

分类号: _____

密 级: _____

U D C: _____

单位代码: _____11646_____

宁波大学

硕士专业学位论文

论文题目: 集装箱码头连续泊位与岸桥联合调度优化研究

学 号: _____1211084021_____

姓 名: _____张小莉_____

专业学位类别: _____工程硕士_____

专业学位领域: _____船舶与海洋工程_____

学 院: _____海运学院_____

指 导 教 师: _____刘桂云 教授_____

论文提交日期: 2015 年 4 月 15 日

A Thesis Submitted to Ningbo University for the Master's Degree

**Optimization of Continuous Berth and Quay-crane
Integrated Scheduling in Container Terminal**

Candidate: Zhang Xiaoli

Supervisor: Professor Liu Guiyun

Faculty of Maritime and transportation
Ningbo University
Ningbo 315211, Zhejiang P.R.CHINA

April 15, 2014

独 创 性 声 明

本人郑重声明：所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得宁波大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

签名：_____ 日期：_____

关于论文使用授权的声明

本人完全了解宁波大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或者部分内容，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵循此规定）

签名：_____ 导师签名：_____ 日期：_____

集装箱码头连续泊位与岸桥联合调度优化研究

摘 要

本文针对连续泊位与岸桥联合调度问题，基于集装箱码头实际生产作业状态与现有泊位与岸桥调度问题的研究方法，提出了连续泊位与岸桥联合调度优化方法。从码头运营者的角度，以最小化惩罚为优化目标建立数学模型，并设计一种嵌套式遗传算法对该问题进行求解，最后通过数值模拟案例分析，在客户满意率最大的情况下，求得船舶的靠、离泊时间和位置及船舶的最优装卸序列。本文分别在多贝位与单贝位装卸方式下，研究连续泊位与岸桥联合调度优化方法的有效性，验证了此种优化方法在提高客户满意率的同时，缩短了船舶在港时间。论文主要研究内容开展如下：

第一，介绍集装箱码头的概况，了解集装箱码头布局、作业流程及生产特点，为后续连续泊位与岸桥联合调度问题界定奠定基础。

第二，界定连续泊位与岸桥联合调度问题，分别详细阐述连续泊位问题、岸桥分配问题和岸桥调度问题，区别泊位与岸桥分配协调问题与泊位与岸桥调度协调问题，为后续建立连续泊位与岸桥联合调度模型奠定基础。

第三，根据对研究问题的界定，建立了连续泊位与岸桥联合调度模型，以最小化离港时间延迟、偏离靠泊偏好位置以及岸桥移动三部分惩罚为目标函数。针对集装箱船两种不同的装卸方式，调度模型中分别以集装箱组和贝位为单位任务。连续泊位与岸桥联合调度模型包括一个子模型——时间模型。时间模型是为求解调度模型中单位任务作业时间提供基础，并且根据集装箱船两种不同的装卸方式，时间模型有两种——多贝位时间模型和单贝位时间模型。对这两种时间模型进行算法求解，数值计算，验证方法的可行性。

第四，根据建立的模型，设计一种嵌套式遗传算法，两个内循环分别用于求解泊位分配和岸桥分配与调度，外循环用于传递和反馈两个内循环参数。

第五，根据宁波梅山岛国际集装箱码头生产作业状况，模拟了 5 艘大型船舶停靠码头的泊位与岸桥数据。将连续泊位与岸桥联合调度优化方法应用于模拟数据中，通过数据计算，验证了本文提出的优化方法在提高码头运营效率方面有着积极的意义。

关键词：集装箱码头，泊位与岸桥，联合调度，遗传算法，客户满意率

Optimization of Continuous Berth and Quay-crane Integrated Scheduling in Container Terminal

Abstract

An optimization method of integrated scheduling for continuous berth and quay-crane is formulated based on the operations situations of the actual production of container terminal and the existing research methods for the berth and quay-crane scheduling problem. A mathematic model is built to minimize the punishment from the terminal operators' perspective, a nested genetic algorithm is designed to solve this problem. The time of docking and departure, berthing and the best loading/unloading sequence of ship are solved by numerical at the highest customer satisfaction rate in a case study. The presented optimization method is verified by two different examples (single-bay case and multi-bay case) and shows a good validity. The main works are listed as:

- (1) The layout, the work flow and the production characteristics are briefly introduced in an overview of the container terminals, which lays a good foundation of the definition of the subsequent problem of integrated scheduling for continuous berth and quay-crane.
- (2) The problems of integrated scheduling for continuous berth and quay-crane are defined. The problems of the continuous berth, the quay-crane scheduling are described in detail and the discrimination between the allocation and scheduling of the berth and quay-crane are given, which lay a solid foundation for the corresponding model for the scheduling problem of the of berth and quay-crane.
- (3) A math model for the scheduling of berth and quay-crane is formulated according to the above definitions. The objective function consists of three parts of punishment (the delay of minimum time of departure, the location's deviation of docking and berthing, and the shift of quay-crane). The scheduling model takes the container group and bay as unit task separately for two different unloading ways. A time model is included in the above mentioned model as a sub-model. The time model is formulated to solve operation time in unit task according to the corresponding unloading way and can be classified into two versions (for single-bay and multi-bay). These two model versions are also numerically verified.
- (4) A nested genetic algorithm is designed based on the formulated model. Two inner circulations are used for the berth allocation and the quay-crane scheduling, the outer circulation is used to transmit and couple back the two circulation parameters.
- (5) A case of 5 large ships' docking and berthing is simulated under the operation conditions of the International Container Terminal of Meishan Island of Ningbo by the presented optimization method, which shows the effectiveness and validity of the method for enhancing the operation efficiency.

Key Words: container terminal, berth and quay-crane, integrated scheduling, genetic algorithm, customer satisfaction rate

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	5
1.2 国内外研究现状述评	5
1.2.1 泊位分配研究	6
1.2.2 岸桥调度研究	7
1.2.3 泊位与岸桥联合调度研究	9
1.3 研究内容与创新点	10
1.3.1 研究内容	10
1.3.2 论文创新点	11
1.4 技术路线	12
2 集装箱码头生产流程及特点	14
2.1 集装箱码头布局	14
2.2 集装箱码头生产流程	15
2.3 集装箱码头生产特点	16
2.4 本章小结	17
3 连续泊位与岸桥联合调度优化问题界定	18
3.1 连续泊位与岸桥调度问题内涵	18
3.1.1 连续泊位分配	18
3.1.2 岸桥分配问题	18
3.1.3 岸桥调度问题	19
3.2 集装箱码头泊位与岸桥资源协调	19
3.2.1 泊位与岸桥分配协调	19
3.2.2 泊位与岸桥调度协调	20

3.3 本文研究范围	21
3.4 本章小结	22
4 连续泊位与岸桥联合调度模型	23
4.1 问题描述	23
4.2 假设和符号	24
4.3 调度模型	25
4.4 时间模型	27
4.4.1 问题描述	27
4.4.2 变量和模型	29
4.5 本章小结	32
5 模型算法设计及求解	33
5.1 遗传算法理论	33
5.2 时间模型求解	35
5.2.1 染色体编码和初始解生成	36
5.2.2 遗传操作	37
5.2.3 数值计算	40
5.3 调度模型求解	44
5.3.1 内循环 1: 泊位计划算法	44
5.3.2 内循环 2: 岸桥分配与调度算法	46
5.3.3 外循环算法	48
5.4 本章小结	50
6 案例研究	51
6.1 案例介绍	51
6.2 案例数据	51
6.3 案例结果分析	52
6.4 本章小结	57
7 结论与展望	58
7.1 研究结论	58

7.2 研究展望	58
参考文献	60
在学研究成果	64
致 谢	65

1 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

(1) 国内外集装箱码头运输量与技术不断提升

20 世纪 80 年代以来，世界经济一体化的快速发展带动了国际贸易总量迅速增加，据文献统计^[1]，其中 90% 的运输量是通过海运完成的，作为海陆运输节点的港口在经济发展中占据越来越重要的地位。货物的海上运输主要分为散杂货运输和集装箱运输，其中集装箱运输有着装卸效率高和适合多式联运等优点，因此，已在港口海上运输中占据了主导地位。目前，国际海上运输中，集装箱化程度已经超过 60%，其中在一些经济发达地区，集装箱化程度接近 100%。随着集装箱运输在海运中占有如此大的比重，在全球范围内集装箱港口吞吐量快速增长的情形下，提高港口的服务水平和投资回报率，来提高自身的市场竞争力，这已经成为各集装箱港口运营者最关心的问题。随着持续增长的港口吞吐量和迅速扩大的集装箱船型，增强港口功能，创建新型港口管理模式已经刻不容缓。目前，全球排名前十位港口的集装箱吞吐量 2013 年相比 2012 年在增长，且前 10 名的港口中，中国据 7 席，从货物吞吐量来分析，我国集装箱港口发展形式非常好（见表 1.1）。在提高吞吐量的同时，各大港口正在致力于不断拓展港口服务功能、提升服务质量，由粗放型向集约型转型发展。因此，研究集装箱港口问题对于推进我国海洋经济发展、提升我国港口的国际地位具有重要意义。

表 1.1 2013 年全球集装箱吞吐量前十大港口排名统计表

排名	港口	国家或地区	2013年 (万 TEU)	2012年 (万 TEU)	同比增速
1	上海	中国	3362	3252	3.3%
2	新加坡	新加坡	3260	3166	2.9%
3	深圳	中国	2328	2294	1.5%
4	香港	中国香港	2229	2311	3.6%
5	釜山	韩国	1765	1703	3.7%
6	宁波-舟山	中国	1732	1618	7.1%
7	青岛	中国	1552	1450	7.0%
8	广州	中国	1531	1474	3.8%

9	迪拜	阿联酋	1363	1327	2.7%
10	天津	中国	1300	1230	5.7%

生产调度管理是港口生产运作的核心环节，因此提高港口生产调度的工作效率，是提升港口生产运作水平的关键。很多国内外港口的生产调度模式只适合小规模生产，不适合港口大规模发展，不能提高港口的竞争力。提高港口的生产调度管理水平主要是优化集装箱生产运作系统，但由于集装箱生产运作系统具有复杂性，因此，优化生产调度研究是十分困难的和复杂的。国内集装箱生产运作系统的主要内容：泊位分配、岸桥调度、集卡调度、场桥调度和堆场空间分配等。此外，码头运营者做决策时，岸桥需要考虑船舶配载计划和装卸船顺序等问题，场桥需要考虑集装箱在堆场的箱位分配、和集装箱翻箱等问题。要提高集装箱港口的竞争力，首要改变传统生产作业模式，引入优化集装箱港口生产调度的理论与方法，提高节能降耗的能力。而我国的大部分港口在这些方面，与国外一些先进港口之间还存在较大的差距^[2]（见表 1.2）。

表 1.2 国内外港口差别对比情况

	国外港口	国内港口
岸吊	大多是人工操作的岸桥，很多港口在岸吊下设有集装箱的缓存区	基本为人工操作的岸桥，岸吊下不设缓存区
场吊	许多港口都开始使用自动化场桥（ASC）来代替龙门吊（RTG）	仅有少量的港口拥有自动化场桥（ASC）
港内运输工具	一些港口使用自动导引车（AGV）来替代人工拖车	所有港口基本使用人工拖车进行港内运输
堆场	堆场中每一个 stack 都有一个缓存区，存放的集装箱在缓存区过度，且很多港口的 stack 不超过 3 层	堆场中不设缓存区，且多数港口 stack 的高度超过 5 层
车队与岸吊的搭配工作模式	多为全船作业面或全场作业面模式	多为作业线模式
堆场计划	堆场计划一般有决策支持系统进行辅助决策，协助制定	多数港口仍凭借员工的经验制定计划
设备资源调度	调度计划一般由决策支持系统进行辅助决策，协助制定	多数港口仍进行人工调度
港口内信息管理系统	港口信息管理系统普通比较完善，能实时采集港内的运作信息	多数港口的信息管理系统不够完善。
港口相关技术支持	多数港口采用全球定位系统（GPS）、无线射频（RFID）等先进技术	多数小中型港口缺乏一系列先进技术支持

目前国外很多港口采用一种“作业面”模式，即集卡和岸桥在全岸线作业或全船作业范围内作业，这样可以充分利用港口资源，减少设备的闲置浪费，提高作业效率；而我国受土地、技术等条件所限，目前大部分港口基本还采用作业线模式，通过对讲机进行调度。作业线模式的优点是更易于港口各个部门单独快速制定决策，调度简单，易于操作，互相之间没有太大的影响，而缺点是无法从总体上统筹港口的全部资源，造成部分资源的浪费。许多国外港口还在堆场附近设有缓冲区，可以使运输工具不再需要等待场桥而导致时间浪费，提高了运输工具的利用率，同时节省了等待时间。而国内港口，土地资源的紧缺导致使用这种缓冲区是不可能的，因此，业务繁忙时，常常导致集卡在堆场内部等待场桥作业。很多国外港口在岸桥下还设有集装箱的缓冲区，用于提前存放出口箱或暂放进口箱，这样就避免集卡的等待，岸桥也可以连续工作而不必等待集卡。所以国外的研究岸桥一般都会假设岸桥的等待时间为 0，而在国内的岸桥研究中，一般都采用作业线模式，岸桥经

常会出现等待集卡的情形。因此缓冲区的有无，对于集装箱港口的操作效率有很大影响。同时，国外一些先进的集装箱港口已采用混合装卸模式，这样减少集卡和岸桥的空载。由于混合装卸模式对于港口的技术要求比较严格，而我国港口目前还没有能力达到这个水平，因此，目前还采用比较传统的先卸后装模式。对于运载工具，国外很多港口采用 AGV（自动导航车辆）。AGV 有着相对固定的行驶路线，并配有便于及时反馈其当前位置信息的 GPS 等设备，以便于实现港口全场调度和实时调度。而我国港口，由于劳动力成本比较低，且港口的自动化程度不高，因此，目前普遍使用集卡运输，且大部分按照作业线方式作业，这样就很难做到全场调度和实时调度。因此，我国的集装箱港口还有待于进一步发展，提高国际竞争力。在研究中，还要考虑国内港口与国外港口的区别，结合港口自身的实际情况，以免盲目采用国外先进技术，而造成不必要的损失。

（2）集装箱码头面临新形势与压力

随着世界一体化的发展，集装箱码头逐渐成为供应链中一个重要节点。为提高竞争力，吸引客户，各班轮公司不仅要降低营运成本，更要缩短集装箱船的周转时间，因为减少船舶在港作业时间，能够提升集装箱运输系统的生产效率。集装箱运输大量需求驱动集装箱船的日益大型化，因此，提供最优服务的同时缩短集装箱船在港时间已经成为各集装箱码头的挑战。具有较高竞争力的码头能够使集装箱船准确靠泊，快速装卸，迅速离港，一方面提高满足客户满意率，实现快速周转，另一方面也使码头能挂靠更多的船舶，增加整个港口的经济效益。

船公司选择挂靠港口，除了考虑港口的硬件条件，如地理条件和设施配备水平，还要重点考虑港口的软件条件，如技术水平和服务水平，也就是港口能否在最短的时间内提供最优质的服务。在岸桥和场桥等设施设备效率一定的情况下，对船舶进行合理的泊位分配，进而缩短靠泊时间，尽可能靠泊更多船舶；不考虑其他因素的情况下，对基于泊位计划的船舶，进行岸桥优化调度，合理分配服务某船舶的岸桥数量和特定岸桥的作业顺序，可以有效缩短船舶在港时间，两者相互协调，有效缩短码头生产作业时间。泊位、岸桥和集卡等组成码头的生产作业系统，其中岸桥和泊位直接接触船舶，是影响船舶在港时间的直接因素，因此如何实现二者之间有效的协作实现最优调度，是缩短船舶在港时间的关键，也是缩短码头生产作业时间的关键。

1.1.2 研究意义

在实际码头生产操作中，泊位分配和岸桥调度常常作为两个独立的环节。调度计划时，系统先进行泊位分配，船舶选择最优的靠泊位置及靠泊时间，而岸桥可能不能立即服务，这时需要船舶在泊位进一步等待，这样就浪费大量的时间^[3]。因此，在生产调度时，为计划周期内的到港船舶分配泊位和岸桥，应将泊位与岸桥进行联合调度。

（1）理论意义

理论研究上，本文建立连续泊位与岸桥联合优化问题的数学模型，并以基于惩罚系数的惩罚函数最小化为目标，采用改进的遗传算法求解，这为码头调度理论提供了更广的研究视角。以往对泊位和岸桥联合调度的研究，大多数是岸桥数量的分配问题，而针对具体岸桥的操作很少研究，本文泊位与岸桥联合调度研究中，包含了根据船舶的配载情况，合理安排岸桥的作业顺序，优化了连续泊位与岸桥联合调度，模型建立时，在原有研究的基础上补充、添加了更多的约束条件，完善了泊位与岸桥调度模型，更细化了岸桥的研究，更接近实际生产情况。

（2）实践意义

集装箱码头运营者在服务水平和自身的运营成本之间做协调，制定科学合理的调度方案，提高码头工作效率，使集装箱码头在激烈竞争中提高竞争力。泊位和岸桥作为码头最昂贵的资源，其调度计划会对船舶的作业效率产生关键性的影响。在我国集装箱码头中，岸线资源是稀缺的，岸桥是昂贵的，并且泊位具有较高的建设成本，码头运营者希望充分利用这些昂贵的码头资源。在全球经济危机的大环境下，大部分码头为争夺吞吐量，导致竞争愈演愈烈。如何合理地分配泊位和岸桥，最小化船舶在港时间，是港口得以在逆境中生存和发展的根本。当经济回升时，随着贸易量的增加，挂靠的船舶数量快速增长。合理地安排泊位与岸桥，可以减少船舶的周转时间，使码头挂靠更多船舶，获取更多的利润。而泊位与岸桥直接影响船舶在港时间，并且对于连续泊位的研究更具有经济价值，因此对于集装箱码头连续泊位与岸桥动态调度的研究具有重大意义。

1.2 国内外研究现状述评

目前，全球有百余个国家和地区进入海运集装箱运输网，研究集装箱码头的装卸问题对于提升码头服务能力，提高运营效率，进而提升全球物流效率具有重要意义。因而，国内外很多学者开始针对码头泊位与岸桥调度问题

进行研究，提出了很多具有实践指导意义的优化方法。同时，一些成熟的理论研究已经开始尝试应用于国内外一些比较先进的码头实际生产作业中。

1.2.1 泊位分配研究

集装箱码头生产调度中，首要环节是要进行泊位分配。泊位与码头中的其他资源相比，泊位资源在我国是很紧缺的，且泊位的初始投入成本也很高。因此，在国内码头管理者很注重泊位资源的合理利用，有效的利用现有泊位资源，提高码头的靠泊能力。泊位分配是对需要靠泊的船舶安排靠泊位置和靠泊时间。

泊位分配要考虑的方面很多，如船舶的靠泊位置、靠泊时间、船型、装卸箱量等。现在大多的研究者依据特定目标和不同的约束条件，把泊位分配划分为多种不同组合的优化问题。①根据泊位的特点分为离散泊位分配和连续泊位分配。离散的泊位分配，对于每一泊位，在特定的时间里只允许一条船舶停靠，并以先来先服务（FCFS）的原则进行泊位分配，而这种分配方式对码头泊位的利用率较低（Lai K K, Shih K, 1992）^[4]。为最大限度提高泊位的利用率，提出了连续泊位分配，连续泊位分配把泊位分配问题看成二维装箱问题（packing problem），并提出了一种有效的启发式算法，利用图形描述船舶的停靠问题，最小化船舶所占用的码头泊位岸线的总长度，此时靠泊的船舶只要满足到港船舶的物理条件（水深和长度）的限制即可，使得模型建立更简便（Lim A, 1998）^[5]。②根据船舶到达情况分为静态泊位分配和动态泊位分配。静态是指在制定调度方案以前，所有要靠泊的船舶都已处于等候状态，而动态是在制定调度方案时，仍有船舶尚未到港，处于陆续到港状态（王军、李卓蓉，2011）^[6]。在此认识的基础上，不少研究者提出了静态泊位分配模型，Imai et al^[7]对离散的静态泊位分配进行研究，内容不仅包括最小化船舶的等待时间和作业时间，而且还研究船舶服务顺序以及到达顺序的背离程度，同时，将这类问题看成经典指派问题。Hansen 和 Qguz^[8]提出更简单的MIP模型对离散泊位进行求解。Imai et al^[9]对最小化加权的拒绝船舶数进行研究，定义拒绝船舶为，如果不能在船舶的截止时间之前完成相应服务，码头可以拒绝该船舶。在静态泊位分配研究的基础上，提出了一种动态泊位分配的遗传算法（Imai 等，2003）^[10]。Guan 和 Cheung^[11]采用拉格朗日松弛和树搜索的方法，研究以总的加权在港时间为目标的问题。Park 和 Kim^[12]采用次梯度方法，Kin 和 Moon^[13]采用了模拟退火算法，同时研究以最小化船舶的延迟

为目标的优化问题。Lim^[14]以最小化到达船只所需的最大岸线长度为目标研究泊位分配问题，其中假定靠泊时间由到达时间确定，文献（2009）[15]和[16]则是对 Lim 研究的继承。③根据调度模型要完成的目标可包含很多模型：时间最小模型（Imai, Sun, Nishimura 等，2005）^[17]、成本最小模型（Park, Kim, 2003）^[18]等都是以港口尽量加速运转，只考虑以缩减某一因素为目标来建立模型的，但这种作业组织方式只能体现利益主体的部分追求，而忽略了因此产生的负面影响，其存在着明显的局限性。李强、杨春霞等^[19]对靠泊位置、靠泊时刻、装卸速度的综合调整以建立混合型整数规划模型，由于考虑了因缩短船舶在港时间而产生的额外费用，可以解决缩短船舶在港作业时间而产生的负面效应，使得生产调度的优化结果更为贴近实际，可以解决生产调度均衡优化问题。Mihalis M. Golias（2009）等^[20]针对客户服务需求的多样性，基于多目标方法建立模型，求解离散、动态泊位调度问题。由于实际生活中有许多不确定的因素（大风浪天气、船舶推迟到港等）影响码头的正常运营。李强（2009）^[21]将“均衡优化”引入港口企业的生产调度中，实现了集装箱码头泊位生产调度均衡优化，提高了泊位生产调度的科学性、均衡性和应变能力。泊位分配的实际作业过程中，在任务计划阶段，对于船舶到达的不确定性，引出了以缓冲时间长度为测度的鲁棒性指标（孙彬，2010）^[22]，用以缓冲短暂时间的船舶到达的延迟，但鲁棒泊位分配方案的鲁棒性也具有一定的局限性，船舶的延时情况的发生是必然的。Lu Zhen（2011）^[23]等分析了船舶到达和服务时间不确定情况下的泊位分配问题，建立了两阶段决策模型用于初始调度和修复调度，并给出了模型求解的启发式算法。Mihalis Golias 等（2014）^[24]用启发式算法研究了泊位调度问题。

1.2.2 岸桥调度研究

岸桥分配是指根据船舶的作业量，把岸桥合理的分配给每条船舶，满足船舶装卸要求。码头运营者希望减少岸桥的启动次数和水平移动时间，提高岸桥的利用率，减少岸桥作业成本。在岸桥分配时，必须已知船舶的靠泊计划——靠泊位置和靠泊时间、码头可使用的岸桥数、船舶的作业量、船舶可同时作业的岸桥最大数和最小数等条件，才能为每艘船舶分配岸桥。

岸桥的分配只是考虑岸桥数量的分配，而没有对特定的一个岸桥进行作业任务的调度。岸桥调度是在岸桥分配的基础上，考虑船舶中任务的作业顺序等因素，对每个岸桥作业的先后进行排序。岸桥调度、岸桥分配和船舶配载计划三者共同决定了船舶上集装箱的实际装卸顺序。在岸桥调度问题中，

必须先卸箱后装箱，每个任务只能被一台岸桥服务，一台岸桥一次只能服务一个作业任务，根据船舶配载计划确定集装箱装卸顺序。岸桥调度问题的目标通常是最小化岸桥作业时间，其解决方案一般要给出每个任务在某台岸桥的起始作业时间。

这里所述的岸桥调度包括岸桥分配和岸桥调度。岸桥调度是在泊位调度之后生成，在集卡分配之前，一般是要满足泊位调度计划和集卡分配为目标，但是很少学者对单独的岸桥进行研究，且大多研究岸桥的混合装卸问题。Daganzo (1989)^[25]首次基于多船情况对静态、动态岸桥调度进行研究，但此模型只适用于有限的几条船。Peterkofsky 和 Daganzo (1990)^[26]针对上述研究的不足，对于多船情况提出了一种分支定界法来求解模型。Bish (2003)^[27]对堆场位置、集卡与岸桥联合调度进行优化，但是没有考虑集装箱在船舶上的位置因素对岸桥作业顺序的约束。Kim 和 Park (2004)^[28]结合实际情况，把任务分为装或卸，并将作业任务时间设为确定值，提出了一种基于时间窗的岸桥调度方法，把同一贝内的集装箱组作为一个任务单位。Lee, Wang 和 Miao (2008)^[29]提出基于间舱的岸桥调度方法，并运用遗传算法求解间舱作业排序，调度方法中考虑了岸桥间的不干涉约束。韩笑乐等 (2009)^[30]综合考虑岸桥实际作业中的特殊约束，建立了基于连续贝的混合装卸模型，这种混合装卸模式下生成的预定义作业顺序考虑了甲板的约束。李晨等 (2010)^[31]考虑了岸桥间不干涉及安全距离和甲板开闭的约束等，在混合装卸的模式下，减少岸桥移动距离和均匀化岸桥负荷。Zhu, Lim (2005)^[32], Liu, Wan 和 Wang (2006)^[33]也研究了岸桥的调度问题，但是均未考虑岸桥的空载问题。为降低岸桥操作过程中的空载率，(Goodchild, 2005)^[34]提出了双循环操作方法。Goodchild 和 Daganzo (2006)^[35]扩展了岸桥的双循环调度，提出了一种基于单一舱口的双循环调度方法，并提出了一种 Johnson's rule，用于堆垛装卸排序。Der-Horng lee 等(2008)^[36]在考虑了岸桥的不干涉约束条件，建立了混合整数规划模型，提出了用遗传算法来解模型获得近似最优解，这里是针对单个船问题研究。Haipeng Zhang 和 Kim (2009)^[37]从单一舱口下的双循环调度扩展到多舱位下的岸桥双循环调度，设计了一种混合启发式算法求解多舱位下的集装箱堆垛装卸顺序。靳志宏，李娜 (2011)^[38]在已知泊位计划的情况下，也就是已为每艘船舶安排了靠泊时间和靠泊位置，以最大限度地减少计划期内所有船舶的滞港时间为目标，

设计优化方法，获得有限的岸桥资源在船舶上的装卸任务间的动态分配与排序。在集装箱船舶大型化的趋势下，为岸桥调度增加了难度。S.H.Chung 等（2012）^[39]针对大型集装箱船舶研究岸桥的分配和基于贝位岸桥任务间的调度，并提出了改进的遗传算法求解问题。Ali Diabat 等（2014）^[40]研究了岸桥分配和调度问题，用遗传算法求解。Yi-Min Fu 等（2015）^[41]用拉格朗日松弛算法研究了集装箱码头岸桥集成分配与调度问题。

1.2.3 泊位与岸桥联合调度研究

杨春霞（2010）^[42]针对泊位与岸桥调度联合优化问题，根据特定的优化策略，为一系列到港船舶安排靠泊时间、靠泊位置及服务的岸桥数目。与先泊位分配后岸桥分配不同，泊位与岸桥联合调度是把两者当成一个整体，充分反映泊位与岸桥的相互影响及相互制约关系，更符合码头生产的实际情况。Li(1998)^[43]最小化船舶在港时间为目标，把泊位与岸桥分配问题看成一个并行调度问题建模求解，而 Guan(2002)^[44]在此基础上建立了以最小化带权重的任务完成时间为目标的模型。韩俊等（2008）^{[[45]-[46]]}研究泊位与岸桥联合调度问题，应用免疫遗传算法求解模型，同时假设中所有为一艘船舶服务的岸桥必须同时结束，但研究的只是离散型泊位调度。Ak(2006)^[47]在以往泊位与岸桥联合调度研究的基础上，引入了禁忌搜索法求最小在港时间和避免船舶延迟离港的惩罚费用。Liang(2009)等^[48]研究泊位与岸桥同时调度问题，以最小化总岸桥工作时间、等待时间和延迟时间为目标函数，并采用遗传算法结合启发式算法求解模型，得出靠泊位置、时间和分配给每艘船舶的岸桥数量。Birger(2011)^[49]在研究连续泊位与岸桥分配的基础上，考虑了对岸桥作业时间超长的惩罚、偏离最佳靠泊位置的惩罚和岸桥移动的惩罚，引入三种惩罚因子，同时加入了滚动时间窗思想船和船优先级。乐美龙^[50]建立了连续泊位与岸桥分配模型，并提出了 Memetic 算法求解模型。Chunxiao Yang(2012)等^[51]提出一个有效方法解决在多用户集装箱码头泊位与岸桥分配问题，首先，根据泊位与岸桥的交互关系，建立泊位与岸桥的耦合模型，然后，设计改进的遗传算法，算法中包含两个解决泊位分配与岸桥分配两个子问题的内循环，和寻找最优解的外循环。桂小娅（2013）等^[52]针对集装箱码头泊位与岸桥两类资源分配问题，提出以最小化总在港时间为目标，建立连续泊位和岸桥集成调度的数学模型，用于决策泊位与岸桥分配计划，并提出一种双层循环迭代算法求解模型。以上都是研究泊位分配和岸桥分配联合调度，只是针对研究需要为船舶服务的岸桥数量，而对具体的岸桥作业顺序很少研究，

集装箱码头实际生产调度中的泊位分配和岸桥调度计划一般都给出明确的作业任务，给出具体的岸桥作业顺序。赵坤强等^[53]首先建立一个泊位分配模型，用于分配泊位和岸桥数量，然后建立一个岸桥调度模型，对具体岸桥进行调度。余刘海，庞洪静^[54]在计划周期内，研究泊位分配与岸桥在任务间的动态调度，建立基于任务的连续泊位与岸桥协调调度模型。Yavuz B(2013)^[55]等研究泊位分配、岸桥分配（数量）和具体岸桥调度问题，并设计了一种能求解大规模问题的算法。彭丽姣，韩晓龙（2013）^[56]为最小化船舶在港时间和提高客户满意率，建立了以最小化延迟完工任务量、偏离最佳靠泊位置和岸桥船舶间移动的惩罚为目标的泊位与岸桥调度模型。杨华龙等（2014）^[57]建立了以最小化船舶在港时间和最大化岸桥利用率为目标的连续泊位与岸桥联合调度模型。蒋大培等（2014）^[58]研究泊位与岸桥的集成分配问题，建立以最小化偏离偏好泊位的泊位数和在港时间最短为目标的模型。吕赛赛等（2014）^[59]依据作业量确定船舶的优先权，建立基于船舶优先权的泊位与岸桥耦合优化模型。

综合分析国内外学者对于集装箱码头泊位、岸桥调度等领域的研究成果，可以发现国内外针对泊位与岸桥问题的研究非常丰富，同时利用研究的理论成果指导生产实践，对集装箱码头生产作业有着重要的贡献。而对于泊位与岸桥联合调度问题的研究很少，且只存在理论研究之上，一般不能用于集装箱码头的生产调度。此外，现有的泊位与岸桥联合调度研究普遍存在以下一些问题：

- 1) 现有的研究大多是对岸桥数量分配的研究，而对具体岸桥在任务间调度研究很少，在实际生产计划中，必须合理安排特定岸桥的作业顺序，船舶才能快速、有效的离开港口。
- 2) 现有的研究大多只考集装箱的装载或卸载操作，而对于具有甲板约束的混合装卸任务的泊位与岸桥联合调度的研究很少。

1.3 研究内容与创新点

1.3.1 研究内容

1.连续泊位与岸桥调度研究问题的界定

根据泊位与岸桥以往的研究假设，结合码头的实际情况，给出本文的研究范围。本文研究的问题是基于连续泊位的岸桥动态调度。在计划周期开始时，有尚未到达港口的船舶；研究的泊位是连续的，没有明确的泊位划分，

只要岸线长度和深度允许，船舶可以挂靠岸线的任意位置；研究的岸桥是动态的，可以在不同的船舶间调度；研究的重点是泊位分配与岸桥调度的联合优化问题，把泊位和岸桥作为一个统一的整体研究，从整体上优化调度，提高客户满意率。本文所研究的岸桥调度不是为船舶分配岸桥数量，而是给特定的岸桥分配作业任务，根据集装箱船舶的配载情况，制定合理的装卸顺序。

2. 集装箱码头连续泊位与岸桥联合调度优化模型

根据问题的界定，结合泊位与岸桥的作业流程，提取关键因素，将问题的文字描述转换成数学语言，建立一个连续泊位与岸桥联合调度优化模型。为便于研究，本文提出一些合理的假设条件，并且该模型能较准确地描述集装箱码头的实际运作特性。为提高客户满意率和缩短船舶在港时间，模型的目标函数引入惩罚函数，包括对船舶离港时间延迟的惩罚，船舶靠泊偏离偏好位置的惩罚，船舶作业中岸桥数量变动的惩罚等。

3. 模型求解算法

连续泊位与岸桥调度是 NP 难问题，本文采用遗传算法求解模型。由于研究问题的复杂性，不易于设计染色体编码，本文设计一种嵌套式遗传算法，把泊位调度和岸桥调度分解成两部分求解计算，再通过一个外循环传递和反馈调度结果。

4. 案例分析研究

根据模型与算法，模拟集装箱码头泊位与岸桥生产作业过程，应用 Matlab 软件求解模型，输出结果图形，与传统作业情况比较、分析此模型与算法的有效性。

1.3.2 论文创新点

论文对连续泊位与岸桥联合调度问题进行系统的研究，在问题分析、模型构造和算法设计方面融入了一些新想法，构造了一些新方法，这主要体现在以下几个方面：

1、研究内容的创新。现有对泊位与岸桥调度研究的文献，基本是对岸桥数量分配的研究，而针对具体的岸桥任务间调度的研究很少，本文对连续泊位与岸桥调度进行系统的研究，并研究特定岸桥在混合装卸任务间进行调度。本文在集装箱码头泊位与岸桥联合调度优化研究模型的建模时，还引入了码头服务损失的思想，运用惩罚函数分析港口的服务损失，目的是提高客户满意率。

2、求解算法的创新。本文将理论较为成熟的遗传算法应用于连续泊位与岸桥联合调度优化研究中，并适当改进算法。由于研究问题的复杂性较高，算法使用嵌套式循环算法，即，大循环包含两个小循环，遗传算法嵌套在循环算法中。

1.4 技术路线

本文基于研究的背景、目的和意义，根据泊位与岸桥研究的现状，深入剖析集装箱码头连续泊位与岸桥联合调度问题的特点，通过对现有文献的阅读分析，基于传统的集装箱码头泊位与岸桥调度问题，探索新的调度优化方法。为提高客户满意率，引入了惩罚函数以惩罚延长在港时间的客户不满意因素，建立基于惩罚的数学模型，并提出相应的求解算法。根据这一研究思路，本文的技术路线如图 1.1。

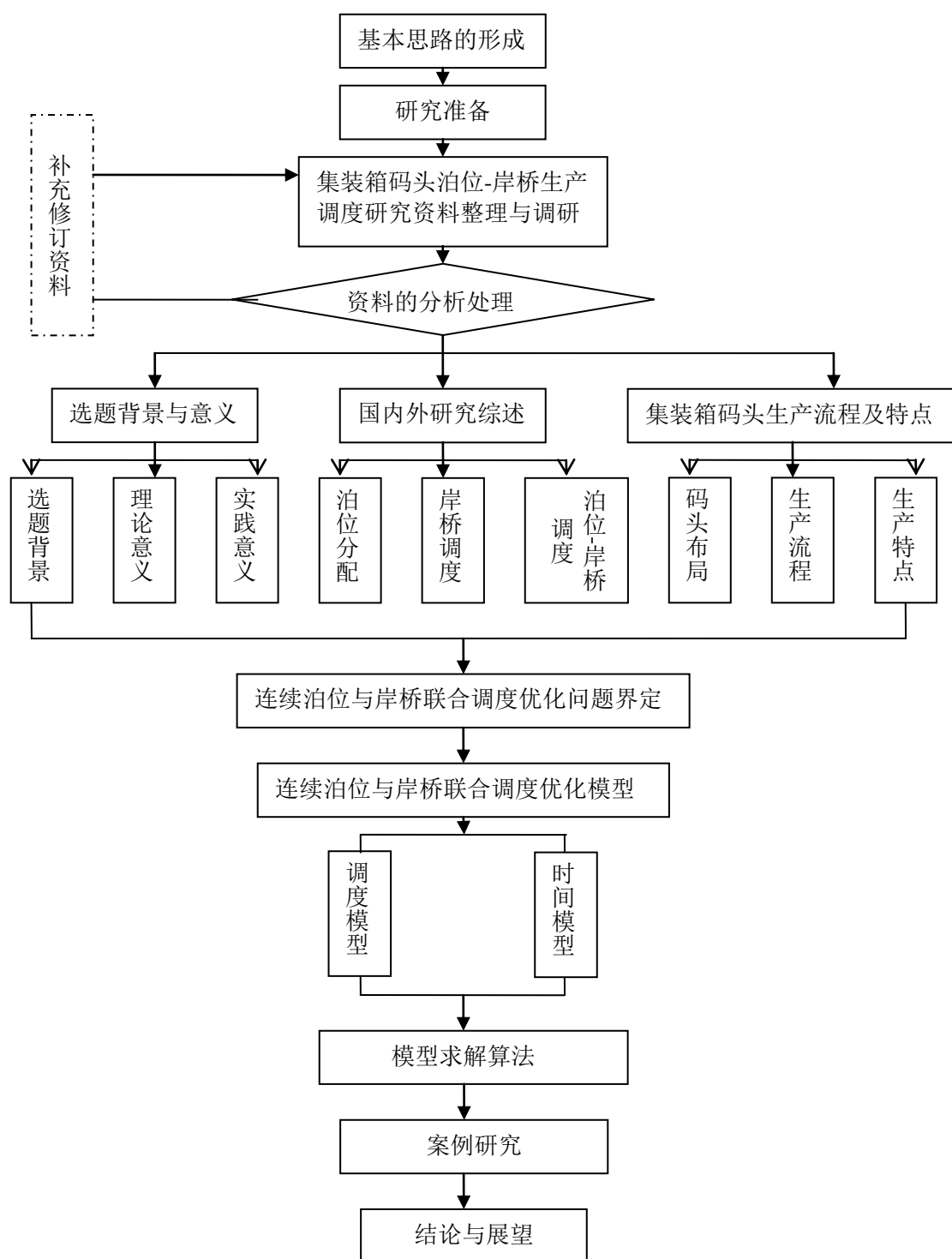


图 1.1 技术路线图

2 集装箱码头生产流程及特点

2.1 集装箱码头布局

集装箱码头是集装箱船舶挂靠、集装箱中转的场所，是集装箱运输中，水路和陆路运输的连接点，在整个水陆联运过程中，起着货物中转多式联运枢纽等作用，为国际生产、贸易做贡献。图 2.1 为宁波北仑国际集装箱码头有限公司平面布局图。集装箱码头主要的资源：泊位、堆场、岸桥、场桥、运输设备（集卡）及其他辅助设施等。

(1) 泊位。泊位位于码头前沿。船舶到港后，根据作业计划，为船舶分配将要靠泊泊位以装卸集装箱。泊位有离散型和连续性，其中离散型泊位有长度和水深等物理属性，但连续型泊位没有长度限制，只要船舶满足其他条件，就可以任意停靠。

(2) 堆场。堆场是暂存集装箱的场所，一般包括前方堆场和后方堆场。前方堆场主要用于缓冲岸桥和集卡的作业，减少等待时间，加速船舶集装箱装卸速度。后方堆场主要用于重箱或空箱交换、保管和堆存。堆场区域通常划分为多个不同用途的小区域，如进口箱区和出口箱区的划分是为了减少捣箱操作。

(3) 岸桥。岸桥是码头前沿用于集装箱装卸的机械设施。岸桥负责装船时将出口箱从集卡车上搬上船舶，或卸船时将进口集装箱从船舶上搬到集卡。由于价格昂贵，并且岸线长度限制，码头配备的岸桥相比其他机械设施较少。目前，码头常用的是岸壁式岸桥(Ship-to shore crane)。此外，常见的还有双小车岸桥、双 20 英尺岸桥、双 40 英尺岸桥、三 40 英尺岸桥。

(4) 场桥。场桥是堆场中装卸集装箱的机械设施。场桥将堆放在箱区内的待提走集装箱搬运到集卡车上，或将集卡上待堆存集装箱搬运到箱区内。场桥主要包括正面吊、叉车和龙门吊等，其中龙门吊是堆场中常用的机型。龙门吊分为轨道式和轮胎式，轨道式自身定位能力较强，但只能在所设轨道的一定范围内作业，轮胎式能够在不同箱区作业，但不易于自身定位。

(5) 集卡。集卡是集装箱卡车的简称。集卡包括外部集卡和内部集卡。外部集卡进出闸口，内部集卡只能在码头内作业。外部集卡将出口箱从闸口外运输到堆场内部，或将进口箱从闸口内运输到闸口外部。内部集卡将出口箱从堆场箱区运输到码头前沿，或将进口箱从码头前沿运输到堆场箱区。

(6) 其他辅助设施。码头其他辅助设施包括货运站、控制塔、闸口、和集



2.2 集装箱码头生产流程

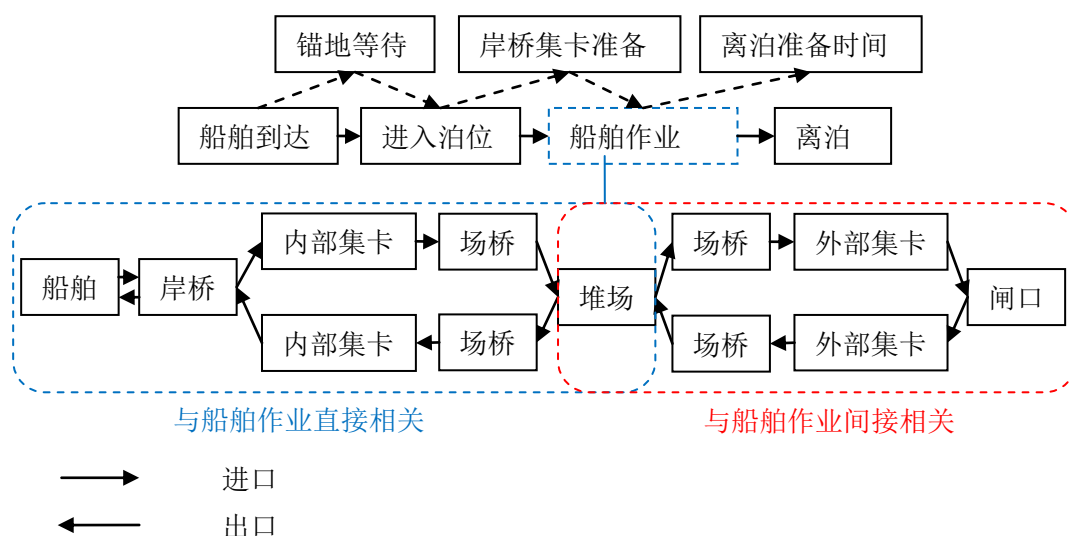


图 2.2 集装箱码头一般作业流程

集装箱船舶在到达港口之前，码头会制定预计划作业表，在到达码头以后，首先在锚地等待靠泊，一旦满足靠泊条件（如有空闲泊位且满足船舶长度和水深等条件）则船舶靠泊。船舶靠泊后等待岸桥和集卡准备就绪，才能开始集装箱的装卸作业。对于服务于船舶的作业过程，可以分为两个部分：与船舶作业直接相关过程和与船舶作业间接相关过程。与船舶作业直接相关的是指整个作业过程与船舶作业直接相关，要等到这一过程的作业基本结束以后，船舶才可以离开。与船舶作业间接相关的是指整个过程是船舶作业的前奏或后续过程。进口作业过程，进口箱从船舶上卸下并堆存在堆场之后，通过外部集卡把进口箱从堆场运输到堆场外部，出口作业过程，船舶到港之前，出口箱需先通过外部集卡把出口箱从堆场外部运输到堆场内并储存在堆场中待船舶装载。

2.3 集装箱码头生产特点

目前，为顺应经济全球化发展，90%货物运输都是海上运输，为便于装卸货物，大部分使用集装箱船运输。集装箱码头是集装箱转运的节点，为顺应集装箱船大型化发展的要求，各港口经营者竞相加强集装箱码头的建设，提高装卸系统和管理系统的高效化。集装箱码头区别与普通非集装箱码头有如下特点：

（1）码头大型化和深水化

随着船舶运输的集装箱化、大型化和专业化发展，港口企业也开始不断发展码头，向着大型化和深水化发展。码头堆场和泊位不断扩大，码头前沿的水深不断增加，岸线长度不断延长。因此，对集装箱码头的管理要求越来越高，

（2）生产的连续性

到达码头的集装箱，不能停留在码头很长时间，要尽快的转运出去。集装箱码头要求生产必须迅速、准确、及时，以满足客户的需求。因此，为缩短集装箱在港时间，就要求集装箱码头的生产必须保持连续性。

（3）装卸组织的协作性

集装箱码头是集装箱水路转运节点，其本身又是一个技术、维修的联合体，是一个完整的生产系统。从系统外部来说，其生产组织要同检验检疫、各代理和企业、保险、铁路交通等部分协作，因此，需要在时间和空间上合理规划生产；从系统内部来说，码头生产是一个有机的整体，需要人员、机械设施和库场等部门协调运作，从整体角度优化生产的各个环节，以提高码头的作业效率。

（4）码头生产调度集成化

集装箱码头生产作业需要岸桥、集卡、场桥等设施设备高度协调调度，以确保集装箱码头具有较高的生产效率。集装箱码头生产局部调度时，由于考虑的因素只是局部的，无法使码头生产调度达到全局最优。为减少船舶在港时间，使船舶尽快离港，在集装箱码头生产调度中，码头运营者一般着重于岸桥和集卡车辆的集成一体化。

（5）码头管理信息化

集装箱码头生产中，码头运营者开始采用一切可以利用的信息技术来提高码头的信息化程度，以提高生产效率，合理利用码头内一切资源。国内一些大型集装箱码头一般都有码头信息管理系统，用于提高生产效率，节省劳动力，实现码头的现代化管理。国内外一些知名的码头系统软件，一般都采用电子数据交换、GPS 定位技术和无线传输技术等，实现码头高速运作。

2.4 本章小结

本章介绍了集装箱码头的概况，描述了一般的集装箱码头布局，总结了集装箱码头的一般作业流程，概括了一般集装箱码头的主要生产特点，为后续连续泊位与岸桥联合调度问题界定奠定基础。

3 连续泊位与岸桥联合调度优化问题界定

3.1 连续泊位与岸桥调度问题内涵

3.1.1 连续泊位分配

由于港口岸线资源比较紧缺，相比与集装箱码头的其他设施，泊位的建设成本是很大的，泊位调度是集装箱码头管理运作中一个重要环节。合理安排泊位资源，提高靠泊能力，加快船舶的周转速度，是大部分码头管理者追求的运营管理策略。一般集装箱船舶靠港之前，码头会综合考虑船舶的技术因素和岸桥等因素的基础上为船舶安排最佳的泊位。泊位分配是为需要靠泊的船舶安排靠泊位置和靠泊时间。根据泊位的物理状态，可将泊位分为连续泊位分配和离散泊位分配。

离散泊位分配中，研究的泊位是离散的，即假设岸线被分割成若干个小块。根据船舶的物理特性，如长度、水深条件等，把某一泊位分配给某一船舶，在这个船舶服务期间，此泊位是不能再停靠其他船舶。由于船舶长度无法和泊位长度完全契合，这种类型的泊位，浪费太多的泊位资源，资源利用率不高。连续泊位调度中，整个岸线都是泊位，泊位是连续的，只要空间允许且满足船舶水深条件，船舶可以在任意位置停靠。根据计划周期开始时船舶是否全部抵港，可将泊位调度分为静态调度和动态调度，因此，连续泊位问题可分连续泊位静态调度和连续泊位动态调度。静态调度研究时，可以不考虑船舶的到达时间，假设计划周期开始时船舶都已经在锚地等待，这种调度只要为船舶安排最佳的靠泊位置。动态调度研究中考虑了船舶的靠泊时间，在研究的计划周期内，仍有一些船舶陆续到港，这时，根据船舶的到港时间和船舶的一些属性，为船舶安排最佳靠泊时间和靠泊位置。

3.1.2 岸桥分配问题

岸桥分配问题是根据船舶的大小和将要作业的集装箱量，将岸桥合理地分配给船舶，通过减少岸桥的操作时间和贝位间移动时间，最小化岸桥的工作时间，提高岸桥利用率。岸桥分配问题的研究是在已经指定好靠泊计划之后，同时要满足岸线上有可供分配的岸桥集合，已知每艘船舶的装卸集装箱数量，和已知因船公司要求和船舶大小限定的可同时作业的岸桥最小和最大数量。这里的岸桥分配问题只是对岸桥数量的分配，可以按每艘船舶的集装箱装卸量，把岸线上可工作的岸桥以一定规则，分配到每一艘船舶，也可以

针对一艘船舶，把集装箱划分为不同的贝区，按一定规则把岸桥分配到每一个贝区，依次类推下去。岸桥分配问题只涉及到岸桥数量的分配，而不涉及到具体岸桥的分配，研究的是岸桥静态问题。

3.1.3 岸桥调度问题

岸桥调度问题是在岸桥分配的基础上，研究岸桥作业整个动态过程，考虑每一个岸桥的作业顺序和运动路线，这些决定了不同的装卸模式。岸桥调度需要与集装箱船舶的配载计划、岸桥分配结合，来研究集装箱船舶的实际装卸顺序。岸桥调度问题研究需要已知船舶的集装箱装卸任务集合，服务于此船舶的岸桥集合，还要有此船舶的配载计划，根据船舶的配载计划可以从中获得一些任务的装卸的预定义约束，如先卸箱后装箱等。由于岸线上的岸桥在一条固定的轨道上，岸桥调度时，还需要考虑一些约束条件，如，岸桥不能交叉跨越作业，两个相邻岸桥之间有一定安全距离，每一个任务只能有一个岸桥作业，一个岸桥一次只能服务一个任务等。

岸桥调度中，任务为研究问题的最小单元，是岸桥作业的最小量，也就是说一个任务只能由一个岸桥作业，中途不能停止，直到全部完成作业，岸桥才能进行下一个任务。装卸任务的划分可以有多种方式，如，贝区（包含若干个贝位），单个贝位，集装箱列（在一个贝位中的一列集装箱，也称堆垛），集装箱组（在一贝位中相邻的若干列集装箱，具有相同目的港），单个集装箱等。

3.2 集装箱码头泊位与岸桥资源协调

泊位与岸桥资源的联合调度优化的研究是大多码头优化问题研究者目前的研究热点之一。由于研究的重点不同，泊位与岸桥的研究多种多样。根据近几年研究者对泊位与岸桥的研究，大致可以分为泊位与岸桥分配协调、泊位与岸桥调度协调

3.2.1 泊位与岸桥分配协调

泊位与岸桥分配协调调度的研究很多，由于这种协调调度易于研究、理解，许多研究者都乐于以不同的形式、不同着重点研究这类问题。泊位与岸桥分配问题描述：船舶到港后，码头管理者为增加码头运营效益，根据到港船舶的有关信息，以及码头装卸的优化策略，为船舶分配最优的靠泊位置和岸桥。这种模式的分配协调研究泊位的分配和岸桥数量的分配，泊位分配与岸桥分配是密切联系的、相互制约的。图 3.1 为泊位与岸桥分配调度过程。

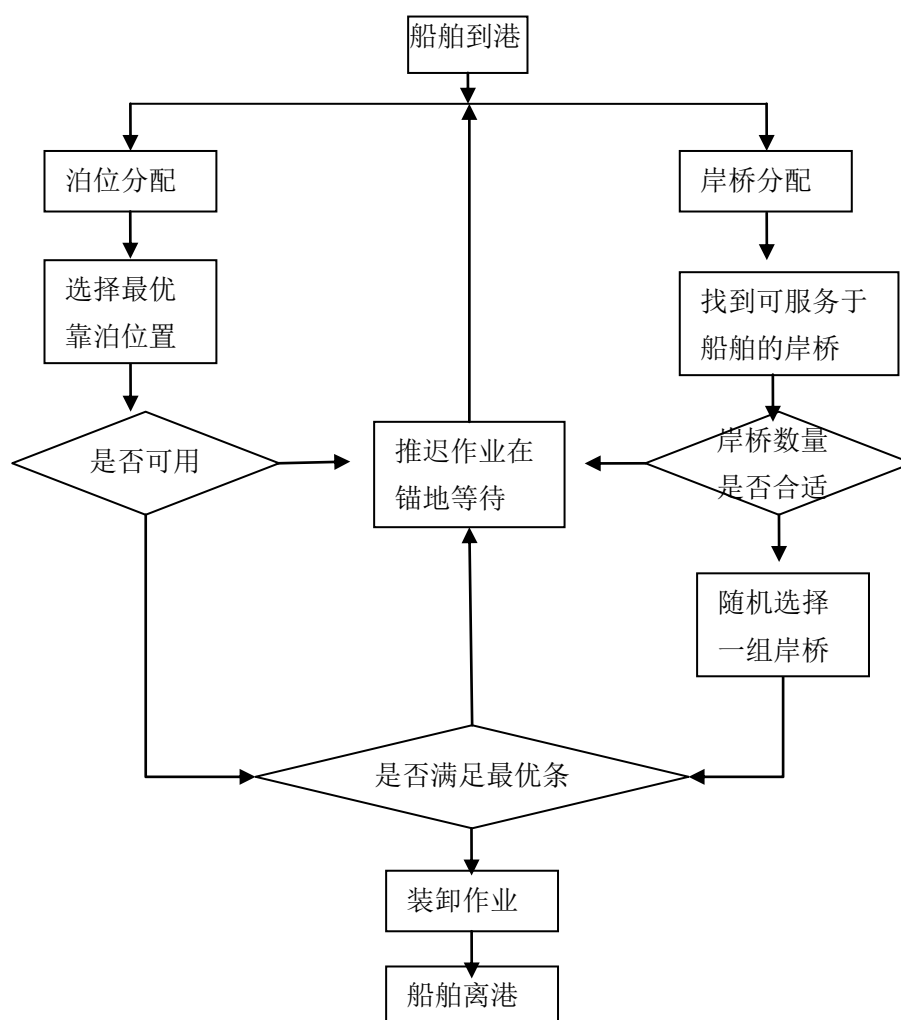


图 3.1 泊位与岸桥分配调度过程

3.2.2 泊位与岸桥调度协调

由于泊位分配、岸桥分配和岸桥调度三者之间的集成调度的复杂性，泊位与岸桥协调调度的研究相比泊位与岸桥分配的研究较少。这类问题的研究不仅要为船舶分配最优靠泊位置，分配岸桥数量，还要在分配的岸桥数量的基础上，优化岸桥的动态调度。图 3.2 为泊位与岸桥协调调度过程。近年国内一些学者也在积极研究三者之间的集成调度，初步解决集装箱码头前沿调度问题，但还存在一些普遍的问题，如，很少给出具体岸桥的装卸任务和运动轨迹，缺乏船舶间的岸桥动态调度等。

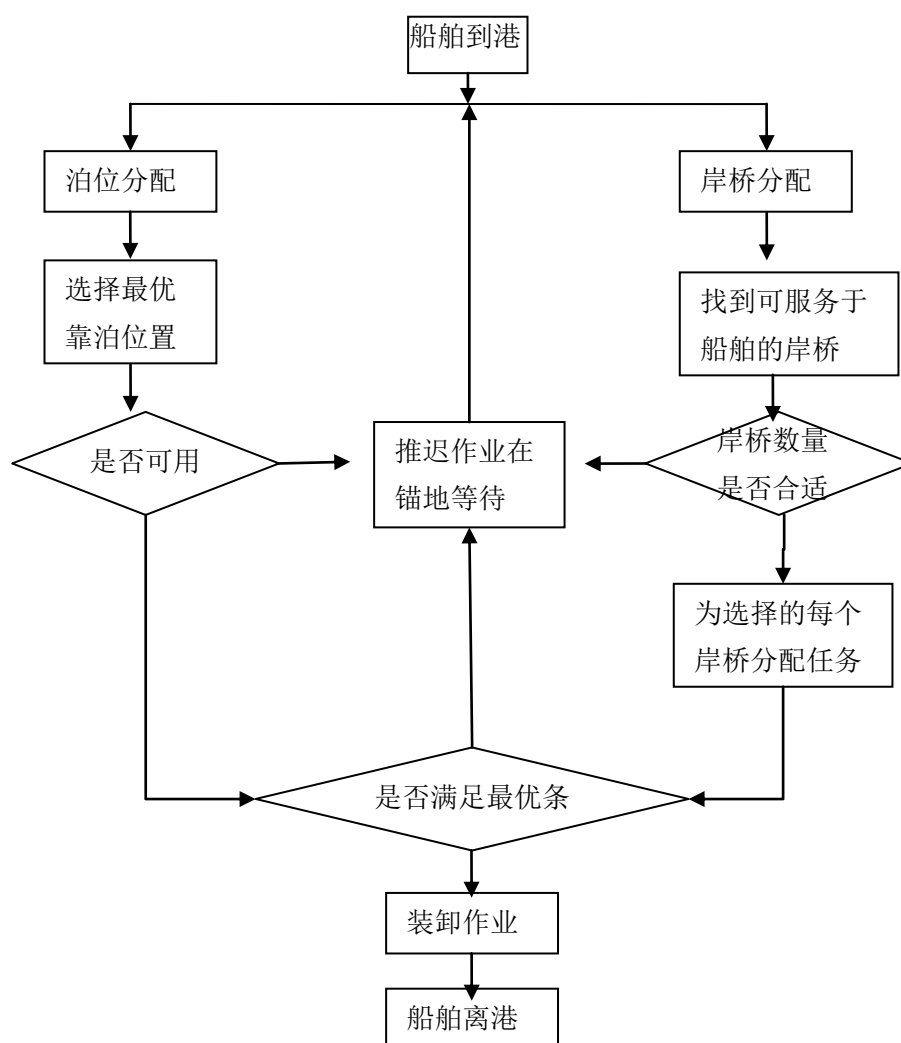


图 3.2 泊位与岸桥协调调度过程

3.3 本文研究范围

通过对集装箱码头生产运作特点的分析，以及对泊位与岸桥相关问题的研究，深入剖析泊位分配、岸桥分配和岸桥调度问题，可知泊位分配、岸桥分配和岸桥调度三者之间的集成调度是十分复杂的一项系统工程，为更好的研究问题，明确本文研究重点，界定研究范围如下：

(1) 本文研究集中在集装箱码头的岸线前沿工作部分，即泊位和岸桥资源的调度优化。

(2) 本文研究的船舶是针对大型船舶，根据船舶的结构和岸桥装卸方式分为多贝位和单贝位装卸船舶，多贝位装卸类型的船舶有其独特的舱口布置方式：一个贝位有多个舱位，且一块甲板涉及多个舱位。而单贝位装卸类型的船舶就是普通的集装箱船舶，一个舱位对应一个贝位，一个贝位包含多个舱位。本文研究的问题

还包括集装箱的混合装卸过程，不是先卸载完集装箱再装载集装箱，而是装载和卸载同时进行，这样减少岸桥在作业过程的空载，提高岸桥的利用率。

(3) 本文研究动态、连续泊位下的调度问题。也就是在计划周期开始时，还有一些船舶陆续到港，泊位是连续的岸线，主要船舶长度和岸线允许，船舶可以任意停靠。

(4) 本文研究重点是泊位和岸桥联合调度，也就是在岸桥船舶靠泊时，要同时将泊位与岸桥作为统一的系统，从整体上优化资源配置，提高港口的运营效率。

(5) 本文研究的岸桥调度问题，是对具体岸桥任务的分配，给出每个作业任务的具体作业岸桥号，而不是岸桥基于数量的一个笼统的分配。

(6) 本文研究的目标是基于惩罚系数对作业的惩罚，主要有三个部分惩罚：船舶离港时间延迟的惩罚，靠泊偏离偏好位置的惩罚，和岸桥作业过程从一艘船舶移动另一艘船舶的惩罚。

3.4 本章小结

本章首先概述了连续泊位与岸桥联合调度问题，分别详细阐述连续泊位问题、岸桥分配问题和岸桥调度问题。再次，介绍并区别泊位与岸桥分配协调调度问题与泊位与岸桥协调调度问题，指出二者之间的联系与差别。最后，给出本文的研究范围，为后续建立连续泊位与岸桥联合调度模型奠定基础。

4 连续泊位与岸桥联合调度模型

4.1 问题描述

集装箱船舶在到达港口后或之前，港口会根据船舶到港计划（如靠泊时间、计划离港时间等）制定靠泊、作业计划，为船舶分配合理的靠泊时间、位置和岸桥具体的作业顺序。本文从港口管理者的角度，根据船公司提供的相关信息，制定最优靠泊计划和岸桥装卸计划，提高客户满意率，以提高港口的运营水平，获取更大的效益。集装箱船在港口的整个作业流程主要包括船舶到港、靠泊、装卸和离港四个部分。

泊位和岸桥调度分为单独调度和联合调度两种。单独调度是在船舶到港前，港口先考虑靠泊时间和靠泊位置最优，再分配、调度可用的岸桥进行装卸作业，这是一个串联过程。由于靠泊时间和装卸时间有着一定的制约性，将两个部分进行串联形式的考虑，很可能造成岸桥的闲置，增加船舶在港时间，所以提出了泊位与岸桥的联合调度，不仅考虑靠泊时间和位置的最优，同时还要加入岸桥对装卸时间的影响，这是一个并联过程。联合调度还考虑了岸桥能在多个船舶间动态调度，不仅克服了单独调度的局限性，减少船舶在港时间，还提高了岸桥的利用率。

本文针对两种不同装卸方式，研究泊位与岸桥联合调度问题。一种是多贝位装卸方式，一个舱位包含多个贝位集装箱，任务单元为集装箱组，一旦岸桥对某一贝位作业时，尽量完成整个贝位作业，直至受甲板约束不能再作业，才能进行下一个贝位（任务）作业；另一种是单贝位装卸方式，一个舱位包含一个贝位集装箱，任务单元为贝位，岸桥作业时，需要完成一个贝位的堆垛任务，再进行下一个贝位作业。本文研究的内容是船舶动态到港，基于连续泊位靠泊，和岸桥多船间动态调度问题。在一定的周期内，如何为动态到达港口的船舶分配靠泊时间、靠泊位置，如何将有限的岸桥分配给这些船舶，并给出所有任务所对应的具体岸桥和任务作业顺序。为便于理解与计算，时间划分为 1 小时为一个单位的离散化连续时间，泊位划分为 100 米为一个单位的离散化连续空间。

本章设计了两个模型：连续泊位与岸桥联合调度模型和时间模型，其中时间模型用于求解调度模型求解过程中所需单位任务的作业时间。连续泊位与岸桥联合调度模型与时间模型关联过程：时间模型分为单贝位装卸方式和多贝位装卸方式。单贝位装卸时，根据时间模型和算法求得每艘船舶的每个贝位的双循环和单循环次数。多贝位装卸时，由于甲板的约束，在不移动的情况下，岸桥不能一次性完成一个贝位的装卸作业，因此，一个贝位的作业需要岸桥多次完成，根据时间模型和算法求得每个集装箱组作业的双循环和单循环次数。根据岸桥单循环和双循环作业效

率，求得泊位与岸桥联合调度模型中单位任务的作业时间，为模型求解提供基础。

4.2 假设和符号

根据研究问题的特性和现实约束，为便于问题分析，更好建立模型，对研究的问题提出以下假设：

- (1) 连续泊位的任何一处都符合任何船舶的水深靠泊条件
- (2) 船舶靠泊和离港操作时间不计
- (3) 岸桥位于同一轨道，从左到右依次标号，并且两台岸桥之间存在一个安全距离，假设为一个贝位。
- (4) 岸桥水平移动时间忽略不计。
- (5) 由于船方要求和船舶大小的限制，每艘船舶有最小和最大岸桥数限制
- (6) 船舶一经靠泊将不再移动
- (7) 每艘船舶都有其最优靠泊位置
- (8) 某一时刻，岸线上所有船舶的贝位，从左到右依次编号。

为把连续泊位与岸桥联合调度过程详细的描述，给出了如下符号定义：

集合符号定义：

$V = \{1, \dots, n\}$ ，为待靠泊的船舶，用 i 和 j 代表不同的船舶。

$Q = \{1, \dots, q\}$ ，岸线可用的岸桥，并从岸线左端依次编号，岸桥总数为 $|Q|$ ，用 k_1 、 k_2 代表在同一轨道上不同的岸桥。

$T = \{0, 1, \dots, t\}$ 为计划期时间，是以 1 小时为单位的离散时间。

$L = \{0, 1, \dots, l\}$ 为海岸线长度，是以 100 米为单位的离散距离。

$\Omega_i = \{1, \dots, n\}$ 为 i 上所有任务，用 n_1 、 n_2 代表不同的任务。

参数符号定义：

$pbl(i)$ ，船舶 i 偏好靠泊位置。

$l(i)$ ，船舶 i 的长度，包括了前后的安全距离。

C_i ，船舶 i 到达时间。

D_i ，根据船期，船舶 i 要求的离港时间。

r_i^{\min} 和 r_i^{\max} ，船舶 i 允许同时作业的最小和最大岸桥数量。

μ_i ，船舶 i 离港延迟的惩罚系数。

α_i ，船舶 i 偏离最优靠泊位置的惩罚系数。

ε ，岸桥跨船移动的惩罚系数。

l_i^n ，船舶 i 上任务 n 的位置，也就是任务所在贝位的编号。

Sl ，单位任务岸桥作业单循环次数。

Dl ，双位任务岸桥作业单循环次数。

Ps ，岸桥单循环作业效率。

Pd ，岸桥双循环作业效率。

决策变量定义：

$busy_{it}$ ，判断船舶 i 在 t 时刻是否处于作业状态。

$change_{it}$ ，船舶 i 在 t 时刻相对于 $t-1$ 时刻岸桥数目的增加量。

pl_i ，船舶 i 计划靠泊位置。

dl_i ，船舶 i 向左偏离最优靠泊位置的偏离差。

dr_i ，船舶 i 向右偏离最优靠泊位置的偏离差。

$y_{ij} \in (0,1)$ ，判断船舶 i 是否在空间上完全停靠在船舶 j 之前。

S_i ，船舶 i 开始服务时间。

E_i ，船舶 i 结束服务时间。

S_i^n ，船舶 i 上任务 n 开始服务时间。

E_i^n ，船舶 i 上任务 n 结束服务时间。

Q_{it} ，船舶 i 在 t 时刻的岸桥数量。

$X_{ik}^n \in (0,1)$ ，判断船舶 i 上任务 n 在 t 时刻是否被岸桥 k 服务。

$Y_{ik} \in (0,1)$ ，判断船舶 i 在 t 时刻是否被岸桥 k 服务。

l_k^T ，岸桥 k 在 T 时期的位置。

c_k^T ，岸桥 k 在 T 时期开始空闲可供作业的时刻。

m_i^n ，船舶 i 上任务 n 作业所用的时间。

4.3 调度模型

目标函数：

$$\text{Min}F = \sum_i \left(\mu_i (E_i - D_i) + \alpha_i (dl_i + dr_i) + \sum_{t=S_i}^{E_i} \text{exchang}_{it} \right) \quad (\text{式 } 1)$$

约束条件：

$$l_k^T = X_{ik}^n \cdot l_i^n \quad (\text{式 } 2)$$

$$c_k^T = X_{itk}^n \cdot E_i^n \quad (\text{式 3})$$

$$m_i^n = \sum (Sl \cdot Ps + Dl \cdot Pd) \quad (\text{式 4})$$

$$S_i \geq C_i \quad (\text{式 5})$$

$$E_i = \max_n \{E_i^n\} \quad (\text{式 6})$$

$$\sum_i \sum_k Y_{itk} \leq |Q| \quad (\text{式 7})$$

$$r_i^{\min} \leq \sum_k Y_{itk} \leq r_i^{\max} \quad (\text{式 8})$$

$$\sum_n X_{itk}^n = Y_{itk} \quad (\text{式 9})$$

$$S_i^n = \max \{c_k^T \cdot X_{itk}^n, S_i\} \quad (\text{式 10})$$

$$S_i^n + m_i^n = E_i^n \quad (\text{式 11})$$

$$\sum_i Y_{itk} \leq 1 \quad (\text{式 12})$$

$$(l_{k_2}^T - l_{k_1}^T) \cdot (pl_i - pl_j) \cdot Y_{jtk_1} \cdot Y_{jtk_2} \geq 0 \quad (\text{式 13})$$

$$(l_{k_2}^T - l_{k_1}^T) \cdot (l_i^{n_2} - l_i^{n_1}) \cdot X_{jtk_1}^{n_1} \cdot X_{jtk_1}^{n_2} \geq 0 \quad (\text{式 14})$$

$$Q_{it} = \sum_k Y_{itk} \quad (\text{式 15})$$

$$chang_{it} \geq Q_{it} - Q_{it-1} \quad (\text{式 16})$$

$$pl_i = pbl(i) - dl_i + dr_i \quad (\text{式 17})$$

$$pl_i + l(i) \leq L \quad (\text{式 18})$$

$$pl_i + l(i) - L(1 - y_{ij}) \leq pl_j \quad (\text{式 19})$$

$$busy_{it} + busy_{jt} \leq 1 + y_{ij} + y_{ji} \quad (\text{式 20})$$

$$X_{itk}^n, Y_{itk}, busy_{it}, busy_{jt}, y_{ij}, y_{ji} \in (0,1) \quad (\text{式 21})$$

目标函数部分：

目标函数的目的是最小化惩罚，这里的目标函数分为三个部分。第一部分是涉及船舶离港延迟惩罚系数，本文中船舶作业时间可看成在港时间。第二部分是涉及船舶的靠泊位置和船舶偏离最优靠泊位置的惩罚，每艘船舶都有其最优靠泊位置，在最优位置，对应的出口堆场区和进口堆场区，集卡运输成本最小，一旦偏移，将导致集卡运输距离增加。第三部分是对每艘船舶

分配的岸桥数量增加的惩罚（不考虑减少是为了防止重复计算如果岸桥数量减少，不是因为船舶作业完成，就是因为岸桥移动到其他船舶而导致其他船舶岸桥数量的增加），由于岸桥的移动会增加岸桥的移动成本，所以限定岸桥在船舶之间大范围的移动，设置了一艘船舶岸桥数量增加的惩罚。

约束函数部分：

式（2）定义岸桥在第 K 期的位置（岸线方向）。式（3）定义岸桥在第 K 期开始空闲的时刻。式（4）定义岸桥服务单个任务所需要的时间。式（5）确保船舶作业开始时间在到达之后。式（6）定义船舶作业的结束时间。式（7）码头岸桥总数量的约束。式（8）表示岸桥只有满足上述要求时，才可开始作业。式（9）表示一个岸桥在某一时刻只能为一个任务服务。式（10）定义任务的开始时间。式（11）定义任务的结束时间。式（12）表示一个岸桥只能为一艘船舶服务。式（13）-（14）限制岸桥不可跨越作业。式（15）定义某时刻服务于同一船舶的岸桥数量。式（16）定义某一时刻到下一时刻岸桥数量的增加量。式（17）通过左偏差和右偏差定义岸桥靠泊位置。式（18）确保所有的船舶在岸线内靠泊。式（19）-（20）确保没有两艘船舶在同一地点同一时刻被服务。

4.4 时间模型

4.4.1 问题描述

本文研究的问题考虑到甲板的约束，并且一个贝位有多个间舱，本节研究问题的任务以堆垛为单位。我们根据所需装卸集装箱在船上的位置信息，通过遗传算法对单个贝位的作业顺序进行预定义，然后根据岸桥作业次数求解调度模型中单位任务的作业时间。由于甲板的约束，不同任务之间的预定义约束为：甲板下集装箱的卸载在甲板上集装箱的卸载之后；甲板上集装箱的装载在甲板下集装箱的装载之后。

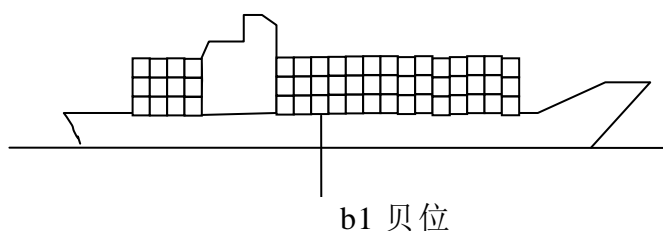


图 4.1 集装箱船舶纵剖面图

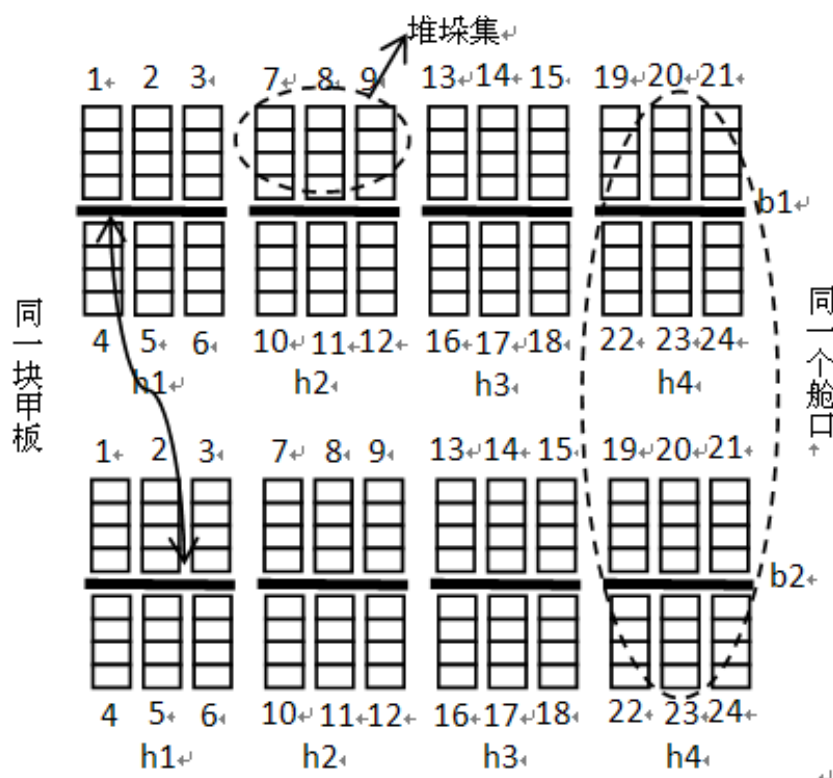


图 4.2 集装箱船舶横剖面图

(1) 多贝位情况

如图 4.1、4.2 集装箱船的纵横剖面图，一组甲板对应两个贝位，一个贝位的集装箱被舱壁划分为多个间舱，如图 4.2 被划分为 4 个间舱。一旦岸桥对某一贝位作业时，尽量完成整个贝位作业，直到受甲板约束不能再作业，才能进行下一个贝位（任务）作业。将任务 J 划分为 4 个类别：甲板上卸载的任务 J_1 ，甲板上卸载甲板下装卸混合的任务 J_2 ，甲板上装载甲板下装卸混合的任务 J_3 ，甲板上装载的任务 J_4 。一组甲板对应两个贝位，包含不同类别的 4 个任务，且有先后顺序： $J_1 > J_2 > J_3 > J_4$ 。

预定义约束步骤：步骤 1 先将各堆垛的作业初步划分集合（ J_1, J_2, J_3, J_4 四大类），对于一组甲板（两个贝位） i ，堆垛作业可以划分为 8 个子集（ $J_{i1}^1, J_{i2}^1, J_{i3}^1, J_{i4}^1, J_{i1}^2, J_{i2}^2, J_{i3}^2, J_{i4}^2$ 八小类，其中上标 1 和 2 代表贝位，下标中的 1、2、3 和 4 代表任务种类）。步骤 2 根据下面的预定义模型定义每组甲板的 8 个子集内部的堆垛的作业顺序。步骤 3 把 8 个子集作为不同的任务，每个贝

位选取两个子集，且贝位 1 如果为 (J_{i1}^1, J_{i3}^1) 则贝位 2 必须为 (J_{i2}^2, J_{i4}^2) ，反之亦然，且必须满足 $J1 > J2 > J3 > J4$ ，根据约束条件预定义子集间的作业顺序。

J_1 和 J_4 类别的任务子集内部作业顺序在这里不需特别介绍，下面介绍 J_2 和 J_3 类别的任务子集的预定义约束。为减少岸桥吊具装卸集装箱过程的空载，最小化岸桥作业的总循环次数，即最大化岸桥的双循环次数。这里假定岸桥作业循环次数近似为岸桥装卸作业完成时间。作业顺序约束分为同一堆垛内部的和同一甲板上下不同堆垛之间的。同一堆垛的集装箱顺序：先卸载再装载，从上到下的卸载集装箱，从下到上的装载集装箱。同一甲板上下不同堆垛之间的作业顺序比较复杂。图 4.2 为一组甲板的两个贝位的装卸载作业位置示意图，以船舶横剖面图表示，每一方格代表一个箱位。根据预定义约束条件，集装箱混合装卸的过程为：①先卸载 b1 贝位一整组甲板上的集装箱；②对 b2 贝位不同舱口的甲板上集装箱卸载和甲板下集装箱装卸进行混合作业（如卸载完 h1 甲板上集装箱后可进行 h1 甲板下集装箱装载、卸载和 h2 甲板上集装箱卸载的混合装卸）；③对 b1 贝位不同舱口的甲板下集装箱装卸和甲板上集装箱装载进行混合作业（如 h1 甲板下集装箱装载、卸载和 h2 甲板上集装箱装载地混合装卸）；④再装载 b2 贝位一整组甲板上的集装箱。根据装卸过程，本文把求解过程分为 4 个步骤，对②和③建立数学模型。

（2）单贝位情况：

一组甲板对应一个贝位，一个贝位的集装箱被舱壁划分为多个间舱，如图 4.2 中的贝位 b1 情况，一个贝位被划分为 4 个间舱。此种类型作业顺序约束也同样可以分为同一堆垛内部的和同一甲板上下不同堆垛之间的。同一堆垛的集装箱顺序：先卸载再装载，从上到下的卸载集装箱，从下到上的装载集装箱。同一甲板上下不同堆垛之间的作业顺序比较复杂，但相对于多贝位的情况比较简洁。这里不需要移动岸桥就可以一次性完成一组甲板的作业任务。根据预定义约束条件，h1 舱：卸载{1,2,3}→卸载{4,5,6}同时装载{4,5,6}→装载{1,2,3}；h2 舱：卸载{7,8,9}→卸载{10,11,12}同时装载{10,11,12}→装载{7,8,9}；h3 舱：卸载{13,14,15}→卸载{16,17,18}同时装载{16,17,18}→装载{13,14,15}；h4 舱：卸载{19,20,21}→卸载{22,23,24}同时装载{22,23,24}→装载{19,20,21}。

4.4.2 变量和模型

（1）变量说明

1) 共用变量

$i, j \in S$, 集装箱堆垛; $h \in H$, 舱口; M , 无穷大数。

2) 参数变量

n_i^u , i 堆垛卸载的集装箱数; n_i^l , i 堆垛装载的集装箱数。

3) 集合

H , 舱口集合;

S , 集装箱堆垛集合;

S^u , 卸载堆垛集合; S^l , 装载堆垛集合;

\bar{S}_h^l , h 舱口甲板下装载集装箱堆垛集合;

\bar{S}_h^u , h 舱口甲板下卸载集装箱堆垛集合;

\underline{S}_h^l , h 舱口甲板上装载集装箱堆垛集合;

\underline{S}_h^u , h 舱口甲板上卸载集装箱堆垛集合;

4) 决策变量:

c_i , i 堆垛集装箱装装卸完成时间, 且 $c_i = \max\{c_i^l, c_i^u\}$;

c_i^u , i 堆垛集装箱卸载完成时间;

c_i^l , i 堆垛集装箱装载完成时间;

\bar{c}_h^u , h 舱口甲板下集装箱卸载完成时间;

\bar{c}_h^l , h 舱口甲板下集装箱装载完成时间;

\underline{c}_h^u , h 舱口甲板上集装箱卸载完成时间;

\underline{c}_h^l , h 舱口甲板上集装箱装载完成时间;

X_{ij}, Y_{ij} , j 在 i 之后卸载 $X_{ij}=1$, 否则 0; j 在 i 之后装载 $Y_{ij}=1$, 否则为 0;

$X_{dd'}, Y_{dd'}$, d' 在 d 之后卸载 $X_{dd'}=1$, 否则 0; d' 在 d 之后装载 $Y_{dd'}=1$, 否则为

0。

(2) 数学模型

1) 多贝位情况:

目标函数:

$$f = \min \max_{i \in S} \{c_i\} \quad (\text{式 1})$$

约束条件:

$$\bar{c}_h^l = \max \{c_i^l\}, i \in \bar{S}_h^l \quad (\text{式 2})$$

$$\underline{c}_h^u = \max \{c_i^u\}, i \in \underline{S}_h^u \quad (\text{式 3})$$

$$c_i^u \geq \underline{c}_h^u + n_i^u, i \in \bar{S}_h^u, \forall h \in H \quad (\text{式 4})$$

$$c_i^l \geq c_i^u + n_i^l, i \in S^u \cap S^l \quad (\text{式 5})$$

$$c_i^l \geq \bar{c}_h^l + n_i^l, i \in \underline{S}_h^l, \forall h \in H \quad (\text{式 6})$$

$$\sum_{j \in S} X_{ij} \leq 1, i \in S \quad (\text{式 7})$$

$$\sum_{j \in S} Y_{ij} \leq 1, i \in S \quad (\text{式 8})$$

$$c_j^u - c_i^u + M(1 - X_{ij}) \geq n_j^u, i, j \in S^u \quad (\text{式 9})$$

$$c_j^l - c_i^l + M(1 - Y_{ij}) \geq n_j^l, i, j \in S^l \quad (\text{式 10})$$

$$\sum_{d' \in D} X_{dd'} \leq 1, d \in D \quad (\text{式 11})$$

$$\sum_{d' \in D} Y_{dd'} \leq 1, d \in D \quad (\text{式 12})$$

$$c_d^u - c_{d'}^u + MX_{dd'} \geq \sum_{i \in S_d} n_i^u, d, d' \in D \quad (\text{式 13})$$

$$c_d^l - c_{d'}^l + MY_{dd'} \geq \sum_{i \in S_d} n_i^l, d, d' \in D \quad (\text{式 14})$$

$$X_{ij}, Y_{ij}, X_{dd'}, Y_{dd'} = \{0, 1\} \quad (\text{式 15})$$

目标函数（1）是最小化一组甲板对应的单贝位中的最大集装箱堆垛装卸完成时间；约束（2）—（3）定义舱口下装载和舱口上卸载完成时间的概念；约束（4）用于上卸下装卸混合的情况，确保在一个舱口中甲板下的卸载要在甲板上的卸载完成以后开始；约束（5）确保在同一堆垛的集装箱装载要在卸载之后；（6）用于下装卸上装的情况，确保在一个舱口中甲板上的装载要在甲板下装载之后；（7）—（8）确保堆垛的装卸顺序；（9）—（10）定义 X_{ij} 、 Y_{ij} 二进制变量；（11）—（12）确保堆垛集的装卸顺序；（13）—（14）定义 $X_{dd'}$ 、 $Y_{dd'}$ 二进制变量。在多贝位情况下，（4）和（6）式在单个贝位求解过程中只能使用其中一个来约束。

2) 单贝位情况：

目标函数：

$$f = \min \max_{i \in S} \{c_i\} \quad (\text{式 1})$$

约束条件：

$$\bar{c}_h^l = \max \{c_i^l\}, i \in \bar{S}_h^l \quad (\text{式 2})$$

$$\underline{c}_h^u = \max \{c_i^u\}, i \in \underline{S}_h^u \quad (\text{式 3})$$

$$c_i^u \geq \underline{c}_h^u + n_i^u, i \in \bar{S}_h^u, \forall h \in H \quad (\text{式 4})$$

$$c_i^l \geq c_i^u + n_i^l, i \in S^u \cap S^l \quad (\text{式 5})$$

$$c_i^l \geq \bar{c}_h^l + n_i^l, i \in \underline{S}_h^l, \forall h \in H \quad (\text{式 6})$$

$$\sum_{j \in S} X_{ij} \leq 1, i \in S \quad (\text{式 7})$$

$$\sum_{j \in S} Y_{ij} \leq 1, i \in S \quad (\text{式 8})$$

$$c_j^u - c_i^u + M(1 - X_{ij}) \geq n_j^u, i, j \in S^u \quad (\text{式 9})$$

$$c_j^l - c_i^l + M(1 - Y_{ij}) \geq n_j^l, i, j \in S^l \quad (\text{式 10})$$

$$X_{ij}, Y_{ij} = \{0, 1\} \quad (\text{式 11})$$

目标函数（1）是最小化一组甲板对应的单贝位中的最大集装箱堆垛装卸完成时间；约束（2）—（3）定义舱口下装载和舱口上卸载完成时间的概念；约束（4）确保在一个舱口中甲板下的卸载要在甲板上的卸载完成以后开始；约束（5）确保在同一堆垛的集装箱装载要在卸载之后；（6）确保在一个舱口中甲板上的装载要在甲板下装载之后；（7）—（8）确保堆垛的装卸顺序；（9）—（11）定义 X_{ij} 、 Y_{ij} 二进制变量。

4.5 本章小结

根据对研究问题的界定，建立了连续泊位与岸桥联合调度模型，以最小化离港时间延迟、偏离靠泊偏好位置以及岸桥移动三部分惩罚为目标函数，优化问题不仅研究泊位分配和岸桥分配，还研究岸桥调度。问题建模时，还考虑了集装箱的混合装卸。连续泊位与岸桥联合调度模型还包括一个子模型——时间模型。采用最大化双循环、最小化单循环的思想，时间模型求解岸桥在一个贝位最小作业次数。时间模型是为求解调度模型中单位任务作业时间提供基础，并且根据集装箱船舶两种不同的装卸方式，时间模型有两种不同的模型——多贝位时间模型和单贝位时间模型。对这两种时间模型进行算法求解，数值计算，验证方法的可行性。

5 模型算法设计及求解

5.1 遗传算法理论

遗传算法是由美国 Michigan 大学的 Holland 教授于 1975 年在《自然界和人工系统的适应性》中首次提出的，其是由达尔文的进化论、孟德尔的遗传学说启发演变而来的。遗传算法是在遗传理论和生物进化论基础上，提出的一种求解大型问题最优解的算法。遗传算法求解问题是通过构造一种染色体结构，生成一个染色体群体，通过编码和解码的方式，根据适者生存的原则，经过选择、交叉和变异三种遗传操作，生成新一代更适应环境的种群，最后收敛到一个最适应环境的（最优解）染色体群体。遗传算法是一种具有自适应能力的、具有全局搜索能力的概率搜索算法。

遗传算法求解模型时，需要考虑以下两个问题：

- 1、 把问题转化为符号的形式，用于被计算机识别。如定义可行域空间，设计染色体的编码方式，对目标函数进行适当的变形为适应度函数等。
- 2、 设计遗传算法求解过程的参数。如种群规模大小，选择、交叉、变异概率大小，进化过程中最大迭代代数等，这些参数大多是通过多次试验或经验得到的。

遗传算法详细步骤：

（1） 编码方式

在使用遗传算法搜索之前对决策变量进行编码，根据模型的不同，选择适合模型求解的编码方式。现有的编码方式很多，如，二进制编码是最早使用的，也是最简单的，但求解大规模问题时，由于位串长度与问题所要求精度的限制，二进制编码不再适合；实数编码是针对二进制编码的缺陷而提出的，染色体的基因值是由实数表示，其长度为模型决策变量的个数。

（2） 适应度函数

适应度函数一般是通过目标函数变形得到，用于评价个体的适应度。常用的适应度评价方法：原始适应度函数，用模型的目标函数值直接评价个体的适应度；标准适应度函数，根据一定的规则，适应度值越大，表示个体对问题的适应性越好，这就要将原始适应度函数转变成标准形式。

（3） 选择

在遗传算法求解过程中，使用选择操作对个体适应性进行淘汰，适应度越高被遗传到下一代的概率越大。不同的选择方式将导致被复制到下一代中父代个体的数目的不同分配关系，常用的方法：（1）适应度比值法，也叫轮盘赌法。轮盘赌法是根据选择概率将一个圆盘分成 N 份，适应度值越大，被选择复制到下一代的概率越

大。(2)精英个体保存法,是对适应度最高的个体不进行配对交叉、变异,而直接复制到下一代中。这种方法由于最优解直接复制到下一代中,而使局部最优解加剧,因而易于陷入局部最优。

(4) 交叉

交叉是两个父代个体根据一定的规则,把部分基因替代重组,生成两个新的子代个体的遗传操作。根据所解决问题的不同,交叉操作的设计和实现也不同。交叉过程中最好不要破坏个体编码串中表示优良性状的优良组合模式,并有效生产一些较好的新个体模式。常用的交叉方式:单点交叉,两点交叉,多点交叉,算术交叉。

(5) 变异

变异操作是变动个体的某些基因上的基因值。变异操作主要用于改善遗传算法局部搜索能力,通过调整个体染色体的某些基因值,使个体局部逼近最优解;变异操作用于保持种群的多样性,防止获得局部最优解,导致过早收敛。常用的变异方式:均匀变异、非均匀变异和多项式变异等。

5.2 时间模型求解

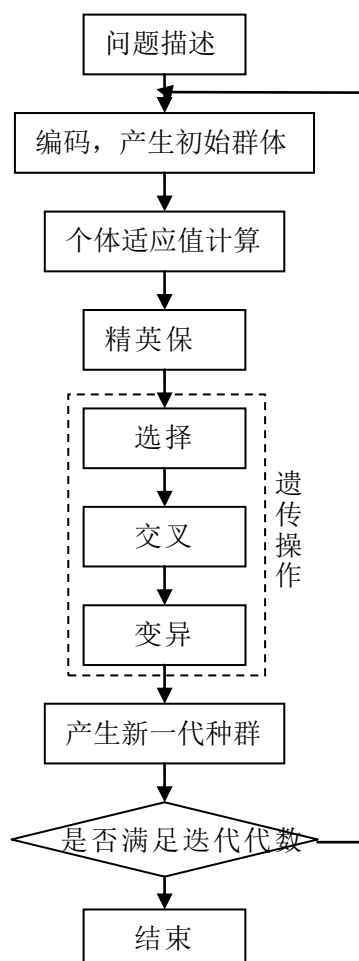


图 5.1 多贝位情况下的遗传算法流程图

图 5.1 为计算单贝位完成时间的流程，用于求解单个贝位最小完成时间。多贝位情况下的预定义约束求解过程（图 5.2），与单贝位情况有些微不同，多贝位的涉及了舱位内部优化和外部优化。内部优化用于优化舱位内部作业顺序，外部优化用于优化不同舱位间的作业顺序。

舱位内部：舱位内部的堆垛装卸顺序的优化，只要使用遗传算法优化甲板下的堆垛顺序，甲板上的堆垛装卸顺序不影响优化结果。

舱位外部：在舱位内部优化的基础上，舱位间的优化，是调整不同舱位的作业顺序，同时变换甲板上堆垛作业顺序，以最大化双循环次数，和最小化单循环次数。

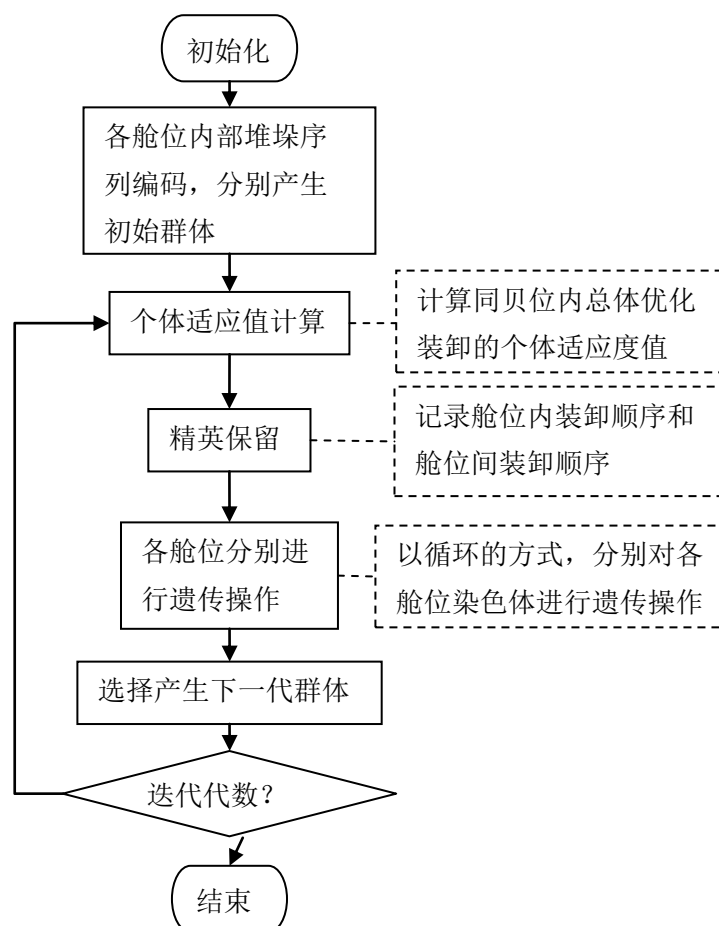


图 5.2 单贝位情况下的遗传算法流程图

算法设计思想：

- (1) 分别对各舱位进行实数编码，并分别产生初始种群。
- (2) 选取最佳舱位顺序，计算同贝位内总体装卸优化的个体适应值。
- (3) 记录舱位内装卸顺序和舱位间装卸顺序。
- (4) 遍历全部舱位间装卸的顺序，分别对各舱位染色体进行遗传操作。
- (5) 选择并生产下一代种群。
- (6) 判读是否循环结束，满足迭代代数，则结束，否则，返回（2）。

5.2.1 染色体编码和初始解生成

(1) 多贝位情况

针对一组甲板对应的单贝位，构建一个二维矩阵（ $M \times N$ ），其中 M 表示堆垛集（如 $b1$ 对应的 $h1$ ）堆垛的最大值， N 表示堆垛集合的个数。矩阵的行是由堆垛集中的集装箱堆垛编号组成，从左到右随机排列生成，表示内部

的装卸顺序，矩阵的列表示堆垛集合的装卸顺序，以图 4.2 中贝位 b1 为例编码如图 5.3 所示。

1	2	3
4	5	6
7	8	9
10	11	12
13	14	15
16	17	18
19	20	21
22	23	24

堆垛集合的
装卸顺序

图 5.3 染色体编码示例

(2) 单贝位情况：

舱位内部优化编码，舱位 h1 编码如下图 5.4 所示，第一部分染色体表示卸载甲板上集装箱，顺序为卸载 1→卸载 2→卸载 3，其中中间染色体部分，表示甲板下堆垛装卸顺序：卸载 4→卸载 5 装载 4→装载 5 卸载 6→装载 6，第三部分染色体表示装载甲板上集装箱，顺序为装载 1→装载 2→装载 3。整个染色体表示一个舱位内堆垛的装卸顺序：卸载 {1, 2, 3}→卸载 4→装载 4→卸载 5→装载 5→卸载 6→装载 6→装载 {1, 2, 3}。

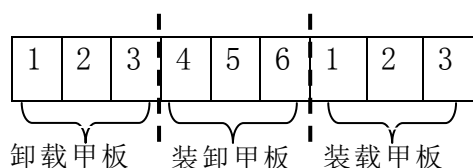


图 5.4 染色体编码示例

5.2.2 遗传操作

每条染色体都有一个适应度值来判断其适应度大小，遗传算法是根据每条染色体的适应值大小，对其进行概率计算，适应值越高，被选择的概率越大。本文的目标函数是最小化单个贝位堆垛的最大完成时间，也就是目标函数值越小进入下一代的概率越大，所以可以使适应度函数 $g_{(x)} = 1/f_{(x)}$ 。本文使用轮盘赌的方式选择染色体，在选择操作中引入记忆单元，将每一代的最优值储存在记忆单元中，选择两个最优父代（不可重复）复制到下一代。由于

染色体长度较小，采用单点交叉的方式交叉染色体。染色体变异是在一条染色体中随机产生两个整数，确定变异的位置，将两个位置的数据互换。

(1) 多贝位情况

交叉操作：一个二维矩阵单点交叉过程：随机产生一行，对矩阵的行进行单点交叉操作，同时，随机产生一列，对矩阵的列进行单点交叉操作。以 $P_c=0.8$ 的概率对一条染色体单点交叉，其具体操作如图 5.5。

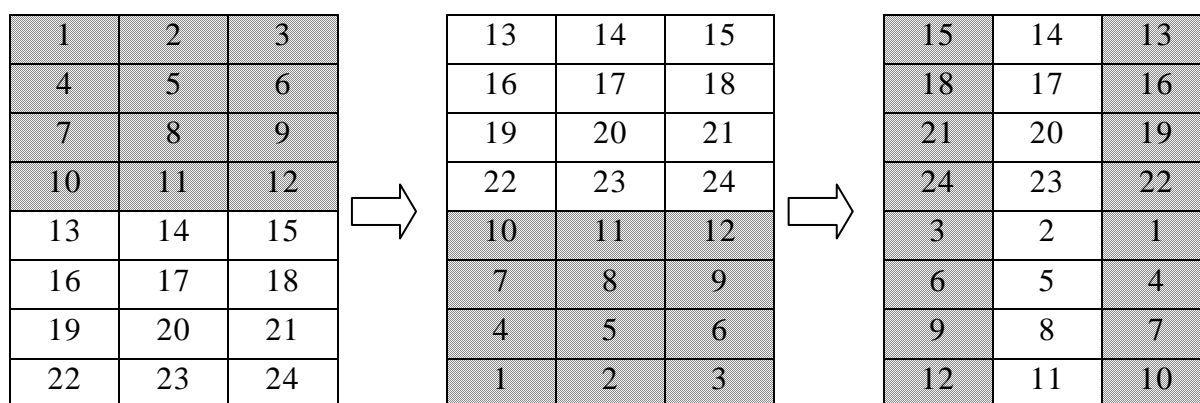


图 5.5 染色体单点交叉

变异操作：一个二维矩阵变异过程：矩阵的行和列分别随机生成两个随机数，分别交换两行和两列。以 $P_m=0.1$ 的概率对一个染色体变异，其具体操作过程如图 5.6。

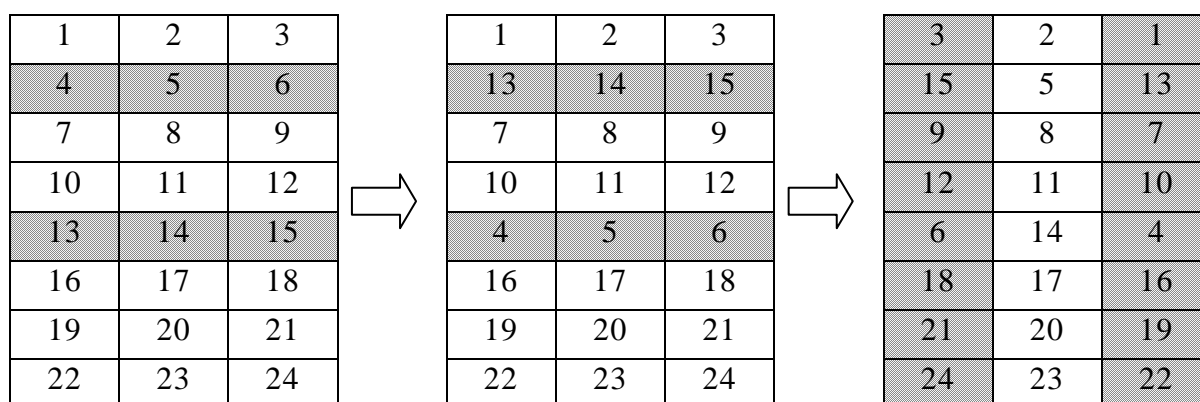


图 5.6 染色体变异

上述遗传算法是求解单个贝位最小完成时间，而对于多贝位情况的一组甲板最小完成时间是其对应的多个单贝位通过遗传算法求得的最小完成时间之和。

(2) 单贝位情况

染色体的遗传操作分两个部分：舱位内部优化和舱位外部优化。舱位内部优化的遗传操作主要是对染色体中间部分的操作，舱位外部优化的遗传操作主要是对染色体第一、三部分的操作。

舱位内部：

交叉：对染色体中间部分，随机生成一个随机数，交换两边染色体的基因，如图 5.7。

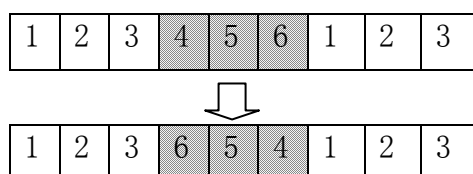


图 5.7 染色体交叉

变异：对染色体中间部分，随机生产两个数，交换两个染色体的基因，如图 5.8。

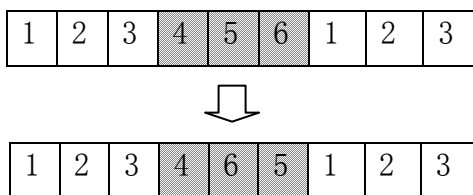


图 5.8 染色体变异

舱外部分：

交叉：分别对染色体第一、三部分，随机生成一个随机数，交换两边染色体的基因，如图 5.9。

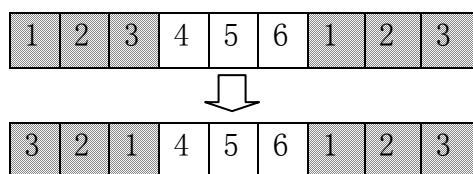


图 5.9 染色体交叉

变异：分别对染色体第一、三部分，随机生产两个数，交换两个染色体的基因，如图 5.10。

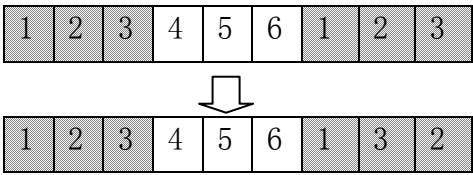


图 5.10 染色体变异

5.2.3 数值计算

(1) 多贝位情况

为验证模型和算法的有效性，本文选取了一艘集装箱船数据。以其中一组甲板对应的两个贝位的集装箱为例，其配积载情况见表 5.1。

表 5.1 一组甲板的配积载情况

		b1		b2				b1		b2	
舱号	堆号	装 载 量	卸 载 量	装 载 量	卸 载 量	舱号	堆号	装 载 量	卸 载 量	装 载 量	卸 载 量
h1	1	4	3	4	4	h3	13	3	5	3	2
	2	6	2	4	5		14	4	4	4	4
	3	5	6	6	6		15	6	6	6	6
	4	6	3	6	3		16	3	5	4	5
	5	5	5	5	5		17	7	7	7	7
	6	4	4	4	4		18	6	6	6	6
h2	7	5	6	4	6	h4	19	5	4	5	4
	8	4	5	4	4		20	3	4	3	3
	9	3	3	3	3		21	6	5	6	5
	10	5	4	6	5		22	4	6	4	6
	11	4	4	4	4		23	3	4	2	4
	12	6	5	5	5		24	4	2	5	3

注：装卸集装箱量单位为 TEU

由遗传算法得，贝位 b2 甲板上卸载甲板下装卸、贝位 b1 甲板下装卸甲板上装载的优化结果，如图 5.11、图 5.12、图 5.13 所示。

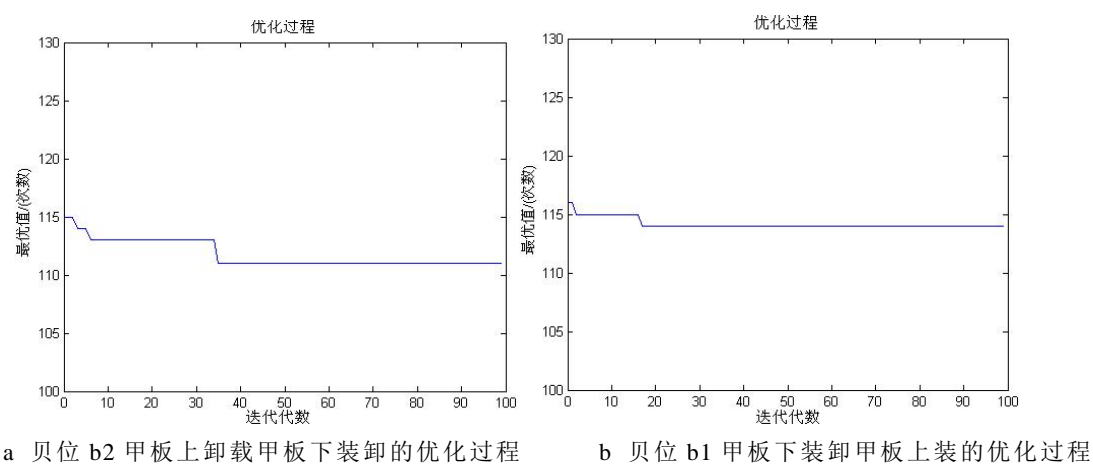


图 5.11 贝位 b1、b2 优化过程

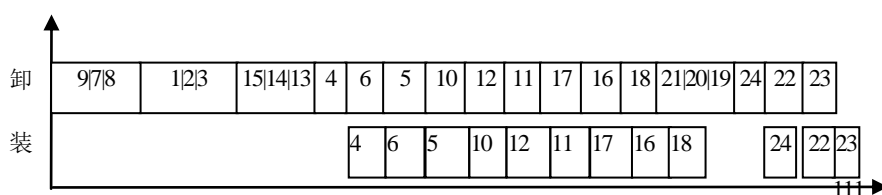


图 5.12 贝位 b2 甲板上卸载甲板下装卸的一个优化顺序结果

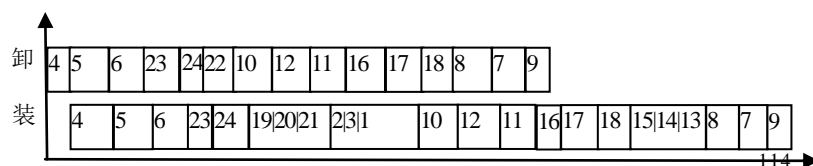


图 5.13 贝位 b1 甲板下装卸甲板上装的一个优化顺序结果

因此，这一组甲板组成工作完成的时间 $C = \underline{C}_{b1}''$ (b1 甲板上卸载时间) + C_{b2} (b2 甲板上卸载甲板下装卸时间) + C_{b1} (b1 甲板下装卸甲板上装载时间) + \underline{C}_{b2}'' (b2 甲板上装载时间) = 53 + 111 + 114 + 52 = 330。

根据上述一组甲板计算方法可以推广到一艘船舶的多组甲板，计算结果与码头实际作业中使用的传统方法（先卸后装）比较见表 5.2。

表 5.2 计算结果与传统方法比较

甲板组号	传统方法对应的次数	优化方法对应的次数	改进率 (%)
1	158	120	24.05
2	185	139	24.86

3	389	283	27.25
4	321	237	26.17
5	444	330	25.68
6	365	271	25.75
7	196	144	26.53
8	167	128	23.35
总计	2225	1652	25.75

由表 5.2 可得，采用堆垛的混合装卸策略在装卸效率上较传统装卸方法平均提高 25.75%。以第 5 组甲板为例，按传统的方法，岸桥需要操作循环 444 次，而按堆垛混合装卸优化后，岸桥需操作循环 330 次，装卸效率提高了 25.68%。

(2) 单贝位情况

为验证模型和算法的有效性，本文选取了一艘集装箱船数据。以其中一组甲板对应的集装箱为例，其配积载情况见表 5.3。

表 5.3 贝位 b1 对应的一组甲板的配积载情况

舱号	堆号	装载量	卸载量	舱号	堆号	装载量	卸载量
h1	1	4	3	h3	13	3	5
	2	6	2		14	4	4
	3	5	6		15	6	6
	4	6	3		16	3	5
	5	5	5		17	7	7
	6	4	4		18	6	6
h2	7	5	6	h4	19	5	4
	8	4	5		20	3	4
	9	3	3		21	6	5
	10	5	4		22	4	6
	11	4	4		23	3	4
	12	6	5		24	4	2

注：装卸集装箱量单位为 TEU

在 matlab 环境下编程，并使用遗传算法方法，贝位 b1 作业顺序的优化过程及装卸顺序如图 5.14、图 5.15 所示，计算结果与码头实际作业中使用的传统方法（先卸后装）比较见表 5.4。

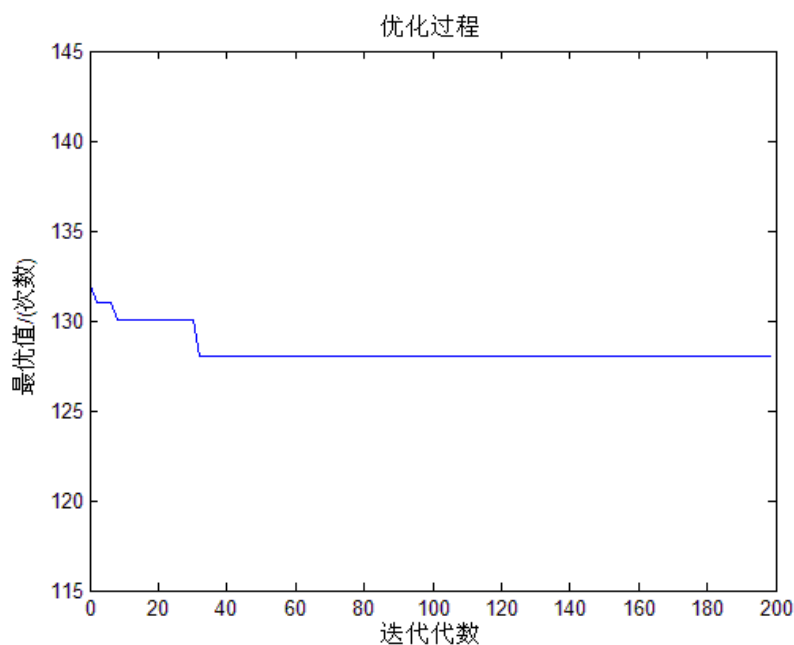


图 5.14 优化过程

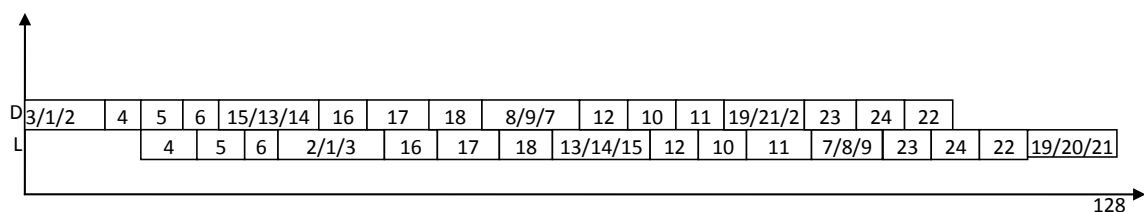


图 5.15 贝位 b1 作业顺序

表 5.4 计算结果与码头实际作业中使用的传统方法（先卸后装）比较

贝位号	传统方法对应的次数	优化方法对应的次数	改进率 (%)	贝位号	传统方法对应的次数	优化方法对应的次数	改进率 (%)
1	70	48	31.42	9	224	128	42.86
2	88	60	31.82	10	220	126	42.73
3	90	61	32.22	11	182	117	35.71
4	95	63	33.68	12	183	116	36.61
5	180	115	36.11	13	97	64	34.02

6	210	123	41.43	14	99	65	34.34
7	150	98	34.67	15	83	57	31.33
8	171	110	35.67	16	84	57	32.14

由表 5.4 可得, 针对单贝位装卸的集装箱船舶, 采用堆垛的混合装卸策略在装卸效率上较传统装卸方法平均提高 36.75%。以贝位 9 为例, 按传统的方法, 岸桥需要操作循环 224 次, 而按堆垛混合装卸优化后, 岸桥需操作循环 128 次, 装卸效率提高了 42.86%。同时, 从表 5.4 中可以看出, 随着贝位中作业量的增加, 优化效率随之增加。

5.3 调度模型求解

由于模型涉及的决策变量比较多, 本文把整个模型的求解过程分为两个部分: 泊位计划和岸桥的分配与调度, 因此, 本文提出了一种嵌套式循环算法, 其中包括两个基于遗传算法的内循环和一个参数传递的外循环, 外循环对两个内循环进行迭代和反馈, 结构如图 5.16 所示。

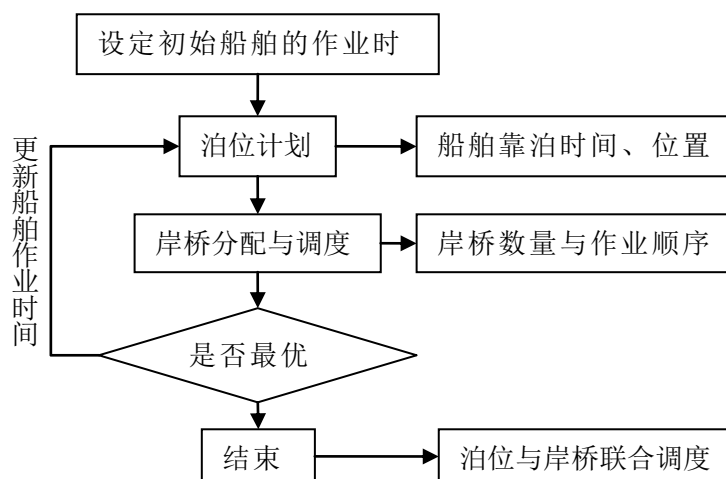


图 5.16 算法结构图

5.3.1 内循环 1: 泊位计划算法

内循环 1 是求解泊位分配的模型, 根据初始假定的每一船舶的作业时间, 来分配船舶的靠泊时间、位置。由于泊位分配问题为 NP 难题, 本文使用遗传算法求解此类问题。

(1) 染色体编码

本文采用自然数编码，染色体采用二维染色体编码形式表达。染色体的列数是船舶总数，从左到右的顺序为船舶序号，每一列代表每艘船舶的相关信息。染色体的第一行表示船舶靠泊位置，第二行表示船舶靠泊时间。图为 5.17 艘船舶的泊位计划的染色体编码，以第一列为例，船舶 1 的靠泊位置是 50，靠泊时间是 30。

	船舶	船舶 2	船舶	船舶 4	船舶
位	100	300	1100	400	800
时	6	2	12	20	17

图 5.17 泊位计划染色体编码

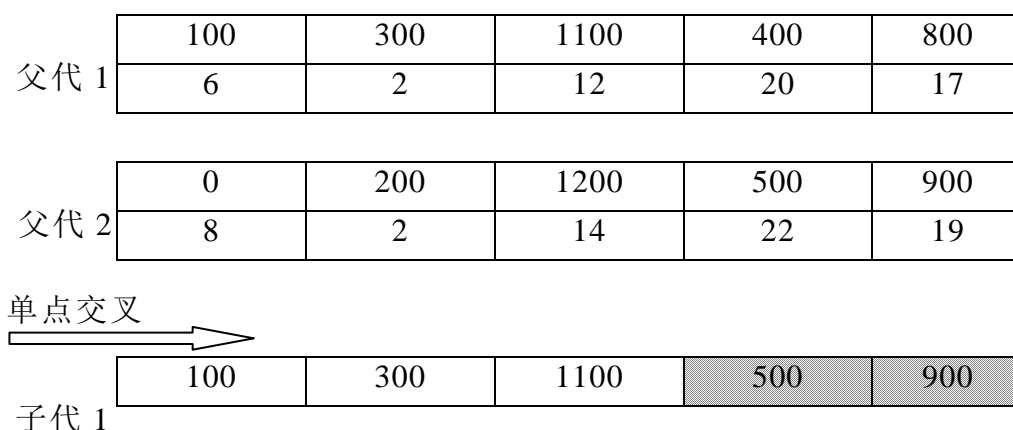
(2) 适应度函数

模型的目标函数 $\text{Min}F = \sum_i \left(\mu_i(E_i - D_i) + \alpha_i(dl_i + dr_i) + \sum_{t=S_i}^{E_i} \text{exchang}_{it} \right)$ ，由于泊位计划只涉及到船舶的在泊时间和泊位的偏移问题，因此内循环 1 的目标函数为： $\text{Min}F = \sum_i (\mu_i(E_i - D_i) + \alpha_i(dl_i + dr_i))$ 。根据目标函数是最小化问题，应采用如下适应度函数： $f(x) = 1/y(x)$ ，式中： $f(x)$ 为适应度值， $y(x)$ 为内循环 1 的目标函数值。

(3) 遗传操作

选择操作采用轮盘赌法。交叉操作采用单点交叉方式，染色体的第一行和第二行分别采用单点交叉。

单点交叉是在第一行和第二行染色体中随机选择一点，此点之前的基因继承父代 1 的基因，此点之后的基因继承父代 2 的基因。交叉过程如图 5.18。



	8	2	14	22	19
子代 2	0	200	1200	400	800
	6	2	12	20	17

图 5.18 染色体单点交叉

变异操作，针对每一行染色体，随机选择两个基因，互换两个基因。变异过程如下图 5.19。

父代	100	300	1100	400	800
	6	2	12	20	17
变异 →					
子代	100	400	1100	300	800
	6	2	17	20	12

图 5.19 染色体变异

5.3.2 内循环 2：岸桥分配与调度算法

内循环 2 在内循环 1 泊位计划的基础上，求解岸桥分配与调度。由于岸桥分配与调度问题也属于 NP 难题，所以内循环 2 也采用遗传算法求解。

这里，我们假设岸线是一个虚拟的大型集装箱船，贝位号从左到右依次编号 1-100。在已知船舶靠泊时间和位置的情况下，可以确定每艘船舶的开始作业时间和贝位在岸线上的编号。

（1）染色体编码

采用自然数编码方式。构建一个二维矩阵作为一个染色体，其中染色体的列数为船舶数量，行数表示船舶中最多任务的数量。如下图 5.20 所示，每一列代表一艘船舶的相关信息，每一列上的数字代表任务的标号，从上到下的排列代表任务的分配顺序。

	船舶 1	船舶 2	船舶 3	船舶 4	船舶 5
任务分配顺序	1	4	3	2	5
	4	3	4	3	4
	2	5	2	1	2
	3	1	5	4	1
	5	6	1	0	3
	6	2	6	0	0

图 5.20 岸桥分配与调度染色体编码

(2) 适应度函数

内循环 2 是在内循环 1 结果的基础上（也就是泊位计划：靠泊时间和靠泊位置），研究岸桥调度问题，因此问题的目标函数为：

$$\text{Min}F = \sum_i \left(\mu_i(E_i - D_i) + \alpha_i(dl_i + dr_i) + \sum_{t=S_i}^{E_i} \text{exchang}_{it} \right)$$

题，应采用如下适应度函数： $f(x)=1/y(x)$ ，式中： $f(x)$ 为适应度值， $y(x)$ 为目标函数值。

(3) 遗传操作

选择操作位轮盘赌法。交叉操作采用扩展修补交叉。先随机生成一个由 0 或 1 构成的与父代染色体结构一样的染色体，随机选择两个染色体作为父代，在随机生成的染色体中，找到值为 1 的基因位，将父代中相同基因位的非 0 基因复制到子代中，再在父代 2 中删除子代中已有的基因，然后将父代 2 中剩余的基因按顺序从上到下填入子代空余基因位中，若还有空余的基因位用 0 补齐，如图 5.21。变异操作选择交换变异，在每艘船舶中随机选择两个基因，交换其位置，如图 5.22。

父代	二元染色	子代
1 4 3 2 5	1 0 0 0 0	1 0 0 0 0
4 3 4 3 4	0 0 4 3 0	0 0 1 1 0
2 5 2 1 2	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0
3 1 5 4 1	3 1 5 0 1	1 1 1 0 1
5 6 1 0 3	0 0 0 0 0	0 0 0 1 0
6 2 6 0 0	0 2 0 0 0	0 1 0 0 0

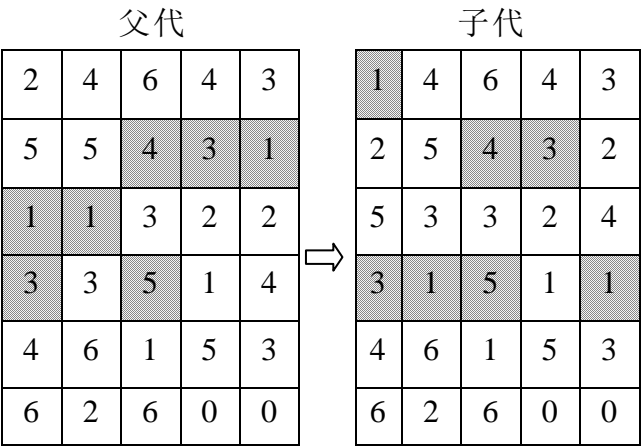


图 5.21 交叉过程

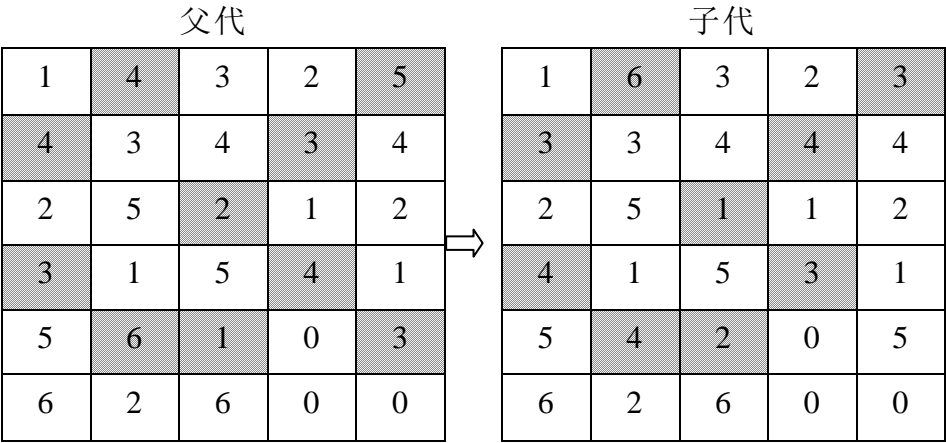


图 5.22 变异过程

5.3.3 外循环算法

内循环 1 用于求解泊位分配问题，内循环 2 用于求解岸桥分配与调度问题。外循环算法主要用于传递两个内循环之间的参数，实现两个问题的衔接，还可以通过两个内循环的迭代和反馈，不断改进泊位与岸桥联合调度解的质量和计划的性能。算法的流程图 5.23 如下。

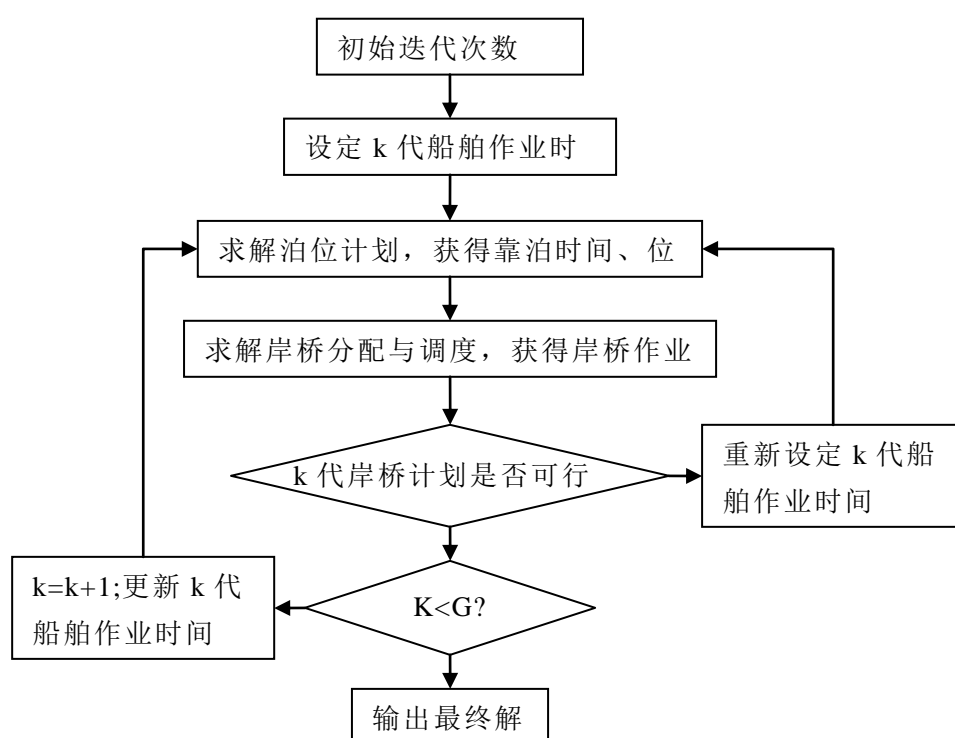


图 5.23 外循环算法流程图

算法设计思想：

- (1) 初始化：k=1。
 - (2) 根据每艘船舶的装载和卸载量，按一定的作业效率设定每艘船舶作业需要的时间；
 - (3) 根据上一步设定的作业时间，使用遗传算法求解泊位计划，获得每艘船舶的靠泊时间和位置。
 - (4) 根据上一步获得的泊位计划，把内循环 1 中结果参数传递到内循环 2 中，使用遗传算法求解岸桥分配与调度，获得岸桥作业顺序。
 - (5) 判断步骤 (4) 获得的岸桥调度结果是否正确、合理，如果“是”，进入步骤 (6)，否则，重新设定初始船舶作业时间，重复步骤 (3)。
 - (6) 判断外循环的迭代次数是否满足，如果“是”，进入步骤 (7)，否则，根据当前的岸桥分配与调度结果更新船舶作业时间，重复步骤 (3)，
 - (7) 当迭代次数满足时，退出循环，输出最终解。
- 步骤 (2) 中，在设定初始船舶作业时间过程中，令每艘船舶作业时间=船舶总作业量/岸桥平均作业效率。步骤 (5) 中，重新设定初始船舶作业时间时，令每艘船舶作业时间=船舶总作业量/岸桥平均作业效率 $\times(0.9 \sim 1.1)$ 。步骤

(6) 中, 在更新船舶作业时间过程中, 船舶作业时间
 $= \sum \text{每一贝位作业时间} = \sum (\text{单循环次数} \times \text{岸桥单循环效率} + \text{双循环次数} \times \text{岸桥双循环效率})$
 。

5.4 本章小结

在求解连续泊位与岸桥联合调度模型之前, 需要求解单位任务岸桥的作业时间。对于时间模型的求解, 由于问题较小型, 本章设计了一种单亲遗传算法来分别求解多贝位和单贝位时间模型, 并通过数值计算, 验证了模型和算法的有效性。根据建立的连续泊位与岸桥联合调度模型特点, 设计了一种嵌套式遗传算法, 算法中包括两个内循环和一个外循环, 两个内循环分别用于求解泊位分配和岸桥分配与调度, 一个外循环用于传递和反馈两个内循环参数。

6 案例研究

6.1 案例介绍

本文针对单贝位装卸和多贝位装卸两种不同船舶的作业方式研究，由于大部分的集装箱码头停靠的都是单贝位装卸类型的船舶，而多贝位装卸类型的船舶在实际码头中很少，为验证第五章模型和算法的有效性，参照现有的停靠大型集装箱船舶的宁波梅山岛国际集装箱码头，来模拟大型船舶靠、离泊及作业过程。

宁波梅山岛国际集装箱码头有限公司是由宁波港股份有限公司和宁波梅山岛开发投资有限公司共同投资组建的。港区位于北仑梅山岛东南部，与国际航道和锚区相邻，处于宁波—舟山港核心区域，并且码头海岸线水深条件良好。这样优越的地理环境，是保障公司迈向国际一流集装箱码头的前提条件。

梅山岛国际集装箱码头的地理环境优越，能够停靠大型船舶，具有一定的国际影响力，因此，根据宁波梅山岛国际集装箱码头的现有生产状态与特点，模拟集装箱船舶的靠离泊位与岸桥作业过程。

6.2 案例数据

根据宁波梅山岛国际集装箱码头的生产作业状态与特点，本章模拟了集装箱码头 24 小时内靠泊的 5 艘大型集装箱船数据，码头前沿岸线长 1500 米，并配有 13 台岸桥，并且设定岸桥跨船移动的惩罚系数 $\varepsilon = 20$ 。案例分析过程中，我们假设：（1）所使用的单贝位装卸类型的船舶数据与多贝位装卸类型的船舶数据（船舶的贝位、舱位和堆垛数据等）是一样的，并且 5 艘单贝位装卸类型的或多贝位装卸类型的集装箱船的模型参数数据如表 6.1；

（2）每艘集装箱按船头、船尾和中间分为三个部分，且其装卸量均匀分为 4 份，船头和船尾各占 1 份，中间部分占 2 份，这些集装箱装卸量随机分布于每一贝位，每一贝位的装卸量随机分布于每一堆垛；（3）岸桥平均作业效率是 30TEU/(台·h)，岸桥单循环效率是 28 TEU/(台·h)，岸桥双循环效率是 32 TEU/(台·h)。

表 6.1 船舶参数数据

船舶	船长	到港时间	装卸量	μ_i	偏好靠泊位置	最大岸桥数	α_i	要求离港时间
----	----	------	-----	---------	--------	-------	------------	--------

1	300	1	720	1	0	5	0.04	9
2	500	2	1500	2	500	6	0.05	12
3	300	1	1800	3	200	5	0.01	13
4	200	3	1200	1	600	4	0.03	13
5	300	3	900	2	900	5	0.02	13

此处的“要求离港时间”为船公司受班轮班期所限，为码头作业完成时间设定的最大值，实际码头作业中，会或多或少的延期，虽然在后续航行中可以加快航行速度以保证准班，但船公司由于加速而会带来额外消费，从而会影响到船公司对码头的信誉度。

6.3 案例结果分析

对 6.2 节中案例，采用第四、五章设计的模型与算法，首先根据时间模型和算法得到的单循环和双循环次数，求得调度模型中每一单位任务的作业时间，然后根据调度模型和算法求解案例，运用 MATLAB2007 编写本文设计的遗传算法程序，计算的运行环境为 Windows Xp，主频 2.20GHz，内存 2.00G。设计遗传算法参数：种群规模 80，交叉概率 $P_c=0.8$ ，变异概率 $P_m=0.1$ 。

(1) 时间模型求解

为便于编程求解，我们假定每一组甲板需要先作业最左边的贝位。根据模拟出的 5 艘集装箱船数据，分别计算每艘船舶每个贝位岸桥作业的单循环和双循环次数，同时可以得到调度模型中单位任务的堆垛装卸顺序（如 5.2.3）。特别指出，对于多贝位装卸类型船舶，一个贝位的作业分为两个部分：混合装卸和单装或单卸，所以单循环次数为混合装卸的单循环次数和单装或单卸次数之和。最后结果为表 6.2 和表 6.3。

表 6.2 针对多贝位装卸类型的船舶情况

贝 位 号	船舶 1		船舶 2		船舶 3		船舶 4		船舶 5	
	单循 环	双循 环	单循 环	双循 环	单循 环	双循 环	单循 环	双循 环	单循 环	双循 环
1	4(0)	13	43(24)	50	43(21)	50	10(6)	13	13(3)	33
2	13(7)	25	45(30)	56	37(17)	66	18(9)	24	13(1)	26
3	15(8)	30	34(14)	59	40(20)	77	35(19)	45	17(7)	28
4	27(12)	26	36(16)	66	51(30)	64	46(27)	43	29(18)	24

5	22(15)	40	43(23)	55	56(28)	76	51(26)	63	42(20)	50
6	20(13)	35	68(39)	61	78(45)	101	53(22)	72	50(26)	65
7	13(6)	36	50(23)	65	50(29)	69	46(21)	66	33(17)	46
8	27(17)	30	48(21)	58	47(24)	59	42(26)	44	27(13)	30
9	16(2)	40	34(12)	56	46(22)	60	34(15)	47	25(14)	31
10	15(5)	26	28(15)	46	34(13)	46	23(10)	23	16(7)	25
11	20(12)	22	24(10)	37	30(12)	37	28(19)	33	22(11)	20
12	7(4)	12	23(13)	30	55(26)	65	25(16)	28	8(2)	15

注：（1）单位为次数；（2）括号内为甲板上部分的集装箱单装或单卸

表 6.3 针对单贝位装卸类型的船舶情况

贝 位 号	船舶 1		船舶 2		船舶 3		船舶 4		船舶 5	
	单循 环	双循 环	单循 环	双循 环	单循 环	双循 环	单循 环	双循 环	单循 环	双循 环
1	6	13	18	40	18	52	6	18	7	13
2	13	23	11	28	23	57	25	47	15	31
3	15	30	25	67	35	65	21	43	20	30
4	17	38	26	53	25	70	24	53	18	38
5	19	50	28	61	27	76	32	65	29	70
6	22	43	25	67	34	100	26	76	32	63
7	23	56	23	74	28	78	19	60	23	56
8	27	60	30	89	39	99	20	45	26	60
9	16	40	28	70	20	72	21	51	26	46
10	11	29	27	67	27	63	11	35	16	34
11	10	33	19	34	24	61	9	18	9	34
12	6	14	12	27	13	23	14	30	9	14

注：单位为次数

（2）调度模型求解

根据上面时间模型算法求得的岸桥作业的单循环和双循环次数，和已知岸桥单循环和双循环作业效率，调度模型中可以得到每一单位任务作业时间。然后根据优化调度模型和算法，可以获得 5 艘船舶的靠泊位置、离泊时间、所分配岸桥数量和岸桥作业任务。

1) 针对多贝位装卸类型的船舶情况

MATLAB 计算，遗传算法迭代到 226 代时，得到最小惩罚值 198。计算的优化过程如图 6.1。岸桥服务的任务如表 6.4。调度优化结果如表 6.5，得出船舶靠泊位置、最后离港时刻和三部分惩罚值。调度优化结果与岸桥数量分配下的 5 艘船舶作业时间对比如表 6.6。

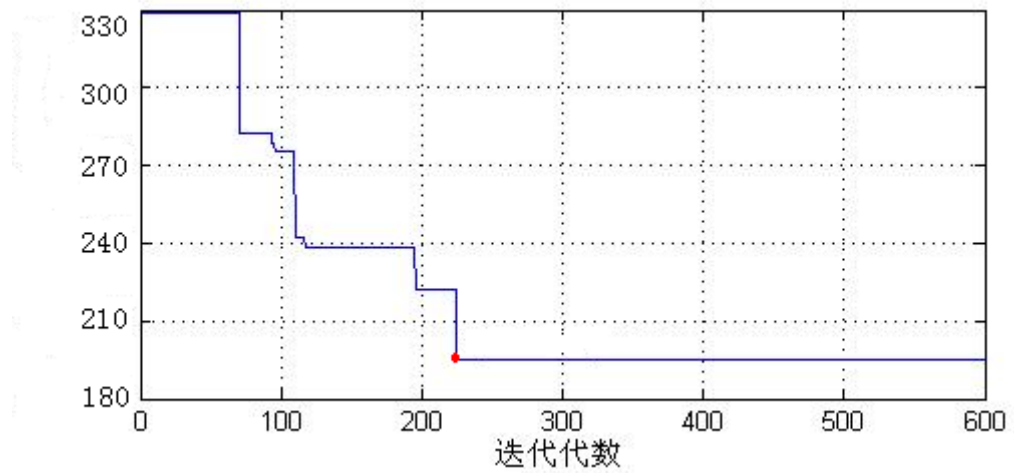


图 6.1 多贝位装卸算法进化收敛图

表 6.4 岸桥服务的任务

	船舶 1	船舶 2	船舶 3	船舶 4	船舶 5
贝位 1	1	8	4	1	11
贝位 2	1	8	4	1	11
贝位 3	1	9/8	5/4	1	12/11
贝位 4	2/1	9/8	5	2/1	12/11
贝位 5	2/1	9	6/5	2	12
贝位 6	2	9	6	2	12
贝位 7	2	10/9	6	2	13/12
贝位 8	2	10	7	3	13/12
贝位 9	3/2	11/10	7	3	13
贝位 10	3	11/10	8/7	4/3	13
贝位 11	3	11	8	4	13
贝位 12	3	11	8	4	13

注：中间值为岸桥号

表 6.5 调度问题结果表

船舶	靠泊位置	离港时刻	延迟离港惩罚	靠泊位置偏离惩罚	岸桥移动惩罚
1	0	7	0	0	20

2	600	17	10	4	20
3	300	15	6	1	0
4	100	17	4	15	40
5	1100	20	14	4	60

注：为便于计算，离港时刻取整数

表 6.6 与传统方法作业时间对比表

船舶	优化结果	传统时间	优化率(%)
1	7.1	8.6	17.4
2	8.7	10.7	18.6
3	10.3	12.8	19.6
4	8.7	10.6	17.9
5	6.7	8.0	16.3

本文设计的泊位与岸桥联合调度优化方法相对于传统的集装箱码头作业方式，在保证码头作业最小惩罚的基础上，每条船舶的作业时间都相应得到优化。

2) 针对单贝位装卸类型的船舶情况

MATLAB 计算，遗传算法迭代到 400 代时，得到最小惩罚 189。计算的优化过程如图 6.2。岸桥服务的任务如表 6.7。调度优化结果如表 6.8，得出船舶靠泊位置、最后离港时刻和三部分惩罚值。调度优化结果与岸桥数量分配下的 5 艘船舶作业时间对比如表 6.9。

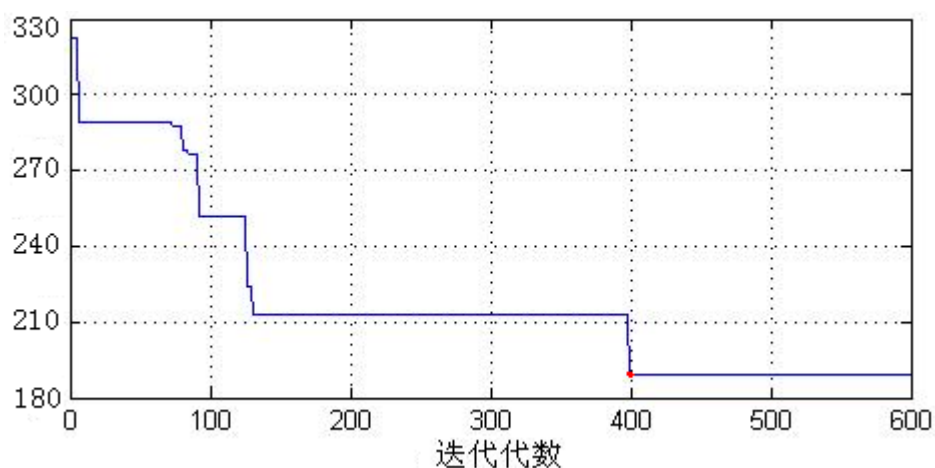


图 6.2 算法进化收敛图

表 6.7 岸桥服务的任务

	船舶 1	船舶 2	船舶 3	船舶 4	船舶 5
贝位 1	1	8	4	1	11
贝位 2	1	8	4	1	11
贝位 3	1	9	5	1	11
贝位 4	2	9	5	1	12
贝位 5	2	9	6	2	12
贝位 6	2	9	6	2	12
贝位 7	2	10	7	2	12
贝位 8	3	10	7	3	12
贝位 9	3	10	8	3	13
贝位 10	3	11	8	4	13
贝位 11	4	11	8	4	13
贝位 12	4	11	8	4	13

注：中间值为岸桥号

表 6.8 优化调度结果

船舶	靠泊位置	离港时刻	延迟离港惩罚	靠泊位置偏离惩罚	岸桥移动惩罚
1	0	7	0	0	20
2	600	15	6	4	40
3	300	14	3	1	20
4	100	17	4	15	0
5	1100	19	12	4	60

注：为便于计算，离港时刻取整数

表 6.9 与传统方法作业时间对比表

船舶	优化结果	传统时间	优化率(%)
1	6.7	8.6	22.1
2	8.1	10.7	24.3
3	9.3	12.8	27.3
4	8.2	10.6	23.6
5	6.4	8.0	19.6

本文设计的泊位与岸桥联合调度优化方法相对于传统的集装箱码头作业方式，在保证码头作业最小惩罚的基础上，每条船舶的作业时间都相应的得

到优化。同时，与表 6.6 相比，采用本文设计的泊位与岸桥联合调度优化方法，单贝位装卸类型的船舶优化效率普遍优于多贝位装卸类型的船舶。

6.4 本章小结

根据宁波梅山岛国际集装箱码头生产作业状况，模拟了 5 艘大型船舶停靠码头过程，并获得了泊位与岸桥优化调度所需的数据。将连续泊位与岸桥联合调度优化方法应用于模拟数据中，对多贝位装卸类型船舶的泊位与岸桥联合调度进行优化，采用改进的遗传算法，算例分析，得到最小惩罚值为 198，对单贝位装卸类型船舶的泊位与岸桥联合调度进行优化，采用改进的遗传算法，算例分析，得到最小惩罚值为 189。在客户满意率最大的情况下，与传统的集装箱码头作业方式相比，每艘船舶在港时间都得到一定减少。由案例分析可验证，本文提出的优化方法在提高码头运营效率方面有着积极的意义。

7 结论与展望

7.1 研究结论

本文在传统意义上的泊位与岸桥联合调度思想的基础上，设计了连续泊位与岸桥联合调度优化方法。此种方法考虑了岸桥的混合装卸因素，还考虑了船舶甲板的约束限制，针对多贝位和单贝位这两种装卸方式的船舶，建立了连续泊位与岸桥联合调度模型，并使用改进后的遗传算法求解模型。在最小惩罚的基础上，本文研究动态到达的船舶在连续泊位上靠、离泊及作业状态，提高客户对集装箱码头的满意率，进而提高码头的运营效率。依据宁波梅山岛国际集装箱码头的运作情况，模拟算例，验证了本文设计的优化方法的可行性及有效性，并为集装箱码头泊位与岸桥联合调度相关问题研究提供了依据。

论文的研究成果：

（1）根据集装箱码头生产特点及本文对连续泊位与岸桥联合调度问题界定，建立了优化调度模型。设计的模型中还包含一个小模型——时间模型，用以求解大模型中单位任务的作业时间。连续泊位与岸桥联合调度模型不仅研究泊位的分配和岸桥的分配，还研究岸桥在任务间的调度。

（2）由于所设计的模型的复杂性，本文改进了传统的遗传算法，提出了一种嵌套式的遗传算法。算法中包含一个外循环和两个内循环，两个内循环分别用以求解泊位分配和岸桥分配与调度，外循环用以传递与反馈两个内循环参数。

（3）定义并研究多贝位装卸类型船舶，对此种类型船舶的泊位与岸桥联合调度进行优化，采用改进的遗传算法，算例分析，得到最小惩罚值为 198。在客户满意率最大的情况下，每艘船舶在港时间都得到一定的减少。

（4）描述并研究单贝位装卸类型船舶，对此种类型船舶的泊位与岸桥联合调度进行优化，采用改进的遗传算法，算例分析，得到最小惩罚值为 189。在客户满意率最大的情况下，每艘船舶在港时间都得到一定的减少。

7.2 研究展望

对本课题未来研究方向的展望，可以向着以下四个方面发展：

（1）本文是以最小化惩罚为优化目标建立模型，仅仅考虑提高客户的满意率，在未来的研究中可以建立多目标优化的模型，不仅考虑客户的满意率，还要最小化船舶在港时间，以提高码头的运营效率；

（2）本文建立模型时，为简化问题忽略了岸桥在贝位间的移动时间，在未来建模时，应考虑岸桥移动时间，使模型更接近码头实际生产；

（3）使用遗传算法对模型求解时，设计新的编码，更利于连续泊位与岸桥联合调度问题的求解；

（4）对嵌套式遗传算法进行改进，使其更易编程、更适应问题求解。

参考文献

- [1] 卓骏. 国际贸易理论与实务[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 22
- [2] 陶经辉, 张晓萍, 陆旻. 集装箱港口智能化调度研究综述与展望[J]. 中国港口, 2008, 4: 21-24.
- [3] 冯春焕. 集装箱码头泊位-岸桥-集卡调度优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011, 1-56.
- [4] Lai K K, Shih K. A study of container berth allocation[J]. Journal of Advanced Transportation, 1992, 26:45-60.
- [5] Lim A. The Berth Planning Problem[J]. Operations Research Letters, 1998, 22(2) : 105- 110.
- [6] 王军, 李卓蓉. 基于遗传算法的动态泊位分配问题优化研究[J]. 中国水运, 2011, 11 (1) : 63-66.
- [7] Imai A, Nagaiwa K, Tat C W. Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia. Journal of Advanced Transportation, 1997, 31(1): 75~94
- [8] Hansen P, Oguz C. A note on formulations of static and dynamic berth allocation problems. Les Cahiers du GERAD, 2003, 30: 1~17
- [9] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S. Berthing ships at a multi-user container terminal with a limited quay capacity. Transportation Research Part E, 2008, 44(1): 136-151
- [10] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S. Berth allocation with service priority. Transportation Research Part B, 2003(37): 437-457.
- [11] Guan Y, Cheung R K. The berth allocation problem: models and solution methods. OR Spectrum, 2004, 26(1): 75-92.
- [12] Park K T, Kim K H. Berth scheduling for container terminals by using a subgradient optimization technique. Journal of the Operational Research Society, 2002, 53(9): 1054-1062.
- [13] Kim K H, Moon K C. Berth scheduling by simulated annealing. Transportation Research Part B, 2003, 37(6): 541-560.
- [14] Lim A. The berth planning problem. Operations Research Letters, 1998, 22(2): 105-110.
- [15] Tong C J, Lan H C, Lim A. Ant colony optimization for the ship berthing problems. In: Thiagarajan P S, Yap R, eds. Fifth Asian Computing Science Conference, Springer, Berlin et al, 1999. 359-370.
- [16] Gob K S, Lim A. Combining various algorithms to solve the ship berthing problem. In: Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2000. 370-373.
- [17] Imai A, Sun X, Nishimura E. Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach [J]. Transportation Research Part B, 2005,39(3):199-221.

- [18] Park Y M, Kim K H. A scheduling method for berth and quay cranes[J]. OR Spectrum, 2003, 25: 1-23.
- [19] 李强, 杨春霞, 王诺等. 集装箱码头泊位生产调度均衡优化[J]. 沈阳建筑大学学报, 2008, 24 (6) 1132-1136.
- [20] Mihalios M. Golias, Maria Boile, Sotirios Theofanis. Berth scheduling by customer service differentiation: A multi-objective approach[J]. Transportation Research Part E, 2009,45:878-892.
- [21] 李强. 集装箱码头泊位调度均衡优化方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009, 1-115.
- [22] 孙彬. 基于多 Agent 的集装箱码头泊位调度系统的建模与优化[D]. 天津: 天津理工大学, 2010, 1-83.
- [23] Lu Zhen, Loo Hay Lee, Ek Peng Chew, A Decision Model for Berth Allocation under Uncertainty[J]. European Journal of Operational Research, 2011(212):54-68.
- [24] Mihalios Golias, Isabel Portal, Dincer Konur, Evangelos Kaisar, Georgios Kolomvos. Robust Berth Scheduling at Marine Container Terminals Via Hierarchical Optimization. Computers & Operations Research. 2014, Vol.41:412-422
- [25] Daganzo C F. The Crane Scheduling Problem[J]. Transportation Research B, 1989, 23 (3) : 159-175.
- [26] Peterkofsky R I, Daganzo C F. A Branch and Bound Solution Method for the Crane Scheduling Problem[J]. Transportation Research B, 1990, 24 (3) :159-172.
- [27] Bish EK. A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 144 (1) :83-107.
- [28] Kim K H, Park Y M. A crane scheduling method for port container terminals[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 156 (3) , 752-786.
- [29] Lee D H, Wang H Q, Miao L. Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals[J]. Transportation Research Part E, 2008, 44, 124-135.
- [30] 韩笑乐, 梁亮, 陆志强等. 集装箱码头岸吊作业调度建模及调度策略研究[J]. 工业工程与管理, 2009, 14 (5) :20-26.
- [31] 李晨, 陆志强, 陈璐. 具有岸桥碰撞和甲板约束的岸桥混合装卸作业调度优化[J]. 上海交通大学学报, 44 (8) :1159-1164.
- [32] Zhu Y, Lim A. Crane scheduling with non-crossing constraint[J]. Journal of the Operational Research Society, 2005, 57 (12) , 1464-1471.
- [33] Liu J, Wan Y W, Wang L. Quay crane scheduling at container terminals to minimize the maximum relative tardiness of vessel departures[J]. Naval Research Logistics, 2006, 53 (1) , 60-74.
- [34] Goodchild, A V. Crane Double Cycling in Container Ports: Algorithms, Evaluation, and Planning[D]. California: University of California, 2005.

- [35] Goodchild A V, Daganzo C F. Double-Cycling Strategies for Container Ships and Their Effect on Ship Loading and Unloading Operations[J]. Transportation Science, 2006, 40 (4) , 473-483.
- [36] Der-Horng Lee, Hui Qiu Wang, Lixin Miao. Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals[J]. Transportation Research Part E, 2008,44:124-135.
- [37] Zhang H, Kim K H, Maximizing the number of dual-cycle operations of quay cranes in container terminals[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56 (3) :979-992.
- [38] 靳志宏, 李娜. 基于泊位计划的集装箱码头岸桥动态调度优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11 (3) : 58-64.
- [39] S.H. Chung, K.L. Choy. A modified genetic algorithm for quay crane scheduling operations[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39:4213-4221.
- [40] Ali Diabat, Effrosyni Theodorou. An Integrated Quay Crane Assignment and Scheduling Problem. Computers & Industrial Engineering. 2014, Vol.73:115-123
- [41] Yi-Min Fu, Ali Diabat. A Lagrangian relaxation approach for solving the integrated quay crane assignment and scheduling problem. Applied Mathematical Modelling. 2015, Vol.39:1194 - 1201
- [42] 杨春霞, 王诺, 基于多目标遗传算法的集装箱码头泊位-岸桥分配问题研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27 (5) : 1720-1722.
- [43] Li C L, Cai X, Lee C Y, Scheduling with multiple-job-on-one-processor pattem[J]. IE Transactions, 1998, 30: 433-445.
- [44] Guan Y, Xiao W Q, Cheung R K, et al. A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: Heuristic and worst-case analysis[J]. Operations Research Letters, 2002, 30(5): 343-350.
- [45] 韩骏, 孙晓娜, 靳志宏. 集装箱码头泊位与岸桥协调调度优化[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34(2): 117-121.
- [46] 靳志宏, 徐奇, 韩骏, 等. 集装箱码头泊位与岸桥联合动态调度[J]. 中国科技论文在线, 2011, 6(11): 809-814.
- [47] Ak A, Erera A L. Simultaneous berth and quay crane scheduling for container ports[R]. USA: Georgia Institute of Technology, 2006.
- [48] Chengji Liang, Youfang Huang, Yang Yang. A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56: 1021-1028.
- [49] Birger Raa W, Dullaert R, Schaeren V. An enriched model for the integrated berth allocation and quay crane assignment problem[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38: 14136-14147.
- [50] 乐美龙, 刘菲. 基于算 Memetic 算法的泊位和岸桥分配问题[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(11): 66-71.

- [51] 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.
- [52] 桂小娅, 陆志强, 韩笑乐. 集装箱码头连续泊位与岸桥集成调度[J]. 上海交通大学学报, 2013, 2 (47) : 226-230.
- [53] 赵坤强, 韩晓龙, 梁承姬. 连续泊位下集装箱码头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) : 61-66.
- [54] 余刘海, 庞洪静. 集装箱码头连续泊位与岸桥联合调度[J]. 科技信息, 2013, 9: 196-197.
- [55] Yavuz B. Turkogullar, Z. Caner Taskin, Necati Aras, I. Kuban Altinel. Optimal berth allocation and time-invariant quay crane assignment[J]. European Journal of Operational Research in container terminals, 2013, 1-14.
- [56] 彭丽姣, 韩晓龙. 连续泊位下泊位分配与岸桥动态调度的联合优化[J]. 水运工程, 2013, 4: 83-88.
- [57] 杨华龙、滕川川. 基于挤压算法的集装箱码头泊位与岸桥联合调度优化. 大连海事大学学报[J]. 2014, Vol. 40, (3) :8-12
- [58] 蒋大培, 胡志华, 胡少龙. 考虑偏好泊位的泊位和岸桥集成分配问题. 广西大学学报: 自然科学版[J]. 2014, 39 (3) : 663-672.
- [59] 吕赛赛, 韩小龙. 基于船舶优先权的泊位与岸桥耦合优化. 河南科学[J]. 2014, 32 (4) : 531-536.

在学研究成果

一、 在学期间所获的奖励

2013 年 10 月获全国研究生建模大赛三等奖

2013 年 12 月获宁波大学“课程优秀”奖学金

2014 年 10 月获宁波市学术节银奖

2014 年 12 月获宁波大学“科研优秀”奖学金

二、 在学期间发表的论文

张小莉，刘桂云. 基于堆垛的集装箱混合装卸方法的优化[J]. 科技与管理, 2014,16（6）：52-57.

Xiaoli Zhang, Guiyun Liu. Development Model of the Intelligent Port: a case study of Ningbo-Zhoushan Port[C]. 2014(2):1523-1527.

致 谢

在本课题研究的整个过程中，我要深深地感谢以下对我支持和帮助的人：

首先，我要感谢我的导师刘桂云老师，从选题、研究到论文即将完成的这三年多时间中，给予我很大的指导，每当课题研究出现瓶颈时，通过与刘老师的沟通交流，在她的帮助下，使我明确继续研究的思路；除了科研上的指导，在校期间我遇到的学习、社会实践、以及工作问题都会向刘老师请教，她也总能给我提出建设性意见。

其次，我要感谢我们课题组的师兄弟们，课题进展顺利离不开他们在技术及资料提供上提供的大力帮助。

再次，我要感谢我们海运 2012 级研究生班级的每位同学，两年多时间的相处，大家建立了坚定的友谊，无论学习还是生活上都互相帮助，互相探讨，共同进步，共同发展。

最后，我要感谢我的家人，给我创造了一个安逸的继续深造的环境，能顺利完成研究社阶段的科研任务，离不开他们的经济与精神上的支持。