

分类号: U169.63

密 级: 公开

U D C:

单位代码: 11646

# 宁波大学

## 硕士专业学位论文

论文题目: 集装箱码头多船岸桥协同调度方法研究

学 号: 1211084012  
姓 名: 李建辉  
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: 胡燕海 教授

论文提交日期: 2015 年 4 月 23 日

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

Research on quay crane collaborative scheduling among  
vessels in container terminal

Candidate: Li Jianhui

Supervisors: Professor Hu Yanhai

Faculty of Marine  
Ningbo University  
Ningbo 315211, Zhejiang P.R.CHINA

April.23,2015

## 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部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵循此规定）

签名：\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

## 集装箱码头多船岸桥协同调度方法研究

### 摘 要

本文针对集装箱码头岸桥对靠港船舶的集装箱装卸问题，在同步装卸技术思想的基础上，结合实际集装箱码头多船岸桥调度方法，提出了集装箱码头基于同步装卸的多船岸桥协同调度方法。以最小化所有船舶的最大延迟时间为优化目标建立数学模型，并运用单亲遗传算法对模型进行求解，通过计算机进行数值模拟，求得船舶上集装箱装卸任务的最优装卸序列和各船舶的离港时间。通过与传统岸桥装卸模式的对比，验证了基于同步装卸的多船岸桥协同调度方法对于提高集装箱码头岸桥装卸效率，减少资源浪费有着积极的意义。论文主要研究内容如下：

首先，介绍研究背景和意义，以及集装箱码头布局、集装箱装卸设备、集装箱码头生产流程和码头装卸相关术语，为后续设计提出的各装卸方法奠定基础。

其次，提出了单船岸桥调度方法，以船舶装卸时间最小为目标建立模型并用设计单亲遗传算法求解；之后提出基于同步装卸的单船岸桥调度方法，建立数学模型并求解，与传统单船岸桥调度方法进行比较分析，验证方法的可行性与有效性。

再次，针对多船装卸的岸桥调度问题，分别提出了多船静态岸桥协同作业调度方法和多船动态到港岸桥协同作业调度方法，建立数学模型，并设计单亲遗传算法进行求解，求得全岸线船舶集装箱装卸任务的装卸顺序，通过与传统多船岸桥调度方法进行比较，证明了方法的可行性与有效性。

最后，将本文提出的多船岸桥协同调度方法应用于宁波港北仑第二集装箱码头有限公司，通过实际数据计算，本文提出的多船岸桥协同调度方法以及同步装卸方法对提高码头装卸效率方面有着积极的意义。

**关键词：**岸桥调度，同步装卸，协同，单亲遗传算法

## **Research on quay crane collaborative scheduling among vessels in container terminal**

### **Abstract**

Loading and unloading containers by quay cranes (QCs) is studied in this paper. Based on synchronized loading and unloading technology, and combined with actual scheduling method in terminals, quay crane collaborative scheduling among vessels is proposed. Mathematical models are established to minimize the maximum delay time of all ships. Partheno-genetic algorithms(PGAs) are adopted to solve this problem. The optimal loading and unloading sequence and the ships' departure time are got by numerical simulation. It is verified that quay crane collaborative scheduling is helpful to improve the operation efficiency of QCs and has a positive meaning to reduce the waste of resources by compared with traditional mode. The main research contents of this paper are introduced as follow:

Firstly, the research background and significance are introduced, as well as the layout of container terminal production process, the handling facilities, and the related terms of terminal, which lay the foundation for the follow-up proposed handling method.

Secondly, QC scheduling method for single ship is proposed. Mathematical model is established to minimize the operation time of the ship and PGA is designed to solve this problem. Then QC scheduling method based on synchronized loading and unloading for single ship is proposed. It verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method by compared with traditional QC scheduling method.

Thirdly, QC collaborative scheduling methods among vessels which static arriving and dynamic arriving are proposed to solve the loading and unloading problem. Mathematical models are established and PGAs are designed to solve the problems. The optimal loading and unloading sequence are got to compare with traditional mode so that it verifies the feasibility and effectiveness of the proposed methods.

Finally, QC collaborative scheduling method among vessels is applied to The Second Container Terminal Co. Ltd. of Ningbo Beilun harbor. By the real date calculation, the advantage of the collaborative scheduling method and synchronized loading and unloading operation method in container terminal are proved concerning handling efficiency.

**Key Words:** quay crane scheduling, synchronized loading and unloading, collaborative, artheno-genetic algorithms

## 目 录

1 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 集装箱码头概述 .....	2
1.2.1 集装箱码头的布局 .....	2
1.2.2 集装箱装卸机械 .....	3
1.2.3 集装箱码头的作业流程 .....	5
1.3 国内外研究现状 .....	6
1.3.1 单船岸桥作业调度研究 .....	6
1.3.2 多船岸桥作业调度研究 .....	7
1.3.3 同步装卸作业调度研究 .....	8
1.3.4 遗传算法应用研究 .....	9
1.4 本文研究内容 .....	10
2 面向单船装卸的岸桥作业调度方法 .....	12
2.1 单船岸桥作业调度方法 .....	12
2.1.1 单船岸桥作业调度问题描述 .....	12
2.1.2 单船岸桥作业调度优化数学模型 .....	12
2.1.3 模型求解 .....	14
2.1.4 算例分析 .....	16
2.2 基于同步装卸的单船岸桥作业调度方法 .....	18
2.2.1 同步装卸作业问题描述 .....	18
2.2.2 基于同步装卸的岸桥作业调度优化数学模型 .....	19
2.2.3 算例分析 .....	21
2.3 本章小结 .....	24
3 面向多船装卸的岸桥协同作业调度方法 .....	25
3.1 多船静态岸桥协同作业调度方法 .....	25
3.1.1 多船静态岸桥协同作业调度问题描述 .....	25

3.1.2 多船静态岸桥协同作业调度优化数学模型.....	26
3.1.3 模型求解.....	27
3.1.4 算例分析.....	29
3.2 多船动态到港岸桥协同作业调度方法.....	31
3.2.1 多船动态到港岸桥协同作业调度问题描述.....	31
3.2.2 多船动态到港岸桥协同作业调度优化数学模型 .....	32
3.2.3 模型求解.....	34
3.2.4 算例分析.....	36
3.3 本章小结 .....	38
4 工程应用 .....	40
4.1 实例数据 .....	41
4.2 优化结果.....	44
4.2.1 多船岸桥协同调度计算结果.....	44
4.2.2 基于同步装卸的多船岸桥协同调度计算结果 .....	45
4.2.3 不同调度方法结果对比.....	46
4.3 本章小结 .....	46
5 总结与展望.....	47
5.1 研究结论与创新 .....	47
5.2 研究展望 .....	48
参考文献 .....	49
附录 A 集装箱装卸信息 .....	52
在学研究成果.....	58
致 谢.....	59

# 1 绪论

## 1.1 研究背景及意义

随着全球经济一体化的迅速发展,国家间的经济贸易大幅度增长,而集装箱运输业在该过程中起着至关重要的作用。以集装箱作为运输单位的这种便捷的运输方式叫做集装箱运输。该运输方式最大优点是以集装箱为单位对货物进行全程运输,集装箱可以进行公路、铁路、水路、航空联运运输方式,可实现运输方式的直接转换,无需掏箱和重新装箱,大大提高了装卸效率。集装箱运输的标准化与低运营成本,使世界各地经济贸易体系紧密结合在一起,它对整个世界贸易产生了巨大影响。

集装箱码头作为港口物流的节点,在集装箱运输体系中至关重要。其运作效率也就反映了码头的运营管理先进化程度。随着经济贸易的不断增长,目前我国很多港口的集装箱吞吐量超出了港口的设计能力,使得港口超负荷运作。由于码头一些硬件条件的限制,如何提高码头管理能力,从而提高码头生产效率,避免大量的船舶滞港、堆场压货等现象,减少不必要的经济损失,是众多学者关注研究的课题。

作为集装箱码头第一个生产作业环节,集装箱装卸作业的生产效率是影响船舶在港停留时间以及码头整体运输效率的关键因素。当下,我国很多港口经常发生船舶压港现象,一艘船舶往往要在锚地等上 10 多个小时才能进港服务,有的甚至要等上 1 天的时间。提高港口的服务能力,港口资源的合理、充分使用显得格外重要。作为码头的主要装卸工具,提高岸桥装卸效率显得非常重要。因此制定一个合理完善的岸桥调度计划,安排集装箱装卸作业顺序,实现在满足船舶离泊时间要求的前提下,尽可能缩短船舶停靠时间,均衡岸桥间的生产作业,最终提高码头的生产效率,显得迫切重要。

过去码头制定岸桥调度计划,先是为集装箱船舶确定分配的岸桥数量,再确定具体岸桥,这些岸桥投入作业后一般都等到该船的所有装卸作业完成后才退出该船舶的作业。当前国内外研究人员所研究问题大多是以单船岸桥调度问题作为研究对象,而对码头多船靠泊情况下的岸桥调度问题的研究少见。就目前集装箱码头实际操作情况来看,也有些码头的岸桥在船与船之间进行协同调度,但也只是凭借调度人员的经验,而没有制定出一个很好的协同调度方法。同时在集装箱装卸作业中,岸桥也只是单程作业,没有实现边装边卸。以上情况使得岸桥资源没有得到充分利用而造成严重浪费。

本文针对集装箱码头岸桥调度现状存在的问题,提出了“集装箱码头多船岸桥协同调度方法”,其最终的实现有利于提高岸桥的装卸效率,减少岸桥闲置现象,提高岸桥利用率,缩短港口集装箱船舶的停留时间,为港口和船主双方获得最大经济利益,从而



吸引更多的船舶挂靠。本方案的提出，在理论上为码头岸桥作业调度的进一步研究提供了参考；在工程运用中，对于打破码头现有的调度模式，提高目前国内大多数港口作业效率有着积极意义。

1.2 集装箱码头概述

1.2.1 集装箱码头的布局

集装箱码头(Container Terminal)是港口码头中停靠转载集装箱的船舶，以及装卸集装箱的作业基地，是由多种设施构成的大型复杂系统，其基本组成部分包括：锚地、进港航道、泊位以及码头前沿、堆场、集装箱货运站、控制室、闸口等。一个高效的集装箱码头作业系统，必须合理安排分配码头布局，把各种资源和各部门有机结合起来，才能最大程度发挥各种装卸运输等设备的作业效率。集装箱码头的布局示意图如图 1. 1 所示。

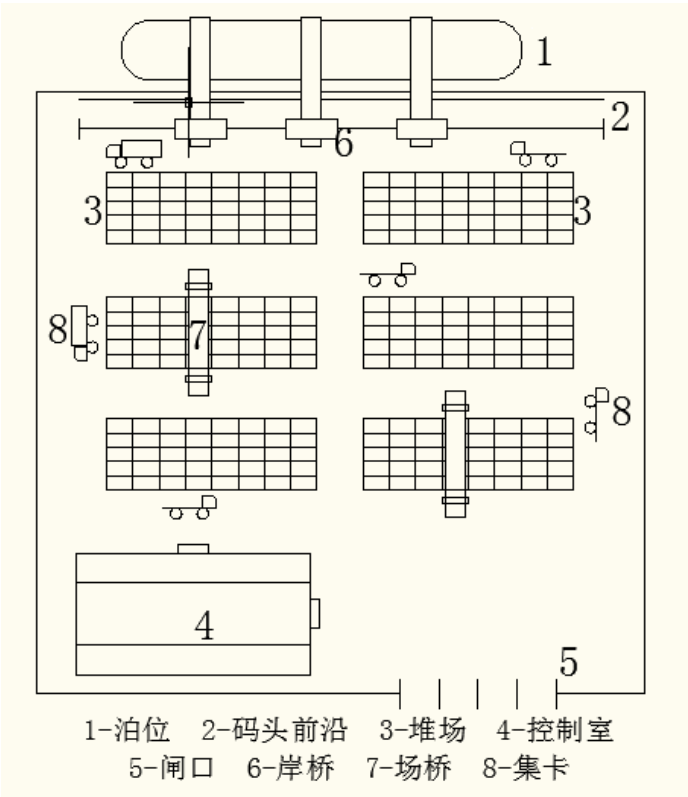


图 1.1 集装箱码头布局  
Fig. 1.1 The layout of container terminal

(1)锚地，指港口中供船舶安全停泊、避风、海关边防检查、检疫、装卸货物和进行

过驳编组作业的水域。又称锚泊地、泊地。当船舶抵港时，若无空闲泊位，船舶需要停在锚地等待已停靠船舶离港后才能靠泊进行服务。

(2)进港航道，是海上或内河主航道和港池间提供船舶进出港口的水道。为确保船舶安全进出，进港航道需有足够的宽度和水深、适当的方位以及较平稳的水流。进港航道可分为天然航道和人工航道。人工航道是指天然水深不能满足船舶航行需要时，人工开挖所成。

(3)泊位，是集装箱码头最基本的硬件资源。靠港船舶的装卸作业都要在泊位上完成。随着集装箱船舶的大型化，泊位必须满足相应的长度、深度等要求。通常为了方便管理和定位，一段连续的泊位会被划分成几个离散的泊位，每个长度基本上为 300 米。

(4)码头前沿，是指码头岸线延伸到堆场的陆地区域，是集装箱码头最繁忙的地方，主要提供岸桥装卸作业以及集卡运输。该区域要有一定的宽广度，以确保设备的正常运作，同时避免运输发生拥堵情况，从而保证码头的生产效率。

(5)堆场，是指集装箱码头临时堆放集装箱货物的一块区域，是办理集装箱装卸，转运，保管，交接的地方，是集装箱码头中重要的组成部分。其大小是影响港口吞吐能力的重要因素。通常划分为若干箱区，便于场桥和集卡作业有序。

(6)集装箱货运站，是集装箱码头后方靠近内陆公路或铁路的区域，主要用于装箱、拆箱、货物保管、交接等。

(7)控制室，是集装箱码头的调度指挥中心，码头作业的中枢机构，主要工作是码头各作业计划的制定，以及对码头运作进行监控和管理。为便于观察整个码头作业情况，一般设置在码头高地势处。

(8)闸口，又叫检查口、大门等，是集卡进出码头的必经之道，负责集装箱信息检查和登记。

### 1.2.2 集装箱装卸机械

集装箱装卸机械样式很多，按功能主要可分为两类：装卸机械和运输机械。运输机械我国普遍采用集卡车。装卸机械有岸桥和场桥两种。

(1)岸桥(quay crane)，全称岸边集装箱装卸桥，又叫岸吊、桥吊，是装卸集装箱的专用机械设备，其体积庞大，是码头最昂贵的设备。岸桥的利用率和作业效率是码头作业中的重要指标，其对船舶在港时间长短起着决定性作用。岸桥一般在只能在同一个固定轨道上移动，导致岸桥不能跨越其他岸桥进行作业，且相邻岸桥在作业中要保持一定的安全距离。本文的主要研究对象就是岸桥。

目前对码头前沿船舶进行装卸作业的设备基本上采用岸壁式集装箱装卸桥（如图 1.2 a）。岸桥专用吊具是用于起吊集装箱的属具，常见的有双 20 英尺集装箱吊具（如图 1.2 b）、双 40 英尺集装箱吊具（如图 1.2 c）、三 40 英尺集装箱吊具（如图 1.2 d）



图 1.2 岸桥类型  
Fig. 1.2 The types of quay cranes

(2)场桥(Yard Crane), 指堆场内集装箱装卸桥, 又叫龙门吊, 主要完成堆场内集装箱的堆垛、移动。按行走方式的不同可分为轮胎式和轨道式两种。其中轮胎式有较强的灵活性, 可在不同的箱区间来回作业。轨道式只能在固定轨道上移动, 灵活性差。现大多数码头堆场采用轮胎式龙门吊, 如图 1.3 所示。



图 1.3 场桥  
Fig. 1.3 The yard cranes

(3)集卡，集装箱卡车的简称，是码头集装箱运输的主要设备，它由牵引车和挂车两部分组成，中间依靠转盘衔接（如图 1.4）。负责将岸桥卸下的进口集装箱运往堆场堆码，或者把出口集装箱从堆场运往码头前沿进行装船，同时也负责堆场内部、堆场与集装箱货运站之间的运输工作。集装箱码头使用最普遍的是 20 英尺、40 英尺规格的集卡。为保证集卡高效作业，必须对集卡进行合理运营调度，避免在运输过程中出现交通堵塞情况。



图 1.4 集卡  
Fig. 1.4 The vehicles

### 1.2.3 集装箱码头的作业流程

集装箱码头的生产作业主要是为到港船舶提供服务的过程，可分为进口作业和出口作业。出口作业是指在船舶到港前将该船所对应的出口集装箱运至码头，由闸口录入集装箱相关信息，同时指示港外集卡将集装箱运至堆场指定箱区，并由场桥将集装箱堆至相应箱区的预定位置，待船舶靠岸，由场桥把集装箱装到港内集卡上，运至码头前沿，由岸桥装上船。对于进口作业，和出口作业相反。详细过程如图 1.5 所示。

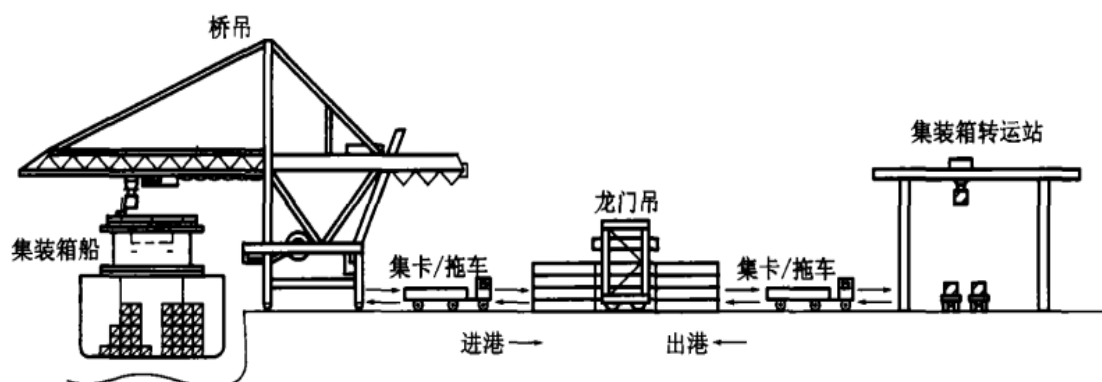


图 1.5 集装箱码头作业流程  
Fig. 1.5 The flow chart of import unloading and export loading

### 1.3 国内外研究现状

岸桥调度问题作为集装箱码头调度优化重要问题之一，一般可描述为将岸桥合理分配给船舶进行装卸作业，并确定装卸任务的作业序列以及作业时间从而达到一定的计划目标。当前国内外学者对集装箱码头岸桥作业调度问题的研究，可分为单船岸桥作业调度和多船岸桥作业调度。

#### 1.3.1 单船岸桥作业调度研究

根据靠泊船舶在装卸作业过程中岸桥数量是否固定，岸桥作业调度模式又可分为动态和静态两种模式。大多岸桥调度及相关研究都以静态为主。静态岸桥调度也相当于对单条集装箱船的岸桥调度进行研究，为船舶服务的岸桥数目和各自岸桥准备时间已经给定。集装箱码头岸桥调度涉及到很多繁琐的因素，如岸桥操作中不可相互穿越并要保持一定的安全距离，以及就绪时间，还有任务优先关系等等。

Kim 和 Park<sup>[1]</sup>考虑了岸桥不可穿越作业的约束，建立一混合整数规划模型，用分支定界法和贪婪算法进行求解，但算法只适于求解小规模问题。Moccia 等<sup>[2]</sup>分析了文献[1]中在干扰约束的不足，改进了调度模型，求解方法采用分支切割法，实现了对中等规模问题的求解，不足就是求解时间较长。Sammorra 等<sup>[3]</sup>用禁忌搜索算法对模型进行求解，求解时间大大降低。Bierwirth 等<sup>[4]</sup>加上了以上文献中未考虑进的一些干扰约束，重建了整数规划模型。Meisel 等<sup>[5]</sup>为验证岸桥调度模型以及求解方法的性能提出了一个标准方法。Unsal 等<sup>[6]</sup>考虑了岸桥移动时间这个约束条件。Lim 等<sup>[7]</sup>将岸桥调度问题看做平行机调度问题，并用模拟退火算法对大规模问题进行求解。Lee 等<sup>[8]</sup>建立了最小化最大完工时间数学模型，采用遗传算法进行优化求解，得到岸桥作业的舱位顺序。秦天保等<sup>[9]</sup>考



虑了岸桥不能相互穿越、安全作业间距、准备时间以及任务作业优先关系等约束，提出一个基于约束规划的岸桥调度模型，用约束规划求解，针对大规模问题能得到较好解。杨明珠<sup>[10]</sup>对单船装卸作业的岸桥调度问题进行了研究分析，考虑了岸桥移动时间和作业均衡性，给出了一种改进的贪婪算法，通过实验对比验证了算法的有效性。乐美龙等<sup>[11]</sup>在考虑任务任务优先顺序约束以及岸桥时间窗、转移时间、初始位置、安全间距、装卸速度等约束条件下，以单船最短岸桥作业时间为目标，建立混合整数线性模型，用启发式算法求解。范志强等<sup>[12]</sup>指出减少岸桥等待时间，提高岸桥利用率，加强岸桥对相邻船舶的支援，对提高码头整体运作效率有着重要意义。故建立了双目标混合整数规划模型，以最小化最大完工时间与岸桥等待时间为目标，用遗传算法求解。张亚辉<sup>[13]</sup>提出二阶模型，先以岸桥作业时间最小为目的，得到岸桥的优化作业线路，并在此基础上，以船舶服务时间最短为目标提出了一个基于离散贝位的岸桥调度混合整数规划模型，并用算例验证模型有效性。

### 1.3.2 多船岸桥作业调度研究

岸桥调度问题与泊位调度问题紧密联系，现有研究大致可分为两类：独立调度方法和集成调度方法。独立调度方法是把成泊位调度和岸桥调度分开来。先进行泊位调度，根据船舶实际情况等估算各船舶作业时间，再计划并获取各船舶的靠泊位置、靠泊时间及离港时间。再在泊位调度的基础上，进行岸桥调度，确定每艘船舶所分配的岸桥数目及编号。现阶段对于集成调度方法的研究比较多，集成调度方法求解时能同时获得泊位、岸桥调度方案，减少了泊位和岸桥独立调度产生的作业冲突。

靳志宏等<sup>[14]</sup>对船舶动态到港下岸桥调度问题进行了研究，以最小化所有船舶的在港作业时间为优化目标，设计算法求解模型，并做了单船与多船岸桥调度的比较。赵坤强、韩晓龙等<sup>[15]</sup>对泊位和岸桥调度进行了研究，先建立泊位分配数学模型，为抵港船舶确定泊位和桥吊数目，再由另一个岸桥调度模型求解得到服务各船舶的具体岸桥编号。杨春霞、王诺<sup>[16]</sup>为求得合理的泊位和岸桥整体分配调度方案，设立了以最小化船舶在港时间和码头生产成本为决策目标的优化模型。韩骏、孙晓娜等<sup>[17]</sup>提出以所有船舶在港时间最小为目标的泊位与岸桥协调调度优化方法，对泊位调度与岸桥分配这两个相互关联的问题进行系统分析与集成，基于免疫遗传算法进行求解。周鹏飞等<sup>[18]</sup>针对船舶抵港时间和装卸作业时间的不确定性，建立了针对随机环境的泊位和岸桥分配模型，以最小化船舶平均等待时间为优化目标，并设计一改进遗传算法进行问题求解。张红菊、乐美龙<sup>[19]</sup>以船舶在港时间和码头运营成本最小为目标建立泊位-岸桥分配模型，采用多目标粒子群算法求解不同规模船舶情况下的模型。白治江、黄卿<sup>[20]</sup>考虑了船舶优先权、理想泊位

及处理时间三方面约束，提出了泊位分配和岸桥配置集成模型。Liang 等<sup>[21]</sup>对每艘船舶停泊位置和时间以及每艘船舶分配的岸桥数量问题进行研究，以最小化船舶的处理时间、等待时间和延迟时间的总和为优化目标，并设计了一启发式遗传算法进行求解。Elwany 等<sup>[22]</sup>在考虑了泊位水深约束条件情况下，设计了一种整合启发式算法同时求解泊位调度问题和岸桥调度问题。Tavakkoli-Moghaddam 等<sup>[23]</sup>提出多船到港情况下岸桥调度以及分配问题，即每艘船的岸桥数量分配和每艘船舶装卸任务顺序调度问题，每到港一艘船或每离港一艘船即启动一次调度计划，但没有实现岸桥在船之间的协同调度。

以上关于多船岸桥调度问题的研究思路大多是先配置各船舶的岸桥数量，然后再给已分配的岸桥进行任务分配，而没有涉及到船与船之间岸桥的协同调度。在该船装卸完工之前，部分岸桥因早已完成分配的任务而闲置，造成资源浪费。故有学者做了关于岸桥在船与船间协同调度的研究。

董良才等<sup>[24]</sup>在所有船舶全都已经靠泊的情况下，以全岸线所有岸桥均衡为目标，建立全岸线岸桥分配调度的混合整数动态规划模型，但是由于没有把岸桥的安全距离和移动时间作为约束考虑进模型当中，所得结果使得岸桥大距离移动且频繁。秦进等<sup>[25]</sup>以所有岸桥使用费和船舶停靠费最小作为优化目标，建立了面向多船的集装箱码头岸桥统一调度优化模型，求解结果没有获得具多船体岸桥调度方案。

### 1.3.3 同步装卸作业调度研究

就国内港口对于集装箱装载与卸载而言，岸桥装或卸载过程中总是又一次空运行的现象，没有满负荷工作，这使设备作业时间长、效率低、成本费用高。同步装卸是码头为提高装卸、运输效率及降低生产成本的一种新的调度模式，其基本思想是：利用集装箱船分为好几个内舱的特征，装卸桥先卸完一列，从第二列开始，装卸桥卸下一个进口集装箱的同时，从集装箱卡车上将另一出口集装箱吊起进行装船作业<sup>[26]</sup>。同步装卸避免通常先卸后装作业模式下集装箱卡车空车来重车去或重车来空车去的浪费现象，同时实现装卸设备和运输设备的无空行程作业，大大提高集装箱码头装卸作业效率。Goodchild 等<sup>[27][28]</sup>在同步装卸的基础上，提出了同贝同步装卸概念并证明了其在码头内装卸箱作业中的有效性。

为了提高运输设备的利用率和装卸设备的装卸效率，王嘉民，何琪敏，李晓鸣<sup>[29]</sup>结合宁波国际集装箱码头有限公司集装箱生产管理系统的运行实践，介绍了同步装卸方法的作业流程设计与应用。该模式中，集卡运输和岸桥装卸作业中都是满载作业。包起帆等<sup>[30]</sup>提出集卡车的固定分配和动态分配两种方法实施集卡调度，并强调了集卡车的合

理调度对同贝位装卸工艺的重要性。

曾庆成, 杨忠振<sup>[31]</sup>设计了双层遗传算法求解同贝同步装卸调度模型, 实现装卸桥在同一贝位内同时进行装船与卸船作业, 降低装卸桥与龙门吊作业时间, 并通过实例验证其有效性。

吴志佩, 胡燕海<sup>[32]</sup>提出了集装箱码头的双桥同贝同步装卸方法, 建立了岸桥、集卡与龙门吊加权作业时间最短的多目标优化模型, 求解得出同贝位不同舱位间最优装卸顺序下的岸桥、集卡及龙门吊加权作业时间。胡燕海等<sup>[33]</sup>又提出了基于混堆的集装箱同贝位同步调度方法。

刘琴, 周强, 张艳伟<sup>[34]</sup>根据同一个贝位装卸作业的特征, 提出了堆场同贝位对于进出口集装箱混合堆放的方法, 设计同贝同步装卸工艺。运用系统仿真技术, 仿真研究堆场设备选型问题, 为集装箱码头实施同贝同步装卸提供技术依据。

何赟燕, 胡燕海<sup>[35]</sup>在针对同步装卸研究, 提出了舱位协同作业, 提出了舱位协同作业, 根据船体舱位结构求解获取一个贝位中不同舱位的最优装卸顺序及优化后的集装箱卡车与装卸桥作业时间。通过数值模拟与传统装卸策略的数据对比, 验证了基于舱位协同策略的集装箱同步装卸方法的可行性与有效性。随后又提出了针对集装箱船同贝同步装卸的堆垛协同作业<sup>[36]</sup>。

### 1.3.4 遗传算法应用研究

在课题研究中, 提出了集装箱码头多船岸桥协同调度方法, 建立了以所有船舶最大完工时间和岸桥闲置时间最小为目标的优化数学模型。本课题主要采用遗传算法(GA)对优化问题求解。遗传算法的核心过程可以描述为: (1)设立参数; (2)种群初始化; (3)执行各种遗传算子等进化操作, 直到满足停止准则为止<sup>[37]</sup>。然后, 遗传算法是一种概率搜索算法, 存在一些问题, 如早熟(局部收敛)现象以及计算量大等。针对本课题提出的调度问题, 传统的遗传算法在被采用时发现不完全适合于序号编码的该问题。遗传算法是模拟自然界生物进化过程与机制求解极值问题的一类自组织、自适应人工智能技术<sup>[38]</sup>。通过文献查阅, 发现用单亲遗传算法(PGA)求解序号排列最优化问题无论是在其编码的便捷性, 计算效率方面, 还是其收敛性情况, 都比传统遗传算法(TGA)有优势<sup>[39]~[41]</sup>。

李茂军等<sup>[42]</sup>通过对单亲遗传算法(PGA)和传统遗传算法(TGA)的编码方式、遗传算子、运行过程和适值计算等方面的比较分析, 指出 PGA 的基因重组算子隐含了序号编码 TGA 的交叉算子的功能, PGA 的子代个体保留了父代个体的大部分遗传特征。PGA 仍属于遗传算法的范畴。PGA 保证全局收敛的关键是实施最优保持操作。



在编码操作方面，李茂军，童调生<sup>[43]</sup>列出了几种 PGA 的序号编码方法，用不同的编码方法求解同一个优化问题。陈慧琴等<sup>[44]</sup>提出了以组合优化问题中的 N 皇后为例，用整数编码的单亲遗传算法来解这类问题，有其优越性。

在遗传算子方面，PGA 和 TGA 最大的区别就是 PGA 不使用交叉算子，而是通过在一条染色体上实现基因重组操作。这样使得遗传操作过程简单化，并且不要求初始群体具有广泛多样性，不存在“早熟收敛”问题<sup>[45]</sup>。

基因编码是应用遗传算法时要解决的首要问题，也是设计遗传算法时的一个关键步骤。编码方法直接影响遗传算子的运算方法，并且很大程度上决定了染色体的进化效率。总的来说，编码方法可以分为三大类：二进制编码法、浮点编码法、符号编码法。二进制编码有很多优点，但是不能直接反映问题的固有结构，精度不高，个体长度大，占用计算机内存多；而且二进制编码 GA 的稳定性不如实值编码 GA<sup>[46]</sup>。通过文献查阅，发现多维实数编码遗传算法不仅能在短时间内搜索到高精度的全局最优解，而且稳定性也非常好<sup>[47]</sup>。

## 1.4 本文研究内容

本文是在浙江省科技厅重点软科学基金项目、教育部规划基金项目的支持下，对国内港口传统装卸模式进行改进，引入基于同步装卸的岸桥协同调度方法的项目。通过宁波北仑港第二集装箱码头的实际装卸作业数据验证方案。具体的技术路线如图 1.6:

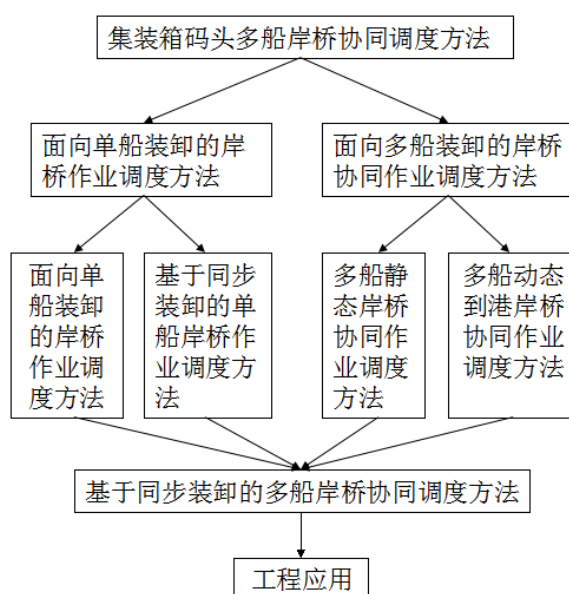


图 1.6 技术路线

Fig. 1.6 The technology road map

本论文结构展开如下：

第一章 绪论。介绍论文研究背景和意义，集装箱码头的基本概况，国内外研究现状和本文研究内容。

第二章 面向单船装卸的岸桥作业调度方法。先提出了单船岸桥调度方法，以船舶装卸时间最小为目标建立模型并用设计单亲遗传算法求解；之后提出基于同步装卸的单船岸桥调度方法，与传统单船岸桥调度方法进行比较分析，验证方法的可行性与有效性。

第三章 面向多船装卸的岸桥协同作业调度方法。针对多船装卸的岸桥协同调度问题，分布提出了多船静态岸桥协同作业调度方法和多船动态到港岸桥协同作业调度方法。

第四章 工程应用。将本文提出的集装箱码头多船岸桥协同调度方法与实际码头调度方法进行对比，通过实际数据分析，验证其可行性。

第五章 总结与展望。

## 2 面向单船装卸的岸桥作业调度方法

### 2.1 单船岸桥作业调度方法

#### 2.1.1 单船岸桥作业调度问题描述

在集装箱码头船舶靠泊后，要进行船舶上的集装箱进行装卸操作。给定一组岸桥，以最小化岸桥最大完工时间为目标函数，进行任务分配操作。图 2.1 是一艘船舶的装卸作业示意图。岸桥的装卸作业以下特点：（1）所有岸桥在同一个轨道上移动，所以一台岸桥不能跨越另一台岸桥去进行作业，并且相邻岸桥间必须保持一定的安全距离，以防止岸桥发生碰撞；（2）在实际操作中，同一贝位上的装卸任务只能由 1 台岸桥作业，在该岸桥完成整个贝位的作业后才可以到下一贝位进行作业；（3）同一贝位间的装卸任务有先后关系，如卸船任务要先于装船作业，甲板下面的装载任务要优先于甲板上的装载等。岸桥调度就是在满足这些约束的情况下得出各台岸桥的装卸任务的时序表。

根据问题的特性和现实约束，对研究的问题做如下假设：（1）本文将对以一整贝位为任务对象同类岸桥作业调度问题进行研究，即一台岸桥要完成一贝位所有装卸任务，才去下一个贝位进行作业；（2）各岸桥在同一导轨上，不能相互穿越，且相邻的岸桥需要保持一定安全距离；（3）和岸桥装卸时间相比，岸桥的移动时间很小，故忽略岸桥移动时间；（4）岸桥的装卸速度是一致的；（5）船舶的集装箱配载计划已知。

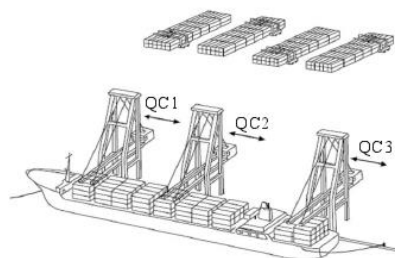


图 2.1 一艘船舶的装卸作业示意图  
Fig. 2.1 The working figure of a boat

#### 2.1.2 单船岸桥作业调度优化数学模型

有关参数和变量定义如下：

$Q = \{1, 2, \dots, k, \dots, q\}$  : 岸桥集合；  $\Omega = \{1, 2, \dots, b, a\}$  : 贝位任务集合；  
 $P_i (i = 1, 2, \dots, bay)$  : 贝位  $i$  的装卸时间；  $T = \{1, 2, \dots, t, \dots\}$  : 单位时间集合；  $M$  : 足够大

的正数； $h$ ：相邻岸桥安全间距为  $h$  个贝位距离。 $t_s^i$  贝位  $i$  的任务作业开始时间； $t_e^i$  贝位  $i$  的任务作业结束时间； $E_k$  为在同一台岸桥  $k$  上装卸的贝位的集合； $X_{itk}$ ：若贝位  $i$  的任务在  $t$  时间被岸桥  $k$  服务时为 1，否则为 0； $Y_{ij}^k(i, j \in E_k)$ ：若岸桥  $k$  完成贝位  $i$  后紧接着开始贝位  $j$  的任务时为 1，否则为 0； $Z_{ij}$ ：若贝位  $j$  的任务开始时间在贝位  $i$  的任务结束之后时为 1，否则为 0； $T_k$ ：岸桥  $k$  完工时间； $W_k$ ：岸桥  $k$  操作过程中的闲置时间； $V$ ：整个调度方案的时间跨度。

单船岸桥作业调度模型为：

$$\min \lambda_1 \max(T_k) + \lambda_2 \sum_{k=1}^q W_k \quad (2-1)$$

S.t.,

$$W_k = T_k - \sum_{i \in E_k} P_i \quad (2-2)$$

$$T_k \leq V \quad (k \in Q) \quad (2-3)$$

$$\sum_{k \in Q} X_{itk} = 1 (t \in T, i \in \Omega) \quad (2-4)$$

$$t_s^i + P_i = t_e^i (i \in \Omega) \quad (2-5)$$

$$t_e^i - t_s^j \leq (1 - Z_{ij}) \cdot M (i, j \in \Omega) \quad (2-6)$$

$$Y_{ij}^k \cdot t_e^i + P_j \leq t_e^j (i, j \in \Omega, k \in Q) \quad (2-7)$$

$$(k_2 - k_1)(j - i) \cdot X_{itk_1} \cdot X_{jtk_2} \geq 0 (k_1, k_2 \in Q, i, j \in \Omega, t \in T) \quad (2-8)$$

$$\sum_{i \in \Omega} Y_{ij}^k \leq 1 (j \in \Omega, k \in Q) \quad (2-9)$$

$$\sum_{j \in \Omega} Y_{ij}^k \leq 1 \quad (2-10)$$

$$|i - j| \geq h \cdot X_{itk} \cdot X_{j(t+k+1)} (i, j \in \Omega, k \in Q, t \in T) \quad (2-11)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 \quad (2-12)$$

在这个模型中目标函数(2-1)是最小化岸桥最大完工时间和所有岸桥闲置时间二者的线性组合，鉴于这两个目标有相同的单位量纲，设定相应权重  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 。(2-2)式表示岸桥闲置时间的定义。约束(2-3)表示各个岸桥的完工时间小于等于整个调度方案的时间跨度。约束(2-4)表示每个贝位在任意时刻只能由一台岸桥操作。约束(2-5)表示每个贝位任务的作业开始时间和完成时间的关系。约束(2-6)表示由同一台岸桥的服务的两个贝位的

前后时间关系。约束(2-7)表示由同一个岸桥作业的紧接着的两个贝位任务的时间关系。约束(2-8)表示岸桥不能相互穿越进行交叉作业。约束(2-9)和(2-10)表示任意一个贝位任务最多有一个连续的前序作业和一个连续的后续作业。约束(2-11)表示相邻贝位在作业时要保持一定的安全距离。约束(2-12)对目标函数的权重做出了规定，由于最大完工时间较重要，故  $\lambda_1 > \lambda_2$ 。

### 2.1.3 模型求解

岸桥调度问题是一个 NP-Hard 问题，一般的数学方法很难在有效时间内求解上诉优化模型，本文将设计一种基于矩阵编码的单亲遗传算法求解该问题。

#### (1) 矩阵实数编码

编码是遗传算法中的重要工作之一，一个好的编码方法将给算法带来很大方便。传统一维实数编码稳定性强，但是搜索性能差，在进化过程中会产生许多非法个体，而且在处理大规模复杂问题时效率很低。本文设计了矩阵实数编码。矩阵这种二维数据结构比一维的享有更大的表示空间，可以有更加多样化的遗传算子的设计，同时也使得算法具有更好的搜索能力，同时它更好地反映实际问题，进行遗传操作时，可以利用更多的信息<sup>[48][49][50]</sup>。其形式如下：

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

$m \times n$  矩阵  $A$  中， $m$  表示分配给船舶的岸桥数量， $n$  表示任务总数量。矩阵中元素  $a_{22}$  表示分配给岸桥 2 的贝位任务号，空的位置用“0”补齐。矩阵编码有很大的优点：

1) 能形象、直观地判断个体是否合法，即调度是否符合码头实际操作；2) 便于个体适应值的计算；3) 生成种群多样化；4) 易于将非法个体变为合法个体；5) 较一维编码稳定。

#### (2) 初始种群的设定

初始化的染色体是由 1 到  $n$  的整数随机分配给各行的矩阵，矩阵染色体每行元素的前后关系表示这些基因所代表的贝位作业任务的先后顺序关系，即在矩阵某一行中前面的基因所代表的贝位任务先做，后面的基因代表的贝位任务后做。

#### (3) 适应值计算

本文算法中的适应值计算是基于对染色体的解释过程。解释过程主要分以下步骤：

步骤一：读取染色体的基因。

步骤二：为了减少岸桥不必要的移动，并确保各岸桥在同时操作过程中没有发生干扰情况，要对染色进行合法化。先对分配给每个岸桥的任务的编号从小到大排列，这样岸桥单向性的移动可以减少其不必要的移动。再让分配给各岸桥的第一项任务的编号从小到大排列，即染色体矩阵第一列从小到大排列，重复以上步骤直到符合大小排列要求。

步骤三：步骤二得到的染色体矩阵的第一列为各岸桥分配到的第一项任务。接着继续对染色体合法化。染色体第二列表示各岸桥分配到的第二项任务，若第二列任务在被作业时岸桥间发生穿越，则让作业时会发生穿越的任务对应的基因及其该基因后面的基因集体向右边挪一个位置，该基因原来位置用“0”替换，表示该岸桥要等待第二列中非零基因所代表的任务完成后才能进行它的下一个任务。后面每列以此类推，直到每一列的任务在作业中岸桥不会发生干扰。随机一染色体的合法化过程如图 2.2 所示。

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & 0 & 1 & 6 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 9 & 0 & 3 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 2 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 6 & 7 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 4 & 8 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 6 & 7 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 4 & 8 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 6 & 7 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 4 & 8 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

图 2.2 染色体合法化

Fig. 2.2 The legalization of Chromosome

步骤四：染色体合法化结束后，计算得到染色体各行执行完每个基因后的最终值，并最终得到适应值。

#### (4) 单亲遗传算子

传统序号编码遗传算法（genetic algorithm - GA）的遗传操作是模仿非序号编码 GA 的，主要遗传算子仍为交叉算子，而序号编码 GA 的染色体不能在任意位置进行交叉，随意交叉后的染色体很可能不再代表原问题的一个解。单亲遗传算法（partheno-genetic algorithm - PGA）取消了传统序号编码 GA 的交叉算子，代之以仅在一条染色体上操作的基因重组等遗传算子，简化了遗传操作，提高了计算效率。本文 PGA 采用了以下几种基因重组方法：

- 1) 基因多点换位：随机选取  $i$  对基因交换基因位置，如图 2.3 所示；
- 2) 基因倒置：随机选取染色体矩阵中的一列基因进行上下倒置，如图 2.4 所示；

3) 基因单点移位: 随机选取两个基因位, 把矩阵索引大的位置的基因移到索引小的位置, 索引小的位置的基因以及两个基因位中间的基因按照线性编码集体向后移动一个位置, 如图 2.5 所示;

4) 基因倒置后再进行基因多点互换;

5) 基因倒置后再进行基因单点移位。

1	0	5	0	0	0	0	0	0	0		1	0	4	0	0	0	0	0	0	0
2	0	6	7	10	0	0	0	0	0	→	2	0	6	7	9	0	0	0	0	0
3	4	8	9	0	0	0	0	0	0		3	5	8	10	0	0	0	0	0	0

图 2.3 基因多点换位

Fig. 2.3 The transposition of genes

1	0	5	0	0	0	0	0	0	0		1	4	5	0	0	0	0	0	0	0
2	0	6	7	10	0	0	0	0	0	→	2	0	6	7	10	0	0	0	0	0
3	4	8	9	0	0	0	0	0	0		3	0	8	9	0	0	0	0	0	0

图 2.4 基因倒置

Fig. 2.4 The inversion of genes

1	0	5	0	0	0	0	0	0	0		1	3	4	8	9	0	0	0	0	0
2	0	6	7	10	0	0	0	0	0	→	2	0	5	0	0	0	0	0	0	0
3	4	8	9	0	0	0	0	0	0		0	0	6	7	10	0	0	0	0	0

图 2.5 基因单点移位

Fig. 2.5 the Single-point shift of gene

初始染色体经过以上每一种遗传操作后, 都要进行 (3) 中所述的步骤二、三, 对染色体进行合法化得到 5 个子代个体。接着对该 5 个子代个体进行适应值计算。比较该 5 个子代染色体和父代染色体的适应值, 取最优作为下一代的父代染色体。

经过每一个染色体的进化后, 对染色体种群进行选择。本文采取的方法是取适应值最佳的染色体替换掉最差的染色体, 实现种群的更新和进化。

## 2.1.4 算例分析

本算例数据来自文献[12]中的算例 2, 如表 2.1 所示。试验船舶满足假设条件: 忽略岸桥移动时间; 岸桥的装卸速度是一致的; 作业能力一个单位时间一箱; 岸桥可用时间均为 0 时刻。遗传算法求解参数: 种群大小为 50, 迭代代数为 500。

表 2.1 船舶各贝位装卸作业量  
Tab. 2.1 Loading and unloading jobs of bays

贝位	数量	贝位	数量
1	10	11	40
2	20	12	45
3	19	13	8
4	33	14	56
5	12	15	68
6	38	16	25
7	29	17	18
8	16	18	42
9	26	19	15
10	27	20	16

通过 MATLAB 程序设计单亲遗传算法求解该算例，运行 10 次取得最优结果。适应度值变化趋势如图 2.6 所示。当遗传算法迭代到 170 代左右时，目标函数值已经接近平稳并趋于收敛。通过观察平均适应度值的变化趋势是逐渐靠近最小适应度值，说明种群是朝着最优方向进化的。求得最终结果如表 2.2 所示。通过和文献[12]比较发现，本文的最大完工时间为 154min，比文献[12]最大完工时间提前了 5min，岸桥闲置时间 5min，比文献[12]中减少了 10min。

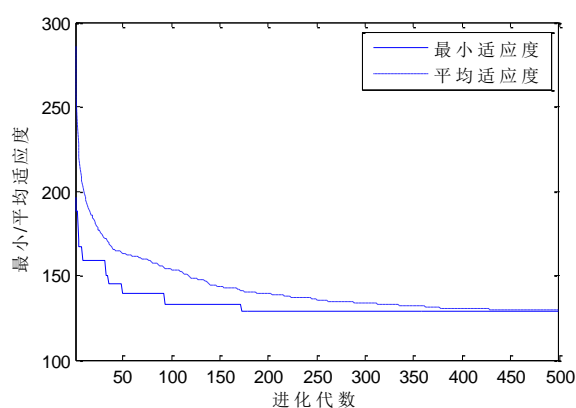


图 2.6 进化代数图  
Fig. 2.6 The figure of evolution



表 2.2 双目标岸桥调度优化方案

Tab. 2.2 the optimized schedule of quay cranes with dual objectives

岸桥 1				岸桥 2				岸桥 3				岸桥 4			
贝位	开始时间	作业时间	完成时间	贝位	开始时间	作业时间	完成时间	贝位	开始时间	作业时间	完成时间	贝位	开始时间	作业时间	完成时间
1	0	10	10	5	0	12	12	8	0	16	16	16	0	25	25
2	10	20	30	因安全距离约束等待 4 分钟				13	16	8	24	17	25	18	43
3	30	19	49	9	16	26	42	因安全距离约束等待 1 分钟				18	43	42	85
4	49	33	82	10	42	27	69	14	25	56	81	19	85	15	100
6	82	38	120	11	69	40	109	15	81	68	149	20	16	16	116
7	120	29	149	12	109	45	154								
最大完工时间 154min，岸桥闲置时间 5min															

通过实验算例分析与比较，可见本节设计的单亲遗传算法的可行性。下一节将在此基础上提出同步装卸方法。

2.2 基于同步装卸的单船岸桥作业调度方法

2.2.1 同步装卸作业问题描述

岸桥同步装卸方法是基于一个贝位内的集装箱堆放格局特点进行边装边卸的作业方法，这使岸桥在对集装箱装卸时减少了单程装卸的次数，减少了该贝位中岸桥的作业时间。图 2.7 为某船舶一个贝位横截面结构示意图。该贝位有 4 个舱位。图中每一个小方块表示一个箱位，行号表示横向坐标，以船舶中剖面为基准，如果整条船的列数是奇数，那么中间列就叫 00 列，如果整条船列数是偶数，那就没有 00 列。向船头方向正视，左手边的列数用偶数命名，分别为 02、04、06…，右手边的列用奇数命名，分别为 01、03、05…。用层号表示垂直坐标，舱内集装箱层从最底层开始分别为 02、04、06…，舱盖板上面的层数分别为 80、82、84…。根据集装箱装卸的船箱位信息，装卸任务可分为 4 种：甲板装卸、甲板卸箱、舱内装箱和舱内卸箱。由于船舶的甲板以上空间和舱内空间用舱盖板隔开，所以在作业过程中，除了集装箱的装卸外，还有舱盖板的装卸。因此任一贝位在装卸时，应当按照以下步骤进行装卸：(1)甲板卸船；(2)卸下舱盖板；(3)舱内卸船；(4)舱内装船；(5)装舱盖板；(6)甲板装船。本文以一个舱位为单位进行舱位协同装卸作业，例如先把舱位 1 位置的单程卸载任务完成后，再对舱位 2 位置

的卸载任务和舱位 1 位置的装货任务进行同步装卸，以此类推，最后完成舱位 4 位置的单程装载任务。

本节将在岸桥同步装卸作业的基础上，以集装箱船舶的最大完工时间最小化为目标进行研究。

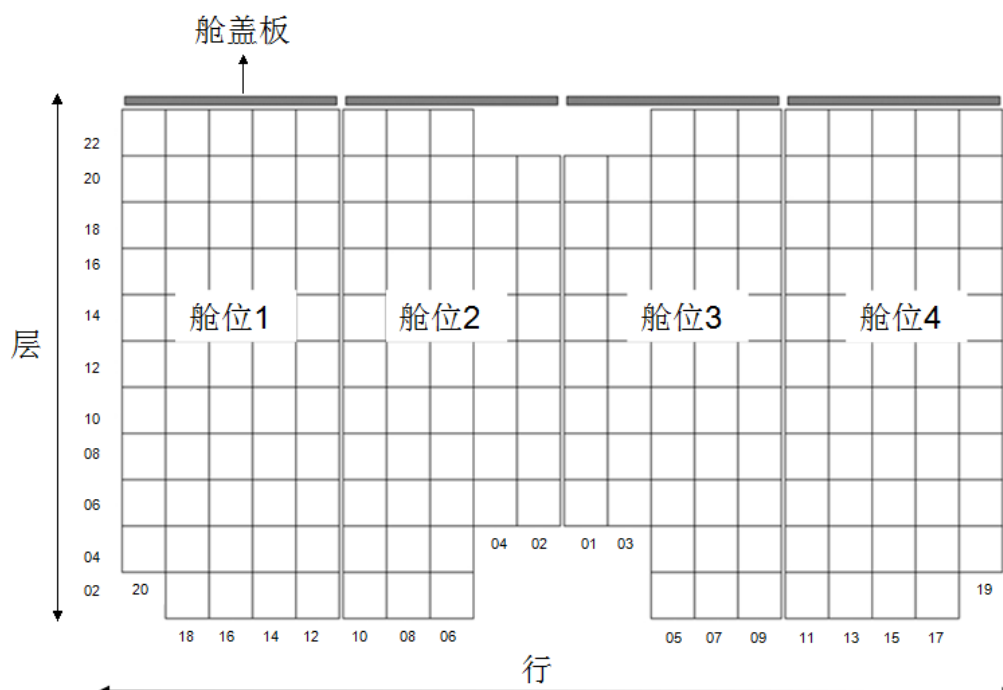


图 2.7 某贝位横截面结构示意图  
Fig. 2.7 the cross section schematic diagram of a bay

## 2.2.2 基于同步装卸的岸桥作业调度优化数学模型

有关参数和变量定义如下：

$Q = \{1, 2, \dots, k, \dots, q\}$ ：岸桥集合； $\Omega = \{1, 2, \dots, bay\}$ ：贝位任务集合； $C_n = \{1, 2, \dots, c\}$ ：贝位  $n$  集装箱集合； $H_n = \{1, 2, \dots, h, \dots, H\}$ ：贝位  $n$  舱位集合； $T = \{1, 2, \dots, t, \dots\}$ ：单位时间集合； $d$ ：相邻岸桥安全间距为  $d$  个贝位距离。 $M$ ：足够大的正数； $L_n^i$ ：贝位  $n$  中舱位  $i$  中待装集装箱； $U_n^i$ ：贝位  $n$  中舱位  $i$  中待卸集装箱； $T_n^1$ ：贝位  $n$  的所有单程装卸次数； $T_n^2$ ：贝位  $n$  的所有同步装卸次数； $T_n$ ：贝位  $n$  的装卸作业时间； $\tilde{t}_1$ ：岸桥完成一个单程装卸的时间； $\tilde{t}_2$ ：岸桥完成一个同步装卸的时间； $t_s^n$ ：贝位  $n$  的任务作业开始时间； $t_e^n$ ：贝位  $n$  的任务作业结束时间； $E_k$ ：在同一台岸桥  $k$  上装卸的贝位的集合； $X_m^k$ ：若贝位  $n$  的任务被岸桥  $k$  服务时为 1，否则为 0；

$y_{i,n}$ : 若贝位  $n$  的舱位  $i$  是岸桥第一个卸载的舱位时为 1, 否则为 0;  $z_{c,c'}(c,c' \in C_n)$ : 若集装箱  $c$  在  $c'$  之前完成时为 1, 否则为 0;  $Y_{nn'}^k(n,n' \in E_k)$ : 若岸桥  $k$  完成贝位  $n$  后紧接开始贝位  $n'$  的任务时为 1, 否则为 0;  $Z_{nn'}$ : 若贝位  $n'$  的任务开始时间在贝位  $n$  的任务结束之后时为 1, 否则为 0;  $TT_k$ : 岸桥  $k$  完工时间;  $W_k$ : 岸桥  $k$  操作过程中的闲置时间;  $V$ : 整个调度方案的时间跨度。

基于同步装卸的岸桥作业调度模型为:

$$\min \lambda_1 \max(T_k) + \lambda_2 \sum_{k=1}^q W_k \quad (2-13)$$

**S.t.,**

$$W_k = TT_k - \sum_{n \in E_k} T_n \quad (2-14)$$

$$TT_k \leq V \quad (k \in Q) \quad (2-15)$$

$$\sum_{k \in Q} X_{nt}^k = 1 \quad (n \in \Omega) \quad (2-16)$$

$$t_s^n + T_n = t_e^n \quad (i \in \Omega) \quad (2-17)$$

$$T_n = \tilde{t}_1 \cdot T_n^1 + \tilde{t}_2 \cdot T_n^2 \quad (2-18)$$

$$\sum_{i \in H_n} L_n^i + \sum_{i \in H_n} U_n^i - T_n^1 - 2 \cdot T_n^2 = 0 \quad (2-19)$$

$$\sum_{i \in H_n} y_{i,n} \leq 1 \quad (n \in \Omega) \quad (2-20)$$

$$\sum_{c' \in C_n} z_{cc'} \leq 1 \quad (c \in C_n, n \in \Omega) \quad (2-21)$$

$$t_e^n - t_s^{n'} \leq (1 - Z_{nn'}) \cdot M \quad (n, n' \in \Omega) \quad (2-22)$$

$$Y_{nn'}^k \cdot t_e^n + T_{n'} \leq t_e^{n'} \quad (n, n' \in \Omega, k \in Q) \quad (2-23)$$

$$(k_2 - k_1)(n' - n) \cdot X_{nt}^{k_1} \cdot X_{n't}^{k_2} \geq 0 \quad (k_1, k_2 \in Q, n, n' \in \Omega, t \in T) \quad (2-24)$$

$$\sum_{n \in \Omega} Y_{nn'}^k \leq 1 \quad (n' \in \Omega, k \in Q) \quad (2-25)$$

$$\sum_{n' \in \Omega} Y_{nn'}^k \leq 1 \quad (n \in \Omega, k \in Q) \quad (2-26)$$

$$|n - n'| \geq d \cdot X_{nt}^k \cdot X_{n't}^{k+1} \quad (n, n' \in \Omega, k \in Q, t \in T) \quad (2-27)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 \quad (2-28)$$

在这个模型中目标函数(2-13)是最小化岸桥最大完工时间和所有岸桥闲置时间二者的线性组合, 鉴于这两个目标有相同的单位量纲, 设定相应权重  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 。(2-14)式表示岸桥闲置时间的定义。约束(2-15)表示各个岸桥的完工时间小于等于整个调度方案的时间跨度。约束(2-16)表示每个贝位在任意时刻只能由一台岸桥操作。约束(2-17)表示每个贝位任务的作业开始时间和完成时间的关系。式子(2-18)和(2-19)是对贝位作业时间的定义。约束(2-20)表示一个舱位最多只能为一个初始操作。约束(2-21)保证了每个集装箱最多有一个前序与后序作业。约束(2-22)表示由同一台岸桥的服务的两个贝位的前后时间关系。约束(2-23)表示由同一个岸桥作业的紧接着的两个贝位任务的时间关系。约束(2-24)表示岸桥不能相互穿越进行交叉作业。约束(2-25)和(2-26)表示任意一个贝位任务最多有一个连续的前序作业和一个连续的后续作业。约束(2-27)表示相邻贝位在作业时要保持一定的安全距离。约束(2-28)对目标函数的权重做出规定, 由于最大完工时间较重要, 故  $\lambda_1 > \lambda_2$ 。

### 2.2.3 算例分析

本文采用同贝位舱位协同的同步装卸策略。例如以船舶一个贝位分  $i$  个舱位, 就有  $A_i^j$  种岸桥装卸方案, 不同方案岸桥同步装卸次数也会不同。整艘船舶的岸桥调度采用 2.1.3 中提出的 PGA 求解。

试验船舶满足假设条件: (1)忽略特殊集装箱的特殊处理工作; (2)在集装箱的装卸过程中, 岸桥完成 1 个单程装卸的平均时间  $\tilde{t}_1 = 2min$ , 完成 1 个同步装卸的时间  $\tilde{t}_2 = 2.5min$ ; (3)算例为在宁波一港口靠泊的集装箱船, 装卸的集装箱信息见附录 A, 例如信息 0260510 表示 26 贝 05 列 10 层。整理附录数据得到船舶贝位中各个舱位对应的集装箱装卸量见表 2.3。用 MATLAB 编程计算得到各贝位中舱位最优装卸序列见表 2.4。各贝位任务同步装卸时间和传统单程装卸时间比较见表 2.5。基于同步装卸的岸桥作业调度方案见表 2.6。

表 2.3 船舶贝位中各个舱位对应的集装箱装卸量

Tab. 2.3 Loading and unloading jobs in each hatch within each ship-bay

单位: FEU

Unit: FEU

舱位号	装卸量	贝位号									
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
1	卸箱量	0	4	0	0	6	1	0	1	0	0
	装箱量	1	4	3	20	0	1	11	0	0	0
2	卸箱量	2	38	24	0	16	20	24	18	0	0
	装箱量	11	27	19	36	0	26	33	0	16	16
3	卸箱量	15	12	24	0	16	21	23	0	0	0
	装箱量	13	2	22	39	1	26	32	0	16	29
4	卸箱量	0	0	2	0	7	4	0	0	0	0
	装箱量	0	0	2	18	0	2	11	0	0	0

舱位号	装卸量	贝位号									
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	卸箱量	35	0	0	38	0	0	28	0	0	16
	装箱量	0	0	0	29	0	0	30	0	0	18
2	卸箱量	45	0	0	48	0	46	44	24	23	30
	装箱量	0	0	5	39	0	14	50	0	0	21
3	卸箱量	44	0	0	48	0	42	47	23	25	30
	装箱量	0	0	10	42	8	38	52	0	0	21
4	卸箱量	34	0	0	36	0	0	28	0	3	17
	装箱量	0	0	0	29	0	5	30	0	0	20

表 2.4 各贝位中舱位最优装卸序列一览表

Tab. 2.4 The best loading and unloading sequence of hatches in each ship-bay

Bay	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Stack	2	2	4	4	4	2	4	2	3	3
	1	3	1	3	3	3	1	1	2	2
	3	1	3	2	2	4	3			
			2	1	1	1	2			

Bay	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Stack	4		3	3	3	4	4	3	4	4
↓	3		2	2		3	1	2	3	3
	2			4		2	2		2	1
	1			1			3			2

表 2.5 各贝位任务同步装卸时间和传统单程装卸时间比较 单位: min

Fig. 2.5 The comparison between synchronized handling time and traditional one-way mode Unit: min

贝位号	单程装 卸	同步装 卸	时间节省 率	贝位号	单程装 卸	同步装卸	时间节省 率
1	84	66	21.4%	11	316	316	0
2	174	150	13.8%	12	0	0	0
3	192	151.5	21.1%	13	30	30	0
4	226	226	0	14	618	453	26.7%
5	92	90.5	1.6%	15	16	16	0
6	202	163	19.3%	16	290	225.5	22.2%
7	268	199	25.8%	17	618	457.5	26.0%
8	38	38	0	18	94	94	0
9	64	64	0	19	102	102	0
10	90	90	0	20	346	257.5	25.6%

表 2.6 基于同步装卸的岸桥作业调度方案

Fig. 2.6 The quay crane scheduling based on synchronized handling

岸桥 1				岸桥 2			
贝位	开始时间	作业时间	完成时间	贝位	开始时间	作业时间	完成时间
1	0	66	66	5	0	90.5	90.5
2	66	150	216	7	90.5	199	289.5
3	216	151.5	367.5	9	289.5	64	353.5
4	367.5	226	593.5	10	353.5	90	443.5
6	593.5	163	756.5	11	443.5	316	759.5
8	756.5	38	794.5	15	759.5	16	775.5
岸桥 3				岸桥 4			
贝位	开始时间	作业时间	完成时间	贝位	开始时间	作业时间	完成时间
13	0	30	30	17	0	457.5	457.5
14	30	453	483	19	457.5	102	559.5
16	483	225.5	708.5	20	559.5	257.5	817
18	708.5	94	802.5				

由表 2.5 中可知,各贝位采用同步装卸比传统单程装卸最大可节省 26.7%的装卸时间。由表 2.6 得知,在基于同步装卸的岸桥作业调度方法下,岸桥的最大完工时间为 817min。而在传统单程的岸桥作业方式下,采用 2.1 中的模型以及求解方法得到岸桥的最大完工时间为 1018min。相比较两种岸桥装卸方式,同步装卸模式比传统单程装卸模式节省了 19.7%。

### 2.3 本章小结

本章节对面向单船装卸的岸桥作业调度方法做了研究。以船舶作业时间和岸桥闲置时间最短为目标函数,建立了面向单船的集装箱码头岸桥调度和装卸船任务分配问题的多目标混合整数规划优化模型。设计了一种基于矩阵编码的单亲遗传算法进行求解,并通过实验算例证明了模型和求解方法的有效性。同时分析比较了同步装卸的岸桥作业调度模式和传统单程岸桥作业调度模式,证明了同步装卸模式的可行性。在本章研究基础上,下一章节的研究重点为面向多船装卸的岸桥协同作业调度方法。通过数学建模与求解,并用算例验证调度方法的可行性。

### 3 面向多船装卸的岸桥协同作业调度方法

#### 3.1 多船静态岸桥协同作业调度方法

##### 3.1.1 多船静态岸桥协同作业调度问题描述

国内外学者对单船的岸桥调度研究得比较广，而对多船岸桥调度研究得很少。多船岸桥调度基于船舶的泊位调度，如图 3.1，矩形代表的是各船舶在停泊时候的位置和时间图。传统的多船岸桥调度问题研究的是多台岸桥在多艘船舶间的作业排程，先将岸桥分配给船舶，再把船舶的装卸任务分配给岸桥，以及安排作业顺序。其特点就是分配给船舶的岸桥投入作业后一般要等到该船的所有集装箱都完成装卸后才退出该船舶的作业，这样必然造成岸桥资源的作业不均衡以及浪费。岸桥作业的不均衡对于后续码头生产作业也将产生影响。例如在图 3.1 中，如果派更多的岸桥去为船 C 服务，这样船舶 C 就有可能提前完成，接下来如果船舶 E 已经准备就绪，船舶 E 也就可以提前进行服务。同时可能使得后面靠泊服务的船舶 F 甚至更后面的船舶提前服务，减少延迟时间。可想而知，如果要想让船舶 B、C 尽可能同时完成，让后续船舶靠泊服务，必须让岸桥作业均衡。码头岸桥数量有限，岸桥调度方案好坏直接决定了岸桥的利用率、生产效率。

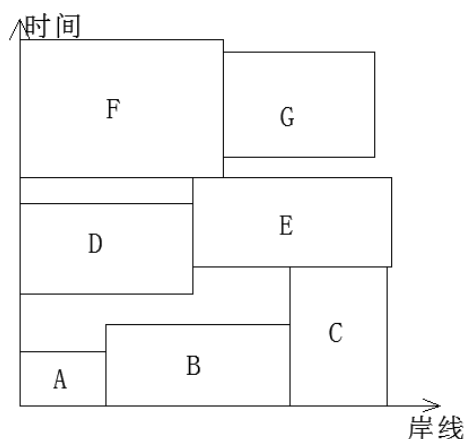


图 3.1 泊位调度示例

Fig. 3.1 An illustration of berth scheduling

本节将展开多船静态岸桥协同调度研究。多船静态岸桥协同调度是指针对已经到港的船舶，确定各船舶上装卸任务所分配的岸桥编号以及装卸顺序，且岸桥可以在不同船舶间进行来回调用，即岸桥在服务第一艘船舶时，可以在该艘船还未完成装卸作业的情况下去相邻船舶进行作业，以达到岸桥作业均衡性，从而提高岸桥利用率。

根据问题的特性和现实约束，对研究的问题做如下假设：（1）以贝位所有装卸作



业为一个任务，岸桥要完成整个贝位任务才能移动到下一个贝位进行装卸工作；（2）各岸桥在同一导轨上，不能相互穿越，且相邻的岸桥需要保持一定安全距离；（3）各个岸桥的装卸速度是一致的；（4）船舶的集装箱配载计划已知；（5）不考虑岸桥等待集卡的现象；（6）岸桥水平移动时间等于移动距离除以水平移动的平均速度。

### 3.1.2 多船静态岸桥协同作业调度优化数学模型

有关参数以及变量：

$V = \{1, 2, \dots, v\}$ ：船舶集合； $Q = \{1, 2, \dots, k, \dots, q\}$ ：岸桥集合； $\Omega = \{1, \dots, N\}$ ：所有船舶的贝位任务集合； $\Omega_v = \{1, 2, \dots, bay_v\}$ ：船舶  $v$  上贝位的装卸任务集合； $P_{vi}$ ：船舶  $v$  上贝位  $i$  的装卸时间； $P_n$ ：贝位  $i$  的装卸时间( $n=1, 2, \dots, N$ )； $T = \{1, 2, \dots, t, \dots\}$ ：单位时间集合； $h$ ：相邻岸桥的安全距离为  $h$  个贝位距离； $t_m$ ：岸桥移动一个贝位距离的时间； $M$  为足够大的正数； $t_{av}$ ：船  $v$  到港时间； $t_{sv}$ ：船  $v$  开始服务时间； $t_{ev}$ ：船  $v$  结束服务时间； $t_{s,vi}$ ：船舶  $v$  上的贝位  $i$  任务开始作业时间( $n=1, 2, \dots, N$ )； $t_{e,vi}$ ：船舶  $v$  上的贝位  $i$  任务结束作业时间( $n=1, 2, \dots, N$ )； $t_{s,n}$ ：贝位  $n$  任务开始作业时间( $n=1, 2, \dots, N$ )； $t_{e,n}$ ：贝位  $n$  任务结束作业时间( $n=1, 2, \dots, N$ )； $E_k$ ：为在同一台岸桥  $k$  上装卸的贝位的集合； $X_{vik}$ ：若船舶  $v$  的贝位  $i$  的任务在  $t$  时间被岸桥  $k$  服务时为 1，否则为 0； $X_{ntk}$ ：若贝位  $n$  的任务在  $t$  时间被岸桥  $k$  服务时为 1，否则为 0； $Y_{vk}$ ：若船舶  $v$  在  $t$  时间被岸桥  $k$  服务时为 1，否则为 0； $Y_{n_1 n_2}^k(i, j \in E_k)$ ：若岸桥  $k$  完成贝位任务  $n_1$  后紧接着开始贝位任务  $n_2$  时为 1，否则为 0； $Z_{n_1 n_2}$ ：若贝位  $n_2$  的任务开始时间在贝位  $n_1$  的任务结束之后时为 1，否则为 0； $T_k$ ：岸桥  $k$  完工时间； $W_k$ ：岸桥  $k$  操作过程中的闲置时间； $T_v$ ：整个调度方案的时间跨度； $T_{vv}$ ：船舶  $v$  预计离港时间。

多船岸桥协同调度模型为：

$$\min \lambda_1 \max(T_k) + \lambda_2 \sum_{k=1}^q W_k \quad (3-1)$$

S.t.,

$$W_k = T_k - \sum_{n \in E_k} P_n \quad (3-2)$$

$$t_{sv} = \min\{t_{s,vi}\} (\forall i \in \Omega_v) \quad (3-3)$$

$$t_{ev} = \max\{t_{e,vi}\} (\forall i \in \Omega_v) \quad (3-4)$$

$$T_k \leq T_v (k \in Q) \quad (3-5)$$

$$\sum_{k \in Q} X_{vitk} = 1 (t \in T, v \in \Omega, v \in V) \quad (3-6)$$

$$\sum_i X_{vitk} = Y_{vitk} (t \in T, i \in \Omega, v \in V) \quad (3-7)$$

$$t_{s,n} + P_n = t_{e,n} (n \in \Omega) \quad (3-8)$$

$$t_{e,n_1} - t_{s,n_2} \leq (1 - Z_{n_1 n_2}) M (n_1, n_2 \in \Omega) \quad (3-9)$$

$$Y_{n_1 n_2}^k \cdot t_{e,n_1} + P_{n_2} + t_m \cdot |n_2 - n_1| \leq t_{e,n_2} (n_1, n_2 \in \Omega, k \in Q) \quad (3-10)$$

$$(k_2 - k_1)(n_2 - n_1) \cdot X_{n_1 k_1} \cdot X_{n_2 k_2} \geq 0 (k_1, k_2 \in Q, n_1, n_2 \in \Omega, t \in T) \quad (3-11)$$

$$\sum_{n_1 \in \Omega} Y_{n_1 n_2}^k \leq 1 (n_2 \in \Omega, k \in Q) \quad (3-12)$$

$$\sum_{n_2 \in \Omega} Y_{n_1 n_2}^k \leq 1 (n_1 \in \Omega, k \in Q) \quad (3-13)$$

$$|n_1 - n_2| \geq h \cdot X_{n_1 k} \cdot X_{n_2 t(k+1)} (n_1, n_2 \in \Omega, k \in Q, t \in T) \quad (3-14)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 \quad (3-15)$$

$$t_{sv} - t_{av} \geq 0 \quad (3-16)$$

$$T_{vv} - t_{ev} \geq 0 \quad (3-17)$$

在这个模型中目标函数(3-1)是最小化岸桥最大完工时间和所有岸桥闲置时间二者的线性组合，鉴于这两个目标有相同的单位量纲，设定相应权重  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 。(3-2)式表示岸桥闲置时间的定义。(3-3)式和(3-4)式定义船舶开始作业的时间和结束作业的时间。约束(3-5)表示各个岸桥的完工时间小于等于整个调度方案的时间跨度。约束(3-6)表示每个贝位在任意时刻只能由一台岸桥操作。约束(3-7)表示一台岸桥在任意时刻只能为一艘船舶中的一个贝位服务。约束(3-8)表示每个贝位任务的作业开始时间和完成时间的关系。约束(3-9)表示由同一台岸桥的服务的两个贝位的前后时间关系。约束(3-10)表示由同一个岸桥作业的紧接着的两个贝位任务的时间关系。约束(3-11)表示岸桥不能相互穿越进行交叉作业。约束(3-12)和(3-13)表示任意一个贝位任务最多有一个连续的前序作业和一个连续的后续作业。约束(3-14)表示相邻贝位在作业时要保持一定的安全距离。约束(3-15)对目标函数的权重做出规定，由于最大完工时间较重要，故  $\lambda_1 > \lambda_2$ 。约束(3-16)表示船舶停泊后才能开始服务。约束(3-17)表示船舶要在预定时间内完成装卸离港。

### 3.1.3 模型求解

对全岸线上停靠的所有船舶的贝位任务从左到右依次编号，岸线上的岸桥也按同样的方向依次编号。模型的求解即对各个贝位任务的分配以及岸桥对贝位任务的作业顺序

问题进行求解。遗传算法是一种通过模拟达尔文自然进化机制搜索最优解的智能优化方法。它在搜索优化问题的全局或全局附近的最优解上具有良好的优势，因此在很多领域都得到了应用。本文设计了单亲遗传算法（partheno-genetic algorithm-PGA）求解多船岸桥调度问题，流程见图 3.2。

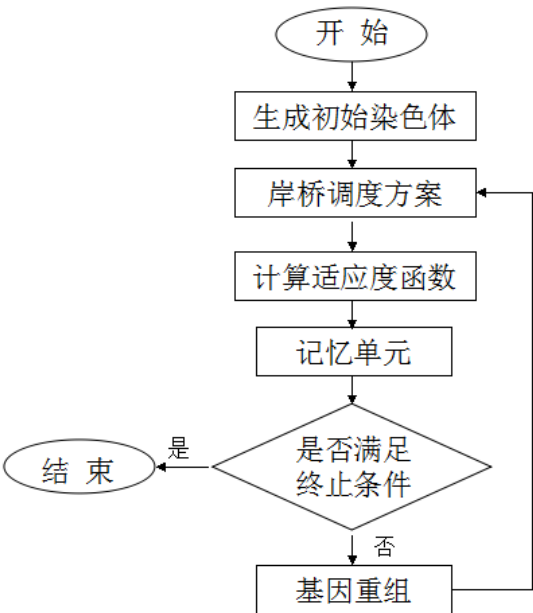


图 3.2 单亲遗传算法流程图  
Fig. 3.2 The flow chart of partheno-genetic algorithm

(1) 染色体编码和初始解的生成

构建一个  $(m \times n)$  的二维矩阵， $m$  表示进行装卸操作的岸桥数量， $n$  表示所有船舶的装卸总任务数，把 1 到  $n$  的整数随机分配给各行。如图 3.3 所示，每行表示一台岸桥，每行上面的数字代表分配给该岸桥的任务的编号，其从左到右排列代表任务的装卸顺序。其余空的位置用“0”补齐。

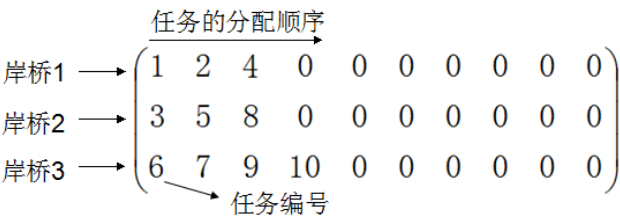


图 3.3 染色体编码示例  
Fig. 3.3 The illustration of chromosome representation

## (2) 染色体合法化

为确保各岸桥在同时操作过程中没有发生穿越情况，要对染色体进行合法化。染色体矩阵的第一列为各岸桥分配到的第一项任务。若第一列任务在被作业时岸桥间发生穿越，则让作业时会发生穿越的任务对应的基因及其该基因后面的基因集体向右边挪一个位置，该基因原来位置用“0”替换，表示该岸桥要等待第一列中非零基因所代表的任务完成后才能进行它的下一个任务。后面每列以此类推，直到每一列的任务在作业中岸桥不会发生干扰。随机一染色体的合法化过程如图 3.4 所示。

$$\begin{pmatrix} 5 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 1 & 6 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 4 & 9 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 5 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 1 & 6 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 4 & 9 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

图 3.4 染色体合法化示例

Fig. 3.4 The legalization of Chromosome

## (3) 遗传操作

单亲遗传算法(PGA)仅在一条染色体上进行遗传操作。本文 PGA 采用了以下几种基因重组方法：（1）基因多点换位；（2）基因倒置；（3）基因单点移位；（4）基因倒置后再进行基因多点互换；（5）基因倒置后再进行基因单点移位。

初始染色体经过以上每一种遗传操作后，对染色体进行合法化，可得到 5 个子代个体。接着对该 5 个子代个体进行适应值计算。选择所有父代、子代染色体中适应值最优的染色体替代该父代染色体实现种群的进化。

### 3.1.4 算例分析

本算例数据来自文献[24]中的算例。码头岸桥吊具现为双 20'吊具，可同时吊起两个 20'或一个 40'集装箱，该码头岸桥数量为 10 台。本文岸桥调度基于一个贝位的工作量为单位任务，故根据文献[24]中四艘船舶的集装箱箱量图得出实际装卸数据见表 3.1。

表 3.1 四艘船舶各贝位装卸作业量

Tab. 3.1 Loading and unloading jobs for bays in four ships

bay v	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	39	67	88	90	72	46	78	75	100	130	88			
2	74	88	72	98	101	81	48							
3	49	102	82	96	112	95	108	60						
4	88	90	87	70	108	110	106	70	98	98	88	56	92	50

本文假设岸桥作业速度为一个单位时间一箱，岸桥移动速度为一个单位时间移动一个贝位距离，岸桥可用时间均为 0 时刻。所有船舶的贝位也从左到右依次编号，两艘船舶之间的间隙用一个虚拟贝位表示，如 V1 和 V2 之间用贝位号 12 表示。虚拟贝位的装卸量为 0。由此，船舶 V1 的贝位号为 1~11，船舶 V2 的贝位号为 13~19，船舶 V3 的贝位号为 21~28，船舶 V4 的贝位号为 30~43。

运用计算机软件编写本文设计的单亲遗传算法程序。PGA 算法参数为：种群规模 50，终止代数 500。求得结果如表 3.2 所示。表 3.2 表示了整个岸线上 10 台岸桥分配的装卸任务情况，以及 4 艘船舶各个贝位的开始作业时间和结束作业时间。从表 3 中可得，10 台岸桥完工时间分别为 350、347、340、343、319、319、360、358、346、333。4 艘船舶的完工时间分别为 350、343、319、360，全岸线完工时间为 360。其中岸桥 3、4、5、7 都为多艘船舶提供装卸服务，实现了船与船之间的协同调度。

表 3.2 各岸桥装卸任务情况

Tab. 3.2 The optimized schedule of quay cranes

岸桥 1				岸桥 2				岸桥 3				岸桥 4				岸桥 5			
bay	Tsn	Pn	Ten	bay	Tsn	Pn	Ten	bay	Tsn	Pn	Ten	bay	Tsn	Pn	Ten	bay	Tsn	Pn	Ten
1	0	39	39	4	0	90	90	9	0	100	100	11	0	88	88	18	0	81	81
2	40	67	107	6	92	46	138	13	104	74	178	16	93	98	191	21	84	49	133
3	108	88	196	8	140	75	215	14	179	88	267	17	192	101	293	22	134	102	136
5	198	72	270	10	217	130	347	15	268	72	340	19	295	48	343	23	137	82	319
7	272	78	350																
岸桥 6				岸桥 7				岸桥 8				岸桥 9				岸桥 10			
bay	Tsn	Pn	Ten	bay	Tsn	Pn	Ten	bay	Tsn	Pn	Ten	bay	Tsn	Pn	Ten	bay	Tsn	Pn	Ten
24	0	96	96	26	0	95	95	31	0	90	90	35	0	110	110	38	0	98	98
25	97	112	209	28	97	60	157	32	91	87	178	37	112	70	182	40	100	88	188
27	211	108	319	30	159	88	247	33	179	70	249	因安全距离约束等待 6				42	190	92	282
				因安全距离约束等待 1				36	252	106	358	39	190	98	288	43	283	50	333
				34	252	108	360					41	290	56	346				

传统多船岸桥调度方法是先根据各船舶装卸的集装箱箱量确定岸桥分配数量，再为各艘船舶所分配的岸桥进行任务分配。这些岸桥投入作业后一般都等到该船的所有集装箱都完成装卸后才退出该船舶的作业。同样以全岸线岸桥均衡为决策目标，根据船舶 V1、V2、V3、V4 的总装卸量得到的岸桥分配数量为 3、2、2、3，然后用本文设计的

算法求解单船岸桥调度问题，得到 1~10 号岸桥的完工时间分别为 287、308、296、274、306、349、363、412、410、409。四艘船舶的完工时间为 308、306、363、412，全岸线完工时间为 412。

通过本文调度方法和传统调度方法的比较可知，本文方法得到的岸桥最早完工时间与最晚完工时间之比为 0.886，较传统方法得到的结果 0.665 好，即本文方法所得到的岸桥作业均衡性较传统方法好，且全岸线完工时间比传统方法缩短了 52 个单位时间，即优化了 12.6%。

3.2 多船动态到港岸桥协同作业调度方法

3.2.1 多船动态到港岸桥协同作业调度问题描述

在集装箱码头作业中，在每条船舶到港前，港口会预留一个相对固定的时间窗口给该船舶，再根据船舶实际到港时间、箱量情况确定靠泊、离泊时间和靠泊位置。目前码头大多还是采用传统的岸桥调度方法，即先给船舶配置岸桥数量，然后再给分配到船的岸桥进行任务分配，在该船舶装卸任务完成后所有岸桥集体退出该船舶的作业。实际生产中也有岸桥在船与船之间进行共享的情况，但只是凭借调度人员的经验，没有有效的协同调度方法。本节提出了滚动窗口调度优化的思路，以进行全岸线岸桥协同调度研究。图 3.5 是到港船舶的泊位分布图，五个矩形 A、B、C、D、E 表示五艘船舶，长宽分别表示船舶的长度和停靠的时间。从图中可知，调度计划 1 启动后，等到船舶 D 靠泊时，更新启动调度计划 2，同理船舶 E 靠泊时，更新启动调度计划 3，即每停靠一艘船舶，启动更新一次岸桥调度计划。

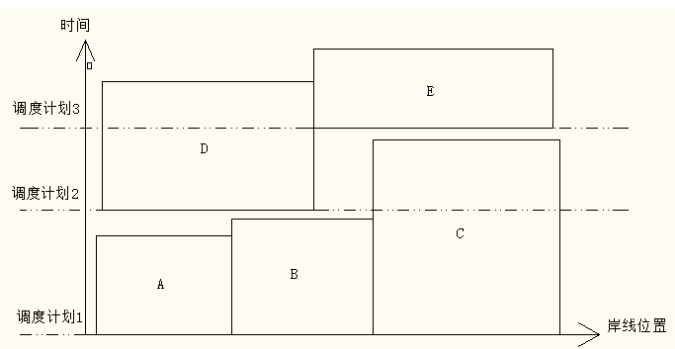


图 3.5 滚动式全岸线岸桥协同调度策略  
Tab. 3.5 Rolling type of quay crane collaborative scheduling strategy

实际码头已有采用滚动式泊位分配，如图 3.6 所示。决策计划综合考虑近  $n$  天到港船舶的整体情况，该策略下只有滚动决策周期的第 1 天计划被执行，计划执行并更新相

关信息后，当前决策周期向前推进，进行新一轮决策，其实质上就是静态的泊位调度策略。而在实际操作过程中，船舶可能在预计离港时间之前完成操作，若不及时更新泊位状态以及岸桥调度情况，将造成泊位资源以及岸桥资源的严重浪费。

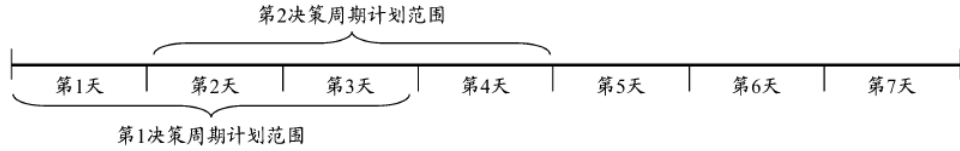


图 3.6 滚动式泊位分配调度策略

Tab. 3.6 Berth scheduling strategy of rolling type

本节提出了基于滚动式泊位分配的全岸线动态岸桥协同调度方法，即进行一次岸桥协同调度计划后，滚动决策周期的每一艘船舶离港后，泊位调度计划更新，向前推进进行新一轮泊位分配决策。每一艘船舶靠泊后，岸桥协同调度计划更新，向前推进进行新一轮岸桥调度决策。全岸线岸桥协同调度是指确定各船舶上装卸任务所分配的岸桥编号以及装卸顺序，且岸桥可以在不同船舶间进行来回调用，即岸桥在服务第一艘船舶时，可以在该艘船还未完成装卸作业的情况下去相邻船舶进行作业，实现在船舶之间的协同，从而提高岸桥装卸效率。

根据研究问题的特性和现实约束，进行如下假设：（1）在一次计划周期内，船舶的靠泊位置、离靠泊时间和装卸量已知；（2）各个岸桥的装卸速度和移动速度一致；（3）各岸桥在同一导轨上，不能相互穿越，且相邻的岸桥需要保持 1 个贝位的安全距离；（4）以每个贝位所有装卸量为一个任务，岸桥要完成整个贝位装卸任务才能移动到下一个贝位进行装卸工作；（5）船舶的集装箱配载计划已知；（6）不考虑岸桥等待集卡的现象。

### 3.2.2 多船动态到港岸桥协同作业调度优化数学模型

$V = \{1, 2, \dots, v\}$ ：船舶集合； $Q = \{1, 2, \dots, q\}$ ：岸桥集合； $\Omega = \{1, 2, \dots, N\}$ ：所有船舶的贝位任务集合； $\Omega_v = \{1, 2, \dots, bay_v\}$ ：船舶  $v$  上贝位的装卸任务集合； $P_{vi}$ ：船舶  $v$  上贝位  $i$  的装卸时间； $P_n$ ：贝位  $i$  的装卸时间( $n=1, 2, \dots, N$ )； $T = \{1, 2, \dots, t, \dots\}$ ：单位时间集合； $h$ ：相邻岸桥的安全距离为  $h$  个贝位距离； $tm$ ：岸桥移动一个贝位距离的时间； $M$  为足够大的正数； $C_v$ ：船舶  $v$  的计划离泊时间； $L$ ：泊位总长； $TT$ ：总计划时间长度； $l_v$ ：船舶  $v$  的长度（包括水平安全预留长度）； $T_v$ ：船舶  $v$  计划在港时间长度。 $b_v$ ：船  $v$  停靠位置； $t_{av}$ ：船  $v$  到港时间； $t_{sv}$ ：船  $v$  靠港时间； $t_{ev}$ ：船  $v$  离泊时

间;  $n_k$ : 岸桥  $k$  在启动一次计划时的开始所在位置贝位  $n$ ;  $t_{s,vi}$ : 船舶  $v$  上的贝位  $i$  任务开始作业时间( $n=1,2,\cdots,N$ );  $t_{e,vi}$ : 船舶  $v$  上的贝位  $i$  任务结束作业时间( $n=1,2,\cdots,N$ );  $t_{s,n}$ : 贝位  $n$  任务开始作业时间( $n=1,2,\cdots,N$ );  $t_{e,n}$ : 贝位  $n$  任务结束作业时间( $n=1,2,\cdots,N$ );  $E_k$ : 为在同一台岸桥  $k$  上装卸的贝位的集合;  $X_{vitk}$ : 若船舶  $v$  的贝位  $i$  的任务在  $t$  时间被岸桥  $k$  服务时为 1, 否则为 0;  $X_{ntk}$ : 若贝位  $n$  的任务在  $t$  时间被岸桥  $k$  服务时为 1, 否则为 0;  $Y_{vtk}$ : 若船舶  $v$  在  $t$  时间被岸桥  $k$  服务时为 1, 否则为 0;  $Y_{kninj}(ni,nj \in E_k)$ : 若岸桥  $k$  完成贝位任务  $ni$  后紧接着开始贝位任务  $nj$  时为 1, 否则为 0;  $Z_{ninj}$ : 若贝位  $nj$  的任务开始时间在贝位  $ni$  的任务结束之后时为 1, 否则为 0;  $W_{vivj}$ : 若船舶  $vi$  停在船舶  $vj$  左边 (即  $b_{vi}+l_{vi}<b_{vj}$ ) 时为 1, 否则为 0;  $T_{vivj}$ : 若船舶  $vi$  在船舶  $vj$  靠泊之前已经离港则为 1, 否则为 0;  $T_k$ : 岸桥  $k$  完工时间;

多船动态到港岸桥协同作业调度模型为:

$$\min(\max_{v=1}^V(t_{ev} - C_v)) \quad (3-17)$$

S.t.,

$$t_{sv} = \min\{t_{s,vi}\}(\forall i \in \Omega_v) \quad (3-18)$$

$$t_{ev} = \max\{t_{e,vi}\}(\forall i \in \Omega_v) \quad (3-19)$$

$$b_v + l_v \leq L \quad (3-20)$$

$$b_{vi} + l_{vi} \leq b_{vj} + M(1 - W_{vivj})(vi, vj \in V) \quad (3-21)$$

$$t_{evi} \leq t_{svj} + M(1 - T_{vivj})(vi, vj \in V) \quad (3-22)$$

$$W_{vivj} + W_{vjvi} + T_{vivj} + T_{vjvi} \geq 1(vi, vj \in V) \quad (3-23)$$

$$\sum_{k \in Q} X_{vitk} = 1(t \in T, i \in \Omega_v, v \in V) \quad (3-24)$$

$$\sum_i X_{vitk} = Y_{vitk}(t \in T, i \in \Omega_v, v \in V) \quad (3-25)$$

$$t_{s,n} + P_n = t_{e,n}(n \in \Omega) \quad (3-26)$$

$$t_{e,ni} - t_{s,nj} \leq (1 - Z_{ninj})M(n_i, n_j \in \Omega) \quad (3-27)$$

$$Y_{knin_j} \cdot t_{e,ni} + P_{n_j} + t_m \cdot |n_j - n_i| \leq t_{e,n_j}(n_i, n_j \in \Omega, k \in Q) \quad (3-28)$$

$$(k_2 - k_1)(n_2 - n_1) \cdot X_{n_1tk_1} \cdot X_{n_2tk_2} \geq 0(k_1, k_2 \in Q, n_1, n_2 \in \Omega, t \in T) \quad (3-29)$$



$$\sum_{ni \in \Omega} Y_{knij} \leq 1 (nj \in \Omega, k \in Q) \quad (3-30)$$

$$\sum_{nj \in \Omega} Y_{knij} \leq 1 (ni \in \Omega, k \in Q) \quad (3-31)$$

$$|n_i - n_j| \geq h \cdot X_{n_i k} \cdot X_{n_j t} \quad (n_i, n_j \in \Omega, k \in Q, t \in T) \quad (3-32)$$

$$t_{sv} - t_{av} \geq 0 \quad (3-33)$$

$$t_{va} + T_v = C_v \quad (3-34)$$

模型中, (3-17)式为目标函数, 表示最小化所有船舶的最大延迟时间, 其中 $(t_{ev} - C_v)$ 表示船舶实际离港时间和计划离港时间的差, 该值越小, 则说明船舶完成作业时间越早, 若为负值, 即表示船舶比计划提前完成作业。式子(3-18)和(3-19)定义船舶开始作业的时间和结束作业的时间。约束(3-20)表示船头靠泊位置的取值范围。约束(3-21)、(3-22)和(3-23)保证泊位时间坐标系中船舶所占区域不重叠。约束(3-24)表示每个贝位在任意时刻只能由一台岸桥操作。约束(3-25)表示一台岸桥在任意时刻只能为一艘船舶中的一个贝位服务。约束(3-26)表示每个贝位任务的作业开始时间和完成时间的关系。约束(3-27)表示由同一台岸桥的服务的两个贝位的前后时间关系。约束(3-28)表示由同一个岸桥作业的紧接着的两个贝位任务的时间关系。约束(3-29)表示岸桥不能相互穿越进行交叉作业。约束(3-30)和(3-31)表示任意一个贝位任务最多有一个连续的前序作业和一个连续的后续作业。约束(3-32)表示相邻贝位在作业时要保持一定的安全距离。约束(3-33)表示船舶停泊后才能开始服务。约束(3-34)表示到港时间和计划离泊时间关系。

### 3.2.3 模型求解

本文提出基于滚动式泊位分配的全岸线动态岸桥协同调度方法, 其流程如图 3.7 所示。

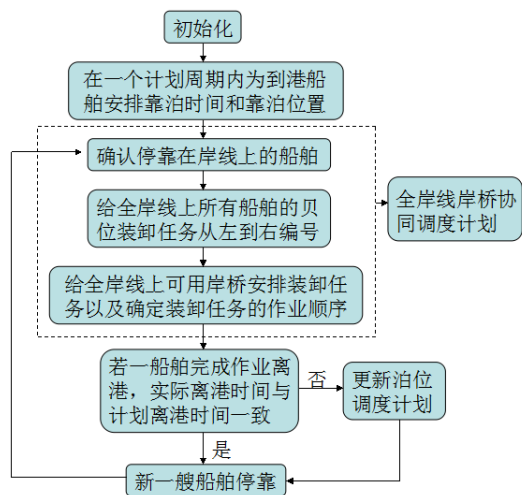


图 3.7 基于滚动式泊位分配的全岸线动态岸桥协同调度方法流程图  
Fig. 3.7 The flow chat of dynamic quay crane collaborative scheduling based on rolling type of berth allocation

在一个计划周期内为陆续到港的船舶制定一个泊位计划，即安排船舶的靠泊时间和靠泊位置，确认所有停靠船舶的贝位装卸任务，制定全岸线岸桥协同调度计划。本节设计 PGA 进行求解岸桥协同调度问题。

(1) 染色体编码和初始解的生成

对所有停靠船舶的贝位任务从左到右依次编号，构建一个  $(m \times n)$  的二维矩阵， $m$  表示进行装卸操作的岸桥数量， $n$  表示所有停靠船舶的装卸贝位任务总数。

在码头操作中，岸桥一般要完成一个贝位所有任务才能移动到下一个贝位进行作业。在更新一次全岸线岸桥协同调度计划时，岸桥要先完成原先计划中正在作业的贝位任务，才能进行新分配的贝位装卸任务。初始染色体的生成得考虑这个约束，否则将会生成大量的不可行解。因此根据研究的问题的特性，设计如图 3.8 所示的染色体编码。图中每行表示一台岸桥，每行上面的数字代表分配给该岸桥的任务的编号，其从左到右排列代表任务的装卸顺序。矩阵的第 1 列表示岸桥初始所在的贝位任务位置，然后把 1 到  $n$  除去第 1 列的任务编号的整数随机分配给各行，其余空位用“0”补齐。



图 3.8 染色体编码示例  
Fig. 3.8 The illustration of chromosome representation

## (2) 染色体合法化

为确保岸桥作业不发生穿越现象，对染色体进行合法化。染色体矩阵的第 1 列为各岸桥所在的初始位置的贝位装卸任务。第 2 列表示各岸桥接下来要进行装卸的贝位任务。若第 2 列基因任务号不是从小到大排列，即说明岸桥在作业时会发生穿越，必须要对基因进行合法化。由于岸桥与任务都是从左到右依次进行编号，对该列基因序号从上到下进行排列。当某列基因中岸桥作业发生穿越且包含“0”时，基因合法化时不对“0”的位置进行变动，以保证染色体不会发生局部收敛。同时，某列基因中相邻岸桥会对相邻贝位序号的作业进行作业，这时规定岸线上靠右的岸桥先进行作业。后面每列以此类推，直到每列任务在作业中岸桥不会发生干扰。随机一染色体的合法化过程如图 3.9 所示。染色体合法化结束后，计算求得该染色体的适应值。

$$\left( \begin{array}{c|cccccccccccccccc} 4 & 13 & 5 & 8 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 12 & 2 & 11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 14 & 1 & 15 & 6 & 3 & 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{c|cccccccccccccccc} 4 & 1 & 2 & 6 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 12 & 5 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 14 & 13 & 15 & 11 & 9 & 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

图 3.9 染色体合法化示例

Fig 3.9 The legalization of Chromosome

## (3) 遗传操作

单亲遗传算法(PGA)是仅在一条染色体上进行遗传操作。染色体第一列是岸桥的初始位置的贝位装卸任务，只有完成染色体第一列的基因任务才可以进行第二列的基因任务。因此对于染色体的第二列以及后面列，本文 PGA 采用了以下几种基因重组方法：1) 基因单点换位；2) 基因多点换位；3) 基因倒置；4) 基因单点移位；5) 基因倒置后再进行基因多点互换；6) 基因倒置后再进行基因单点移位。

父代染色体经过以上每一种遗传操作后，都对染色体进行合法化，可得到 6 个子代个体。对该 6 个子代个体进行适应值计算。选择父代、子代染色体中适应值最优的染色体替代该父代染色体实现种群的进化。

## (4) 种群选择

通过遗传操作得到新一代的种群后，对新一代的种群进行选择更新。用种群中适应度值最佳的染色体选择代替适应度值最差的染色体实现种群的更新进化。

### 3.2.4 算例分析

本节以某实际码头连续靠泊的三艘船舶作为研究对象，如图 3.10 所示。船 V2 在

18:30 靠泊时，更新岸桥调度计划。船舶 V1、V2 和 V3 的预计离港时间分别为 04:30、07:30 和 08:30，即分别要在 600min、780min、840min 内完成装卸工作。船舶 V2 的装卸任务以及 V1 和 V3 的剩余装卸任务情况如表 3.3 所示。该码头具有 10 台岸桥，都为双 20’吊具。故得到船舶实际装卸数据见表 3.4。本文假定岸桥装卸速度为 2min/箱，岸桥移动速度为 2min 一个贝位距离。

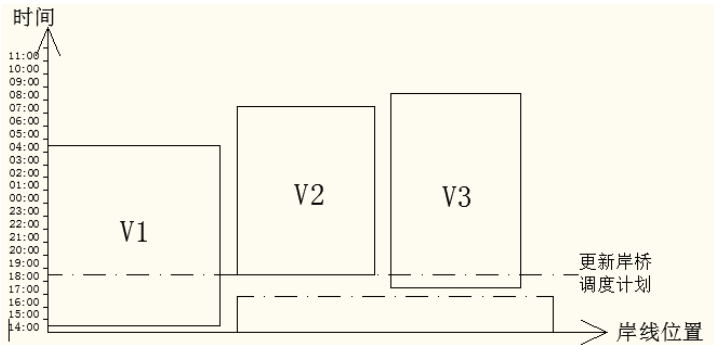


图 3.10 泊位分配图  
Fig. 3.10 The figure of berth allocation

表 3.3 各船舶具体装卸数据  
Tab. 3.3 The detailed handling data of ships

船舶	贝位号	2	6	10	14	18	22	26	30	34	38	42	46	50	54	58	62	66	70	74
V1	卸载		13	106		58	83		63	60	23	6					45	62	70	
	装载				2	4	23	48	26			9	64	12	110		26			
					8	7		5	5	32	32	6	13		4	4	3	2		
V2	卸载	116	33		10	60	20	66	28	37	123	101	49	103	24	148	77	150	10	87
								7	6	32	27		4	7	1	1		3	46	48
	装载		29	30													30			
																	9	8		
V3	卸载				6		4	19	1				34	1	4		15			
	装载	8	19	39	24	64	64	33	115	116	116	84	48	15	26	65	60			
			20	23	24	24	9	10	3							3	3			

表 3.4 船舶实际装卸数据

Tab. 3.4 The actual handling data of ships

bay	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
V1	0	13	106	10	62	111	80	102	60	27	18	64	12	122	0	71	62	70	
V2	116	62	30	10	60	20	73	60	37	130	102	49	106	72	148	120	150	64	87
V3	8	42	63	40	67	68	52	116	126	117	90	82	16	30	68	75			

对三艘船舶的贝位从左到右依次编号，两艘船舶之间的间隙用一个虚拟贝位表示，如 V1 和 V2 之间用贝位号 19 表示，虚拟贝位的装卸量为 0。由此，船舶 V1 的贝位号为 1~18，船舶 V2 的贝位号为 20~38，船舶 V3 的贝位号为 40~55。

运用计算机软件编写 PGA 算法程序。PGA 算法参数为：种群规模 50，终止代数 500。求得贝位装卸任务分配以及操作顺序情况如表 3.5 所示。船舶 V1、V2 和 V3 完工时间分别为 586min、756min 和 798min，比预期离港时间分别提前了 14min、22min、42min。其中岸桥 2、3、4、6、7、8 都为多艘船舶提供装卸服务，实现了船与船间的协同调度。

表 3.5 贝位装卸任务分配以及操作顺序

Tab. 3.5 The assignment and operation sequence of bay tasks

岸桥 1	2	3	5	9	11		岸桥 6	31	32	33	35	41	
岸桥 2	4	6	7	12	13	21	岸桥 7	34	37	38	40	44	
岸桥 3	8	10	16	17	22	23	24	岸桥 8	36	43	46	47	52
岸桥 4	14	18	26	27	28			岸桥 9	42	48	49	53	
岸桥 5	20	25	29	30				岸桥 10	45	50	51	54	55

传统岸桥分配与调度方法是先根据各船舶装卸量确定各自的岸桥分配数量，再为各船舶所分配的岸桥进行装卸任务分配，岸桥投入作业后，直到该船的所有集装箱都完成装卸后才退出该船舶作业。本文同样以最小化所有船舶最大延迟时间为目标，采用传统调度方法计算了三艘船舶的离港时间，分别为 678min、786min、732min。可见，采用传统方法，V1、V2 比预期离港时间分别延迟了 78min、6min，只有 V3 提前了 108min，即使用传统方法将导致部分船舶离港时间发生推迟，从而造成码头和船公司的损失。

3.3 本章小结

本章节以集装箱码头全岸线岸桥调度为研究内容，首先针对计划周内船舶全部已到

港的情况提出了多船静态岸桥协同调度方法，把船舶上的具体装卸任务分配给全岸线上的可用岸桥并确定各任务的装卸顺序。实验数据表明，该方法实现了岸桥在多船间的协同调度，均衡了岸桥作业，从而提高了岸桥的装卸效率。然后在 3.2 中针对多船动态到港的情况提出了基于滚动式泊位分配的全岸线动态岸桥协同调度方法，通过建立全岸线泊位调度模型以及岸桥调度模型，采用单亲遗传算法进行优化求解，实现作业计划周期内岸桥的利用率和装卸效率，并通过算例分析该方法的可行性，对于实际码头具有一定的现实意义。

总结本章节，面向多船的岸桥协同调度方法具有一定的可行性。下一步的研究将结合第二章和本章的调度方法进行工程应用。

## 4 工程应用

宁波港股份有限公司北仑第二集装箱码头分公司（NBSCT），成立于 2000 年 10 月 30 日，码头岸线总长 1258 米，前沿水深-15 米，拥有 4 个大型专业集装箱深水泊位，配备 18 台超巴拿马型集装箱岸桥，是 10000TEU 以上超大型集装箱船舶最佳靠泊作业的集装箱码头之一（如图 4.1 所示）。



图 4.1 北仑港三期码头整体布局  
Fig. 4.1 The overall layout of Beilun harbor

公司自成立以来，吞吐量从 2001 年的 31.5 万 TEU 到 2013 年 380 万 TEU，一直保持着两位数的迅猛增长，如图 4.2 所示。随着吞吐量的不断增长，码头作业压力剧增。尤其在生产繁忙时段，到港的船舶要在锚地等上 10 多小时，甚至等上 1 天时间才能靠泊作业。提高码头作业效率显得至关重要。本章节以宁波港北仑港区三期码头——宁波北仑第二集装箱有限公司为试点单位，进行工程应用计算。

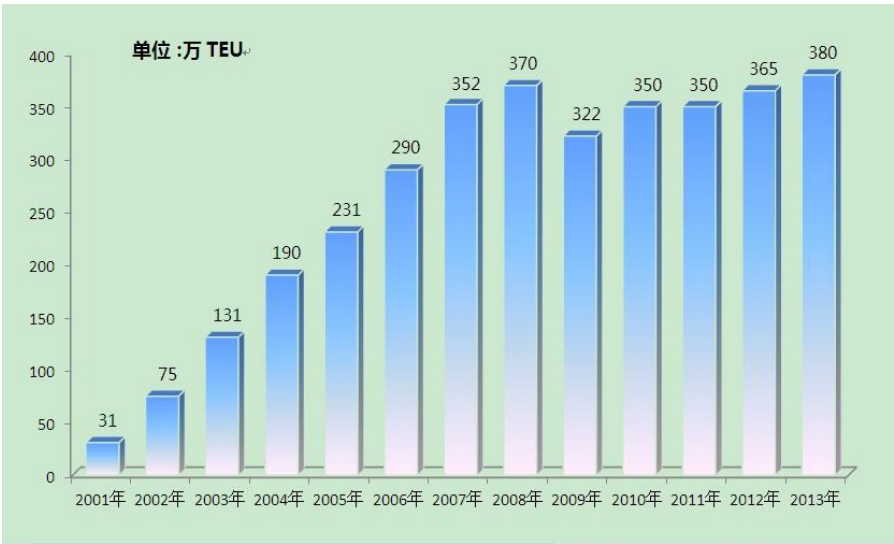


图 4.2 公司历年集装箱吞吐量示意图  
Fig. 4.2 The figure of the company's container throughput over the years

4.1 实例数据

表 4.1 为码头某天停泊的五艘船舶各个贝位的装卸量。对船舶装卸集装箱量数据进一步细化，得到舱位集装箱装卸的计划装卸量见表 4.2。

表 4.1 五艘船舶各个贝位装卸量  
Tab. 4.1 Loading and unloading jobs for bays in four ships

船舶 装卸量		贝位号																	
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A	卸箱量	28	0	0	0	2	27	0											
	装箱量	2	18	5	29	18	19	22											
E	卸箱量	15	15	15	0	0													
	装箱量	30	25	25	20	8													
H	卸箱量	26	21	25	21	27	1												
	装箱量	12	18	19	21	18	0												
N	卸箱量	0	2	1	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	装箱量	48	35	10	0	35	91	3	42	5	158	0	33	1	35	78	30	80	
P	卸箱量	17	0	0	0	43	0	0	0	64	0	0	15	16	0	62	0	94	0
	装箱量	15	37	0	68	46	0	50	142	0	39	56	37	55	50	5	0	43	9



表 4.2 船舶各贝位各舱位待装卸集装箱量

Tab. 4.2 Loading and unloading jobs in each hatch within each ship-bay

船 A 舱位	装卸量	贝位号																	
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	卸箱量	14	0	0	0	2	27	0											
	装箱量	2	6	3	15	9	19	15											
2	卸箱量	14	0	0	0	0	0	0											
	装箱量	0	12	2	14	9	0	7											
船 E 舱位	装卸量	贝位号																	
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	卸箱量	9	9	9	0	0													
	装箱量	18	15	15	12	4													
2	卸箱量	6	6	6	0	0													
	装箱量	12	10	10	8	4													
船 H 舱位	装卸量	贝位号																	
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	卸箱量	12	11	12	11	14	0												
	装箱量	5	8	8	12	10	0												
2	卸箱量	14	10	13	10	13	1												
	装箱量	7	10	11	9	8	0												
船 N 舱位	装卸量	贝位号																	
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	卸箱量	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	装箱量	4	1	2	0	5	14	0	12	0	30	0	0	0	10	14	8	15	
2	卸箱量	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	装箱量	20	16	0	0	0	26	0	7	5	49	0	16	1	9	25	2	25	
3	卸箱量	0	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	装箱量	20	17	8	0	21	38	3	11	0	49	0	17	0	5	25	13	25	
4	卸箱量	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	装箱量	4	1	0	0	9	13	0	12	0	30	0	0	0	11	14	7	15	

船P 舱位	装卸量	贝位号																	
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	卸箱量	1	0	0	0	11	0	0	0	9	0	0	0	0	0	14	0	16	0
	装箱量	1	1	0	1	0	0	0	17	0	1	0	0	0	6	0	0	17	0
2	卸箱量	8	0	0	0	7	0	0	0	18	0	0	2	10	0	19	0	30	0
	装箱量	6	16	0	19	22	0	12	58	0	21	28	21	28	0	0	0	12	2
3	卸箱量	8	0	0	0	9	0	0	0	22	0	0	13	6	0	17	0	33	0
	装箱量	6	19	0	30	24	0	38	43	0	9	28	16	27	29	5	0	11	6
4	卸箱量	0	0	0	0	16	0	0	0	15	0	0	0	0	0	12	0	15	0
	装箱量	2	1	0	18	0	0	0	24	0	8	0	0	0	15	0	0	3	1

船舶 A、E、H、N 和 P 的靠泊时间分别为当天 21:30、19: 00、18:30、19:20 和 15:20，预计离港时间分别为 06:30、03:00、05:45、04:00 和 05:00，即在船靠泊后分别在 570min、480min、650min、520min 和 820min 内完成装卸工作。该五艘船舶的泊位分配图如图 4.3 所示。

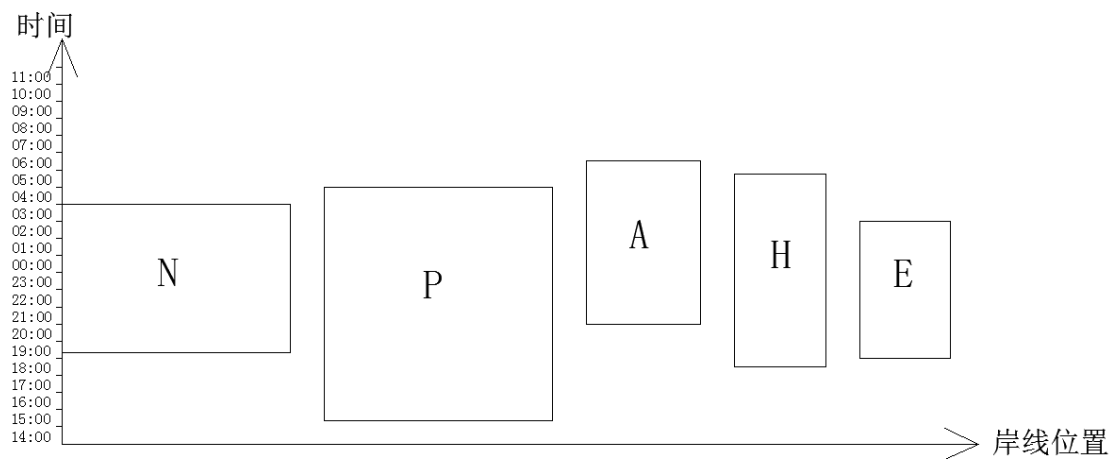


图 4.3 泊位分配图  
Fig. 4.3 The figure of berth allocation

该五艘船舶靠泊时，可用岸桥 12 台，其余岸桥维护中。假定岸桥单程装卸速度为 2min/箱，岸桥同步装卸为 2.5min/箱，岸桥移动速度为 1min 一个贝位距离。

4.2 优化结果

4.2.1 多船岸桥协同调度计算结果

对于采用多船岸桥协同调度方法，5 艘船舶靠泊时，对全岸线上船舶的贝位从左到右依次进行编号，则船舶 N 的贝位号为 1~17，船舶 P 的贝位号为 19~36，船舶 A 的贝位号为 38~44，船舶 H 的贝位号为 46~51，船舶 E 的贝位号为 53~57，船舶间距离用一个虚拟贝位表示，如船舶 N 和 P 间距用虚拟贝位 18 表示。优化计算后调度方法如表 4.3 所示。调度方案甘特图如图 4.4 所示。

表 4.3 贝位装卸任务分配以及操作顺序

Tab. 4.3 The assignment and operation sequence of bay tasks

岸桥 1	1	2	3	5		岸桥 7	27	28	29	36	38	39
岸桥 2	6	7	8			岸桥 8	30	31	33	40	41	42
岸桥 3	9	10				岸桥 9	32	35	43	44		
岸桥 4	19	20	15	14	13	12	岸桥 10	46	47	49		
岸桥 5	22	23	17	16			岸桥 11	48	51	53	54	
岸桥 6	25	26					岸桥 12	50	55	56	57	

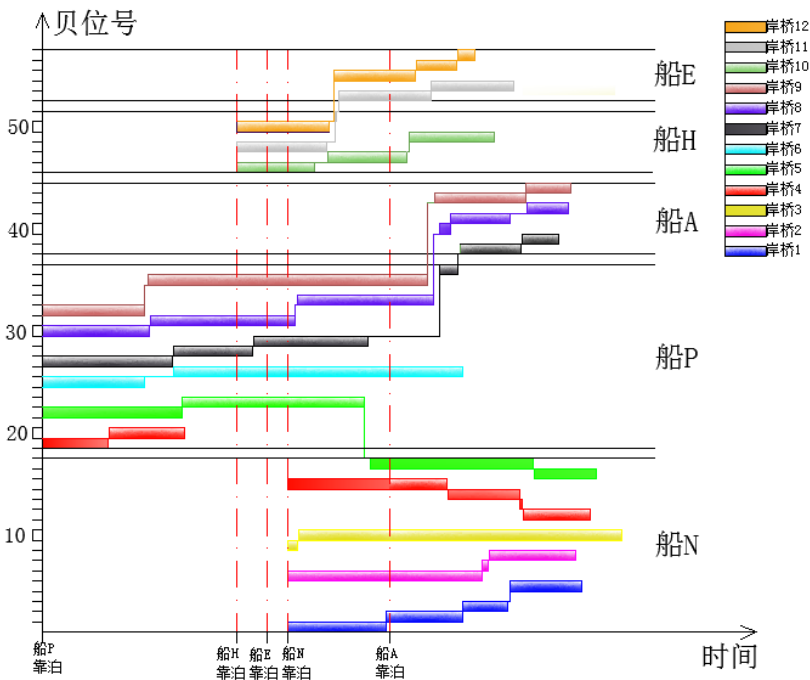


图 4.4 单程装卸的岸桥协同调度方案甘特图  
Fig. 4.4 Gantt chart of schedule based on

船舶 N、P、A、H 和 E 分别在各自靠泊后的 327min、412min、178min、253min 和 241min 内完成作业。

4.2.2 基于同步装卸的多船岸桥协同调度计算结果

基于同步装卸的多船岸桥协同调度方法，其优化计算后调度方法如表 4.4 所示。调度方案甘特图如图 4.5 所示。

表 4.4 贝位装卸任务分配以及操作顺序

Tab. 4.4 The assignment and operation sequence of bay tasks

岸桥 1	1	2	3	5		岸桥 7	27	28	31	38	39
岸桥 2	6	7	8			岸桥 8	29	30	33	40	41 42
岸桥 3	9	10				岸桥 9	32	35	36	43	44
岸桥 4	20	19	15	14	13	12	岸桥 10	46	47	49	
岸桥 5	23	22	17	16			岸桥 11	48	51	53	54
岸桥 6	25	26					岸桥 12	50	55	56	57

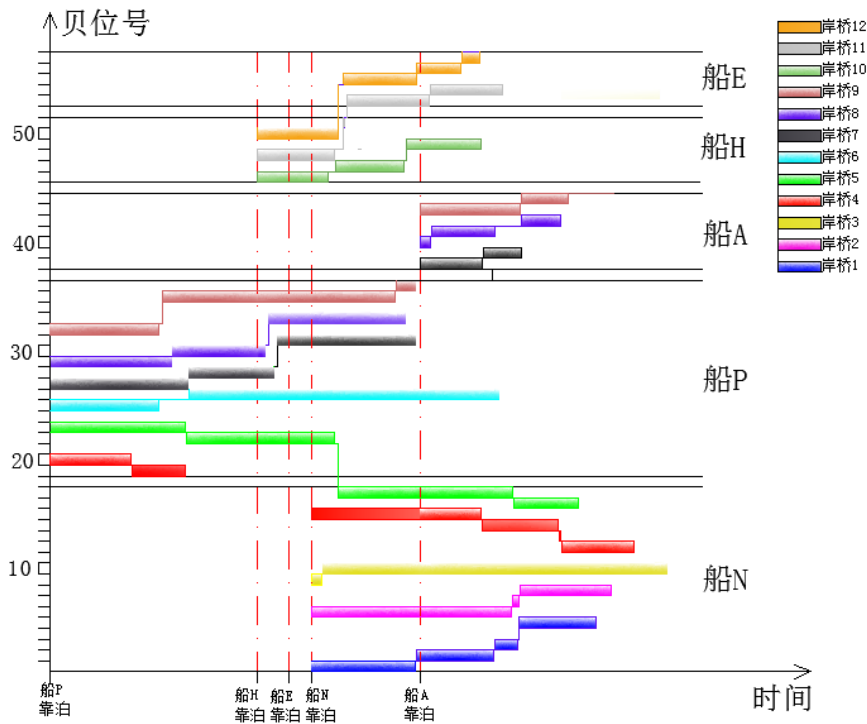


图 4.5 基于同步装卸的调度方案甘特图

Fig. 4.5 Gantt chart of schedule based on synchronized loading and unloading operations

船舶 N、P、A、H 和 E 分别在各自靠泊后的 327min、412min、136min、206.5min 和 196.5min 内完成作业。

4.2.3 不同调度方法结果对比

就船舶装卸作业时间方面，与传统调度方法比较如表 4.5 所示。

表 4.5 各调度方法比较  
Tab. 4.5 Comparison of scheduling methods

	传统方法	单程装卸的协同方法		同步装卸的协同方法	
	作业时间	作业时间	优化率	作业时间	优化率
船 N	327	327	0	327	0
船 P	514	412	19.8%	412	19.8%
船 A	346	178	48.6%	136	60.7%
船 H	423	253	40.2%	206.5	51.2%
船 E	310	241	22.3%	196.5	36.6%

由表 4.5 可得知，与传统调度方法对比，单程装卸的多船岸桥协同调度方法提升了对各船舶装卸作业时间在不同程度上都有了一定的缩短，船 P 装卸作业时间缩短了 19.8%，船 A 装卸作业时间缩短了 48.6%，船 H 装卸作业时间缩短了 40.2%，船 E 装卸作业时间缩短了 22.3%。基于同步装卸的多船岸桥协同调度方法，船 P 装卸作业时间缩短了 19.8%，船 A 装卸作业时间缩短了 60.7%，船 H 装卸作业时间缩短了 51.2%，船 E 装卸作业时间缩短了 36.6%。

4.3 本章小结

本章为工程应用篇，实验数据均来源于宁波港北仑第二集装箱码头有限公司。对获得的码头实际数据进行合理的整理后，应用多船岸桥协同调度方法对集装箱码头全岸线岸桥装卸调度进行优化。通过工程实际算例计算分析，验证了本文提出的多船岸桥协同调度方法的有效性。

## 5 总结与展望

### 5.1 研究结论与创新

为了改变集装箱码头传统岸桥分配与调度模式，提高岸桥资源的利用率，缩短船舶在港时间，从而提升全岸线码头的生产效率，本文通过对现实码头岸桥调度模式以及相关文献的研究，结合现今集装箱码头装运模式改革中的同步装卸调度思想，提出了多船岸桥协同调度方法。分别分析了船舶静态到达和动态到达两种情况下岸桥的协同调度方法，详细描述岸桥在装卸作业过程中的约束，并以系统建模与优化算法深入研究全岸线岸桥协同调度方法如何提高岸桥利用率，减少资源浪费，缩减船舶的在港时间，进而提高码头整体的运营效率。通过对模拟算例的分析与工程实例的计算，验证了本文提出的方法的可行性与有效性，科研结果为集装箱码头同步装卸相关研究提供了有力的依据。

论文的研究成果与创新点如下：

(1) 在集装箱码头装卸工艺系统与调度方法研究的基础上，引入了同步装卸思想，以舱位为同步装卸的最小协同单位，实现岸桥对每一贝位集装箱的同步装卸操作，通过数学建模，算例分析，计算结果显示该方法较传统岸桥单程装卸模式，船舶装卸作业的完工时间缩短了 19.7%。

(2) 针对实际码头操作中岸桥调度模式的不足，提出了多船岸桥协同调度方法。对两种情况下全岸线岸桥协同调度方法都做了描述。对多船静态到港情况的岸桥协同调度方法进行数学建模并数值模拟后得出，该方法得到的岸桥最早完工时间与最晚完工时间之比为 0.886，较传统多船岸桥调度模式得到的结果 0.665 好，即本文方法所得到的岸桥作业均衡性较传统方法好，且全岸线完工时间比传统方法优化了 12.6%。

(3) 对多船动态到港情况提出了基于滚动式泊位分配的全岸线动态岸桥协同调度方法，建立了基于滚动式泊位分配的全岸线动态岸桥协同调度模型，并设计了单亲遗传算法对该模型进行求解，通过数值模拟结果显示，采用基于滚动式泊位分配的全岸线动态岸桥协同调度方法能充分利用岸桥资源从而满足实际操作要求，该方法较传统岸桥调度模式能够让靠泊船舶在计划时间内离港，不用造成码头和船公司的损失。

(4) 宁波北仑港三期码头——宁波港股份有限公司北仑第二集装箱码头分公司为试点获取实际信息和数据，进行工程计算与验证。实例的计算结果显示，与传统调度方法对比，本文提出的多船岸桥协同调度方法对各船舶装卸作业时

间在不同程度上都有了一定的缩短。岸桥单程协同装卸，船 P 装卸作业时间缩短了 19.8%，船 A 装卸作业时间缩短了 48.6%，船 H 装卸作业时间缩短了 40.2%，船 E 装卸作业时间缩短了 22.3%。基于同步装卸的多船岸桥协同调度方法，船 P 装卸作业时间缩短了 19.8%，船 A 装卸作业时间缩短了 60.7%，船 H 装卸作业时间缩短了 51.2%，船 E 装卸作业时间缩短了 36.6%。

## 5.2 研究展望

对本课题未来研究方向的展望，可以向着以下三方面发展：

（1）本文针对集装箱码头船舶到港的不同情况下，建立数学模型，最终求解结果为该种情况下各船舶的离港时间以及岸桥利用情况，在未来的研究中可以建立一个适应任何情况下满足码头作业指标的全岸线岸桥调度的优化模型。

（2）对单亲遗传算法进行改进，或开发其他智能算法，使其更适应问题的求解；

（3）在模型求解过程中发现，靠泊船舶的装卸时间往往取决于几个重点贝位的装卸时间，即该几个重点贝位的装卸时间决定了船舶的靠泊时间，在未来的研究中，可以对整个航线的集装箱配载计划进行优化，使得在各个码头装卸的集装箱在船舶各贝位分布均匀，从而缩短船舶在码头的停靠时间。

## 参考文献

- [1] Kim K H, Park Y M. A crane scheduling method for port container terminals[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 156(3): 752-768.
- [2] Moccia L, Cordeau J F, Gaudioso M, et al. A branch-and-cut algorithm for quay crane scheduling problem in a container terminal[J]. Naval Research Logistics, 2006, 53(1): 45-59.
- [3] Sammarra M, Cordeau J F, Laporte G, et al. A tabu search heuristic for the quay crane scheduling problem[J]. Journal of Scheduling, 2007, 10: 327-336.
- [4] Bierwirth C, Meisel F. A fast heuristic for quay crane scheduling with interference constraints[J]. Journal of Scheduling, 2009, 12, :345-360.
- [5] Meisel F, Bierwirth, C. A unified approach for the evaluation of quay crane scheduling models and algorithms[J]. Computers & Operations Research, 2011, 38(3), 683-693.
- [6] Unsal O, Oguz C. Constraint programming approach to quay crane scheduling problem[J]. Transportation Research Part E, 2013, 59, 108-122.
- [7] Lim A, Rodrigues B, Xu Z. A m-parallel crane scheduling problem with a non-crossing Constraint[J]. Naval Research Logistics, 2007, 54(2): 115-127.
- [8] Lee D H, Wang H Q, Miao L X. Quay crane scheduling with non-interference in port container terminals[J]. Transportation Research Part E, 2008, 44(1): 124-135.
- [9] 秦天保,沙梅. 基于约束规划建模求解岸桥调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(1): 181-186.
- [10] 杨明珠. 单船装卸作业的岸桥调度[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(10): 224-228.
- [11] 乐美龙,刘秀玲. 时间窗下单船岸桥调度——基于数学规划和规则的启发式算法[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(9): 242-248.
- [12] 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(1): 120-127.
- [13] 张亚辉,梁承姬. 基于离散贝位的集装箱港口岸桥作业调度研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(5): 64-69.
- [14] 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.
- [15] 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, 11: 60-65.
- [16] 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, 05: 1720-1722+1725.
- [17] 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, 02: 117-121.
- [18] 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, 01: 161-169.
- [19] 张红菊,乐美龙. 基于多目标粒子群算法的泊位-岸桥分配研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(2): 59-64.



- [20] 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]. 计算机工程与应用, 2014, 18: 265-270.
- [21] Liang Chengji, Huang Youfang, Yang Yang. A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(3): 1021-1028.
- [22] Elwany M H, Ali I, Abouelseoud Y. A heuristics-based solution to the continuous berth allocation and crane assignment problem[J]. Alexandria Engineering Journal, 2013, 52(4): 671-677.
- [23] Tavakkoli-Moghaddam R, Makui A, Salahi S, et al. An efficient algorithm for solving a new mathematical model for a quay crane scheduling problem in container ports[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(1): 241-248.
- [24] 董良才,宓为建. 全岸线集装箱装卸桥调度模型研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(13): 216-222.
- [25] 秦进,倪玲霖,王承娜等. 集装箱码头岸桥调度优化模型及算法[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1): 184-192.
- [26] 曾庆成,杨忠振,陆靖. 集装箱码头同贝同步装卸调度模型与算法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 2(10): 1671-1673.
- [27] 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.
- [28] Goodchild A V, Daganzo C F. Crane double cycling in container ports: planning methods and evaluation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2007, 41(8): 875-891.
- [29] 王嘉民,何琪敏,李晓鸣. 边装边卸流程的系统开发[J]. 港口装卸, 2006(3): 1-4.
- [30] 包起帆,施思明,沈联红等. 数字化港口集装箱生产关键技术[J]. 港口装卸, 2004(3): 14-15.
- [31] 曾庆成,杨忠振. 集装箱码头作业调度双层规划模型及求解算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(3): 276-281.
- [32] 吴志佩,胡燕海. 集装箱码头的双桥同贝同步装卸调度方法[J]. 宁波大学学报(理工版), 2013, 26(3): 118-122.
- [33] 胡燕海,吴志佩,李建辉等. 基于混堆的集装箱同贝位同步调度方法[J]. 科技与管理, 2014, 04: 38-41+51.
- [34] 刘琴,周强,张艳伟. 同贝位同步装卸的集装箱码头装卸工艺与堆场平面布置[J]. 水运工程, 2011, 6(454): 66-69.
- [35] 何赟燕,胡燕海. 基于舱位协同作业的集装箱同步装卸方法[J]. 宁波大学学报(理工版), 2012, 25(3): 105-108.
- [36] 何赟燕,胡燕海,毛育强等. 面向集装箱船同贝同步装卸的堆垛协同作业方法[J]. 宁波大学学报(理工版), 2014, 27(1): 124-128.
- [37] 张文修,梁怡. 遗传算法的数学基础[M]. 西安交通大学出版社, 2000.
- [38] 戴晓明,许超,龚向阳,邵惠鹤. 并行遗传算法收敛性分析及优化运算[J]. 计算机工程, 2002, 28(6): 92-95.

- [39] 李茂军,童调生,罗隆福. 单亲遗传算法及其应用研究[J]. 湖南大学学报, 1998, 25(6): 56-59.
- [40] 李茂军,邱丽芳. 单亲遗传算法的计算效率分析[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版), 1999, 14(1): 48-50.
- [41] 李茂军,童调生. 单亲遗传算法及其全局收敛性分析[J]. 自动化学报, 1999, 25(1): 68-72.
- [42] 李茂军,朱陶业,童调生. 单亲遗传算法与传统遗传算法的比较研究[J]. 系统工程, 2001, 19(1): 61-65.
- [43] 李茂军,童调生. 单亲遗传算法编码方式的研究[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版), 2000, 15(3): 11-13.
- [44] 陈慧琴,刘刚. 用整数编码的单亲遗传算法求解组合优化问题[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 27(2): 241-243.
- [45] 李茂军. 单亲遗传算法理论及应用[D]. 湖南大学, 2002.
- [46] 张晓绩,方浩,戴冠中. 遗传算法的编码机制研究[J]. 信息与控制, 1997, 26(2): 134-139.
- [47] 雷德明. 多维实数编码遗传算法[J]. 控制与决策, 2000, 02: 239-241.
- [48] 刘靖洁,陈桂明,刘小方. 基于矩阵编码的遗传算法研究[J]. 计算机工程, 2011, 37(13): 160-162.
- [49] 杜永贵,陈鑫. 矩阵编码的遗传算法[J]. 太原理工大学学报, 2012, 43(2): 111-113+118.
- [50] 刘晓峰,段富. 遗传算法矩阵编码的研究[J]. 太原科技大学学报, 2006, 27(6): 441-444.

## 附录A 集装箱装卸信息

卸载的集装箱信息									
730312	90204	620112	780988	420784	610310	540794	180484	531004	660982
300802	780990	661110	661318	421418	530908	661114	661584	431114	420882
660618	661188	660810	740390	660188	411310	541694	541384	750512	700116
700482	180686	541088	420690	740384	90306	661488	661082	410706	660686
90212	620712	620318	260388	541282	270208	421588	220416	551204	220306
531412	661012	740186	420718	740492	531310	60818	540884	411004	661118
420692	300804	781486	421184	180588	110210	620708	420588	551214	700316
660288	541388	421088	620284	700418	430814	540586	661218	90210	700286
661486	540502	660592	420788	60416	531014	540508	781190	531012	421290
610906	181186	180286	421388	60888	431412	660712	700390	411308	420586
551006	661310	660192	620492	780582	551406	621010	60182	690312	661484
530910	540692	260416	220216	660182	531210	621014	661316	431106	541418
551212	541488	661382	740284	421092	90408	540604	421484	551104	780288
90406	300806	260318	180384	60418	430604	540690	220486	110214	540718
90206	661312	421282	700192	660486	90208	540888	20388	310614	740392
780180	620818	780788	780384	300618	70614	60114	781186	410906	421218
781090	621004	421688	741318	421118	531010	620704	660190	250414	100218
430710	620410	780586	661384	220288	90104	620192	260286	250404	421492
710314	660708	421392	421490	100388	110206	300812	421486	270306	220490
410714	300810	661586	660816	781288	531308	620804	180282	250108	541682
740418	270114	740482	620482	541318	90110	661090	661418	550904	421686
780488	110310	620384	421084	620416	550714	180284	220182	610306	420686
661186	90410	660284	661582	220282	430508	180782	420782	270408	180684
430806	270312	781684	620388	620486	11084	620114	700184	661088	421016
90414	250114	421186	410514	420816	411114	181182	541082	540788	100318
20788	430804	540818	430910	660490	270406	540612	541016	661010	781286
420790	110106	700392	270108	700488	270410	621016	660282	621012	660584
100316	290602	260212	290608	660786	270404	660582	740286	60488	260190
730314	551002	740290	431404	420992	430514	540992	220214	660988	620216
70386	110212	781688	70106	781584	531006	620908	180988	540512	780686
730110	291204	220390	411408	421586	110104	620104	540684	620204	421416
730410	410708	660492	530914	260288	410502	540610	60286	60208	420888
650908	70206	660784	690410	660384	250402	421692	60218	540688	780684
740114	270302	780780	431408	781188	551306	661412	660488	300808	541218
740318	551412	541414	690212	780880	90112	60686	660484	620102	100488
780282	531108	220310	250314	700282	690114	180486	660992	661390	661016
780486	690110	740182	630306	220290	431006	300814	421316	661410	100216
740316	90312	541584	530904	421284	90214	260188	781382	540988	20582

780480	530714	781380	210106	421086	290612	100186	700382	661388	780884
101384	421690	700186	630904	780390	710210	620108	620390	661214	530708
780286	781390	780888	431112	661592	690210	540890	60484	541688	431208
780284	60482	620490	270310	660782	410606	60816	220114	541494	430506
660318	661292	221390	250302	180984	551112	181086	60682	541288	250208
541084	420516	660884	430706	661182	250204	541692	780688	220218	551014
630304	421414	420518	431108	421292	551004	541292	540882	620206	620186
431206	781084	780984	730514	620190	710114	540506	60216	100386	60688
530702	420684	620288	551114	620484	410614	541192	420986	540588	421190
550906	780388	660392	431312	660684	550914	220118	61284	660990	620106
661686	181286	421482	210102	60108	110114	260390	180482	540990	540786
750212	660986	540716	270106	781386	310604	90108	421314	540782	180788
730414	420792	540618	531002	541684	431306	730210	20384	540594	661690
651008	220186	661684	531304	61282	430914	290604	60188	181082	780186
730510	421082	780380	430712	660916	411008	430602	541314	540792	541116
750312	620716	780982	690408	541118	110208	550814	781488	540504	781686
740214	540608	61084	431214	540918	90412	430810	660518	620110	181284
780484	540514	700318	411108	660616	551404	410704	61286	621008	781586
270402	420584	661086	551010	700218	250206	411010	20584	541690	730412
690208	541094	700216	110406	420984	550704	431110	740386	661490	260484
431212	100286	220304	690310	780382	230402	90114	420892	61088	710412
221388	61086	260118	431210	180584	530804	411102	780786	180786	221590
421590	100190	541586	230104	660386	411012	110204	60618	660888	220388
60684	620212	220284	230108	740516	531214	270104	660586	100486	260116
690412	540582	421090	430608	421018	610312	250112	540816	620718	60882
410804	660812	661416	410610	421682	730512	310602	740192	540894	101382
410902	541588	541484	250410	220212	410712	550912	20784	661112	780690
410504	620710	700388	11082	420916	550908	710410	20782	661212	220386
531114	620202	421384	410608	661092	110410	530710	541086	660688	740488
710212	541592	660516	550710	620188	410710	250406	620386	660790	780182
411106	541390	661682	110312	431406	411014	690414	740292	541590	260386
110306	660590	60884	750514	411306	430708	411410	700416	620404	780882
710112	60212	700118	411104	411206	210208	230110	541482	60118	181384
60886	540592	220384	310610	551106	531208	250202	780490	180682	660186
180882	620292	540886	250408	431002	431202	531306	661492	541182	750414
180386	60214	620282	530706	210202	550706	430808	220188	541492	180784
781480	661688	421684	431310	610904	430812	210110	421582	181282	550810
60282	60210	620116	411214	410512	551312	411110	750112	541290	551108
60616	620208	541416	210206	250104	270304	531204	410904	620706	550808
180886	620810	700490	430614	710110	431304	430902	551008	540892	551210
620118	541392	780588	270204	411006	250310	710214	690308	540510	430906
661216	541188	780886	411312	270110	250106	411202	431004	541184	411208
100284	541186	661284	430610	610308	210108	551410	270112	620816	661190

集装箱码头多船岸桥协同调度方法研究

110108	661014	660292	410612	531206	630308	430904	531202	661210	100290
410810	660710	660290	411412	110314	550806	410912	431410	660910	541092
250308	621018	541286	540682	430714	551310	530912	310606	110408	780184
410602	620210	620290	421182	411204	410808	530812	250110	230102	660792
550708	220116	700288	421386	610304	430504	230206	431308	190186	781582
660482	100384	700188	541316	551408	531406	690112	410814	230208	420818
780482	100382	420688	740484	90314	550910	531212	620406	550804	260186
660716	620408	540616	421382	550702	411210	110308	660690	310608	60284
660388	620214	541382	620286	90106	530704	430510	620814	420616	550712
620382	660914	740184	740490	110110	90308	781088	661116	220112	780280
410908	661288	700486	220482	530902	710312	100282	530802	781388	661192
431010	660588	421318	780986	531110	410510	780290	530814	740388	661414
431008	540584	220302	661084	531312	431102	540516	70410	781588	220406
90886	20984	780980	661482	710310	270206	700292	531410	60288	620392
551206	620314	260214	181188	431104	531008	780188	431204	740288	300616
310612	541090	260418	781690	551304	751314	700384	290610	660390	781282
411406	540784	221690	420886	630302	431012	661392	531104	700492	270314
311202	660808	181386	421188	550812	530712	420918	531102	20386	290614
551308	660912	421192	661282	411212	411404	781290	250312	780682	531404
411002	61288	421286	660184	430502	70412	661184	550902	421116	550802
621006	60414	660286	700190	411112	551012	781482	410604	100116	531408
620402	180586	220488	700182	250306	620808	20586	110414	700290	250412
541490	181382	420618	741316	630312	180582	700484	410702	700284	270308
540590	300818	420786	660882	430512	620412	661018	410812	220190	410506
260290	20988	780680	541582	290606	620714	740190	710414	180884	531112
780784	540606	220484	661386	410910	620812	421584	430802	781590	430606
781184	20986	181486	620418	210204	540984	421216	630906	620184	660886
60186	620910	660984	61082	210402	60116	60184	210104	740282	540916
780790	541190	780890	780782	730310	540694	660818	410802	781280	100482
300816	540602	420682	20786	530808	660814	781384	690314	780584	100288
60112	660890	100118	781082	531106	660714	781182	410508	660382	660316
620316	260216	620182	100184	411304	541194	780386	250304	541486	420716
660892	180986	781080	420590	690214	661590	221386	530810	620218	20588
420890	541294	541216	540686	430704	540994	740486	270202	541284	100416
780590	661588	541686	100182	110112	540790	780580	551208	740518	660918
180288	181482	420988	660692	110412	661692	781086	551110	620488	661286
660118	60486	660682	660718	610302	660788	260316	731314	781490	750314
740416	180982	421288	421488	230106	661290	180382	430612	100188	410806
750412	260488	781484	740382	530806	540614	781180	270414	420990	90310
270412	420582	540518	420884	230202	260218	421390	410914	420982	730212
430908	540986	541386	260486	530906	540982	541018	230204	181184	
730112	620806	181484	60110	431014	61018	100484	430912	181084	

781284	620414	740188	780190	430702	260490	661314	690108	20382	
装载的集装箱									
730312	411002	620208	780380	431404	541282	430512	210108	411010	60218
300802	621006	620810	780982	70106	740492	290606	630308	431110	660488
660618	620402	541392	61084	411408	180588	410910	550806	90114	660484
700482	541490	541188	700318	530914	700418	210204	551310	411102	660992
90212	540590	541186	661086	690410	60416	210402	410808	110204	421316
531412	260290	661014	700216	431408	60888	730310	430504	270104	781382
420692	780784	660710	220304	690212	780582	530808	531406	250112	700382
660288	781184	621018	260118	250314	660182	531106	550910	310602	620390
661486	60186	620210	541586	630306	421092	411304	411210	550912	60484
610906	780790	220116	220284	530904	60418	690214	530704	710410	220114
551006	300816	100384	421090	210106	660486	430704	90308	530710	60682
530910	60112	100382	661416	630904	300618	110112	710312	250406	780688
551212	620316	620408	541484	431112	421118	110412	410510	690414	540882
90406	660892	620214	700388	270310	220288	610302	431102	411410	60216
90206	420890	660914	421384	250302	100388	230106	270206	230110	420986
780180	780590	661288	660516	430706	781288	530806	531008	250202	61284
781090	180288	660588	661682	431108	541318	230202	751314	531306	180482
430710	660118	540584	60884	730514	620416	530906	431012	430808	421314
710314	740416	20984	700118	551114	220282	431014	530712	210110	20384
410714	750412	620314	220384	431312	620486	430702	411404	411110	60188
740418	270412	541090	540886	210102	420816	610310	70412	531204	541314
780488	430908	540784	620282	270106	660490	530908	551012	430902	781488
661186	730112	660808	421684	531002	700488	411310	620808	710214	660518
430806	781284	660912	620116	531304	660786	90306	180582	411202	61286
90414	90204	61288	541416	430712	420992	270208	620412	551410	20584
20788	780990	60414	700490	690408	781584	531310	620714	430904	740386
420790	661188	180586	780588	431214	421586	110210	620812	410912	420892
100316	180686	181382	780886	411108	260288	430814	540984	530912	780786
730314	620712	300818	661284	551010	660384	531014	60116	530812	60618
70386	661012	20988	660292	110406	781188	431412	540694	230206	660586
730110	300804	540606	660290	690310	780880	551406	660814	690112	540816
730410	541388	20986	541286	431210	700282	531210	660714	531212	740192
650908	540502	620910	620290	230104	220290	90408	541194	110308	20784
740114	181186	541190	700288	230108	421284	430604	661590	430510	20782
740318	661310	540602	700188	430608	421086	90208	540994	781088	541086
780282	540692	660890	420688	410610	780390	70614	540790	100282	620386
780486	541488	260216	540616	250410	661592	531010	661692	780290	740292
740316	300806	180986	541382	11082	660782	90104	660788	540516	700416
780480	661312	541294	740184	410608	180984	110206	661290	700292	541482
101384	620818	661588	700486	550710	661182	531308	540614	780188	780490

集装箱码头多船岸桥协同调度方法研究

780286	621004	181482	421318	110312	421292	90110	260218	700384	661492
780284	620410	60486	220302	750514	620190	550714	540982	661392	220188
660318	660708	180982	780980	411104	620484	430508	61018	420918	421582
541084	300810	260488	260214	310610	660684	11084	260490	781290	750112
630304	270114	420582	260418	250408	60108	411114	540794	661184	410904
431206	110310	540986	221690	530706	781386	270406	661114	781482	551008
530702	90410	620806	181386	431310	541684	270410	541694	20586	690308
550906	270312	620414	421192	411214	61282	270404	661488	700484	431004
661686	250114	620112	421286	210206	660916	430514	421588	661018	270112
750212	430804	661110	660286	430614	541118	531006	60818	740190	531202
730414	110106	660810	220488	270204	540918	110104	620708	421584	431410
651008	290602	541088	420618	411312	660616	410502	540586	421216	310606
730510	551002	620318	420786	430610	700218	250402	540508	60184	250110
750312	110212	740186	780680	410612	420984	551306	660712	660818	431308
740214	291204	781486	220484	411412	780382	90112	621010	781384	410814
780484	410708	421088	181486	540682	180584	690114	621014	781182	620406
270402	70206	660592	660984	421182	660386	431006	540604	780386	660690
690208	270302	180286	780890	421386	740516	90214	540690	221386	620814
431212	551412	660192	420682	541316	421018	290612	540888	740486	661116
221388	531108	260416	100118	740484	421682	710210	60114	780580	530802
421590	690110	661382	620182	421382	220212	690210	620704	781086	530814
60684	90312	260318	781080	620286	420916	410606	620192	260316	70410
690412	530714	421282	541216	740490	661092	551112	300812	180382	531410
410804	421690	780788	541686	220482	620188	250204	620804	781180	431204
410902	781390	421688	420988	780986	431406	551004	661090	421390	290610
410504	60482	780586	660682	661084	411306	710114	180284	541018	531104
531114	661292	421392	421288	661482	411206	410614	180782	100484	531102
710212	420516	661586	781484	181188	551106	550914	620114	661314	250312
411106	421414	740482	540518	781690	431002	110114	181182	180484	550902
110306	781084	620384	541386	420886	210202	310604	540612	661584	410604
710112	420684	660284	181484	421188	610904	431306	621016	541384	110414
60886	780388	781684	740188	661282	410512	430914	660582	661082	410702
180882	181286	421186	780988	660184	250104	411008	540992	220416	410812
180386	660986	540818	661318	700190	710110	110208	620908	540884	710414
781480	420792	700392	740390	700182	411006	90412	620104	420588	430802
60282	220186	260212	420690	741316	270110	551404	540610	661218	630906
60616	421082	740290	260388	660882	610308	250206	421692	781190	210104
180886	620716	781688	420718	541582	531206	550704	661412	700390	410802
620118	540608	220390	421184	661386	110314	230402	60686	60182	690314
661216	540514	660492	620284	620418	430714	530804	180486	661316	410508
100284	420584	660784	420788	61082	411204	411012	300814	421484	250304
110108	541094	780780	421388	780782	610304	531214	260188	220486	530810

410810	100286	541414	620492	20786	551408	610312	100186	20388	270202
250308	61086	220310	220216	781082	90314	730512	620108	781186	551208
410602	100190	740182	740284	100184	550702	410712	540890	660190	551110
550708	620212	541584	180384	420590	90106	550908	60816	260286	731314
660482	540582	781380	700192	540686	110110	110410	181086	421486	430612
780482	660812	700186	780384	100182	530902	410710	541692	180282	270414
660716	541588	780888	741318	660692	531110	411014	541292	661418	410914
660388	620710	620490	661384	660718	531312	430708	540506	220182	230204
620382	620202	221390	421490	421488	710310	210208	541192	420782	430912
410908	541592	660884	660816	740382	431104	531208	220118	700184	690108
431010	541390	420518	620482	420884	551304	431202	260390	541082	531004
431008	660590	780984	421084	260486	630302	550706	90108	541016	431114
90886	60212	620288	661582	60110	550812	430812	730210	660282	750512
551206	540592	660392	620388	780190	411212	551312	290604	740286	
310612	620292	421482	410514	420784	430502	270304	430602	220214	
411406	60214	540716	430910	421418	411112	431304	550814	180988	
311202	661688	540618	270108	660188	250306	250310	430810	540684	
551308	60210	661684	290608	740384	630312	250106	410704	60286	

注：0260510 表示船舶 26 贝 05 列 10 层集装箱位置。



## 在学研究成果

### 一、 在学期间取得的科研成果

1. 教育部规划基金项目（10YJA790277）；宁波市自然科学基金项目（2013A610285）

### 二、 在学期间所获的奖励

2012 年 12 月获宁波大学第五届“挑战杯”大学生学术科技作品竞赛三等奖。

2013 年 12 月获第十届“华为杯”全国研究生数学建模竞赛国家二等奖

### 三、 在学期间发表的论文

李建辉,胡燕海. 基于单亲遗传算法的集装箱码头岸桥作业调度[J]. 宁波大学学报(理工版), 2015, 01: 113-117.

李建辉,胡燕海,周超. 多船岸桥协同调度研究[J]. 科技与管理, 2014, 06: 57-60.

## 致 谢

回顾三年的硕士研究生生活，从一开始的接触，到了解并进入集装箱码头作业调度问题的研究领域，在本课题研究的整个过程中，我受益良多，在此我要深深地感谢以下对我有过支持和帮助的人：

论文能够顺利完成，首先我要感谢我的导师胡燕海老师，从选题、发表论文、初稿到论文即将完成的这两年多时间中，给予了莫大的支持与帮助。在我课题研究出现困境时，胡老师总能提出许多宝贵意见，在他的指导下，让我的论文研究道路越来越明朗。不仅在科研上，在校期间我遇到的学习、生活、以及工作的问题，胡老师都会细心帮助我，给我提出建设性意见。

其次，我要感谢我们课题组的师姐、师兄及师弟们，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。同时非常感谢宁波港股份有限公司北仑第二集装箱码头分公司的赵旭主管的大力帮助，在提供实际数据的同时，也不厌其烦的为我讲解分析原始数据含义。

再次，我要感谢两年多时间来，我们海运 2012 级研究生班级的每位同学，你们是我好的伙伴，无论学习还是生活上都给我提供了很多帮助，互相探讨，共同进步，共同发展。

最后，我要感谢我的家人，让我有一个安静学习的机会，能顺利完成硕士研究生阶段的科研任务，离不开他们的经济与精神上的支持。