

分类号 _____

密 级 _____

U D C _____

单位代码 10151 _____

大 连 海 事 大 学

硕士学位论文

集装箱码头装卸系统及调度优化

——以大连港集装箱码头为例

(学位论文形式：专题研究)


白 天 舒

指 导 教 师	蹇令香	职 称	教授
---------	-----	-----	----

学位授予单位	大 连 海 事 大 学
--------	-------------

申请学位类别	工商管理硕士	学科(专业)	工商管理(MBA)
--------	--------	--------	-----------

论文完成日期	2016 年 3 月	答辩日期	2016 年 6 月
--------	------------	------	------------

答辩委员会主席	
---------	--

**Container terminal handling system and scheduling
optimization**

——Dalian port container terminal, for example

A thesis Submitted to

Dalian Maritime University

**In partial fulfillment of the requirements for the degree of
Master of Business Administration**

by

Bai Tianshu

(Business Administration)

Thesis Supervisor: Professor Jian LingXiang

March 2016



Y3041203

大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：本论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，撰写成硕士学位论文“集装箱码头装卸系统及调度优化——以大连港集装箱码头为例”。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：白天舒

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：白天舒 导师签名：蹇令香

日期：2016年05月26日

摘 要

随着集装箱贸易的迅速增加，港口码头的吞吐量也随之增长，而码头作业调度也因此变得更加复杂，因此越来越多的学者研究了关于集装箱码头调度的问题，本文在此基础上，主要研究了集装箱码头的装卸系统，结合码头的实际情况，对码头作业效率的提高有着重要意义。

为更好地分析集装箱码头的装卸系统，本文从装卸系统的主要设备出发，研究了岸桥的结构特点、主要技术参数、使用情况、发展状况、影响因素等角度分析。考虑岸桥数量已知的前提下，根据装卸过程的特点，以船舶在港时间最短为目标，考虑了集装箱岸桥调度优化中的各种约束条件及特点，建立了装卸作业调度优化模型，设计了求解的遗传算法，利用 Matlab 编程实现。以大连港集装箱码头为案例背景，验证了本文建立的模型和算法的有效性。本文建立的优化模型能够为集装箱码头的实际作业调度提供思路。

关键词：集装箱码头；集装箱岸桥；遗传算法；优化方法

ABSTRACT

With the rapid increasing of container trade, throughputs of all ports grow. and scheduling of terminal operation also therefore become more complex, so more and more scholars focused on research of the container terminal operation problem. Based on this, the main research of this paper is about the container terminal handling system , It has important significance to the terminal operation efficiency, combined with the actual situation of terminal.

In order to analyze the container terminal handling system better, this paper started from the main equipment of loading and unloading system, this paper studies from the angle of the shore of the bridge structure characteristics, main technical parameters, usage, development status, influence factors. According to the characteristics of the loading and unloading process, this paper aimed at ship in the shortest time considering quantity of quay cranes. Considering various constraint conditions and characteristics during the container gantry cranes scheduling optimization, a scheduling optimization model was established. Genetic algorithm was designed to solve this problem, using Matlab programming. In the background of Dalian port container terminal, the effectiveness of the established model and algorithm is verified. This paper can provide approach for actual scheduling of container terminal.

Key Words: Container terminal; Quay crane; Genetic algorithm; Optimization method

目 录

第 1 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 研究意义	1
1.2 国内外研究综述	2
1.2.1 岸桥配备研究现状	3
1.2.2 岸桥调度研究现状	5
1.3 研究内容与技术路线	11
1.3.1 研究内容	11
1.3.2 技术路线	12
第 2 章 集装箱码头装卸系统相关理论概述	13
2.1 集装箱岸桥的结构特点及技术指标	13
2.1.1 结构特点	13
2.1.2 主要技术指标	15
2.2 集装箱岸桥的使用状况及发展趋势	18
2.2.1 使用情况	18
2.2.2 发展趋势	20
2.3 岸桥配置的主要因素	23
2.3.1 技术角度	23
2.3.2 港口通过的集装箱吞吐量情况	23
2.3.3 泊位通过能力和堆场能力	24
2.3.4 设备间的匹配性	24
第 3 章 集装箱码头装卸作业调度优化模型	25
3.1 建模的基本思路	25
3.2 目标函数及约束条件	25
3.2.1 模型假设和参数	25
3.2.2 目标函数	27
3.2.3 约束条件	27
第 4 章 集装箱码头作业优化模型的求解	29
4.1 遗传算法	29
4.1.1 基本概念和特点	29
4.1.2 主要运算过程	30

4.1.3 遗传算法的关键要素	31
4.2 算法设计	31
4.2.1 总体框架	31
4.2.2 算法设计过程	33
第 5 章 大连港集装箱码头算例分析	39
5.1 大连港集装箱码头背景	39
5.2 大连港集装箱岸桥的运行情况	41
5.2.1 年度使用频率	41
5.2.2 使用高峰分析	42
5.2.3 集装箱船舶到港规律	43
5.3 基础数据和参数设置	44
5.4 实验设计及结果分析	45
第 6 章 结论与展望	47
6.1 主要结论	47
6.2 研究展望	47
参考文献	48
致 谢	52

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

近几十年来，全球经济高速发展，直接推动着国际贸易的快速发展，我国的对外贸易也随之快速增长。其中 2013 年我国的进出口贸易额就达到了 3.86 万亿美元，占国民生产总值的 40%以上，发展势头迅猛。在世界经济发展的大背景之下，集装箱运输也在近年来高速发展，越来越多的货物通过集装箱运输完成，集装箱码头已成为世界运输网络中的不可替代的节点。而水上运输在我国的对外贸易中起着至关重要的作用。

据相关统计，我国进出口贸易中每年大约有 9 成的货物是经过水上运输实现的。持续许久的杂货船舶运输体系被集装箱的出现打破了原有的运输网络，集装箱班轮运输逐级替代原有的运输，成为是一种全新、高效的运输方式。相比于传统运输，集装箱运输更为安全、方便、并且能够在多种运输之间较快的衔接，因此在现在越来越受到国际贸易的青睐。为了更好地吸引货源，各港口之间存在着严重的竞争，港口作为一项服务行业，其服务的质量从某种程度上影响着其竞争力的大小。因此，提高码头作业效率、提高对船舶的服务质量已是各大港口的研究之重。

通常情况下，提高作业效率的常用方法包括增加设备数量和合理调度，两种方法是不同的策略。增加设备数量是一种较快的方法，但对于码头而言，需要投入过多的设备资源，容易出现资源浪费的现象，据有关资料统计显示，我国的码头平均设备数量已高于欧美国家水平，故而该方法对于很多集装箱码头而言并不适用。合理调度的方法对于码头的实际操作要求更高，要求要保证一定的意义。

1.1.2 研究意义

对于整个集装箱码头作业系统而言，其具有很大程度上的复杂性特征。在正常的调度过程中包括了多个作业环节、涉及多约束。因此本文的研究具有重要的研究意义，本文将从以下两方面分别论述其重要性：

（1）实际生产作业的需求

我国的集装箱运输业务随着世界集装箱运输发展也不断增长,从2003年至今,我国在港口集装箱吞吐量方面已处于世界领先水平。集装箱吞吐量的快速增加对我国的港口业提出了新的要求,如何有效的利用资源,合理安排调度,是国内港口面临的问题。且部分港口之间由于经济腹地的雷同性,存在着很明显的竞争,如大连港与营口港之间、上海港与宁波港之间等。因此,提高港口企业的竞争力,必须要做好港口的各项服务。属于高资本投入的服务业,前期土地购置、土木建设在资本节约方面可利用的空间不大,从战略角度分析,作为不同运输之间的换装节点,港口效率的提升有利于物流系统效率的改善。

虽然我国在集装箱码头管理方面相比于多年前已有较为明显的完善和发展,但自动化程度不足,部分调度问题完全依靠码头工人的经验完成,因此,本文的对集装箱码头的装卸系统的研究可以较好地提高码头作业效率。

（3）理论意义

装卸作业调度在理论上属于 NP-hard 问题,其求解过程较为复杂,无法再有效的时间内进行精确地求解,目前对于该方面虽然已有部分研究,但与实际作业情况存在着一些或多或少的差距,因此如何使优化问题更贴近与实际情况,为实际的调度提供必要的依据是本文拟解决的问题。

综上所述,本文的研究不论是对生产实际而言,还是对理论研究对集装箱码头的装卸系统而言都有极其重要的意义。

1.2 国内外研究综述

根据码头的工艺流程流程,码头的整个系统可以分为四大子系统构成,即泊位子系统、装卸子系统、堆场子系统和集疏运系统^[1]。

泊位子系统,主要满足到港船舶的靠泊需要,是完成货物装卸的必要途径;装卸子系统,主要满足到港船舶的装卸需要,也是港口与船舶直接发生关系的系统,是港口方对船方的一种服务的体现。堆场子系统,则是为了满足到港货物,包括从船舶卸载下来的货物和集卡运进堆场内的货物,而集疏运子系统是为了更

好地将货物从港内运走或者从港外运进而设置的，这些子系统互相之间有着密切的联系，每一环节都有可能码头作业的瓶颈。

本文研究的重点在于四个系统中的装卸子系统，对于集装箱系统而言，装卸子系统主要涉及岸桥的作业，下文将从国内外有关集装箱岸桥相关文献论述，通过研究发现，关于集装箱岸桥的有关研究主要集中于岸桥配备和岸桥调度两方面，而这两方面的合理调配，可以有效地提升岸桥的服务质量。

1.2.1 岸桥配备研究现状

岸桥是集装箱码头前沿的宝贵资源，对于任何一条船舶，给其配备的岸桥数量的多少直接关系到其作业时间的快慢，在实际的生产作业中，国内外许多先进的港口码头都有着一定的经验来合理的配备岸桥的数量，通常采用的方法是利用百米岸线岸桥配置的一个比例来实现岸桥的数量配备。

在该方面，国外学者有如下研究：Daganzo^[2]在不考虑集装箱码头前沿岸桥的实际数量的前提下，研究了岸桥分配，建立了混合整数规划模型，并获得了多条船舶集装箱岸桥的配备数量状况，但有时获得解会超过码头实际的岸桥总量；与上文类似，Peterkosky 等^[3]同样未考虑码头岸桥的总数，但作者以成本作为测算指标，将同一贝位的装卸任务看成同一工作集合，通过计算获得了一定时期内的集装箱岸桥分配情况；而 Gambardella 等^[4-5]分别对所有装卸设备进行考虑优化，建立了双目标优化模型，通过计算机仿真获得最终配置方案，也为最优方案。

林敦清等^[6]从安全靠泊的角度出发，依据到港船舶的船长和岸桥长度的情况，对到港船舶的装卸量及港口的装卸作业能力进行估计评判，按照其能力获得岸桥、集卡和场桥的数量配备比例；魏恒州^[7]以集装箱船舶的吨级作为判断依据，不同吨级的船舶配备不同数量的岸桥，从中获得单个泊位应该配备的岸桥数量，并在此基础上确定了与岸桥配套的龙门吊和集卡地情况；张婕姝^[8]对整个装箱码头的生产调度进行模拟仿真研究；

在众多学者的研究中，在已有的文献中，作者们还会采用以下几种方法来实现岸桥的配置：

(1) 根据集装箱码头的实际作业情况,利用计算机模拟其作业过程,对于船舶整个装卸过程进行计算机模型来达到想要的结果,以岸桥的效益最优作为模型的目标,从而确定配备的数量,这可称为计算机仿真。

杨静蕾等^[9]通过计算机 VB 语言编程仿真港口的活动情况,结合离散事件仿真系统的原理,并建立动态排队网络模型,从码头的装卸工艺的角度出发,分析其相应指标,并利用统计知识分析岸桥的合理配备,并获得不同吞吐量情况的岸桥配备及与场桥、集卡的比例关系。

彭传圣^[10]采用动画的形式模拟集装箱码头的整个过程,分别以船舶、集疏运车辆到港和对应的离港情况为基础数据,以岸桥平均利用率和投入使用的时间占用率相应的计算指标,获得岸桥的配置数量,在此基础上,结合作业线理论,依据比例关系得出码头集卡数量。

(2) 将岸桥的配置方案作为一项投资方案,在这种分析中,通常有不同的角度,第一种是以投资者的角度分析,追求投资者投资成本最低作为评价目标,采用技术经济分析来实现岸桥配备数量的确定,第二种是以码头的综合成本为评价目标,采用综合成本模型来确定其投资规模,寻求最佳以实现岸桥数量的配备等;

韩辉^[11]则依据集装箱码头的装卸工艺,确定码头前沿所配备的装卸设备的情况,通过层次分析法进行相应的规划,并结合《港口工程规范》的有关公式计算获得配置数量,最后以宁波港北仑五期为实际案例,指出了相应的对港口建设规划有利的合理建议。

丁以中^[12]为获得上海外高桥集装箱码头的投资方案,建立了两层模型,第一层为多级动态排队网络模型,该模型为了获得集装箱码头装卸设备机械的配套比例,在此基础上建立了第二层的港口装卸设备投资优化的整数规划模型,该模型是为第一层模型获得配套比例为输入变量,计算各码头净现值最小的投资方案,最终通过计算获得了合理的各年份各码头的装卸设备的投资方案。

(3) 基于船舶的到港规律,寻求其排队论的模型,以此寻求最佳的配备方案。

杨兴晏^[13]考虑港方和船方的利益,以最小化双方的总成本为有关目标,考虑了泊位、装卸设备、人工成本分别构建与成本有关的数学模型。其中,在计算装

卸设备成本时，文中考虑了设备折旧和日常损耗，并利用排队论计算船舶的平均在港停时间，从而获得船舶等待成本，从而获得集装箱码头的装卸设备投资的较合理的方案。

郝旭^[14]考虑装箱码头的实际情况，按照时间发展的先后顺序，建立了两阶段的数学模型来优化装卸设备的配备情况：在投资规划期，建立了有关的综合成本模型，以此计算需要装卸设备的数量情况；在运营期，统计港口机械拥有量、最佳出勤台数和设备完好率的关系，分析其三者的内在联系，结合排队论思想，以成本为优化目标建立数学模型来最终确认码头实际需要配备的装卸设备的数量。

上述文献均考虑的是岸桥数量的配备问题，其相应的计算方法和模型仍存在着不足之处，主要如下：

(1) 首先，以上研究主要集中于港口建设期，主要的工作是针对合理数量的配备数量，为了获得更为经济的收益，按照一定的比例确定各种设备之间的比例关系，没有结合具体情况进行有效分析；

(2) 对于岸桥的服务对象——集装箱船舶，没有充分地考虑，没有针对到港船舶的装卸任务的具体情况有效的分析和任务的安排；

(3) 以上文献建立的模型都将问题简单化，而实际的调度环节较为复杂，对于不同任务存在着明显的先后顺序等。

1.2.2 岸桥调度研究现状

关于集装箱码头岸桥调度问题的研究，近年来是国内外研究的重点问题，学者们都希望通过相应的数学方法计算复杂的集装箱码头的实际调度情况以更好地为实际做一定的参照。在有关文献中，主要的方法集中于两类：建立计算机仿真模型和数学规划模型，由于建立仿真模型进行相应计算所需耗费的资源（包括人力、物力、财力）较多，故而现阶段并不适用，故而在本节的研究现状中，主要以数学规模模型为主。

关于该方面，已有如下研究，如 Guan 等^[15]利用二维背包问题的思想来解决集装箱岸桥分配的问题，并在实际计算中考虑岸桥之间不可互换的情况，并在文中证明集装箱岸桥分配是 NP-complete 问题；BISH^[16]在同时考虑了集装箱码头的多

个任务的问题，如集卡调配，堆场库存、集装箱装卸情况，建立了已靠泊时间最短的优化模型，在模型中充分考虑了码头装卸效率；PARK 等^[17]在假设已知船舶到、离港时间的前提下，将集装箱岸桥作业分开组成多个部分，并分别利用采用分支界限法和 GRASP 算法计算，比较不同计算方法之间的优越性；董良才等^[18]从高架轨道的视角下研究了装卸作业中的水平运输环节；Lee 等^[19]在考虑岸桥之间的相互影响的前提下建立了岸桥调度模型，并根据模型设计了相应的算法，从而获得了所要求解问题的最优解；Canonaco 等^[20]并不像前文一样，其未考虑考虑岸桥之间的相互影响及对码头作业的影响，利用排队论思想进行研究；Tavakkoli 等^[21]采虽然从不同视角研究了集装箱岸桥调度问题，但该问对于问题的描述过于简单，且未考虑船舶受到的影响状况。

在以往的众多研究文献中，关于岸桥的调度，主要集中于表 1.1 的多种情况，各文献均在这些基础上进行有关的改进和组合，使得研究的问题更加符合集装箱码头作业的实际情况，为实际决策提供有效的指导。

表 1.1 岸桥调度考虑角度
Tab.1.1 Factors of crane scheduling

因素	问题的角度
考虑到港船舶状态	静态调度问题和动态调度问题
考虑泊位间关系	离散泊位问题和连续泊位问题
	从船舶数量角度：分为单船调度问题和多船调度问题
调度涉及的内容	从是否结合泊位角度：分为泊位、岸桥分别调度问题和联合调度问题
	从岸桥是否可在不同船舶间移动：分为固定岸桥问题和岸桥动态分配问题
数学模型的优化	船舶在港时间最短，等待时间最短，作业成本最低
求解方法	精确算法、近似算法、优化算法（如遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法）

(1) 考虑到港船舶状态

由于船舶是集装箱码头作业的服务对象，则根据对象的不同情况，可将目前已有的问题分为静态的调度问题和动态的调度问题。在研究的最开始阶段，为降低研究问题的复杂性，学者只考虑港船舶计划已知的情况，即属于静态的调度问题，在此假设前提下实现岸桥的调度，但众所周知，集装箱码头的实际情况并不属于静态调度问题，到港船舶并非完全按照事先的时间表，一刻不差的到港，其到港情况存在一定的随机性，但并非没有规律可寻。在实际生产中，存在着某种状况，已到泊位分配时刻，存在部分船舶未按时到港，这些船舶通常在未来的某个时刻内到达。为此，在 2001 年，Imai 等^[22]首次将静态问题扩展至动态的调度问题，并提出了有效的解决方法，使理论研究更贴近于集装箱船舶实际到达情况的动态变化，使理论更符合实际情况。

周鹏飞等^[23]在研究中，定义船舶实际到港时间和装卸时间与事先安排的时间的偏差属于正态分布的情况，确定了随机环境，研究岸桥的调度问题，利用随机规划的思想，考虑以船舶等待时间最短为优化目标，其主要特点在于模拟集装箱码头的随机性，能有效地反映不同条件下的真实环境，有利于决策者的选择。

白治江等^[24]考虑船舶动态到达问题的动态调度规划，以费用最小为优化目标，建立集装箱泊位岸桥集成调度问题，在模型求解过程中，考虑了泊位优先权限制的问题，并将时间划分为多个同一时间间隔的阶段，以此寻求问题的理想解。

（2）考虑泊位间关系

在研究中，依据泊位间是否有明确的划分，将泊位的形式分为离散泊位和连续泊位，相比于连续泊位，离散泊位有严格的标准划分，而且在船舶靠泊的时候规定每个泊位只允许一条船舶靠泊，而离散泊位则不然，由于众泊位处于同一岸线上，无间隔，基本直线的范畴，只要码头前沿的水深条件允许，存在着多余的岸线能使船舶有效安全的靠泊即可，没有严格意义上的界限划分，2 个泊位可以靠泊 3 条船舶的情况更为多见。

当前，我国绝大部分的港口均采用按泊位指泊的方式来安排集装箱码头的靠泊计划^[25]。在规划和建设集装箱码头时，首先根据市场需求数据来预测码头运营期间靠泊的主力集装箱船型，然后将码头的岸线划分出几个较为固定的专属泊位

[26]。而连续泊位的产生一般可以将其归结为两方面的原因：一方面是船舶大型化造成的，在船舶不断大型化的趋势下，码头的升级要滞后于船舶的发展，因此在实际生产中会出现多个泊位靠泊一条船舶的情况；另一方面是追求岸线利用率，在学术研究中，普遍认为，在提高泊位利用率方面，连续泊位比离散靠泊更具优势[27]。

Akio 等[28]建立两阶段的模型来满足连续泊位分配问题的求解过程，首先，只考虑离散泊位的分配，在此基础上，将离散的泊位连续化，从离散泊位的解中寻求合理的调度方案，从而获得问题的最优解，作者通过大量的试验验证所建模型的有合理性和所设计的启发式算法对于求解该问题的有效性。

（3）调度涉及的内容

基于是否考虑泊位和岸桥联动的视角下，岸桥分配问题又可以分为单独岸桥调度问题和联合调度问题。

在研究的初期，更多学者侧重于单独的调度问题，而随着研究的深入和对集装箱泊位及装卸系统的了解，研究者将研究目标放在了泊位——岸桥联合调度问题上，其比单独的调度问题更符合码头生产实际[29-30]。

赵坤强等[31]对泊位分配和岸桥调度分别建立相关模型，前者以在港时间最短为优化目标，后者以最小化岸桥调动次数为优化目标，在第一个模型的计算中，可以获得船舶靠泊时间、离泊时间、靠泊位置及各船舶配备的岸桥数量，第二个模型则在前者的基础上，最优化的安排岸桥的调度。

李娜[32]以最小化船舶在港时间为目标，建立泊位-岸桥联合调度问题的模型，其实质上市一个混合整数规划问题，设计了相应的构造算法，通过启发式局部搜索来实现泊位的分配，考虑装卸时间最长的船舶优先配备岸桥的情况下完成文章所设计的目标。

同样地，Chun-xia Yang[33]对泊位分配和岸桥调度分别建立了有关的模型，依据其各阶段的不同的特点，设计了遗传算法求解其联合的模型求解问题。

（4）数学模型的优化

在讨论调度问题的优化目标时，绝大多数从整体角度出发，考虑船舶总在港时间最短，但该优化目标对于单船舶而言并非一定最优化，为达到整体的最优，容易出现以牺牲部分船舶利益的现象，即导致部分船舶等待时间过长，而且在岸桥调度过程，很少人考虑了场桥和集卡的调度。

研究初期，绝大多数研究均以时间因素建立了有关的调度目标：Liang 等^[34]选择了以船舶作业时间、船舶等待时间和船舶推迟离港时间之和最小为优化目标，设计了相应的混合遗传算法；范志强等^[35]以最小化最大完工时间与等待时间为目标建立优化模型，同时也应用了遗传算法；Daganzo CF^[36]则以最小化船舶延迟时间为目标建立模型，并设计了求解的启发式算法。

后来，有学者注意到调度过程中的成本等有关问题也会影响到调度过程，故而研究的范围也就扩大了：杨春霞等^[37]建立了多目标优化模型，分别以船舶在港时间最短和码头生产成本最低为目标，并利用多目标遗传算法求解；Lee 等^[38]考虑了用船舶等待时间、船舶靠泊位置、船舶靠泊优先级和船舶移泊距离等问题，利用不同方案的权重之和表示优劣，设计求解的领域搜索启发式算法，以获得最优的方案。

（5）求解方法

最初学者大都是集中在诸如数学规划法、计算机简单仿真及其他一些数学方法上（如图 1.1）。这些方法的运用在一定程度上辅助了码头泊位的调度管理，如分支定界算法^[39]和动态规划^[40]等，但如果碰到较为复杂的调度问题，这些方法往往难以快速获取优化结果或者调度结果不够理想^[41]。现在，随着科技进步的日新月异，各种新兴技术与优化理论技术也迅猛发展，原本难以求解的集装箱码头调度问题也出现了更为适用的优化方法，比如采用遗传学的遗传算法^[42]、人工智能进行优化的禁忌搜索^[43]等等，这些优化方法已被应用求解于各式各样的复杂集装箱码头的调度问题，并且获得了良好的优化结果。而岸桥调度问题是 NP-Hard 问题，遗传算法的应用最广^[44]。

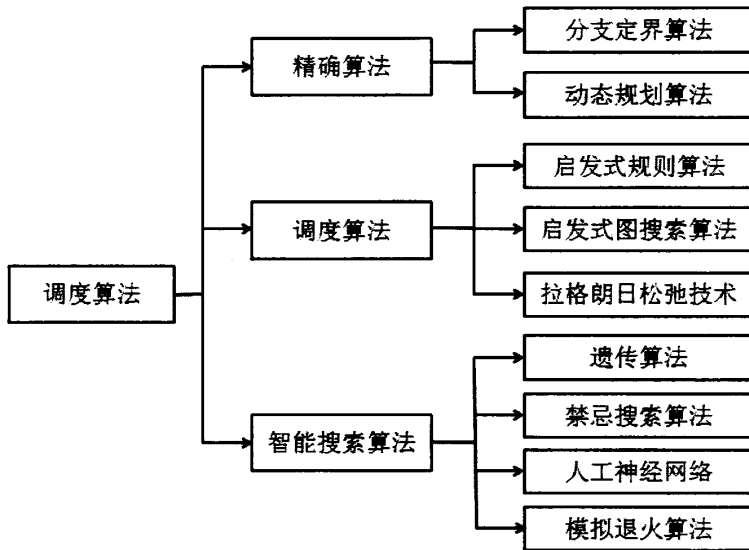


图 1.1 调度算法分类

Fig.1.1 Classification of scheduling algorithm

精确算法主要针对小规模问题，一旦问题规模扩大，其求解效果并不理想，在精确算法中，数学规划法是一种典型的精确算法，其通过建立一个能较好反映码头泊位调度实际情况的整数规划模型，进而利用枚举等优化方法寻求其中的最优解。在枚举方法中，分支定界法是主要的一项枚举策略^[45-46]。

近似算法，也可认为是启发式算法，相比优化算法而言其求解效率低，启发式算法利用一定的积累和经验，根据问题属性的特点，利用一些计算机语言实现求解的过程，从而寻求相对较好的求解方案的过程，目前启发式算法用来评估解决方案质量的手段还比较少，特别是在解决规模较大的优化问题时，其在搜索的效率以及计算机内存的使用大小上还有进一步优化的空间。

智能算法相比于前两个算法更能解决大规模的问题，而且还可以实现不同智能算法之间的组合以弥补各自的不足之处。

秦进等^[47]设计了双层模拟退火算法，计算了不同规模的问题，并对遗传算法和分支定界法进行对比分析，说明其文中设计的算法能够有效地求解问题。

综上所述，对集装箱岸桥调度问题的研究还可以继续，且越来越和实际情况相一致^[48-49]，仍存在着诸多可以深入的问题，结合集装箱码头的实际情况，建立更加符合实际装卸的约束条件，并利用合理的算法进行有效的求解。在此基础上，在实际调度的情况下，本文考虑岸桥的实际完成装卸的情况，主要研究的是单船静态的作业环境，以船舶在港时间最短为优化目标，利用优化算法求解获得做好的岸桥调度的方案。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

本文从集装箱码头的实际作业情况出发，分析了集装箱装卸设备的特点及调度问题，具体的研究内容如下：

第一章 从研究背景及研究意义出发，论述了本文研究的必要性，针对国内外对岸桥配备和岸桥调度的情况分析，对岸桥调度问题研究现状进行总结，指出本文全文的研究内容；

第二章 从集装箱的装卸设备出发，主要研究了岸桥的结构特点，发展趋势，使用状况，配备的影响因素，并以大连港集装箱码头为例，分析岸桥的使用情况，为后文的深入研究奠定相应的研究基础；

第三章 分别介绍了冷链物流及水产品冷链物流的情况，对大连市的水产品冷链物流进行详细论述，研究了冷链物流发展情况及物流配送存在的不足，进行了必要的分析；

第四章 分析了水产品冷链物流配送过程中的成本问题，建立了以配送成本最低和客户满意度最高为目标的双目标模型，通过功效函数将其转换为单目标的模型，对该配送问题设计了相应的遗传算法；

第五章 以大连港集装箱码头为研究背景，利用第3章所建模型和第4章所涉及的遗传算法进行案例求解，并对模型算法的适用性进行了相应的论文，证明本文所建模型和设计算法的有效性。

第六章 对本文研究进行总结，同时对文中存在的不足进行分析，对未来的研究进行了展望。

1.3.2 技术路线

根据本文研究内容，其技术路线如图 1.1 所示。

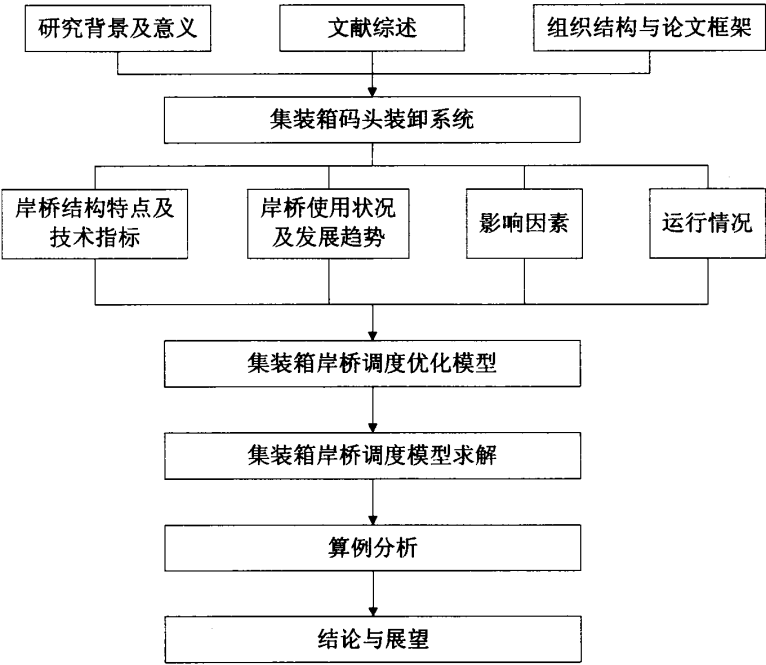


图 1.1 论文技术路线图

Fig.1.1 Technical route of the thesis

第 2 章 集装箱码头装卸系统相关理论概述

随着技术水平的提高和专业化水平的提升，在如今的专业化集装箱码头，专业集装箱泊位上已普遍采用岸桥等专用机械作业，集装箱标准化和集装箱船专用化，为码头装卸高效化提供了良好条件。只有在简易或多用途泊位，才使用门机作业（见图 2.1）。



a) 使用岸桥作业



b) 凹式泊位模拟图

图 2.1 集装箱码头装卸作业

Fig.2.1 Loading and unloading operation in container terminal

在码头前沿完成集装箱起落舱装卸作业的设备通常均是岸臂式集装箱岸桥 (Quay crane)，简称岸桥。通过掉上吊下的方式完成集装箱的船舶装卸作业。岸桥作为集装箱码头的专用机械，最明显的特点是体积庞大，重量较重，且价格高昂，但就集装箱的装卸而言，岸桥能够完成快速的装卸作业。

2.1 集装箱岸桥的结构特点及技术指标

2.1.1 结构特点

集装箱岸桥主要由带行走机构的门架，承担臂架重量的拉杆和臂架等几个部分组成。金属结构包括了陆侧门框上横梁、陆侧门框下横梁、后大梁、后大梁后拉杆、后大梁支撑架、陆侧门框立柱、后撑杆、海陆侧门框间联系横梁、海陆侧门框之间撑杆、海侧门框立柱、前大梁内侧拉杆、前大梁外侧拉杆、前大梁、海侧门框上横梁、海侧门框下横梁。臂架又分为海侧臂架，陆侧臂架和门中臂架 3 个部分。门中臂架是专门用于连接海侧和陆侧臂架，其主要作用是承受升降机构

中的小车、吊具和集装箱重量。海侧臂架可以仰起，以便在岸桥移动时与船舶上层建筑不发生碰撞。岸桥作业时，由于集装箱专用船舶的船舱内设有箱格，舱内集装箱作业对位非常方便，无需人工协助。根据其外形结构又可分为 A 字型结构（如图 3.2 a）和框架型结构（如图 3.2 b）。

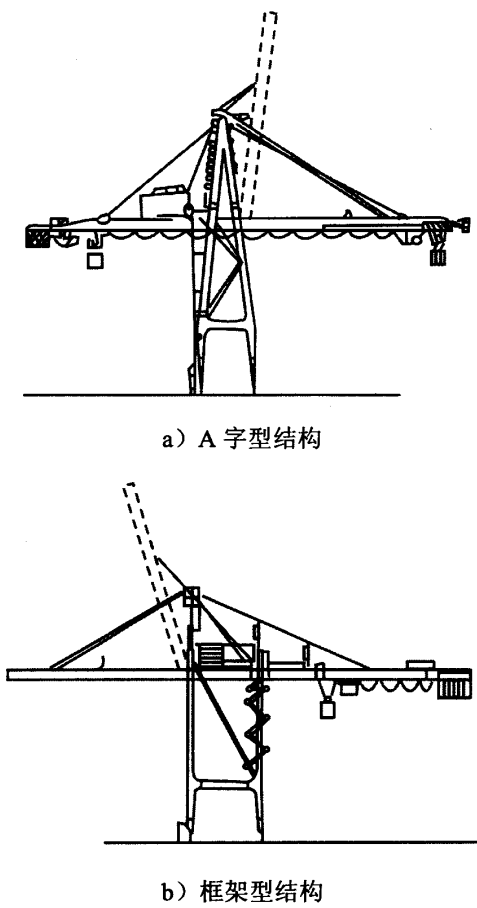


图 2.2 岸桥外形结构图

Fig.2.2 Outside structure chart of quay crane

起升机构是所有起重机必不可少的部分，也是起重机的基础，也是任何起重机都有的内容，能够直接影响起重机的工作情况，其主要作用是完成货物的起落作业；在小车上配备了集装箱专用吊具，小车能够沿着桥架轨道前后运动，以此

完成集装箱在空中的运输过程，配合起升机构实现装船或卸船作业；大车主要满足岸桥的整体移动，在码头前沿存在着大车移动轨道，大车按照固定的轨道完成换位、换舱及换泊位；而岸桥的俯仰机构，主要实现了外伸臂的俯仰来调控岸桥。

2.1.2 主要技术指标

通常情况下，描述集装箱岸桥的各项能力主要涉及其吊起能力、作业效率、以及服务规模等。这些指标从另一方面而言反映了港口装卸能力的大小，下文将主要论述主要的几项技术指标：

1. 起重量

起重量反映能吊起的集装箱重量的大小，可分为额定起重量和吊具重量两部分。即：

$$Q = Q_1 + W \quad (2.1)$$

其中， Q 表示岸桥的起重量，单位：吨； Q_1 表示额定起重量，单位：吨； W 表示吊具重量，单位：吨。

所谓额定起重量是指所吊起的集装箱的最大总重量，在国际标准 ISO/TC104 中规定的 IA、IAX、IAA 型 40ft 集装箱最大总重量为 30.5t，但存在一些特殊的情况，个别船公司 40ft 箱总重已达到了 32.5 吨。但在 20ft 的干货箱上变化更加明显，已有 1960 年前后的 20320 千克发展到现如今的 30480 千克。

同时，由于集装箱岸桥的吊具种类繁多，不同种类的吊具重量也不尽相同，因此岸桥的起重量也会存在着一定的差异。

2. 尺寸参数

在考虑岸桥尺寸时，通常也与其装卸的船型和箱型、码头情况及与堆场的作业相联系。

(1) 起升高度

岸桥起升高度取决于轨道面以上的高度和轨道面以下的高度。其起升高度的设定，通常考虑到港集装箱船的型深、吃水、甲板面上装载集装箱层数、港口的潮差情况、码头标高以及到港船舶可能发生的船体倾斜等。如需要装卸巴拿马型集装箱船，岸桥起升高度必须保证在高水位条件下，还能满足小车能通过三层集

装箱，并能完成四层的堆高。而在现在的市场上，对于大型超巴拿马集装箱船舶、甲板上可允许装箱6层甚至更多。在满载低水位时，能吊到舱底最下一层集装箱。从以往的制造的岸桥情况看，各国一般取轨道面上起升高度为25m，轨道面下起升高度为12m。

（2）外伸距与内伸距（亦可称为后伸距）

外伸距是指集装箱岸桥海侧轨道中心线向外至集装箱吊具铅垂中心线之间的最大水平距离，而内伸距则是相反方向，指中心线向内至吊具铅垂中心线之间的最大水平距离。外伸距主要与现在的船舶的型宽有关，随着船舶大型化的发展，对岸桥的要求也在提高，故而外伸距也有改善。内伸距则通常与集装箱的水平搬运机械有关。

（3）轨距（亦可称为跨距）

轨距是指起重机两条行走轨道中心线之间的水平距离。轨距的大小影响到岸桥的整机稳定性。轨距大有利于提高岸桥的稳定性和降低轮压，轨距宽有利于改善前沿的交通和作业环境，提高装卸船作业效率。但对于中小码头，尤其是老码头，不宜盲目采用大轨距，应经过技术经济分析比较后确定。

（4）净空高度和门框净宽

净空高度是指海陆侧门框联系横梁下面到轨顶面之间的垂直距离，而门框净宽反映了岸桥同轨左右门腿内侧之间的水平距离。前者取决于集装箱码头的工艺方案。不同的工艺有不同的要求，如跨运车系统，净空高度要高。门框净宽为了安全，为满足船舶舱盖板开盖及特殊集装箱能够顺利通过。

（5）岸桥总宽和基距

岸桥总宽指同轨岸桥两腿外防撞器端面之间的宽度，而基距是指门框下横梁上与左右大车行走机构大平衡梁支点之间的中心距离。两者存在一定的矛盾，为满足多台岸桥同时作业的要求，就岸桥总宽而言应该是越小越好，但岸桥总宽越小会使得基距也随之减少，从而导致侧向稳定性变差。因此，需要根据码头的实际情况选择合适的规模使其尽可能满足码头的实际作业需求的同时保证安全。

3. 工作速度

在分析岸桥的工作速度时，主要考虑起升速度、小车的行走速度、大车的行走速度和臂架俯仰时间。以下将从这几个方面分析：

(1) 起升速度

在考虑起升速度的时候，通常又可以将其划分为满载起升速度和空载起升速度，在实际中，空载速度能达到满载速度的一倍以上。

(2) 小车行走速度

在岸桥的整个工作中，小车行走时间约占 1/4，由此可以看出，提高小车行走速度有利于提高集装箱码头的生产效率。

(3) 大车行走速度

在集装箱码头前沿的作业过程中，当需要完成转位、转舱及转船时，需要移动大车，一般在调度过程中，会尽可能地降低大车的行走次数，而当作业完毕或遇大风天气均需将岸桥移动到固定位置。

(4) 臂架俯仰时间

臂架俯仰的时间并不属于工作时间，一般是装卸作业之前完成的，一般需要 4~6 分钟。

依据前文的介绍，将有关岸桥的主要技术参数及相应的参数单位如表 2.1 所示。

表 2.1 岸桥主要技术参数
Tab.2.1 The technical Parameter of quay crane

参数类别	参数名称	参数单位
起重量	额定起重量	t
	吊具重量	t
尺寸参数	起升高度	m
	外伸距	m
	内伸距	m
	轨距	m
	横梁下的净空高度	m
	基距	m
	门框的净空宽度	m
	岸桥总宽	m
工作速度	起升速度	m/min
	小车行走速度	m/min
	大车行走速度	m/min
	臂架俯仰时间	min

2.2 集装箱岸桥的使用状况及发展趋势

2.2.1 使用情况

岸桥作为一种设备，与其他任何设备一样，均有着一定的使用周期，同样会经历几个基本产品都会经历的阶段，通常将这些阶段叫做规划阶段、设计阶段、制造阶段、安装阶段和正常运行阶段，具体可见图 2.3。

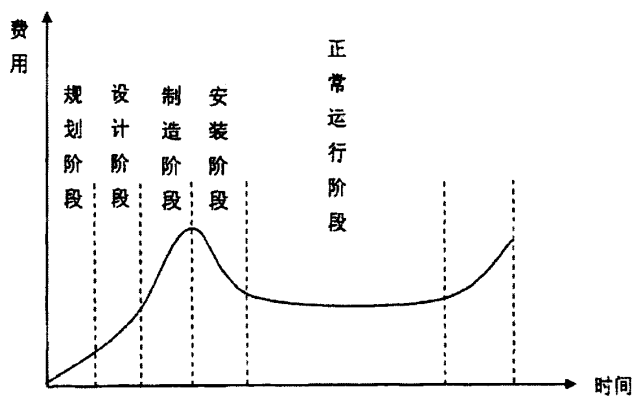


图 2.3 岸桥使用周期曲线

Fig2.3 The curve of quay crane usecycle

每种设备在使用过程中除了正常的工作运行以为，会由于部分其他原因造成的一些非正常时使用的状况，集装箱岸桥也不例外。在实际生产时，由于设备的经常使用，容易出现一些自然磨损的情况，这由于在使用过程中，部分零件发生了一些变形或磨损造成的。根据有关试验和统计数据，一般情况下设备是在设备一开始使用时磨损较快，到达一定时期后，磨损发生将持续一段时间内基本不发生什么变化，当设备使用时间达到很长一段时间后，设备的磨损又将加速，即已处于设备的老化期，这些过程的具体的变化情况可见图 2.4。

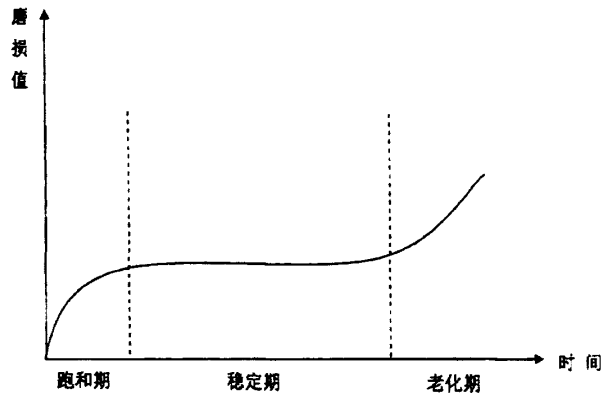


图 2.4 普通设备磨损量变化曲线

Fig.2.4 The curve of normal equipment abrasion

依据有关试验和统计情况，表明岸桥出现故障原因除了自身的物理特性外，还与其使用频率有关，有特殊的使用频率会造成其故障率有不一样的变化趋势，具有概率分布情况见图 2.5。

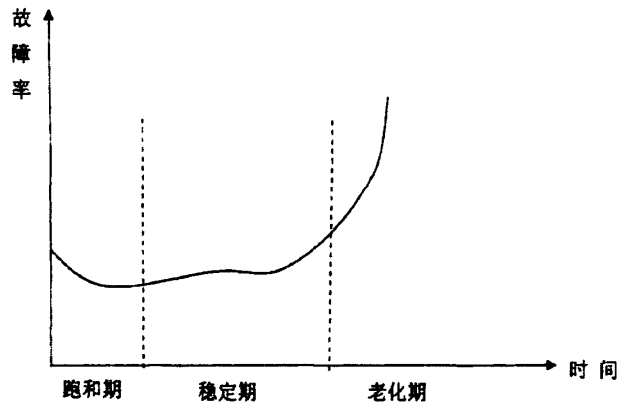


图 2.5 岸桥故障率分布曲线

Fig.2.5 The cure of malfunction rate of quay crane

20 世纪 90 年代，我国的许多沿海港口才开始建立有关的专业化集装箱码头，从以上的使用情况来看，目前，许多港口会存在着一些使用时间较长的岸桥设备，部分岸桥已处于上文论述中的非正常运行阶段，因此为了减少一些不必要的事故

的发生，港口方应该加强对岸桥的定期的检查、维修、这也势必会导致部分港口日常运作的成本的增加。

2.2.2 发展趋势

1. 集装箱船舶大型化

全球每年增加的订单总量中的4成以上主要集中在超过8000TEU的大型集装箱船舶订单中，因此，集装箱船舶正在经历着一种大型化趋势。在以载运集装箱能力为划分标准下的集装箱船型经历了以下的几个代次的发展：1957年之前被称为第一代集装箱船舶，通常情况下装载不到1000TEU；1957~1968年间，集装箱船舶的载运能力得到不断提升，一艘船舶运输的集装箱量可达1000~2499TEU之间，此阶段被称为第二代集装箱船；1968~1972年间的第三代集装箱船型载运能力在2500~3499TEU间；1972~1988年间的第四代集装箱船型载箱量在3500~4799TUE间；1988~1995年间出现的第五代集装箱船型载箱量为4800~6600TEU；1997年之后出现的第六代集装箱船型载箱量超过了6600TEU^[56-58]。据此，可以发现集装箱船舶大型化趋势在加快，船型更新换代的速度在增快，其中，集装箱船舶从第三代到第四代的发展大约经历16年，从第四代发展到第五代只历时7年，甚至从第五代集装箱船型的出现发展到第六代船型使用，期间仅仅经历2年时间。直到现在，集装箱船舶并未停下大型化的脚步，更大型的船舶仍在不断出现，尤其是单船载箱量超过10000 TEU甚至18000 TEU的马六甲型集装箱船也已出现。研究表明，在计算单位TEU的成本花费时，相比于4000TEU船舶，6000TEU的超巴拿马船将近节省25%的船舶燃油费用、30%的船员工资、10%的港口及航道使用费、以及接近30%的维修及保养费。特别的，当6000TEU容量的集装箱船舶载运4700 TEU的箱量时（75%位利用率），其单个集装箱的营运成本就与4000TEU容量的集装箱船舶基本相当了^[59-61]。即使大型集装箱船舶的装载率可能达不到百分百，但是也存在着可观的规模经济效益，主要是由于其运行成本相对来说低于中小型船舶。综上，船舶大型化发展趋势很早之前就已开始出现，而且在未来很长一段时间将持续下去。尤其是处在科技如此迅猛发展的如今，超大型化的集装箱船舶的出现指日可待。

2. 设备大型化

随着集装箱运输的高速增长，集装箱船成为了近几十年来发展最快的船型之一。目前，集装箱船型已开始了新的历史阶段，进入万箱船甚至 2 万箱船时代，集装箱船舶以代际作为区分已成为历史。在船舶载箱量上，具有代表意义的时间节点是：1996 年，马士基“Regina”号问世，将集装箱船从 5000TEU 提升到 7000TEU；2006 年，9500TEU “中远宁波”号下水；2007 年，中国海运集团与韩国三星重工签订 8 艘 13300TEU 集装箱船建造合同；2013 年 7 月，马士基集团在韩国船企订造的 18000TEU 集装箱船首航（载箱量变化见图 2.6）。

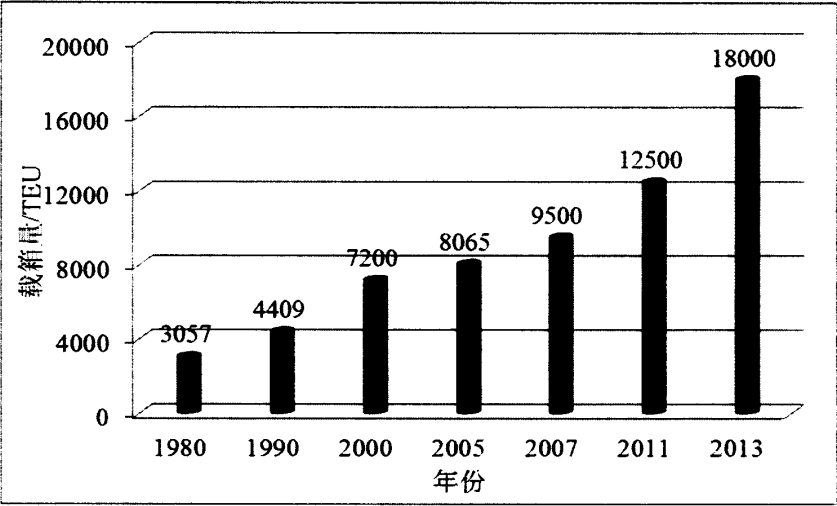


图 2.6 集装箱船舶载箱量变化趋势

Fig.2.6 The change trend of container ships' capacity

而作为专业集装箱码头的主要装卸设备，集装箱岸桥在集装箱运输船舶大型化的驱动下也在不停地更新、换代，以适应更大的集装箱船舶的装卸作业，同时，技术的不断提高，使得岸桥的科技含量越来越高，设备更加自动化和智能化，可靠性更高、使用寿命更长、能耗量更低、更趋于环保、绿色化。

据前文 3.1 介绍的岸桥的主要技术参数发生着重要的变化（如表 2.2）。如岸桥外伸距已由最初的 28m 增加到现在的 70m 以上，已可满足集装箱船横向布置 23 列集装箱装卸的要求。吊具可以实现同时起吊 3 个 40ft 箱或 6 个 20ft 箱。由于这

样的岸桥需要同时占用 3 个集拖通道，因而需要安排基座更大跨度（如 35m 以上）的岸桥才能发挥效率。

由于岸桥的吊具种类繁多，吊具自重大小不一，目前世界各港所配岸桥的起重量也各不相同，大部分岸桥的起重量为 30.5t 和 40.5t。为了适应超重箱和多箱装卸，目前有的已提高到 70t，这一起重能力，对于岸桥的结构和稳定性是一个极大的考验，对码头的基础设计，尤其是对高桩码头的承载能力有着较大影响，因而不宜再追求更大的起重能力。

表 2.2 各代岸桥的主要技术参数

Tab.2.2 The technical Parameter of quay crane in different generations

划分 等级	服务船型 (TEU)	起重能力 (t)	起升速度 (m/min)	小车速度 (m/min)	起吊高度 (m)	外伸距 (m)	装卸效率 (TEU/h)
第一代	600	25.0	22	120	22	28	20
第二代	1500	30.5	25	150	25	35	25
第三代	3500	30.5~40.5	30	180	30	38	30
第四代	4850	40.5~50	35	210	35	38	30
第五代	7400	50~60	40	240	40	52~61	60
第六代	8400	60~70	45	300	45	65~73	80~100
以上	以上						

显然，随着岸桥的高效化及多个岸桥对单船同时作业面数的提高，集装箱装卸的船时效率也显著增加。为节省投资，并不需在泊位全部都配备最高效的设备，而是采取不同种尺度岸桥搭配配备，典型的案例是香港的集装箱码头，配备有不同尺度组合的岸桥（见图 2.7）。

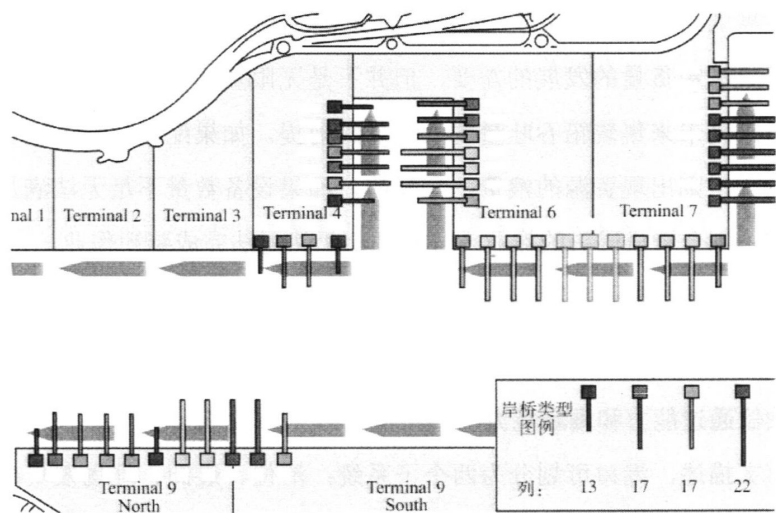


图 2.7 香港集装箱码头示意图

Fig.2.7 The sketch map of container terminal in Hong Kong

3. 运行高速化

岸桥的运行速度的提高，主要是与起升速度的改善、小车行驶速度的提高，双箱吊具的使用以及双小车双箱吊具的使用，甚至已出现一次起吊 6TEU 的集装箱的吊具。

2.3 岸桥配置的主要因素

2.3.1 技术角度

任何港口的岸线资源都是有限的，这也就意味着在一定岸线上配备的集装箱岸桥数量是有一定的数量限制，这也由其他因素所控制的，如集装箱船舶的靠泊要求，相邻集装箱靠泊时候的安全作业的要求等等，因此在考虑岸桥配备的时候必须要考虑技术的可行性，可以说技术可行性是能够配置的重要因素，如果技术不可行，那么无法配置装卸设备。

2.3.2 港口通过的集装箱吞吐量情况

集装箱岸桥的作用是为了满足装卸集装箱的需要，岸桥是以服务为目标的，这说明港口吞吐量的集装箱量的大小，直接能影响需要配备的岸桥数量。为了满

足未来发展的需求，通常情况下，港口在设计时都将有一些装卸能力的富裕，以满足为了集装箱货量发展的需要，但并不是无限量的多配，而是在一定的条件下，即考虑到未来集装箱吞吐量的增长量的前提。如果配备的设备远大于吞吐量发展的需求，则出现资源的浪费；相反的，如果设备数量不足无法满足吞吐量发展的需求，则会造成码头的作业十分繁忙却仍然无法完成装卸作业。

因此，这要求在码头规划的过程中，必须要以码头未来集装箱吞吐量为依据，做一个科学的判断和预测，故而合理的配备岸桥的数量。

2.3.3 泊位通过能力和堆场能力

据前文描述，港口可划分为四个子系统：泊位、装卸、堆场及集疏运系统，四个子系统中应该配套。

对于一个码头而言，泊位的岸线资源相当紧缺，这也就意味着一旦码头建成，泊位的通过能力基本已经确定，因此需要配备的岸桥数量应该与泊位的通过能力相一致，否则超出部分就造成了资源的浪费现象，堆场的情况同样如此，需要预先进行科学有效的预判。

2.3.4 设备间的匹配性

码头的装卸系统是一个整体，应该以系统的角度去看待该工艺系统中的任何设备，因为设备间相互影响，相互制约，从而共同构成了一个有机的整体，必须要让所有的设备都有有效的发挥其作用，才能更好地发挥码头的装卸系统的功能。

第 3 章 集装箱码头装卸作业调度优化模型

3.1 建模的基本思路

根据前文分析，集装箱在船舶内是按照贝位、列位和层位三维空间堆放的，船舶的装卸任务顺序的安排主要依靠于集装箱的配载图，集装箱在船舶内是按照贝位、列位和层位三维空间堆放的（如图 3.1 所示）。通常情况下，对于同一贝位、列位的不同层位的箱子，要先卸上方的箱子，先装下方的箱子，否则容易出现捣箱的情况，捣箱既影响工作效率还不利于安全因素。而考虑到相邻的贝位、列位通常情况下一起作业的情况，将相邻的列为同一项任务进行装卸作业。

本文研究的岸桥调度主要针对于一条船舶的不同装卸任务项之间的岸桥的调度优化问题。其目的在于确定不同任务之间的装卸顺序，从而使得各作业任务所花费的时间最短，从而降低船舶的在港停留时间，提高码头的工作效率。

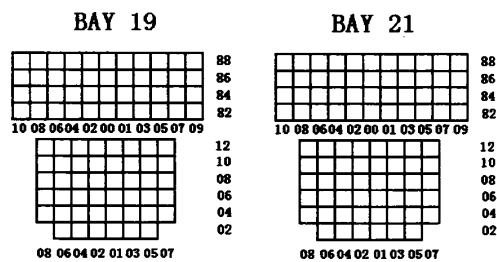


图 3.1 贝位图

Fig.3.1 Bay

3.2 目标函数及约束条件

3.2.1 模型假设和参数

(1) 模型假设

本文侧重研究的是在一条船舶下，多岸桥共同完成装卸任务的岸桥调度优化问题。根据岸桥的工作特点，为了方便建立相关的数学模型，现提出以下的假设条件：

- ①由于岸桥作业的特点，岸桥之间不发生交叉装卸的情况；

②具有相同贝位区的作业任务必须满足先卸船再装船的作业顺序，如果有甲板货，在卸船过程中，先完成甲板货的卸船过程，再进行舱内货的作业，在装船过程中，先完成舱内的作业，再进行甲板货的作业；

③有些任务不能同时进行，某些贝位在一些特定的情况下，只能停靠一台岸桥，因此这个贝位的任务不能同时被操作，与此同时，相邻岸桥间必须保持一定的安全距离（通常情况下为一个贝位）；

④所有到港船舶的装卸作业的任务都是已知的，并且对于船方所提供的作业任务在不考虑外界干扰的情况下已确定岸桥的数量；

⑤单台岸桥在装卸任务时，只能完成装船或者卸船，不考虑装卸同时进行的情况；

⑥岸桥在进行某项任务的装卸作业时，只有当完成了该项任务的装卸才能进行下一项任务的作业；

⑦不考虑岸桥在不同作业区的移动时间。

（2）模型参数

根据假设条件，为更好地表达模型的特点，建立有关的数学表达式，故相关参数和变量定义如下：

①参数

i, j 表示某一条船舶的装卸任务的编号；

Ω 表示某一条船舶的装卸任务集合；

Q 表示为该船舶配备的岸桥数量；

q 表示岸桥编号；

B_i 表示第 i 项任务的贝位；

$B_i^{(1)}$ 表示第 i 项任务为在贝位上的装船任务；

$B_i^{(0)}$ 表示第 i 项任务在贝位上的卸船任务；

H_i 表示第 i 项任务的层位；

s_i 表示第 i 项任务的开始时间；

d_i 表示第 i 项任务的结束时间；

l_i 表示第 i 项任务的位置;

$L_q^{(t)}$ 表示 t 时刻岸桥 q 所处的位置;

②决策变量

T 表示船舶的装卸任务总作业时间;

$f_q(t)$ 表示第 q 台岸桥的作业时间;

$Z_{ij}^{(q)}$ 为 0-1 变量, 表示第 q 台岸桥完成任务 i 之后紧接着完成任务 j , 则有 $Z_{ij}^{(q)} = 1$, 否则 $Z_{ij}^{(q)} = 0$;

3.2.2 目标函数

根据以上分析, 第 q ($q < Q$) 台岸桥完成作业的时间可表示为

$$f_q(t) = \sum_i^{\Omega} \sum_j^{\Omega} Z_{ij}^{(q)} * (d_j - s_i) \quad (3.1)$$

只有当分配给船舶的所有岸桥均完成装卸任务时, 船舶才能正常离港, 故而船舶完成装卸任务的时间表达如下:

$$T = \max_{q \leq Q} \{f_q(t)\} \quad (3.2)$$

为使船舶能够尽快的离港, 故本文追求的目标是船舶在一定岸桥数量的情况的合理安排岸桥的装卸顺序, 使得船舶的装卸时间最短, 即

$$g(t) = \min T \quad (3.3)$$

3.2.3 约束条件

$$f_q(t) \leq T \quad (3.4)$$

$$\sum_q \sum_{i \in \Omega} Z_{ij}^{(q)} = 1, \forall j \in \Omega \quad (3.5)$$

$$\sum_j Z_{ij}^{(q)} - \sum_j Z_{ji}^{(q)} = 0, \forall j \in \Omega, q \in Q \quad (3.6)$$

$$s_i \geq d_j, \text{ if } B_i^{(1)} = B_j^{(1)}, H_i > H_j \quad (3.7)$$

$$s_i \geq d_j, \text{ if } B_i^{(0)} = B_j^{(0)}, H_i < H_j \quad (3.8)$$

$$s_i \geq d_j, \text{ if } B_i^{(1)} = B_j^{(0)} \quad (3.9)$$

$$L_q^{(i)} < L_{q'}^{(i)}, q, q' \in \Omega \quad (3.10)$$

$$Z_{ij}^{(q)} \in \{0,1\} \quad (3.11)$$

其中，约束条件（3.4）保证了各个岸桥的作业时间不会超过整条船舶装卸作业的总时间；约束条件（3.5）表示每一项任务只能由一台岸桥进行装卸作业；约束条件（3.6）是为了保证每项任务都能被安排进入装卸中；约束条件（3.7）表示在装船过程同一贝位的任务下，舱内优先于甲板；约束条件（3.8）表示在卸船过程同一贝位的任务下，甲板优先于舱内；约束条件（3.9）表示在同一贝位任务下，卸船优先于装船；约束（3.10）保证了岸桥之间不会出现交叉作业的情况；约束条件（3.11）为对 0-1 变量的约束。

第4章 集装箱码头作业优化模型的求解

4.1 遗传算法

4.1.1 基本概念和特点

遗传算法(Genetic Algorithms)是由生物遗传学理论和遗传学说相结合发展起来的一种随机全局搜索的智能优化算法,通过种群内个体之间进行交叉和变异操作从而产生新的个体,来实现种群进化的目标。每一次种群的进化过程,与之相对应的是解的一次迭代过程,从而最终求得可行解,该算法中的个体、染色体、基因、种群、适应度、选择、交叉、变异等概念都是模仿自遗传学^[73]。遗传算法全局优化搜索能力比较强、运输过程中收敛速度快、运算过程简单、鲁棒性强,这些优点让它在选址问题、车辆路径问题、组合优化问题、网络设计问题等领域被广泛应用。

与传统的搜索式优化算法不同,遗传算法是将某种规则作用于问题的初始解集,使之不断的进化,进而生成新的解,然后对这些解进行优胜劣汰。无论解的规模扩大到多少,它都能够以有限的迭代次数解决搜索和优化过程。遗传算法的主要特点表现为以下五个方面^[74]:

(1) 智能性。在确定了解的编码形式、适应度评价函数以及交叉、变异算子后,首先遗传算法能在进化过程中获得一定的信息,然后在这些信息的基础上进一步组织搜索,它拥有很强的自适应能力,能够解决复杂的非结构化问题。

(2) 独立性。遗传算法的运算搜索过程是相对独立的,它不受限于其他规则,只需要根据适应度函数来判断搜索的方向。

(3) 能够进行全局搜索。遗传算法是一种全局性搜索方法,从群体的角度出发,快速搜索可行解,同时它具有潜在的并行性,可以对多个区域的信息进行搜索。

(4) 遗传算法的转换规则是不确定的,它以一定的概率进行转换。

(5) 遗传算法的效率,能够较快地收敛出优化的结果。

4.1.2 主要运算过程

遗传算法是一个淘汰和选择的过程，优胜劣汰，最终得到最优解，其主要运算过程如下。

(1) 编码。编码就是要选择适当的形式把需要解决问题的参数转换为遗传算法中的染色体，染色体是基因值按照一定结构有序排列组成的。常用的编码方法有二进制编码、自然数编码和格雷码编码。同时，编码方式也决定了将染色体从基因型转换为可行解的解码方法，解码与编码是相反的操作过程。

(2) 初始种群的生成。通常用 N 表示种群大小，随机产生 N 个初始解，这 N 个个体构成了一个初始群体。之后进行迭代、搜索和寻优的过程是以这 N 个个体作为初始种群。

(3) 适应度值评价。适应度函数是用来评价种群中的每个个体所对应的解优劣程度的。定义适应度函数的方式是要根据所需要解决的问题类型来确定的，通常情况下，采用模型的目标函数或是对目标函数进行变形之后的新函数作为适应度函数。

(4) 选择。选择是按照一定的选择方式从当前种群中选出适应性较强的个体，使其有机会作为父代参与遗传过程，将其基因遗传到下一代群体之中。个体被选中的概率是以种群中各个个体的适应度函数值作为依据的。

(5) 交叉。交叉操作实质上就是模仿自然界的繁殖过程，是遗传算法中最主要的操作。交叉操作是将种群内的父辈以某个概率交换它们之间的部分基因值，从而得到新一代的个体。

(6) 变异。变异操作可以对种群的多样性起到一定作用，首先在种群中随机选择一个个体，并以一定的变异概率对选中个体进行变异操作，即改变其某个基因位置上的基因值。与自然界相类似，在遗传算法运算过程中个体发生变异的概率并不大。群体 $P(t)$ 经过选择、交叉、变异操作后得到新的下一代种群 $P(t+1)$ 。

(7) 运算终止判断：若 $t \leq T$ ，则 $t \rightarrow t+1$ ，转回步骤(2)继续循环；若 $t > T$ ，则终止运算，以进化过程中所得到的具有最大适应度的个体作为最优解输出。

4.1.3 遗传算法的关键要素

随着对遗传算法的深入研究，为了解决各种各样的问题，出现了各种各样改进的遗传算法，但是这些改进的遗传算法都是从标准的遗传算法改进得到的。

标准遗传算法的数学模型如下所示：

$$GA = (C, E, P_0, N, \phi, \Gamma, \Psi, T)$$

其中， C ——个体编码方法；

E ——个体的适应度函数；

P_0 ——初始种群（初始可行解）；

N ——种群的大小；

ϕ ——选择算子；

Γ ——交叉算子；

Ψ ——变异算子；

T ——算法终止条件。

4.2 算法设计

4.2.1 总体框架

根据前文分析，本文的集装箱码头装卸作业调度优化问题，实际上需要解决两个方面的问题：（1）作业分配，在既定的岸桥的情况下，有效地将各装卸作业任务分配给指定的岸桥；（2）任务顺序的制定，对于某一岸桥，在既定的作业的情况下，合理安排装卸作业的顺序。

本文所建立的岸桥作业调度优化是一个混合整数规划模型，属于 NP-hard 问题，而且任务数量越多，求解越困难，遗传算法是一种通用的求解优化问题的算法，能够较好地求解各类型的优化问题，因此本文采用遗传算法来进行求解，具体的算法步骤如下：

Step1: 根据问题的特点，采用合适的编码方式，对问题的可行解编码，并设定必要的参数，根据规定的种群数量，生成初始种群；

Step2: 利用前文的设计的目标函数制定相应的适应度函数，并对每个个体的适应度函数进行求解；

Step3: 对种群采取选择、交叉、变异操作；

Step4: 对生成的新子代进行判断, 若满足终止条件, 则进入 Step5; 否则返回 Step2;

Step5: 从种群中选择最优的个体, 输出其染色体的情况, 并进行解码过程, 获得所求问题的最优方案。

具体的算法流程如图 4.1。

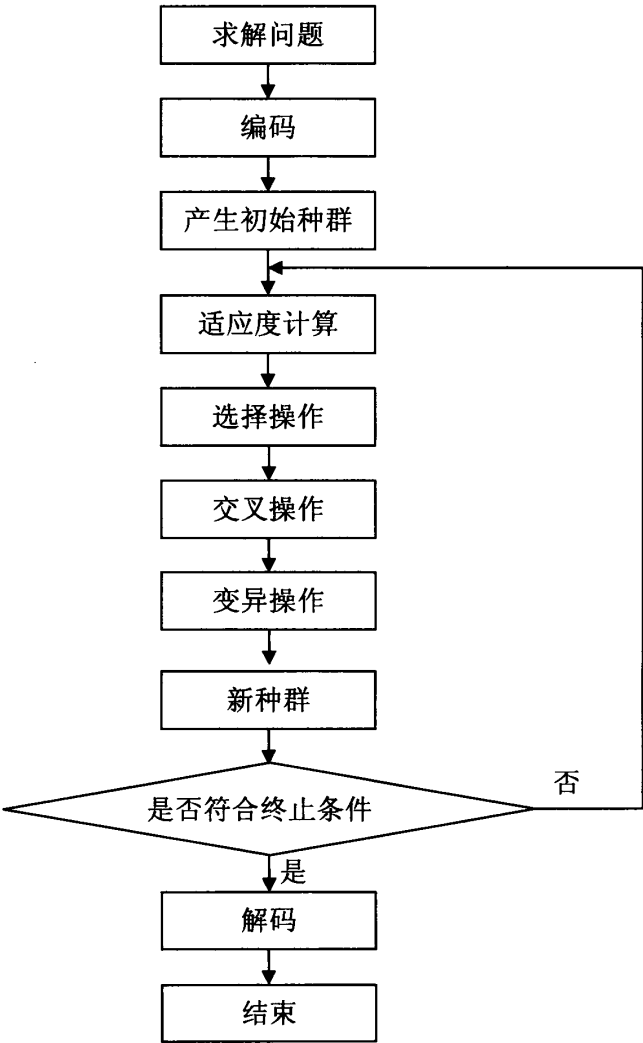


图 4.1 遗传算法运算流程
Fig.4.1 Process of genetic algorithm

4.2.2 算法设计过程

针对前文遗传算法有关的基础理论及所建的模型，根据装卸作业优化问题的具体特点，本节对算法在具体过程中的过程进行描述，具体方案如下：

(1) 染色体的编码与解码

①编码过程

在应用遗传算法时，首先需要考虑的问题是编码问题，即选择适当的表达解的形式来构成解决实际问题的基础。随着遗传算法的广泛应用，人们已经提出了包括二进制编码、实数编码、整数或字母排列编码等不同形式的编码方式。其中，二进制编码是最常用、最原始的编码方式，它由二进制符号 0 和 1 组成，具有编码、解码操作简单，易于进行选择、交叉和变异操作等优点。但在处理次序问题时，会频繁生出大量的无效解，导致其算法效率低下。实数编码能够贴切的展现出车辆路径优化过程中车次问题，其可行解可以直接用染色体表现出来，因此本文选择十进制法编码作为编码方式，每一条染色体即为一个优化问题的可行解。

假设某一靠泊的船舶配备的岸桥有 q 台，需要在该港口完成装卸作业服务的任务量为 n ，用 0 做不同岸桥之间的分隔符，则形成一个长度为 $q+n-1$ 的染色体编码串，0 前后的数字串即表示不同岸桥的作业任务的顺序。则对于 2 台岸桥 9 个需求点的染色体编码串可表示为如图 4.2 所示。

染色体	8	2	9	6	5	0	1	4	7	3
装卸桥	1	1	1	1	1	0	2	2	2	2
作业顺序	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4

图 4.2 染色体
Fig4.2chromosome

可以解释为：岸桥 1[#]所分配的装卸任务编号分别为 2、5、6、8、9，岸桥 2[#]所分配的装卸任务编号分别为 1、3、4、7；岸桥 1[#]的作业顺序为 8→2→9→6→5，

岸桥 2[#]的作业顺序为 1→4→7→3。这种编码方式岸桥的数量是固定的，同时 0 作为区分不同岸桥之间任务的分隔符，直观易懂，但是在以后的交叉阶段会产生大量无效解。

②解码过程

解码过程是将编写计算机语言转换为问题目标解得过程，首先记录所有分隔符 0 所在的位置，选择各岸桥的作业任务，计算某一岸桥的作业时间，比较所有岸桥的作业时间，选择时间最长的时间作为该船舶的作业时间即可。

(2) 初始群体设置

在遗传算法的群体规模设置时，需要考虑到其执行过程的计算效率。当群体规模太小时，其选择数量不够多，优化性能一般不会太好。而当群体规模太大时，计算规模非常大，其优化过程所耗时间会非常长，且较容易局部收敛。对于染色体长度不大的可行解而言，种群数量大小取 20~200 较为合适。

(3) 适应度评价

遗传算法中，适应度是衡量种群中个体质量优劣的标准和进行遗传操作的依据。如果一个个体的适应度越大，则说明该个体越优越，被选择遗传到下一代的概率越大，而适应度函数在任何情况下都是大于或等于 0 的，具有非负性，并且其取值越大越好。而对于模型的目标函数来说，其值可能是正的也可能是负的，并且有时求最大值，有时取最小值，所以适应度与目标函数之间要进行适当的转换处理。

本文所研究的岸桥作业优化问题其目标是作业时间最短，即目标函数值越小越好，因此本文定义适应度函数为：

$$f_i = G - g_i \quad (4.1)$$

其中， f_i 表示种群中第 i 条染色体对应的适应度； g_i 表示种群中第 i 条染色体所对应的目标函数值，反映了第 i 条染色体所对应的问题作业时间； G 表示常数。当染色体对应的目标函数值越小时，其适应度越大。

(4) 选择操作算子

选择操作在遗传算法中是对染色体中的基因片段进行复制，并产生新的染色体的过程。一般的选择算子使用轮盘赌法算子，该算子具有简单易操作的特点。轮盘赌法是一种基于比例的选择，它利用每个染色体的适应度评价价值来决定其染色体中各个基因段保留的可能性，是一种具有回放式特点的随机采样方法。其核心原理为：个体被选中进入下一代的概率与其相对适应度值成正比，个体的适应度函数值越高，其被选中的概率越大。

选择操作是从原来的群体中以一定概率选择优良个体组成父代群体，以繁殖得到下一代个体。适应度值大的父代个体被选中的概率大。遗传算法选择操作通常有轮盘赌法、锦标赛法等多种方法，一般采用的是轮盘赌法，即根据适应度的值得比例来选择个体，个体 i 被选中的概率如 4.3 所示。

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad (4.2)$$

其中， f_i 为个体 i 的适应度值； N 为种群个体数目。根据选择概率的大小将一个圆盘分为 n 个扇形，每个扇形的中心角大小为 $2\pi p_i$ 。

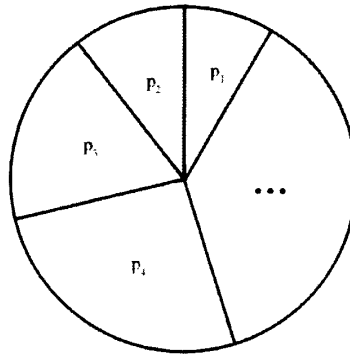


图 4.3 轮盘式选择

Fig.4.3 Roulette selection

每次进行选择时，圆盘随机转动一个角度，若停留在扇形 i 内，就选择个体 i 。这种方式类似于轮盘赌博。扇形的面积越大，被选中的概率也就越高。即适应度大的个体被选择的概率越大，遗传给下一代的可能性就越高。概率小的个体虽然

也会被选择，但是经过多次选择后，它在种群的数量会越来越少，这就体现了“优胜劣汰，适者生存”的原则。

（5）交叉操作算子

交叉算子是遗传算法中的一个比较重要的部分，是新染色体形成的主要操作，为选择算子提供了新的个体来源。一般的遗传算法中采用单点或者多点交叉来产生新个体，考虑到本文所研究问题的排序性，若使用单点或者多点交叉会在染色体中产生重复的基因片段，使该染色体直接被淘汰，故而在本文的交叉中，采用部分匹配交叉（PMX），即先随机产生两个位串交叉点，将其定义为两个染色体的匹配区间，再使用位置交换的方式来进行两个染色体的交叉操作。

由前文的编码方式可知，本文在编码过程中采用了实数编码，采用类 PMX 方法更为合适。与传统的交叉算子不同，该方法不是采取直接交换染色体的交叉段的方式，而是把两个交叉点之间的基因序列插入对方染色体的第一个基因之前，然后将交叉段基因与原染色体基因相比较，再依次去除交叉段基因中相同的基因，从而得到交叉后的新个体。为了更好地表达描述，在交叉之前提前记录要交叉父代的分隔符位置，具体如下（如图 4.4）：①随机选择父代，记录父代中分割符的位置，删除父代的分隔符；②在父代中产生两个交叉位，确定需要进行交叉操作的区域，图中选择的是第 2 位和第 7 位表示交叉点；③将父代中各自的交叉区域插入对方染色体前，得到两个中间个体；④在两个中间个体中，依次删除原染色体中与交叉区域相同的基因，得到两个新的个体即可；⑤将原记录的分隔符的位置重新插回染色体中，完成交叉操作。

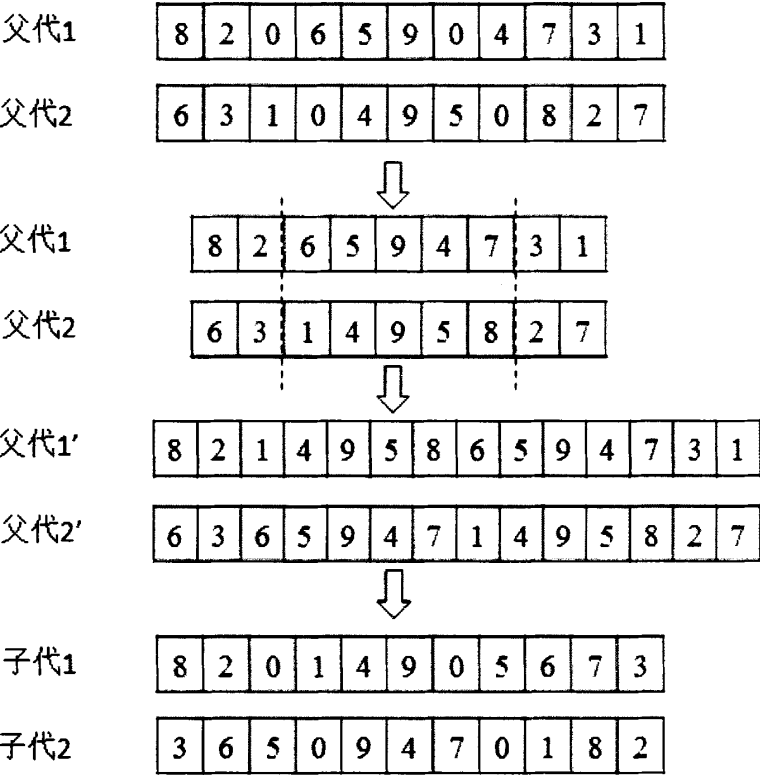


图 4.4 交叉操作

Fig.4.4 Crossover operation

(6) 变异操作算子

遗传算法中的变异操作是模仿自然界中基因突变的现象，这种变异是按照一定概率发生的，它起到辅助进化的作用。为了满足本文问题的特殊性，变异通常可能发生以下几种可能：①同一岸桥内的任务之间的互换（如图 4.5a），该变异只是影响了某一岸桥的作业顺序，不影响作业分配；②不同岸桥间的任务之间的互换（如图 4.5b），该变异对于岸桥的作业分配和作业顺序都有一定的影响；③两个被选择的基因位置分别为任务编号和分隔符的位置（如图 4.5c），该变异能使解的形式得到不一样的改变；④两个被选择的基因位置均为分隔符的位置，这对结果没有任何影响，相当于无变产生，故本文中不考虑最后一种变异的可能性。

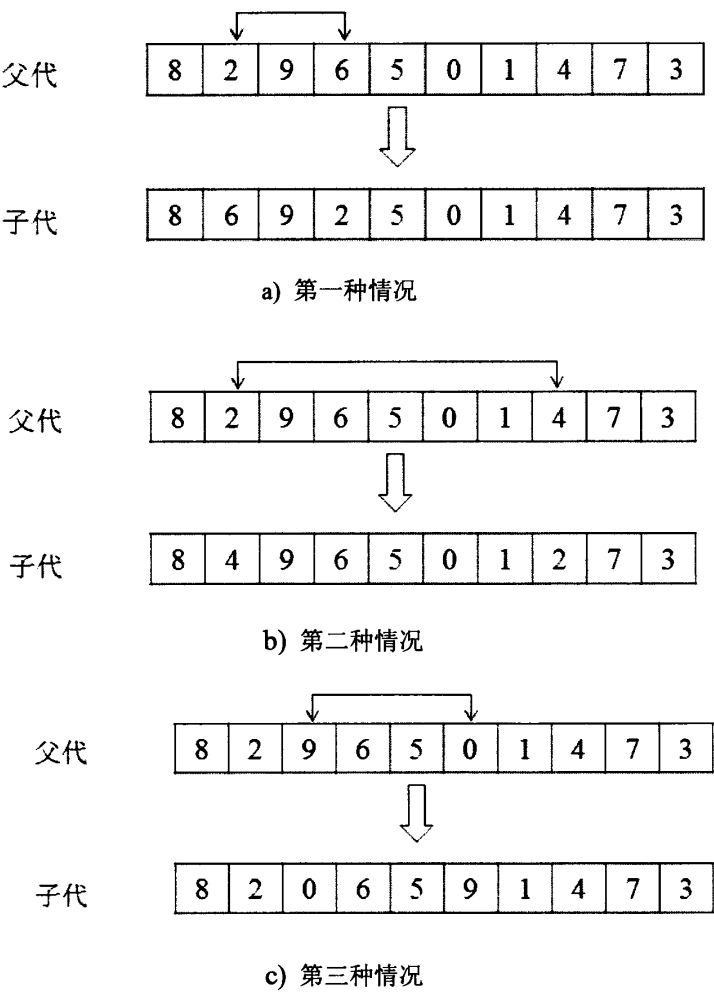


图 4.5 变异操作

Fig.4.5 mutation operation

(7) 终止进化规则

由于遗传算法是一种随机搜索算法，必须事先设定终止规则才能结束其演化循环。本文采用预先设定进化代数作为终止规则，因为该终止规则可以有效控制算法运行时间和求解精度。即如果进化代数达到要求的代数，则停止进化，从中选择性能最好的染色体所代表的配送路径的集合作为最优解输出；反之，则继续执行进化运算。

第 5 章 大连港集装箱码头算例分析

为验证本文所建模型和所设计的算法的有效性，利用大连港集装箱码头的情况作为案例分析的背景进行仿真实验。

5.1 大连港集装箱码头背景

大连港处于东北亚经济地区，位于我国辽宁省辽东半岛，是我国东北地区最大的港口码头，港口码头的自然条件良好，具有冬季不冻的优势，能靠泊万吨级船舶。

（1）大连港概况

大连港的港口自由水域 346 平方千米，陆地面积超过 10 平方千米；现有港内铁路专用线 150 多千米、仓库 30 多万平方米、货物堆场 180 万平方米；大连港拥有各类货种的专业泊位 80 个多，其中包括了集装箱、原油、成品油、粮食等等。

近年来，随着辽宁省内其他港口的不断崛起，大连港也承受着巨大的挑战，表 5.1 统计了辽宁各主要港口自 2000 年来吞吐量及所占份额的变化。由表中可以看出，尽管大连港吞吐量的绝对值依然领先，货物吞吐量也一直保持增长，但在辽宁口岸中的市场份额却持续下降。由于大连和营口两港的强势，锦州港和丹东港显然受到压制，吞吐量上升趋势缓慢。

（2）集装箱码头

大连港是中国东北最重要的集装箱枢纽港，拥有国际国内集装箱航线 74 条，航班密度为 300 多班/月，东北三省 90% 以上的外贸集装箱均在大连港转运。

大连港集装箱码头主要由三家公司经营，分别为外贸集装箱码头公司（Dalian Container Terminal，简称 DCT）、大连港湾集装箱码头有限公司（DPCM）、大连大港中海集装箱码头有限公司（DDCT.CS）。DCT 码头是与新加坡港务集团合作的，且连续多年被国内外港航权威机构评为中国作业效率最佳集装箱码头、亚洲最佳集装箱码头以及亚洲新崛起集装箱码头。在 DCT 码头成功的基础上，新加坡港务集团并联合多家公司又继续组建了 DPCM。泊位情况方面，目前，DCT 和 DPCM 共有集装箱泊位 11 个，各泊位的水深情况主要在 9.8 米~16.0 米之间，通过

能力达到了 360 万 TEU/年，其中 10 万吨级泊位 4 个，DCT、DPCM 均可靠泊 10000TEU 船舶。在堆场状况方面，DCT 码头拥有堆场面积 60 万平米，可一次性堆存能力 6.6 万 TEU；DPCM 码头拥有堆场面积 25.5 万平米，一次性堆存能力 2.5 万 TEU。在码头作业效率方面，DCT 码头的最高单机效率可达到 88 TEU/h，最高单船效率可达到 294 TEU/h；而 DPCM 码头的最高单机效率可达到 67 TEU/h，最高单船效率可达到 154 TEU/h。

表 5.1 辽宁主要港口 2000-2013 年吞吐量及份额变化

Tab.5.1 The throughput and share changes of Liaoning's main ports from 2000 to 2013

年份	大连港		营口港		锦州港		丹东港	
	吞吐量/万 t	份额/%	吞吐量/万 t	份额/%	吞吐量/万 t	份额/%	吞吐量/万 t	份额/%
2000	9084	70.72	2268	17.66	1006	7.83	486	3.79
2001	10047	70.66	2520	17.72	1110	7.81	542	3.81
2002	10851	67.87	3127	19.56	1404	8.78	606	3.79
2003	12602	66.24	4009	21.07	1707	8.97	708	3.72
2004	14516	60.48	5978	24.91	2455	10.23	1053	4.39
2005	17085	58.65	7537	25.87	3003	10.31	1506	5.17
2006	20046	57.79	9477	27.32	3157	9.10	2006	5.78
2007	22286	54.87	12206	30.05	3515	8.65	2610	6.43
2008	24588	51.60	15085	31.65	4723	9.91	3259	6.84
2009	27203	49.99	17603	32.35	5259	9.66	4350	7.99
2010	31399	47.94	22579	34.47	6008	9.17	5513	8.42
2011	33691	44.92	26085	34.78	7582	10.11	7636	10.18
2012	37426	44.27	30107	35.61	7355	8.70	9656	11.42
2013	41206	43.44	33118	34.91	8519	8.98	12022	12.67

(3) 运营状况

大连港集装箱业务从 2001 年开始，一直处于快速增长的状态，2014 年集装箱吞吐量突破了 1000 万 TEU，但是 2015 年市场状况不好，造成了小幅的回落，其具体的情况如表 5.2 所示，其变化趋势如图 5.1。

表 5.2 2001 年-2015 年大连港集装箱吞吐量（单位：万 TEU）

Tab.5.2 The container throughput in Dalian port from 2001-2015

年份	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
集装箱吞吐量	101	122	135	167	222	270	321	381
年份	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
集装箱吞吐量	458	526	635	801	991	1001	930	

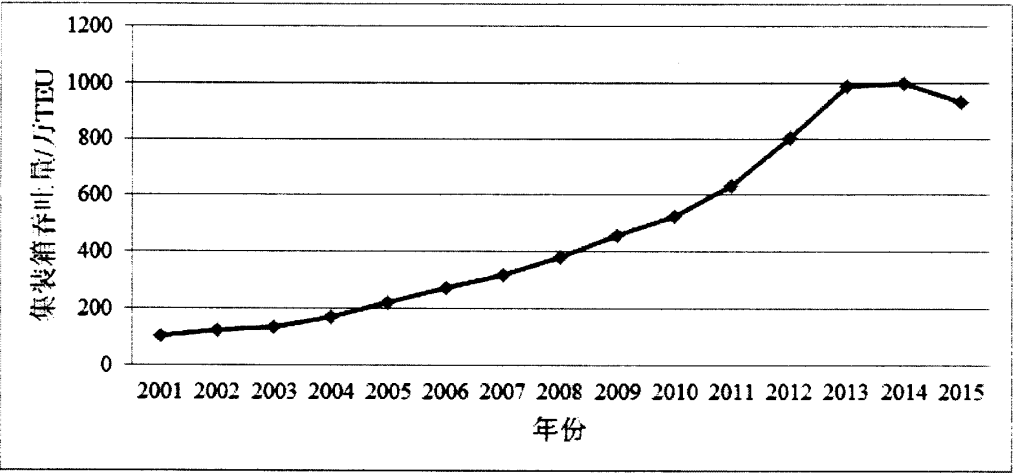


图 5.1 2001 年-2015 年大连港集装箱吞吐量变化趋势

Fig.5.1 The change trend of container throughput in Dalian port from 2001-2015

5.2 大连港集装箱岸桥的运行情况

集装箱岸桥作为集装箱在港口装卸、换装的主要设备，其运行的情况直接关系到港口的集装箱货物的流量，且装卸设备的运作还与到港船舶的分布规律密不可分。本节以大连港为例进行有关情况的分析。

5.2.1 年度使用频率

众所周知，航运市场是一个极易发生波动的市场，其波动情况直接受到国际贸易的影响，而国际贸易存在着一定的波动特性，因此对于集装箱岸桥的使用而言也会存在相应的波动。

根据大连港集装箱码头（Dalian container terminal，简称 DCT）的运行时间的统计，其使用状况如图 2.8 所示。从图中可以明显的看出，在拥有“圣诞节”的 12 月份是国际贸易交易较为频繁的月份，故而岸桥的使用频率也相对较高；相比，我国的春节基本集中于 1 月末和 2 月初，故而 2 月份的国际贸易一般处于整年的低谷时期，相对应的岸桥的使用频率也在这段时间内有所下降。了解每年的装卸设备的使用状况可以制定划每年装卸设备的维修计划等。

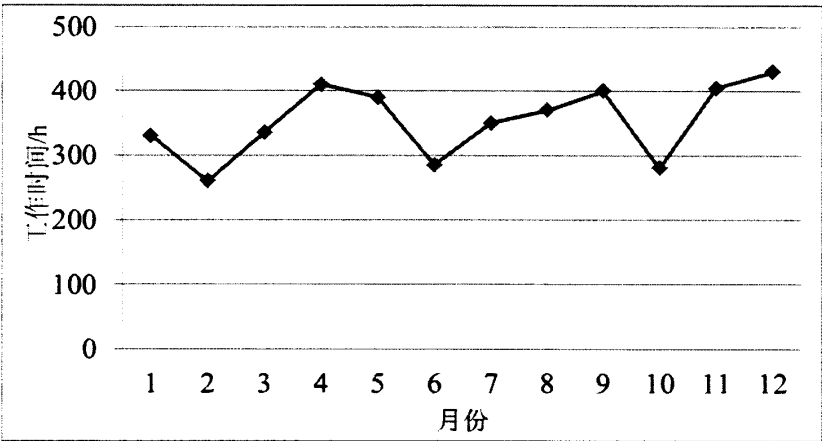


图 2.8 2007 年大连港集装箱码头岸桥使用情况

Fig.2.8 The use condition of quay crane in DCT in 2007

5. 2. 2 使用高峰分析

岸桥是专门为装卸集装箱所用的，故而其使用频率应与集装箱船到港规律有关。在海上运输中，集装箱船舶的运行规律是定期的班轮制特点，为了更好地符合航线的特点，航线经营人通常在周末尽可能地承揽市场货源。究其原因，因为对于国内大多数港口，到达各港的航线中，周末最多，其中直达航线在这段时间内的比例占据了近 8 成，一般时间到达的船舶数量相对较少。从前文分析，集装箱班轮航线运行的这一特点会造成岸桥的使用频率的变化，即在周末容易形成高峰。为探究该原因，本小节以大连港 DCT 码头 2007 年集装箱岸桥每周内的平均使用情况分析，周五、周六两日是岸桥的使用高峰期，而周二、三则是相对的低谷期（具体可如图 2.9）。

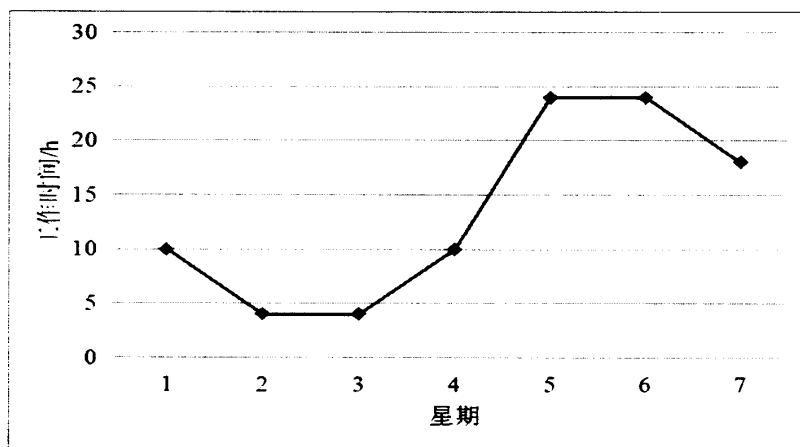


图 2.9 2007 年大连港集装箱码头岸桥每天的使用情况

Fig.2.9 The everyday using condition of quay crane in DCT

5.2.3 集装箱船舶到港规律

集装箱班轮运输,在实际运营中有着较为严格的要求,其运行方式类似于日常生活中的城市公交。当某条集装箱航线确定后,集装箱班轮就会沿着该航线原本设定的挂靠港以此靠泊各港口,并来回反复循环。但是,集装箱班轮所到达港口的时间虽然在理论是一定的,但是在实际的运营中由于某些因素,存在着一定的偏差,所有当出现早到或者晚到的情况下,班轮公司在该船舶的航行中进行调控,使其尽量在原计划的调度中完成运输任务。在整个集装箱运输网络中,由于货量的原因,有些航线只有一家班轮公司组织运营;在货源充足的航线上,多家班轮公司共同经营,但各班轮公司有着自己的航线计划和配船计划^[50-51]。通常为保证某一航线上的货物运输的需求,某些船公司会在部分航线上固定其发班的频率,而其数量与船舶的往返时间及需要的航班密度有关,将这样的船舶的总和称之为编组船队。编组船队之间的到达时间在理论上属于定值,但由于受到如台风、大雾等不可控因素的影响,船舶实际到港的时间会在该船期范围内变化。

对于大连港集装箱船舶到港规律情况,已有学者做了一系列研究^[52-54],指出集装箱船舶到港情况既有符合船期要求的确定型,又有由于受到某些因素影响的

随机型特点。利用爱尔朗分布函数^[55]描述上述的两种特性，在某种程度上较好的描述了集装箱船舶的实际运营状况。

则爱尔朗分布的密度函数如下：

$$f(t) = \frac{k\mu(k\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-k\mu t} \quad (2.2)$$

则其分布函数为

$$F(t) = 1 - e^{-k\mu t} \left[1 + k\mu t + \dots + \frac{(k\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} \right] \quad (2.3)$$

数学期望 $E(T) = \frac{1}{\mu}$ ，方差 $Var(T) = \frac{1}{k\mu^2}$ 。

当为了描述船舶到港情况的随机性时，只要令 $k=1$ 即可，此时的函数表达为负指数分布函数；当为了获得完全确定型的结果时，只需令 $k \rightarrow \infty$ 即可，此时 $Var[T] \rightarrow 0$ ，函数即转变为确定型分布，而当 k 处于以上两个状态之间时，即可描述一种处于随机与确定之间的状态。

掌握好船舶的到港规律能有效的控制岸桥的使用情况，港口码头能够合理地安排岸桥地使用。

5.3 基础数据和参数设置

对于该船舶的配载图（图 5.2），任务 1~5 号均为装船任务，任务 6~10 号为卸船任务，其中任务 1、6、9 为甲板任务，剩余的任务在舱内作业。其工作时间分别为 104min，52min，83min，22min，78min，88min，144min，126min，65min 和 134min。调取两台岸桥对其进行装卸作业。

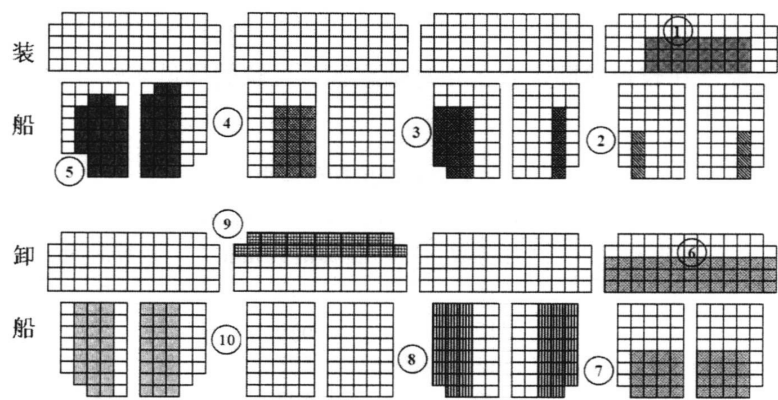


图 5.2 配载图
Fig.5.2 Stowage plan

依据问题的复杂程度，在本案例中，取种群规模，最大迭代次数及交叉概率、变异概率进行有关设定。同时对建模过程中的客户满意度评价的时间铭感系数的 α 、 β 的取值业进行一定的设置，具体如表 5.3。

表 5.3 算法参数
Tab.5.3 Table of the parameter for genetic algorithm

参数	参数含义	本文取值大小
N	种群数量	60
GEN	最大迭代次数	200
p_c	交叉概率	0.85
p_m	变异概率	0.02

5.4 实验设计及结果分析

本节在前文算法和模型的基础上，依据设定的相关参数，利用 MATLAB 编程实现了计算，获得解如下：岸桥 1 所进行的作业顺序为 10-5-9-4-3；岸桥 2 所进行的装卸顺序为 8-6-7-2-1，总的作业时间为 514min。

为说明本文所建模型和算法的有效性，利用多组实验进行验证，分别取岸桥数量为 2、3、4 台，取作业任务的范围为[10, 30]之间，各作业的时间规模在

20min~160min 之间随机选取，得到的结果如下表。从表 5.3 中可以看出，本文所设计的算法能够在较短时间内获得相对满意解，且解的质量在较好的范围内。

表 5.3 岸桥调度优化结果

Tab.5.3 the optimization result of quay crane scheduling

岸桥数量	任务数	目标函数/min	运算时间/s
2	10	514	2
2	15	689	7
3	15	523	11
3	20	607	16
3	25	770	21
4	20	513	28
4	25	581	33
4	30	852	39

第 6 章 结论与展望

6.1 主要结论

本文讨论了集装箱码头的装卸系统，从岸桥的结构、技术、使用、发展、主要应先因素等方面探讨了装卸系统中的主要设备，即岸桥的情况。在此基础上，考虑到实际装卸过程中的装卸作业的一些特点，研究了集装箱码头的岸桥调度问题，主要工作可以总结为以下几个方面：

（1）就集装箱码头的装卸系统而言，随着船舶大型化的发展，集装箱岸桥也在不断地更新换代，且码头前沿配置岸桥的过程中，主要考虑岸桥本身的结构技术特点，港口集装箱的货物吞吐量、码头整个系统的协调程度及集装箱船舶的到港情况，并以大连港为例，描述了大连港岸桥的使用频率及高峰分布状况及其船舶到港规律；

（2）结合集装箱码头前沿的实际作业情况，考虑了不同位置作业任务之间的关系，本文建立了以船舶在港时间最短的岸桥调度作业优化模型；

（3）在模型求解方面，采用遗传算法，运用 MATLAB 编程求解，并以大连港集装箱码头作业本文案例的分析背景，验证了模型及所设计算法的可行性和有效性，为集装箱码头岸桥的作业安排提供相应的优化思路和方法。

6.2 研究展望

本文在岸桥调度研究中取得了一定的进展，但还存在着一些有待改进和进一步完善之处，主要有：①集装箱码头整个作业系统是一个整体，单纯只考虑岸桥调度不一定有利于整个码头的优化；②在考虑岸桥调度作业中，只研究一条船舶的情况下，需要考虑在多船舶下的情况。以上不足可作为下一步研究的方向。

参 考 文 献

- [1] 陈家源. 港口企业管理[M], 大连海事大学出版社, 1999.
- [2] Dagenzocf. The crane scheduling problem[J]. Transportation Research B, 1989, 23(3) :159-175.
- [3] Peterkofsky, R.I., Daganzocf. A branch and bound solution method for the crane scheduling problem[J]. Transportation Research B, 1990, 24(3) :159-172.
- [4] Gambardellalm, Rizzoli A.E., Zaffalonm. Simulation and planning of an intermodal container terminal[J]. Simulation, 1998, 71(2) :107-116.
- [5] Gambardellalm, Mastrolilim, Rizzoli A.E. et, al. An optimization methodology for intermodal terminal management[J]. J Intelligent Manufacturing, 2001, 12(5/6) :521-534.
- [6] 林敦清, 陶其钧. 集装箱码头装卸机械配备台数探讨[J]. 上海港科技, 2001, 5: 19-22.
- [7] 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, 4: 28-36.
- [8] 张婕姝. 港口生产调度仿真模型[J]. 上海海事大学学报, 2005, 26(2) :42-46.
- [9] 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(8): 1069-1073.
- [10] 彭传圣. 集装箱码头前沿设备配置数量研究[J].港站码头, 2005, 7:23-27.
- [11] 韩辉. 宁波港北仑五期集装箱码头装卸工艺及设备配置的研究[D]. 上海:上海海事大学, 2006.
- [12] 丁以中. 基于模拟与整数规划方法的多码头集装箱港口装卸设备投资优化模型及其在上海港的应用[J]. 上海海事大学学报, 2006, 27: 21-26.
- [13] 杨兴晏. 利用综合成本模型研究集装箱码头设备投资的最佳规模[J]. 港工技术, 1995, 2: 19-21.
- [14] 郝旭. 集装箱港口装卸作业资源配置研究[D].大连:大连海事大学, 2003.
- [15] Guan Yongpei, Xiao Wenqiang, Chenung R.K., et al. A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: heuristic and worst-case analysis[J]. Operations ResLett, 2002, 30(5) :343-350.
- [16] Bishek. A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal[J]. Eur JOperational Res, 2003, 144(1) :83-107.
- [17] PARKYM, KIMKH. A scheduling method or berth and quay cranes[J]. OR Spectrum, 2003, 25(1) :1-23.
- [18] 董良才, 丁以中, 黄有方. 新装卸工艺下双倍场吊的平板小车调度策略[J]. 上海海事大学学报, 2007, 28(4) :16-21.

- [19] Lee Der-Horng, Wang Huiqiu, Miao Lixin. Quay crane scheduling with noninterference constrains in port container terminals[J]. Transportation Res E, 2008, 44(1):124-135.
- [20] Canonacop, Legatop, Mazzarm, et al. A queuing network model for the management of berth crane operations[J]. Computers & Operations Res, 2008, 35(8):2432-2446.
- [21] 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 & Ind Eng, 2009, 56(1):241-248
- [22] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S. The dynamic berth allocation problem for a container port[J]. Transportation Research Part B, 2001, 35 (4):401-417.
- [23] 周鹏飞, 康海贵. 面向随机环境的集装箱码头泊位一岸桥分配方法[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(1): 161-168.
- [24] 白治江, 黄卿. 基于滚动规划的泊位和岸桥分配集成模型研究[J/OL]. 计算机工程与应用, 2013.
- [25] 杨兴晏, 魏恒州. 沿海港口集装箱码头合理的泊位利用率分析[J]. 港工技术, 2004, (3):5-7.
- [26] 朱善庆. 关于海港集装箱码头合理通过能力的初步分析[J]. 中国港口, 2004.7:28-30
- [27] Lim A. The berth Planning Problem[J]. Operations Research Letters, 1998, 22 (2-3):105-110.
- [28] Imai A. Berth allocation in a container port using a continuous location space approach[J]. Transportation Research Part B, 2005, 39: 199-221.
- [29] Imai A, Chen H C, Nishimura E, Papadimitriou S. The simultaneous berth and quay crane allocation problem[J]. Transportation Research Part E, 2008, 44(5):900 - 920.
- [30] 茆道方. 面向高效营运的集装箱码头核心资源调度研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [31] 赵坤强, 韩晓龙, 梁承姬. 连续泊位下集装箱港口泊位与桥吊协同调度优化研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(11):60-65.
- [32] 李娜, 靳志宏. 连续泊位调度与岸桥配置协同优化[J]. 中国航海, 2011, 34(2): 86-90.
- [33] Chunxia Yang, Xiaojun fang, Zhenfeng Li. An optimization approach for coup-ling problem of berth allocation and quay crane assignment in container terminal[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 63: 243-253.
- [34] Liang C, Huang Y, Yang Y. A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning[j] . Computers & Industrial Engineering, 2009, 56 (3): 1021-1028.
- [35] 范志强, 乐美龙. 最小化最大完工时间与等待时间的岸桥作业调度双目标优化及其遗传算法[J], 系统管理学报, 2013, 22(01): 120-127.

- [36] Peterkofsky R I, Daganzo C F. A branch and bound solution method for the crane scheduling problem[J]. *Transportation Research Part B*, 1990, 24(3): 159 - 172.
- [37] 杨春霞, 王诺. 基于多目标遗传算法的集装箱泊位-岸桥分配优化研究[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(5):1720-1722.
- [38] Lee Y, Chen C Y. An optimization heuristic for the berth scheduling problem [J]. *European Journal of Operation Research*, 2009, 1996(2): 500-508.
- [39] Ilaria Vacca, Matteo Salani, Michel Bierlaire. An Exact Algorithm for the Integrated Planning of Berth Allocation and Quay Crane Assignment[J]. *Transportation Science*, 2013, 47(2): 148 - 161.
- [40] Park Y M, Kim K H. A scheduling method for berth and quay cranes [J]. *OR Spectrum*, 2003, 25(1):1 -23.
- [41] Beth C.Kuliek, Jmaes T.Sauye. A flexible interface and architecture of container and intermodal freight simulations. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*. A. Farrington, H.B. Nembhard, D.T. Sotiroek, and G. W. Evans, eds.1999.
- [42] Daofang Chang, Zuhua Jiang, Wei Yan, Junliang He. Integrating berth allocation and quay crane assignments[J]. *Transportation Research Part E*, 2010, 46:975-990.
- [43] Cordeau J F, Laporte G, Legato P, Moccia L. Models and tabu search heuristics for the berth-allocation problem [J]. *Transportation Science*, 2005, 39(4): 526 - 538.
- [44] De Oliveira R M, Mauri G R. Clustering search heuristic for solving a continuous berth allocation problem [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2012, 72(45): 49-62,
- [45] 严颖等. 运筹学随机模型.北京:中国人民大学出版社, 1995, 6.
- [46] 钱颂迪等.运筹学.北京:清华大学出版社.
- [47] 秦进, 倪玲璐, 王承娜 等.集装箱码头岸桥调度优化模型及算法[J].*西南交通大学学报*, 2013, 48(1):184-192.
- [48] Lim A, Rodrigues B, Zhou Xu. A m-Parallel Crane Scheduling Problem with a Non-crossing Constraint[J]. *Naval Research Logistics*, 2007, (54): 115—127.
- [49] Dongsheng Xu, Chung Lun Li, Joseph Y T Leung. Berth allocation with time-dependent physical limitations on vessels[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, (216): 47-56.
- [50] Pasquale Legato, Rina M. Mazza. Berth planning and resources optimisation at a container terminal via discrete event simulation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 133(3): 537-547.

- [51] 宋向群, 杨沛霖, 唐国磊, 等. 沿海集装箱港区泊位装卸效率对单线航道利用率的影响[J]. 水运工程, 2011(4): 51-53.
- [52] 王诺, 徐灵杰, 张源凌 等. 集装箱班轮到港规律的耦合性特征及其应用研究[J]. 水运工程, 2014(3): 98-102.
- [53] 王诺, 徐灵杰, 宋南奇 等. 集装箱班轮到港规律的分布函数及实证研究[J]. 大连海事大学学报, 39(4):107-110, 2013.
- [54] 张鲁宁, 王诺*, 陈爽. 集装箱班轮到港规律实证研究[J]. 大连海事大学学报, (2):473-479, 2012.
- [55] 胡运权. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [56] 胡平, 郭永崧, 杨波, 超大型集装箱船螺旋桨设计研究, 交通部上海船舶运输科学研究所学报, 2004, 27(1).
- [57] 杨靳, 国际航运经济学[M], 人民交通出版社, 2009, 47-53
- [58] 崔柳, 超大型集装箱船舶及港口发展研究 [D], 天津大学, 2005
- [59] 王学锋, 基于枢纽港的大型集装箱船营运经济性研究[D], 上海交通大学, 2007
- [60] 李静, 集装箱班轮运输业的规模经济性研究[D], 上海海事大学, 2005
- [61] 钮志荣, 大船时代下集装箱航线挂港的选择[D], 上海交通大学, 2008

致 谢

首先，请允许我向尊敬的蹇令香老师致以衷心的感谢！在论文写作过程中，蹇老师不辞辛劳，在各个方面都在认真指导，悉心点拨。蹇老师知识渊博、治学严谨、人生豁达、胸怀坦荡，从师两载，深深折服！毕业在即，师恩似海，终生难忘！

其次，向大连海事大学专业学位教育学院的领导和老师们致以真挚的谢意！

感谢他们对我的热情帮助和关怀，正是他们无私的教诲才使我能够顺利完成研究生阶段的学习。我要感谢这些年来所有关心和帮助过我的同学和朋友们，是你们支持和鼓励伴随着我一路走来，我会永远铭记在心。

最后，感谢家人、朋友给予我的鼓舞和勉励。借此机会祝愿大家工作顺利、身体健康。