

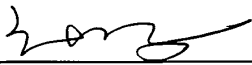
分 类 号 \_\_\_\_\_  
U D C \_\_\_\_\_

密 级 \_\_\_\_\_  
单位代码 10151 \_\_\_\_\_

集装箱码头岸桥优化配置研究

杨 玲 莉

指 导 教 师	王清斌	职 称	副教授
学位授予单位	大 连 海 事 大 学		
申请学位级别	硕士	学科（专业）	物流工程
论文完成日期	2014.5	答辩日期	2014.6

答辩委员会主席 



**Studies on Optimal Configuration of Quay Crane  
in Container Terminal**

**A thesis Submitted to**

**Dalian Maritime University**

**In partial fulfillment of the requirements for the degree of  
Master of Engineering**

by

Yang Lingli

**(Logistic Engineering)**

Thesis Supervisor: Associate Professor Wang Qingbin

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，撰写成博/硕士学位论文“集装箱码头岸桥优化配置研究”。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：杨玲莉

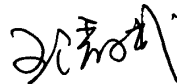
## 学位论文版权使用授权书

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：杨玲莉 导师签名：



日期：2014年 6月 19日

## 摘 要

港口是连接远洋、内河运输以及内陆运输的枢纽，港口综合能力的提升将最大化港口的经济效益，提高港口的服务水平，使得更多的航线、更多的船舶选择该港口挂靠，同时，港口服务系统作为整个交通运输系统的一个子系统，影响整个交通运输系统和区域经济的发展，港口服务能力的提升将为腹地经济带来更多的发展机遇，有助于港口腹地经济的发展，具有明显的社会效益。

集装箱港口由于集装箱运输的兴起，在港口物流中具有重要的战略地位。集装箱港口物流系统可分为岸边装卸子系统、水平运输子系统和堆场子系统三大子系统，各个子系统之间通过协调以实现整个系统的最大通过能力。本文在研究集装箱码头物流系统的优化配置时，以整个系统的关键环节，即以岸边装卸子系统为研究对象，考虑在其他子系统能力充分保证的情况下，探讨营运阶段岸桥的最优保有量。从港口和船方的综合利益出发，建立双层规划模型，利用遗传蚁群算法来求解，获得在既定的港口来船规律下，该集装箱码头岸桥的最优保有量，为港口在营运阶段岸桥的配置提供决策支持。

文中利用大量算例以证明模型及算法的有效性，按照该方法进行岸桥的优化配置，能确保船方和港方的利益达到均衡，并从服务水平和作业成本两方面到达整体最优，实现成本的降低，保证资源较高的利用效率。

**关键词：集装箱码头；岸桥配置；双层规划；遗传蚁群算法**

## ABSTRACT

Port is the hub connects the ocean shipping, inland water transportation and inland transportation. The port's improvement in comprehensive capacity will maximize the economic benefits as well as the service level of port, which will spur more callings at this port, at the same time, the port service system, as a subsystem of the whole transportation system, will have an influence on the whole transportation system and the development of regional economy. Capacity of the port service will bring more opportunities to the hinterland economy, conduce to the prosperity of port hinterland economy, which has obvious social benefits.

Due to the prosperity of container transport, container port has important strategic position in the port logistics. Container terminal logistics system can be divided into subsystem of berthing, transportation between berth and yard and yard operation, the coordination between subsystems contributes to achieving the maximum capacity of the whole system. This passage, researches the optimal configuration of equipment in container terminal, focus on the key link of the whole system, namely quayside loading and unloading subsystem as the research object, under the condition of other subsystems' capacity being fully guaranteed to explore the optimal ownership of crane during the operating stage. Considering both the port and the ship's comprehensive interests, a bi-level programming model is set up, using genetic and ant colony algorithm to solve and followed with index analysis to obtain the optimal ownership of the cranes container terminal based on the established probability model of port, by which provides decision support for configuration of crane in operation period.

The results of numerical experiments show that the proposed model and heuristic are applicable to solve this difficult but essential terminal operation problem. The proposed approach make an equilibrium of the interest of the port and vessel as well as realize the best combination of service level and operating costs to guarantee the cost reduction and efficient use of resources.

**Key Words:** Container terminal; Quay crane configuration; Bi-level programming; Genetic-ant colony algorithm

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究内容和意义 .....	2
1.2.1 研究内容 .....	2
1.2.2 研究意义 .....	3
1.3 研究现状 .....	3
1.2.1 集装箱码头岸桥配置研究现状 .....	4
1.2.2 集装箱码头岸桥调度研究现状 .....	6
1.3 论文技术路线 .....	11
第 2 章 集装箱码头生产运作分析 .....	13
2.1 岸桥作业对象分析 .....	13
2.2 集装箱码头作业流程分析 .....	15
2.2.1 作业流程 .....	15
2.2.2 作业效益分析 .....	18
2.3 本章小结 .....	20
第 3 章 岸桥优化配置双层规划模型 .....	21
3.1 问题描述 .....	21
3.2 双层规划模型介绍 .....	21
3.3 建立双层规划模型 .....	22
3.3.1 模型假设 .....	23
3.3.2 设计变量及参数 .....	23
3.3.3 目标函数及约束 .....	25
第 4 章 基于调度的岸桥优化配置算法 .....	27
4.1 算法构造的理论基础 .....	27
4.1.1 混合整数模型的求解算法 .....	27
4.1.2 遗传算法原理 .....	27
4.1.3 蚁群算法原理 .....	29
4.2 遗传蚁群算法 .....	30
4.2.1 遗传蚁群算法的应用 .....	30
4.2.2 遗传蚁群算法求解思路 .....	31

4.3 遗传蚁群算法求解 .....	33
4.3.1 初始化操作 .....	33
4.3.2 遗传操作 .....	35
4.3.3 蚁群操作 .....	36
第 5 章 集装箱码头岸桥优化配置实例 .....	40
5.1 实例介绍 .....	40
5.1.1 数据统计 .....	40
5.1.2 拟合检验 .....	41
5.1.3 模型系数 .....	42
5.2 实例验证 .....	42
5.2.1 单周期数值实验 .....	43
5.2.2 多周期数值实验 .....	45
5.3 实例结果分析 .....	46
第 6 章 结论与展望 .....	49
6.1 主要结论 .....	49
6.2 研究展望 .....	49
参考文献 .....	51
附 录 蚁群算法路径优化程序代码节选 .....	55
致    谢 .....	58
作者简介 .....	59



## 第1章 绪论

集装箱运输以其在运输安全性及装卸方便性等方面的独特优势成为了国际运输方式的首选，同时也吸引了众多国内外专家学者就其良性发展而进行相关的研究。集装箱码头作为集装箱运输的重要衔接体及水运和陆运的重要节点，一方面，良好的集装箱码头操作能实现集装箱多式联运的无缝连接，另一方面，考虑到码头建设投资巨大，码头的改善将会有巨大的经济效应，因而，以提升集装箱码头综合能力为主题的研究将会有重要的实践意义。

### 1.1 研究背景

国际分工推动世界贸易的发展并促进国际运输集装箱化的发展，使得集装箱运输在国际运输中的地位显得越来越重要，另一方面集装箱船舶朝大型化方向发展，给集装箱码头有序高效的生产经营带来了巨大的压力，因而，市场需求的剧增以及船方对港口服务的高要求使得集装箱码头要想在日趋激烈的国际航运市场搏得一片天地，提高自身在国际航运市场中的竞争力，必须在提高生产能力的同时从根本上提高现代化管理水平，提高码头的作业效益，以迎接新的挑战。

集装箱码头运作效果中与生产能力和管理水平相对应的是吞吐量和服务水平，这两者是相互矛盾的两个方面，码头必须在保证服务水平的前提下实现码头的低能耗高效率运转：一方面，为缓解通过能力不足的压力，挖掘码头系统潜力，着眼于提高通过能力，可能引起装卸设备的超负荷运转及船舶的高滞港率；另一方面，为降低船舶等待作业的时间，即基于增加机械数量以提高船舶服务水平、运作效益，则可能导致较低的装卸设备利用率。物极必反，较高的通过能力如果不能以高效率的服务水平为基础，仅靠盲目的增加设备数量或以低服务水平为代价，将很难获得长足的发展。

综合考虑港方投资运营成本及船舶的服务水平是贯穿码头投资初期及经营管理整个过程的。集装箱码头的装卸机械配置问题根据决策所处阶段不同可分为两类：码头建设阶段根据码头建设规模进行设备配置以及码头营运阶段为适应市场需求进行的设备优化配置。码头建设阶段，港口规划在满足国际贸易和国际运输

网络规划的情况下综合考虑建设地点、类型、规模及建设时间，一般由设计单位根据预测的运量和建设项目的具体条件，按规范制定多个方案最终以经济利益为主要目标进行综合论证比较，提出推荐方案，此时，考虑到码头投产初期经营以及码头其他基础设施尚未完全到位，集装箱专用机械价格较昂贵，避免机械闲置，通常是根据码头设计通过能力所产生的机械操作量以及集装箱作业量进行“量量”配备；而在码头营运阶段，需要根据市场发展进一步挖掘潜力以优化设备配置时，应根据码头的来船规律及实际作业状况，以提升码头服务水平为主要目标结合经济成本进行集装箱作业量与岸桥作业能力的“量能”配备，也就是码头运营阶段设备的优化配置。

## 1.2 研究内容和意义

### 1.2.1 研究内容

考虑到集装箱码头资源配置的复杂性，为了充分发挥码头的装卸能力，提高港口的运行效率，集装箱码头的规划设计不再以港口吞吐量作为唯一的控制指标，而是，根据码头的水深条件、潮汐特征，以及国际集装箱船舶的大型化的趋势，在码头系统能力配置时以确保船舶的离港准时作为生产系统能力配置中的控制节点，对整个码头系统采用“不平衡配置模式”<sup>[1]</sup>。

生产系统能力不平衡配置是指系统能力设计以 100%发挥码头装卸能力为基准，与各系统的通过能力相匹配，即：

$$P_{\text{信息}} > P_{\text{集疏}} > P_{\text{堆场}} > P_{\text{码头}} \quad (1.1)$$

上述不等式可最大限度降低港口生产随机性对码头装卸效率的影响，有利于保证大型集装箱船的准班率，另外，考虑到岸桥作业成本较之场桥、集卡更高，这种配置模式对成本控制也具有一定的意义。

综上，在对营运阶段码头装卸设备进行优化配置时，假设场桥和集卡能充分满足场区内水平运输的需求，以港口方面的经济成本和船方的船舶准时率为目标，结合集装箱船舶的来船规律，在考虑岸桥优化调度的情况下，依据集装箱的作业量和岸桥的作业能力的“量能”进行设备的优化配置为港口的服务水平提高、成

本降低提供指导。

### 1.2.2 研究意义

港口企业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，港口的装卸设备属于大型机械，也需要较高的资本投入，但考虑到航运市场不断变化的需求以及较高的资金使用成本，可在不同阶段根据市场的需求的变化进行优化配置，因而，通过对运营阶段的岸桥进行优化配置也是有必要的。

从港口战略意义角度，作为水路和陆运的重要衔接点，与来船规律相适应的岸桥配置将会有助于提升码头的整体效率，从而能提升港口所在的整个物流系统的作业效率。

从投资效益角度，应该使所有的港口设施都能够物尽其用，减少闲置的可能性，使港口投资获取最大的经济效益，但在来港船舶较多的情况下，不可避免的会造成船舶排队等待作业，出现船舶滞港、压船、压货现象，这将给船方和港方造成巨大的经济损失。反之，若港方追求高服务水平，增加设备投资以提高生产能力，使得船舶到港就能够靠泊作业而无需等待，则当来港船舶较少时，将导致港口泊位和设施闲置。因而，为适应经济发展的需要，在保证高质量完成生产任务的情况下，降低装卸机械的投资，这就要求港口企业能够合理地确定港口运营阶段装卸机械的保有量，在较高的资源利用效率的条件下合理配置资源。

由此可以得出，集装箱码头岸边设施优化配置研究将在提升设施本身优化利用的前提下，构建与来港作业相适应的岸桥配置，能够获得服务水平和成本的平衡，提高码头整体的通过能力，将有助于码头综合实力的提升，不论是对现阶段效益的提升还是对未来的长期发展都有着重要的意义。

### 1.3 研究现状

集装箱码头物流系统由三大子系统构成：岸边装卸子系统、水平运输子系统和堆场子系统。岸边装卸子系统对来港船舶提供集装箱装卸服务，是港口对船方的直接服务者。在水平运输子系统和堆场子系统能力充足的情况下，岸桥服务质

量的提升,可从合理配置数量和优化岸桥调度方面入手。本文在考虑岸边装卸桥实际调度的情况下,研究集装箱码头岸桥设备的最优保有量,主要参考了国内外有关集装箱码头机械配置及岸桥调度的相关文献。

### 1.2.1 集装箱码头岸桥配置研究现状

有关集装箱码头作业资源的配置,在实践操作中,有以下解决方法:根据国内外先进码头的百米岸线岸桥配置比例来配置岸桥;对每一个泊位按一定比例配置岸桥。

已有的研究文献主要采用以下方法来进行资源配置:通过计算机仿真软件,建立集装箱码头运作的模拟模型,对整个集装箱码头物流系统在不同装卸设备资源下的物流过程进行模拟,以机械设备的效益为目标确定最优装卸设备数量;运用技术经济分析方法以追求投资成本最低为目标对码头装卸机械配置的投资方案进行评价分析;利用综合成本模型通过计算码头综合成本来确定集装箱码头装卸设备的最佳投资规模等;在船舶到港并接受服务的过程中,船舶到达港口的规律和船舶在港接受服务的特点符合排队论的模型,鉴于此,因而建立以费用为优化目标的排队论模型。以下按照时间顺序介绍研究该问题的相关文献:

杨兴晏<sup>[2]</sup>以港方和船方的综合成本最小为目标,综合考虑泊位成本、装卸设备成本、人工成本建立成本模型,其中装卸设备成本考虑设备的折旧及运行时损耗,并通过排队论得出船舶的平均在港停时以得出船舶停靠等待成本,最终实现利用综合成本模型研究集装箱码头设备投资的最佳规模。

林敦清、陶其钧<sup>[3]</sup>根据特定岸线长度及不同船舶组合从泊位和船舶的技术要求和安全角度出发,以来船作业量与岸桥作业能力的“量能”配比、码头通过量与集卡和场桥的机械作业来量的“量量”配比得出岸桥、集卡和场桥的数量配备比例。

魏恒州<sup>[4]</sup>以集装箱船舶的吨级不同确定船舶的岸桥数,并分析得出了单泊位配备的岸桥数量范围及单岸桥配备的龙门吊和集卡数量范围。

杨静蕾、丁以中<sup>[5]</sup>建立多级动态排队网络模型,结合离散事件仿真系统的原

理, 用 VB6.0 语言编写程序模拟港口活动, 通过对装卸工艺的运行指标进行统计分析得出集装箱码头装卸设备的合理配置, 并给出了各吞吐量下岸桥、集卡及场桥的最优机械配比。

郝旭<sup>[6]</sup>将集装箱码头装卸机械优化问题分为两个阶段分别建立优化模型, 在码头的投资规划期采用综合成本模型确定设备的保有量, 在港口运营期通过分析港口机械拥有量、最佳出勤台数和设备完好率三者之间的函数关系, 结合排队论建立成本模型确定机械持有量。

彭传圣<sup>[7]</sup>以船舶到、离港和集疏运车辆到、离港为边界建立了反映码头运作全过程的计算机动画模拟模型, 以岸边起重机的平均利用率和所有岸边起重机均投入使用的时间占用率为指标, 得出岸边起重机的配置数量, 并以作业线理论为基础, 通过比例得出码头拖车的配置数量。

丁以中<sup>[8]</sup>分别建立多级动态排队网络模型及港口装卸设备投资优化整数规划模型, 以第一个模型得出的动态机械最优配比为第二个模型的输入参数, 以第二个模型各集装箱码头总投资的净现值最小为目标, 解决上海外高桥一期至四期集装箱码头的装卸设备投资决策问题, 得到各码头、各年度装卸设备的投资方案。

韩辉<sup>[9]</sup>利用层次分析法对宁波港北仑五期集装箱码头的装卸工艺系统进行规划, 确定设备选型, 并结合港口工程规范计算公式得出设备的配置数量, 为港口的建设提出规划建议。

综上, 关于集装箱码头设施数量的配置问题, 相关文献在问题的界定和采用的规划模型方面仍然有可以改进的空间:

(1) 已有的研究主要是针对港口建设期机械的配置, 是码头具体建设之前针对市场的预测而进行的码头规划, 更多是市场对码头服务的需求量与机械设施作业量的“量量”配比, 另一方面, 针对岸桥的具体操作对象, 来港靠泊作业的船舶没有进行详尽的描述, 即没能有针对性的提出具有一定来船特征的集装箱码头的岸桥配置策略。

(2) 已有文献中的模型都将相关数据采取简化处理, 不能充分体现具体的调度环节; 综合成本模型仅以配置成本最低为目标, 未考虑服务水平; 排队论模型从

整个码头物流系统角度出发，将调度过程通过统计数据来表示；利用船舶和泊位的技术参数，根据经验来进行配置，具有较高的实践意义，容易操作，但只体现了船舶作业量和机械作业量之间量的匹配。

1.2.2 集装箱码头岸桥调度研究现状

国内外关于集装箱码头岸桥调度问题的文献众多，根据其使用的优化方法不同主要有两大类：建立计算机仿真模型模拟岸桥的调度以获得较优的调度方案；其次就是建立数学规划模型，利用算法求解获得较优的调度方案。

建立仿真模型求解码头资源的配置问题，前期周期长、成本高，本文选择以构建数学规划模型来求解岸边设施配置问题，参阅相关文献，按照发表先后顺序可以得出已有的研究主要从下表所示的五个因素的处理方面不断做出改进，这些改进使得研究更符合实际，具有更高的经济效应，为实际决策提供了更优的指导，因而，这也是本文在进行岸桥调度作业时所努力的方向。

表 1.1 岸桥调度不同因素的处理方式

Tab. 1.1 The Treatment of different factors of crane scheduling

因素	特征
来港船舶	静态→动态
泊位性质	离散泊位→连续泊位
调度特点	单船调度→多船调度
	泊位岸桥单独调度→泊位岸桥联合调度
	固定岸桥分配→岸桥动态分配
优化目标	到港船舶在港时间最短 等待作业时间最短 最小化带权重的任务完成时间
求解算法	精确算法、 近似算法、智能搜索算法、遗传算法、模拟退火算法

(1) 来港船舶

根据作业对象—船舶—的到港与否可分为静态和动态。

Imai, Nishimura, 和 Papadimitriou<sup>[10]</sup>将静态的泊位调度问题延伸至动态调度。前期，为了简化问题将来港船舶计划定为已知，求解来港船舶确定条件下的岸桥

调度问题，而实际情况是来港船舶符合一定的规律，具有随机性，泊位分配时仍有船舶未到港，未到港的船舶会在分配时间段中的某时刻到达，然后再分配作业，船舶动态到达更符合实际。

周鹏飞<sup>[11]</sup>等人研究了岸桥调度问题在随机环境下的优化方法，认为船舶实际发生的抵港时间和装卸时间与计划或事前估计的偏差是正态分布的，因而基于机会约束的随机规划思想，建立了以船舶等待时间最小为目标的求解模型，该模型中的随机因素能较真实地模拟随机决策环境，并同时体现决策者对待风险的态度和偏好。

白治江，黄卿<sup>[12]</sup>建立使所有集装箱货轮的调度费用最小为目标的基于混合整数线性规划的 BA 和 QCA 集成模型，模型中同时考虑了优先权，首选泊位，岸桥移动等生产中的实际特征，将规划期被离散化为相等的若干时段，每运行一次模型相当于规划期向前滚动一个时段，实现船舶动态到达及岸桥分时段动态调度。

## (2) 泊位性质

根据泊位布置形式，可以分为离散泊位和连续泊位两种情况。

离散泊位是将码头岸线严格按照泊位来划分靠泊区间，一个泊位只能停靠一艘船舶，且停靠于泊位上的船舶不能超过该泊位的长度；连续泊位是将码头岸线视为一条连续的、无间隔的直线，只要泊位的水深条件允许，所有到港船舶可以在不超过码头岸线的任意位置上进行靠泊作业，没有严格的泊位划分。

一方面，由于船舶的大型化发展，船舶的停靠已经打破了泊位的界限，一艘船舶横跨多个泊位的情况十分普遍。另一方面，越来越多的学者认为，连续泊位分配有助于提高泊位的利用率<sup>[13]</sup>。

Akio、Imai<sup>[14]</sup>等研究了连续泊位分配问题，将该问题划分成两阶段来解：首先求解离散的泊位分配模型，然后调整离散解形成连续泊位分配问题的解。文中建立启发式算法，并通过大规模算例验证了该模型及算法的求解结果要好于实际结果，证明了求解的有效性。

## (3) 调度特点

根据岸桥分配时是否同时考虑泊位的分配可分为单独岸桥调度和泊位与岸桥联合调度。

随着对港口物流系统的深入了解,研究逐渐向泊位—岸桥联合调度方向发展,把两者当成一个整体,与单纯的泊位分配和岸桥分配相比,前者能有效反映其相互影响相互制约的关系,更符合码头生产组织的实际情况<sup>[15-16]</sup>。

赵坤强,韩晓龙,梁承姬<sup>[17]</sup>建立两阶段模型:连续条件下泊位分配模型,连续泊位下岸桥调度模型。模型一给出了在港时间最短条件下的船舶靠泊时间、离泊时间、靠泊位置,以及给出了各船所分配的桥吊数量,然后以模型为基础,在满足各岸桥需求计划下,以最小化岸桥调动次数为目标求解调度方案。

李娜<sup>[18]</sup>针对连续泊位调度与岸桥配置协同优化的问题,构建了混合整数规划模型,以构造算法为核心,利用启发式局部搜索的方法调整船舶的分配次序,优先为服务时间较长的船舶配置岸桥,以达到船舶在港总时间最短的目标。

Chun xia Yang<sup>[19]</sup>船舶动态到达及连续泊位基础上,充分考虑 BAP 及 QCAP 阶段作业的特性和相关性,分别建立模型,利用遗传算法求解基于双循环的泊位与岸桥分配模型。

根据作业船舶的岸桥数是否发生改变可分为固定岸桥分配和岸桥动态分配。

Imai<sup>[20-22]</sup>关于岸桥调度问题的研究就体现了由静态向动态的转变,起初注重港口作业能力和服务的满意度的平衡,在来港船舶已知的情况下得出岸桥调度方案,后期,针对岸桥动态到达提出拉格朗日算法,解决岸桥的动态分配优化模型。

陈雪莲,杨智应<sup>[23]</sup>研究在允许桥吊动态分配的情况下集装箱码头的连续泊位动态分配问题,重点考虑桥吊在同一轨道上不能交叉服务的约束,基于儿子-兄弟原则对船舶的位置进行调整,建立以船舶在港时间最小为目标的动态泊位分配模型。

魏晓东<sup>[24]</sup>认为文献[23]单调增加某艘船的桥吊数量,不能称为完整意义的动态,他给出了两艘船间桥吊迁移的决策流程,并基于此设计出一个新的连续泊位分配算法,最大程度利用了每一时刻的桥吊,从而使得桥吊作业时间最短。



#### (4) 优化目标

根据调度目标,多数以规划期内船舶的总在港时间最短为目标,但对各个船舶来说单位时间的节约量所付出的代价是不同的,为了达到此目标,会导致个别船舶等待时间过长,即未充分考虑船方的利益。此外,这些规划目标多考虑时间成本,较少考虑岸桥调度对后续集卡及场桥调度所造成的影响,并且未能体现船方所要求的服务水平和港口成本上的矛盾。

前期,较多的文献都以时间因素建立调度目标:Liang<sup>[25]</sup>等人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采用混合遗传算法求解该问题;范志强、乐美龙<sup>[26]</sup>以最小化最大完工时间与等待时间为目标建立岸桥作业调度优化模型,利用遗传算法进行求解该模型;Daganzo C F<sup>[27]</sup>以船舶延迟时间最小为目标建立岸桥调度模型,采用启发式算法求解。

随后,考虑到调度过程中岸桥的成本以及调度与后续作业的衔接,模型目标涉及的因素就逐渐扩展:杨春霞、王诺<sup>[28]</sup>建立了以最小化船舶在港时间和码头生产成本为目标的优化模型并构造多目标遗传算法进行求解;Lee<sup>[29]</sup>等人用船舶等待时间、船舶靠泊位置、船舶靠泊优先级和船舶移泊距离等四方面的权重之和表示一个船舶靠泊方案的优劣,并通过基于领域搜索启发式算法寻求一组满意解,即合理的船舶靠泊方案。

#### (5) 求解算法

因模型的不同对应有不同的优化算法,一方面由于求解模型的不同使用的算法较广泛,精确算法中的分支定界算法<sup>[30]</sup>和动态规划<sup>[31]</sup>、近似算法中的启发式算法和拉格朗日松弛技术以及各种智能搜索算法,包括遗传算法<sup>[32]</sup>、禁忌搜索<sup>[33]</sup>和模拟退火;另一方面,岸桥调度问题是 NP-Hard 问题,智能搜索算法<sup>[34]</sup>,尤其遗传算法使用频率较高。

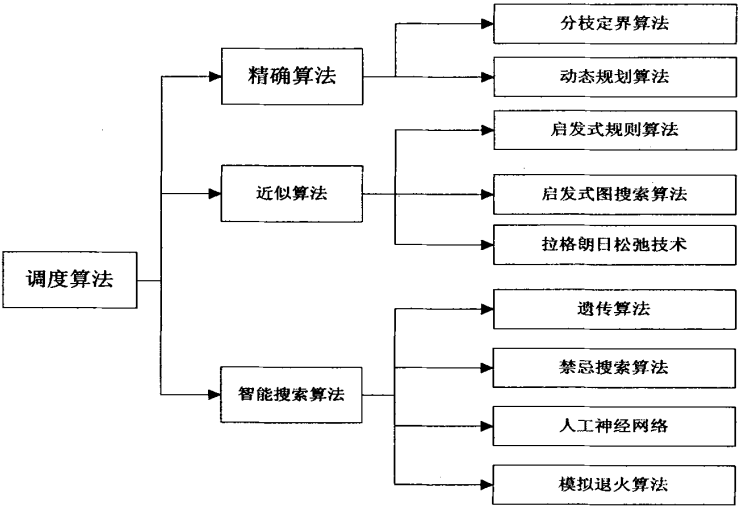


图 1.1 调度算法分类

Fig 1.1 Classification of scheduling algorithm

精确算法针对小规模问题有较好的效果，通常能以较优的求解效率获得最优解，相对而言，近似算法求解效率太低，一般能在可接受的花费（指计算时间和空间）下给出待解决组合优化问题每一个实例的一个可行解，但该可行解与最优解的偏离程度不一定事先可以预计，智能优化算法则在求解效率和精度上都有一定的优势，可充分利用算法自身在可行域内较优的搜索能力，结合启发式规则引导，使得收敛过程快速、高效，而智能优化算法的混合算法则能够实现算法之间的互补，各取所长，求解效果更优。

秦进等<sup>[35]</sup>设计了双层模拟退火算法用来对限制任务路径进行邻域搜索。最后，通过大量规模不同的具体算例，将所设计的模拟退火算法和传统的分支定界法以及遗传算法进行比较，得出模拟退火算法更高效，并且所求最优解的质量更高。

综上所述，岸桥调度问题的研究方向是不断地跟实际情况接轨<sup>[36-37]</sup>，针对岸桥作业对象的动态及随机特性，考虑岸桥调度的协同性和整体最优等特点，建立能够体现岸桥调度效果的成本、时间或效益模型，综合、全面的考虑各方的利益，使得求解效果不断地朝整体效率最优的方向发展，在求解算法的设计中也以解决问题的精度为首要考虑的因素，并综合考虑算法的求解效率。

### 1.3 论文技术路线

港口枢纽内的物流中转效率和成本主要受港口综合通过能力的影响，但鉴于港口物流系统的复杂性，在对整个系统进行配置优化时，可重点考虑系统的关键制约环节。根据前文提到的“不平衡配置模式”，结合岸桥、场桥和集卡的成本分析，得出岸边装卸资源，即岸桥的配置是港口码头装卸能力的关键所在。

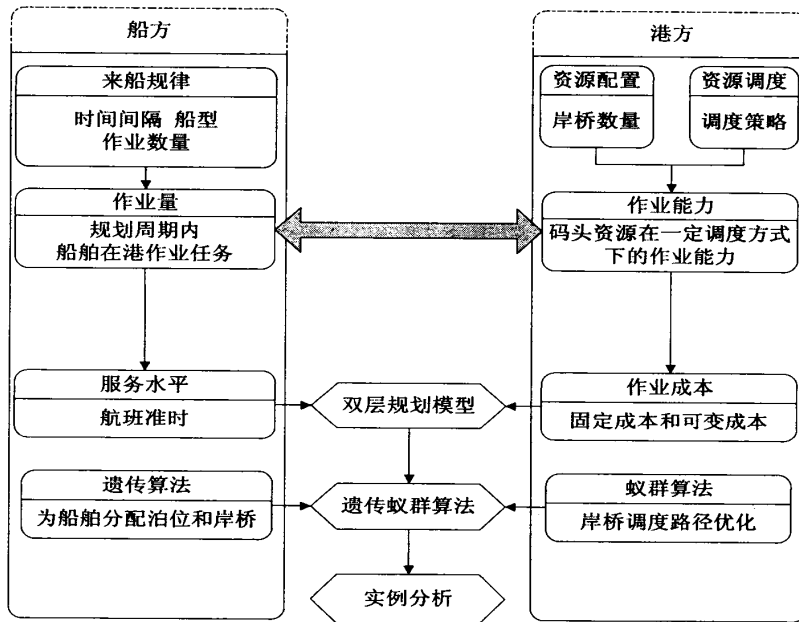


图 1.2 研究的技术路线

Fig 1.2 Flow chart of research

合理的岸桥配置经过优化调度形成作业能力以满足一定的集装箱作业量，达到最优的“量能”配比就是本文的研究主题，其中，“量”指代岸桥作业量，通过统计集装箱码头的来船信息得出船规律所适用的概率模型并得出模型的参数，用以生成作业周期内的来港作业任务；“能”指代码头岸桥的作业能力，主要由两个方面来衡量，一是岸桥数量，二是岸桥的调度策略，一定数量的岸桥经过调度形成作业能力。

本文基于港口的来船规律得出一段时间内的集装箱作业量，在考虑场桥和集卡配备充足的情况下，对泊位和岸桥进行优化调度以获得在此来船规律下，该码头最优的岸桥配置数量。

其中，在建立模型阶段，同时考虑港口的运营成本和能代表港口调度水平的成本，并分析各成本的成因，建立双层规划模型用以平衡作业成本和作业服务水平；调度过程中考虑连续泊位、泊位和岸桥协同调度，最小化船舶的时间延迟成本、船舶靠泊偏离偏好位置所导致的水平运输成本以及岸桥调动过程中水平移动成本为目标；算法设计阶段，利用遗传算法较强的全局搜索能力求解泊位分配和岸桥配置问题，利用蚁群算法在路径优化方面的优势求解岸桥调度问题，以岸桥利用率约束获得岸桥优化配置的决策支持。

## 第2章 集装箱码头生产运作分析

集装箱码头作为一个复杂的随机服务系统，岸边装卸子系统、水平运输子系统和堆场子系统之间相互协调，才能确保整个系统的高效运转：来港船舶的船期是制定码头作业计划的前提，集装箱码头岸边作业是衔接来船靠泊作业和后方堆场水平作业的中间环节，堆场的作业计划是岸边作业能有序开展的保障。鉴于集装箱码头各系统之间相互联系紧密，在研究岸桥的优化配置时，一方面，需了解岸桥作业对象，即来港船舶的规律，另一方面，需要梳理岸桥子系统与相关系统的衔接关系，确定相关成本。

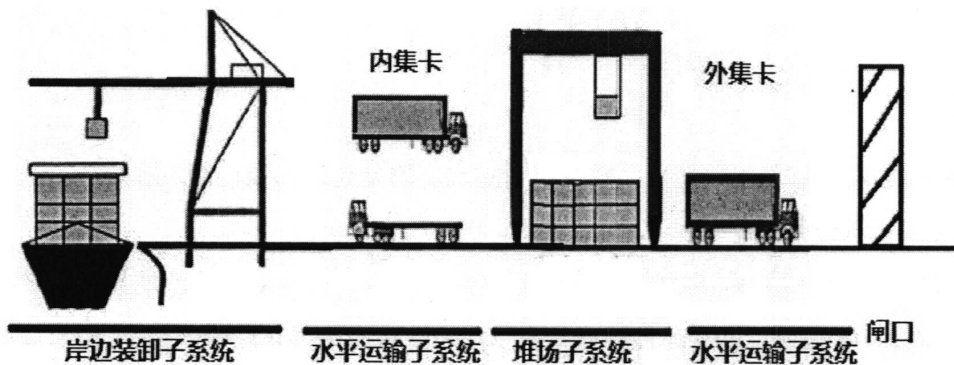


图 2.1 集装箱码头生产运作流程

Fig.2.1 Container terminal operation process

### 2.1 岸桥作业对象分析

集装箱船舶多为班轮运输，具有“四固定”的特点，即固定航线、固定港口、固定船期和相对固定的费率。船舶按固定的航线结合预先公布的船期表在固定港口间输送旅客和货物，但在实际航行中，由于受到天气、海流和风速等不可抗力因素的影响，可能使其偏离预期的船期，使得船舶最终到港时间体现随机特征。

研究船舶的到港特性有助于提高港口建设规模决策的准确性，我们可以通过统计该港口到港船舶的相关属性获得该港口到港船舶的来港规律，另一方面，对于在经济环境和地理位置方面有特殊优势的集装箱港口来说，在码头基础设施改变前后，来往集装箱船舶受该港口的服务水平变化敏感度低，即这些港口的来船

规律受港口基础设施和管理能力的影响小，由此产生的变化可忽略，所以，据此来探求该来船规律下港口基础设施配置的最佳规模。

此外，考虑到这类港口来往船舶多，作业量大，探求港口资源的优化配置，确定合理的资源调度模式，可以有效提高经济效益，所以是具有一定的研究意义。

集装箱船舶受众多因素的影响使得船舶到港时间是随机的，但是，对船舶的到港时间间隔和单位时间内到港船数两方面进行统计研究，发现这种随机性是符合一定的规律，现有的研究主要认为来船规律符合以下几种模型<sup>[38]</sup>：

### (1) 爱尔朗分布

如果随机变量  $x$  的概率密度为：

$$P(t) = \begin{cases} \frac{\mu(\mu t)^{K-1}}{(K-1)!} e^{-\mu} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

则称  $X$  服从  $K$  阶爱尔兰分布。参数  $\mu$  表示爱尔朗分布的均值； $K$  为阶数。

### (2) 泊松分布

港口系统中船舶随机到达，排队等候作业，基本符合最简单流的基本条件，即平稳性、无后效性和普通性，通常可以用泊松分布来描述船舶的到港特征， $t$  时间段内到达港口  $n$  艘船舶的概率可表示为

$$P = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad n = 0, 1, 2, \quad (2.2)$$

这里的参数  $\lambda$  为  $t$  时间段内平均到达港口的船舶数。

### (3) 负指数分布

若连续型随机变量  $x$  的概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

其中  $\lambda > 0$  为常数，则称  $X$  服从参数为  $\lambda$  的负指数分布，其概率分布函数为

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

在描述集装箱船舶的来船规律时，三种概率模型之间有一定的相关性：经证明，船舶到港间隔时间服从负指数分布与在单位时间内到港船只数服从泊松分布互为充要条件；另一方面，爱尔朗分布族具有较为广泛的模型类使得它更具适应性<sup>[39]</sup>。事实上，当  $k=1$  时，爱尔朗分布退化为负指数分布，这可看成是完全随机的；当  $k$  增大时，爱尔朗分布的图形逐渐变为对称的；当  $k \geq 30$  时爱尔朗分布近似于正态分布； $k \rightarrow \infty$  时，这时爱尔朗分布化为确定型分布，所以一般  $k$  阶爱尔朗分布可看成完全随机与完全确定的中间型，能对现实世界提供更为广泛的适应性<sup>[40]</sup>。

此外，有研究表明，班轮到港规律因航线、经营该航线的船公司数目及班轮的准班率的不同而不同，某航线上有多个船公司共同运营时，因实际中已通过安排船期将各船公司班轮到港时间有序分隔，所以整体统计时其概率分布呈现服从负指数分布的特征，但船舶到港规律一般服从阶数较高的爱尔朗分布，一般  $k$  取值在 30 左右，当船公司数较多时， $1 < k < 10^{[41]}$ 。

## 2.2 集装箱码头作业流程分析

### 2.2.1 作业流程

集装箱码头岸边操作最大的挑战就是船舶到港的随机性，港方可根据船舶到港规律结合来船计划协调安排港口作业，包括确定船舶的靠泊位置、船舶的作业岸桥数及其调度计划以及集卡和场桥的作业计划。

#### (1) 岸边装卸子系统

鉴于岸桥直接位于码头岸线上对船舶服务，在确定靠泊位置时也在一定程度上决定了作业的岸桥范围，岸桥与泊位联系紧密，将两者作为一个系统即岸边装卸子系统进行规划，作业流程主要可划分为以下三步：泊位分配（berth allocation problem，BAP），岸桥分配（quay crane assignment problem，QCAP）以及岸桥调度（quay crane scheduling problem，QCSP）。

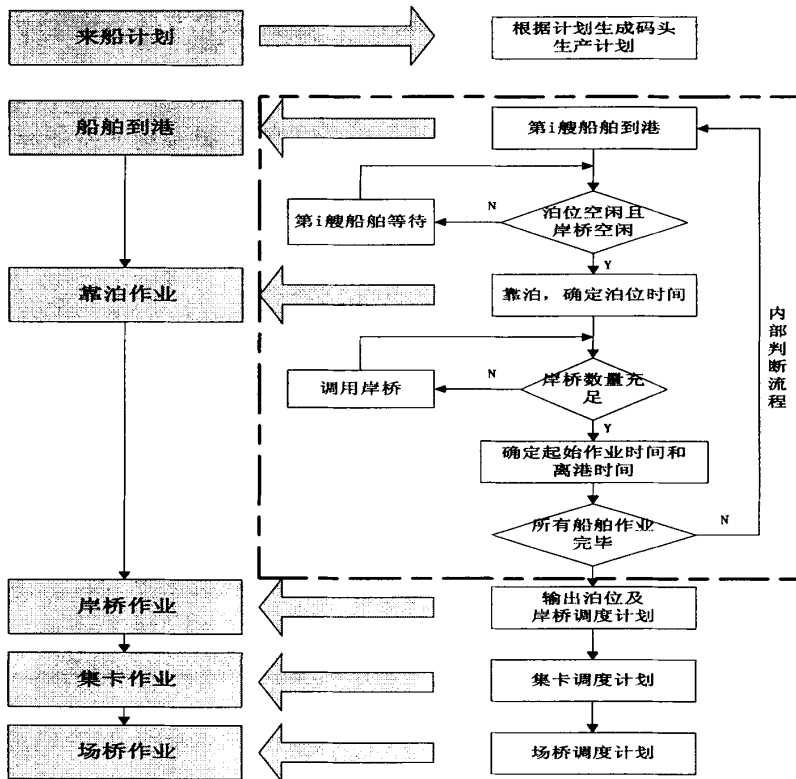


图 2.2 作业流程图

Fig. 2.2 The process of operation

泊位分配阶段除受到水深条件限制外，可根据船舶需要装卸的集装箱所在的后方堆场来选择停靠位置，其中，泊位偏好位置就是指距离对应后方堆场运输距离较近的停靠泊位，选择与最佳停靠位置偏差较小的位置停靠可缩短集卡的作业路径，而集卡是岸桥与场桥作业的中间媒介，若集卡运行优良，岸桥和场桥可连续作业，此时岸桥和场桥的作业效率高，因此，减少此偏差可在一定程度上保证岸桥和场桥的作业效率，同时也可降低集卡服务成本。

岸桥分配和调度阶段的作业效率体现在等待岸桥作业时间以及岸桥作业时间的长短。其中等待靠泊时间和等待岸桥作业时间可通过泊位和岸桥的联合调度而实现一定程度的降低，而岸桥作业时间则需通过高效的岸桥调度来实现，优化岸桥的调度路径，减少岸桥的水平移动是岸桥调度的优化方向。



(2) 集疏运子系统

集疏运子系统的调度主要体现在集卡的调度环节。目前对集卡的作业形式有两种描述，图(a)作业线、图(b)作业面也即外文文献中提及的 Single-cycling 和 Dual-cycling 模式。前者针对每台岸桥配置相应的服务集卡，岸桥与集卡形成一对多的形式，后者，岸桥与集卡之间没有确定的联系，依据岸桥与集卡空闲与否实行集卡全场调度，集卡无固定路径。相对于作业线单一模式的调度而言，作业面模式由于要形成全场调度，对信息流通要求更高，因而操作难度较大，但作业面模式对集卡资源利用率高且能很好的降低岸桥的作业等待时间，随着信息技术的不断创新发展，相信这种调度模式会是发展趋势。

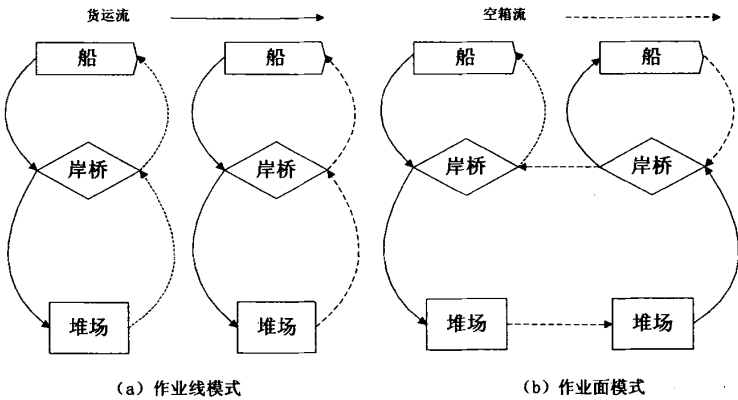


图 2.3 集卡调度模式

Fig. 2.3 The scheduling of trailer

(3) 堆场子系统

集装箱码头堆场作业主要包括集装箱进出场作业以及集装箱在场内的移动。

① 集装箱进出场作业

进出场作业分为卸船收箱、装船发箱、进箱收箱、提箱发箱，其中卸船收箱和装船发箱作业由场桥和内集卡协作完成，进箱收箱和提箱发箱则涉及到外集卡的作业。

② 场内的集装箱移动作业

转堆是指将堆场上某一箱位的集装箱转移到其它箱位的操作，一般包括转堆发箱、集卡拖运和转堆收箱三种操作。

翻箱是指因目标集装箱未处于所在栈的最上层而把压在其上的其它集装箱转移到其它栈的操作。

## 2.2.2 作业效益分析

港口作为服务业，服务成本和服务水平之间存在一定的冲突因而可能出现以提高自身成本为代价换得较高服务水平的情况，这使得服务成本与服务水平之间有协调的空间，两者之间的利益平衡有助于实现整体利益最大化。

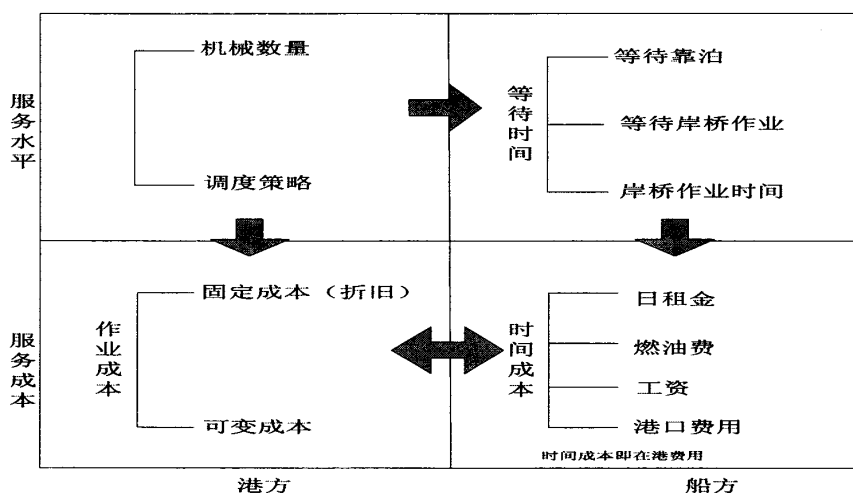


图 2.4 成本分析

Fig. 2.4 The analysis of cost

对于港口来说，机械数量和调度策略能体现港口的服务水平，决定了港方提供作业的成本，同时也影响了船方所接受服务的水平，增加设备的配置数量可相应的缩短等待作业时间和作业时间，从而提升服务水平，但设备过多直接导致成本过高的同时有可能出现较高的闲置率，港口成本过高；对于来港船舶，在港口接受集装箱的装船和卸船作业以期按预计时间离港完成整个运输任务，较多的服务设施将提高按时离港的概率，可降低时间成本；港方的作业成本与能体现船方所接受服务的水平的时间成本之间，存在寻求平衡的空间，以获得系统的整体效

益最优。

因而，从整个系统的成本和服务水平两方面对码头的作业效益分析如下：

### (1) 码头服务水平分析

船舶航期固定，准班率有时也作为对船舶或航线的评价指标，航行过程中自然因素对时间的扰动属于不可抗力，但船舶在港作业时间却是可以通过码头合理的资源调度获得优化的。船舶在港作业时可以通过提高效率来缩短的时间有以下几种：等待靠泊的时间、等待岸桥作业的时间、岸桥作业时间、岸桥等待集卡的时间。

泊位分配和岸桥分配的不协同性有可能导致船舶靠泊后没有可提供服务的空闲岸桥，因而存在船舶等待岸桥作业的情况；由于集卡能力的不足而出现岸桥等待集卡作业的情况，这时候的等待成本是最昂贵的，可通过增加集卡配置或将船舶靠泊在偏好位置以缩短集卡运输距离。

利用计划离港时间和实际离港时间的差值可综合体现物流系统在时间方面的作业效率，其中，这个差值应该是除去了船舶计划到港时间和实际到港时间的差值；

### (2) 机械成本分析

#### ① 岸桥作业成本与效率分析

岸桥作业的成本可分为固定成本和动态成本，其中动态成本与岸桥的选型有关，本文中用折旧费用来表示，而动态成本可考虑岸桥在操作过程中的电耗等随作业时间变动的成本，但本文中由于作业效率固定，作业量一定时，此动态成本不随岸桥总数量规模的影响，因而，文中没有考虑。

通常情况下，设备数量是否合理可以通过计算设备的利用率来判断，但这个指标体现的是设备的平均利用率，实践中可能存在利用率过高或过低的现象，即设备调度不合理，分别计算每台设备的利用率可发现调度中存在的问题。

#### ② 集卡作业分析

堆场的集装箱进出场作业是由集卡和场桥协作完成的，集卡的作业效率和行走路径也在一定程度上影响着码头的作业效率，服务于某一挂靠船舶的集卡数量

是由岸桥的作业效率和集卡的行走速度以及船舶与各个堆放箱区之间的距离决定的；最佳的集卡配置数量是在保证岸桥正常工作的前提下，不产生拥堵的集卡，或者在保证集卡正常工作的前提下，岸桥作业不产生闲置；集卡的作业成本也与船舶的停靠位置有关，停靠泊位与最佳靠泊位置偏差较小时，集卡的运输距离较短，为保证岸桥的效率所需的集卡数量也会减少从而进一步降低成本。

### 2.3 本章小结

本文研究集装箱岸桥优化配置，在建立成本模型时，从时间和机械作业角度出发，同时考虑港口的运营成本和船方的时间成本。其中，在泊位和岸桥的指派环节，打破泊位的限制，考虑到连续泊位分配对岸线的较高利用率，选择连续泊位分配策略；为体现泊位与岸桥的协同性，给船舶指定了一个最小作业岸桥数，将岸桥与泊位看作一个协调作业的整体，而不是将泊位调度及岸桥调度作为港口作业的两个独立环节进行考虑，在等待时间和作业时间之间找到一个平衡点，使船舶能按计划时间离港。

泊位分配与岸桥分配的效果可从两方面考虑：

(1) 船方 体现为船舶是否能及时完成在港作业按照预计船期离港。港口提供船舶装卸服务，船舶与预期离港时间偏差值的大小体现了港口的服务水平，代表了船方的利益。

(2) 港方 体现为在保证港口机械的使用效率的前提下如何有效调度岸桥使船舶能按预计时间离港并保持较低的成本。码头岸桥设施存在固定成本，岸桥运行时也存在维修成本、保养费、耗电量等变动成本此外，为确保岸桥配置数量与港口作业量的一致性，在岸桥配置时应考虑岸桥的平均利用率和单台岸桥的利用率；船舶靠泊时，减少与最佳靠泊位置的偏差；为船舶分配岸桥时，岸桥的水平移动是应当尽量避免的无效作业。

## 第3章 岸桥优化配置双层规划模型

### 3.1 问题描述

在集装箱码头物流系统中，岸边设施是码头通过能力的瓶颈，由设施的分配与调度所决定的作业效率决定了码头的通过能力。将岸边物流系统分为两级，上一级，包括码头的泊位和岸桥在内的固定设施配置规模；下一级，岸线和岸桥的分配调度策略。上一级决策有关岸边设施的规模自上而下的对下一级调度决策进行控制，从全局进行决策；下一级受上一级决策的控制，在自己的管理范围内行使决策权，最终设施调度策略的结果以机械利用率的形式反馈给上层决策。

在一个计划周期内，结合港口机械的具体调度来配备岸桥应实现两个目标：第一，达到港口较低的营运成本，即机械设备的折旧；第二，实现港口服务水平与作业成本的平衡，分别针对船舶、岸桥和与岸边作业联系紧密的集卡设置优化目标，降低实际离港时间与预期离港时间的偏差、减少岸桥水平移动的成本及降低靠泊位置与最佳停靠泊位的偏差值。

第一个目标属于港口规模建设部分应当考虑的设施配置规模，从全局掌控港口的生产运作；第二个目标涉及港口具体的生产过程，是在港口的规模一定的条件下开展的。前者影响后者的目标实现，体现服务水平，后者生产过程的具体实施通过设施利用率的形式影响前者的设施规模，决定作业成本，两者从属于不同的规划层面，相互影响，实现成本与服务水平的平衡，双层规划模型可以较好的体现这一思想。

### 3.2 双层规划模型介绍

#### (1) 双层规划模型定义

双层规划问题（Bi-Level Programming Problem, BLPP）是具有主从递阶结构的双层决策系统优化问题，两个各具目标函数的决策者之间按有序的和非合作方式进行的相互作用，上层先给定一个决策变量，下层决策者在上层决策信息下根据约束条件在可能的范围内优化自身的目标函数，由于任何一方又不能完全控制

另一方的选择行为，因此，上层决策者又要根据下层的反应做出符合自身利益的决策。反复进行该过程直至上、下层都不愿意继续调整其决策为止，此时，模型达到一个相对平衡、满意的状态，这时的决策方案称为相对最优方案。

### (2) 双层规划的数学模型

$$\begin{aligned} \min_u \quad & F(u, v(u)) \\ \text{s.t.} \quad & G(u, v(u)) \leq 0, \end{aligned} \quad (3.1)$$

其中  $v(u)$  由下面的规划求得

$$\begin{aligned} \min_v \quad & f(u, v) \\ \text{s.t.} \quad & g(u, v) \leq 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

上式中， $F(u, v(u))$  为上一级的目标函数， $f(u, v)$  为下一级的目标函数。上层和下层规划问题都有各自的目标函数和约束条件，决策向量  $(u, v)$  分由上下两层的决策者控制。上层决策控制  $x$ ，由上层决策者根据上层规划的目标函数和约束条件选择  $x$ ，然后固定  $x$ ，作为下层决策的参数，再由下层决策者以此为条件根据下层规划的目标函数和约束条件选择  $y$ ，并将  $y$  反馈给上层决策，如此反复，以达到整体最优。

### (3) 双层规划主要特点

① 层次性与依赖性。所研究的问题是分层规划的，各层决策者依次做出决策，下层决策在保持自身自主性的前提下服从上层，且各层决策者的容许策略集通常是相互关联不可分的整体。

② 独立性与制约性。各层决策者各自控制一部分决策变量，以优化本层的目标，但下层的决策不但决定着自身目标的达成，而且影响着上层目标的实现。

③ 冲突性与优先性。各层决策者有各自不同的目标，且这些目标往往是相互矛盾的，但上层决策者优先做出决策，下层决策者在优化自己的目标而选择决策时，不能违背上层的决策。

## 3.3 建立双层规划模型

第一层以岸桥的折旧成本和运营期内的可变成本，即运营成本达到最小为目

标进行岸桥的配置，考虑到可变成本与作业量直接相关，与岸桥的数量关系不大，此处仅以岸桥的折旧成本为目标；

第二层目标表示在调度过程中发生的成本，体现调度过程的效益，以预期离港时间、最佳停靠泊位的偏差及岸桥移动所导致的成本达到最小为目标进行泊位与岸桥协同调度，一方面，更能符合船方利益，即，按时完成装卸作业离开港口，另一方面也能保证港方有较高的岸桥利用率（岸桥等待时间短）和较低的集卡作业成本。

### 3.3.1 模型假设

(1) 船舶之间的安全距离已经计入了船舶长度；

(2) 对调度周期以 0.5 小时为时间单位平均划分，对岸线长以 10 米为距离单位划分为各个区间，船舶的停靠位置以船舶的中间位置所在区间标注另外，由于岸桥的不可交叉性，可按照岸线划分的区间方向对岸桥编号；

(3) 对每一艘船舶，由于其对应的后方堆场是确定的，因而存在偏好靠泊位置，离偏好靠泊位置越远，集卡的运营成本越高；

(4) 单岸桥的作业效率一定，船舶的作业量用单岸桥所需的作业时间来表示；

(5) 船舶从锚地起航到泊位的时间和离开泊位时间通常是一个常数，它们不随泊位调度和岸桥分配的好坏而改变，因此在模型中不予考虑。

### 3.3.2 设计变量及参数

$i=(1,2,...) \in$  船舶 $i$ 集合 $V$

$j=(1,2,...) \in$  第 $j$ 个时间段 $T$

$k=(1,2,...) \in$  岸桥编号 $C$

$L$ —岸线总长

$L_i$ —第 $i$ 艘船舶的长度

$W_i$ —第 $i$ 艘船舶的作业量

$S_i$ —第 $i$ 艘船的实际到港时间

$T_i$ —第 $i$ 艘船的预计离港时刻

$B_i$ —第  $i$  艘船的最优靠泊位置

$N_i^{\max}$ —第  $i$  艘船舶的最大同时作业岸桥数

$N_i^{\min}$ —第  $i$  艘船舶的最小作业岸桥数

$C$ —单台岸桥作业周期内的折旧成本

$\alpha_i$ —第  $i$  艘船舶偏离预计离港时间一个单位长度的成本

$\beta_i$ —第  $i$  艘船舶的偏离最佳停靠位置的成本

$\gamma$ —正在服务船舶的岸桥移动至另一艘船舶的成本

$\delta_1$ —港口所有岸桥平均利用率的最小值

$\delta_2$ —港口所有岸桥平均利用率的最大值

$\eta_1$ —单岸桥利用率的最小值

$\eta_2$ —单岸桥利用率的最大值

决策变量和从属变量

$n_1$  岸桥总数

$b_i$  第  $i$  艘船舶靠泊位置

$$n_{ijk} = \begin{cases} 1; & \text{第 } j \text{ 时间段 } k \text{ 个岸桥服务第 } i \text{ 艘船舶} \\ 0; & \text{否则} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1; & \text{第 } j \text{ 时间段第 } i \text{ 艘船在泊} \\ 0; & \text{否则} \end{cases}$$

$m_{ij}$  在第  $j$  时间段为第  $i$  艘船舶移动岸桥的次数

$s_i$  第  $i$  艘船舶靠泊的时间,  $s_i = (x_{i(j+1)} - x_{ij})(j+1) \quad s_i > 0$

$t_i$  第  $i$  艘船舶离港的时间,  $t_i = (x_{ij} - x_{i(j+1)})(j+1) \quad t_i > 0$

$T$  作业时间周期长度值,  $T = \max\{t_i\}$

$\Delta b_i$  第  $i$  艘船舶偏离偏好位置的偏离量,  $\Delta b_i = |b_i - B_i|$



$\Delta T_i$  第  $i$  艘船舶迟于预计离港时间离港的偏差值,  $\Delta T_i = \max\{0, t_i - T_i\}$

### 3.3.3 目标函数及约束

$$\text{第一层} \quad MIN = C \cdot n_1 \quad (3.3)$$

$$\delta_2 \geq \frac{\sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^N n_{ijk}}{n_1 \cdot T} \geq \delta_1 \quad (3.4)$$

$$\eta_2 \geq \frac{\sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^T n_{ijk}}{T} \geq \eta_1 \quad \forall k \in N \quad (3.5)$$

$$\text{第二层} \quad MIN = \sum_{i=1}^V \alpha_i \Delta T_i + \gamma \sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^T m_{ij} + \sum_{i=1}^V \beta_i \Delta b_i \quad (3.6)$$

$$\sum_{k=1}^N n_{ijk} \geq x_{ij} \quad (3.7)$$

$$S_i \leq s_i \quad (3.8)$$

$$x_{ij} x_{i'j} (|b_i - b_{i'}| - L_i/2 - L_{i'}/2) \geq 0 \quad \forall x_{ij} \neq 0, x_{i'j} \neq 0 \quad (3.9)$$

$$L_i/2 \leq b_i \leq L - L_i/2 \quad (3.10)$$

$$\sum_{i=1}^V x_{ij} L_i \leq L \quad (3.11)$$

$$(x_{ij} b_i - x_{i'j} b_{i'}) (k n_{ijk} - k' n_{i'jk'}) \geq 0 \quad \forall x_{ij} \neq 0, x_{i'j} \neq 0 \quad (3.12)$$

$$\sum_{i=1}^V \sum_{k=1}^N n_{ijk} \leq n_1 \quad (3.13)$$

$$N_i^{\min} \leq \sum_{k=1}^N n_{ijk} \leq N_i^{\max} \quad (3.14)$$

$$\sum_{i=1}^N n_{ijk} \leq 1 \quad (3.15)$$

$$\sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^N n_{ijk} = W_i \quad (3.16)$$

$$m_{ij} \leq \sum_{k=1}^N n_{ijk} \quad (3.17)$$

约束条件具体解释如下：

第一层，式（3.3）用岸桥的折旧成本和岸桥作业过程中的运营成本代表港方的总成本式；（3.4）对码头所有岸桥的平均利用率做出限制；式（3.5）限定单岸桥的利用率。

第二层，式（3.6）整个作业周期内与岸桥具体调度有关的，分别从船方、岸桥和集卡方面考虑的，能体现服务水平的运营成本。

关于时间的约束，式（3.7）有岸桥服务时才靠泊，体现泊位分配和岸桥分配的协同性；式（3.8）离港时间不能早于船舶到港时间。

关于位置的约束，式（3.9）相邻船舶停靠位置不存在交叉；式（3.10）船舶的停靠位置不能超过岸线范围；式（3.11）同一时间段内能够靠泊的船舶受岸线长的约束；式（3.12）同时在港的任意两艘船舶所分配的岸桥不存在交叉的情况。

关于作业量的约束，式（3.13）岸桥总数的约束；式（3.14）对一艘船同时作业岸桥数设定范围；式（3.15）同一时刻一台岸桥只能为一艘船舶服务；式（3.16）靠泊船舶作业量；式（3.17）同一时刻为某一岸桥移动岸桥的次数小于岸桥的需求量。

## 第4章 基于调度的岸桥优化配置算法

文中第3章针对岸桥优化配置问题，建立了均衡考虑服务水平和成本的、基于岸桥调度的双层规划模型，该双层规划模型是混合整数规划模型，参数为0-1变量和离散的整数，求解算法可借鉴整数规划思想，而关于连续泊位和岸桥的联合调度，算法的构建则应该充分考虑具体调度过程，鉴于混合智能算法在解决调度问题方面的优势，本文选择构建遗传蚁群混合算法进行求解。

### 4.1 算法构造的理论基础

#### 4.1.1 混合整数模型的求解算法

双层线性规划是一个NP-hard问题<sup>[42]</sup>，Hansen对双层线性规划是强NP-hard问题给出了严格的证明<sup>[43-44]</sup>，双层规划问题求解的复杂性取决于上下层规划的特性。

文中提出的双层规划模型是混合整数规划问题，一般用来求解整数规划问题的软件包使用穷尽法或枚举法，针对本文所建模型，可借鉴以下求解思路：

① 分支定界法：基本思路是确定分枝准则，根据分枝准则将所求解的问题分成若干个子问题，并从中选取一个子问题进行检验，确定该分支所代表的解集中解的可行性以决定其取舍，缩小解的范围从而最终确定问题的解。值得注意的是分枝定界法计算量很大，但它能求得全局最优解。

② 极点搜索算法：理论基础是线性双层规划的最优解必在诱导域的极点处取得，本质是首先确定双层规划问题诱导域的极点，然后再从诱导域的极点中找出线性双层规划问题的局部最优解或全局最优解。

#### 4.1.2 遗传算法原理

遗传算法是以达尔文的生物进化论“适者生存、优胜劣汰”和孟德尔的遗传变异理论为基础，通过模拟生物界的遗传进化过程，以作用于染色体上的基因所代表的问题的可能潜在解集合开始，通过遗传算子来更新解集合并最终优胜劣汰的方式来寻求好的染色体来求解问题。

染色体是多个基因的集合，他作为遗传物质的主要载体，其内部表现（即基因型）是由基因组合决定的，因此，需要通过编码实现从表现型到基因型的映射。初始种群生成后，根据解集合中个体的适应度值来挑选个体，再借鉴遗传变异理论进行交叉和变异以产生出代表新的解集的种群，每一次迭代都选择适应度好的解作为新的种群，使得后代种群比前代更加适应于环境，末代种群中的最优个体经过解码，可以作为问题的近似最优解。

遗传算法起源于生物进化理论，相关的进化特征为问题的解决提供了思路：

(1) 进化体现在染色体的基因型上。利用编码来表示优化问题，编码值的进化直接体现问题的优化，编码和解码是遗传算法解决问题的关键。

(2) 自然选择规律决定后代染色体的生成。遗传算法中以优化问题的目标函数为线索构造适应度函数从而确定选择后代染色体的标准，这一标准决定了进化的方向。

(3) 当染色体结合时，子女在保持父母染色体特征的同时也会由于随机变异造成子代与父代的不同。遗传算法中可以制定遗传策略，实现人为控制遗传和变异的几率，使得基因向适应度值较高的方向进化。

从以上遗传算法的求解思路中可总结出遗传算法的若干优点：

(1) 可行的解决方案代表的广泛性。遗传操作的对象是染色体本身，利用编码，将解直接转化成基因型，使得运作对象直接受遗传算法的控制；

(2) 具有并行性，能同时计算种群内多个个体，实现多路径全局搜索；

(3) 无需辅助信息，只需用适应度函数值来评价个体的基因；

(4) 遗传算法在搜索运行过程中能较好的避免收敛于局部极值点，即便是在噪声较大、不连贯的或无规律等恶劣的适应度函数条件下，同样可以以相当大的机率达到全局最优化；

(5) 借鉴自然界的进化机理，利用个体的适应度信息进行内在的启发式搜索，使得遗传算法在处理极其复杂的问题时有效率，准确性高；

(6) 遗传算法能够比较方便的和其他的算法进行融合，具有良好的延展性。

另一方面，遗传算法也有它的不足之处：

- (1) 较大的计算量，搜索速度慢，需要较多的训练时间才能得到较精确的解；
- (2) 对初始种群的选择有一定的依赖性，再加上探索新空间的能力有限，容易收敛到局部最优解，出现早熟现象；
- (3) 属于随机算法，需要多次运算，结果的可靠性差，解不稳定。

#### 4.1.3 蚁群算法原理

蚁群算法是借鉴自然界蚂蚁的寻径方式模拟得出的一种仿生算法。昆虫学家们在研究蚂蚁是如何选择从其巢穴到达食物源的最佳路线的过程中发现，蚂蚁在移动过程中所释放的一种分泌物——信息素，以此作为通信媒介来选择路径。当一个孤立的蚂蚁随机移动时，它通过检测某路径上的信息素来选择合适的路径，同时又释放自身的信息素以此增强该路线上的信息素数量。随着越来越多的蚂蚁通过该路线，一条最佳的路径就会逐渐形成。

蚁群算法优化过程的本质在于蚁群算法的三个独特机制：选择机制、更新机制和协调机制。选择机制，路径上残留的信息素数量是蚂蚁选择该路径的依据，信息素浓度越高，蚂蚁选择该路径的概率越大；更新机制，指路径上的信息素会随着蚂蚁经过次数、释放信息数的增加而增长，同时也会随时间以一定的速率挥发；协调机制，指蚂蚁之间通过这种信息素的分泌和识别来实现彼此之间的通信与协作。

蚁群算法以候选解组成的集合为起点经过适应、协作两个阶段来寻求最优解：适应阶段，各个候选解根据信息素的持续更新来不断调整自身结构，向最优解靠近；协作阶段，候选解之间通过信息素的交流实现相互协作，引导下一次迭代以期产生性能更好的解。蚁群算法个体之间的信息交流与相互协作为选择、更新和协调的优化机制提供了可能，使它具有很强的发现较优解的能力，能够找到最优解。

蚁群算法的优点：

- (1) 蚁群算法作为一种基于种群的进化算法，能实现分布式计算，具有本质并行性，易于并行实现；

(2) 通过检测信息素自发的进行选择的同时通过释放信息素影响以后的选择行为, 具有自组织与正反馈的特性;

(3) 具备较强的鲁棒性, 对蚁群算法模型稍加修改, 就可以应用于其他问题或与其他启发式方法相结合以提高算法的精度及效率, 改善算法的性能。

蚁群算法的缺点:

(1) 对初始解的依赖较高, 初始解直接影响算法的准确性和算法的效率;

(2) 对信息素有较高的依赖性;

(3) 搜索效率不高。

## 4.2 遗传蚁群算法

### 4.2.1 遗传蚁群算法的应用

现阶段, 遗传蚁群算法的应用主要有一下几种思路:

(1) 前期采用遗传算法后期采用蚁群算法

遗传算法前期对解的全局搜索能力较高, 后期受限于解的更新机制导致搜索能力下降, 容易形成局部最优, 而蚁群算法对初始解的依赖性较高, 好的初始解可使得蚁群算法求解效率大大提升, 鉴于此, 首先利用遗传算法快速全面的搜索性能, 或设置固定迭代次数, 或设置动态临界点<sup>[45-46]</sup>, 或直接将遗传算法的最优解转化后作为蚁群算法的初始解, 再利用蚁群算法的正反馈性、高效性求取问题的最优解, 融合后的算法能克服遗传算法在搜索到一定阶段时最优解搜索效率低以及蚁群算法初始信息素匮乏的不足的问题, 发挥遗传算法与蚁群算法在寻优搜索中各自的优势。

(2) 将启发式遗传信息加入到蚁群算法中<sup>[47-50]</sup>

该算法的本质就是引入了遗传算子的蚁群算法, 通过对维持代价的敏感度以及信息素浓度敏感度进行编码, 将遗传算法引入每一次迭代过程中, 实现对蚁群算法中控制参数的自我调整, 相比于蚁群算法循环迭代以获得解的改进效率更高。

(3) 将蚁群算法融入到遗传算法的交叉或者变异操作中<sup>[51]</sup>

以遗传算法为整个算法的框架, 利用了蚁群算法中的信息素特性进行交叉操

作，用信息素来指导遗传搜索过程，在搜索过程中又不断更新信息素，其本质就是利用信息素来控制适应过程用以加快遗传算法的收敛速度从而提高求解效率。

#### (4) 前期采用蚁群算法后期采用遗传算法

考虑到遗传操作基于随机生成的方法产生初始种群，大量计算时间消耗于淘汰初始种群中可行却明显劣质的个体，收敛时间长，寻优效率低，为此利用蚁群算法的正反馈机制，通过较少次数迭代，对问题的解空间做粗略搜索，提高初始种群质量，再应用遗传算法进一步优化。

#### 4.2.2 遗传蚁群算法求解思路

在本文在解决基于调度的岸桥优化配置问题时，构造遗传蚁群算法进行求解，遗传操作和蚁群操作是串联进行的，即遗传操作的输出是蚁群操作的输入，为蚁群算法提供相关初始化特征及相关约束。

前期利用遗传算法以最小化作业期间的运营成本为目标解决泊位分配和岸桥分配问题，即得出靠泊时间、靠泊位置及为船舶服务的岸桥数，属于组合优化问题；后运用蚁群算法以寻求蚂蚁行走路径的最短路，降低该路径被选择的概率使其利用率降低，从而通过单岸桥利用率约束优化岸桥数量。在遗传操作过程中，性能优异的染色体是其最终输出，解决了泊位和岸桥分配问题；而在蚁群算法中，遗传操作得到的解为蚂蚁寻优提供约束，使得蚂蚁在节点邻域附近寻优以提高路径寻优的效率。

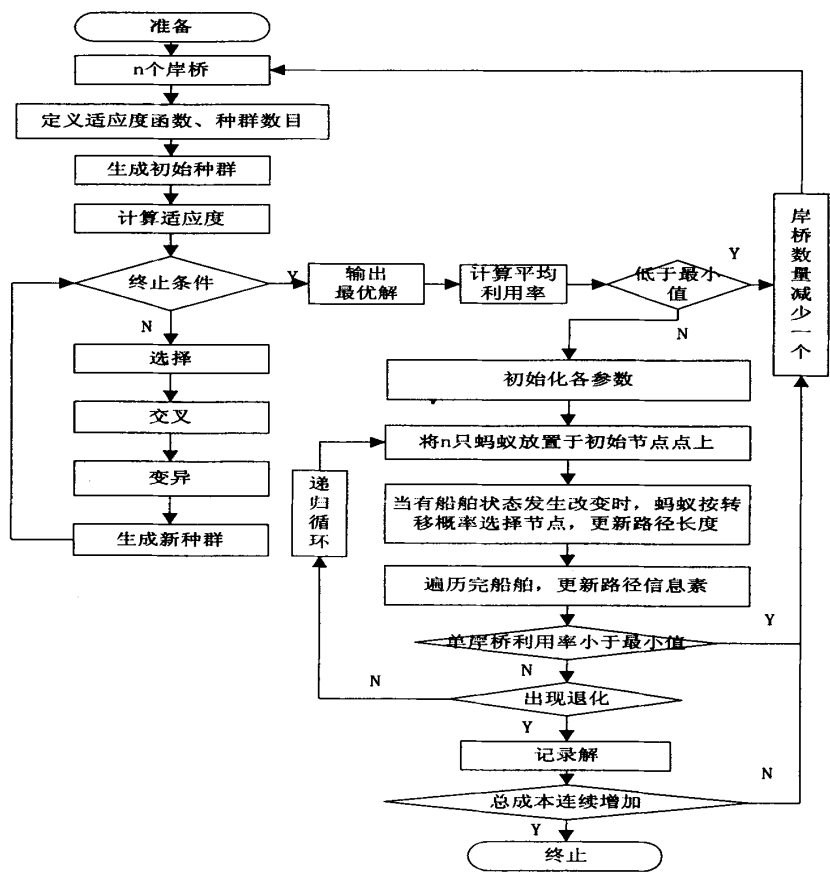


图 4.1 算法流程图

Fig. 4.1 The flow chart of algorithm

本文的遗传蚁群算法充分结合了遗传算法在解决组合优化问题方面的优势以及蚁群算法在解决旅行商问题（TSP）和工序排序问题方面的优点：

前一阶段采用遗传算法，充分利用遗传算法的快速性、随机性和全局收敛性，解决泊位分配和岸桥分配问题；在算法的后阶段采用蚁群算法，充分利用蚁群算法的并行性、正反馈性的特点和局部搜索的优势，结合蚁群算法求解解决旅行商问题（TSP）的原理，以遗传算法的解定义节点属性，求解岸桥路径规划问题，并使用岸桥利用率约束来优化岸桥配置问题。

遗传算法具有快速的全局搜索能力，在寻找最优解过程中具有自我学习、自我改进的进化特点，能够自适应地控制搜索过程以求得最优解；遗传算法采用基



因编码的方式将解的特征转化为基因型，简化问题的同时提高了问题的解决效率。蚁群算法最早成功地应用于解决著名的旅行商问题(TSP)，算法的本质就是寻求最短路径；蚁群算法的正反馈和全局收敛能力通过提高搜索效率得出全局最优解；蚁群算法分布计算及并行性的特征也有效地提高了寻求最短路径的效率。

用蚂蚁代表岸桥，每个岸桥按照一定的概率从待作业船舶中选取船舶进行作业，岸桥为各个船舶服务的时间之和形成蚂蚁的路径长度。为岸桥规划路径这一过程，即作业机械寻找作业对象的过程，与车间作业调度问题（job shop scheduling），任务单元寻找作业单元类似，而实际上，研究这类问题的学者也较多的采用了遗传蚁群算法<sup>[52-53]</sup>，且相对于单纯的遗传或蚁群算法表现出了更好的性能。

### 4.3 遗传蚁群算法求解

首先，由遗传算法得出泊位与岸桥分配的较优解，让蚂蚁根据该解进行遍历，记录各节点的时间及该路径的时间；然后，根据蚂蚁所记录的信息来决定下一次迭代各节点对蚂蚁的吸引度，即蚁群算法中的选择概率，从而确定岸桥的调度路径，并最终确定蚂蚁个数，即配置的岸桥数。

在整个算法的运行中，需要建立合适的基因与染色体编码方式，以染色体的形式表现解，并确定适应度函数和遗传操作停止点，选择出符合约束且规划结果较好的基因编码，为蚁群算法求解提供约束，充分利用蚁群算法局部求解能力的优势，将遗传算法和蚁群算法有效地结合，最后通过设定蚁群算法的信息素分布与更新函数，利用蚁群算法获得最终解。

#### 4.3.1 初始化操作

##### (1) 染色体编码及初始种群

遗传算法阶段最终要求得泊位分配和岸桥分配的较优解，因而使用三层染色体组的方式进行编码，染色体所在位置为船舶编号，BAP 和 QCAP 阶段涉及的靠泊时间、靠泊位置和作业岸桥数量分别用基因 1, 2, 3 来表示。其中，由于将调

度周期和岸线长进行了均分，靠泊时间和靠泊位置所对应的染色体值可用自然数来表示：

船舶序号	1	2	3	4	5	6	7
时间	2	8	16	22	27	31	32
位置	15	89	16	53	97	73	110
数量	3	2	4	2	3	3	2

图 4.2 染色体结构

Fig. 4.2 Chromosome representation

采用在定义域内按照概率随机选择的方式产生的初始种群具有多样性，以避免遗传算法由于搜索新空间能力的局限导致早熟，另一方面，虽然单个基因的取值符合定义，但他们的基因组合存在不可行的可能，因此后期需要通过解的可行性判断进行基因修复以选出满足模型中相关约束的可行解。

**时间范围：**由于船舶从锚地停靠到泊位的时间和离开泊位时间通常是一个常数，它们不随泊位调度和岸桥分配的好坏而改变，因此在模型中不予考虑，本算法以时间周期内第一艘船舶到港即可作业为周期的时间起点，以来船时间间隔进行时间的推移，得出各船的来港时间，以来港时间和来港时间之后的六个单位为靠泊的时间范围，以确保港口的服务水平；

**靠泊位置：**在整个岸线上首尾除去二分之一船长的区间范围内生成；对岸线以十米为单位进行编号，靠泊位置用船舶中心位置所处第几个十米区域来定位，按照以偏好靠泊位置为均值的正态分布模型来取值。

**岸桥数量：**根据作业量以及由船型所决定的最小作业岸桥数和最大作业岸桥数综合考虑决定，在此范围内按均匀分布取值。此外，考虑到上海国际港务集团1566m 长的岸线上配置了26 台岸桥，本文按照每50m 布置一台岸桥的方法来确定初始总岸桥数。

**可行性判断：**基因型代表一个靠泊和岸桥分配方案，基因的可行与否体现在船舶是否能按该方案在指定时间、指定靠泊位置停靠并被分配指定数量的岸桥。考虑到一艘船舶在泊位上不存在交叉时，靠泊时间上则一定可行，算法中按照靠

泊时间依次判断可行性，具体流程如下：

① 当时间等于靠泊时间时，如无空闲岸桥，靠泊时间推迟至已在港船舶离港时间的最小值，更新靠泊时间基因；有空闲岸桥，则转至②；

② 检查靠泊位置是否与其他船舶相重叠，不重叠则转至③，重叠则检查是否有空闲的、长度适合靠泊的岸线，选择偏好位置偏移量小的位置靠泊，更新船舶靠泊位置的基因，没有则靠泊时间推迟至已在港船舶离港时间的最小值，更新靠泊时间基因，转至①；

③ 按基因型中所需分配的岸桥数为船舶分配岸桥，若已有岸桥小于该值，则更新岸桥数基因，时间推移至下一艘船舶靠泊，转至①。

## (2) 适应度函数

第二层目标函数代表了调度结果的优劣。函数值越小，调度效果越好，取该目标函数前两项关于时间和位置的偏移惩罚值的倒数为适应度函数，用以评判靠泊方案和岸桥分配方案的效果。考虑到目标函数不可能为负数，所以不用担心适应度函数为负，但目标函数在数值上会很大，那么适应度函数在数值上会很小不利于机器运算，所以将其扩大  $\theta$  倍，系数  $\theta$  的值根据实际情况合理选取。

### 4.3.2 遗传操作

#### (1) 选择操作

采用基于轮盘赌法的非线性排名选择进行选择操作，在保证样本多样性的同时兼顾算法的效率。首先基于标准正态分布的基值生成选择概率，再按轮盘赌法执行遗传算法的选择操作，然后将当前群体中适应度最高的个体结构完整的复制到下一代种群中，其主要优点是能保证遗传算法终止时得到的最后结果是历代出现的过的最高适应度的个体。

#### (2) 交叉操作

交叉操作是把两个父代个体的部分基因加以重组而生产新个体的操作。

对船舶的靠泊位置和岸桥服务数量的基因进行算术交叉，即由两个个体的线性组合而产生出两个新的个体，以保证船舶靠泊时尽可能的靠近偏好位置。

假设在两个个体  $x'_A$ 、 $x'_B$  之间进行算术交叉，则交叉运算后所产生的两个新个体为

$$\begin{cases} X'^{i+1}_A = \alpha X'_B + (1-\alpha)X'_A \\ X'^{i+1}_B = \alpha X'_A + (1-\alpha)X'_B \end{cases} \quad (4.1)$$

其中， $\alpha$  为一个参数， $\alpha$  可以是一个常数，此时所进行的交叉运算称为均匀算术交叉，在本文中  $\alpha$  取值为 0.5。

### (3) 变异操作

变异操作可防止早熟现象，维持种群的多样性，改善局部搜索能力。考虑到服务船舶的岸桥数量变化的区域较小，对这部分基因进行均匀变异，即分别用符合某一范围内均匀分布的随机数，以某一较小的概率替换个体编码串中基因上的原有基因值。

对船舶靠泊时间部分的基因进行变异操作，考虑港方为提高客户服务水平，避免较长的靠泊等待时间，将变异范围设定为到港时间至到港时间以后三小时内。

### (4) 终止判断条件

一般有以下三种情况：① 连续几代的解变化不大；② 运算已达到设定的收敛代数；③ 达到预先设置的运算时间。本算法确定以解出现退化或达到最大迭代次数作为终止判断条件。

## 4.3.3 蚁群操作

前期通过遗传算法得出船舶的靠泊时间、岸桥的作业数量，以此来分别确定蚂蚁行走路径上各节点的时间属性以及该节点该时间段可容纳的蚂蚁数量；船舶停靠位置基因可确定蚁群算法中节点的横坐标位置，利用节点的横坐标与岸桥在岸线上的位置可得出转移概率。

如图 (a)，遗传算法得靠泊时间  $s(i)$ 、靠泊位置  $b(i)$ ，并利用靠泊时间和分配的岸桥数量计算得离港时间  $t(i)$ ，图中的矩形框代表船舶在二维矩阵中所占空间，纵向长度代表在港时间，横向代表船舶长度，矩形横向的中心位置即靠泊位置  $b(i)$ ；如图 (b)，将船舶在二维矩阵中抽象为一条直线，直线所处横坐标位置为船舶的停靠泊位，纵向上的延伸则代表船舶节点的时间窗。

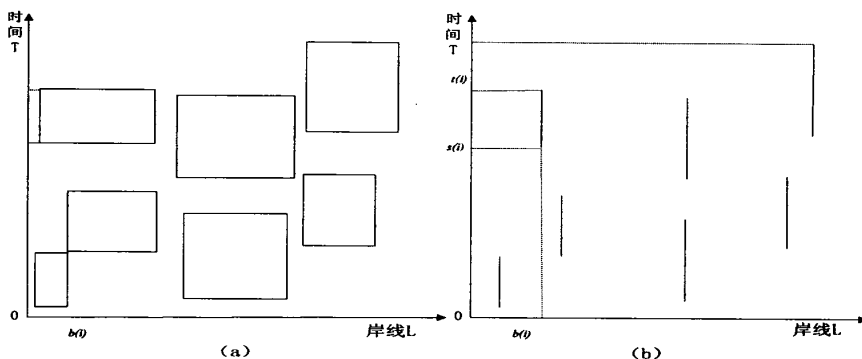


图 4.3 岸线-时间二维坐标示意图

Fig. 4.3 Illustration of berth-time diagram

蚂蚁的初始位置集合，即岸桥均匀分布在岸线上的位置集合，初始时刻岸桥存在被占用的可能性；在调度过程中，对同一船舶服务的岸桥不一定同时开始、同时结束，前期遗传算法得出的岸桥作业数量在调度过程作为约束，指导节点在局部搜索符合距离约束的岸桥来服务该船舶，同时，在调度过程中考虑岸桥的不可跨越性。

在更新信息素环节，路径最短的路线信息素降低，使下一循环被选择的概率降低，同时计算单个岸桥的利用率，如果单岸桥的利用率低于最小利用率，减少岸桥数，回到遗传算法，如果单桥利用率满足的情况下出现退化时，蚁群算法的路径寻优循环终止，记录该解，判断目标函数值。为了给决策提供更多的指导意见，文中选择当第二层目标函数值的增加量大于第一层目标函数的减少量这种情况出现连续两次时，即总成本连续增加时算法终止。

### (1) 转移概率

每当有船舶靠泊和船舶离港时蚂蚁进行下一个节点的选择，将岸桥与船舶停靠点的距离转化成转移概率，距离船舶节点近的岸桥被选择服务该船舶，蚂蚁在两节点之间的路径长度即岸桥在两个时间节点之间工作的时间长度。

$$P_i^k = \frac{\eta_{ik}^\alpha \tau_{ik}^\beta}{\sum_k \eta_{ik}^\alpha \tau_{ik}^\beta} \quad (4.2)$$

其中,  $\eta_{ik}$  = 船舶靠泊位置 (中心位置点) 与岸桥位置距离的倒数;  $\tau_{ik}$  = 第  $i$  艘船舶对第  $k$  个岸桥的吸引力;  $\alpha$ 、 $\beta$  相对重要性。

由于是按概率选择距离船舶较近的岸桥, 而未考虑岸桥的工作状态, 有可能出现正在工作的岸桥被另一艘船舶选中的情况, 这时, 为了平衡作业效率和岸桥移动成本, 将岸桥移动次数计入规划目标中。

## (2) 信息素

信息素强度的更新方程为:

$$\tau_{ik}^{new} = \rho \tau_{ik}^{old} - \Delta \tau_{ik} \quad (4.3)$$

其中,  $\rho$  代表轨迹的持久性;  $Q$  单位距离蚂蚁所留信息素常数。本算法中  $\Delta \tau_{ik}$  的按 Ant-Cycle 模型计算如下:

$$\Delta \tau_{ik} = \begin{cases} Q * d_{ij} & \text{若第 } k \text{ 个岸桥在最短路径 } (i, j) \text{ 上} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4.4)$$

采用蚁周模型, 即所有船舶遍历完成后才对信息素进行更新, 对于作业时间过低的岸桥降低它的选择概率, 使得被选择的机会更小, 直至单岸桥的利用率值或低于最小值或出现退化。

蚂蚁路径形成的算法流程如下:

While 不满足结束条件时 do

    for each 在港船舶状态发生改变, 即靠泊

        for each 此时在港所有船舶

            按船舶靠泊位置顺序和岸桥的编号为序构造转移概率矩阵

        end of for

    for each 船舶, 即转移概率矩阵的每一行

        按转移概率从小到大为船舶选择所需岸桥, 岸桥编号最大值为  $n$

    if 转移概率矩阵的列数比剩余船舶所需岸桥数小  $m$  个

        将前一艘船舶的分配的岸桥编号分别减少  $m$  个单位

    end of if

```
    将转移概率矩阵的前  $n-m$  列值改为 1
    记录为船舶服务的岸桥编号和岸桥作业时间
  end of for
end of for
计算单岸桥的利用率
if 岸桥的利用率小于最小值
    岸桥数减少，回到遗传算法
end of if
降低最短路所在岸桥的信息素浓度
判断算法终止条件
end of while
```

第 5 章 集装箱码头岸桥优化配置实例

对具有特定来船规律的港口进行岸桥优化配置，应首先确定港口来船规律的相关数据及模型，然后根据所建立的模型和构建的求解算法进行编程求解。本章实例介绍部分阐述相关数据的收集与处理，为模型的建立提供数据支持；实例验证部分，利用单周期实验说明解决问题的思路，多周期实验中，各周期数据来自同一个概率分布，以 72 小时为周期长度划分为多周期，前期作业时长超过 72 小时的部分为下一周期的初始状态。

5.1 实例介绍

5.1.1 数据统计

(1) 时间间隔

统计港口来船时刻，然后整理出连续两次来船的时间间隔，并按从大到小顺序进行排列，然后再将数据划分成几个区间，将子样本的随机变量由离散型转化为连续型，计算出每个区间内的频数，此时需注意频数不应过大或过小，其中，最小值不能小于 5。

(2) 船舶长度和作业量

考虑到港口使用驳船为大型船舶的货物进行分流，船型和作业量不存在相关性，因而，对船舶长度和作业量分别进行统计。针对船型，按照船长大小分为三个区间，统计各船型的比例如表所示。

表 5.1 船型统计表

Tab.5.1 The statistic of the types of shipping

船型	载箱量（TEU）	船长（m）	数量比例
1 小	800~2000	175~225	60%
2 中	2000~3000	225~275	30%
3 大	3000~6000	275~300	10%

至于周期内来船的单船作业量，一般服从正态分布，数据处理方式与时间间



隔的处理方式相同，后期再采用拟合检验的方式确定作业量所服从的分布及模型参数。

### (3) 最大作业岸桥数

船舶的最小服务岸桥数一般由船公司和码头协议制定，具有一定的随机性，本文采取利用作业量约束在 1 台和 2 台岸桥中进行随机选择；最大岸桥数则从安全角度和作业效率角度结合作业量和船舶长度生成。

#### 5.1.2 拟合检验

船舶到港分布的假设检验问题，属于非参数的分布拟合假设检验，统计学中对分布函数的拟合检验通常采用皮尔逊  $\chi^2$  检验法。该方法是针对分类数据的检验，是在总体  $X$  的分布未知时，根据来自总体的样本，检验关于总体分布的假设的一种非参数检验方法，即验证数据是否与理论分布相符合。检验统计量：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (5.1)$$

式中： $n_i$  为实测频数； $np_i$  为理论频数； $n$  为样本总数。

在  $\chi^2$  分布中，参数只与自由度  $R$  有关

$$R = r - s - 1 \quad (5.2)$$

式中： $s$  为利用统计分布求出的理论分布的估计参数数目，指数分布的参数  $s$  都为 1； $r$  为分组数。

根据皮尔逊定理，若给定显著性水平  $\alpha$ ，可计算  $\chi^2$  分布的临界量  $\chi_{\alpha, R}^2$ 。如果统计量  $\chi^2$  小于  $\chi_{\alpha, R}^2$ ，就接受假设检验；反之，统计量  $\chi^2$  的实测值落入拒绝域，则拒绝假定的理论分布。

本文对来港时间间隔和作业量的检验采取皮尔逊  $\chi^2$  检验法，检测可能服从的概率模型：对于来港时间间隔的拟合检验，分别检验样本数据与泊松分布、爱尔朗分布和指数分布的拟合程度；作业量则重点检验它与正态分布的拟合情况。

### 5.1.3 模型系数

某集装箱码头岸线的总长度为 1356 米，现有岸桥 17 台，本文以作业效率为 35 自然箱/小时的岸桥为对象进行优化配置：

根据集装箱码头的实际生产经营统计数据，本文相关数据取值如下<sup>[54-59]</sup>：

(1) 单个岸桥单小时的折旧成本可通过港口的财务数据和技术指标等相关数据直接得出，本文中以双 40 英尺岸桥为例，结合相关文献得折旧成本  $C$  计算如下：

年折旧额=购置成本\*（1-净残值）/折旧年限=4800\*（1-2.5%）/20=234 万元，  
得日折旧成本为 0.6411 万元。

(2) 未能按计划离港时间离港的时间惩罚成本  $\alpha_i$

通常班轮有其固定的班期，船舶在港口进行装卸作业，当提前完成任务时有奖励，对应的，离港时间的推迟也应存在成本，一般，港口和船方之间是有相关规定的，文中利用船舶在港停留的成本来计算延迟离港的成本，计算公式：日租金+燃油成本+工资+港口费用，每小时船舶等待成本具体取值按照大、中、小船型分别为 0.3033 万元、0.3406 万元、0.3978 万元。

(3) 偏离最优靠泊位置的惩罚成本  $\beta_i$

为保证岸桥作业的持续不间断，不出现岸桥等待集卡作业的情况，靠泊的偏移要求更高的集卡作业效率来弥补，因而最终体现为集卡作业成本的提高，文中每条船舶所对应的位置偏移成本不同，是根据其作业量来决定的，随着作业量的提升，集卡成本增加，具体表达式如下：惩罚成本  $\beta_i$ =作业量  $W_i$ \*偏离距离  $\Delta b_i$ \*油耗成本

(4) 岸桥移动的单位成本  $\gamma$

由于岸桥的不可交叉性，岸桥在进行水平移动时不可跨越其他岸桥，从而使岸桥的水平移动范围受到限制，移动距离变化不大，在此，将岸桥水平移动成本简化计算，取平均移动距离来规定每次移动的成本。计算公式为，岸桥移动的单位成本  $\gamma$ =启动成本+单位距离能耗\*距离。

## 5.2 实例验证

将统计得到的来港时间间隔数据进行拟合检验，得出集装箱码头的到港时间间隔服从均值为 1.5 小时的指数分布。

一方面，考虑到短周期内的数据对港口来船规律的体现有失真的可能性，另一方面，港口作业计划一般以 72 小时为周期生成滚动作业计划，因此，分别进行单周期和多周期数值实验：单周期数值实验，根据来港时间间隔的规律生成多组 72 小时内到港船舶的计划并结合船舶的相关属性得来船计划表，用以具体阐述求解问题的思路；多周期数值实验，利用多周期、连续的港口作业充分拟合港口的来船规律和港口作业，部分消除单周期数值实验对表现港口来船规律失真的可能性。

### 5.2.1 单周期数值实验

以 72 小时内到港船舶为例说明算法的具体操作。

第一阶段 遗传算法得到船舶的在港时间段 $[s(i), t(i)]$ 、靠泊位置  $b(i)$ 及服务船舶的岸桥数量，也就是蚁群算法中各个节点的时间窗、各节点所处水平横轴岸线上的位置以及同一时间段该节点通过的蚂蚁数量。文中通过多次对比得遗传算法部分的参数设置：交叉概率取 0.3、变异概率取 0.06、种群规模为 100、最大迭代数为 300 代。遗传部分求解泊位分配和岸桥分配的迭代图如图 5.1：

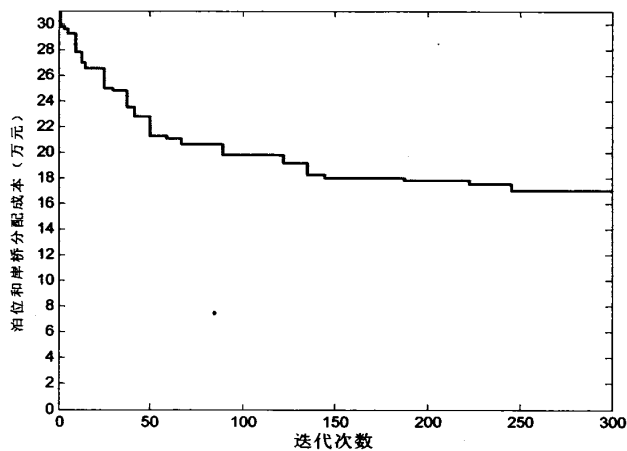


图 5.1 遗传算法收敛示意图

Fig 5.1 Convergence of genetic algorithm

第二阶段 蚁群算法得出岸桥的具体路径以及满足利用率的岸桥配置数量解的集合：在已知在港时间段和靠泊位置的情况下，在船舶靠泊或离港时，生成此时在港船舶与岸桥的概率转移矩阵 D，按靠泊位置从小到大为序，让船舶按所需岸桥数量选择距离自己较近的岸桥，选中的岸桥将会从距离矩阵 D 中划去，不参与下一艘船舶的选择，如此循环，直至作业周期内的所有船舶离港，从而完成岸桥的路径选择。

本文参考岸桥调度相关文献的优化结果，将岸桥平均利用率和岸桥单机利用率值的范围分别设置为：[34%，100%]、[25%，100%]。

以下是满足利用率的解的集合：

表 5.2 优化结果

Tab.5.2 The result of optimization

岸桥数	平均利用率	单机利用率		F1 函数值 (万元)	F2 函数值 (万元)	总成本 (万元)
		最小值	最大值			
13	48.01%	35.23%	68.35%	25.00	18.15	43.15
14	46.59%	34.46%	65.24%	26.93	13.02	39.95
15	42.10%	33.54%	67.49%	28.85	9.47	38.32
16	37.95%	33.26%	66.83%	30.78	9.02	39.80
17	36.32%	32.85%	65.30%	32.70	7.78	40.48
18	35.86%	33.79%	67.22%	34.62	6.56	41.18
19	34.55%	33.21%	66.97%	36.54	5.29	41.83
20	34.27%	32.56%	65.12%	38.47	4.08	42.55

注 1) 图中数据是由原始数据小数点后保留两位有效数字得出。

其中，目标函数 F1、 F2 与总成本随岸桥数变化的趋势图如下：

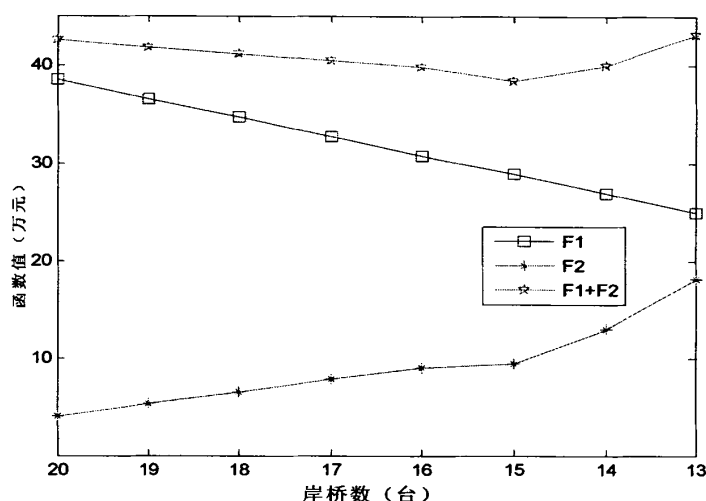


图 5.2 单周期实验结果示意图

Fig 5.2 Schematic single-cycle results

可见，随着岸桥数的减少，与岸桥数有关的港方成本 F1 目标函数的值不断减小，此外，由于岸桥数的减少港口作业的服务水平降低，与岸桥调度有关的成本不断升高。当  $n=15$  时，总成本达到最低值，随后，由于岸桥减少而引起的作业成本大幅度增加大于岸桥折旧成本的减少量而使得总成本呈上升趋势，不存在优化的空间。

### 5.2.2 多周期数值实验

为避免小规模数据对港口实际来船规律有所失真，文中利用来港概率的相关模型连续生成 300 天的来船作业表，以 72 小时为作业周期，分成 100 组进行 100 次试验，前一次试验超出 72 小时部分的作业计划为下一组试验中泊位和岸桥分配的初始状况。

实验结果证明，各个实验组中总成本都在  $n=15$  时获得最小值，但各实验组中由于来港船舶时间间隔及作业量存在差异，通过利用率进行约束后，输出的解集中岸桥数量的范围存在不同，如图，该组实验岸桥数最大值为 18，说明作业周期内作业量少，该组实验的来港作业表可验证此推测。

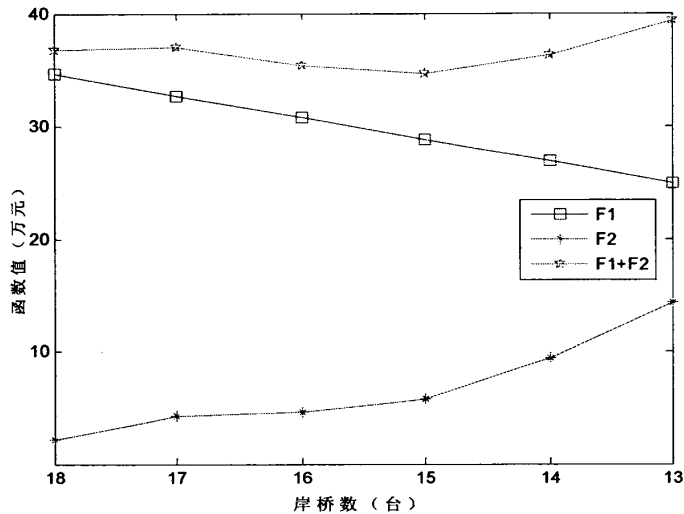


图 5.3 多周期实验示意图

Fig 5.3 Schematic multi-cycle results

文中的港口业务量大，作业繁忙，各个单周期的作业量均衡，因而岸桥的优化配置方案均为 15 台。对于作业量不均衡的港口，可根据文中的思路得出各作业量水平下的优化配置方案，结合港口各配置方案对应作业量出现的概率及对应的成本综合考虑配置的决策。

### 5.3 实例结果分析

#### (1) 泊位利用率与服务水平

泊位利用率虽然是绝对数值，但以它作为港口资源利用效果的评价指标仍有些不足。泊位利用率越高，船舶等待的可能性就越大，会增加港方和船方的成本，同时港口也会由于服务水平低而影响其在市场上的竞争力。反之，如果为了提高服务水平而扩大设施规模，则泊位有效利用率过低，设施未能有效利用，会严重影响港方的经济效益。所以合理的泊位利用率应该是建立在平衡港航双方利益的基础之上，获得成本和服务水平整体上最优。

AST 代表港口在正常情况下，平均装卸一条船所需的时间（即船在泊位的停时），而 AWT 则表示船舶的平均等待时间，指标  $AWT/AST$  为船舶等待时间占

其泊位停时的比例，可用于反映港口服务水平。

联合国贸易和发展会议在《发展中国家港口规划手册》指出“通常认为等泊位时间不宜超过装卸作业时间的 10%~50%”，AWT/AST 取值范围应介于 0.1~0.5 之间。在我国 3 个以上泊位连续布置的大型(5 万吨级以上)集装箱码头服务水平指标宜为 0.1~0.3。

表 5.3 集装箱码头泊位有效利用率取值范围

Tab.5.3 The range of the container terminal berth's utilization

AWT/AST 泊位数	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
3	0.493	0.556	0.603	0.639	0.669	0.694	0.715
4	0.575	0.633	0.675	0.707	0.733	0.755	0.773
5	0.632	0.686	0.724	0.752	0.775	0.794	0.810

注：1) 本表摘自《海港集装箱码头设计规范》JTS 165-4-2011<sup>[60]</sup>；

2) 文中岸线长 1356m，选择以泊位数为 4 的相关数据作为参考。

以 5.2.1 中的数据为例，计算泊位利用率和 AWT/AST 指标得下图：

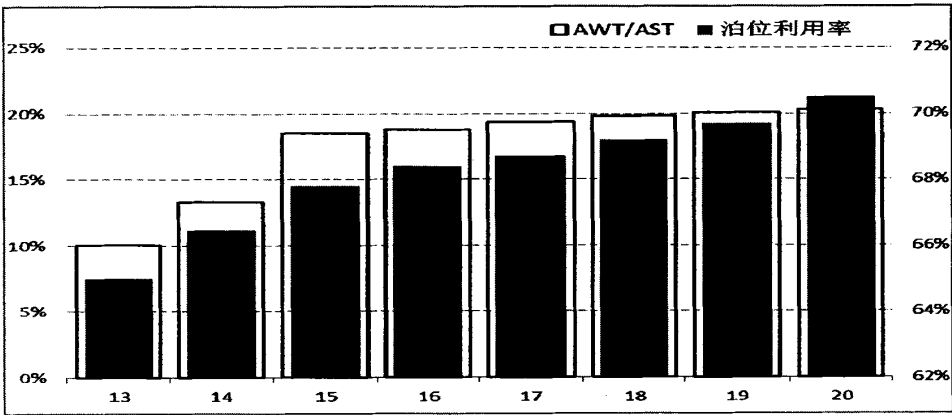


图 5.4 泊位利用率和服务水平指标

Fig 5.4 The berth utilization and the service level

结合 JTS 165-4-2011《海港集装箱码头设计规范》中的集装箱码头取值范围表，分析上图中泊位利用率与 AWT/AST 指标的趋势图可得：①岸桥数为 13~15 范围

内时，两个指标值上升速度快，说明此时，岸桥数量是泊位利用率和服务水平的瓶颈因素，随后，增加趋势减缓，说明随着岸桥数大于 15 时，由于岸线长度受到限制，岸桥数增加对服务水平和泊位利用率的贡献不大；②实验案例中，同时停靠岸线上的船舶数一般为 3 或者 4，以这个水平对照《集装箱码头泊位有效利用率取值范围表》可得，实验数据显示泊位利用率相对偏高，所以现阶段有扩充岸线的必要，另一方面也说明了调度过程的有效，能充分利用泊位资源。

### (2) 结果分析

一般，港口资源优化调度以岸桥利用率、泊位利用率和船时作业效率为评价指标，文中，岸桥的利用率已达到较优水平，泊位利用率偏高，结合文中的优化配置方案，即配置 15 台岸桥，给出以下决策建议：

① 考虑到泊位利用率与 AWT/AST 指标随岸桥的增加增幅不大，在优化配置方案的 15 台岸桥上再多配置岸桥对港口服务水平的提升作用较小，现阶段岸桥资源可能存在浪费现象，一方面，可以在自然条件允许的情况下适当扩充岸线，另一方面，文中将岸桥折旧成本和作业效率均一化，实际情况是岸桥会由于型号、使用年限等原因存在能力上的不同，可以适当将使用年限较长、岸桥维护成本较高的岸桥淘汰，降低维护成本；

② 结合 JTS 165-4-2011《海港集装箱码头设计规范》中的关于集装箱装卸桥主要技术参数的说明，本文中提到的 35 标准箱/每小时是超巴拿马型以上级别的岸桥可能的装卸效率，而现实中港口很少有能够全部岸桥此标准来进行配置的，鉴于此，现阶段本港口由于岸桥作业能力存在不足，配置 17 台也是合理的。



## 第 6 章 结论与展望

### 6.1 主要结论

本文提出针对营运阶段港口来船规律对岸桥进行优化配置的问题，建立了从设施规模和设施的调度两个层面平衡设施规模所决定的服务成本和能体现服务水平成本这两者的双层规划模型，针对具体的来港规律，给出岸桥的配置指导；结合双层规划模型和岸桥调度模型的特点，综合已有的解决这类问题的算法，提出利用遗传蚁群算法求解问题的思路。利用给出的实例，详细说明如何结合文中给出的概率验证、模型和算法解决营运阶段集装箱码头岸桥配置问题，并分析相关指标验证模型和算法的有效性，为实践决策给出指导。

首先确定港口的来船规律，来港时间间隔服从以 1.5 小时为均值的负指数分布，作业量服从均值为 800，标准差为 100 的正态分布，以该来港规律生成该港口的来船作业计划，针对该来船作业量结合泊位和岸桥的联合调度形成的作业能力进行作业量和作业能力的匹配，利用岸桥平均利用率和单岸桥利用率约束，给出该来船规律下集装箱码头岸桥应该配置作业效率为 35 标准箱/每小时的岸桥 15 台的优化配置方案。

通过泊位利用率、岸桥利用率指标以及大量的实例验证，本文提出的求解模型和算法对解决营运阶段岸桥优化配置问题有较优的效果，能够实现服务水平和服务成本之间的平衡。

### 6.2 研究展望

本文是基于调度情况下的岸桥优化配置，借鉴相关文献的最新研究方向，考虑连续泊位、泊位岸桥联合调度的模式，从船方和港方两方面的利益出发，假设集卡和场桥作业能力充足，以港口的来船规律为基础，研究集装箱码头岸边设施优化配置。

一方面，假设集卡和场桥作业能力充足，是“不平衡配置模式”下集中解决岸桥配置问题的关键，它为集装箱码头充分利用该岸桥配置下的岸边装卸作业能

力提供了保障；但另一方面，由于集装箱码头调度系统的复杂性，三大子系统之间相互联系紧密，现已有学者对岸桥、集卡和场桥进行联合调度，单独对岸桥进行优化配置，很难体现各子系统之间的协调调度关系。因此，本文可作为集装箱码头机械优化配置的第一阶段，结合本文对岸桥进行配置的思路，在作业面的调度模式下，确定集卡和场桥的配置数量。

再者，本文在对来港规律的表述方面仍有很多不足之处，对来港规律的考察耗时较长，而文中仅对港口不到一年的数据进行了统计分析，统计结果仍有待考证，此外，船型、作业量以及来港时间的相关性有待探究，而本文由于缺乏相关数据，简单的判定这三者是独立的、不相关的。

## 参考文献

- [1] 洪承礼. 港口规划与布置[M], 人民交通出版社, 2003.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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
- [6] 郝旭. 集装箱港口装卸作业资源配置研究:(硕士学位论文). 大连:大连海事大学, 2003.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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:(硕士学位论文). 上海:上海海事大学, 2006.
- [10] 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.
- [11] 周鹏飞, 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, 28(1):161-168.
- [12] 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, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20130313.0946.002.html>.
- [13] Lim A. The berth Planning Problem[J]. Operations Research Letters, 1998, 22(2-3):105-110.
- [14] Imai A. Berth allocation in a container port using a continuous location space approach[J]. Transportation Research PartB, 2005, 39:199-221.
- [15] 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.
- [16] 茆道方. 面向高效运营的集装箱码头核心资源调度研究:(博士学位论文). 上海:上海交通大学, 2012.
- [17] 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.

- [18] 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.
- [19] Chunxia Yang, Xiaojun Wang, Zhenfeng Li. An optimization approach for coupling problem of berth allocation and quay crane assignment in container terminal [J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 63: 243-253.
- [20] Imai A, Nagaiwa K, Tat C W. Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia[J]. Journal of advanced transportation, 1997, 31(1): 75-94.
- [21] 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.
- [22] Imai A, Sun X, Papadimitriou S. Berth allocation in a container port: Using a continuous location space approach[J]. Transportation Research Part B, 2005, 39: 199-221.
- [23] 陈雪莲, 杨智应. 桥吊可动态分配的连续泊位分配问题算法[J]. 计算机应用, 2012, 23(05): 1453-1456.
- [24] 魏晓东, 杨智应. 基于桥吊迁移的集装箱码头连续泊位分配算法研究[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(10): 2973-2976.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Lee Y, Chen C Y. An optimization heuristic for the berth scheduling problem [J]. European Journal of Operation Research, 2009, 196(2): 500-508.
- [30] 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.
- [31] Park Y M, Kim K H. A scheduling method for berth and quay cranes[J]. OR Spectrum,

2003, 25(1):1-23.

[32] Daofang Chang, Zuhua Jiang, Wei Yan, Junliang He. Integrating berth allocation and quay crane assignments[J]. Transportation Research Part E, 2010, 46:975-990.

[33] 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.

[34] 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.

[35] 秦进, 倪玲霖, 王承娜, 缪立新. 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.

[36] 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.

[37] 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.

[38] 交通部第一航务工程勘察设计院 编; 顾民权 主编; 顾民权, 杨桂樨, 杨希宏等本册主编. 海港工程设计手册·上册[M]. 北京: 人民交通出版社. 2001. 第 695-705 页.

[39] 杨兴晏. 海港船舶到港规律浅析[J]. 港工技术, 1986, 01: 6-13.

[40] 《运筹学》教材编写组. 运筹学[M]. 北京清华大学出版社, 2005.

[41] 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, 2012, 38(1):47-49.

[42] Jeroslow R. The polynomial hierarchy and a simple model for competitive analysis[J]. Mathematical Programming, 1985, 32:146-164.

[43] Hansen P, Jaumard B, Savard G. New branch-and-bound rules for linear bilevel programming[J]. SIAM Journal on Scientific and Statistical computing, 1992, 13:1194-1217.

[44] Bialas W F, Chew M N. On two-level programming[J]. IEEE transactions on automatic control, 1982, AC-26:211-214.

[45] 姜欢容. 遗传蚁群混合算法及其在车间调度问题中的应用:(硕士学位论文). 武汉: 武汉理工大学, 2007.

[46] Xiong Z H, Li S K, Chen J H. Hardware/Software partitioning based on dynamic combination of genetic algorithm and ant algorithm[J]. Journal of Software, 2005, 1

6(4):503-512.

[47] 吴庆洪, 张纪会, 徐心和. 具有变异特征的蚁群算法[J]. 计算机研究与发展, 1999, 36(10):1240-1245.

[48] Gaifang Dong, Guo William W, Tickle Kevin. Solving the traveling salesman problem using cooperative genetic-ant system[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(5):5006-5011.

[49] White T, Pagurek B, Oppacher F. Improving the Ant System by Integration with Genetic Algorithms[J]. In Proc of the 3rd Genetic Programming Conference. San-Francisco, USA: Morgan Kaufmann, 1998, 610-617.

[50] 毛宁. 蚁群遗传混合算法[J]. 计算机应用, 2006, 26(7):1692-1696.

[51] 伍爱华, 李智勇. 蚁群遗传算法的多目标优化[J]. 计算机工程, 2008, 34(8):200-202.

[52] 程晖, 李原. 基于遗传蚁群算法的复杂产品装配顺序规划方法[J]. 西北工业大学学报 2009, 27(1): 30-38.

[53] 张维存, 郑丕谔, 吴晓丹. 蚁群遗传算法求解能力约束的柔性作业车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(2): 333-337.

[54] 许力以, 周谊. 主编. 百科知识数据辞典[M]. 青岛: 青岛出版社. 2008.

[55] 张晓. 海上货物运输[M]. 大连海事大学出版社, 2005.

[56] 张敏. 集装箱运输业务[M]. 人民交通出版社, 2002.

[57] 蒋正雄, 刘鼎铭. 集装箱运输[M]. 人民交通出版社, 1997.

[58] 张颖超. 基于生命周期理论的集装箱港口用能结构研究: (硕士学位论文). 大连: 大连理工大学, 2013.

[59] 张凯, 刘杰强. 集装箱码头岸桥能耗分析及节能措施[J]. 交通信息与安全, 2010, 28(2): 4-6.

[60] TS 165--4-2011, 海港集装箱码头设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

## 附 录 A 蚁群算法路径优化程序代码节选

```
% best(3,Mship)是遗传算法得出的靠泊时间、位置、岸桥数量的解;
% W 为船舶作业量;Mship 是船舶数量;N=岸桥数;
Leave=zeros(1,Mship);
Leave=best(1,:)+W./best(3,:);
T=max(Leave(1,:));
Craneroad=zeros(Mship,N);
[F,IV]=sort(best(1,:));
inf=ones(1,N);iter=0;K=[];TCraneship=[];errf=0;
while errf>1e-3 && iter<200
    iter=iter+1;
    for i=1:Mship
        t=best(1,IV(i));
        b=zeros(1,Mship);
        for k=1:Mship
            if t<Leave(k) && t>=best(1,k)
                b(1,k)=k;
            end
        end
        indices=find(b(1,:)>0);
        z=length(indices);
        [H,IIV]=sort(best(2,indices));
        E=zeros(z,N);
        P=zeros(z,N);
        for j=1:z
            for k=1:N
                E(j,k)=inf(1,N)*abs(d(k)-best(2,IIV(j)));
            end
        end
        for k=1:N
```

```

        P(j,k)=E(j,k)/sum(E(j,:));
    end
end
for j=1:z
    [G,X]=sort(P(j,:));
    R=X(1:best(3,IIV(j)));
    Ncrane=max(R);
    P(:,1:Ncrane)=1;
    m=N-Ncrane-sum(best(3,indices))+sum(best(3,IIV(1:j)));
    if m<0
        R=R-abs(m);
        Ncrane=max(R);
        P(:,1:Ncrane)=1;
    end
    Craneship=zeros(z,N+1);
    Craneship(j,1)=IIV(j);
    Craneship(j,R+1)=1;
    if best(3,IV(i+1))>Leave(1,IIV(j))
        Craneroad(i,j)=Leave(1,IIV(j))-best(3,IV(i));
    else
        Craneroad(i,j)=best(3,IV(i+1))-best(3,IV(i));
    end
end
end
K=[K,z];
TCraneship=[TCraneship;Craneship];
end

route=sum(Craneroad);
[m1,n1]=min(route);
minroute=zeros(1,200);
minroute(1,iter)=m1;

```



```

if m1/T<=min(danjiliyonglv)
    N=N-1;
end
const=0.008;
inf(1,n1)=inf(1,n1)-const*m1;
while iter>1 && iter<200
    errf=(minroute(1,iter-1)-minroute(1,iter))/minroute(1,iter-1);
end
iter=iter+1;
end

```

## 致 谢

本文是在导师王清斌老师的精心指导下历时两年完成的，在论文完成之际首先向实验室的所有老师们表示衷心的感谢和崇高的敬意，并对实验室一起奋斗、给予我帮助的同学们表示我诚挚的谢意。

导师严谨的治学态度、深厚的学术造诣使我受益匪浅，在论文的选题方面给了我很大的启发，写作初期精心的指导让我理清了论文的思路，但随着研究的深入，理论上的欠缺和能力上的不足的确让我感到心有余而力不足，是老师一次次耐心细致地指导让困难迎刃而解，才使得论文能如期按质完成。

特别感谢我父母的养育之恩，感谢他们日夜辛劳，感谢他们对我的爱、理解和帮助，让我幸福地度过了学生时代。

感谢我的同学们，他们在学习和生活上都给了我很多帮助和关心，我的研究生生活也因为他们变得生动而难忘。感谢我生活中给与过我帮助和关心的人，是你们让我不断成长起来的。

最后感谢评阅论文的各位老师，感谢教导过我的老师，谨在此向诸位献上最诚挚的祝福和感谢！

作者简介

姓 名：杨玲莉

性 别：女

出生年月：1988 年 10 月

民 族：汉

籍 贯：湖北·宜昌

研究方向：物流方案设计

简历：

学习经历

2008.9——2012.6	武汉工业学院	物流管理	本科
2012.9——2014.7	大连海事大学	物流工程	硕士