

分 类 号 _____

密 级 _____

U D C _____

单位代码 10151

基于排队网络理论的集装箱码头配置 优化研究

鞠 言

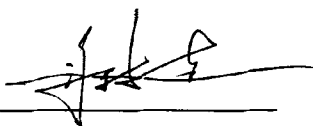
指 导 教 师 肖青 职 称 副教授

学位授予单位 大连海事大学

申请学位级别 工程硕士 学科与专业 交通运输工程

论文完成日期 2014 年 4 月 论文答辩日期 2014 年 6 月

答辩委员会主席





Y2584316

**A study on optimization of container
terminal configuration based on queueing network theory**

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

**by
JuYan
(Transportation Engineering)**

Thesis Supervisor: Professor Xiao Qing

June 2014

大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：本论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，撰写成硕士学位论文“基于排队网络理论的集装箱码头配置优化研究”。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表或未公开发表的成果。本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：张言

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解大连海事大学有关保留、使用研究生学位论文的规定，即：大连海事大学有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连海事大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。同意将本学位论文收录到《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》（中国学术期刊（光盘版）电子杂志社）、《中国学位论文全文数据库》（中国科学技术信息研究所）等数据库中，并以电子出版物形式出版发行和提供信息服务。保密的论文在解密后遵守此规定。

本学位论文属于： 保 密 ☐ 在_____年解密后适用本授权书。

不保密 ☒ （请在以上方框内打“√”）

论文作者签名：张言

导师签名：王立

日期：2014年6月19日

摘 要

在经济全球化的迅速推进下，各个国家国际间的贸易往来和物流流转的业务越来越多，各国对现代物流的运转能力和效率也提出了更高的要求。而在物流体系中始终占有重要地位的航运业，一直是大家研究探讨的焦点。与此同时，集装箱码头，作为航运物流最关键的枢纽环节，其整个内部网络的配置水平和运转效率直接关系到整个物流系统的运行效率，甚至直接影响国际贸易往来的效率和整个集装箱码头的经济效益。因此，有必要对集装箱码头内部网络各个环节进行深入地研究，针对各个节点的问题，提出解决途径，从而提高整个集装箱码头内部网络的运转效率。

本文首先介绍了研究背景和意义，并概括和总结国内外文献，随后简要介绍研究内容和论文的整体结构。

文章的主体部分中，先对集装箱码头内部物流网络进行了总体的概述，包括集装箱码头内部物流网络的地位和作用，及其构成要素、主要特点和层次结构，并指出了集装箱码头内部物流网络运作的主要内容。随后介绍了如今研究集装箱码头内部网络的核心理论方法——排队网络理论，并基于此理论，进行模拟仿真研究。文章最核心的部分就是利用定量的计算工具，并基于排队网络进行仿真建模，通过节点配置的排队网络解析计算和仿真计算结果对比分析，来解决集装箱码头内部网络各个节点的配置问题。文章的最后，是对整篇论文研究内容的一个概括性总结和对未来研究内容的展望。

本文基于排队网络理论，并通过仿真建模的方式对集装箱码头内部网络各个节点的配置问题进行分析研究，在一定程度上为集装箱码头内部物流网络优化发展提供了参考价值。

关键词：集装箱码头；排队网络；节点配置优化

ABSTRACT

With the acceleration of the economic globalization, international commerce and logistics businesses have developed prosperously. The running ability and efficiency of modern logistics are highly demanded in today's international business. While, shipping business, as an important part of modern logistics system, has always been the focus of the researchers' research and discussion. As the key element of shipping logistics, its internal network configuration level and running efficiency have the direct bearing on the operating efficiency of the whole logistics system, even directly influence the international trade efficiency and the economic benefit of the whole container terminals. Therefore, it is necessary to deeply study every step in the internal network of container terminals and find the solutions to the existing problems of each node, so as to increase the operating efficiency of the whole container terminals' internal network.

The present paper first elaborated the research background and significance of the current study, then gave an overall review and summary of the literature at home and abroad. Next, the paper introduced the research content and structure of the paper.

The main part of the paper first gave an overview of the internal logistics network of container terminals, including its position and role, components, major features and hierarchical structure. Next, the paper introduced the essential theoretical approach to studying container terminals internal network---queuing network theory. The most essential part of the paper was using quantitative calculating tools and the simulation modeling based on the queuing network to solve the configuration problems of every node in the internal network, through comparatively analyzing the results of analytic calculation and simulation calculation. In the end, the paper briefly summarized the whole research content and proposed the forecast to future research.

The current paper, based on queuing network theory, analyzed and studied the configuration problems of every node in the internal network of container terminals by means of simulation modeling. To some extent, it provided reference value for the development and optimization of container terminals' internal logistics network.

Key Words: Container terminals; Queuing network; Node configuration optimization

目 录

第 1 章绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	2
1.3 国内外研究综述	2
1.3.1 码头泊位系统研究	3
1.3.2 堆场物流系统研究	4
1.3.3 码头布局与规划仿真研究	5
1.4 研究内容与结构	6
第 2 章 集装箱码头内部物流网络运作的概述	7
2.1 集装箱码头内部物流网络的地位和作用	7
2.1.1 集装箱码头内部物流网络在物流网络中的地位和作用	7
2.1.2 集装箱码头内部物流网络在集装箱码头中的地位和作用	7
2.2 集装箱码头内部物流网络的构成、特点和层次结构	8
2.2.1 集装箱码头内部物流网络构成的要素	9
2.2.2 集装箱码头内部物流网络的主要特点和层次结构	9
2.3 集装箱码头内部物流网络的主要内容	10
2.3.1 战略层集装箱码头内部物流网络运作的内容	10
2.3.2 战术层面集装箱码头内部物流网络运作的内容	11
2.3.3 作业层集装箱码头内部物流网络运作的内容	11
2.4 本章总结	11
第 3 章 排队网络的相关理论	12
3.1 排队网络的解析分析	12
3.1.1 串联排队网络	13
3.1.2 闭排队网络	13
3.1.3 Jackson 排队网络	14
3.2 排队网络的模拟仿真	16
3.2.1 仿真算法确定	17
3.2.2 排队仿真模型的建立	18
3.3 本章总结	19
第 4 章 基于排队网络的集装箱码头内部物流网络的节点配置	20
4.1 节点配置的排队网络解析模型	20
4.1.1 节点配置的串联排队网络解析模型	20

4.1.2 节点配置的闭排队网络解析模型	24
4.1.3 节点配置的 Jackson 排队网络的解析模型	28
4.2 节点配置排队网络的仿真模型	35
4.2.1 仿真模型的建立	35
4.2.2 输入参数	38
4.2.3 输出参数	38
4.3.4 仿真模型的检验	39
4.3 节点配置的排队网络解析计算与仿真计算结果的对比分析	41
4.3.1 Jackson 排队网络解析与仿真计算结果分析	42
4.3.2 对比分析小结	44
4.4 本章总结	45
第 5 章 实证分析	46
5.1 S 港集装箱码头一期概况	46
5.2 S 港集装箱码头一期内部物流网络的节点配置	46
第 6 章 结论与展望	51
6.1 结论	51
6.2 展望	52
参考文献	53
致谢	57

第1章绪论

1.1 研究背景

近年来,我国对外贸易增量迅猛,无论进口出口都有着显著的提高对商品的大量需求也给物流的运转提出了更高层次的要求。而较高效率运转的物资运输体系需要完整的物流网络,而且物流网络的每个部分都很重要,一个部分出问题,可能导致整个网络瘫痪。这就需要我们做好物流网络的每一个环节,提高各个节点的运行效率,才能保证整个物流网络的高效运转。物流的发展影响着国民经济的发展,物流产业作为国民经济的重要组成部分,它包括了许多在我国的 GDP 中占有很大比重的产业^[1]。例如:铁路运输、公路运输、海上运输、内河运输、航空运输、管道运输等,涉及内贸、外贸、供销、物资、粮食、医药等多个产业等领域,这些物流业的发展对我国国民经济发展,对服务业的发展,对就业的增加,都具有举足轻重的作用^[2]。水路运输运量大,运输成本低,平均运输距离长等优点,有着不可被替代的地位。

伴随着后金融危机时代的到来,一度萎靡不振的航运事业又迎来了新的复苏契机,但与此同时伴随机遇而来的是来自世界范围内更加激烈的竞争。我国作为进出口贸易大国,这就更需要的我们审时度势,加快调整的步伐,将我国的物流航运事业做得更好。而富有竞争力的航运物流业离不开最核心的枢纽环节——集装箱码头,只有以高效运转的集装箱码头作支撑,才能保证整个物流体系的运行效率,才能提高航运港口的经济效益,满足快速增长的国际贸易往来需求。

随着集装箱船舶不断向大型化、专业化发展,同质化竞争日益严峻,市场对集装箱码头的运转效率提出了更高的要求。码头是整个物流供应链服务当中的核心节点,集装箱码头为了满足客户更加个性化需求,抢占市场,在激烈的竞争中立于不败之地,应该做好内部物流网络的每一个环节,优化配置,充分整合资源。

到目前为止,很多论文研究的都是集装箱内部的物流系统内的若干个要素对其进行合理的配置。经常是一个节点达到最优而忽视了其他要素的工作效率和作业成本。为了更加全面和系统的研究集装箱码头内部物流系统,可以通过引入物流

网络各节点之间的相互关系，系统地优化集装箱码头内部物流系统。装箱码头的运作是一个网络系统。对于集装箱码头运作效率的研究可以转化为对集装箱码头内部物流网络的研究。本文就是通过对集装箱码头内部物流网络的研究，提高集装箱码头的效率。

1.2 研究意义

集装箱码头是运输链中的一个关键性的环节，在这之中整个运输链的效率受物流作业效率的影响^[3]。为了符合现今物流发展的需求，码头内部物流网络节点的配置需要不断地被优化，使其能够充分利用码头配置，提高作业效率。这就要求码头管理者制定科学的作业顺序，提高资源利用率、减少船舶在港口的逗留时间。

国内现有的部分集装箱码头，尽管码头已经具备了先进的生产设施并安装了实时控制系统，但相比国外的一些更先进的集装箱码头还具有一定的差距。现代物流和供应链管理对于码头的要求，关键在码头内部物流系统的资源配置、任务安排和路径优化等方面，同时，码头物流信息系统也有待于进一步完善和发展。现代物流的管理对于码头管理者的要求是：码头内部物流网络配置的合理性需要不断提升，对码头船舶装卸作业的作业计划以及作业顺序制定要有较高的科学性，要足够重视^[4]。

本文主要针对集装箱码头内部物流网络进行作业层面的研究，通过对龙门吊、桥吊、集卡节点的配置，使这三者的数量配比在最优的情况下进行工作，提高集装箱码头内部物流网络整体的工作效率。

1.3 国内外研究综述

随着集装箱码头在现代物流发展领域的地位不断提高，为了能够适应市场需求，降低物流运营成本，提高整个流程的效率和整体效益，集装箱码头内部物流系统需要不断完善。目前，国内外对于这样一个复杂的动态离散系统的研究范围主要集中在：码头泊位系统、堆场物流系统以及码头布局与规划仿真三大方面。

1.3.1 码头泊位系统研究

码头的泊位是所有集装箱业务操作的集中场所,如何将有限的泊位进行合理分配,优化利用率,直接关系到集装箱码头运作整体效率。

国外学者中, Lim(1998)以码头最小使用距离为研究目标,假设集装箱船舶抵达码头港口后便直接停靠在某一泊位口,直到其离开港口,研究了动态的泊位分配问题^[5]。Nishimura 和 Imai(2001)利用泊位分配的约束条件,更深层次地研究了动态的泊位分配的相关问题,建造非线性整数规划模型,并且采用遗传算法对该模型进行了求解^[6]。Guan 等(2002)以实现集装箱船舶总服务时间最短为研究目标,模拟了动态连续性的泊位分配,并用启发式算法对模型进行求解^[7]。Park 和 Kim(2002)以实现集装箱船舶因故停留港口造成损失最小化为研究目标,建造了泊位分配模型,并用模拟退火算法对其求解。Imai 和 Nishimura(2005)以实现集装箱船舶停港时间最短为研究目标,假设每一个泊位的吃水深度相同,把静态泊位分配延伸为动态泊位分配问题,利用启发式算法对模型求解^[8]。Hansen 等(2008)以实现集装箱船舶停港时间最短为研究目标,探讨研究了泊位分配问题。Golias 等(2009)利用了时间窗的概念,假设提前进入时间窗或延迟离开时间窗则将费用最大化,假设是在时间窗范围里进出则将费用最小化,研究了泊位分配问题。Saharidis 和 Golias 等(2010)初次尝试采用层次分析法,对动态抵达的泊位调度和离散空间问题进行了探讨,运用层次结构的级别来区别两个互相矛盾的优化目标,与此同时利用交互式算法对问题求解。

国内学者中汪锋,陶德馨(2003)通过研究分析了在吞吐量一定的情况下,怎样用最佳的泊位数:在泊位数确定的条件下如何优化调度岸边起重机^[9]。这两个问题,提出应根据集装箱船舶到港密度来进行合理安排具体的调度方式的理论。杨海东(2007)采用,把集装箱船舶进港顺序总结为9种船舶进港的指泊条件,通过对泊位系统模拟的方式以及数据模拟,得出的结论满足每一艘到港船舶在港时间最小目标函数条件下,船舶泊位的选择、泊位利用情况和最优的进港顺序^[10]。韩骏,孙晓娜,靳志宏(2007)通过协调调度优化模型,对岸桥的联合调度和集装箱码头的泊位分配问题进行了研究^[11]。周鹏飞、康海贵(2008)根据集装箱船

舶到达港口时间和货物装卸时间的不确定性,建立了面向随机环境的集装箱码头泊位—岸桥分配模型,并针对此模型创造出改进的遗传算法^[12]。

1.3.2 堆场物流系统研究

堆场作为集装箱码头最重要、最复杂的一个环节,如何能在有限的空间资源里实现集装箱存储位置的合理优化分配,并在一定时间范围内提高操作效率,一直是国内外学者们探讨研究的重要方面^[13]。

国外学者中, Preston 和 Kozan(2001)以实现所有集装箱船舶周转时间最短为研究目标,建造出集装箱的堆区分配模型,利用遗传算法对模型求解^[14]。Kozan 和 Preston(2006)为研究如何才能确定最优的堆区分配方案和集装箱操作计划,提出了一种迭代搜索算法^[15]。Lee 等(2006)考虑到特殊的中转型集装箱码头,为减少集装箱的倒箱数量,提出了堆区分配方法;为减少交通堵塞,提出了高低负载均衡协议^[16]。R. Dekker, P. Voogd, E. Asperen (2007)研究了集装箱码头自动化堆存问题,关于集装箱装卸这一环节考虑了集装箱的分配作业以及倒箱作业问题,在其建立的优化系统后,并利用实际案例对模型的可行性进行验证^[17]。Han 等(2008)利用改进了的迭代算法研究了堆区分配问题^[18]。Bazzazi 等(2009)利用遗传算法研究了集装箱堆区分配问题,并对其求解^[19]。Mi 等(2009)将分配遗传算法和启发式算法结合了起来,形成了混合算法,用此方法研究了集装箱码头堆区分配问题,并对该问题进行了求解^[20]。国内学者中,王斌(2005)研究了混堆模式下集装箱堆区堆位的分配问题,利用线性规划的方法来算出每艘集装箱船舶在每一堆区堆位的集装箱最佳分配数^[20]。张莉(2007)利用排队网络的理论,将堆场集卡与龙门吊之间的整体合作进行了优化,创建了包含岸桥与堆场龙门吊在内的循环操作系统,建立了以集卡为顾客的二级循环排队模型,将码头前沿装卸设备进行一系列优化^[21]。谢尘等(2008)将压箱量最小作为研究目标,把混堆模式下出口箱的堆区堆位分配问题进行了,建立了整数规划模型,利用分布式遗传算法和启发式相结合的混合算法对模型求解^[22]。陶经纬等(2009)把混堆模式下的集装箱堆区分配问题进行了研究,建立了两阶段的数学模型。第一个阶段是优化工作量平衡,第二个阶段是优化箱组平衡,然后利用启发式算法对模型求解^[23]。王志明等

(2009)为实现翻箱率最小化,在以提箱时间为限制条件的情况下,建立了集装箱堆场的堆位分配模型,利用遗传算法对模型求解^[24]。王展(2011)以堆区作业量均衡和船舶滞港时间为研究目标,讨论了确定性和非确定性两种条件下的混堆模式下的码头堆区堆位分配问题,并用禁忌搜索和仿真方法对问题进行了求解^[25]。侯春霞(2011)以实现不同堆区间集装箱作业的不均衡度和集装箱存位与所装船舶位间的距离最小为研究目标,建立了多目标优化模型,并用数学规划方队对模型求解^[26]。

1.3.3 码头布局与规划仿真研究

随着科技水平的不断提高,虚拟仿真模拟系统越来越得到大家的认可,并广泛应用到集装箱码头布局规划研究中,为集装箱码头各类决策提供了真实可靠的数据支持^[27]。

国外学者中,D. Lagan, P. Legato, O. Pisacane 等(2006)基于排队网络模型,利用仿真优化的方法来解决物流系统每一个环节中的利益问题^[28]。Huynh(2007)利用 Arena 仿真软件对集装箱码头外部集卡运作进行模拟,模拟包括对外集卡进入堆场的过程,堆场中集装箱运至岸边装卸桥过程,整个集装箱码头网络包括集卡、堆场龙门吊以及岸边装卸桥等。L. M. Gambardellal, G. Bontempi 等(2008)尝试了一种将人工智能、仿真和生产管理相结合的模拟方法,从而能提高一个集装箱码头生产力,以及最大程度降低成本。

国内学者中,杨静蕾、丁以中(2003)通过构建一个锚地、泊位、龙门吊和集卡相结合的动态多级排队网络,并利用仿真科技对上海港外高桥集装箱码头装卸系统进行描述^[29]。李巍(2006)通过对大连港二期集装箱码头的研究,以离散事件的相关理论为基础,并利用仿真软件 Arena 建立模型,对大连港集装箱船舶到港分布模式、到港船舶泊位分布以及到港船舶装卸量分布进行了探讨。张煜

(2007)综合了复合建模、遗传算法、模糊控制、虚拟现实等技术,对集装箱码头的设备配置、泊位指派、集卡调度、堆场车流控制、码头规划设计等问题进行了仿真技术和优化方法的研究^[30]。武剑(2008)利用 Witness 仿真软件对岸边装卸桥、龙门吊的资源分配以及集装箱码头生产作业系统进行模拟和仿真,将模拟

指标进行了提取和分析，优化配置有限的资源^[31]。

1.4 研究内容与结构

本文研究内容主要有以下几个方面：

1、集装箱码头内部物流网络运作的概述。

本文先阐述物流网络的概念、构成要素和层次结构，和集装箱码头内部的物流网络在整体物流网络中的地位和作用。再说明集装箱码头内部物流网络的构成、特点和层次结构。从集装箱码头的装卸工艺入手，解析集装箱码头内部物流网络运作的网络构成要素。

2、排队网络的相关理论。

这部分首先系统的研究了排队网络的理论部分，分三个方面：输入过程、排队规则和服务结构。这三个方面分别解释了串联排队网络、闭排队网络和 Jackson 排队网络。排队网络只有在符合某些假定条件时，才能使用解析方法计算系统性能指标。之后对仿真条件的确定，实验数据的设计，以及仿真模型的校验进行了选择。

3、基于排队网络的集装箱码头内部物流网络的节点配置。

这一部分首先说明了排队网络在港口中的应用，从作业的层面解析了集装箱码头内部物流网络的节点配置，包括桥吊节点、集卡节点、龙门吊节点这几个部分。再利用这些节点配置的 Jackson 排队网络模型，进行计算校验。

第2章 集装箱码头内部物流网络运作的概述

集装箱码头内部物流是一个典型的物流网络系统，它是整个集装箱运输过程的中转站，起到了枢纽的作用。为了使物流网络中的每一个节点的功能得到最充分的利用，提高工作效率，必须将集装箱码头资源有效配置，本章首先阐述了集装箱码头内部物流网络的地位和作用，通过阐述集装箱码头内部物流网络的构成要素、主要特点和层次结构，指出了集装箱码头内部物流网络运作的主要内容。

2.1 集装箱码头内部物流网络的地位和作用

在现代物流中，集装箱码头承担着重要的作用，其地位是不可替代的。集装箱码头作为集装箱运输的枢纽，其运作管理情况直接影响到整个码头的效益。

2.1.1 集装箱码头内部物流网络在物流网络中的地位和作用

物流网络的构造主要分为线路和节点这两个部分^[32]。线路包括铁路线路、公路线路、海运线路和空运线路这四种类型。物流网络中的主要节点包括供应商、制造商、仓储、配送、零售商和顾客等。根据物流网络具体的工作职能，可把物流网络分成三个层次，战略层次、战术层次和作业层次。战略层次的规划作为在各种规划层级中最高，时间最长的规划，侧重于宏观控制，所考虑的问题包括：企业的目标、总体服务需求以及管理者通过何种方式来实现这些目标。战术层次的物流网络主要描述了物流网络中主要的节点配置。作业层次的物流网络是随着工作周期的变化而变化的，是战术层次物流网络的落实和实现，是物流网络运作中的重心。

港口是物流系统中的重要节点，是连接各种运输方式的核心部分^[33]。从整个物流网络来看，集装箱码头内部物流网络是整个物流网络中的一个重要节点。随着集装箱运输地位的日益重要，一个港口是否为国际大港，经常以集装箱码头的吞吐能力作为衡量指标。

2.1.2 集装箱码头内部物流网络在集装箱码头中的地位和作用

集装箱码头内部物流网络与集装箱码头装卸工艺密切相关，承担着码头集装箱的装卸和集疏。集装箱码头采用最多的就是龙门吊装卸工艺，通过只保留码头

内物流设施的功能点和个功能点之间的逻辑关系，可以构造下图：

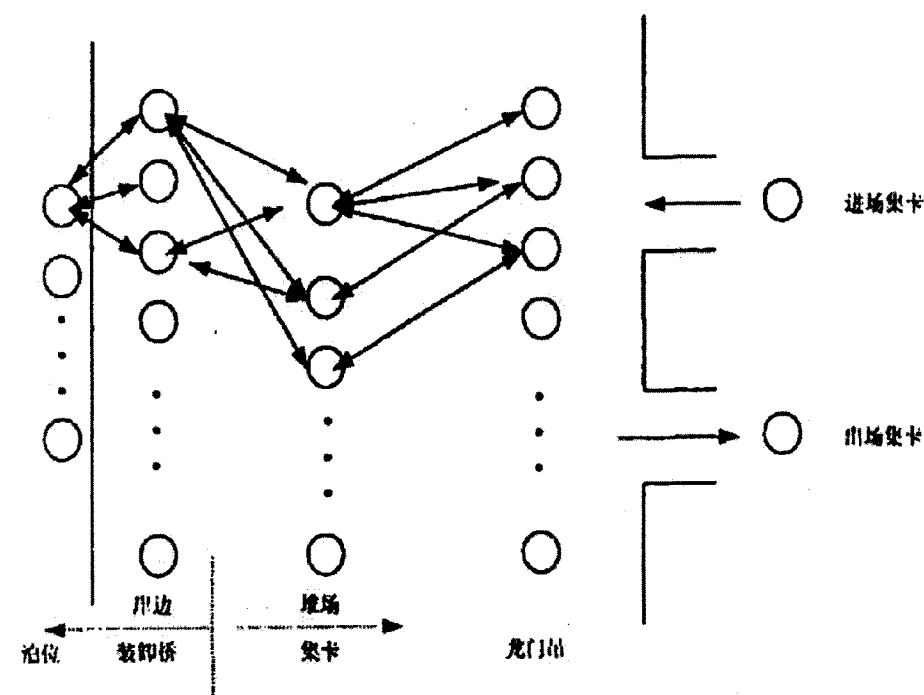


图 2.1 集装箱码头内部物流网络节点逻辑图

Fig.2.1 Container terminal logistics network node logic diagram

码头部分所有与集装箱装卸和搬运、船舶有关的物流作业构成了集装箱码头内部物流网络。集装箱码头物流网络不但完成了船舶的装卸，还承担了码头进场和出场的集装箱的装卸作业。所以船舶到达港口后，集装箱码头物流网络的工作状态，直接影响到整个港口的效率。

2.2 集装箱码头内部物流网络的构成、特点和层次结构

到目前为止，很多论文研究的都是集装箱内部的物流系统若干个要素进行合理的配置。经常是一个节点达到最优而忽视其他要素的工作效率。为了能更加全面的考虑集装箱码头内部物流网络的工作效率，本文综合考虑了集装箱码头内部物流网络的各要素间的关系和它们之间的工作效率。这一节的重点是集装箱码

头内部物流网络构成的要素，主要特点和层次结构。

2.2.1 集装箱码头内部物流网络构成的要素

集装箱码头内部物流网络构成的要素包括：泊位、桥吊、集卡、龙门吊组成的网络节点以及将这些节点相互关联的集装箱流构成的线路^[34]。

泊位：是港区内码头岸线供船舶安全靠进行装卸作业或停泊所需要的水域或空间^[34]。

桥吊：从事码头前沿集装箱起落仓作业的起重机^[34]。

龙门吊：桥式起重机的一种变形，承担集装箱码头堆场集装箱的装卸作业^[34]。

集装箱船舶达到港口停靠在泊位，按照装卸的船舶的顺序，岸边的桥吊依次对船舶上的集装箱进行装卸^[35]。桥吊的行走路径即为桥吊的平移方向。桥吊将集装箱从船舶装卸到集卡上，集卡将集装箱运送到堆场。龙门吊再将集卡上的集装箱装卸到相应的场箱位。或是桥吊将场箱位置的集装运到集卡上，集卡将集装箱运给岸边桥吊装船。这期间集卡的水平运输形成了集卡的行走路径和集装箱流。龙门吊的行走路线是由龙门吊的移动形成的。

2.2.2 集装箱码头内部物流网络的主要特点和层次结构

集装箱港口的物流作业是一个非常复杂的进程。集装箱码头是一个开放的系统，集装箱到达码头的数量和时间是不确定的，因此决定了集装箱码头的码头物流作业的随机性和动态性很强。集装箱码头内部物流系统的组成部分包括：各个要素之间的陆域平面布置和装卸工艺等。由于系统内的各要素之间存在着目标冲突，因此其复杂性主要体现在：集装箱码头的岸线长度限制了泊位的数量，同时限制了桥吊的数量。码头的装卸作业过程需要由桥吊、集卡、龙门吊三者共同完成，所以集卡和龙门吊的数量受桥吊的数量的限制。这些要素之间的相互制约，组成了一个复杂的物流网络。

集装箱码头的动态性体现在：集装箱码头内部物流网络会根据每次到港船舶的不同，其装卸的配置也会随之变化。集装箱码头的集装箱进出堆场的数量是随机的，提箱和卸箱操作都会使堆场的状态发生变化。由于进出口的作业计划都要依据堆场的状态制定，所以堆场的状态影响了集装箱进出口的作业计划，从而影响了集卡、龙门吊和桥吊的配置。

根据集装箱码头的特点把集装箱码头内部物流网络分为战略层的集装箱码头内部物流网络、战术层集装箱码头内部物流网络和作业层的集装箱码头内部物流网络^[36]。

1、战略层面的集装箱码头内部物流网络结构，是从宏观是规划集装箱码头内部物流网络。主要描述了各节点以及各节点之间的相互关系。集装箱码头分为三个部分：一是泊位和桥吊组成的码头前沿部分，二是龙门吊和进出场的道口组成的堆场部分，三是连接码头和堆场的集卡水平运输路线。各要素的布局设计属于集装箱码头内部物流网络战略层面[37]。

2、战术层的集装箱码头内部物流网络介绍了集装箱码头内部物流网络中各节点数量的配置。战术层是基于战略层集装箱码头内部物流网络的规划之后，对各节点的配置。怎样使节点配置最优化是这个层面需要解决的问题。

3、作业层集装箱码头内部物流网络是指集装箱码头作业调度人员，根据到港集装箱船舶的类型和时间制定装卸顺序和设备的工作调度，体现了内部物流网络的实时性。制定具体的工作计划，让码头的工作人员进行执行。

战略层和战术层的集装箱码头内部物流网络一旦建立就在宏观上对作业层的集装箱码头内部物流网络形成了约束。在作业层的集装箱码头内部物流网络中工作的各要素的数量不能超过战术层的各物流节点的数量，因此作业层面又为战术层和战略层提供了数据依据。

2.3 集装箱码头内部物流网络的主要内容

本节分别从战略层面、战术层面和作业层面三个层面详细阐述了集装箱码头内部物流网络运作的主要内容。

2.3.1 战略层集装箱码头内部物流网络运作的内容

战略层集装箱码头内部物流网络是在宏观层面上对码头进行规划，影响着码头未来的发展。桥吊的类型、运输集装箱设备的类型、堆场堆垛类型、堆场堆垛的布局等，都属于战略层集装箱码头内部物流网络运作的内容。未来的集装箱码头的集疏运的形势，影响着集装箱码头个要素的布局，以及各设备的类型。

2.3.2 战术层面集装箱码头内部物流网络运作的内容

泊位的数量、桥吊的数量、运输集装箱设备的数量、堆场堆垛设备的数量，在很大程度上决定了集装箱码头的作业能力^[38]。根据战略层集装箱码头内部物流网络的规划，为到港的船舶配置合理数量的泊位、桥吊、集卡以及堆场。

2.3.3 作业层集装箱码头内部物流网络运作的内容

作业层集装箱码头内部物流网络的主要内容包括：泊位分配、配载计划、运输路径、堆垛设备路径及原则、作业顺序等^[39]。根据到港船舶，安排合理数量的泊位、桥吊、集卡和堆场，各个节点之间安排合理的衔接，以提高整个物流网络的工作效率。

2.4 本章总结

本章阐述了集装箱码头内部物流网络的地位和作用，内部物流网络是整个运输网络中的重要节点，它身兼数职，不但要完成港口码头的物流作业，而且它还承担着管理职能作为运输网络中的一个物流管理中心，是整个交通运输网络中的港口码头物流节点的放大。集装箱码头内部物流网络的构成要素、特点和层次结构。集装箱码头内部物流网络包括泊位、龙门吊、集卡、桥吊等。整个网络是一个复杂动态的开系统。本章从战略层次、战术层次和作业层次阐述了集装箱码头内部物流网络的内容。

第3章 排队网络的相关理论

从系统的复杂度分析, 集装箱码头内部物流网络无疑使复杂度很高的一个系统, 而排队网络比单一的排队系统更能完整的描述集装箱码头内部物流网络。本章系统地研究了排队网络的基本理论及其仿真。

3.1 排队网络的解析分析

排队系统概括的解释, 就是指顾客到达服务台, 此时服务台若有空闲便立刻进行服务, 若无空闲, 则顾客需要在服务台前排队等候, 直到服务台服务完之前一个顾客后再进行服务, 服务完毕后自动离开系统, 如下图 3.1 所示。

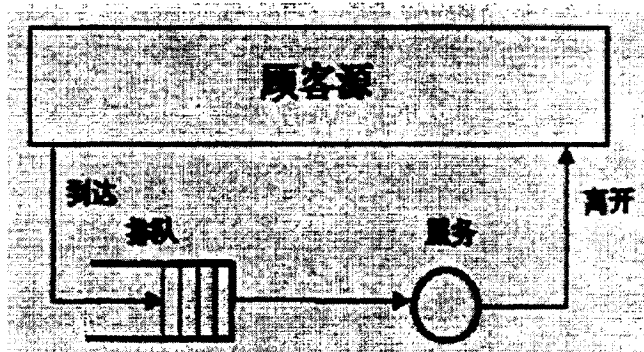


图 3.1 排队网络示意图

Fig.3.1 Queueing network diagram

排队系统一般从输入过程、排队规则和服务机构三个方面来描述^[40]。输入过程一般根据顾客的到达时间来描述。根据到达时间间隔的概率分布, 输入过程可分为泊松输入、定长输入、爱尔朗输入、一般输入和成批到达输入。泊松输入: 顾客到达系统服从泊松分布的输入。定长输入: 顾客有规律的按照一定的时间间隔到达系统, 是一种确定型系统。爱尔朗输入: 在 t 时间内到达 k 个顾客的概率服从 k 阶爱尔朗分布。一般输入: 顾客在时间 t 内到达的概率服从任意的分布 $f(x)$ ($f(x)$ 为任意的函数), 这种输入成为一般输入。成批到达输入: 顾客是一批一批到达的, 每批的顾客的数量为随机变量。排队规则是指到达的顾客等候服务

的次序方式。常用的排队规则有：先到先服务、后到先服务、优先权服务和损失制等^[41]。服务机构指服务台数和服务时间。服务机构可以为一个或是多个服务台，而且每个服务台的服务时间分布可以相同也可以不同^[42]。为了统一符号，方便的描述服务系统本文采用“Kendall”符号来表示排队系统中的输入过程、排队规则和服务机构这些要素^[43]。排队网络是由两个或两个以上的单级排队系统组成的，每个单级排队系统又包含自身的输入过程、排队规则和服务机构^[44]。

3.1.1 串联排队网络

串联排队网络是最简单的排队网络，在串联排队网络中共包含 K 个节点每个节点是一个 $M/M/m$ 的单级多服务台排队子系统，每个子系统的服务时间服从参数为 μ 的负指数分布，服务台的个数为 s_i ($i=1, 2, \dots, K$)^[45]。顾客以参数为 λ 的泊松流从第一个节点进入串联排队网络系统，依次经过第二个节点、第三个节点等等，一直到第 K 个节点接受完服务后离开整个系统，如图 3.2 所示。

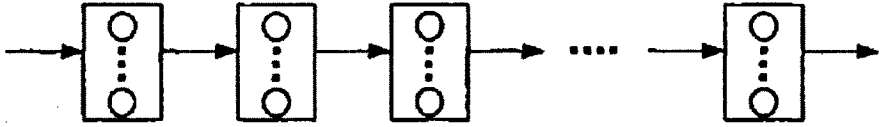


图 3.2 串联排队网络示意图

Fig.3.2 Tandem queueing network diagram

3.1.2 闭排队网络

闭排队网络中既不允许顾客离开网络，也不允许外来顾客到达网络，顾客在网络内部节点之间移动，系统内的顾客总数保持不变。在闭排队网络中排队网络由 K 个节点组成，每个节点是一个 $M/M/m$ 单级多服务台（或单服务台）排队子系统，节点 i 有 s_i 个服务台，每个服务台独立工作，服务时间服从负指数分布，平均服务时间为 $1/\mu$ ，($i=1, \dots, K$)。顾客在节点 i 的服务结束后，以概率 r_{ij} 转移到节点 j ，且有 $\sum_{j=1}^K r_{ij} = 1$ 。顾客只在网络内部节点之间转移，不能离开网络，网络

外部的顾客也无法进入网络，网络中的顾客总数为 M 保持不变^[46]。

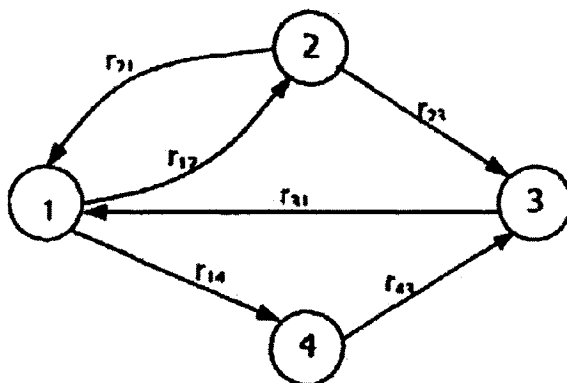


图 3.3 闭排队网络示意图

Fig.3.3 Closed queueing network diagram

3.1.3 Jackson 排队网络

Jackson 排队网络是一种开排队网络。Jackson 排队网络由 K 个节点组成，每一个节点是一个 $M/M/m$ 单级多服务台（或单服务台）排队系统，节点 i 有 s_i 个服务台，每个服务台独立工作，服务时间服从负指数分布，平均服务时间为 $1/\mu_i$ ，（ $i=1, \dots, K$ ）。顾客从网络外部到达第 i 个点的分布是参数为 λ_i 的泊松流。网络中的每一个节点都可以有外部顾客到达，每一个节点也都可以有顾客离开。顾客在节点 i 的服务结束后，以概率 r_{ij} 转移到节点 j ，或以概率 $1 - \sum_{j=1}^K r_{ij}$ 离开网络，

顾客在网络中的服务结束后都会离开此网络^[47]。这个网络中每个节点的服务是相互独立的，而且每个节点前面的排队空间是无限的。

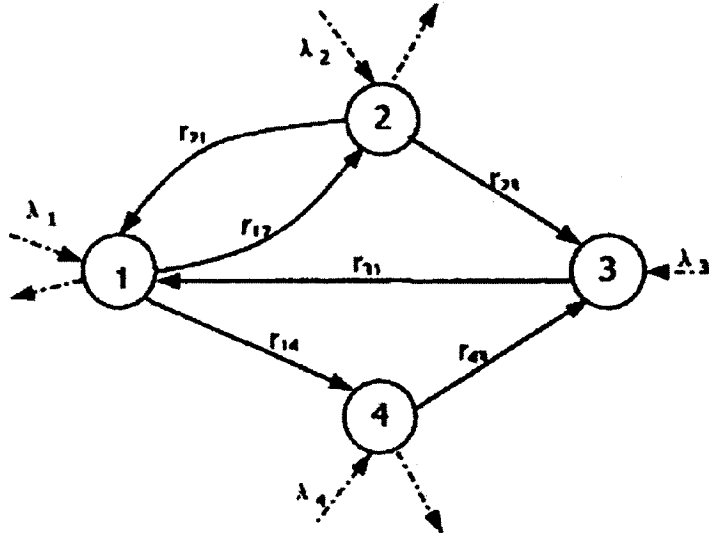


图 3.4 Jackson 排队网络示意图

Fig.3.4 Jackson queueing network diagram

图 3.4 中的虚箭头表示外部顾客到达网络或服务结束后顾客离开网络，实箭头表示顾客在不同的节点之间的转移。根据泊松流的两个定理和系统平稳时输入流和输出流均值相等可以得出节点 i 的总到达率为：

$$\sigma_i = \lambda_i = \sum_{j=1}^K \sigma_j r_{ji}, \quad i=1 \cdots K$$

解此方程组得每个节点的顾客总到达率 σ_i 。

令 $\rho_i = \sigma_i / (s_i \mu_i)$ ，如果对于所有的 ρ_i 都小于 1，则网络平稳。网络平稳时，系统的联合分布状态为：

$$P(n_1, \dots, n_K) = \prod_{i=1}^K P_i(n_i)$$

其中 $P_i(n_i)$ 是第 i 个节点有 n_i 个顾客的概率，其计算公式与 M/M/m 排队模型的相应的计算公式相同^[48]。

Jackson 网络中的各符号的含义如下：

K: 排队网络的节点总数；

S_i :第 i 个节点的服务台数;

λ_i :顾客由外部进入节点 i 的到达率,是泊松分布;

μ_i :第 i 个节点的服务率,服务时间分布服从负指数分布;

r_{ij} :顾客离开节点 i 进节点 j 的转移概率;

σ_i :节点 i 的总到达率;

n_i :在节点 i 的顾客数。

3.2 排队网络的模拟仿真

排队系统的研究方法一般分为解析和仿真两种研究方法。对于复杂的排队网络,解析方法的表达式非常的复杂,很难看出整个系统的规律。模拟仿真能够更加系统、直观有效的分析排队系统的性能与规律。

Witness 计算机仿真软件的出现,使仿真模型的建立和运算更加方便准确,更有利于排队网络模型的建立和计算。

本文采用 Witness 软件进行仿真模型的建立。Witness 软件提供了五类建模的基本元素:离散性元素、连续型元素、逻辑元素、图形元素、运输逻辑元素^[49]。

离散元素一般表示要研究的现实系统中可以看得见的,可以计量个数的物体,主要包括:零部件或实体 (Part or Entity)、机器 (Machine)、缓冲区或仓库 (Buffer)、输送链 (Conveyor)、车辆 (Vehicle)、轨道 (Track)、路径 (Path) 劳动者 (Labor)、模块 (Module)^[50]。

零件是一种最基本的离散型元素,它可以代表在其他离散性元素间移动的任何事物。模型当中,零部件的使用方法多种多样,我们可以把一个零部件分成许多个零部件,也可以单独使用零部件,还可以将多个零部件组装成一个零部件。零部件可在同一时间被同批量或单个创建,在模型的处理过程中还可转变为另一些零部件。机器是指获得、整理零部件并送达目的地的离散元素。不同的机器代表不同类型的处理过程。系统提供不同的七种机器:单处理机、批处理机、装配机、生产机、通用机、多周期处理机、多工作站机。传送带是一种可以实现带传送和滚轴传送的离散型元素。Witness 提供了两种传送带:(1)固定式,这是一种保持部件间距不变的传送方式。(2)队列式,这种方式可以采用队列间的累积。

若该传送链上的部件被阻塞，部件继续滑到一起，直至这个输送链被堵满。缓冲区是指存放零部件的离散元素，是一种被动型元素。缓冲区元素不能像机器元素那样主动的获取部件，也不能把自身存放的部件主动的运送给其他元素，它部件的存取依靠的是系统中其他的元素主动推或拉。基于利用缓冲区原则，利用另一个元素将部件送进缓冲区或从缓冲区中取出来。把部件在缓冲区中整齐的排列成先进先出或者后进先出的顺序。缓冲区在存放零部件还可以分出若干区域。车辆是一种离散元素，可以被用来建立装置模型，可以将一个或多个部件，从一个目的地运送到另一个目的地，例如：集卡，起重机等。车辆沿着轨道运动。虽然车辆在移动，但是轨道规定了其运输轨迹，并包含了使系统运行的逻辑理论。轨道则是一种代表车辆运送部件时所遵循的路径的离散元素，定义了车辆装载、装卸或是停靠的地点。劳动者是指代表资源的离散元素，包括操作工人或是工具。劳动者一般负责对其他元素进行处理、清洁、修理或是装配。路径是指设定的部件和劳动者（或其他资源），从一个元素到达另一个元素的一种移动路程的离散元素。路径被用来表现现实系统中行程的长度和实际路线。模块是表示其他一些元素集合的离散元素。通过模块，我们就可以在模型内部建立具有自动处理功能的模型。

运输逻辑元素会在构建物料运输系统方面起到重要作用，它主要包括：运输网络、单件运输小车、路线集、车辆站点^[51]。

逻辑元素可以对复杂的系统结构进行建模，其作用是处理数据、制作报表、建立复杂逻辑结构，从而提高模型的质量和可操作性。逻辑元素主要包括内容，例如：属性、变量、分布、函数、文件、零部件文件、班次^[52]。

图形元素是为了将模型的运行绩效指标在仿真窗口形象的表现出来。图形元素主要包括：时间序列图、饼状图、直方图。

一旦在模型中创建了元素，就必须解释零部件，流体，车辆和单件运输小车在它们相互之间是怎样流动的，以及劳动者是怎样分配的，利用规则是很重要的。Witness 的规则有输入规则、输出规则和劳动者规则。

3.2.1 仿真算法确定

离散事件的仿真算法一般由产生所需的随机变量、排队系统效率指标的仿真计算公式、仿真建模策略三部分组成。

1、随机变量

离散事件系统一般包含多个随机变量，随机变量在仿真系统的每次运行中，按照分布得到不同的样本值^[53]。通过随机数发生器产生在 $[0, 1)$ 区间上均匀分布的随机变量变换而得到仿真随机变量。本文采用了 VB6.0 中的 Radom 函数随机数发生器，来产生 $[0, 1)$ 区间上的均匀分布。

2、系统效率指标的仿真计算公式

系统效率指标中两个重要的公式如下：

$$W_q(n) = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n}$$

$$L_q(n) = \frac{\sum_{i=1}^n q_i(b_i - b_{i-1})}{T}$$

其中：

$W_q(n)$ ：顾客平均排队时间

D_i ：第 i 个顾客的排队时间

$L_q(n)$ ：顾客平均等待队长

b_i ：第 i 个任意事件发生的时间

q_i ：在区间 $[b_i, b_{i+1}]$ 上排队的顾客数

3.2.2 排队仿真模型的建立

离散事件模型大致可分成三种类型：以事件为基础的离散事件仿真模型、以活动扫描为基础的离散事件仿真模型和以过程为基础的离散事件仿真模型^[54]，所以离散事件系统仿真模型建立的策略一般也有 3 种：事件调度法、活动扫描法和进程交互法。排队网络本身成分之间的关系清晰，而事件调度法的基本思想是事件为分析系统的基本单元，通过事件及每个事件发生时系统状态的变化，按时间顺序来确定和执行每个事件发生时相关的逻辑关系^[55]。因此，本文的建模策略采用事件调度法。

事件调度算法如下：

执行初始化操作，包括

置初始事件 $t=t_0$, 结束时间 t ;

事件表初始化, 置系统初始事件

时间表初始化----- $S = ((s_{a_1}, t_{a_1}), \dots, (s_{a_m}, t_{a_m}), s_{a_{m+1}}, \dots, s_{a_n})$

操作事件表, 包括

取出具有 $t(s) = \min\{t_a | a \in C_A\}$ 的事件记录

修改事件表

TIME=t (s)

While (TIME $\leq t_{\infty}$ and 不满足结束条件) 则执行

case 根据事件类型 j

j=1 执行第一类事件处理程序

j=2 执行第二类事件处理程序

.

.

.

j=m 执行第 m 类事件处理程序

end case

取出具有 $t(s) = \min\{t_a | a \in C_A\}$ 事件记录

置仿真时间 TIME=t (s)

End While

3.3 本章总结

本章分别概述了串联排队网络、闭排队网络和 Jackson 排队网络三种排队网络, 并对它们的算法进行了说明。并采用事件调度法来建立排队仿真模型, 通过 Witness 来建模。同时也详细地解释了 Witness, 为之后模拟仿真集装箱码头的内部物流网络奠定理论基础和有效方法。

第4章 基于排队网络的集装箱码头内部物流网络的节点配置

集装箱码头内部网络物流系统是一个复杂的离散事件动态系统。第三章中提供的解析和仿真算法为排队网络系统提供了定量的计算工具，可以解决网络节点的配置问题。

4.1 节点配置的排队网络解析模型

集装箱码头内部物流网络是典型的排队系统，码头这个部分对码头整体工作效率至关重要^[56]。每个小的节点有各自的输入过程、排队规则和服务机构又形成一个独立的排队系统。作业层面的集装箱码头内部物流网络系统包括桥吊、集卡、龙门吊三个节点，每个节点都是一个小的排队系统，节点之间通过顾客（集卡或是集装箱）流相互连接。

1、桥吊节点

桥吊分布可以是作业线的情况也可以使作业面的情况，这就决定了桥吊节点可以是单服务台系统也可以是多服务台系统，而且每个桥吊的服务时间分布相互独立。桥吊的工作规则为先到先服务，且假设桥吊节点的容量不限。

2、集卡节点

集卡一般为多服务系统，因为一般由多辆集卡进行服务。各集卡的服务时间相互独立。集卡节点的工作规则为先到先服务，且假设集卡节点容量不限。

3、龙门吊节点

龙门吊一般也为多服务台系统。各龙门吊的服务时间相互独立，工作规则为先到先服务，且假设龙门吊节点容量不限。

在作业层面的集装箱码头内部物流网络系统中，每一个节点都是一个单级子系统，各节点之间通过集装箱流相互连接。本节通过利用串联排队排队网络、闭排队网络和 Jackson 排队网络本节通过的解析模型，对集装箱码头内部物流网络的节点配置进行了研究。

4.1.1 节点配置的串联排队网络解析模型

作业线排布方式为串联排队网络。如下图 4.1 所示：

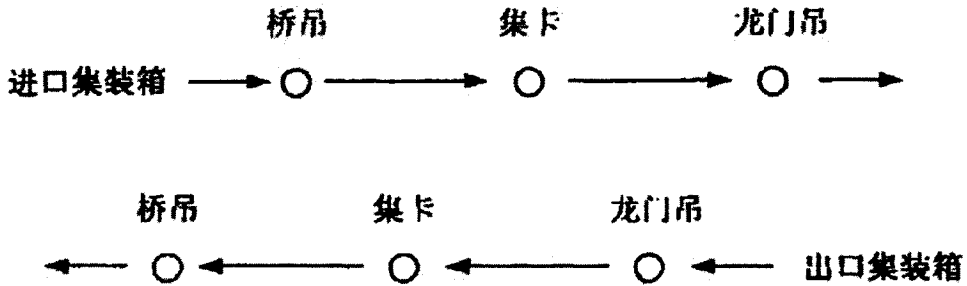


图 4.1 作业线方式的作业层集装箱码头内部物流网络串联排队网络示意图

Fig.4.1 job layer container terminal of Job-line logistics network internal tandem queuing network diagram

1、模型的特点

(1) 此网络共有三个节点：桥吊、集卡、龙门吊。节点之间通过集装箱流相连。进口集装箱从桥吊开始进入网络，通过集卡到达龙门吊，通过龙门吊离开整个网络。出口集装箱从龙门吊起吊开始进入网络，通过集卡到达桥吊，通过桥吊最后离开整个网络。

(2) 桥吊节点的服务台数为 1。

(3) 顾客分为进口集装箱和出口集装箱。

(4) 此网络忽略了进口集装箱和出口集装箱的进出场操作。

2、假设条件

(1) 假设网络中只有一种顾客，将进口集装箱与出口集装箱看成同质。

(2) 假设某些龙门吊固定为某一桥吊服务。

(3) 网络可以达到稳态。

(4) 龙门吊、桥吊、集卡的服务时间相互独立，而且服从负指数分布。

(5) 集装箱达到桥吊节点的平均速率服从泊松分布。

3、输入参数

下面说明模型中所用符号的含义

μ_i : 网络中各节点的平均服务效率, $i=1, 2, 3$, 下标 1 代表桥吊、2 代表集卡、

3 代表龙门吊;

s_i : 各节点的服务台数, $i=1, 2, 3$, 其中 $s_1=1$;

ρ_i : 各节点服务台的利用率, $i=1, 2, 3$;

λ_1 : 桥吊节点的平均到达率。

输入参数如下:

(1) 桥吊节点、集卡节点和龙门吊节点的平均服务率;

可用桥吊、龙门吊和集卡的平均吊箱时间或行走时间的均值倒数最为参数 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 的估计值。

(2) 集卡服务台数和龙门吊的服务台数的变化范围;

桥吊台数 $s_1=1$ 。在 s_2 和 s_3 的变化范围内 (在 s_2 和 s_3 的变化范围通过实际情况而定), 在串联排队网络中通过计算不同 (s_2, s_3) 组合下的性能指标, 从而估算出作业层集装箱码头内部物流网络桥吊、集卡和龙门吊的配置。

(3) 到达桥吊节点的平均到达率 λ_1

龙门吊的台数和吊箱时间以及集卡台数和行走时间影响着集装箱达到桥吊节点的时间。当满足了上述假设条件时, 可以通过 λ_1 的递归计算表示出桥吊节点到达率随龙门吊台数、龙门吊吊箱时间、集卡台数、集卡行走时间的改变而变化的规律:

λ_1 赋初值, 令 $\lambda_1' = \lambda_1$;

$$\lambda_1' = \lambda_1' + \frac{0.01 \times s_3 \times \mu_3}{1 + \sum_{n=1}^{s_3} n} \quad (4-1)$$

$$\lambda_1' = \lambda_1$$

$$\lambda_1 = \lambda_1 + \frac{0.147 \times s_2 \times \mu_2}{1 + \sum_{n=1}^{s_2} n} \quad (4-2)$$

由 Burke 理论可知, 串联排队网络的各个节点的到达分布相同, 等于桥吊节

点到达分布。

1、输出参数

桥吊节点和龙门吊节点是码头作业时重点考虑的性能指标，桥吊节点的利用率又是重中之重。所以此模型仅把桥吊节点和龙门吊节点的利用率和平均等待队长作为模型的输出参数。

- (1) 桥吊节点和龙门吊节点的利用率；
- (2) 桥吊节点和龙门吊节点的平均队长。

2、输出参数计算公式

- (1) 桥吊节点：

$$\text{桥吊利用率, } \rho_1 = \lambda_1 / \mu_1 \quad (4-3)$$

$$\text{桥吊节点的平均等待队长, } (\lambda_1 * \rho_1) / (\mu_1 - \lambda_1) \quad (4-4)$$

集装箱码头内部物流网络关于作业层面的节点配置应该尽可能使桥吊连续不断地工作，在桥吊节点在满足一定情况的条件下，尽可能提高利用率。

- (2) 龙门吊节点：

$$\text{龙门吊利用率, } \rho_3 = \frac{\lambda_1}{s_3 \mu_3} \quad (4-5)$$

$$\text{龙门吊节点的平均等待队长, } \frac{(s_3 \rho_3)^{s_3} \rho_3}{s_3^3 (1 - \rho_3)^2} P_3(0) \quad (4-6)$$

$$\text{其中, } P_3(0) = \left(\sum_{j=0}^{s_3-1} \frac{(\lambda_1 \mu_3)^j}{j!} + \frac{(\lambda_1 \mu_3)^{s_3}}{s_3} \frac{1}{1 - \rho_3} \right)^{-1}$$

在桥吊利用率保证的情况下，龙门吊的利用率要尽可能的提高。

3、桥吊、龙门吊和集卡节点配置递归估算

- (1) 为 s_2 、 s_3 和 λ_1 赋初值；
- (2) 根据式 (4-1) 计算 λ' 的值；
- (3) 根据式 (4-2) 计算 λ_1 的值；
- (4) 计算桥吊和龙门吊节点的利用率和平均等待队长；

(5) 在 s_2 、 s_3 的变化范围内 (s_2 、 s_3 的变化范围根据实际情况而定), 依次改变 s_2 、 s_3 的值, 从步骤 (2) 重新开始计算;

(6) 当 s_2 、 s_3 所有的取值都计算完毕时, 停止运算;

(7) 根据桥吊节点和龙门吊节点的利用率和平均等待队长, 选取一组合理的 (s_2 , s_3)。

4.1.2 节点配置的闭排队网络解析模型

在作业线的生产方式下, 会出现有的桥吊下集卡等待而有的桥吊下无服务集卡的现象, 各作业线的装卸量因船舶积载等因素往往不平衡, 为了提高集卡的利用率, 我们开始采取作业面的工作方式^[57]。在作业面的工作方式下, 集卡根据现场的作业任务, 被实时分配。这样某辆集卡再也不为某一特定的桥吊工作, 增加了工作现场的可调控性, 提高了集卡和龙门吊的利用率, 从而提高了整个码头的工作效率。闭排队网络就是在这种作业面的生产方式下建立的。闭排队网络中的顾客数量是不变的, 所以闭排队网络忽略了集装箱进出场操作。



图 4.2 作业面的集装箱码头内部物流网络的闭排队网络模型示意图

Fig.4.2 Internal logistics networks of the container terminal of Job-surface closed queuing network diagram

1、模型的特点

(1) 集卡被看做顾客。虚设一个“路径”节点来描述集卡的水平运输时间, 假设“路径”节点的服务台数为无穷, 其服务时间均值是集卡的水平运输时间均值。

(2) 网络中包含了: 桥吊节点、路径节点和龙门吊节点

(3) 排队网络中, 顾客在各个节点之间的转移概率集合包括: 桥吊节点服务结束后, 集卡以转移概率 1 进入路径节点; 龙门吊节点服务结束后, 集卡以转移概率 1 进入路径节点; 路径节点服务结束之后, 转移到桥吊节点的集卡是载有出口集装箱的集卡。其转移概率为 r_{21} , 转移到龙门吊节点的集卡是载有进口箱的集卡, 其转移概率为 r_{33} 。

(4) 闭排队网络中的顾客数量是不变的, 即没有集卡进入网络也没有集卡离开网络。

2、假设条件

- (1) 网络可以达到稳态;
- (2) 服务时间在各节点分布不受限制, 而且服务时间是互相独立的;
- (3) 顾客转移概率独立。

3、输入参数

首先说明模型中所用符号的含义

s_i : 网络中各节点的平均服务时间, $i=1, 2, 3$, 下标 1 代表桥吊、2 代表路径、

3 代表龙门吊, 后边的下标含义与此相同;

σ_i : 各节点服务时间标准差, $i=1, 2, 3$;

c_i : 各节点的服务台数, $i=1, 2, 3$;

r_{ij} : 集装箱从节点 i 转移到节点 j 的转移概率, 有 $\sum_{j=1}^3 r_{ij} = 1, i=1, 2, 3$;

$$A_i = \sum_{j=1}^3 A_j r_{ji}, \quad i=1, 2, 3 \quad (4-7)$$

λ_i^* : 节点 i 的相对到达率, $i=1, 2, 3$

M : 闭网络的顾客总数

$W_i(H)$: 集卡在节点 i 的平均等待时间, $i=1, 2, 3$

$S_i(H)$: 集卡在节点 i 的平均逗留时间, $S_i(H) = W_i(H) + s_i, i=1, 2, 3$;

$L_i(H)$: 集卡在节点 i 的平均等待队长, $i=1, 2, 3$;

$\rho_i(H)$: 节点 i 的利用率, $i=1, 2, 3$;

$Q_i(H)$: 节点 i 中所有服务台都忙的概率, $i=1, 2, 3$;

R_i : 节点 i 的残余服务时间。

$$R_i = \frac{s_i}{2} \left(1 + \left(\frac{\sigma_i}{s_i} \right)^2 \right), \quad i=1, 2, 3 \quad (4-8)$$

模型的输入参数为:

(1) 桥吊、路径和龙门吊的平均服务时间和服务时间的标准差

用桥吊、龙门吊和集卡的平均吊箱时间或行走时间的均值作为参数 s_1 、 s_2 和 s_3 的估计值, 用样本标准差作为 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 的估计值。

(2) 桥吊、集卡和龙门吊台数的变化范围

在 c_1 和 c_3 的变化范围内, 计算不同的 (c_1, c_3) 组合下闭网络性能指标, 对作业层集装箱码头内部物流网络的节点配置进行估算。

(3) 集卡的转移概率。

4、输出参数

模型的输出参数

模型的输出参数也是桥吊节点和龙门吊节点的性能指标。

(1) 桥吊和龙门吊节点利用率;

(2) 桥吊和龙门吊节点的平均等待队长。

5、估算均值分析法的计算步骤

本文利用估算均值分析法对作业层集装箱码头内部物流网络的闭排队网络性能指标进行估算, 进而得到桥吊、集卡和龙门吊之间的最优配置方案。估算均值分析法的计算步骤如下:

(1) 赋初值: $L_i(0) = Q_i(0) = 0$;

(2) 对 $h=1, 2, \dots, H$ 有

$$W_i(H) = Q_i(h-1) \frac{R_i}{c_i} + L_i(h-1) \frac{s_i}{c_i} \quad (4-9)$$

$$S_i(h) = W_i(h) + s_i \quad (4-10)$$

$$\Lambda_i(h) = \frac{\lambda_i h}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i S_i(h)} \quad (4-11)$$

$$L_i(h) = \Lambda_i(h) W_i(h) \quad (4-12)$$

$$\rho_i(h) = \Lambda_i(h) \frac{s_i}{c_i} \quad (4-13)$$

若 $h < c_i$, 则 $Q(h) = 0$;

$$\text{若 } h \geq c_i, \text{ 则 } Q_i(h) = \frac{(c_i \rho_i(h))^{c_i}}{c_i!} \left\{ (1 - \rho_i(h)) \sum_{k=0}^{c_i-1} \frac{(c_i \rho_i(h))^k}{k!} + \frac{(c_i \rho_i(h))^{c_i}}{c_i!} \right\}^{-1} \quad (4-14)$$

6、桥吊、龙门吊和集卡节点配置递归估算

(1) 赋初值 $s_1 = 1$ 、 $s_3 = 1$;

(2) 根据式 (4-7) 计算闭网络各节点相对到达率;

$$\text{令 } \lambda_2^* = s_2;$$

闭排队网络流量平衡方程组为:

$$\lambda_1^* = r_{21} \times \lambda_2^*$$

$$\lambda_2^* = r_{12} \times \lambda_1^* + r_{31} \times \lambda_3^*$$

$$\lambda_3^* = r_{23} \times \lambda_2^*$$

解此方程组得到: $\lambda_1^* = r_{21}s_2$, $\lambda_2^* = s_2$, $\lambda_3^* = r_{23}s_2$ 。

(3) 令 H 为最大的集卡台数, 利用估算均值分析法计算 h 从 1~H 的闭网络系统性能指标;

(4) 在 c_1 和 c_3 的变化范围内, 依次改变 c_1 和 c_3 的值, 从步骤 (3) 重新开始计算;

(5) 在 c_1 和 c_3 取遍变化范围内的所有值时, 停止计算。

(6) 根据桥吊节点、龙门吊节点和利用率平均等待队长, 从中挑选一组最合理合理的 $(c_1, c_2 = h, c_3)$ 作为作业面方式下作业层面下集装箱码头内部物流网络的节点配置。

4.1.3 节点配置的 Jackson 排队网络的解析模型

以上两种模型串联排队网络模型和闭排队网络模型都没有考虑集装箱的进出场作业。而 Jackson 排队网络模型考虑了集装箱码头内部物流网络中集装箱的进出场作业时的节点配置。

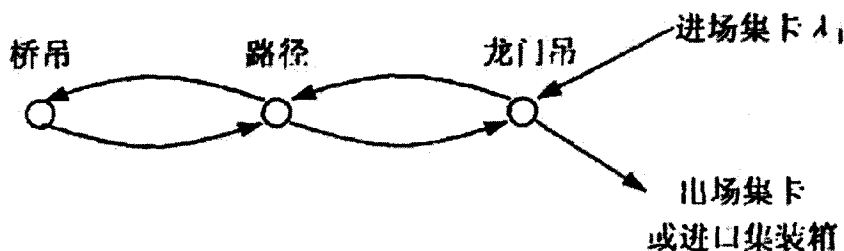


图 4.3 基于作业层集装箱码头内部物流网络 Jackson 排队网络模型示意图

Fig.4.3 Internal logistics networks of the container terminal based on Job-container Jackson queueing network diagram

1、模型特点

(1) Jackson 排队网络模型也有三个节点, 桥吊节点、路径节点和龙门吊节点。设置一个虚的“路径”节点来描述集卡的水平运输时间和集卡的配备台数。服务台个数是集卡的配备台数, 服务时间均值是集卡的水平运输时间均值。

(2) 顾客类型有两种: 第一种在码头前沿和堆场之间运输的集卡; 第二种完成出口集装箱进场和进口集装箱出厂的外集卡。桥吊作为一个起点来说明集卡的访问顺序: 顾客在网络中节点访问顺序: 集卡到了桥吊节点, 桥吊把集卡上的出口箱装船, 然后将船上的进口箱放到集卡上, 集卡再把它运到堆场, 最后龙门吊在堆场中堆存进口箱。以龙门吊为起点说明集卡节点访问顺序: 集卡首先到达龙门

吊处，龙门吊把集卡上的进口集装箱卸到堆场上，然后在堆场上为集卡选取出口集装箱，集卡再把出口集装箱从堆场运到岸边，最后桥吊再把出口集装箱吊到船上。

(3) 集卡从路径节点转移到桥吊节点的转移概率 r_{21} 和转移到龙门吊节点的转移概率 r_{23} 不独立，但和各个节点的服务台数和服务时间相关，而且 r_{21} 影响桥吊节点的到达率。

(4) 进场集卡到达龙门吊节点的分布独立于桥吊、路径和龙门吊的服务时间。

(5) 桥吊节点和路径节点没有外部顾客到达。

2、模型假设

(1) 顾客同质，即忽略了进出场集卡的区别。

(2) 可以达到稳态。

(3) 各个节点间的服务时间互相独立，并呈现负指数分布态势。节点的排队空间无限。

(4) 集卡到达分布独立，且服从泊松分布。

(5) 顾客转移概率独立。

3、输入参数

首先说明模型中所用符号的含义

μ_i : 网络中各节点的平均服务效率， $i=1, 2, 3$ ，下标 1 代表桥吊、2 代表集卡、3 代表龙门吊；

s_i : 各节点的服务台数， $i=1, 2, 3$ ，其中 $s_1=1$ ；

ρ_i : 各节点服务台的利用率， $i=1, 2, 3$ ；

λ_i : 桥吊节点的平均到达率。

r_{ij} : 集卡从节点 i 转移到节点 j 的转移概率， $1 - \sum_{j=1}^3 r_{ij}$ 是集卡从节点 i 离开系统的概率， $i=1, 2, 3$ ；

σ_i : 节点 i 的总到达率。

$$\sigma_i = \lambda_i + \sum_{j=1}^3 \sigma_j r_{ji}, \quad i=1, 2, 3$$

输入参数如下:

(1) 桥吊、路径和龙门吊的平均服务率

可用桥吊、龙门吊和集卡的平均吊箱时间或行走时间的均值倒数最为参数 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 的估计值。

(2) 集卡和龙门吊的服务台数的变化范围;

在 s_1 、 s_2 和 s_3 变化范围内, 通过计算不同 (s_1, s_2, s_3) 组合下的 Jackson 排队网络的性能指标估算作业层面的集装箱网络内部物流网络的节点配置。

(3) 龙门吊节点外部顾客平均到达率 λ_1

随着内集卡台数增加到达桥吊和龙门吊的顾客数也增加, 用式 (4-5) 表示这一趋势:

$$\lambda_1 = \lambda_0 + \frac{0.1 \times s_2 \times \mu_2}{1 + \sum_{n=1}^{s_2} n} \quad (4-16)$$

其中, s_2 为内集卡台数。

(4) 集卡转移概率。

顾客从桥吊到桥吊, 集卡到集卡, 龙门吊到龙门吊, 龙门吊到桥吊, 桥吊到龙门吊转移概率为 0;

从龙门吊节点出来的顾客中, 内集卡返回桥吊继续船舶装卸作业, 外集卡离开系统。所以顾客从龙门吊节点转移到桥吊节点的转移概率为 r_{32} , 这既是内集卡的函数, 也是船舶集装箱装卸量与龙门吊总操作量的函数:

设 r_{32} 初值为 r_{32}' , 则:

$$r_{32} = r_{32}' + \frac{0.28 \times s_2 \times \mu_2}{1 + \sum_{n=1}^{s_2} n} \quad (4-17)$$

其中, s_2 为内集卡台数。

集卡从路径节点到桥吊节点的转移概率 r_{21} 和到龙门吊节点的转移概率 r_{23} 与各个节点的服务台数和服务时间有关，而相互之间不独立。在满足假设条件（5）时，用式（4-18）可表示 r_{21} 和 r_{23} 与各节点的服务台数和服务时间之间的关系：

$$\begin{aligned} r_{21} &= \frac{s_3 \mu_3}{5s_1 \mu_1 + s_3 \mu_3} \\ r_{23} &= \frac{5s_1 \mu_1}{5s_1 \mu_1 + s_3 \mu_3} \end{aligned} \quad (4-18)$$

4、输出参数

- （1）桥吊和龙门吊节点利用率。
- （2）桥吊和龙门吊节点的平均等待队长。

5、输出参数计算公式

- （1）桥吊节点：

$$\text{桥吊利用率, } \rho_1 = \frac{\sigma_1}{s_1 \mu_1} \quad (4-19)$$

$$\text{桥吊节点的平均等待队长, } \frac{(s_1 \rho_1)^{s_1} \rho_1}{s_1! (1 - \rho_1)^2} P_1(0) \quad (4-20)$$

$$\text{其中: } P_1(0) = \left(\sum_{j=0}^{s_1-1} \frac{(\sigma_1 \mu_1)^j}{j!} + \frac{(\sigma_1 \mu_1)^{s_1}}{s_1!} \frac{1}{1 - \rho_1} \right)^{-1}$$

龙门吊节点：

$$\text{龙门吊利用率, } \rho_3 = \frac{\sigma_3}{s_3 \mu_3} \quad (4-21)$$

$$\text{龙门吊节点的平均等待队长, } \frac{(s_3 \rho_3)^{s_3} \rho_3}{s_3! (1 - \rho_3)^2} P_3(0) \quad (4-22)$$

$$\text{其中: } P_3(0) = \left(\sum_{j=0}^{s_3-1} \frac{(\sigma_3 \mu_3)^j}{j!} + \frac{(\sigma_3 \mu_3)^{s_3}}{s_3!} \frac{1}{1 - \rho_3} \right)^{-1}$$

桥吊、龙门吊和集卡配置递归估算

为 s_1 、 s_2 、 s_3 和 λ 赋初值；

根据式 (4-18) 计算 r_{21} 和 r_{23} ；

根据式 (4-16)、(4-17) 计算 λ_1 和 r_{32}

根据式 (4-15) 计算节点总到达率；

Jackson 排队网络流量平衡方程组为：

$$\sigma_1 = r_{21} * \sigma_2 + r_{31} * \sigma_3 = r_{21} * \sigma_2$$

$$\sigma_2 = r_{12} * \sigma_1 + r_{32} * \sigma_3$$

$$\sigma_3 = \lambda_1 + r_{13} * \sigma_1 + r_{23} * \sigma_2 = \lambda_1 + r_{23} * \sigma_2$$

解此方程组得 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 的值。

计算桥吊、龙门吊节点的利用率和平均等待队长；

在 s_1 、 s_2 和 s_3 的变化范围内，依次改变 s_1 、 s_2 和 s_3 的值，从步骤 (2) 重新开始计算；

当 s_1 、 s_2 和 s_3 取遍变化范围的所有值时，停止运算。

分析比较之前算出的桥吊节点和龙门吊节点的利用率和平均等待队长，从中选取一组最合理的 (s_1, s_2, s_3) 作为作业层集装箱码头内部物流网络的节点配置。

6、算例：

已知某个作业面方式下，作业层集装箱码头内部物流网络 Jackson 排队网络，桥吊、集卡和龙门吊节点的平均服务率为：

$(\mu_1, \mu_2, \mu_3) = (0.2435, 0.6879, 0.3502)$ ；顾客转移概率 $r_{23} = 0.25$ ；桥吊台数为 1，集卡的变化范围 (1~6) 龙门吊的变化范围 (1~4)，求解在保证桥吊利用率大于 0.7 的条件下，集卡和龙门吊的最少配备台数。

(1) 赋初值 $s_1 = 1, s_2 = 1, s_3 = 1, \lambda_1 = 0.2, r_{32} = 0.25$

(2) 递归计算得到桥吊节点和龙门吊节点在不同集卡台数和龙门吊台数的情

况下的利用率和平均等待队长如表 4. 1—4. 2 所示：

表 4.1 桥吊节点的利用率表

Tab.4.1 The bridge crane node rate table

集卡台数 龙门吊台数						
	1	2	3	4	5	6
1	0. 0446	0. 0709	0. 1041	0. 1421	0. 1860	0. 2376
2	0. 0892	0. 1418	0. 2081	0. 2842	0. 3720	0. 4752
3	0. 1339	0. 2127	0. 3122	0. 4264	0. 5580	0. 7128
4	0. 1785	0. 2837	0. 4163	0. 5685	0. 7440	0. 9504

表 4.2 龙门吊节点的利用率表

Tab.4.2 Gantry crane node rate table

集卡台数 龙门吊台数						
	1	2	3	4	5	6
1	0. 8924	1. 0000	1. 0000	1. 0000	1. 0000	1. 0000
2	0. 4462	0. 5120	0. 5878	0. 6766	0. 7812	0. 9064
3	0. 2975	0. 3413	0. 3919	0. 4511	0. 5208	0. 6042
4	0. 2231	0. 2560	0. 2939	0. 3383	0. 3906	0. 4532

表 4.3 桥吊节点的平均等待队长（辆）

Tab.4.3 The average wait for bridge crane node

集 卡台数 龙 门 吊 台数						
	1	2	3	4	5	6
1	0.0021	0.0054	0.0121	0.0235	0.0425	0.0741
2	0.0087	0.0234	0.0547	0.1129	0.2203	0.4303
3	0.0207	0.0575	0.1417	0.3169	0.7044	1.7693
4	0.0388	0.1123	0.2969	0.7490	2.1621	18.2223

表 4.4 龙门吊节点的平均等待队长（辆）

Tab.4.4 The average wait for gantry crane node

集卡台数 龙门吊台数						
	1	2	3	4	5	6
1	0.0094	0.0199	0.0422	0.0891	0.1856	0.3741
2	0.0047	0.0100	0.0211	0.0446	0.0928	0.1870
3	0.0031	0.0066	0.0141	0.0297	0.0619	0.1247
4	0.0024	0.0050	0.0105	0.0223	0.0464	0.0935

由表 4.1 可以观察到桥吊利用率大于 0.7 的桥吊、集卡和龙门吊的组合有（1, 6, 3）、（1, 5, 4）和（1, 6, 4）。比较（1, 5, 4）和（1, 6, 4）明显在桥吊和龙门吊相同的情况下集卡 6 台比 5 台的成本要高，相比（1, 5, 4）更加合理。再比较（1, 6, 3）和（1, 5, 4），龙门吊的成本远远高于集卡的成本，所以在桥吊相同时 6 台集卡和 3 台龙门吊的组合更加合理。在外集卡的到达率为 0.2，且桥吊、集卡和龙门吊组合满足（1, 6, 3）时，桥吊节点的利用率为 0.7128，龙门吊节点的利用率为 0.6042，桥吊节点的平均等待队长为 1.7693，龙门吊节点的平均等待队长为 0.1247。

从表 4.1 可以看出，从（1, 5, 4）到（1, 6, 4）桥吊节点的利用率从 0.7440 变

化为 0.9504, 从 (1, 6, 3) 到 (1, 6, 4) 桥吊节点的利用率从 0.7128 变化为 0.9504, 桥吊节点的利用率都相应发生了很大变化。同时表 4.3 中从 (1, 5, 4) 到 (1, 6, 4) 桥吊节点的平均等待队长从 2.1621 变化为 18.2223, 从 (1, 6, 3) 到 (1, 6, 4) 桥吊节点的平均等待队长从 1.7693 变化为 18.2223, 桥吊节点利用率的突变直接导致了桥吊节点平均等待队长的突变。

综合分析, 节点发生突变的原因: 我们把顾客都看成同质的顾客, 而且内集卡有优先权, 此模型都没有考虑到。模型中的顾客到来都被假设为服从泊松分布, 服务时间服从负指数分布, 这在实际情况中很难用常见的分布函数来进行拟合。此模型中假设顾客再节点之间的转移存在概率转移概率独立, 实际上转移概率和节点的服务台的个数和服务台的服务时间的分布是相关的。

4.2 节点配置排队网络的仿真模型

节点配置的排队网络模型主要是针对集装箱码头内部物流网络的资源配置问题, 因此在模型中基本覆盖了集装箱码头中所有的资源。仿真模型有着解析模型不可替代的优点。本节将介绍仿真模型的建立、输入参数和输出参数。

4.2.1 仿真模型的建立

一、仿真模型中的基本单元

1、Part (零部件) 类

此类用来定义排队网络中的顾客类, 此模型中的集卡和集装箱。Part 进入模型一共有两种方式, 第一种是主动式, 例如: 集装箱船舶可以按照随机分布进入模型; 第二种是被动式, 例如: 进口集装箱在堆场堆放一定时间后需要离开堆场, 这时外集卡需要进入模型进行提箱操作。

2、Buffer (缓冲区) 类

此类用来存放零部件, 此模型中的泊位、堆场都为 Buffer 类。每个缓冲区的容量是有限的。泊位的容量就是 1, 因为一个泊位只能允许停靠一艘船舶。堆场的容量就是箱区能存放的最大集装箱量。本文假设集卡的行走路径的容量是无限大。缓冲区类的输出规则是可以设定的, 例如: 我们可以设定进口集装箱在堆场的堆放时间不超过十天, 时间一到, 集装箱立即被提走。

3、Labor(劳动者)类

劳动者类数量的控制,可以用来改变集装箱码头内部物流网络中各节点配置的数量。此模型中指:桥吊、龙门吊和内集卡。

4、Machine(机器)类

此类是用来运送零部件的。这个模型中指桥吊和龙门吊对集装箱的吊装过程,集装箱在码头堆场中的搬运过程。机器类需要劳动者类才能完成作业任务。为机器类制定劳动者

规则可以很相像具体的说明完成作业的过程中我们需要的劳动者类型和数量。例如:一个集装箱靠泊后从船上卸载下来需要一个桥吊的参与;一个集装箱从码头前沿运送到堆场需要一辆集卡的参与;一个集装箱从外集卡到堆场需要一个龙门吊来参与。码头的作业效率,在一定程度上是由劳动者类决定的。

5、Distribution(分布)类

集装箱码头内部物流网络是一个离散的复杂的动态网络,其整个作业过程受到很多随机因素的影响^[48]。在模型中我们考虑了主要的随机因素。参照码头的生产规律和本文的仿真目的,有如下的随机分布:

- (1) 船舶到港时间的间隔分布
- (2) 桥吊的装卸效率分布
- (3) 龙门吊的装卸效率分布
- (4) 进口集装箱在堆场的存放时间的分布
- (5) 出口集装箱进场的时间分布
- (6) 集卡的行驶时间分布

6、Variable(变量)类

模型中的各节点配置的数量应易于改变。此模型中将桥吊、集卡和龙门吊都设为变量。模型每次开始运行时,进行初始化。

二、仿真模型中的事件

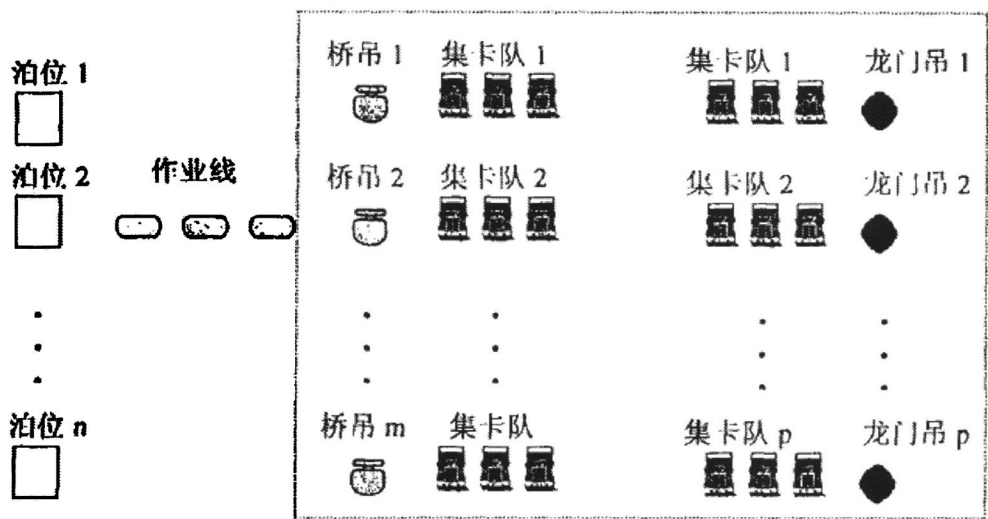


图 4.4 节点配置的排队网络系统

Fig.4.4 Queuing network node of configuration

各个节点之间的关系表述如下：

- 1、集装箱到达码头后如果码头有泊位，则在泊位处等待码头对其进行服务，如果没有泊位则在锚地等待形成船队列。
- 2、船舶进入到泊位后，根据船舶的实际情况，码头工作人员采取不同的方式。例如由船舶大小和货物装载情况确定需要的作业线情况，即为每艘船安排相应的桥吊数量，若空闲的桥吊数大于等于需要的作业线数，则这艘船可进行全面的装卸作业。若空闲的桥吊数小于需要的作业线数，则剩余的作业线形成等待队列。
- 3、已经开始装卸的船舶，利用集卡将集装箱在堆场和岸边之间进行运载。
- 4、集卡在岸边的时候如果桥吊空闲则为此集卡进行装卸，如果此时桥吊正在工作，则集卡形成等待队列。
- 5、集卡在堆场时，如果龙门吊空闲则为此集卡进行装卸，如果此时龙门吊正在工作，则集卡形成等待队列。

由上图可见此模型中共包含了九类事件：

- 1、触发点是船到达事¹。船到达事件用来描述船舶到达港口，根据定义的时间间隔产生集装箱船舶，给到港的船舶添加属性并给其赋初值，例如：船舶的装卸

箱量，可安排的作业线数量等。

2、作业线的到达事件。作业线到达事件用来描述船舶到达泊位后为其安排相应的桥吊。

3、集卡到达桥吊事件。集卡到达桥吊事件用来描述集卡在桥吊处接受服务。桥吊服务时间的分布律来推进此事件的进程。

4、集卡到达龙门吊事件。集卡到达龙门吊事件是用来描述集卡在龙门吊处接受服务。龙门吊服务时间的分布率来推进此事件的进程。

5、集装箱装到集卡事件。集装箱装到集卡事件是用来描述桥吊或是龙门吊将集装箱装卸到集卡上。对于进口箱来说，我们利用集卡到堆场的行驶时间来推进事件的进程；对于出口箱来说，我们利用是集卡从堆场到桥吊的行驶时间来推进事件的进程。

6、集装箱从集卡上卸下事件。集装箱从集卡上卸下事件是用来描述龙门吊或是桥吊将集装箱装到集卡上结束。

7、进口作业开始事件。进口作业开始事件是用来描述进口集装箱进入队列开始接受服务，集卡根据排队规则开始在相应桥吊下接受服务。

8、进口作业结束，出口作业开始事件。进口作业结束，出口作业开始事件是用来描述船舶的状态由卸载改为装船后，相应的船舶出口集装箱进入出口缓冲区即出口作业开始。

9、出口作业结束事件。出口作业结束事件是用来描述出口作业结束，船舶离泊后为该船服务的岸桥为空闲状态，可以为它开始重新安排任务。

4.2.2 输入参数

此仿真模型的输入参数主要有以下几个：

- 1、船舶到港的时间间隔分布
- 2、船舶装卸集装箱的箱型分布和货运量分布
- 3、桥吊、龙门吊和集卡的数量

4.2.3 输出参数

- 1、桥吊的利用率
- 2、龙门吊的利用率

- 3、集卡在桥吊处的平均等待队长
- 4、集卡在桥吊处的平均等待时间
- 5、集卡在龙门吊处的平均等待时间
- 6、集卡在桥吊处的平均等待队长
- 7、仿真时间内船的总到达次数
- 8、仿真时间内装卸的集装箱总量
- 9、船舶在整个系统内的逗留时间：开始到达泊位时的准备装卸时间、装卸时间和离开泊位的准备时间的总和。

4.3.4 仿真模型的检验

算例：

已知桥吊、龙门吊服务时间分布，采用经验分布，分布率如表 4.5 所示：

表 4.5 桥吊、龙门吊的服务时间分布（秒）

Tab.4.5 Bridge, gantry crane service time distribution

桥吊服务时间 分布率	桥吊服务 时间	龙门吊服务时间 分布率	龙门吊服务 时间
0.206	75	0.1326	25
0.485	105	0.4062	65
0.079	135	0.2654	100
0.102	165	0.1014	135
0.039	195	0.0340	170
0.025	225	0.0400	205
0.043	290	0.0154	240

内集卡行走速度为 10（m/s），外集卡进入堆场的分布是服从参数为 0.2 的泊松分布；桥吊台数为 1，集卡台数范围为（1~6），龙门吊台数变化范围为（1~4），仿真过程中处理的集装箱量模拟为 200 个自然箱，同一组数据重复仿真 15 次，取平均值。

通过模拟仿真可以得到结果如表 4.6——4.9 所示：

表 4.6 桥吊节点利用率表

Tab.4.6 Bridge crane node utilization table

集卡台数 龙门吊台数						
	1	2	3	4	5	6
1	0.4235	0.6030	0.8440	0.957	0.9857	0.9663
2	0.4835	0.7045	0.9002	0.985	0.9906	1.0000
3	0.4975	0.7219	0.9213	0.990	0.9985	1.0000
4	0.5001	0.7320	0.9354	0.997	1.0000	1.0000

表 4.7 龙门吊节点利用率表

Tab.4.7 Gantry crane node utilization table

集卡台 数 龙门吊台数						
	1	2	3	4	5	6
1	0.8400	0.7980	0.8120	0.8090	0.8010	0.7670
2	0.8349	0.8006	0.7915	0.8032	0.8105	0.8015
3	0.8245	0.8001	0.7902	0.7985	0.8125	0.7935
4	0.8175	0.7985	0.7899	0.8015	0.7846	0.8088

表 4.8 桥吊节点平均等待队长（辆）

Tab.4.8 The average wait for bridge crane node

集卡台数 龙门吊台 数						
	1	2	3	4	5	6
1	0.0200	0.1060	0.4414	1.1357	2.0500	3.0040
2	0.0010	0.1360	0.5044	1.2132	2.2042	3.1102
3	0.0000	0.1475	0.6002	1.3564	2.3012	3.2578
4	0.0000	0.1563	0.6134	1.4213	2.4003	3.3078

表 4.9 龙门吊节点平均等待队长（辆）

Tab.4.9 The average wait for gantry crane node

集卡台 数 龙门吊台数						
	1	2	3	4	5	6
1	0.2012	0.4161	0.4844	0.5111	0.6156	0.6431
2	0.0850	0.2034	0.2435	0.2602	0.3075	0.3090
3	0.0691	0.1543	0.1835	0.1812	0.2165	0.2078
4	0.0600	0.1372	0.1403	0.1395	0.1501	0.1532

4.3 节点配置的排队网络解析计算与仿真计算结果的对比分析

节点配置的排队网络解析模型对模型中的很多要素进行了假设，相比之下仿真模型更贴近现实的操作环境，更加形象具体的。本节对作业层面的集装箱码头内部物流网络的解析计算和仿真计算的结果进行对比分析。

4.3.1 Jackson 排队网络解析与仿真计算结果分析

表 4.10 作业层集装箱码头内部物流网络 Jackson 排队网络仿真与解析算法结果对比

Tab.4.10 Job internal logistics network layer container terminal Jackson queuing network simulation results were compared with the analytical method

节点配置情况	桥吊利用率		龙门吊利用率		桥吊平均等待队长		龙门吊平均等待队长	
	仿真计算结果	解析计算结果	仿真计算结果	解析计算结果	仿真计算结果	解析计算结果	仿真计算结果	解析计算结果
(桥吊: 集卡: 龙 门吊)								
1:1:1	0.4235	0.0446	0.8400	0.8924	0.0200	0.0021	0.2012	0.0094
1:2:1	0.6030	0.0709	0.7980	1	0.1060	0.0054	0.4161	0.0199
1:3:1	0.8440	0.1041	0.8120	1	0.4414	0.0121	0.4844	0.0422
1:4:1	0.9572	0.1421	0.8090	1	1.1357	0.0235	0.5111	0.0891
1:5:1	0.9857	0.1860	0.8010	1	2.0500	0.0425	0.6156	0.1856
1:6:1	0.9963	0.2376	0.7670	1	3.0040	0.0741	0.6431	0.3741
1:1:2	0.4835	0.0892	0.8349	0.4462	0.0010	0.0087	0.085	0.0047
1:2:2	0.7045	0.1418	0.8006	0.5120	0.1360	0.0234	0.2034	0.0100
1:3:2	0.9002	0.2081	0.7915	0.5878	0.5044	0.0547	0.2435	0.0211
1:4:2	0.9857	0.2842	0.8032	0.6766	1.2132	0.1129	0.2602	0.0446
1:5:2	0.9906	0.3720	0.8105	0.7812	2.2042	0.2203	0.3075	0.0928
1:6:2	1	0.4752	0.8015	0.9064	3.1102	0.4303	0.3090	0.1870
1:1:3	0.4975	0.1339	0.8245	0.2975	0	0.0207	0.0691	0.0031
1:2:3	0.7219	0.2127	0.8001	0.3413	0.1475	0.0575	0.1543	0.0066
1:3:3	0.9213	0.3122	0.7902	0.3919	0.6002	0.1417	0.1835	0.0141
1:4:3	0.9905	0.4264	0.7985	0.4511	1.3564	0.3169	0.1812	0.0297
1:5:3	0.9985	0.5580	0.8125	0.5208	2.3012	0.7044	0.2165	0.0619
1:6:3	1	0.7128	0.7935	0.6042	3.2578	1.7693	0.2078	0.1247
1:1:4	0.5001	0.1785	0.8175	0.2231	0	0.0388	0.0600	0.0024

续表 4.10

1:2:4	0.7320	0.2837	0.7985	0.2560	0.1563	0.1123	0.1372	0.0050
1:3:4	0.9354	0.4163	0.7899	0.2939	0.6134	0.2969	0.1403	0.0105
1:4:4	0.9975	0.5685	0.8015	0.3383	1.4213	0.7490	0.1395	0.0223
1:5:4	1	0.7440	0.7846	0.3906	2.4003	2.1621	0.1501	0.0464
1:6:4	1	0.9504	0.8088	0.4532	3.3078	18.2223	0.1532	0.0935

表 4.11 作业面方式下节点配置的集装箱码头内部物流网络的 Jackson 排队网络模拟仿真与解析分析的相对偏差表

Tab.4.11 Relative deviation table container terminal node configuration mode internal logistics network Jackson queuing network simulation and analytical analysis under job-surface

节点配置情况（桥吊：集卡：龙门吊）	桥吊利用率 相对偏差	龙门吊利用 率相对偏差	桥吊平均等待 队长相对偏差	龙门吊平均等待 队长相对偏差
1:1:1	-0.8947	0.0624	-0.8950	-0.9533
1:2:1	-0.8824	0.2531	-0.9491	-0.9522
1:3:1	-0.8767	0.2315	-0.9726	-0.9129
1:4:1	-0.8515	0.2361	-0.9793	-0.8257
1:5:1	-0.8113	0.2484	-0.9793	-0.6985
1:6:1	-0.7615	0.3038	-0.9753	-0.4183
1:1:2	-0.8155	-0.4656	7.7000	-0.9447
1:2:2	-0.7987	-0.3605	-0.8279	-0.9508
1:3:2	-0.7688	-0.2574	-0.8916	-0.9133
1:4:2	-0.7117	-0.1576	-0.9069	-0.8286
1:5:2	-0.6245	-0.0362	-0.9001	-0.6982
1:6:2	-0.5248	0.1309	-0.8616	-0.3948
1:1:3	-0.7309	-0.6392		-0.9551
1:2:3	-0.7054	-0.5734	-0.6102	-0.9572

续表 4.11

1:3:3	-0.6611	-0.5040	-0.7639	-0.9232
1:4:3	-0.5695	-0.4351	-0.7664	-0.8361
1:5:3	-0.4412	-0.3590	-0.6939	-0.7141
1:6:3	-0.2872	-0.2386	-0.4569	-0.3999
1:1:4	-0.6431	-0.7271		-0.9600
1:2:4	-0.6124	-0.6794	-0.2815	-0.9636
1:3:4	-0.5549	-0.6279	-0.5160	-0.9252
1:4:4	-0.4301	-0.5779	-0.4730	-0.8401
1:5:4	-0.2560	-0.5022	-0.0992	-0.6909
1:6:4	-0.0496	-0.4397	4.5089	-0.3897
相对偏差均值	-0.6360	-0.2548	-0.1178	-0.7936
相对偏差标准 偏差	0.2131	0.3391	2.0394	0.1968

由表 4.11 可以看出, 桥吊节点的利用率和平均等待队长, 龙门吊节点的利用率和平均等待队长的解析算法的相对偏差均值都较大。其中 0.1178 对应的是桥吊平均等待队长, 相对偏差最小; 0.7936 为龙门吊平均等待队长, 相对偏差最大。

4.3.2 对比分析小结

对于 Jackson 排队网络的解析计算结果和仿真计算结果可以看出其偏差较大, 总结原因有以下几点:

1、造成解析模型的计算结果和仿真计算结果偏差大的最主要原因是, 在解析模型中我们把所有的集卡看成一种顾客, 而在仿真模型中我们分为了内集卡和外集卡两种类型的顾客。因为在实际的操作过程中, 场内的集卡即内集卡具有优先权, 而在解析模型中所有的集卡都看成同质的忽略了这种优先权^[58]。

2、在作业层的集装箱码头内部物流运输网络中, 集卡在各个节点之间的运输不是独立的, 而在解析模型中我们设定了在各个节点之间的转移概率。

3、模拟仿真模型的每次输出值都不同取多次均值更加贴近实际值，解析模型没有此功能

4、在解析模型中我们将龙门吊节点、桥吊节点和集卡节点服务时间这几项分布服从负指数分布，但在仿真模型中这些节点的时间分布采取经验分布，这样会更贴近实际情况。

4.4 本章总结

本章的主要内容如下：

1、建立了节点配置的排队网络解析模型：节点配置的串联排队网络解析模型、节点配置的闭排队网络解析模型、节点配置的 Jackson 排队网络解析模型。并对模型的特点、输入参数、输出参数计算公式、假设条件，节点配置的递归算法，并重点对 Jackson 排队网络的算例进行了计算分析。

2、基于 Witness 仿真软件建立了节点配置的排队网络仿真模型并且说明了仿真模型中的基本单元、仿真模型中的事件、各事件的处理流程。而且解释说明了模型中的输入、输出参数的含义。

3、对比分析了节点配置的排队网络解析计算和仿真计算结果，并分析说明了两种计算结果偏差较大的原因。

4、实际问题中的集装箱内部物流网络系统一般情况下不符合解析模型的假设条件，所以复杂的作业层的集装箱码头内部物流网络节点配置用模拟仿真模型更便于我们求解。

第5章 实证分析

本章利用模拟仿真方法研究了S港集装箱码头内部物流网络的节点配置。

5.1 S港集装箱码头一期概况

S港区陆域面积较大,是国内外港区陆域纵深超过1km的极少数港区之一。外一期岸线长900米,有3个泊位,设计吞吐量60万TEU,堆场面积设计为12.65万平方米。

为了满足集装箱船舶趋于大型化、高速化和密集化的需要,S港集装箱码头一方面需要进一步投资、购买设备,提高码头硬件配置;另一方面需要不断提高内部物流网络运作管理水平,以适应快速增长的箱量需求、不断加剧的枢纽港地位的竞争和不断变化的集装箱运输格局。

5.2 S港集装箱码头一期内部物流网络的节点配置

S港集装箱码头采用的生产方式是“作业线”生产方式,因此可采用“作业线”方式的作业层集装箱码头内部物流网络仿真模型计算,得到船舶装卸的桥吊、龙门吊和集卡的最佳配比。

1、计算过程

节点设备最优配比是通过Jackson排队网络仿真模型计算得到的,其计算过程和结果分析如下:

最优设备配比是指在相同的装卸量条件下船舶装卸时间最短,或者在相同时间的条件下装卸集装箱装卸量最多的桥吊、集卡和龙门吊的配比。本案例计算以系统排队队长最小为标准得到配比最优解。

最优设备配比是通过仿真计算在不同组合的设备配比下的排队长度,其仿真运算过程如下:

- (1)根据S港集装箱码头的岸线长度和到港船舶类型,确定桥吊台数变化范围3~13台;
- (2)根据集装箱码头实际作业情况,确定龙门吊台数变化范围2~20台;
- (3)同样根据码头实际作业情况,确定集卡与桥吊数量比例变化范围别为5、

5.5、6、6.5、7、7.5、8;

(4)依次变化桥吊、集卡与龙门吊台数比例, 仿真计算出每个“桥吊、龙门吊、集卡与桥吊比例”组合下的系统排队长度。

仿真结果分析:

对不同桥吊、龙门吊和集卡与桥吊比例组合下的系统排队长度仿真结果分析可分为两个阶段:

(1)保持桥吊、龙门吊台数不变, 寻找系统排队长度变化最小(即排队长度随集卡比例变化趋于平稳)的集卡与桥吊比例。

以外高桥一期计算结果为例, 如表 5.1 所示。

表 5.1 最优桥吊与集卡比例仿真运算示例表(S 港一期)

Tab.5.1 The optimal ratio of bridge crane and truck simulation computing sample table

桥吊数	龙门吊数	系统排队长度最小的 集卡与桥吊比例
7	2	5
7	3	7
7	4	7
7	5	7.5
7	6	7
7	7	7
7	8	7.5
7	9	7
7	10	7
7	11	7
7	12	7
7	13	7
7	14	6.5
7	15	6
7	16	6.5

续表 5.1

桥吊数	龙门吊数	系统排队长度最小的 集卡与桥吊比例
7	17	7
7	18	7.5
7	19	6.5
均值:		6.8

表 5.1 以桥吊台数 7 为例，首先计算桥吊台数为 7 和龙门吊台数为 2，集卡比例依次为 5、5.5、6、6.5、7、7.5、8 时，寻找系统排队长度变化最小（即排队长度随集卡比例变化趋于平稳）的集卡与桥吊比例。依次利用模型计算出桥吊为 7，龙门吊为 3~19 时，集卡比例依次为 5、5.5、6、6.5、7、7.5、8 时，系统排队长度变化最小（即排队长度随集卡比例变化的趋于平稳）时的集卡与桥吊比例。

(2)保持桥吊台数和集卡与桥吊的比例不变，寻找最优的龙门吊台数。

仍以 S 港一期计算结果为例，见表 5.2。

表 5.2 最优桥吊与集卡比例仿真运算示例表(S 港一期)

Tab.5.2 The optimal ratio of bridge crane and truck simulation computing sample table

桥吊数	集卡比例	排队长度最小的龙门吊台数
7	5	13
7	5.5	14
7	6	12
7	6.5	13
7	7	12
7	7.5	9
7	8	14
均值:		$(13+14+12+13+12+9+14) / 7 = 1.776$

表 5.2 的仿真结果分析同表 5.1 相似，先计算桥吊数 7 和集卡比例 5 不变，龙门吊台数为 2~20 时的系统排队长度随龙门吊台数的变化。根据系统排队长度的变化，选出系统排队长度变化最小（系统排队队长随龙门吊台数变化趋于平稳）时的龙门吊台数，可以看出变化最小的点为 13。依次利用模型计算出桥吊为 7，集卡桥吊比例依次为 5.5、6、6.5、7、7.5、8 时，系统排队长度变化最小（系统排队队长随龙门吊台数变化趋于平稳）时的龙门吊台数。

1、结果分析

根据上述仿真运算过程，经结果分析得到 S 港一期最佳设备配比，见表 5.1、表 5.2。

表 5.3 S 港不同桥吊数下最优的集卡比例与龙门吊比

Tab.5.3 S port number under the optimal different bridge crane truck crane proportion and ratio

桥吊数	集卡与桥吊比例	龙门吊与桥吊比例
3	7.03	2.468
4	7.21	2.014
5	6.98	1.765
6	7.19	1.954
7	6.8	1.776
8	7.16	2.142
9	7.25	1.899
10	7.04	1.803
11	7.15	1.833
12	7.14	1.747
13	7.26	1.694
均值：		1.917

从表 5.3 可以看出在不同桥吊数下最优的集卡与桥吊比例、龙门吊与桥吊比例情况。例如：桥吊数为 10 时相应的集卡与桥吊比例为 7.04，龙门吊

与桥吊比例为 1.803，如果这两个比例继续增加不会带来系统排队长度的明显减小，如果这两个比例减小反而会带来系统排队长度的明显增加，即在桥吊台数为 10 时，在尽可能不增加龙门吊与集卡数的前提下，使得系统排队长度尽可能小。

第 6 章 结论与展望

现如今经济发展依然迅猛，物流行业也发展到前所未有的高度。在船舶大型化的趋势下，各港口对于集装箱的吞吐量越来越大，对于码头装卸能力和作业效率的要求越来越高。本文通过对作业层的集装箱码头内部物流网络的基础研究，详细分析了国内外的相关的研究成果，建立模型通过算例进行求证，得到如下的结果以及对未来的展望。

6.1 结论

本文的研究结论主要包括以下几个方面：

(1) 本文通过运用物流网络的形式分析了集装箱码头内部物流网路。通过战略层、战术层和作业层分析集装箱码头内部物流网络。指出了集装箱码头内部物流网络在物流网络中和在集装箱码头中的地位和作用。而且重点说明了作业层面的集装箱码头内部物流网络的构成要素，并对其特点进行了分析。集装箱码头内部物流网络是整个物流网络中的一个重要节点，而其整个网络是一个复杂动态的开系统。

(2) 本文介绍了建立集装箱码头内部物流网络的理论基础，排队网络的相关理论。阐述分析了串联排队网络、闭排队网络和 Jackson 排队网络理论。并对排队网络的模拟仿真算法的确定模型的建立进行了说明。

(3) 本文对排队网络解析算法和排队网络仿真模型在集装箱码头内部物流网络节点配置的应用进行了深入的研究分析。并建立了串联排队网络解析模型、闭排队网络解析模型和 Jackson 排队网络解析模型。简单介绍了 Witness 仿真软件，并通过 Witness 软件建立了节点配置的排队网络仿真模型，对于仿真模型中的事件、输入输出参数进行了详细的说明，并且通过算例对模型进行了检验。

(4) 本文通过对节点配置的 Jackson 排队网络解析计算和仿真计算结果进行了相同算例的对比，对仿真模型和解析算法的各自的优劣进行了比较，并添加了这些模型的实际意义。

6.2 展望

集装箱码头内部物流网络本身就是一个复杂系统,本文虽然取得了以上的成果,但是还有许多需要改进的地方:

(1) 对于节点配置的物流网络的建模的理论基础还有待于突破。排队网络本身有许多的局限性。排队网络中的输入流为泊松分布,输出为负指数分布,这与实际情况可能会有误差。

(2) 对于数据的整理和资料的收集需要进一步加强。如果文中这些随机变量不是通过函数发生器产生的,而是集装箱码头的实际营运过程中产生的数据,这会更有实际意义。但是由于本身条件所限,所掌握的数据、资料不充分,所以分析得不是很全面。

(3) 本文使用的仿真软件是 Witness,这种建模的方法可以进一步更新。集装箱码头内部物流网络的仿真模型的参数化和对于内部模块事件的设计问题,很大程度上提高了建模的效率,不过很多方面还可以进一步采用新的方式来继续研究。

(4) 节点配置的集装箱码头内部物流网络只是集装箱码头内部物流网络的一部分。节点配置虽然为到港船舶提供了码头资源,但是节点配置之后,网络的高效率运作还需要集卡和龙门吊合理的行走路径。对于集卡和龙门吊的行走路径的优化,本文未对其进行说明研究。

参考文献

- [1]Lim.The berth planning problem [J]. Operations Research Letters. 1998(22): 105-110.
- [2]Nishimura, Imai. Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms [J]. European Journal of Operational Research. 2001(131): 282-292.
- [3]Guan. A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: heuristic and worst-case analysis [J]. Operations Research Letters. 2002(30): 343-350.
- [4]Park, Kim. Berth scheduling for container terminals by using a sub-gradient optimization technique [J]. Journal of the Operational Research Society. 2002(53): 1054-1062.
- [5]Imai, Nishimura. Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach [J]. Transportation Research Part B. 2005(39): 199-221.
- [6]Hansen. Variable neighborhood search for minimum cost berth allocation[J]. European Journal of Operational Research. 2008, 191(3): 636-649.
- [7]Golias. Berth scheduling by customer service differentiation: A multi-objective approach[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2009, 45(6): 878-892.
- [8] Saharidis. The berth scheduling problem with customer differentiation: a new methodological approach based on hierarchical optimization[J]. International Advantage Manufacture Technology. 2010(46): 377-393.
- [9]汪锋, 陶德馨. Witness 仿真软件在集装箱码头模拟系统中的应用[J]. 交通与计算机, 2003(2): 64-66.
- [10]杨海东. 港口泊位系统仿真求解泊位分配问题[D]. 天津大学 (硕士论文), 2007.
- [11]韩骏, 孙晓娜, 靳志宏. 集装箱码头泊位与岸桥协调调度优化[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34(2): 117-121.
- [12]周鹏, 康海贵. 面向随机环境的集装箱码头泊位—岸桥分配方法[J]. 系统工程理论与实践, 2008(1): 161-168.
- [13]Preston, Kozan. An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals[J]. Computers & Operations Research. 2001(28): 83-995.
- [14]Kozan, Preston. Mathematical modeling of container transfers and storage location at seaport terminals[J]. OR Spectrum. 2006(28): 519-537.
- [15] Lee. An optimization model for storage yard management in transshipment hubs[J].

OR Spectrum. 2006, 28(4):539 - 561.

[16]R. Dekker, P. Voogd, E. Asperen. Advanced methods for container stacking[J]. Container Terminals and Cargo Systems, 2007.

[17]Han, Lee, L. H. A yard storage strategy for minimizing traffic congestion in a marine container transshipment hub[J]. OR Spectrum. 2008(30):697 - 720.

[18]Bazzazi, M. Safaei, N. Javadian. A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal[J]. Computers & Industrial Engineering. 2009, 56(1): 44-52.

[19]Mi, W. J, Yan, W. He. An investigation into yard allocation for outbound containers[J]. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical Engineering. 2009, 28(6):1442-1457.

[20]王斌. 集装箱堆场基于混堆的滚动式计划堆存方法[J]. 系统工程学报. 2005, 20(5): 466~471.

[21]张莉. 基于排队网络理论的集装箱码头设备配置优化研究[D]. 同济大学. 2007.

[22]谢尘, 何军良, 蒯道方. 基于混堆模式的集装箱码头出口箱进场选位策略[J]. 上海海事大学学报. 2008, 29(4):70-75.

[23]陶经纬, 汪敏. 基于混堆模式的集装箱堆场区段分配[J]. 系统工程理论与实践. 2009, 29(8):185-192.

[24]王志明, 符云清. 基于遗传算法的集装箱后方堆场箱位分配策略[J]. 计算机应用研究. 2010, 27(8): 2939~2941.

[25]王展. 混堆操作下的堆场作业量与堆区堆位分配研究[D]. 上海:上海交通大学. 2011.

[26]侯春霞. 集装箱码头出口箱堆场空位分配研究[D]. 大连:大连海事大学. 2011.

[27]李巍. 集装箱码头物流系统仿真勾优化研究[D]. 大连理工大学. 2006.

[28]武剑. 集装箱码头生产作业系统仿真优化研究[D]. 大连海事大学. 2008.

[29]现代港口的新发展[J]. http://www.drcnet.com.cn/html_document/guoyan/intra/2000-09-25/2686A7ABB467E39A4825696I000FEIEA.asp.

[30]杨钰池. 亚太地区港埠物流信息系统之比[J]. <http://www.easipass.com06/206:04> 亿通网.

[31]Ballou. R. H. Business Logistics Management[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1992

[32]Ereng S. S., SimPson. N. C., Vakharia. A. J. Integrated Production/ distribution Planning in Supply chains: An invited review [J]. European Journal of Operational Research, 1999, 115, 219-236.

- [33]Vercellis.C.Multi-plant Production Planning in capacitated self-configuring two-stages erial systems[J].European Journal of OperationResearch ,1999,119,451-460.
- [34]Anthony D.Ross.A two-phase approach to the supply network reconfiguration Problem[J].European Journal of Operation Research,2000,122,18-30.
- [35]大卫·辛奇-利维等著,季建华等译.供应链设计与管理:概念、战略与案例研究IM].上海:上海远东出版社,2000.10.
- [36]马十华,林勇,陈志祥.供应链管理[M].北京:机械工业出版社,2000.5.
- [37]Yang-JaJang, Seong-YongJang, Byung-Mann Chang, Jim woo Park.A combined model of network design and production/distribution planning for a supply network[J].Computer&Industrial Engineering,2002,43,263-281.
- [38]袁志耕.集装箱码头[M].上海:中国纺织大学出版社,1998.9.
- [39]陈戌源.集装箱码头业务管理[M],大连:大连海事大学出版社,1998,8
- [40]Lai K.K., Shih K.Astudy of container berth allocation, [J].Journal of Advanced Transportation,1992,26:45 — 6e0.
- [41]Brown GG.,Lawphong panich S.,Thurman K.P.Optimizing ship berthing [J].Naval Research Logistics,1994,41:1 — 15.
- [42]BrownG. G., CormieanK. J.,Lawphong panich S.,Widdis D.B.Optimizing submarine Berthing with a persistence incentive[J].Naval Research Logistics,1997,44:301-318.
- [43]ImaiA.,NagaiwaK.,ChanWT. T.Effieient.planning of berth allocation for container in Asia[J]. Journal of Advanced, Transportation,1997,31:75-94.
- [44]AkioImai,EtsukoNishimura,StratosPapadimitriou,The dynamic berth allocation problem for a container[J].TransportationResearch PartB,2001,35:401-417.
- [45]魏恒州我国集装箱码头装卸工艺模式及发展[J].水运工程,2002,339(4):28-30.
- [46]张杰.上海港集装箱码头装卸桥配置研究[J].水运管理,2002,8:25 — 27.
- [47]DaganzoC. F. TheCraneSchedulingProblem[J]. TransportationResearechB,1989,23(3): 159 — 175.
- [48]R. I. Peterkofsky, C. F. Daganzo. ABaranch and Boud Solution Method for the Crane Scheduling Problem [J].TransportationResearch,1990,24B:159 — 172.
- [49]林敦清,陶其钧.集装箱码头装卸机械设各台数探讨[J].上海港科技,2001,5:19-22.
- [50]LaiK. K.,Lam. K. A study of container yard equipment allocation strategy in HongKong[J]. International Journal of Modeling and simulation,1994,14(3):134-138.
- [51]Kozan E,Preston P.Genetic algorithm to schedule container transfers,at

- multimodal terminals[J]. International Transactions in Operational Research, 1999, 6:311-329.
- [52] ChuqianZhang, Yat-wahWan, JiyinLiu, Richard J.Linn. Dynamic crane deployment in container storage yards[J]. Transportation Research PartB, 2002, 36:537- 555.
- [53] 李冠声, 丁以中等. 上海港集装箱码头吞吐能力与设备配置优化研究[J]. 上海港科技, 2002, 4, 4-6.
- [54] 金健. 国际集装箱码头的生产组织管理[J]. 集装箱化, 2001, 1, 15-18.
- [55] 金健. 浅析 TPS 的优化[J]. 集装箱化, 2002, 4, 19-20.
- [56] 缪强. 集卡全场自动调配系统[. I]. 上海港科技, 2002, 5:2-4.
- [57] 丁以中. 集装箱码头设备吞吐能力与设备配置优化研究[P]. 上海海运学院, 上海港务局, 2001. 12
- [58] Gopal SL, Kasilingam RG. A simulation model for estimating vehicle requirements in automated guided vehicle systems[J]. Computer Industry Engineering, 1991, 21: 623-627.

致 谢

由于本人的水平有限,时间短暂,对于码头内部物流网络的路径优化问题没有进行研究,路径问题在很大程度上也影响着集装箱码头内部物流网络。论文中算法和数据的采集还有待于进一步改进,望大家指正提供更好的方法。相信在未来更进一步的研究一定可以得到更加完善的方案。本人所呈交的论文是本人在导师的知道下,独立完成的。在此感谢肖青老师给予我耐心的指导,不断帮助改进方案,提供很多有价值的建议和意见。感谢在学校研究生期间对我栽培的老师,在学术方面给予我很多的帮助。