥平均利用率	0.63	0.75	0.61	0.56	0.58
街区 10 场桥平均利用率	0.61	0.75	0.58	0.53	0.53
街区 11 场桥平均利用率	0.61	0.7	0.55	0.52	0.52
街区 12 场桥平均利用率	0.59	0.68	0.55	0.51	0.51
集卡平均利用率	0.91	0.9	0.88	0.86	0.83
堆场平均利用率（%）	30.77	30.1	31.86	31.96	32.83
AWT/AST	0.1727	0.1727	0.1834	0.2029	0.1823
船舶平均在港时间（h）	28.17	26.42	24.87	22.9	23.04

表 5-4 设计吞吐量为 438（万 TEU），岸桥数为 4，集卡数为 165 时仿真结果统计

统计参数	场桥数				
	M=72	M=80	M=88	M=96	M=104
年吞吐量（万 TEU）	377.98	387.84	407.3	427.32	427.45
到港船舶艘次	2226	2158	2134	2170	2175
出港船舶艘次	1918	1949	2034	2128	2157
AST（h）	4.23	3.81	4.05	3.9	3.35
AWT（h）	22.35	21.4	20.42	18.62	19.07
泊位 1 岸桥平均利用率	0.95	0.95	0.94	0.95	0.91
泊位 2 岸桥平均利用率	0.95	0.94	0.94	0.95	0.9
泊位 3 岸桥平均利用率	0.95	0.94	0.94	0.94	0.89
泊位 4 岸桥平均利用率	0.94	0.94	0.93	0.94	0.88
泊位 5 岸桥平均利用率	0.94	0.93	0.93	0.93	0.85
街区 1 场桥平均利用率	0.69	0.65	0.56	0.63	0.52
街区 2 场桥平均利用率	0.69	0.64	0.54	0.63	0.52
街区 3 场桥平均利用率	0.69	0.64	0.54	0.63	0.51
街区 4 场桥平均利用率	0.69	0.63	0.54	0.63	0.51
街区 5 场桥平均利用率	0.67	0.63	0.64	0.61	0.51
街区 6 场桥平均利用率	0.67	0.58	0.64	0.61	0.45
街区 7 场桥平均利用率	0.67	0.56	0.64	0.61	0.44
街区 8 场桥平均利用率	0.64	0.54	0.59	0.59	0.43
街区 9 场桥平均利用率	0.63	0.76	0.58	0.57	0.58
街区 10 场桥平均利用率	0.59	0.76	0.55	0.55	0.58
街区 11 场桥平均利用率	0.57	0.71	0.54	0.54	0.55
街区 12 场桥平均利用率	0.57	0.68	0.52	0.52	0.53
集卡平均利用率	0.81	0.83	0.79	0.8	0.73
堆场平均利用率（%）	31.95	31.78	32.28	33.16	31.67
AWT/AST	0.1893	0.178	0.1983	0.2095	0.1757
船舶平均在港时间（h）	27.25	25.88	25.14	23.19	23.09

表 5-5 设计吞吐量为 438（万 TEU），岸桥数为 4，场桥数为 72 时仿真结果统计

统计参数	集卡数				
	N=105	N=120	N=135	N=150	N=165
年吞吐量（万 TEU）	355.86	363.62	364.15	368.44	377.98
到港船舶艘次	2213	2186	2140	2252	2226
出港船舶艘次	1775	1803	1823	1848	1918
AST（h）	4.25	3.88	4.05	3.71	4.23
AWT（h）	25	23.7	23.45	21.95	22.35
泊位 1 岸桥平均利用率	0.95	0.96	0.94	0.96	0.95
泊位 2 岸桥平均利用率	0.94	0.95	0.94	0.95	0.95
泊位 3 岸桥平均利用率	0.94	0.95	0.94	0.95	0.95
泊位 4 岸桥平均利用率	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94
泊位 5 岸桥平均利用率	0.94	0.94	0.93	0.94	0.94
街区 1 场桥平均利用率	0.66	0.71	0.71	0.72	0.69
街区 2 场桥平均利用率	0.66	0.71	0.71	0.72	0.69
街区 3 场桥平均利用率	0.66	0.71	0.71	0.72	0.69
街区 4 场桥平均利用率	0.66	0.71	0.7	0.72	0.69
街区 5 场桥平均利用率	0.65	0.7	0.7	0.71	0.67
街区 6 场桥平均利用率	0.64	0.69	0.69	0.71	0.67
街区 7 场桥平均利用率	0.64	0.69	0.68	0.7	0.67
街区 8 场桥平均利用率	0.62	0.67	0.67	0.68	0.64
街区 9 场桥平均利用率	0.6	0.64	0.63	0.65	0.63
街区 10 场桥平均利用率	0.57	0.62	0.61	0.62	0.59
街区 11 场桥平均利用率	0.57	0.62	0.61	0.62	0.57
街区 12 场桥平均利用率	0.55	0.59	0.59	0.6	0.57
集卡平均利用率	0.95	0.94	0.91	0.86	0.81
堆场平均利用率（%）	31.26	31.43	30.77	31.34	31.95
AWT/AST	0.17	0.1637	0.1727	0.169	0.1893
船舶平均在港时间（h）	29.92	28.25	28.17	26.33	27.25

表 5-6 设计吞吐量为 438 (万 TEU)，岸桥数为 4，场桥数为 88 时仿真结果统计

统计参数	集卡数				
	N=105	N=120	N=135	N=150	N=165
年吞吐量 (万 TEU)	380.76	396.03	398.78	398.23	407.3
到港船舶艘次	2179	2243	2098	2219	2134
出港船舶艘次	1902	1983	1992	1991	2034
AST (h)	3.84	3.91	3.75	3.82	4.05
AWT (h)	22.2	21.3	20.45	20.17	20.42
泊位 1 岸桥平均利用率	0.94	0.95	0.95	0.95	0.94
泊位 2 岸桥平均利用率	0.94	0.95	0.95	0.95	0.94
泊位 3 岸桥平均利用率	0.94	0.94	0.93	0.95	0.94
泊位 4 岸桥平均利用率	0.93	0.94	0.92	0.94	0.93
泊位 5 岸桥平均利用率	0.93	0.93	0.91	0.94	0.93
街区 1 场桥平均利用率	0.55	0.58	0.59	0.6	0.56
街区 2 场桥平均利用率	0.55	0.57	0.58	0.58	0.54
街区 3 场桥平均利用率	0.54	0.57	0.57	0.58	0.54
街区 4 场桥平均利用率	0.54	0.57	0.57	0.58	0.54
街区 5 场桥平均利用率	0.64	0.66	0.67	0.68	0.64
街区 6 场桥平均利用率	0.64	0.66	0.67	0.68	0.64
街区 7 场桥平均利用率	0.64	0.66	0.67	0.68	0.64
街区 8 场桥平均利用率	0.6	0.62	0.62	0.63	0.59
街区 9 场桥平均利用率	0.58	0.6	0.61	0.61	0.58
街区 10 场桥平均利用率	0.55	0.57	0.58	0.61	0.55
街区 11 场桥平均利用率	0.53	0.56	0.55	0.58	0.54
街区 12 场桥平均利用率	0.53	0.55	0.55	0.56	0.52
集卡平均利用率	0.96	0.93	0.88	0.86	0.79
堆场平均利用率 (%)	32.21	31.54	31.86	31.99	32.28
AWT/AST	0.173	0.1836	0.1834	0.1894	0.1983
船舶平均在港时间 (h)	26.71	25.88	24.87	24.66	25.14

表 5-7 设计吞吐量为 438（万 TEU），岸桥数为 4，场桥数为 104 时仿真结果统计

统计参数	集卡数				
	N=105	N=120	N=135	N=150	N=165
年吞吐量（万 TEU）	419.03	422.84	429.96	430.76	427.45
到港船舶艘次	2150	2185	2191	2237	2175
出港船舶艘次	2100	2156	2149	2159	2157
AST（h）	3.9	3.42	3.45	3.3	3.35
AWT（h）	19.8	18.9	18.92	18.32	19.07
泊位 1 岸桥平均利用率	0.94	0.93	0.93	0.94	0.91
泊位 2 岸桥平均利用率	0.93	0.92	0.93	0.92	0.9
泊位 3 岸桥平均利用率	0.93	0.92	0.93	0.9	0.89
泊位 4 岸桥平均利用率	0.92	0.9	0.91	0.9	0.88
泊位 5 岸桥平均利用率	0.91	0.88	0.92	0.91	0.85
街区 1 场桥平均利用率	0.51	0.52	0.53	0.52	0.52
街区 2 场桥平均利用率	0.5	0.52	0.52	0.52	0.52
街区 3 场桥平均利用率	0.5	0.5	0.51	0.5	0.51
街区 4 场桥平均利用率	0.49	0.5	0.51	0.5	0.51
街区 5 场桥平均利用率	0.49	0.5	0.51	0.5	0.51
街区 6 场桥平均利用率	0.47	0.44	0.45	0.46	0.45
街区 7 场桥平均利用率	0.44	0.42	0.45	0.45	0.44
街区 8 场桥平均利用率	0.42	0.42	0.43	0.44	0.43
街区 9 场桥平均利用率	0.57	0.58	0.58	0.59	0.58
街区 10 场桥平均利用率	0.57	0.58	0.53	0.59	0.58
街区 11 场桥平均利用率	0.54	0.56	0.52	0.55	0.55
街区 12 场桥平均利用率	0.52	0.54	0.51	0.53	0.53
集卡平均利用率	0.93	0.87	0.83	0.78	0.73
堆场平均利用率（%）	32.22	32.63	32.83	32.97	31.67
AWT/AST	0.197	0.181	0.1823	0.1801	0.1757
船舶平均在港时间（h）	24.37	22.92	23.04	22.29	23.09

表 5-8 设计年吞吐量为 146（万 TEU）时年吞吐量仿真结果

设计年 吞吐量 （万 TEU）	单 泊 位 岸 桥 数	各设计组合情况下的实际年吞吐量（万 TEU）								
		集 卡 数	场桥数							
			30	32	34	35	36	38	40	42
146(A VE(TE U)=10 00, λ=6)	2	50	142.91	148.36	143.63	145.1	145.16	143.03	145.58	144.35
		55	143.11	—	—	142.7	—	—	147.7	—
		60	143.28	147.15	141.07	151.07	139.57	145.04	135.34	141.78
		65	150.91	—	—	148.19	—	—	148.26	—
		70	139.82	150.26	144.51	147.03	145.46	142.68	142.98	148.91

表 5-9 设计年吞吐量为 292（万 TEU）时年吞吐量仿真结果

设计年吞吐量（万 TEU）	单泊位岸桥数	各设计组合情况下的实际年吞吐量（万 TEU）					
		集卡数	场桥数				
			50	55	60	65	70
292((AVE(TEU)=2000, $\lambda=6$))	3	70	227.44	244.46	251.11	272.5	268.7
		80	254.11	—	282.57	—	286.54
		90	244.72	264.86	291.04	293.81	306.6
		100	265.64	—	281.94	—	277.67
		110	264.05	270.18	286.98	286.44	289.57

表 5-10 设计年吞吐量为 701（万 TEU）时年吞吐量仿真结果

设计年吞吐量（万 TEU）	单泊位岸桥数	各设计组合情况下的实际年吞吐量（万 TEU）					
		集卡数	场桥数				
			148	160	172	184	196
701(AVE(TEU)=4000, $\lambda=5$))	5	200	593.33	606.23	619.49	624.61	637.1
		220	595.87	—	619.98	—	640.12
		240	596.1	609.82	620.4	635.9	641.3
		260	593.51	—	619.9	—	646.28
		280	599.28	614.27	625.15	635	651.48

注：上表中横线表示在这种设计组合情况下没有进行仿真模拟。

由表 5-2 至 5-7 可以看出,随着场桥数和集卡数的增加,船舶平均在泊时间、平均待泊时间、各泊位岸桥利用率、各街区场桥利用率、集卡利用率、船舶平均在港时间都呈下降的趋势,但其下降的速率不同;堆场的平均利用率在 30%左右,变化不大,说明本文仿真模型中对堆场容量的设定满足港口集装箱的装卸需求,不制约港口的装卸效率(其他设计年吞吐量情况下的堆场平均利用率的情况也是如此);AWT/AST 值的变化趋势不明显,变化不大。船舶平均在港时间随着场桥数和集卡数的变化情况将在下面的章节中具体分析,此外还分析了各组场桥数和集卡数组合情况下的 AWT/AST 值,保证 $0.1 < \text{AWT/AST} < 0.5$ 。

由表 5-8 至 5-10 可以看出,当集装箱码头设计年吞吐量较小时,实际的年吞吐量并不随着场桥数和集卡数的增加而明显增加。如设计吞吐量为 146（万 TEU）时,场桥数从 30 增加至 42,实际年吞吐量没有发生明显的增加;集卡数从 50 增加至 70,实际年吞吐量也没有明显增加。反之,当集装箱码头设计年吞吐较大时,随着场桥数和集卡数的增加,实际年吞吐量明显增大,并且当场桥数和集卡数增大到一定程度后,实际年吞吐量的增长趋势可能不再明显。如设计年

吞吐量为 292 (万 TEU) 时, 场桥数由 50 增加至 55, 实际年吞吐量明显增加, 而由 65 增加至 70 时, 实际年吞吐量变化趋势不明显; 集卡数由 70 增加至 80, 实际年吞吐量变化明显, 而由 100 增加至 110 时, 实际年吞吐量将不再产生明显的变化。

5.2.1 场桥数对船舶平均在港时间的影响分析

图 5.1—5.10 表示设计年吞吐量为 146 万 TEU ($AVE(TEU)=1000$, $\lambda=6$)、175 万 TEU ($AVE(TEU)=1000$, $\lambda=5$)、219 万 TEU ($AVE(TEU)=1000$, $\lambda=4$)、292 万 TEU ($AVE(TEU)=2000$, $\lambda=6$)、350 万 TEU ($AVE(TEU)=2000$, $\lambda=5$)、438 万 TEU ($AVE(TEU)=2000$, $\lambda=4$)、438 万 TEU ($AVE(TEU)=3000$, $\lambda=6$)、525 万 TEU ($AVE(TEU)=1000$, $\lambda=5$)、584 万 TEU ($AVE(TEU)=4000$, $\lambda=6$)、701 万 TEU ($AVE(TEU)=1000$, $\lambda=5$) 十种情况, 船舶平均在港时间随岸桥数的变化规律。

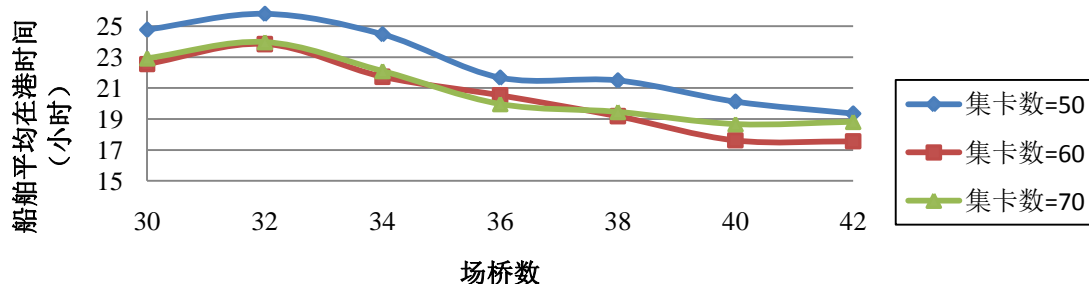


图 5.1 146 万 TEU ($AVE(TEU)=1000$, $\lambda=6$) 船舶平均在港时间

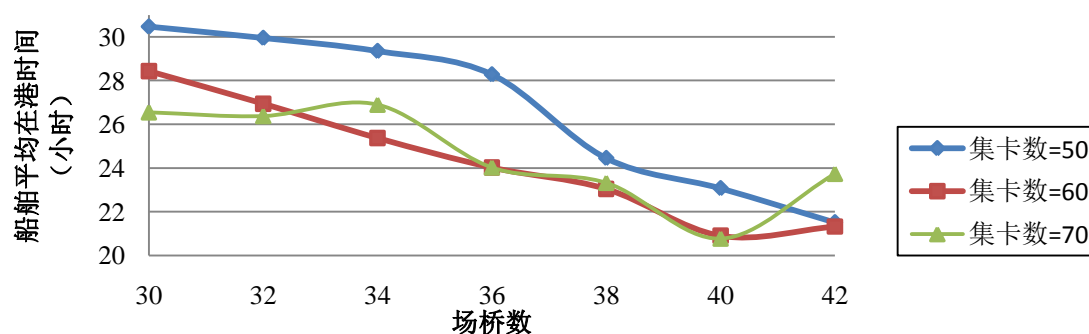
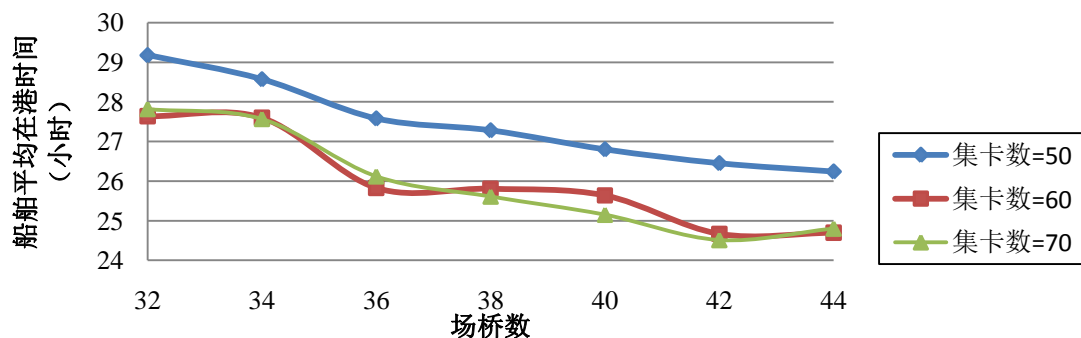
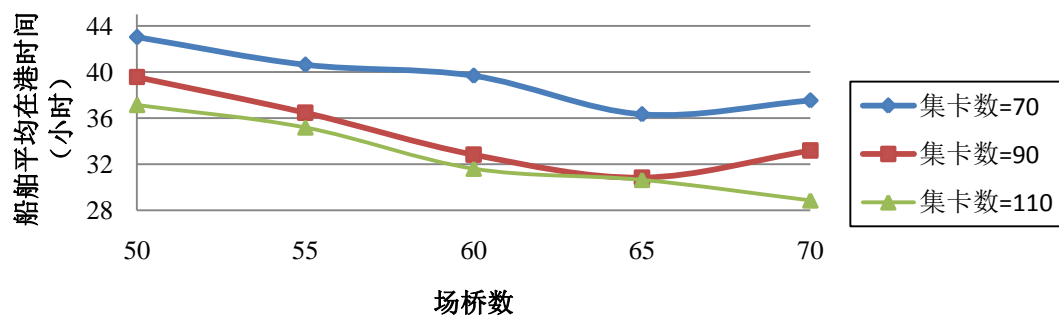
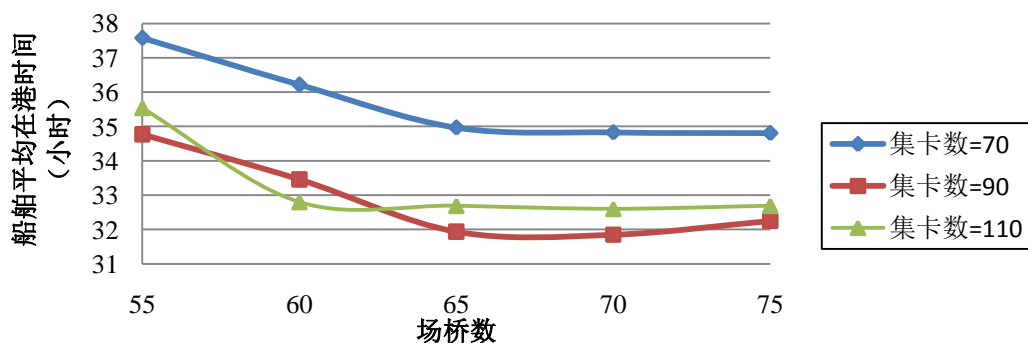
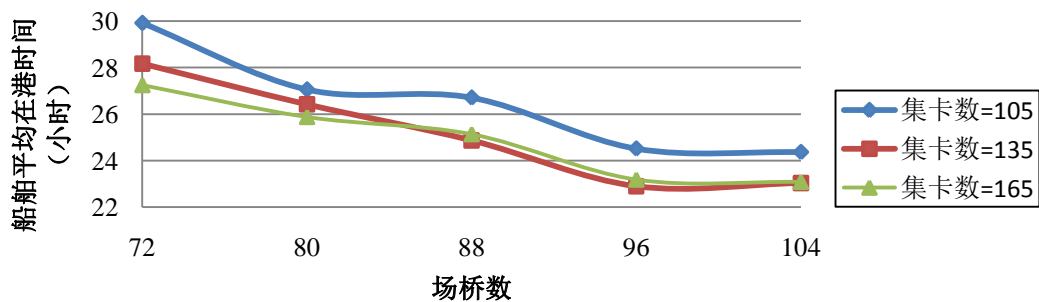
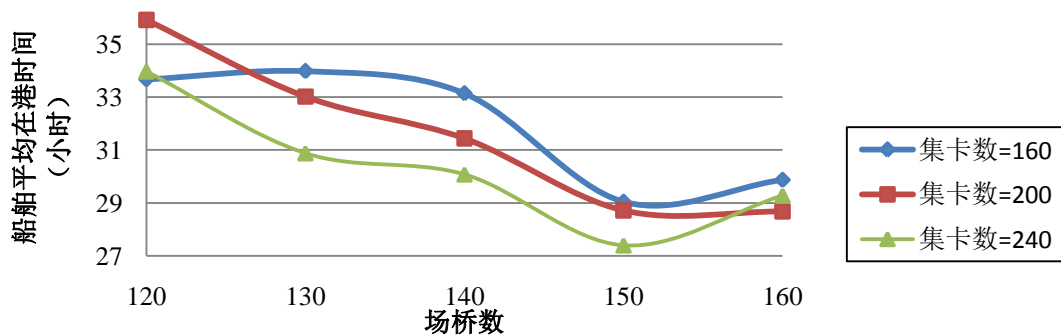
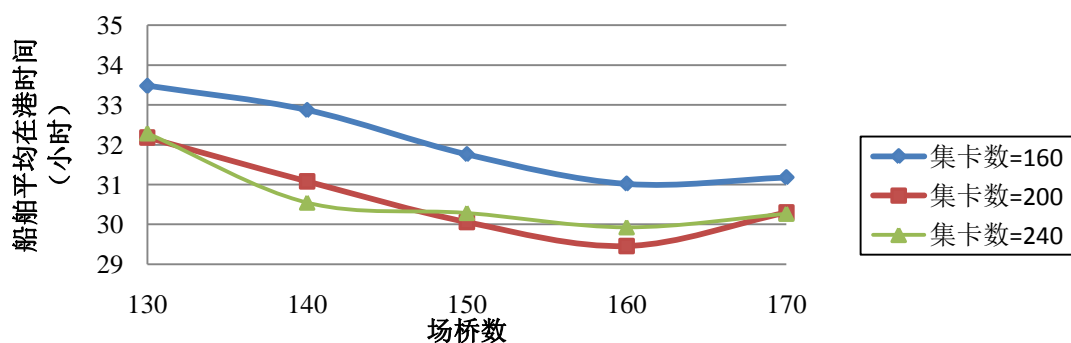
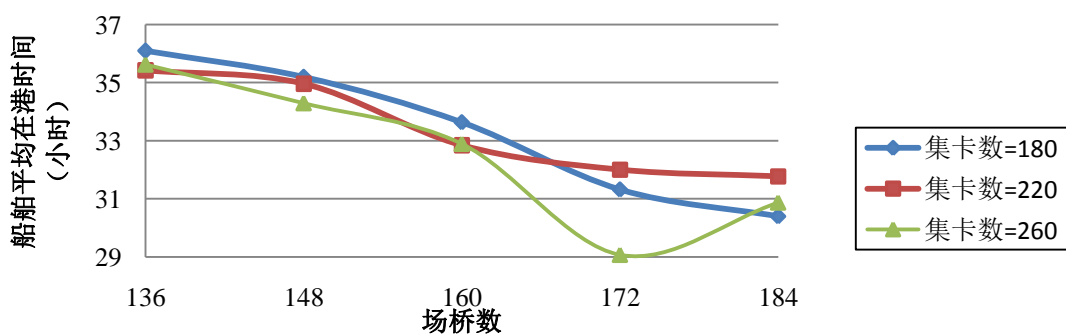
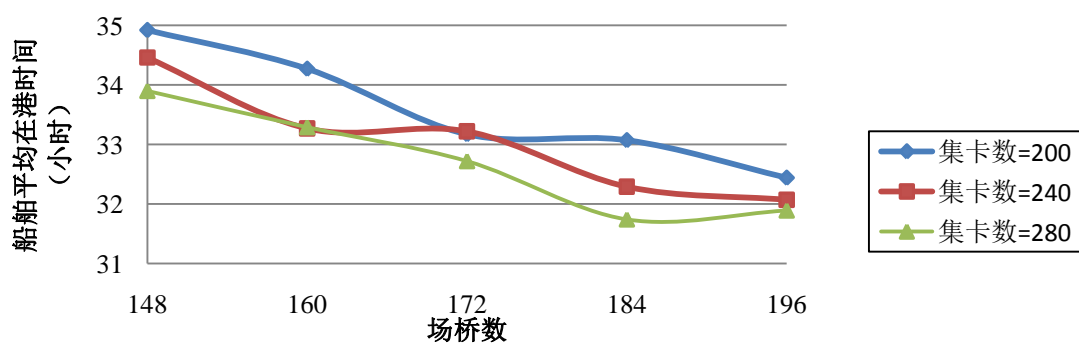


图 5.2 175 万 TEU ($AVE(TEU)=1000$, $\lambda=5$) 船舶平均在港时间

图 5.3 219 万 TEU (AVE(TEU)=1000, $\lambda=4$) 船舶平均在港时间图 5.4 292 万 TEU (AVE(TEU)=2000, $\lambda=6$) 船舶平均在港时间图 5.5 350 万 TEU (AVE(TEU)=2000, $\lambda=5$) 船舶平均在港时间图 5.6 438 万 TEU (AVE(TEU)=2000, $\lambda=4$) 船舶平均在港时间

图 5.7 438 万 TEU ($\text{AVE}(\text{TEU})=3000$, $\lambda=6$) 船舶平均在港时间图 5.8 525 万 TEU ($\text{AVE}(\text{TEU})=3000$, $\lambda=5$) 船舶平均在港时间图 5.9 584 万 TEU ($\text{AVE}(\text{TEU})=4000$, $\lambda=6$) 船舶平均在港时间图 5.10 701 万 TEU ($\text{AVE}(\text{TEU})=4000$, $\lambda=5$) 船舶平均在港时间

由以上图示可以看出,在各个设计年吞吐量情况下,当集装箱码头单泊位岸桥数、集卡数一定时,随着场桥数的增加,船舶平均在港时间在降低,最初下降的幅度较大,而当场桥数增大到一定数量时,船舶平均在港时间将不再下降,甚至还会增加,船舶平均在港时间曲线存在一个拐点。因此,可以找到船舶平均在港时间曲线拐点处对应的场桥数,即在该场桥数下,船舶平均在港时间最短。对于个别船舶平均在港时间曲线未出现拐点的情况,取船舶平均在港时间最短处对应的场桥数。结果如表 5-11 所示。

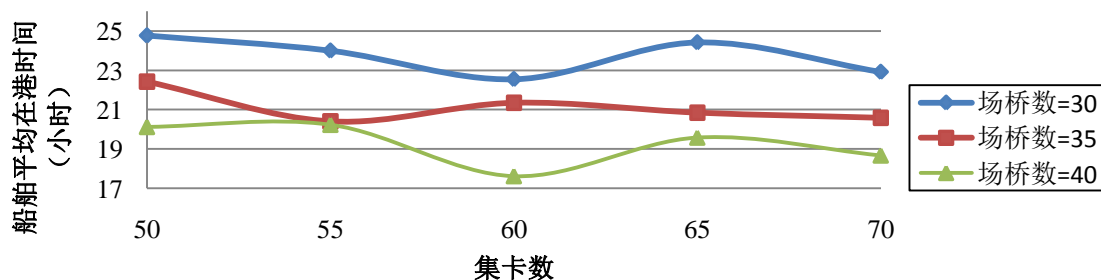
表 5-11 船舶平均在港时间拐点对应的场桥数

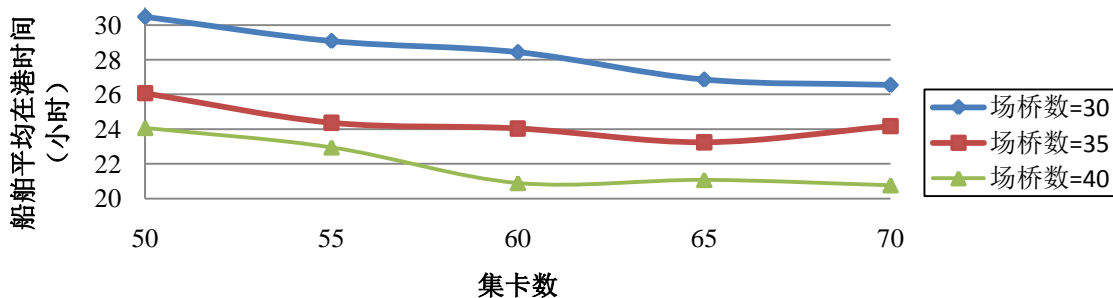
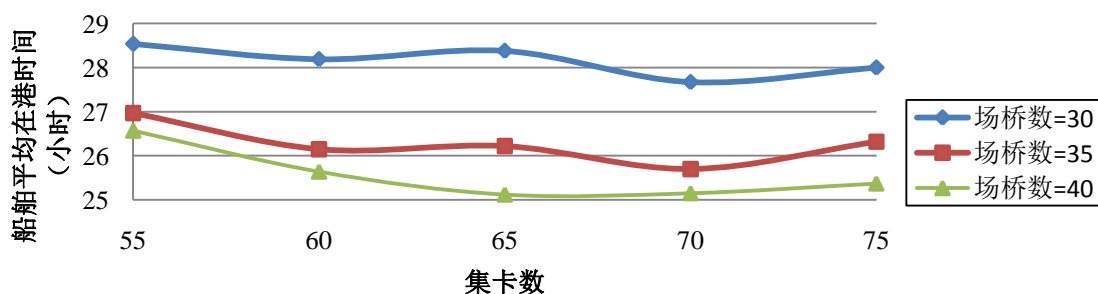
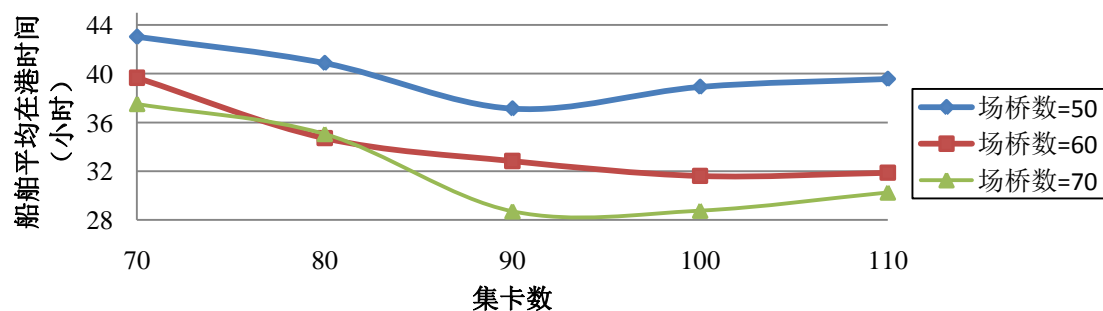
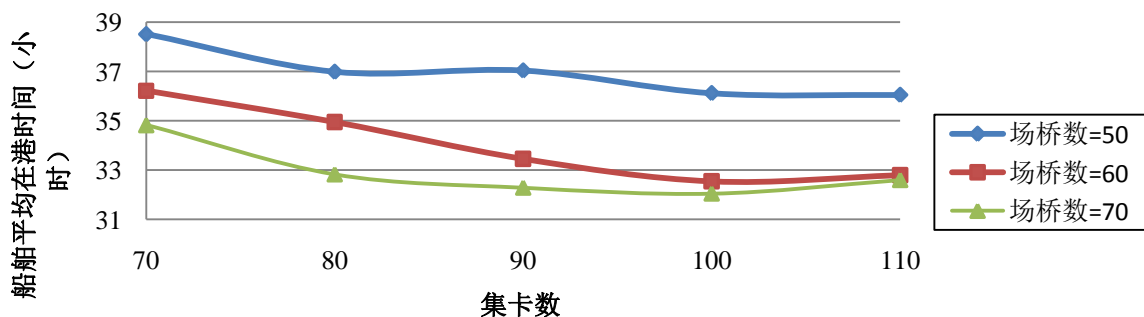
设计年吞吐量 (万 TEU)	单泊位岸桥数	船舶平均在港时间拐点对应的场桥数		
146 (AVE(TEU)=1000, $\lambda=6$)	2	42 (50)	40 (60)	40 (70)
175 (AVE(TEU)=1000, $\lambda=5$)	2	42 (50)	40 (60)	40 (70)
219 (AVE(TEU)=1000, $\lambda=4$)	2	44 (50)	42 (60)	42 (70)
292 (AVE(TEU)=2000, $\lambda=6$)	3	65 (70)	65 (90)	70 (110)
350 (AVE(TEU)=2000, $\lambda=5$)	3	70 (70)	70 (90)	70 (110)
438 (AVE(TEU)=2000, $\lambda=4$)	4	104 (105)	96 (135)	104 (165)
438 (AVE(TEU)=3000, $\lambda=6$)	4	150 (160)	150 (200)	150 (240)
525 (AVE(TEU)=3000, $\lambda=5$)	4	160 (160)	160 (200)	160 (240)
584 (AVE(TEU)=4000, $\lambda=6$)	5	184 (180)	184 (220)	172 (260)
701 (AVE(TEU)=4000, $\lambda=5$)	5	196 (200)	196 (240)	184 (280)

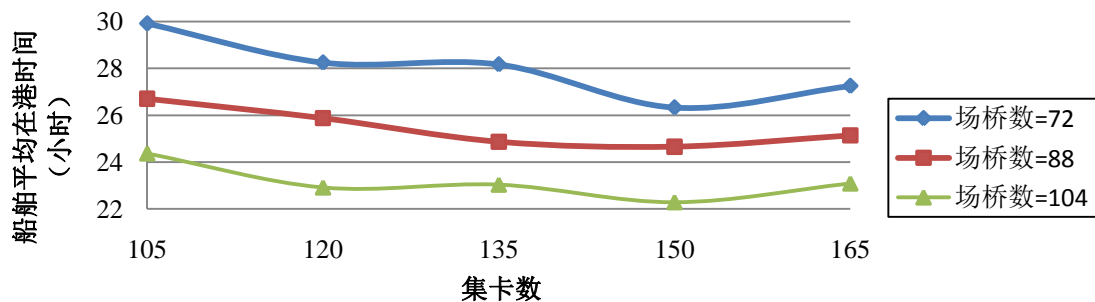
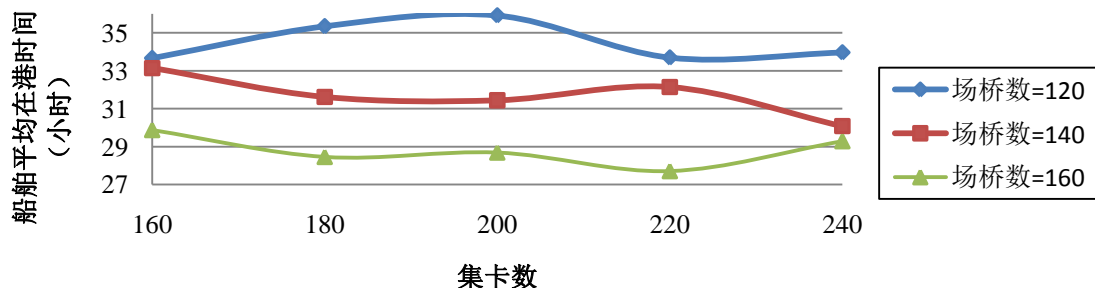
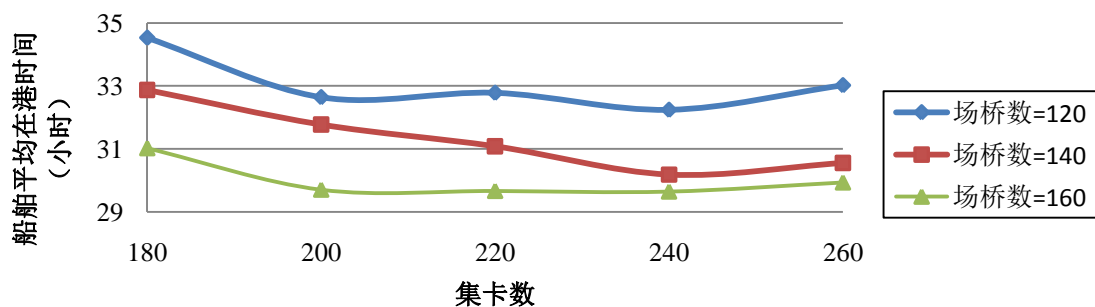
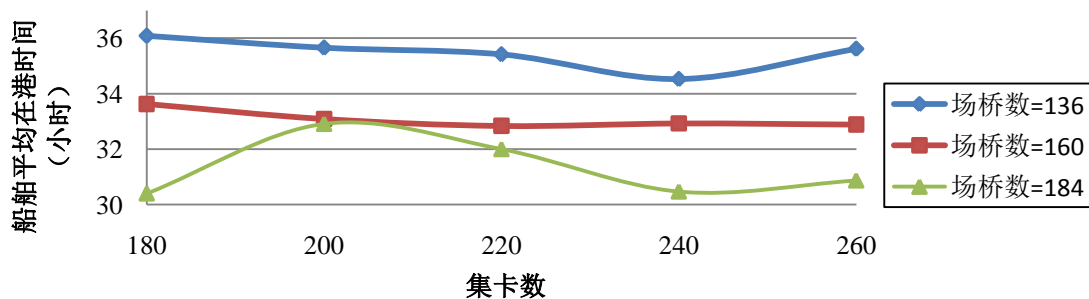
注:上表中()中的数表示得到该船舶平均在港时间拐点处对应场桥数时的集卡数。

5.2.2 集卡数对船舶平均在港时间的影响分析

图 5.11—5.20 表示设计年吞吐量为 146 万 TEU (AVE(TEU)=1000, $\lambda=6$)、175 万 TEU (AVE(TEU)=1000, $\lambda=5$)、219 万 TEU (AVE(TEU)=1000, $\lambda=4$)、292 万 TEU (AVE(TEU)=2000, $\lambda=6$)、350 万 TEU (AVE(TEU)=2000, $\lambda=5$)、438 万 TEU (AVE(TEU)=2000, $\lambda=4$)、438 万 TEU (AVE(TEU)=3000, $\lambda=6$)、525 万 TEU (AVE(TEU)=1000, $\lambda=5$)、584 万 TEU (AVE(TEU)=4000, $\lambda=6$)、701 万 TEU (AVE(TEU)=1000, $\lambda=5$) 十种情况,船舶平均在港时间随集卡(内卡)数的变化规律。

图 5.11 146 万 TEU (AVE(TEU)=1000, $\lambda=6$) 船舶平均在港时间

图 5.12 175 万 TEU ($AVE(TEU)=1000$, $\lambda=5$) 船舶平均在港时间图 5.13 219 万 TEU ($AVE(TEU)=1000$, $\lambda=4$) 船舶平均在港时间图 5.14 292 万 TEU ($AVE(TEU)=2000$, $\lambda=6$) 船舶平均在港时间图 5.15 350 万 TEU ($AVE(TEU)=2000$, $\lambda=5$) 船舶平均在港时间

图 5.16 438 万 TEU ($\text{AVE(TEU)}=2000$, $\lambda=4$) 船舶平均在港时间图 5.17 438 万 TEU ($\text{AVE(TEU)}=3000$, $\lambda=6$) 船舶平均在港时间图 5.18 525 万 TEU ($\text{AVE(TEU)}=3000$, $\lambda=5$) 船舶平均在港时间图 5.19 584 万 TEU ($\text{AVE(TEU)}=4000$, $\lambda=6$) 船舶平均在港时间

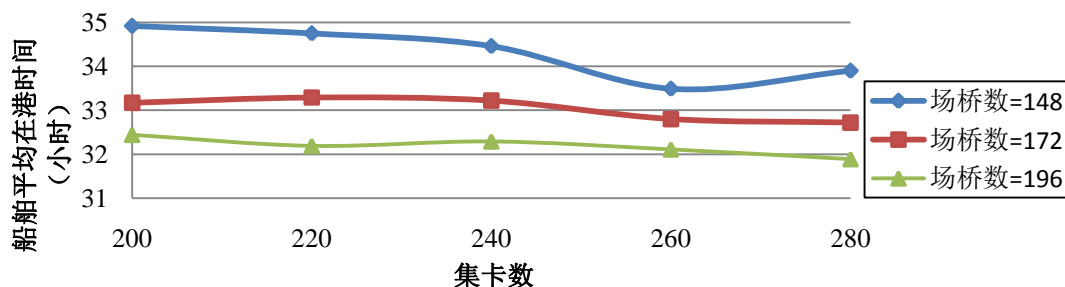
图 5.20 701 万 TEU ($\text{AVE}(\text{TEU})=4000$, $\lambda=5$) 船舶平均在港时间

图 5.11 至图 5.20 表示了在不同设计年设计吞吐量情况下,当单泊位岸桥数、场桥数一定时,船舶平均在港时间随集卡数增加的变化情况。可以看出,在大部分情况下,船舶平均在港时间随着集卡数增加的变化情况与场桥类似,即船舶平均在港时间开始下降趋势明显,之后将不再下降甚至会产生增加,船舶平均在港时间曲线存在一个拐点。而在个别情况下,随着集卡数的增加,船舶平均在港时间变化趋势不太明显,船舶平均在港时间曲线不存在一个明显的拐点。在本文的仿真模型设定中,船舶的到港时间和平均载箱量都是服从一定规律的随机分布的,当到港船舶较多(或较少)、平均载箱量较大(或较小)时,其对船舶平均在港时间产生的影响可能会大于集卡数增加一定数量产生的影响,即出现上述个别情况。同时,通过以上图示也可以看出,本文对于集卡数的增加幅度要大于场桥数的增加幅度,这主要是因为对于集装箱码头而言,集卡的装卸效率要小于场桥的装卸效率。

找到船舶平均在港时间曲线拐点处对应的集卡数,即在该集卡数下,船舶平均在港时间最短,对于个别船舶平均在港时间曲线未出现拐点的情况,取船舶平均在港时间最短处对应的集卡数。结果如表 5-12 所示。

表 5-12 船舶平均在港时间拐点对应的集卡数

设计年吞吐量 (万 TEU)	单泊位岸桥数	船舶平均在港时间拐点对应的集卡数		
146 ($\text{AVE}(\text{TEU})=1000$, $\lambda=6$)	2	60 (30)	55 (35)	60 (40)
175 ($\text{AVE}(\text{TEU})=1000$, $\lambda=5$)	2	70 (30)	65 (35)	60 (40)
219 ($\text{AVE}(\text{TEU})=1000$, $\lambda=4$)	2	70 (30)	70 (35)	65 (40)
292 ($\text{AVE}(\text{TEU})=2000$, $\lambda=6$)	3	90 (50)	100 (60)	90 (70)
350 ($\text{AVE}(\text{TEU})=2000$, $\lambda=5$)	3	110 (50)	100 (60)	100 (70)
438 ($\text{AVE}(\text{TEU})=2000$, $\lambda=4$)	4	150 (72)	150 (88)	150 (104)
438 ($\text{AVE}(\text{TEU})=3000$, $\lambda=6$)	4	220 (120)	240 (140)	220 (160)
525 ($\text{AVE}(\text{TEU})=3000$, $\lambda=5$)	4	240 (120)	240 (140)	220 (160)
584 ($\text{AVE}(\text{TEU})=4000$, $\lambda=6$)	5	240 (136)	260 (160)	240 (184)
701 ($\text{AVE}(\text{TEU})=4000$, $\lambda=5$)	5	260 (148)	280 (172)	280 (196)

注: 上表中 () 中的数表示得到该船舶平均在港时间拐点处对应的集卡数时的场桥数。

5.2.3 AWT/AST 值分析

通过前面的分析,得到了各个设计年吞吐量情况下,船舶平均在港时间拐点处对应场桥数和集卡数。为了进一步得到各个设计年吞吐量情况下的最优场桥数和集卡数,还需要综合考虑 AWT/AST 值。AWT/AST 是国际上用来反映泊位系统服务质量高低的指标。通常认为待泊时间不宜超过装卸作业时间的 10%~50%,即它的取值范围应该介于 $0.1 < \text{AWT/AST} < 0.5$ 之间。

对于表 5-11 和 5-12 中,不满足 $0.1 < \text{AWT/AST} < 0.5$ 的场桥数和集卡数,将取船舶平均在港时间相对较短且满足 $0.1 < \text{AWT/AST} < 0.5$ 的场桥数和集卡数代替。以设计年吞吐量为 146 (AVE(TEU)=1000, $\lambda=6$) 万 TEU 为例进行说明。设计年吞吐量为 146 万 TEU,各场桥数和集卡数设计组合情况下的 AWT/AST 值计算结果如表 5-13 所示。

表 5-13 AWT/AST 指标值计算结果

设计 年吞 吐量 （万 TEU）	单 泊 位 岸 桥 数	各设计组合情况下的 AWT/AST 值								
		集 卡 数	场桥数							
			30	32	34	35	36	38	40	42
146(A VE(T EU)=1 000, λ=6)	2	50	0.107	0.1265	0.12	0.0805	0.0898	0.0666	0.0758	0.0524
		55	0.0927	—	—	0.0556	—	—	0.0688	—
		60	0.0762	0.0971	0.0839	0.0867	0.0547	0.0608	0.0346	0.0403
		65	0.9031	—	—	0.0538	—	—	0.0535	—
		70	0.0744	0.0975	0.0796	0.0681	0.0472	0.0604	0.0417	0.0552

注:上表中横线表示在这种设计组合情况下没有进行仿真模拟。

由表 5-11 和表 5-12 可以得到,设计年吞吐量为 146 万 TEU 时,集卡数为 50、60、70 时船舶平均在港时间曲线拐点对应的场桥数分别为 42、40、40;场桥数为 30、35、40 时船舶平均在港时间曲线对应的集卡数分别为 60、55、60;而综合考虑表 5-13 中的 AWT/AST 指标值,可以看到这些拐点处对应的场桥数和集卡数均不满足 $0.1 < \text{AWT/AST} < 0.5$,所以只能取满足条件且船舶平均在港时间相对较短处对应的场桥数和集卡数,即取场桥数为 34,集卡数为 50。

5.2.4 最优场桥数和集卡数

根据 5.1 节所述选取原则, 通过以上章节的分析, 得到了由船舶平均在港时间和 AWT/AST 两个参数同时控制的场桥数和集卡数。将得到的各组场桥数和集卡数分别取得平均值, 即为各个设计年吞吐量情况下, 泊位数 ($N=5$) 固定, 单泊位岸桥数为最优岸桥数时, 集装箱码头的最优场桥数和集卡 (内卡) 数, 如表 5-14 所示。

表 5-14 最优场桥数和集卡数

设计年吞吐量 (万 TEU)	单泊位岸桥数	场桥数				集卡数			
		船舶平均在港时间拐点对应的场桥数			平均值 (最优岸桥数)	船舶平均在港时间拐点对应的集卡数			平均值 (最优集卡数)
146 (AVE(TEU)=1000, $\lambda =6$)	2	34			34	50			50
175 (AVE(TEU)=1000, $\lambda =5$)	2	42	42	40	41	70	65	70	68
219 (AVE(TEU)=1000, $\lambda =4$)	2	44	42	42	43	70	70	65	68
292 (AVE(TEU)=2000, $\lambda =6$)	3	65	65	70	67	90	100	90	93
350 (AVE(TEU)=2000, $\lambda =5$)	3	70	70	70	70	110	100	100	103
438 (AVE(TEU)=2000, $\lambda =4$)	4	104	96	104	101	150	150	150	150
438 (AVE(TEU)=3000, $\lambda =6$)	4	150	150	150	150	220	240	220	227
525 (AVE(TEU)=3000, $\lambda =5$)	4	160	160	160	160	240	240	220	237
584 (AVE(TEU)=4000, $\lambda =6$)	5	184	184	172	180	240	260	240	247
701 (AVE(TEU)=4000, $\lambda =5$)	5	196	196	184	192	260	280	280	273

在表 5-14 中, 我们可以看到, 随着设计年吞吐量的增加、船舶平均载箱量的不断增大以及船舶到港密度的增大, 集装箱码头的最优场桥数和集卡数不断增大, 但是增长趋势并不呈线性变化; 最优机械配比 (最优岸桥数: 最优场桥数: 最优集卡数) 在整体上也呈增长趋势。如设计年吞吐量为 146 万 TEU 时, 最优机械配比为 1:3.4:6.5, 而当设计年吞吐量为 701 万 TEU 时, 最优机械配比为 1:7.68:10.92。此外, 我们还可以看到, 对于船舶平均载箱量 AVE(TEU)=2000, 船流密度参数 $\lambda =4$ 和船舶平均载箱量 AVE(TEU)=3000, 船流密度参数 $\lambda =6$ 两种情况, 设计年吞吐量同为 438 万 TEU, 单泊位最优岸桥数均为 4, 但是最优场桥数和集卡数差距却较大。这也正说明了集装箱船的大型化对码头装卸机械的装卸效率有了更高的要求, 其对码头的要求已不仅是航道水深, 更重要的是具有高效快捷的装卸工艺, 这对提高码头通过能力和服务水平, 降低运营成本至关重要。

在实际的仿真过程中, 由于集装箱船舶平均载箱量和船舶到港时间具有随机性, 且受到泊位数和最优单泊位岸桥数的限制, 仿真模型中实际完成年吞吐量与

设计年吞吐量之间存在一定的差距。图 5.21 即给出了各组最优场桥数和集卡数情况下的实际年吞吐量。

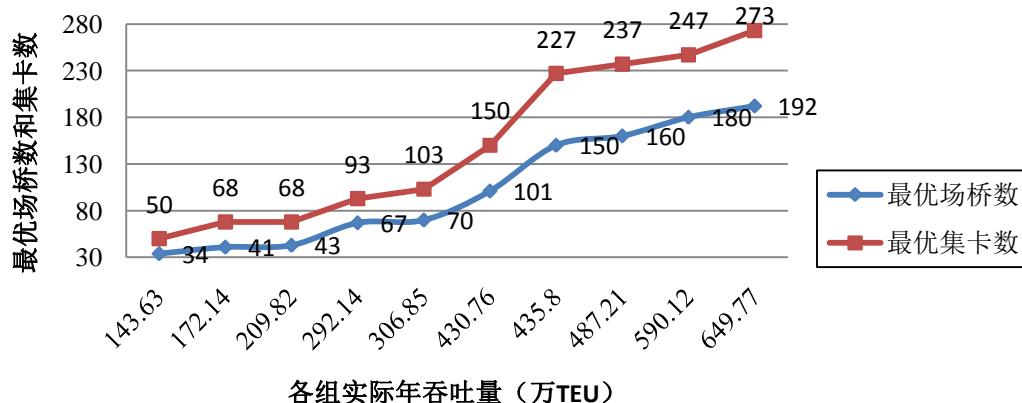


图 5.21 各组最优场桥数和集卡数下的实际年吞吐量

5.3 泊位、岸桥、场桥、集卡联合配置方法

分析上一节的仿真结果，我们得到了泊位数固定（ $N=5$ ）情况下，一些设计年吞吐量下的集装箱码头最优单泊位岸桥数，场桥数和集卡数。而对于拟建港口而言，为了更加平衡船港双方的利益，即不过分增大港方的投资，造成港方资源成本和人力成本的浪费；又要尽量缩短船舶平均在港时间，降低船舶在港成本，增加船舶到港率，提高港口服务质量，往往需要对泊位、岸桥、场桥、集卡等集装箱码头资源进行联合配置。

各种船舶平均载箱量和船流密度情况下，泊位数和岸桥数的最优联合配置结果已知，如表 5-16 所示。在此基础，本文将进一步按照 5.1 节所述的选取原则，得到各种情况下的最优场桥数和集卡数，从而得到泊位、岸桥、场桥、集卡（内卡）的联合配置结果。

表 5-16 最优泊位数和单泊位岸桥数配置

船舶平均载箱量 (TEU)	船流密度参数 (h)		
	$\lambda=4$	$\lambda=5$	$\lambda=6$
1000	(3,4)	(3,3)	(3,3)
2000	(4,5)	(4,4)	(3,5)
3000	(7,4)	(6,4)	(4,5)
4000	(7,5)	(5,5)	(5,5)

资料来源：参考文献^[47]

注：表内括号中第一个是最优泊位数，第二个数是单泊位最优岸桥数。

5.4 泊位与装卸机械最优联合配置结果及结果分析

根据上节所述的泊位与装卸机械（岸桥、场桥、集卡）的联合配置方法，可以得到各个船舶平均载箱量和船流密度情况下的泊位数与装卸机械数的联合配置结果，如表 5-17 所示。各组最优泊位数和装卸机械数情况下的实际年吞吐量如图 5.22 所示。

表 5-17 最优泊位数和装卸机械数配置

船舶平均载箱量 (TEU)	船流密度参数 (h)		
	$\lambda=4$	$\lambda=5$	$\lambda=6$
1000	(219,3,4,43,72)	(175,3,3,41,65)	(146,3,3,36,55)
2000	(438,4,5,106,170)	(350,4,4,92,127)	(292,3,5,67,90)
3000	(657,7,4,186,266)	(525,6,4,140,220)	(438,4,5,140,207)
4000	(876,7,5,246,350)	(701,5,5,192,273)	(584,5,5,180,247)

注：表内括号中第一个数是设计年吞吐量，单位为万 TEU；第二个数是最优泊位数，第三个数是单泊位最优岸桥数，第四个数是最优场桥数，第五个数是最优集卡数。

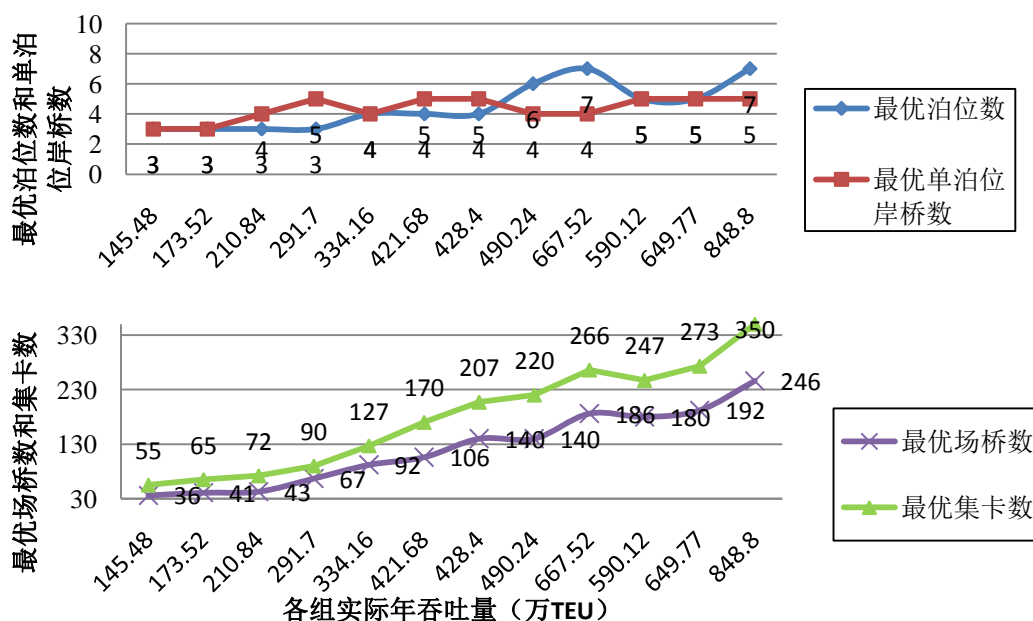


图 5.22 各组最优泊位数和装卸机械数下的实际年吞吐量

由表 5-14 和表 5-17 的结论可以看出，在相同的船舶平均载箱量和船流密度的情况下，即设计年吞吐量相同，当泊位数固定或是不固定时，得到的最优场桥数和集卡数相差不大。由此可知，集装箱码头到港船舶的载箱量和到港规律是决定装卸机械配置数量的主要因素。但是，对于泊位和装卸机械进行联合配置能更

为综合地考虑船港双方的综合利益，能更有效地降低船舶在港时间和在港成本。此外，由本文的仿真也可以看到，评价指标的选取对得到最优配置组合有着重大意义，选取不同的评价指标可能得出不同的最优解，因此分析问题的过程中一定要分清问题的主要和次要矛盾，选取合适的评价指标，全面地分析问题。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本文基于排队论理论,利用计算机仿真技术,运用仿真软件 Arena 建立了集装箱码头装卸系统的仿真模型,以船舶平均在港时间和 AWT/AST 两个指标值作为控制条件,得到了泊位数固定,单泊位最优岸桥数已知情况下,不同设计年吞吐量下的最优场桥数和集卡数以及给出了泊位数、岸桥数、场桥数和集卡数的联合配置结果,如表所示。现总结本文如下:

(1) 对于已建港口,泊位数固定,单泊位岸桥已知,本文设计了十种不同的设计年吞吐量。在各个设计年吞吐量下,随着场桥数和集卡数的增加,船舶平均在港时间在降低,最初下降的幅度较大,而当场桥数增大到一定数目时,船舶平均在港时间将不再下降,甚至还会增加,船舶平均在港时间曲线存在一个拐点。找到各组船舶平均在港时间曲线图的拐点处(船舶平均在港时间最短)对应的场桥数和集卡数,同时还需保证 $0.1 < \text{AWT/AST} < 0.5$ 。若船舶平均在港时间曲线图的拐点处对应场桥数(或集卡数)的 $\text{AWT/AST} > 0.5$ 或 < 0.1 ,则取满足 $0.1 < \text{AWT/AST} < 0.5$ 且船舶平均在港时间相对较短处对应的场桥数(或集卡数)。再将得到的各组场桥数和集卡数分别取平均值,则为最优的场桥数和集卡数。集装箱船的大型化对码头的要求已不仅是航道水深,更重要的是具有更加高效快捷的装卸工艺和更高装卸效率的装卸机械。

(2) 对于拟建港口,在各个设计年吞吐量情况下,泊位数和岸桥数的最优联合配置结果已知。在此基础,本文将进一步按照上述的选取原则,得到各种情况下的最优场桥数和集卡数,进而得到泊位、岸桥、场桥、集卡的联合配置结果。

6.2 展望

由于时间与精力有限,本文无法对所有问题的细节都进行仔细研究,本文的一些不足之处可以作为继续研究的方向:

(1) 在本文的仿真模型中,对泊位进行了简化处理,没有考虑大小泊位的差别。岸桥的装卸效率也只采用一个固定参数,没有详细讨论。泊位和岸桥虽然不是本文的研究重点,但是对最优场桥数和集卡数有比较大的影响。

(2) 本文的仿真模型中，考虑场桥的装卸效率时没有具体的考虑堆场中的翻箱和倒箱作业，只是按照堆箱和取箱作业，对场桥的装卸效率进行了分别的设定。此外，对于集卡的装卸效率，也没有考虑码头前沿至堆场各个街区的具体距离以及集卡的时速。在未来的研究中，可以继续细化这些部分的研究。

(3) 本文选取最优场桥数和集卡数时，采用的是三组最优结果取平均的方法，在未来的研究中可以考虑多进行几组仿真，再取各组最优结果的平均值，这样可以使仿真结果更准确且更具说服力。

参考文献

- [1] 陈长庚, 中国港口集装箱运输发展的历史回顾[J], 中国港口, 2002 (06-10)
- [2] 中国交通年鉴社, 中国交通年鉴[M], 北京: 中国交通年鉴社, 2012, 316-317
- [3] Steenken D, Stefan V, Robert S, Container terminal operation and operations research-a classification and literature review[J]. OR Spectrum, 2004, 26: 3-49
- [4] Edmond E D, Maggs R P, How useful are queue models in Port investment decisions for container berths[J]. Journal of the Operation Research Society, 1978, 19(8): 741-750
- [5] Lai K K, Shih K, A study of container berth allocation[J].Journal of Advanced Transportation, 1992, 26, 45-60
- [6] Imai A, Nagaiwa K, Tat C W, Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia[J].Journal of Advanced Transportation , 1997, 31(1): 75-94
- [7] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S, The dynamic berth allocation problem for a container port[J]. Transportation Research-B, 2001, 35(4): 401-407
- [8] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S, Corrigendum to “The dynamic berth allocation problem for a container port” [Transportation Research-B, 35(2001): 401-407][J]. Transportation Research-B, 2005, 39: 197
- [9] Nishimura E, Imai A, Papadimitriou S, Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms[J].European Journal of Operational Research, 2001, 131(2): 282-292
- [10] Monaco M F, Sammarra M, The berth allocation problem; a strong formulation solved by a Lagrangean approach[J].Transportation Science, 2007, 41(2): 265-280
- [11] 赵智帮, 用排队论推算港口最佳泊位数[J], 水运工程, 1982, 2, 8-15
- [12] 张一诺, 港口通用泊位最佳数量的计算方法[J], 系统工程理论与实践, 1983, 1, 35-41
- [13] 张维中, 排队理论在确定集装箱码头吞吐能力中的应用[J], 海岸工程, 1998, 1, 67-71
- [14] Lee D, Wang H Q, Miao L, Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals [J].Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2008, 44(1): 124-135

- [15] Meisel F, Wichmann M, Container sequencing for quay cranes with internal reshuffles[J].OR Spectrum, 2010, 32(3): 569-591
- [16] 徐斌, 基于 Agent 的集装箱码头实时调度系统的研究: [博士学位论文], 大连: 大连理工大学, 2010
- [17] 赵雪静, 港口集装箱作业计划模型研究: [硕士学位论文], 大连: 大连海事大学, 2011
- [18] Meisel F, Bierwirth C, A unified approach for the evaluation of quay crane scheduling models and algorithms [J].Computers & Operations Research, 2011, 38(3): 683-693
- [19] Bierwirth C, Meisel F, A fast heuristic for quay crane scheduling with interference constraints [J].Journal of Scheduling, 2009, 12(4): 345-345
- [20] Daganzo C F, The crane scheduling problem[J]. Transportation Research-B, 1989, 23(3): 159-175
- [21] Peterkofsky R I., Daganzo C F, A branch and bound solution method for the crane scheduling problem[J]. Transportation Research-B, 1990, 24(1): 159-172
- [22] Tavakkoli-Moghaddam R, Makui A, Salahi S, et al, An efficient algorithm for solving a new mathematical model for a quay crane scheduling problem in container Ports [J].Computers & industrial Engineering, 2009, 56(1): 241-248
- [23] 计明军, 靳志宏, 集装箱码头集卡与岸桥协调调度优化[J], 复旦大学学报(自然科学版), 2004(4), 476-480
- [24] Wang Y, Kim K, A quay crane scheduling algorithm considering the workload of yard cranes in a container yard [J].Journal of intelligent Manufacturing, 2011, 22(3): 459-470
- [25] Petering M E H, Murty K G, Effect of block length and yard crane deployment systems on overall Performance at a sea port container transshipment terminal [J].Computers & Operations Research, 2009, 36(5): 1711-1725
- [26] 陈超, 王海燕, 集装箱码头泊位生产运作优化模型[J], 大连海事大学学报, 2009(4), 52-54
- [27] Legato P, Mazza R M, Berth planning and resources optimization at a container terminal via discrete event simulation[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 133(3): 537-54
- [28] Nam K C, Kwak K C, Yu N S, Simulation study of container terminal performance [J].Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering-Asce, 2002, 128(3): 126-132

- [29] Cananaco P, Legato P, Mazza R M, et al, A queuing network model for the management of berth crane operations [J]. Computers & Operations Research, 2008, 35(8): 2432-2446
- [30] Legato P, Mazza R M, Trunfio R, Simulation-based optimization for discharge/loading operations at a maritime container terminal[J]. OR Spectrum, 2010, 32(3): 543-567
- [31] 杨静蕾, 丁以中, 集装箱码头设备配置的模拟研究[J], 系统仿真学报, 2003, 15, 1069-1073
- [32] 杨春霞, 王晓军, 集装箱码头前沿生产系统优化调度理论与方法[M], 北京: 国防工业出版社, 2012, 33-35
- [33] 汪兴东, 集装箱堆场堆存策略比较研究: [硕士学位论文], 大连: 大连海事大学, 2011
- [34] 中国港口协会, 国际集装箱港口管理实务 [M], 上海: 上海人民出版社, 2007
- [35] 孟玉珂, 排队论基础及应用 (第一版) [M], 上海: 同济大学出版社, 1989, 1-36, 91-101
- [36] 杨兴晏, 海港船舶到港规律浅析[J], 港工技术, 1986, 1, 6-13
- [37] 董婧, 基于 WITNESS 的集装箱码头串联排队网络系统资源配置研究: [硕士学位论文], 上海: 上海交通大学, 2006
- [38] 刘丰, 集装箱码头泊位能力与相关指标研究: [硕士学位论文], 大连: 大连海事大学, 2009
- [39] 郑鑫, 基于 flexsim 的集装箱堆存布局优化和仿真研究: [硕士学位论文], 北京: 北京交通大学, 2008
- [40] 王宏达, 船舶在港停泊艘天费用之二[J], 水运工程, 1991, 6, 9-12
- [41] 何江华, 计算机仿真 [M], 安徽: 中国科学技术大学出版社, 2010, 1-9
- [42] 冯允成, 邹志红, 周泓, 离散系统仿真 [M], 北京: 机械工业出版社, 1998, 6-12
- [43] 顾启泰, 离散事件系统建模与仿真 [M], 北京: 清华大学出版社, 1999, 115-116
- [44] David Kelton, W., Randall P. Sadowski, David T. Sturrock 著, 周泓等译, 仿真: 使用 Arena 软件 (原书第 3 版) [M], 北京: 机械工业出版社, 2007
- [45] 彭传圣, 港口码头系统计算机模拟技术应用的现状与发展 [J], 水运科学研究所学报, 1999, 1, 1-10
- [46] 中华人民共和国交通部, JTJ211-99, 海港总平面设计规范局部修订[S], 北京: 人民交通出版社, 2007-12-15

- [47]倪晓畅, 基于排队论的集装箱码头泊位与岸桥联合配置仿真: [硕士学位论文], 天津: 天津大学, 2013
- [48]赵瑾, 港口集装箱物流系统装卸机械优化配置研究: [硕士学位论文], 武汉: 武汉理工大学, 2008

发表论文情况说明

发表的论文:

[1] 李世森, 王熹芳, 凹包内散乱点集 Delaunay 四面体角度剖分算法, 水道港口, 2013 (录用待刊)

致 谢

本文的研究工作是在李世森导师的悉心指导下完成的,在此对李老师耐心的指导表示诚挚的感谢。两年半的研究生生活中,李老师科学高效的学习方法、一丝不苟的科研精神让我受益匪浅。我的理论知识、科学研究能力以及创新实践能力都在李老师的指导下得到了提高。除了科研学习之外,李老师在日常生活中也给予了我极大的关心和鼓励,让我能够健康且快乐的度过两年半的研究生生活。

此外,我还要感谢我的室友唐巾评同学。她跟我同在一个实验室工作,两年多来无论在学习上还是生活上,她都给予了我无微不至的关怀和巨大的帮助,对我的论文工作也提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

我还要感谢我实验室的师姐倪晓畅老师,以及师弟黄睿同学。他们在我论文遇到问题和困难时,及时提供了指导和帮助,让我顺利解决了问题,克服了困难,体验到了整个实验室大家庭的温暖以及团队的力量。值此完成论文之际,向他们表达我最真挚的谢意。

最后,我要感谢我的家人,朋友。他们的理解、支持和鼓励是我坚强的后盾,使我度过一个又一个的难关,顺利完成论文,愉快地度过了研究生生活。