

分 类 号\_\_\_\_\_

密 级\_\_\_\_\_

U D C\_\_\_\_\_

单位代码 10151\_\_\_\_\_

大 连 海 事 大 学  
硕士学位论文

集装箱码头场桥调度优化模型与算法研究

周文杰

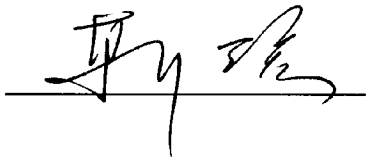
指 导 教 师 计明军 职称 教授

学位授予单位 大连海事大学

申请学位级别 工学硕士 学科（专业） 物流工程与管理

论文完成日期 2014 年 09 月 答辩日期 2015 年 01 月

答辩委员会主席





**Study on Optimization Model and Algorithm of Yard  
Cranes Scheduling in a Container Terminal**

**A thesis Submitted to**

**Dalian Maritime University**

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

**Master of Engineering**

**by**

**Zhou Wenjie**

**(Logistics Engineering and Management)**

**Thesis Supervisor: Professor Ji Mingjun**

**September 2014**

# 大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

## 原创性声明

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

学位论文作者签名：周文杰

## 学位论文版权使用授权书

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

本学位论文属于： 保 密 ☐ 在\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

不保密 ☒ （请在以上方框内打“√”）

论文作者签名：周文杰 导师签名：张明

日期：2015 年 1 月 4 日

## 摘 要

集装箱运输作为一种先进的运输组织形式，在国内外被广泛采用。集装箱码头，是集装箱运输的一个关键节点。随着集装箱运输量的增加，集装箱码头作业所承受的压力增大。资源配备、信息技术及经营管理方式等都是影响集装箱码头作业水平的重要因素。在码头已有的资源配置下，如何提高资源的作业效率，是亟待解决的问题。本文即在此环境下，对集装箱码头内场桥的调度进行优化研究，旨在通过优化场桥的移动路径，缩短其作业时间，达到资源的有效利用。

本文以集装箱码头内场桥为研究对象，运用运筹学中线性规划、动态规划等优化理论与方法，研究场桥调度的优化问题。建立了两阶段规划的数学模型，第一阶段建立线性约束的混合整数规划模型，确定子任务内场桥需要进行作业的贝位号和在对应贝位上的取箱数量；第二阶段将研究问题分单场桥和多场桥两种情况进行解决，以总移动距离最小为目标，确定场桥在进行任务时作业贝位号的顺序，结合第一阶段求得的取箱数量，最终获得每台场桥进行任务时作业的贝位号序列和对应贝位上的取箱数量。本文设计了线性规划和动态规划相结合的算法，第一阶段首先对研究问题进行线性化和连续化，运用单纯形法求得使所有场桥在完成总任务时需要进行作业的贝位数量最少的集合和在对应贝位上的取箱数量；第二阶段采用动态规划的方法，考虑场桥在作业每个子任务及之后的五个子任务，选择场桥移动距离最小的贝位号进行作业，确定场桥在完成所有任务时作业的贝位号序列。另外，将本文采用的模型与混合整数规划模型进行了对比分析，也对比分析了本文算法与模拟退火算法、遗传算法和随机搜索式算法等算法的特点，通过算例验证表明本文数学模型的合理性和算法的高效性，能够有效的提高码头场桥的作业效率，减少作业时间，提高码头装卸资源的工作效率。

**关键词：**码头场桥；路径优化；两阶段法；线性规划；动态规划

## ABSTRACT

Container transportation, as an advanced transportation model, has been widely used both at home and in abroad. Container terminal yard, as a key node for container transportation, with the continuous development of container shipping, is facing with the increasing pressure. Port resources, information technology, the management mode, and other factors can affect the level of the operation of container terminal. With the container terminal yard existing scale and allocation of resources, how to improve the operational efficiency of the whole terminal is an extremely important problem. This paper studies the routing optimization problem of yard cranes, expect to improve the efficiency of yard cranes and shorten it's operation time, to achieve the Container terminal's effective resource usage.

In this paper, by the linear programming, the dynamic programming and some other optimization theory and method in operational research, we study the optimization of yard cranes' routes. We establish a two-stage programming model, the first stage is to determine the bay number and the quantity of suitcase on each bay to fulfill the whole task, and we divide the second stage into a single and more than one yard cranes types, it's objective is to minimum the total moving distance, to determine the bay number sequence for yard cranes to work, then combined with the size of suitcase which was determined in the first stage, we get the bay number sequence and quantity of suitcase on the corresponding bay to finish all the task of each yard crane. To solve this mathematic model we design a algorithm combined the linear programming with the dynamic programming, first we make the problem being linear and continuous for the first stage, then we use the simplex method to get the least quantity of bay which yard cranes need to work, for the second stage, we adopt the dynamic programming method to select a bay for the yard crane to work with the minimum distance, finally we can get the bay number sequence for each yard crane to work, and we compromise our two stage model with the mixed integer programming model, also we make a comparison analysis with our two phrase algorithm, the simulated annealing algorithm, the genetic

algorithm and the greed stochastic search algorithm, by multiple examples we validate the effectiveness of our model and algorithm, which can show the rationality of the mathematical model, the high efficiency of the algorithm. Then the working efficiency of container terminal can be effective improved and the operation time can be reduced.

**Key Words: Yard Crane; Routing Optimization; two-stage approach; Linear Programming; Dynamic Programming**

## 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....             | 1  |
| 1.1 论文背景及意义 .....          | 1  |
| 1.2 研究现状 .....             | 1  |
| 1.3 研究内容及方法路线 .....        | 5  |
| 第 2 章 集装箱码头场桥操作管理 .....    | 7  |
| 2.1 集装箱码头的装卸工艺 .....       | 7  |
| 2.2 集装箱堆场的堆存策略 .....       | 7  |
| 2.3 场桥的作业控制 .....          | 8  |
| 2.4 影响场桥作业计划的因素 .....      | 10 |
| 第 3 章 集装箱码头场桥调度优化问题 .....  | 12 |
| 3.1 集装箱码头场桥的作业流程 .....     | 12 |
| 3.2 集装箱码头场桥调度优化问题的描述 ..... | 13 |
| 3.3 场桥的路径优化模型 .....        | 14 |
| 3.3.1 模型假设 .....           | 14 |
| 3.3.2 符号表示 .....           | 14 |
| 3.3.3 模型建立 .....           | 15 |
| 3.4 与混合整数规划模型对比分析 .....    | 18 |
| 3.5 本章小结 .....             | 21 |
| 第 4 章 算法设计及对比分析 .....      | 22 |
| 4.1 算法介绍 .....             | 22 |
| 4.1.1 概述 .....             | 22 |
| 4.1.2 有约束的最小化问题 .....      | 22 |
| 4.2 集装箱码头场桥调度的算法设计 .....   | 23 |
| 4.2.1 第一阶段的求解思路 .....      | 23 |
| 4.2.2 第二阶段的求解思路 .....      | 26 |
| 4.3 算法对比分析 .....           | 29 |
| 4.3.1 与模拟退火算法对比分析 .....    | 29 |
| 4.3.2 与遗传算法对比分析 .....      | 30 |
| 4.3.3 与随机搜索算法对比分析 .....    | 31 |
| 第 5 章 算例分析 .....           | 32 |
| 5.1 算例求解 .....             | 32 |
| 5.2 比较分析 .....             | 35 |

|              |    |
|--------------|----|
| 5.3 小结 ..... | 38 |
| 结论与展望 .....  | 39 |
| 参考文献 .....   | 41 |
| 附录 算例 .....  | 45 |
| 致 谢 .....    | 49 |
| 作者简介 .....   | 50 |



## 第1章 绪论

### 1.1 论文背景及意义

随着经济的飞速发展，集装箱运输业在运输领域展现着强劲的发展劲头和优势。集装箱码头，作为专门停靠集装箱船舶，进行装卸集装箱作业的港口场所，是集装箱多式联运的交通枢纽，作为水路与陆路运输的连接点，在货运物流网络中起关键节点作用，成为集装箱运输作业面临的首要发展对象。现阶段，我国集装箱码头发展的特点有码头集装箱化率急于增长、码头集装箱吞吐量飞速增加、国际集装箱枢纽港产生雏形、集装箱码头经营主体和投资建设多元化、集装箱码头软环境和硬环境进一步完善等。

自 21 世纪以来，我国集装箱码头面临着严峻的挑战和难得的机遇，应该正确对待集装箱码头的意义和地位，抓住历史机遇，加快我国的集装箱码头运输行业发展，提高集装箱码头的运营效率和作业水平，这就要求必须提高码头现有机械设备的利用率，优化资源配置。集装箱码头的主要机械设备有岸桥、集卡和场桥等，岸桥的作业效率直接影响码头装卸船的效率，集卡是负责中间运输的工具，而场桥的作业效率对集卡及岸桥都会产生影响，场桥作业效率低，必然会导致集卡等待，使集装箱运输延误，导致岸桥等待时间过长、闲置率高和使用率低，从而影响整个码头的作业效率，增加运营成本。因此，提高场桥的作业效率迫在眉睫，要提高场桥的效率，必须缩短其运行距离、减少其作业时间和提高其使用率。本文即是在此环境下，研究集装箱码头内场桥调度的优化问题，建立数学模型并用计算机语言验证其可行性和实用性，以希望能够提高场桥、集装箱码头的运作效率。

### 1.2 研究现状

本文研究的是集装箱码头场桥调度的优化模型与算法，首先需要解决的是如何建立码头场桥的调度模型，然后需要根据模型设计相应的算法进行优化分析。近年来，国内外许多学者在这方面已经做了些研究。

在集装箱码头资源配置的优化方面, L.M.Gambardell 等<sup>[1]</sup>对整体码头的装卸资源进行了研究, 研究了集装箱码头岸桥和堆场起重机等机械资源的配置问题, 还对装卸机械在每个时间段内的进度安排问题进行了分析, 并用网络流法对研究内容进行模拟仿真。Cheng 等<sup>[2]</sup>研究了集装箱码头空间资源配置的优化问题, 运用四种不同的优化算法进行对比和分析, 认为在解决该问题时混合求解方法具有优越性。Bish<sup>[3]</sup>研究了集装箱码头堆场空间资源利用的问题, 考虑了码头场桥的作业优化问题, 也考虑了场桥对应集卡的优化分配, 将集疏运子系统和泊位子系统看做整体进行优化作业, 使其协调运作。Kim 等<sup>[4-7]</sup>不仅研究了集装箱码头堆场空间资源利用率的问题, 还研究了装船作业效率的问题, 建立了混合整数规划模型, 采用近视算法和次梯度算法分别对堆场空间资源利用率问题和装船效率问题进行求解计算, 并对比分析了结果。Kozan<sup>[8]</sup>等研究了堆场中集装箱的堆存策略问题, 建立了以船舶在港时间最短为目标的混合整数规划模型, 运用遗传算法进行求解, 得到按随机顺序、先到先服务和后到后服务的作业顺序原则下集装箱堆存的最优策略。Richard<sup>[9]</sup>针对多个工班研究了集装箱码头场桥的配置问题, 建立了两阶段模型。第一阶段考虑到优化分配堆场内各个装卸机械的作业任务, 将集装箱按类型分配到堆场内各箱区。第二阶段为了使作业过程中翻箱率达到最低, 将集装箱的分配位置进行了具体化。Mosca<sup>[10]</sup>等对集装箱码头以及堆场的空间资源配置管理问题进行了优化研究。Peterkofsky 等<sup>[11]</sup>将桥吊优化为开放的生产作业计划问题, 建立整数规划模型并用分支定界法求解。Dagno 等<sup>[12]</sup>研究了堆存方式对集装箱码头堆场的空间资源利用率的影响, 以进口箱的堆存方式为例, 分析了按集装箱的大小分类堆存的原则, 并根据船舶到达港口的时间先后顺序, 采用先到先服务的堆存方式来提高空间资源的利用率。蔡芸<sup>[13]</sup>建立了总体船舶在港时间的最小化仿真模型, 采用遗传算法产生和评估了泊位分配方案, 得到满足靠泊约束和岸桥调度策略的可行解, 最终求得包括船舶的靠港时间、靠泊位置和为其服务的岸桥数目等资源的优化解。

在路径优化方面, Chung<sup>[14]</sup>为了提高集装箱码头场桥的作业效率, 减少场桥的移动距离, 最早对场桥路径选择的优化问题进行了研究。Kim 等<sup>[15,16]</sup>对集装箱码头仅有单台场桥的情况进行了路径优化研究, 建立了整数规划模型, 目标是场桥

完成整体任务的总作业时间最短。此外, Kim 等<sup>[17,18]</sup>还利用混合整数规划模型, 考虑场桥运作的约束条件, 采用分支定界法、贪婪随机适应搜索法进行求解。W.C.Ng 等<sup>[19,20]</sup>也利用分支定界法, 对以场桥的等待时间最小为目标函数的优化模型进行了求解计算。Zhang 等<sup>[21]</sup>研究了场桥的路线优化问题, 假设在已知每天每个时间段集装箱提取数量的条件下, 用拉格朗日松弛法对以完成总任务所需要的时间最短为目标函数的优化模型进行求解计算。Bishop E.K.等<sup>[22-24]</sup>研究了集装箱堆场内集卡的分配问题和路线优化问题, 考虑了交通控制和网络优化, 建立整数规划模型, 采用启发式算法求解计算。Bose 等<sup>[25]</sup>研究了集装箱码头岸桥的作业情况, 在给定集装箱装卸序列的前提下, 对岸桥配备的跨越车的作业顺序进行确定, 建立了仿真模型, 目标是使岸桥等待时间最短。Narasimhan<sup>[26]</sup>研究了路径结构特征的问题, 建立整数规划模型, 采用分支定界算法和启发式算法求解计算。Vis 等<sup>[27]</sup>研究了水平运输机械, 在一定任务要求的条件下, 利用网络优化模型来确定自动导航车辆的最小数量。韩晓龙<sup>[28]</sup>研究了龙门吊的路径优化问题, 建立了混合整数规划模型, 目标函数是龙门吊行走时间最短, 用 lingo8.0 对优化模型进行求解分析, 通过对优化前后结果的对比分析, 证明模型的有效性。刘艳等<sup>[29]</sup>研究了进口箱的箱位分配问题, 由于港口交货时间和货主提货时间的不确定因素, 在对集装箱进行箱位分配时, 提出要尽量平衡各箱区的作业量, 并以集卡的运输距离最短为目标进行优化。

在动态规划和组合优化方面, 陈璐等<sup>[30]</sup>研究了集装箱码头装卸作业的调度控制问题, 建立了一个基于柔性化 flow shop 的集成化控制模型, 设计了两类给予优先级规则的启发式跳读算法。Steenken D 等<sup>[31,32]</sup>研究了车辆分配路线选择的问题, 利用网络优化模型, 通过组合运输任务最小化空驶距离。王丽颖<sup>[33]</sup>根据动态规划理论基础, 研究铺设管道的最短路径问题, 运用逆序递推和顺序递推的方法, 采用 lingo 软件求解。吕显强等<sup>[34]</sup>运用整数规划模型对码头内车辆调度进行了初步研究。孙晓燕<sup>[35]</sup>研究了运输问题的最短路径问题, 利用动态规划的思想将整个运输过程划分为几个阶段, 分别对每个阶段求取对应的最优方案策略, 最后求得整个运输过程的最短路径。吕聪颖等<sup>[36]</sup>以 0-1 背包问题的子问题重叠性质和最优子结构性为依据, 提出了基于动态规划法的方案策略。郑怡等<sup>[37]</sup>采用 Matlab 对动态规划

问题中资源配置的问题进行求解计算。费蓉等<sup>[38]</sup>研究了中国邮递员的问题,以动态规划算法为基础,提出新的搜索算法,通过对中国邮递员问题的分析求解提出了弧点转换算法,建立适用于决策的中国邮递员问题模型,并提出多阶段的决策过程模型的转换算法。马立肖等<sup>[39]</sup>分析了遗传算法在组合优化问题中的应用,通过旅行商问题进行实例说明,验证了算法的有效性。余雷<sup>[40]</sup>研究了堆场作业计划问题以及组合优化技术,对资源与作业之间、作业与作业之间的关系进行分析,建立数学模型,采用 CPLEX 搜索引擎求解模型。韩骏等<sup>[41]</sup>研究了船舶在港停留时间的问题,提出了以船舶在港时间最小化为目标的泊位与岸桥协调调度优化算法,对岸桥分配和泊位调度这两个相互关联的问题进行系统分析,采用免疫遗传算法对所建的模型进行计算。

在场桥的调度方面, Richard 等<sup>[42]</sup>对场桥的动态布局问题进行了研究,建立了数学模型,采用启发式算法进行求解计算。Bake<sup>[43]</sup>研究了跨运车的作业对堆场装卸机械运作效率的影响问题。Bae<sup>[44]</sup>对船舶的延误时间和 AGV 车辆消耗时间进行了研究,利用整数规划和启发式算法对托运集装箱进行车辆分配。Lai 和 Lam<sup>[45]</sup>运用模拟仿真的方法比较了不同配置策略下龙门吊的使用率、作业量和等待时间等问题。Kap 等<sup>[46]</sup>运用混合整数规划模型,考虑龙门吊操作的不同限制条件,采用分支定界法进行求解计算。魏众、申金升等<sup>[47]</sup>对轮胎吊的优化调度进行了研究,提出混合整数规划理论,研究了在定量作业条件下的龙门吊优化调度问题,并用实际案例进行分析为码头管理提供决策支持。杨鹏等<sup>[48]</sup>对场桥的协同调度问题进行了研究,分析和利用了集中式决策和多 agent 建模方法,建立了集装箱码头多场桥调度问题的数学模型,以完成总体任务所有场桥中用时最长的场桥所用的工作时间最小为目标函数,利用蚁群算法对优化模型进行了求解。严伟等<sup>[49]</sup>基于最佳优先搜索算法研究了场桥调度的优化策略问题,以场桥的调度问题和堆场的空间分配为整体进行分析,基于启发式算法和整数规划模型提出了场桥调度的混合策略方案,运用最佳优先搜索算法对优化模型进行计算。李斌等<sup>[50]</sup>面向哈佛体系结构研究了场桥的作业调度问题,引入计算机操作系统中仿真的优化思想和磁盘臂的调度算法,利用 Agent 进行建模和仿真,通过分析计算得到高效鲁棒的调度配置和场桥生产的决策方案。何良军等<sup>[51]</sup>研究了场桥的调度问题,建立了整数规划

模型，采用爬山算法的启发式算法进行计算，得出了关于场桥调度问题的混合优化策略，并以某集装箱码头为案例进行系统仿真分析。陈欢等<sup>[52]</sup>基于 AnyLogic 离散事件研究了场桥的调度问题，分析了离散事件的系统仿真方法，运用 AnyLogic 软件进行数学建模和优化仿真，得到了一组优化的场桥调度方案。

通过分析以上研究现状可以发现，目前我国对集装箱码头场桥的调度问题研究甚少。集装箱码头资源配置的优化、路径优化和场桥调度等关于集装箱码头和场桥各个方面的研究，对场桥调度的优化有很大意义。

### 1.3 研究内容及方法路线

本文的研究内容是集装箱码头内场桥调度的优化，是针对集装箱码头作业效率的优化问题提出的，场桥作业效率制约着岸桥作业效率，而岸桥的作业效率直接影响着装卸船作业的效率，决定着整个码头的效率，因而场桥作业效率的提高是提高码头运营效益的关键。另外，提高场桥的作业效率与集装箱堆场效益的提高有直接关系，堆场是集装箱码头的一个重要组成部分。因此，本文对集装箱码头场桥调度的优化研究将会对集装箱码头的运营产生重要的影响。

本文的具体研究框架如图 1.1 所示。首先，本文介绍了集装箱码头的发展现状和集装箱码头场桥的操作管理，分析了影响场桥作业的因素，然后提出如何优化场桥的移动路径以达到提高场桥作业效率的效果，使其对堆场和码头的作业效率产生积极的影响。对集装箱码头场桥的路径优化问题引入了线性约束的混合整数规划模型，建立了两阶段规划的数学模型，更简单明确的将制约集装箱码头场桥作业的条件表达出来，在建立模型之前，对相应的优化问题做出了一定的假设和简化。第一阶段建立的模型以整个作业任务完成时场桥所需要作业的贝位数量最少为目标，第二阶段建立的模型以码头装卸船任务完成时场桥的总移动距离最短为目标，模型的约束条件包括集装箱码头岸桥的作业顺序要求、堆场内集装箱种类与数量和任务要求的集装箱种类和数量等。本文设计了线性规划和动态规划相结合的算法，第一阶段首先对研究问题进行线性化和连续化，采用单纯形法调用 Matlab 库函数，求得使所有场桥在完成总任务时需要作业的贝位数量最少的集合和在对应贝位上的取箱数量，第二阶段采用动态规划的方法，考虑场桥在作业每个子任务及之后的五个子任务，选择使场桥移动距离最小的贝位号进行作业，确

定场桥在完成作业任务时进行作业的贝位号序列，并将本文采用的算法与模拟退火算法、遗传算法和随机搜索式算法等进行了比较分析，通过算例验证本文模型与算法的高效性。

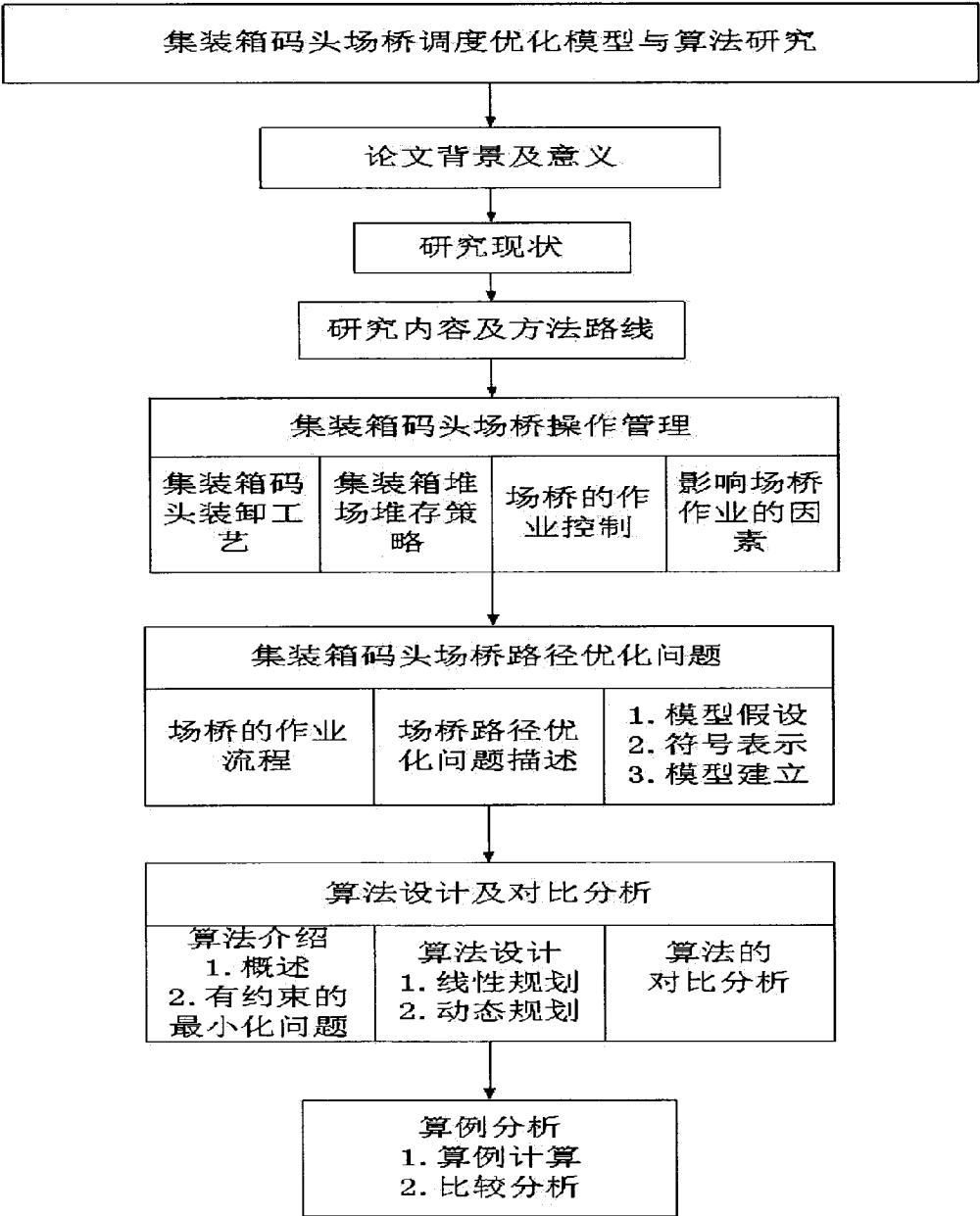


图 1.1 论文研究框架图

Fig.1.1 the research frame of this paper

## 第 2 章 集装箱码头场桥操作管理

### 2.1 集装箱码头的装卸工艺

集装箱码头的主要作业对象是集装箱，集装箱码头内堆场的作业机械和作业方式不同会导致集装箱码头的装卸工艺不同。岸壁式海港集装箱码头的装卸工艺主要分轮胎吊装卸工艺、轨道吊装卸工艺、自动化装卸工艺、跨运车装卸工艺、底盘车装卸工艺和混合型的装卸工艺等。本文研究的是码头场桥也就是龙门吊的调度优化问题，故在此着重介绍轮胎式龙门吊起重机作业系统和轨道式龙门吊起重机作业系统。

集装箱码头最常采用的作业系统是轮胎式龙门吊起重机作业系统，而在新建的码头中，轨道式龙门吊起重机作业系统作为一种新型的绿色节能环保的工艺系统比较受欢迎。岸边集装箱装卸桥即岸桥是轮胎吊和轨道吊这两种工艺系统的码头前沿进行船舶装卸作业所采用的装卸机械，集装箱码头的具体作业流程如图 2.1 所示。

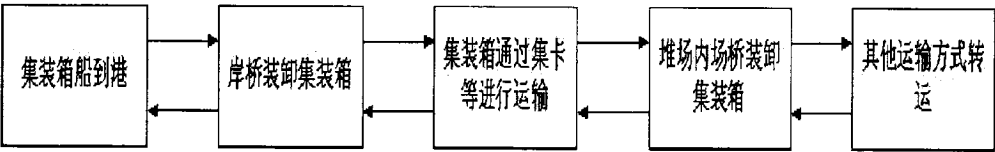


图 2.1 集装箱码头物流作业流程图

Fig.2.1 the operation process of Container terminal logistics

### 2.2 集装箱堆场的堆存策略

#### 2.2.1 堆场箱区的划分

集装箱码头在布局计划时，按照集装箱的不同功能和操作的特殊要求对堆场进行功能分类和定位，根据不同的分类方法，集装箱码头堆场可以分成不同的箱区；集装箱码头堆场根据码头集装箱货物的进出口方向，可以分成进口箱区、出口箱区和中转箱区；根据码头集装箱货物的种类，可以分成普通箱区、冷藏箱区、特种箱区、危险品箱区和非标准集装箱箱区等；按照集装箱空、重箱区别，可以分成空箱区和重箱区。

集装箱码头堆场内箱区的总体布局和规格的基本要求<sup>[53]</sup>为：（1）进、出口箱

分开堆放；(2) 空、重箱分开堆放；(3) 20ft、40ft、45ft 集装箱分开堆放；(4) 依据码头堆场的负载要求对重箱进行堆放；(5) 依据码头的装船任务要求分港和分吨位对出口的重箱进行堆放；(6) 依据集装箱的持箱人、箱型和尺寸的不同将空箱分类堆放，另外必须分开堆存其中的坏箱和污箱；(7) 冷藏箱必须堆存在冷藏箱专区，特种重箱必须堆存在特种重箱专区，危险品箱必须堆存在危险品专用箱区；(8) 进行中转的集装箱必须在海关明确指定的中转箱区进行堆存。

### 2.2.2 堆场箱位的编码方式

为了具体定位集装箱码头堆场内每个集装箱的位置，首先将堆场划分为多个块作为堆场的箱区，然后箱区又被划分为更小的单位包括贝位、列和层。堆场内每个集装箱对应一个具体的编码<sup>[54]</sup>，编码包括了堆场内的箱区号、贝位号、箱列号、箱排号和箱层号。

(1) 箱区。箱区可以用一个英文字母表示或者用一个英文字母加一个阿拉伯数字表示，英文字母表示码头的泊位号，阿拉伯数字表示堆场从海测到陆侧后方堆场的顺序号。

(2) 贝位。一个箱区包含若干个贝位，一个贝位通常用两位的阿拉伯数字表示，贝位数与堆场箱区的长度有关。

(3) 排。一位阿拉伯数字表示。堆箱的层数由场桥的跨度决定，一般为 23.47m，通常箱区的排数为六。

(4) 层。一位阿拉伯数字表示。堆箱的层数由场桥的高度决定，不同类型的场桥系统下，堆箱层数不同，一般为四或五层。

这样，堆场内集装箱位置一般由五或六位表示，例如“A0111”表示该箱区 01 贝位第一排第一层。

## 2.3 场桥的作业控制

场桥的作业控制是在集装箱码头作业控制的基础上进行的，按照集装箱码头的作业任务和作业计划，与堆场集卡、码头堆场内海侧船舶集装箱的装卸作业和陆侧集装箱的装卸作业、码头内部进出口业务及归并和转运等作业的具体要求和实际情况相联系，并与码头内其他装卸机械和基础设施相互协调调度，以保证各



项作业过程顺利进行。由于场桥同时为堆场的内卡和外卡服务，因此场桥的运作很容易成为码头集装箱装卸任务的关键问题和瓶颈，必须在水准和效率的场桥调度作业计划下，有效的调度场桥，才能尽可能的减少内卡、外卡等配置机械的等待时间，减少岸桥等待内卡运输集装箱的时间。因为码头堆场内有多箱区，码头作业任务在各个时段和各个箱区上的作业分配量是随时在变化的，因此场桥的调度也应该随任务的变化灵活的进行变化。所以，优化集装箱码头场桥的调度问题是必要的。

一般地，轨道吊装工艺系统下集装箱装卸机械是轨道式龙门起重机，轮胎吊装工艺系统下是轮胎式龙门起重机，另外还有正面吊、跨运车和叉车等集装箱堆场装卸机械。集装箱的搬运、堆码、存取和装卸作业都可以通过上述机械设施实现，轮胎式龙门起重机是我国目前多数集装箱码头堆场中所采用的。现有的场桥包括轮胎式起重机和轨道式起重机，其在集装箱堆场中的作业调度过程如图 2.2 所示。

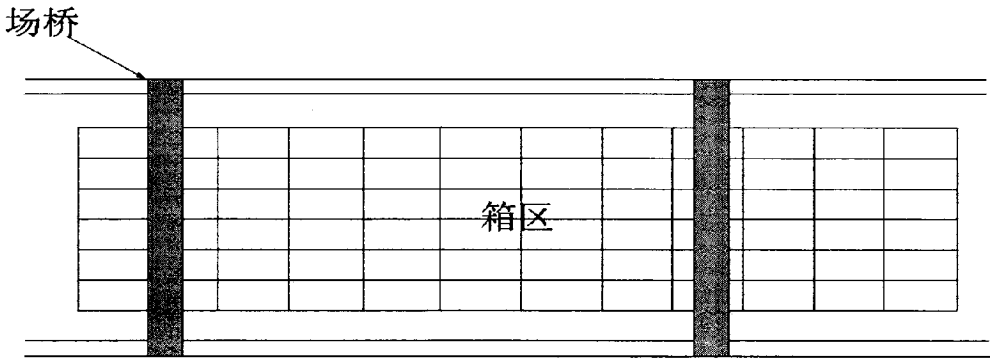


图 2.2 场桥的作业调度过程示意图

Fig.2.2 the scheduling process of the yard crane

轮胎式龙门起重机<sup>[55]</sup>是集装箱码头堆场内专门对集装箱进行装卸、堆垛和搬运作业的一种机械设施，俗称轮胎吊，基本构造包括门框和门架，其中门框有前后两片，门架由底梁组成，整体是支撑在橡胶轮胎上的。轮胎式龙门起重机的门框横梁上有轨道，可以方便装有集装箱吊具的小车在上面运行，需与底盘车相配合，对集装箱进行装卸、堆垛、搬运和堆码作业。通用性强和机动比较灵活是轮胎吊的基本特点，在集装箱码头堆场内，轮胎吊可以自由地前进和后退，另外还设有转向的功能设施，可以旋转 90 度从一个箱区灵活地移动到另一个箱区进行对

集装箱的作业。

轨道式龙门起重机<sup>[56]</sup>，是在集装箱码头堆场和集装箱中转站堆场内进行装卸、堆码和搬运集装箱的一种机械设施，俗称轨道吊。轨道式龙门起重机节能环保、成本低，一般采用电力驱动，故障率低，是新码头首选的装卸机械。其基本构造是门架，门架是两片悬臂的，下横梁可以连接门架两侧的门腿，行走台上支撑着门架，门架作业必须在轨道上运行。轨道式龙门起重机与轮胎式龙门起重机相比，体积较大、可堆垛层数较多。

轨道式龙门起重机的机械形态决定其必须依靠堆场内铺设的轨道运行，因此轨道吊的作业范围只能局限在所设轨道的某一场地内。但轨道式龙门起重机自身的定位能力较强，与轮胎式龙门起重机相比更容易实现全自动化装卸。两种起重机的工作原理大致相同，如图 2.3 所示。

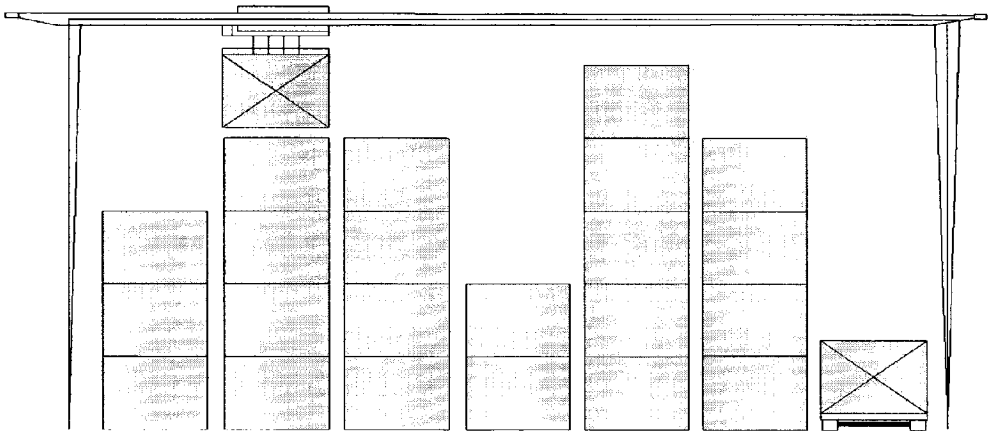


图 2.3 龙门起重机示意图

Fig.2.3 the schematic plot of yard crane

## 2.4 影响场桥作业计划的因素

要提高场桥的工作效率和利用率，合理分配场桥的作业任务和作业计划，首先需要分析好影响场桥作业效率的因素。

(一) 任务量。任务量的多少直接影响场桥的作业量，当码头面临较大的任务量时，需要装卸的集装箱数量较多，配合集装箱码头岸桥的作业，堆场内场桥将会没有闲置，从而会有较高的效率和设备利用率。而当码头作业任务量较小时，需要装卸的集装箱数量也就较少，此时必然会有场桥闲置的情况，导致场桥的工

作效率和机械设备的利用率降低，影响堆场的作业水平，降低码头的整体效益增加码头的运营成本。

（二）机械作业顺序。据调查，先到先服务原则在集装箱码头堆场的机械资源装卸作业中被广泛使用，此原则虽然较为合理但仍会有机械设备工作量分配不均匀使作业效率降低的可能，集装箱码头堆场内装卸机械作业优先级的分配不合理，必然会使场桥利用率降低，甚至出现堆场内运输不畅通、集卡等待等现象，导致岸桥等待，集装箱码头效率降低。

（三）配置数量。为了提高岸桥的利用率，大多数码头会选择增加场桥的配置数量，但在堆场的运作管理中，场桥的利用率就会降低，导致燃油费和劳动力的浪费，甚至出现场桥闲置的状态。若码头为了提高设备的利用率、降低设施建设成本，配备有限数量的场桥时，会导致场桥跨箱区操作，使场桥的作业路径大大增加，场桥的损耗速度加快，使用寿命减短，作业效率降低。显然，场桥的配置数量直接影响其作业水平。合理的资源配置，有效利用现有的装卸设备，对集装箱码头作业效率的提高和运营成本的降低有重要意义。

（四）堆场的堆存策略。集装箱码头堆场的堆存策略，是堆场内各类集装箱的存放布局，堆场堆存策略的不同会直接影响各类型集装箱存储位置的不同，进而影响场桥的运行路径。集装箱运输业的规模化发展，使集装箱码头吞吐量大幅度增长，集装箱船舶越来越大型化，根据进出口箱分类堆存是堆场采取的传统堆存方式，这种方式已经满足不了实际的操作需要，导致场桥运行距离过长，影响堆场的运行效率。因此，在集装箱码头堆场面积有限的情况下，充分利用空间资源，优化堆场的堆存策略，对场桥的作业计划和工作效率有巨大影响。

## 第3章 集装箱码头场桥调度优化问题

### 3.1 集装箱码头场桥的作业流程

#### 一、取箱作业

集装箱码头控制室收到集装箱船的配载图和装船顺序单后，检查各船舱所配对的装卸港，计算出需要装卸的集装箱数量。调度室发出装船通知后，船舶交接人员和工班指导员联系并相互确认，分析获得此次装船任务的目的、所需作业的集装箱顺序和所在的箱区以及其他的一些要求和注意事项等，对相应的装卸机械发出指令，同时通知装船拖头到位。堆场箱控室将控制电脑上显示的装船集装箱箱号及位置发送给场桥司机，司机操控完成任务，对应集卡将集装箱运出堆场。场桥司机作业完毕之后，反馈给控制室，经确认后，控制室再在电脑上输入已经作业完毕装入船舱的集装箱箱号 and 对应场桥操控司机的代码，这样装船任务的取箱作业就完成了。

#### 二、卸箱作业

首先获得卸船任务，根据卸船任务得到卸船的作业计划及场区安排，集装箱码头堆场内的箱控制室按照计划进行布局，控制室和船边的交接员相互联系确定集装箱卸船的作业顺序，控制室向堆场内等待接箱场区配备的场桥操作司机发出通知，准备好卸船接箱工作任务，并且控制室要注意各箱区场桥的合作使其协调作业，箱控制室接收相应的卸船清单后，负责调度的调度员发出卸船作业任务。船边操作人员发出通知要求堆场接箱后，机械设备做好准备。集卡按照交接员的指示将卸下的集装箱载往相应的箱区，司机把箱号报告给箱控室，与控制电脑显示的计划卸箱场区位置相比对，确认后，安排司机进行卸箱操作。卸箱完毕后向箱控室反馈信息，箱控室把相应的箱号、实际进行操作的场区位置、进行作业的司机代码等输入电脑，卸箱作业完毕。

本文所研究的集装箱码头场桥调度优化问题是在取箱作业环节中考虑集装箱堆场内场桥的取箱作业顺序，在满足整体装船任务和岸桥装船计划的前提下，研究场桥在箱区内如何移动、应该从哪个贝位移动到哪个贝位以及在相应贝位上所提取的集装箱数量，使在完成取箱任务时场桥在堆场内移动的总距离最短，所用

的时间最少。对于卸船任务而言，只不过与装船任务方向相反而已，优化过程是一致的。

### 3.2 集装箱码头场桥调度优化问题的描述

本文研究的场桥调度优化问题，是在已知装船顺序和岸桥作业计划的前提下进行的。由堆场箱区内集装箱的堆存策略决定，同一个贝位上只能存放重量、尺寸、目的港等完全一致的集装箱，为了便于优化，本文根据装船顺序，按照集装箱类型将整个装船任务划分为多个子任务，要求每个子任务需求的集装箱为同一种类型。堆场箱区内，每个贝位上仅堆存一类集装箱。同一类集装箱要求集装箱的尺寸、重量、存货种类和目的港等完全一致。由于贝位上存箱数量有限，一个贝位可能无法满足一个子任务的集装箱数量要求，因此一个子任务要求的集装箱类型就会在多个贝位上堆存，而且，可能是多个子任务同时需求相同类型的集装箱，这样就出现了多对多的选择，具体情况见图 3.1。

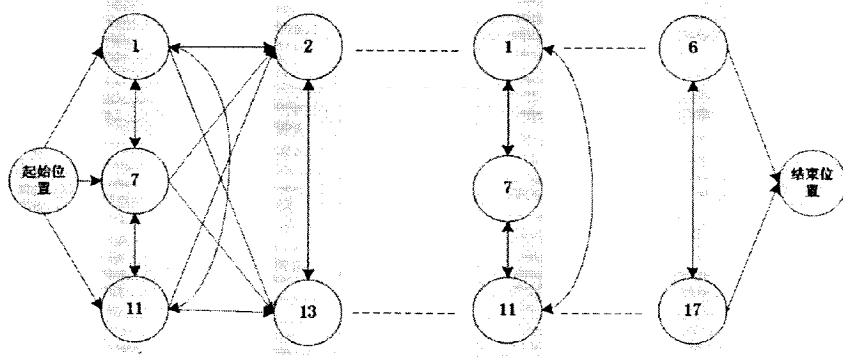


图 3.1 场桥作业路径图

Fig.3.1 the operation road map of yard crane

对于出口集装箱装船操作，需要将集装箱装至船上的目的位置。首先，场桥要移动到所取集装箱堆存的贝位上，将需要提取的集装箱抓起，再把集装箱放到旁边等待的集卡上，然后，通过集卡将提取出的集装箱运送至码头岸边，最后，岸桥将集卡上的集装箱吊起装到船上相应的目的位置，当所有待装船的集装箱全部装入船舱，完成装船任务。集装箱码头场桥的调度，是指在满足岸桥装卸顺序的前提下，确定场桥按照要求依次从一个目标贝位移动到另一个目标贝位的贝位号序列，并确定在对应贝位上需要提取的集装箱数量，直到任务完成。本文研究

的场桥调度优化问题就是确定场桥进行作业的贝位号序列和在对应贝位上需要提取的集装箱数量的问题，目标是使场桥在完成所有任务时总的行走距离最短。

### 3.3 场桥的路径优化模型

#### 3.3.1 模型假设

- 1) 根据船舶的配载图制定岸桥的集装箱装卸计划，将岸桥的装卸计划按照集装箱类型划分成多个子任务，子任务要求按顺序依次完成，也就是该子任务必须在前一个子任务完成以后才能开始进行作业。
- 2) 贝位位于堆场同一箱区内或在同一条直线上，并将贝位依次编号。不同类型的集装箱存放在不同的贝位内，同种类的集装箱可能存放在不同的贝位，一个贝位只能堆放一类集装箱，取箱过程中不存在倒箱问题。
- 3) 集装箱码头堆场内存放的集装箱种类和对应的初始数量与整个装船任务要求的集装箱种类和数量是完全一致的，也就是在完成整个装船任务时集装箱码头堆场内集装箱数量变为零。

#### 3.3.2 符号表示

$i$ : 贝位编号

$j$ : 子任务编号

$T$ : 装船任务被划分的子任务总数

$B$ : 集装箱码头堆场内划分的贝位总数

$t_j$ : 子任务  $j$  要求的集装箱提取量,  $j=1,2,3,\dots,T$ 。

$b_i$ : 贝位  $i$  集装箱的初始堆存量,  $i=1,2,3,\dots,B$ 。

$Q_j$ : 矩阵  $Z_j$  中第  $j$  列中非零项所在行即贝位号的集合,  $i=1,2,3,\dots,B$ ,

$j=1,2,3,\dots,T$ 。

$\alpha_j$ :  $Q_j$  的元素中最大的数值, 即子任务  $j$  需要作业的贝位中贝位号最大的一个,  $j=1,2,3,\dots,T$ 。

$\beta_j$ :  $Q_j$  的元素中最小的数值, 即子任务  $j$  需要作业的贝位中贝位号最小的一个,  $j=1,2,3,\dots,T$ 。

$B_j$ : 由  $\alpha_j$  和  $\beta_j$  组成的元素集合,  $j=1,2,3,\dots,T$

$d_{mn}=|m-n|$ : 贝位  $m$  与贝位  $n$  之间的距离

决策变量:

$x_{ij}$ : 任务  $j$  在贝位  $i$  上取箱数量, 当任务  $j$  不可在贝位  $i$  上取箱时,  $x_{ij}=0$ , 并

且  $x_{i,T+1}=b_i, x_{B+1,j}=t_j$  取正整数。

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1 & x_{ij} \text{ 为正整数} \\ 0 & x_{ij} = 0 \end{cases} \quad i=1,2,3,\dots,B, j=1,2,3,\dots,T$$

$$e_{qj} = \begin{cases} 1 & \text{场桥结束子任务 } j \text{ 的贝位是 } q \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$s_{pj} = \begin{cases} 1 & \text{场桥开始子任务 } j \text{ 的贝位是 } p \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$Y_{mnj} = \begin{cases} 1 & e_{mj}=1 \text{ 且 } s_{n,j+1}=1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

### 3.3.3 模型建立

第一阶段: 确定场桥在每个贝位上取箱数量及每个子任务内作业的贝位号。

目标函数:

$$\min \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^T Z_{ij} \quad i=1,2,3,\dots,B, j=1,2,3,\dots,T \quad (3.1)$$

约束条件:

$$\sum_{j=1}^T x_{ij} = b_i \quad i=1,2,3,\dots,B, j=1,2,3,\dots,T \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^B x_{ij} = t_j \quad i=1,2,3,\dots,B, j=1,2,3,\dots,T \quad (3.3)$$

$$Z_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} = 0 \\ 1 & x_{ij} \text{ 为正整数} \end{cases} \quad i=1,2,3,\dots,B, j=1,2,3,\dots,T \quad (3.4)$$

模型分析:

式(3.1)是目标函数,表示在完成所有子任务时场桥作业过的贝位数量最少,其中肯定存在满足完成所有任务时场桥运行的总距离最短的情况。式(3.2)是关于子任务取箱量的约束,保证每个子任务都被完成。式(3.3)表示所有贝位上集装箱的初始堆存量与所有子任务要求的提取量总和一致。0-1 约束式(3.4)是表示满足约束的解中场桥是否在子任务  $j$  中贝位  $i$  上提取集装箱。

该模型求出的结果是在满足约束条件的情况下,非零数最少、零数值最多的  $x_{ij}$  解集,满足目标函数的解可能不止一个,实际意义是场桥完成整个装船任务所需要作业的贝位数量最少,其中一定存在完成任务时场桥总行走距离最短的情况的解。所以,可以继续求解,建立第二阶段的数学模型,得出在取箱贝位号和数量固定的情况下,场桥行走路径最短的贝位号序列。

性质一:

矩阵  $x_{ij}$  中零元素个数越多则非零元素越少,当零元素个数最多时,所有非零元素所在行的差值之和不大于其他时候所求的和,即当零元素最多时,解中一定存在所有非零元素所在的行按列随机排列后相邻差值之和最小的情况。

第二阶段:确定场桥进行作业的贝位号顺序

通过第一阶段的求解,可以得到取箱矩阵  $x_{ij}$  及其对应的 0-1 矩阵  $Z_{ij}$ ,对于第二阶段场桥作业贝位的顺序而言,只要根据  $Z_{ij}$  矩阵判断子任务  $j$  是否可以在贝位  $i$  作业,然后选择进行作业的顺序即可。

目标函数:

$$\min \sum_{m \in B_j} \sum_{n \in B_{j+1}} \sum_{j=1}^{T-1} Y_{mnj} d_{mn} \quad j=1,2,3,\dots,T \quad (3.5)$$

约束条件:

$$\sum_{j=1}^{T-1} Y_{mnj} = T-1 \quad m \in Q_j, n \in Q_{j+1} \quad (3.6)$$

$$\sum_{p \in B_j} s_{pj} = 1 \quad j=1,2,3,\dots,T \quad (3.7)$$

$$\sum_{q \in B_j} e_{qj} = 1 \quad j=1,2,3,\dots,T \quad (3.8)$$



$$Y_{mj} = \begin{cases} 1 & e_{mj} = 1 \text{ 且 } s_{n,j+1} = 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, \dots, T \quad (3.9)$$

$$d_{mn} = |m - n| \quad m = 1, 2, 3, \dots, B, n = 1, 2, 3, \dots, B \quad (3.10)$$

模型分析：

式(3.5)是目标函数，表示在完成所有子任务时场桥在子任务间移动的距离最小。(3.6)表示每个子任务只能从一个贝位开始从一个贝位结束。式(3.7)表示场桥在进行子任务 $j$ 时从贝位 $p$ 开始作业。式(3.8)表示场桥在进行子任务 $j$ 时从贝位 $p$ 结束作业。式(3.9)为0-1变量，表示场桥在作业子任务 $j$ 时从贝位 $m$ 开始和在贝位 $n$ 结束。式(3.10)表示贝位 $m$ 和 $n$ 间的距离。

根据第一阶段建立的模型可以确定完成整个装船任务时场桥需要进行取箱作业的贝位号和取箱量，即可以确定每个子任务内场桥需要作业的贝位号，场桥作业的移动可以分为子任务内部贝位间的移动和相邻子任务作业贝位间的移动两部分，子任务间的移动是指场桥由子任务要求作业的最后一个贝位到下一子任务最先作业的贝位的移动。显然任务内部，场桥按贝位号大小依次作业时所移动的距离总和最小，即场桥按照该子任务需要作业的贝位号从小到大或者从大到小依次作业时，比随机选择贝位进行作业时移动的总距离短。因此，子任务内部场桥的最小移动距离是可以确定的，要使场桥的整体移动距离最短，要求场桥在子任务间移动距离最短即可，此时要求子任务内场桥进行作业的起始位置和结束位置为需要作业的贝位号中最大的或最小的。第二阶段的目标函数即解决了此问题。

性质二：

$x_i$ 为已知数列，共 $n$ 个元素，现将其中的元素按顺序排列为新数列 $y_i$ ，则有

$$\sum_{i=1}^{n-1} |y_{i+1} - y_i| \leq \sum_{i=1}^{n-1} |x_{i+1} - x_i|$$

对于堆场内存在多台场桥的情况，假设有 $N$ 台场桥，可以将第一阶段求得的每个子任务内必须作业的贝位号集合按顺序等分为 $N$ 部分，再按照子任务顺序依次组成矩阵，分别由这 $N$ 台场桥去作业。即将整个任务矩阵划分为 $N$ 部分，对其中的所有子部分分别运用以上方法进行求解，得到每一子部分的最优解，然后得到整体任务的最优解。

### 3.4 与混合整数规划模型的对比分析

符号表示:

$m$ : 场桥所需作业的子任务总数

$n$ : 堆场内的贝位数量

$l$ : 集装箱类型的数量

$B$ : 由贝位编号组成的集合

$G$ : 由集装箱类型编号组成的集合

$S(h)$ : 由要求提取  $h$  类集装箱的子任务编号所组成的集合

$B(h)$ : 由存放  $h$  类集装箱的贝位编号组成的集合

$c_{hj}$ : 贝位  $j$  存放  $h$  类集装箱的初始数量

$r_t$ : 子任务  $t$  要求提取的集装箱数量

$g_t$ : 子任务  $t$  要求提取的集装箱类型编号

$t$ : 场桥提取顺序单中子任务编号

$y'_{ij}$ : 如果场桥完成第  $t$  个子任务后由贝位  $i$  进入贝位  $j$  则  $y'_{ij} = 1$ ; 否则为 0。

$z'_{ij}$ : 如果场桥在第  $t$  个子任务中由贝位  $i$  进入贝位  $j$ , 则  $z'_{ij} = 1$ ; 否则为 0。

$x'_j$ : 场桥在第  $t$  个子任务中从贝位  $j$  提取的集装箱数量

$T_s$ : 场桥由静止到运作所需要的启动时间

$T_d$ : 场桥移动一个贝位的距离所需要运行的时间

决策变量:

$x'_j \geq 0$  表示场桥在第  $t$  个子任务中从贝位  $j$  提取的集装箱数量。

$y'_{ij} \in \{0, 1\}$  表示如果场桥在完成第  $t$  个子任务后由贝位  $i$  进入贝位  $j$  进行作业, 则等于 1, 否则等于 0, 其中  $i \in B(g_t), j \in B(g_{t+1})$ 。

$z'_{ij} \in \{0,1\}$  表示如果场桥在第  $t$  个子任务中由贝位  $i$  进入贝位  $j$  进行作业,

则等于 1, 否则等于 0, 其中  $i, j \in B(g_t)$ 。

$y_{sj}^0 = 1$  表示场桥首先从贝位  $j$  开始作业。

$y_{jT}^0 = 1$  表示场桥首先从贝位  $j$  结束作业。

目标函数:

$$\begin{aligned} \text{Min } T_s & (\sum_{t=0}^m \sum_{i \in B(g_t), j \in B(g_{t+1})} y'_{ij} + \sum_{t=1}^m \sum_{i, j \in B(g_t)} z'_{ij}) + T_d (\sum_{t=0}^m \sum_{i \in B(g_t), j \in B(g_{t+1})} |i-j| y'_{ij} \\ & + \sum_{t=1}^m \sum_{i, j \in B(g_t)} |i-j| z'_{ij}) = \sum_{t=0}^m \sum_{i \in B(g_t), j \in B(g_{t+1})} (T_s + T_d |i-j|) y'_{ij} \\ & + \sum_{t=1}^m \sum_{i, j \in B(g_t)} (T_s + T_d |i-j|) z'_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{j \in B(g_1)} y_{sj}^0 = 1 \quad (2)$$

$$- \sum_{j \in B(g_m)} y_{jT}^m = -1 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} (\sum_{j \in B(g_{t-1})} y_{ji}^{t-1} + \sum_{k \in B(g_t)} z'_{ki}) - (\sum_{j \in B(g_{t+1})} y'_{ji} + \sum_{k \in B(g_t)} z'_{ik}) = 0 \\ i \in B(g_t), t = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sum_{i, j \in B(g_t)} z'_{ij} \leq |N| - 1 \quad N \subseteq B(g_t), t = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$x'_j \leq M (\sum_{k \in B(g_t)} z'_{kj} + \sum_{i \in B(g_{t-1})} y_{ij}^{t-1}) \quad j \in B(g_t), t = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$\sum_{j \in B(g_t)} x'_j = r_t \quad t = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$\sum_{t \in s(h)} x'_j = c_{hj} \quad h = 1, 2, \dots, l, j \in B(h) \quad (8)$$

$$y'_{ij} \in \{0,1\} \quad i \in B(g_t), j \in B(g_{t+1}), t = 0,1,2,\dots,m \quad (9)$$

$$z'_{ij} \in \{0,1\} \quad i, j \in B(g_t), t = 1,2,\dots,m \quad (10)$$

$$x'_j \geq 0 \quad j \in B(g_t), t = 1,2,\dots,m \quad (11)$$

模型分析:

目标函数(1)场桥总运行时间最短,总运行时间包括子任务内部和子任务间场桥每次移动前需要的启动时间以及子任务内部和子任务间场桥移动时所消耗的时间,也可视为子任务内的运行时间和子任务间的运行时间两部分;约束条件(2)和(3)分别表示场桥从S点开始、到T点结束;式(4)表示中间点的流入量和流出量必须相等,即场桥进入一贝位作业次数和从此贝位移动到另一贝位的次数必须相等;式(5)表示每一子任务中避免回路, $N$ 是集合 $B(g_t)$ 的子集, $|N|$ 表示集合 $N$ 中组成元素的个数;式(6)表示当 $x'_j > 0$ 时,节点 $j$ 一定有流入量,即保证 $x'_j$ 与流入量一致,其中 $M$ 是一个足够大的数;式(7)表示每一子任务中提取的集装箱数量满足工作计划要求;式(8)表示在所有子任务中贝位 $j$ 提取的集装箱总数应等于在贝位 $j$ 上堆存的原始集装箱数量。

模型对比:

在模型假设相同的情况下,本文建立的是两阶段规划的数学模型,第一阶段建立线性约束的混合整数规划模型,确定任务内场桥需要进行作业的贝位号和在对应贝位上的取箱数量;第二阶段将研究问题分单场桥和多场桥两种情况进行求解,建立动态规划模型,以总移动距离最小为目标,确定场桥在进行任务时作业贝位号的顺序,结合第一阶段求得的取箱数量,最终获得每台场桥进行作业任务时作业的贝位号序列和对应贝位上的取箱数量。而Kim所建的混合整数规划模型,采用随机的启发式方法,将所有约束条件罗列出来进行求解计算,他将场桥运行的时间分为启动时间和移动时间两部分,就实际情况而言,每当场桥从一个贝位移动到另一个贝位都需要启动然后移动,所以完全可以将场桥的启动时间和移动时间合并为场桥整体的运行时间。相比较,本文模型简单明确、易求解,采用与传统的启发式求解明显不同的方法,能够较快较准确的求得最优结果。

### 3.5 本章小结

通过本章的研究，对集装箱码头场桥调度的优化问题建立模型，建立了两阶段规划的数学模型，第一阶段建立线性约束的混合整数规划模型，确定任务内场桥需要进行作业的贝位号和在对应贝位上的取箱数量，第二阶段将研究问题分单场桥和多场桥两种情况，建立动态规划模型，以总移动距离最小为目标，确定场桥在进行任务时作业贝位号的顺序，结合第一阶段求得的取箱数量，最终获得每台场桥进行作业任务时作业的贝位号序列和对应贝位上的取箱数量。并与 Kim 所建的混合整数规划模型进行了对比分析，突出了本文两阶段模型的优越性。

## 第4章 算法设计及对比分析

### 4.1 算法介绍

#### 4.1.1 概述

最优化方法<sup>[57]</sup>是从多个方案科学合理的选取最优方案的专门研究。在生产控制、化学工程、机械工程、土木工程、经济规划、经济管理和运输调度等领域最优化方法被广泛应用，社会效益和经济效益已经在最优化方法的帮助下有了明显的提高。现今，最优化方法研究越来越深化，在很多分支领域得到了发展，其中线性规划、非线性规划、整数规划、多目标规划和动态规划等更为突出。

线性规划问题是目标函数和约束条件都是线性的最优化问题，其思想是在可行域里寻找最优解，本文研究问题的目标函数和约束条件都不是线性的，根据我们建立的第一阶段数学模型知道，可以将集装箱码头场桥调度的约束条件进行线性化和连续化处理，得到一个线性约束混合整数函数的最小值问题。

动态规划方法是解决多阶段决策过程的最优化方法之一，一般由初始状态开始，通过对中间阶段决策的选择，使在结束状态时，得到一个优化的决策序列。动态规划可分为正向思维法和逆向思维法，逆向思维法是指从问题目标状态出发倒退到初始状态或边界状态的思维方法，正向思维法与此相反。在求解最短路问题时可以采用从前向后求解的顺序递推法和从后向前求解的逆序递推法。

本文设计的算法是在线性规划和动态规划的基础上进行的，分阶段对场桥调度的优化模型进行求解计算。

#### 4.1.2 有约束的最小化问题

在有约束的最优化问题中经常采用对整体问题进行转化的方法，使之变为更简单的子问题和小问题，其中的子问题和变小的问题成为下一步求解和继续迭代计算过程的前提。惩罚函数等在早期经常被构造，它可以把有约束的最优化问题转化为无约束的最优化问题，然后就可以在无约束的条件下再进行求解计算。本文对第一阶段模型的求解采用单纯形法，调用 Matlab 工具箱里的 `fmincon` 函数<sup>[58]</sup>。

fmincon 函数采用了四种不同的算法: interior point 内点算法、active set 有效集算法、SQP 序列二次规划算法、trust region reflective 信赖域反射算法。引入了并行机制,能够加快梯度计算速度。

对于中等规模优化问题,fmincon 命令使用 SQP 序列二次规划算法<sup>[59]</sup>来求解,序列二次规划方法是将一个带有等式约束和不等式约束(可以是线性的)的非线性优化问题转化为二次规划问题求解。基本思想是在某个近似最优解处将原非线性规划问题简化为处理一个二次规划的问题,求得最优解,如果有则认为是原问题的最优解,否则用近似解代替构成一个新的二次规划问题继续迭代。分三步进行实现:stept1.拉格朗日函数 Hessian 矩阵的更新;stept2.二次规划问题求解;stept3.一维搜索和目标函数的计算。

对于大规模问题,fmincon 采用了 subspace trust region 信赖域反射算法<sup>[60]</sup>。这种算法是把目标函数在点  $x$  的邻域泰勒展开, $x$  是人为提供的初始猜测值,这个展开的邻域就是所谓的 trust region,泰勒展开到二阶项为止,这时目标函数在某一个局部的特性就可以得到,在这样一个邻域里求得一个新的点  $x_1$ ,使目标函数值减小,将原问题简单化继续处理。

Fmincon 函数虽然可以解决非线性的问题,但要求目标函数和约束条件都必须是连续的,梯度也是连续的,而且该函数是根据给定的初始值进行梯度步长收敛的,所以给定的初始值必须是一个可行解,本文采用 while 随机搜索的方法首先找到一个可行的初始解。然后多次利用 fmincon 函数求得的最优解继续优化求解,最终确定最优解。

## 4.2 集装箱码头场桥调度的算法设计

### 4.2.1 第一阶段的求解思路

根据船舶装箱的配载计划,制定的岸桥作业任务是已知的,集装箱类型、目的港分布是可以确定的,首先将装船总任务按照岸桥作业计划和需要装运的集装箱类型、要到达的目的港划分成多个子任务,子任务间互不影响,但要求一个子任务必须在上一个子任务完成以后才可以开始进行。对于码头堆场,各个贝位上集装箱的存放是按照集装箱类型分布的,即每个贝位仅存放一种类型的集装箱,

此种类型的集装箱包括集装箱种类和要到达的目的港都是一致的，可以看做等同。且由于箱区贝位集装箱存放量的限制，一种类型的集装箱可能被存放在多个贝位上，这些贝位未必相邻。因此要完成岸边分配的一个子任务，可能需要到多个贝位进行取箱。

通过分析可以得到每个子任务对应的集装箱类型和数量，再根据每个贝位上存放的集装箱类型和数量，将非线性约束的问题转化为线性等式约束问题。在约束条件小于决策变量的情况下，可以得到满足线性等式的多个可行解。

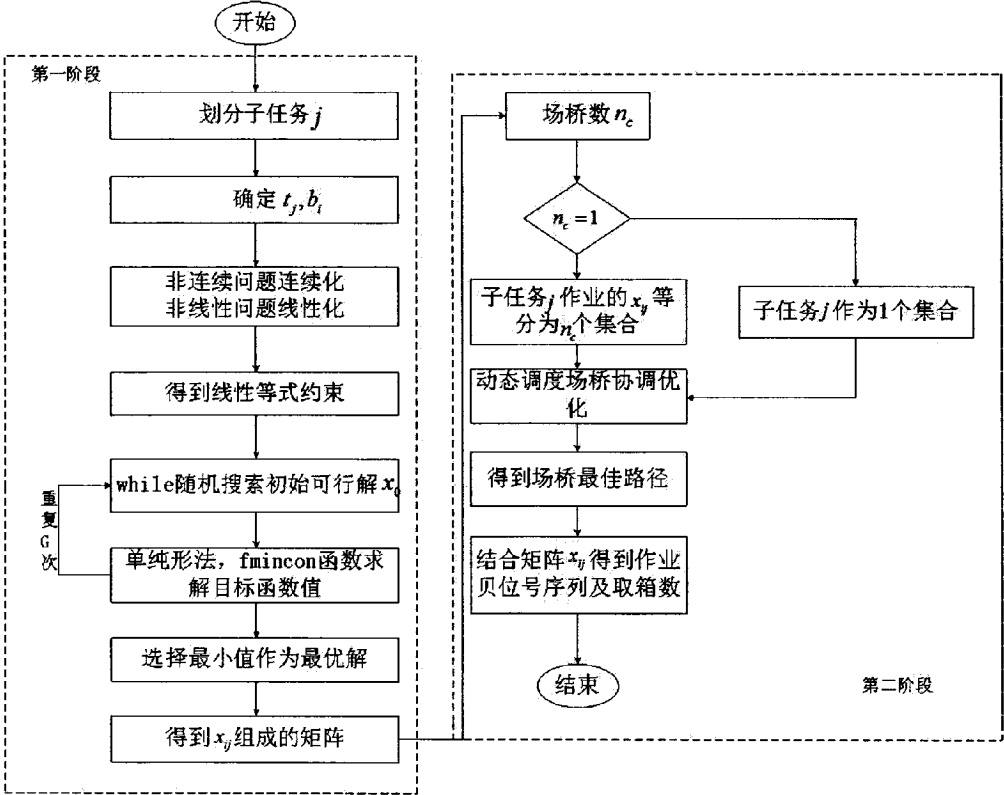


图 4.1 算法流程图

Fig.4.1 the algorithm flow chart

第一阶段算法的主要目的是求解第一阶段数学模型，根据子任务对应的集装箱类型和数量，确定子任务作业的贝位号及对应的集装箱类型和数量，结合图 4.1，第一阶段求解的具体流程为：



步骤一：根据岸桥作业计划、需要装运的集装箱类型和船舶要到达的目的港，将装船任务依次划分成多个子任务  $j$ ，每个子任务对应确定的集装箱类型和数量。

步骤二：根据集装箱码头堆场箱区内各贝位内堆存的集装箱类型和数量，确定每个子任务  $j$  中场桥可作业的贝位号  $i$  和该贝位上集装箱的初始存放量  $b_i$ 。

步骤三：进行非连续性问题连续化，非线性问题线性化。

根据给定的子任务要求和堆场贝位上存箱情况可以知道，对于任意贝位，在进行每一个子任务的作业时，有在该贝位上取箱和不在该贝位上取箱两种可能，变量  $x$  表示子任务中在该贝位上的取箱数量，不在该贝位上进行取箱时为零，若贝位上存放的集装箱类型与子任务中要求取的集装箱类型不相符时对应变量  $x$  的系数为零，相符则为 1，可以得到变量  $x$  的系数矩阵，再根据堆场内初始存箱数量与在各子任务中的取箱数量总和相等的要求得到  $n$  个线性等式约束， $n$  为贝位号总数。

同样，对于任一子任务而言，根据子任务的要求取箱数量与在所有贝位上取得的集装箱数量总和相等的要求得到  $m$  个线性等式约束， $m$  为子任务总数。由于该实际问题是整数规划的问题，为了便于引用函数，将约束连续化，最后再对求得的解进行四舍五入取整运算。

由以上分析，得到  $n+m$  个线性等式约束，将研究问题中子任务要求的取箱种类和数量以及贝位上存放的集装箱种类和初始数量的约束条件描述清楚。列出场桥作业的约束条件对应的线性等式，得到函数的矩阵  $Aeq$  和  $beq$ 。

步骤四：确定变量  $x_{ij}$  的上界  $ub$  和下界  $lb$ 。由实际意义决定，每个子任务在贝位内取箱数量不得小于 0，不能超过贝位初始堆存数量，故  $lb$  为 0 矩阵， $ub$  为贝位初始堆箱数量。

步骤五：根据得到的线性等式约束，采用 while 随机搜索的方法首先找到一个可行的初始解，作为目标函数的一个初始值  $x_0$ 。

步骤六：确定目标函数，由于该实际问题集装箱码头场桥的优化调度是一个非线性的问题，符合库函数中对目标函数要求，根据第一阶段模型，将满足所有约束条件的解中非零数值最少的矩阵设为目标函数，根据模型建立时的分析，其中必定存在满足最终目标堆场场桥总移动距离最短的目标的解。

步骤七：利用 while 随机搜索方法多找几组初始解，再调用 fmincon 函数进行求解，从中选取最佳者作为此阶段的最优解。

#### 4.2.2 第二阶段的求解思路

这一阶段的算法要解决的问题是从第一阶段得出的可行解中求出满足最终目标场桥在所有子任务完成后所移动的总路径最短的目标函数。

根据第一阶段的求解计算，已经得到每个子任务中场桥取箱作业的贝位号和在该贝位上的取箱数量，第二阶段需要进一步确定场桥从哪个贝位移动到哪个贝位，即如何得到满足最终目标函数的场桥作业的贝位号序列。

第二阶段求解的具体流程：

步骤一：判断场桥  $n_c$  的个数，如果  $n_c = 1$ ，即为单场桥作业，将每个子任务内作业贝位号作为一个集合转入步骤四；如果  $n_c > 1$ ，即为多场桥作业，进行步骤二。

步骤二：根据第一阶段求得的结果，将每个子任务中需要作业的贝位号对应的取箱数量分为  $n_c$  个集合，要求每个集合内场桥提取的集装箱数量大体相同。

例如，通过第一阶段求得的最优解为下表 4.1。

表 4.1 第一阶段求得的关于某案例的最优解

Tab.4.1 a optimal solution of a case after the first phase

| 子任务号 | 1  |   |    |    | 2  |   |    | 3  |    |    |    |    |
|------|----|---|----|----|----|---|----|----|----|----|----|----|
| 贝位号  | 1  | 4 | 8  | 11 | 2  | 6 | 9  | 3  | 5  | 7  | 10 | 12 |
| 取箱数量 | 17 | 8 | 13 | 16 | 24 | 9 | 15 | 22 | 18 | 13 | 9  | 29 |

有两台场桥时，划分后的组合为表 4.2。

表 4.2 两台场桥下子任务内需要作业的贝位号组合

Tab.4.2 the combination of bay number in subtasks with two yard cranes

| 子任务号 | 1  |   |    |    | 2  |   |    | 3  |    |    |    |    |
|------|----|---|----|----|----|---|----|----|----|----|----|----|
| 贝位号  | 1  | 4 | 8  | 11 | 2  | 6 | 9  | 3  | 5  | 7  | 10 | 12 |
| 取箱数量 | 17 | 8 | 13 | 16 | 24 | 9 | 15 | 22 | 18 | 13 | 9  | 29 |

当有三台场桥时，划分后的组合为表 4.3。

表 4.3 三台场桥下子任务内需要作业的贝位号组合

Tab.4.3 the combination of bay number in subtasks with three yard cranes

| 子任务号 | 1  |      |    | 2  |   |    | 3  |       |       |  |
|------|----|------|----|----|---|----|----|-------|-------|--|
| 贝位号  | 1  | 4 8  | 11 | 2  | 6 | 9  | 3  | 5 7   | 10 12 |  |
| 取箱数量 | 17 | 8 13 | 16 | 24 | 9 | 15 | 22 | 18 13 | 9 29  |  |

这样做的目的是保证每台场桥作业任务等量，避免作业划分不均匀，减少场桥等待时间。

步骤三：对每个子任务中被划分出的各个子集合，分别求出场桥需要作业的贝位中贝位号最小和最大的，组成数列矩阵。然后进行步骤五。

每台场桥对每个子任务中划分出的贝位号子集合都可以进行作业，即有 $n_c!$ 种选择，假设 $n_c$ 台场桥， $T$ 个子任务时，因为所有场桥是一样的，对每个贝位都可以进行作业，所以存在 $(n_c!)^{T-1}$ 种选择方法，动态调度这 $n_c$ 台场桥，将每台场桥作业各个子任务时对应可选择的贝位号集合重新按子任务顺序组成矩阵如以下例题方法进行求解。

例如，两台场桥时如下表 4.4。

表 4.4 两台场桥各自作业子任务内贝位号组合

Tab.4.4 the combination of bay number in subtasks for both yard cranes

| 场桥号  | 1  |   |    |    |    | 2  |    |   |    |    |    |    |
|------|----|---|----|----|----|----|----|---|----|----|----|----|
| 子任务号 | 1  |   | 2  | 3  |    | 1  |    | 2 |    | 3  |    |    |
| 贝位号  | 1  | 4 | 2  | 3  | 5  | 8  | 11 | 6 | 9  | 7  | 10 | 12 |
| 取箱数量 | 17 | 8 | 16 | 22 | 18 | 13 | 16 | 9 | 15 | 13 | 9  | 29 |

三台场桥时如下表 4.5。

表 4.5 三台场桥各自作业子任务内贝位号组合

Tab.4.5 the combination of bay number in subtasks for each of the three yard cranes

| 场桥号  | 1  |    |    | 2    |   |       | 3  |    |       |
|------|----|----|----|------|---|-------|----|----|-------|
| 子任务号 | 1  | 2  | 3  | 1    | 2 | 3     | 1  | 2  | 3     |
| 贝位号  | 1  | 2  | 3  | 4 8  | 6 | 5 7   | 11 | 9  | 10 12 |
| 取箱数量 | 17 | 16 | 22 | 8 13 | 8 | 18 13 | 16 | 15 | 9 29  |

一般而言,子任务内需要作业的小贝位号集合和下一子任务需作业的小贝位号集合一组,子任务内需要作业的大贝位号集合和下一子任务需作业的大贝位号集合一组,分别作为一个集合提供给一台场桥作业,这种组合方式能减少场桥移动的距离和运行的时间,但为了防止特殊情况发生,本文采用就近选择的方法,动态考虑场桥作业子任务时贝位号子集合的选择,将 $(n_c!)^{T-1}$ 种选择简化为一种。

步骤四:求出每个集合中场桥需要作业的贝位号最小和最大的,组成数列矩阵,转入步骤五。

步骤五:确定每个集合可选择作业的起始位置和结束位置。

集装箱码头场桥的移动路径包括子任务内部的移动路径和子任务之间的移动路径两部分,目标是使场桥的总移动距离最短,假设有一个贝位号序列即能满足子任务内部场桥移动距离最短也能满足子任务之间场桥移动距离最短,那么这个贝位号序列就是我们要求的场桥作业顺序。由于子任务内部需要作业的贝位号已经确定,因此要想使场桥在子任务内部作业时所运行的距离最短,场桥必须按照贝位号的顺序从小到大或从大到小作业,否则必然会重复运动路线,使移动距离增大,这是在所有贝位在一个箱区或同一条直线上分布的假设下进行的,即贝位号之差可以代表相应贝位间的距离。将原问题简化为求解场桥在子任务间总移动距离最短的问题。而且每个子任务所需作业的最小贝位号和最大贝位号是确定的,也就是说场桥在每个子任务中作业的第一个贝位和最后一个贝位只能从确定的两者中选择一个,原问题转化为场桥在每个子任务作业中起始位置和终止位置的选择问题,而且对起始位置、结束位置的选择只有两种方式,一种是起始位置为最小的贝位号,结束位置为最大的贝位号,另一种则相反,使起始位置为最大的贝位号,结束位置为最小的贝位号。

步骤六:动态协调优化场桥在每个子任务作业时最优的起始位置和结束位置。

由于每个子任务必须依次进行,因此场桥在一个子任务内作业的起始位置和结束位置的选择,会影响场桥在上一子任务作业的结束位置和下一子任务作业的起始位置的确定,是一个动态变化的过程。因此本阶段算法采用动态优化调度的方法,每决定一步考虑此后的五步,即场桥在每一个子任务作业结束位置的选择时,考虑它对场桥在下一个子任务作业的开始与结束位置,以及在下下一个子任

务作业时的开始与结束位置.....一直考虑到场桥在该子任务后的第五个子任务作业时的开始位置与结束位置的影响, 每个子任务场桥的起始作业位置有两种选择, 那么考虑五个子任务时共需对  $2^5 = 32$  种排列进行比较, 选择场桥运行距离最短的, 得到场桥在每个子任务中作业的最优起始位置和结束位置。

步骤七: 结合第一阶段得出的场桥在每个子任务内需要作业的贝位号 and 对应贝位上的取箱数量, 补充完整得到场桥在所有子任务完成时所作业的贝位号序列和对应贝位上的取箱数量。

### 4.3 算法对比分析

第一章中研究现状里已经说明关于集装箱码头场桥路径优化问题的研究已经有了些发展, 本节主要对已经有了的各种算法与本文设计的两阶段算法在理论上进行对比分析, 再通过下一章的实际案例进行结果比较, 得出采用本文算法的明显优势。

#### 4.3.1 与模拟退火算法对比分析

模拟退火算法 (Simulate Anneal Arithmetic, SAA) <sup>[61]</sup> 是对局部搜索算法的扩展, 作为一种较为常用的随机搜索算法, 可以在一个大空间内搜索问题的最优解。

与本文子任务的划分相同, 首先建立一个三行的矩阵, 将每个子任务所需要提取的集装箱种类对应存放的贝位号集合依次排列存放在矩阵的第一行, 第二对应写入贝位上集装箱存放的初始数量, 第三行对应写入该子任务要求提取的集装箱数量, 因为第一行的贝位号是根据子任务一次排列的, 可以按照子任务顺序将矩阵分为  $n$  个模块, 共  $n$  个子任务。算法中对每个子任务对应的模块用 for 循环对第二行初始集装箱存储量与第三行子任务要求取箱数量进行比较判断, 依次取箱, 若存储量大于要求箱量则提取需要数量的箱量, 更新对应贝位上的存数量对下一模块进行比较, 若存数量小于需求量, 则全部取走再对模块中下一贝位进行比较, 直到取够所需要的箱子, 直到所有任务都被完成, 对进行取箱的贝位号依次记录, 求移动距离。再对每个子任务对应模块中所有贝位号进行随机交叉互换形成新的矩阵, 依上述方法再进行循环比较求得移动距离, 若比之前的距离小则取代它, 并把记录的取箱贝位记录也取代, 否则舍弃, 设置一个循环次数的限定和初始温

度, 降温频度及最低温度的限制, 直到循环结束, 输出搜索到的最小移动距离和对应取箱贝位号集合, 即最优解。

可以看出, 模拟退火算法是一种新的随机搜索算法, 应用到集装箱码头堆场内场桥的路径优化问题中, 便于程序的编辑, 逻辑简单, 容易理解, 但是, 其解的最优效果远远没有本文所采取的算法高。在初始温度值高、降温速率缓慢、终止温度值小和各个温度下足够多的抽样次数的要求下, 模拟退火的优化过程比较缓慢和复杂, 而且具有严重的随机性, 子任务间的衔接性较差, 应用模拟退火算法在此问题中的计算, 迭代效果不是很理想, 算法运行用时较长。

#### 4.3.2 与遗传算法对比分析

遗传算法<sup>[62]</sup>作为一种全局性的概率搜索算法, 在形式上, 遗传算法也是一种迭代的方法, 类似于基于导数的解析式算法和其他启发式搜索方法, 但传统的优化算法相比较, 它有许多不同, 遗传算法的重要特点是以解对问题的适应度为搜索信息, 优化函数的连续性约束不对搜索信息的过程产生限制, 不用产生导数和别的辅助信息; 并行性强, 多个区域的信息能够在解空间中被同时进行搜索; 鲁棒性强, 当为多峰的、有噪声的并且是非连续的待求解问题时, 最优解或及其接近最优解的值被收敛求得的可能性较大; 可扩充性高, 与各个领域的知识或算法相衔接相结合的能力较强; 基本思想简单和可操作性强; 智能型好。

首先根据子任务数量设置一个种群规模  $n$ ,  $n$  个个体为一个种群, 同本文对装船任务的划分一样, 对每个子任务对应的可取贝位号组成的集合组成数列进行随机选择进行变异, 然后再就近选择的方式, 对贝位上集装箱的初始存放数量和子任务要求量进行比较, 设置一定的迭代次数, 用随机竞争的方式进行新种群的选择方式, 父代与子代同时进行竞争组成集合, 从中随机选取  $m$  个个体计算适应值, 选择适应值大的继续迭代, 直到结束循环。

采用遗传算法解决码头场桥的动态调度路径优化问题, 以生物进化为原型, 能够较好的收敛到目的解, 鲁棒性高, 但很容易陷入“早熟”, 不能很好地解决场桥路径优化类大规模计算量的问题, 在新空间中进行搜索时, 能力受限制, 得到的解容易是局部最优的。对于解决大量计算数据时耗时较长, 对于维度较高的问题也很难进行处理和优化。对于码头场桥路径优化类非线性规划问题, 较难处理,

大多需要添加惩罚因子，但随之将会带来更复杂的运算。而且遗传算法属于随机类算法，运算次数多，结果的随机性较大可靠性不好，不能稳定的得到解，算法进行求解的稳定性相对较差。

#### 4.3.3 与随机搜索算法对比分析

Kim<sup>[15-18]</sup>研究了单台场桥的最优路径问题，他在文中假设每个场桥只为一个箱区服务，并且在箱区内每个贝位上的箱子都根据大小、重量和目的港分成几类，同一类的箱子可以分散在不同的贝位，这与本文的分解方法是一致的。他是在考虑场桥作业时不同约束条件的基础上，建立了混合整数规划的模型，目标是使场桥的总处理时间包括启动时间和行走时间最短，先用分支界定法进行求解，为了克服分支界定法在计算求解时求解效率的不足，利用贪婪随机适应搜索法进一步求解计算。Kim 采用的随即搜索算法具体流程为：

Step1 产生满足各种类型集装箱的所有基本可行。

Step2 通过列举满足产生各种类型集装箱的基本可行解的组合解，产生所有满足取箱规则的基本可行解。

Step3 对于 step2 中可行解集的每个元素，使用贪婪随机适应搜索法解决路径问题。

Step4 选择 step3 中所有方案中成本最小的方案。

Kim 旨在最小化场桥装卸时间，包括场桥启动时间和堆场贝位间移动的运行时间；但是仅仅考虑了单岸桥的最佳路径优化，并未涉及多台场桥时的并行作业。此外，该文的算法枚举了所有的可行组合解，仅适合解决小规模问题，大规模问题的运行效率有待提高。

与 Kim 的研究相比，本文的方法即可以解决单台场桥时的情况又可以解决多台场桥共同作业时的协调调度问题，另外通过本文的算法求得的最优解是确定性的，而 Kim 的计算方法只是随机适应的，是一种启发式的方法，因此随机性较强，容易求得局部最优解。

第 5 章 算例分析

5.1 算例求解

根据装船任务和岸桥作业计划，按集装箱类型划分子任务得到下表：

表 5.1 场桥子任务计划及堆场贝位上集装箱的存储情况

Tab.5.1 the working schedule for gantry cranes and the distribution of containers in bays

| 场桥子任务计划       |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 子任务           | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |    |    |    |
| 集装箱类型         | A  | B  | C  | A  | C  |    |    |    |
| 需求数量          | 37 | 26 | 41 | 23 | 29 |    |    |    |
| 堆场贝位上集装箱的存储情况 |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 贝位号           | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 集装箱类型         | A  | B  | A  | C  | B  | C  | A  | C  |
| 初始箱量          | 17 | 8  | 22 | 25 | 18 | 21 | 21 | 24 |

表 5.2 场桥提取集装箱的约束条件表

Tal.5.2 The constraint conditions of the gantry crane

| 子任务<br>贝位号 | 子任务一   | 子任务二   | 子任务三   | 子任务四   | 子任务五   | 初始箱量 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| 贝位号 1      | X(1,1) | 0      | 0      | X(1,4) | 0      | 17   |
| 贝位号 2      | 0      | X(2,2) | 0      | 0      | 0      | 8    |
| 贝位号 3      | X(3,1) | 0      | 0      | X(3,4) | 0      | 22   |
| 贝位号 4      | 0      | 0      | X(4,3) | 0      | X(4,5) | 25   |
| 贝位号 5      | 0      | X(5,2) | 0      | 0      | 0      | 18   |
| 贝位号 6      | 0      | 0      | X(6,3) | 0      | X(6,5) | 21   |
| 贝位号 7      | X(7,1) | 0      | 0      | X(7,4) | 0      | 21   |
| 贝位号 8      | 0      | 0      | X(8,3) | 0      | X(8,5) | 24   |
| 需求箱量       | 37     | 26     | 41     | 23     | 29     | 156  |



根据表 5.1 给出的信息可知,场桥在每个子任务中可以访问的贝位集合。可以得到表 5.2 场桥提取集装箱的约束条件表,显然此案例中,集装箱船的总装船任务要求 156TEU 的集装箱,具体要求有集装箱类型 A 为 60TEU,集装箱类型 B 为 26TEU 和集装箱类型 C 为 70TEU。

根据表 5.2 中给定的具体每个子任务对应的集装箱需求量和每个贝位上集装箱的初始存放量,就可以确定变量  $x_{ij}$  的取值范围,第一阶段具体的数学模型为:

$$\begin{aligned} & \min(\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^5 Z_{ij}) \\ & x_{11} + x_{31} + x_{71} = 37 \\ & x_{22} + x_{52} = 26 \\ & x_{43} + x_{63} + x_{83} = 41 \\ & x_{14} + x_{34} + x_{74} = 23 \\ & x_{45} + x_{65} + x_{85} = 29 \\ & x_{11} + x_{14} = 17 \\ & x_{22} = 8 \\ & x_{31} + x_{34} = 22 \\ & x_{43} + x_{45} = 25 \\ & x_{52} = 18 \\ & x_{63} + x_{65} = 21 \\ & x_{71} + x_{74} = 21 \\ & x_{83} + x_{85} = 24 \\ & x_{ij} \geq 0, i=1,2\cdots 8, j=1,2\cdots 5 \\ & Z_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} = 0 \\ 1 & x_{ij} > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

其中  $x_{ij}$  为场桥在子任务  $j$  中作业时需在贝位  $i$  上的取箱量,当  $x_{ij} = 0$  时表示不需要在此贝位  $i$  上取箱即可完成子任务  $j$ ,前五个等式为每个子任务取箱数量的要求,剩余等式为每个贝位上集装箱初始存放量与场桥分别在每个子任务中在该贝位上的取箱数量总和一致的约束,再利用单纯形法即可求解。进行第一阶段,通过上述等式可以得出库函数中的  $Aeq, beq, lb, ub$ , 利用 while 循环随机搜取一个满

足线性约束的初始解  $x_0$ ，进而可以调用 `fmincon` 函数进行计算，求解的最优结果如下：

$$x_{ij} = \begin{bmatrix} 17 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 20 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 25 & 0 & 0 \\ 0 & 18 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 16 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 21 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 24 \end{bmatrix}, fval=10, t1=5.0420$$

即场桥只需移动十次就可完成整个作业任务，在每个子任务内作业贝位的取箱数量为  $x_{ij}$  对应数字。

单台场桥时再经过第二阶段的动态规划算法，得出最优路径为下图 5.1，得到最少移动距离为 17 个贝位，其中  $t2=0.0130$ ，总运行时间为 5.0550s。

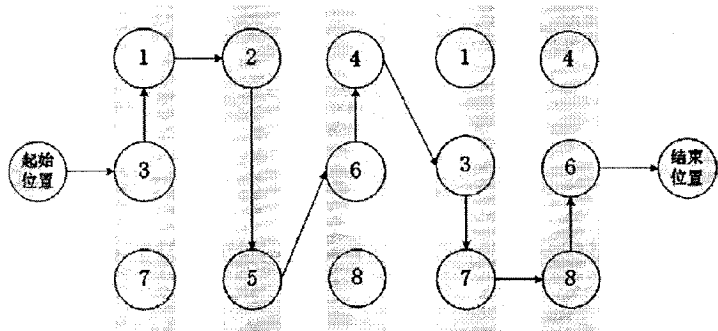


图 5.1 单台场桥作业路径图

Fig.5.1 the operation road map of a single yard crane

结合第一阶段求得的取箱数量，最终得到场桥的作业顺序和对应贝位上取箱数量如下表 5.3。

表 5.3 单场桥提取集装箱的顺序表

Tal.5.2 The operation schedule for a single yard crane

|     |    |    |   |    |    |    |   |    |    |   |
|-----|----|----|---|----|----|----|---|----|----|---|
| 贝位号 | 3  | 1  | 2 | 5  | 6  | 4  | 3 | 7  | 8  | 6 |
| 取箱量 | 20 | 17 | 8 | 18 | 16 | 25 | 2 | 21 | 24 | 5 |

两台场桥时，先对第一阶段求得的子任务内需要作业的贝位号集合进行划分重新组合，再根据动态规划算法，得到最优路径为图 5.2。

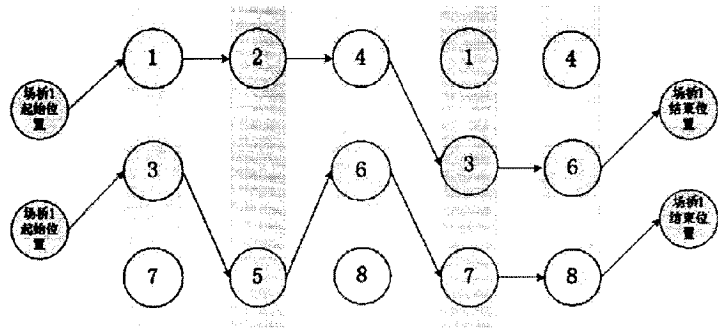


图 5.2 两台场桥作业路径图

Fig.5.2 the operation road map of two yard cranes

最小移动路径总和为 12 个贝位。再结合第一阶段求得的取箱数量，得到具体的作业计划如下表 5.4。

表 5.4 两台场桥提取集装箱的顺序表

Tal.5.4 The operation schedule for two yard cranes

| 场桥号 | 1  |   |    |   |   | 2  |    |    |    |    |
|-----|----|---|----|---|---|----|----|----|----|----|
| 贝位号 | 1  | 2 | 4  | 3 | 6 | 3  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 取箱量 | 17 | 8 | 25 | 2 | 5 | 20 | 18 | 16 | 21 | 24 |

5. 2 比较分析

本文研究了集装箱码头场桥调度的优化模型和算法，强调了本文算法的有效性，本节主要根据多个实际算例的计算结果进行比较分析，验证论文算法的实用性和快捷性，见下表 5.5 及表 5.6，其中总移动路径单位为贝位数，总运行时间单位为 s。具体算例见附录。

表 5.5 单场桥算例比较与分析

Tal.5.5 The examples' comparison and analysis for a single yard crane

|      | 具体任务量   | 两阶段算法 |         | 模拟退火算法 |         | 遗传算法  |         | 两阶段算法/模拟退火算法     | 两阶段算法/遗传算法       |
|------|---------|-------|---------|--------|---------|-------|---------|------------------|------------------|
|      |         | 总移动距离 | 总运行时间/s | 总移动距离  | 总运行时间/s | 总移动距离 | 总运行时间/s | (总移动距离比, 总运行时间比) | (总移动距离比, 总运行时间比) |
| 小规模  | (5,8)   | 17    | 5.1     | 19     | 5.2     | 19    | 6.0     | (89.5%,98.1%)    | (89.5%,85%)      |
|      | (5,10)  | 19    | 3.8     | 20     | 5.6     | 21    | 7.2     | (95%,67.9%)      | (90.5%,52.8%)    |
|      | (6,10)  | 14    | 4.8     | 20     | 6.5     | 15    | 12.8    | (70%,73.8%)      | (93.3%,37.5%)    |
|      | (7,12)  | 18    | 5.2     | 19     | 6.6     | 18    | 11.2    | (94.7%,80%)      | (100%,46.4%)     |
| 中型规模 | (8,15)  | 52    | 6.4     | 58     | 14.8    | 102   | 35.1    | (89.7%,43.2%)    | (50.9%,18.2%)    |
|      | (9,15)  | 22    | 5.3     | 24     | 12.1    | 93    | 24.8    | (91.7%,43.8%)    | (23.7%,21.3%)    |
|      | (11,18) | 32    | 7.5     | 36     | 10.2    | 147   | 33.7    | (88.9%,73.5%)    | (21.8%,22.3%)    |
|      | (12,22) | 123   | 12.4    | 199    | 34.6    | 330   | 47.6    | (61.8%,35.8%)    | (37.3%,26.1%)    |
| 大规模  | (20,30) | 180   | 29.7    | 435    | 63.8    | 370   | 40.0    | (41.4%,46.6%)    | (48.6%,74.3%)    |
|      | (18,30) | 79    | 11.2    | 90     | 20.7    | 379   | 49.9    | (87.8%,54.1%)    | (20.8%,22.4%)    |
|      | (16,30) | 74    | 10.8    | 94     | 17.0    | 293   | 45.3    | (78.7%,63.5%)    | (25.3%,23.8%)    |

表 5.6 两台场桥算例比较与分析

Tal.5.6 The examples' comparison and analysis for two yard cranes

|      | 具体任务量            | 两阶段算法     |             | 模拟退火算法    |             | 两阶段算法/模拟退火算法        |
|------|------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------------|
| 规模   | (子任务总量,<br>贝位数量) | 总移动<br>距离 | 总运行<br>时间/s | 总移动<br>距离 | 总运行<br>时间/s | (总移动距离比,<br>总运行时间比) |
| 小规模  | (5,8)            | 12        | 5.0         | 19        | 4.6         | (63.2%,109%)        |
|      | (5,10)           | 15        | 5.0         | 19        | 4.9         | (78.9%,102%)        |
|      | (6,10)           | 14        | 4.9         | 20        | 5.2         | (70%,94.2%)         |
|      | (7,12)           | 18        | 5.1         | 19        | 5.0         | (94.7%,102%)        |
| 中型规模 | (8,15)           | 22        | 5.7         | 26        | 5.9         | (84.6%,96.6%)       |
|      | (9,15)           | 22        | 5.6         | 29        | 6.9         | (75.9%,81.2%)       |
|      | (11,18)          | 32        | 6.2         | 42        | 8.3         | (76.2%,74.7%)       |
|      | (12,22)          | 47        | 6.4         | 60        | 7.9         | (78.3%,81%)         |
| 大规模  | (20,30)          | 78        | 8.7         | 89        | 10.5        | (87.6%,82.9%)       |
|      | (18,30)          | 79        | 8.6         | 104       | 11.7        | (76%,73.5%)         |
|      | (16,30)          | 91        | 8.2         | 110       | 13.6        | (82.7%,60.3%)       |

由上述两表分析可得，本文设计的算法无论对小、中和大规模的算例都能快速有效的得到最佳路径。单台场桥时，都能够用最短的时间求得最好的解；两台场桥时，对于较小规模的算例，能够保证快又准确的得到最优解，对于较大规模的算例，也能保证在较短的时间内得到最满意的解。而模拟退火算法有一定的不稳定性，有时能够得到比较好的结果但大部分情况下结果并不是最优的，而且运行时间相对较长，它是一种随机的求解方式，因此导致每次得到的结果都不同，很可能求得局部最优解。遗传算法对于解决小规模在场桥调度问题是可行的，但对于中、大型规模的问题而言，不光运行时间极长而且求得的结果有严重偏差。通过上述，证明了本文两阶段算法的可行性和高效性。

### 5.3 小结

通过本章算例的计算，证明本文所建立的模型和算法是有效的，比起利用模拟退火算法和遗传算法求解等其他算法，能够在较短的时间内得出场桥作业的最优路径，稳定性更高，求得的解对场桥的利用率有很大提高，进而能够有效的提高堆场的作业效率，提高码头岸桥的装船效率，提高整个码头的运营效益，在资源有限的情况下能够使装卸机械场桥得到更有效的利用，对码头资源配置的有效利用、作业效率的提高有积极影响。

## 结论与展望

本文集装箱码头场桥调度优化模型与算法研究，以集装箱码头场桥为研究对象，主要研究了场桥在作业任务中的路径优化问题，分两阶段确定了场桥需要作业的贝位号和在该贝位上的取箱数量，以及完成总任务场桥对所有贝位的作业顺序，分别以每个子任务对应集装箱类型和数量的要求与每个贝位上初始存放的集装箱类型和数量为约束条件，以场桥完成整个装船任务所需作业的贝位数最少为目标函数建立第一阶段线性规划的数学模型，又以第一阶段的解为前提，建立以场桥在子任务间移动距离最短为目标，子任务内场桥作业的起始位置和结束位置的相互影响为约束条件建立第二阶段动态规划的数学模型。在算法优化上采用线性规划单纯形法和动态规划的算法，分别计算得出满足第一阶段和第二阶段的最优解，最终得到满足场桥在完成整个装船任务时总移动距离最短的具体路径和取箱方案，可以实现全局的最优化。本文的研究和结论，对集装箱码头作业效率的提高，运营成本的降低，资源配置的优化，作业计划的安排都有很大的帮助作用。

本文的主要结论是集装箱码头场桥调度优化问题可以通过两阶段规划的方法建立模型和求解计算。两阶段规划的方法，能够更明确的将影响场桥的作业因素描述出来，能够更准确的将场桥在每个子任务中所要作业的贝位号和在该贝位上需要提取的集装箱数量以及场桥在各个贝位上的作业顺序的最优解求解出来。将复杂问题简单化、分步化，将非线性问题线性化，非连续性问题连续化，减少了计算的次数和降低了计算的难度。通过比较分析多种算法，证明了本文采用的算法的可行性和高效性。单纯形法的计算逻辑性强，**Matlab** 函数工具箱的使用简化的算法编程的难度，使该问题的逻辑变得简单易懂。动态规划的利用增加了算法的有效性，使结果更加优化。

本文的创新点是采用了与传统求解该问题所用方法明显不同的两阶段法，首先构建了线性规划和动态规划模型，然后分别运用单纯形法和动态规划算法对模型进行了求解，求解的效果与启发式算法相比有明显提高，本文方法能够准确、高效地求得场桥作业路线的最优取箱方案。

在本文研究的基础上，下一步将根据实际问题进行进一步优化研究。由于本文是在假设已经得到集装箱船的装卸计划和岸桥的作业顺序的前提下，码头场桥

的子任务是给定的，因此可以结合优化集装箱船的配载问题，使岸桥与场桥作业计划成为一个整体，进行优化研究。另外，本文假设集装箱码头堆场中所有贝位在箱区内按直线排列，贝位号可以代表贝位之间的距离关系，对于情况复杂的堆场考虑不是很周到，需要进一步优化研究。但是在现有情况下，已经可以取得一定的优化结果，能对码头的作业效率有较大的影响。



## 参 考 文 献

- [1] L. M. Gambardella, M. M. Asterolilli, A. E. Rizzili, M. Z. Affalon. An optimization methodology for intermodal terminal management. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2012, 12: 521-534.
- [2] P. Chen, Z. H. Fu, A. Lim. The yard allocation problem. *Eighteenth National Conference on Artificial Intelligence.*, 2002, 56-65.
- [3] E. K. Bish, T. Leong, C. Li, L. D. Simchi. Analysis of a new vehicle scheduling and location problem. *Naval Research Logistics*, 2001, 48(5): 363-385.
- [4] K. H. Kim, K. T. Park. A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers. *European Journal of Operational Research*, 2003, 148(1): 92-101.
- [5] K. H. Kim, K. Y. Kim. An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals. *Transportation Science*, 1999, 33(1): 17-33.
- [6] K. H. Kim, Y. M. Park. A crane scheduling method for port container terminals. *European Journal of Operational Research Part E*, 2004, 156: 752-768.
- [7] K. H. Kim, K. Y. Kim. A routing algorithm for a single crane to load export containers onto a containership. *Elsevier Science*, 1997, 33: 673-676.
- [8] E. Kozan, P. Preston. Generticalgorithm to schedule container transfer at multimodal terminals. *International Transaction in Operational Research*, 1999, 6:311-328.
- [9] J. L. Richard, C. Q. Zhang. A routing algorithm for a single transfer crane to load export containers onto a containership. *Computers & Industrial Engineering*, 1997, 33: 673-676.
- [10] R. Mosca, P. Giribone, A. G. Bruzzone. Simulation of dock management and planning in a port terminal. *International Journal of Modeling and Simulation*, 2000, 20: 153-157.
- [11] Peterkofsky R. I, Daganzo C. F. A branch and bound solution method for the crane scheduling problem. *Transportation Research B*, 1990, 24(3):159-172.
- [12] C. F. Daganzo, D. B. Castilho, Handling strategies for import container at marine terminals. *Transportation Research B*. 1993, 27, 151-166.
- [13] 蔡芸. 同时求解泊位分配及岸桥调度问题的仿真优化方法. *可持续发展的中国*, 2003, 11:22-26.

- 
- [14] Y.G.Chung, S.U.Randhawa, E.D.Medowell. A simulation analysis for a transtainer-based container handling facility. *Computers & Industrial Engineering*, 1988, 14(2): 113-125.
  - [15] K.H.Kim, H.Zhang. Maximizing the number of dual-cycle operations of quay container in container terminals. Elsevier Science, 2009, 56: 979-992.
  - [16] K.H.Kim, B.K.Lee. Optimizing the block size in container yards. Elsevier Science, 2010, 46: 120-135.
  - [17] K.H.Kim, K.M.Lee. Sequencing delivery and receiving operations for yard cranes in port container terminals. Elsevier Science, 2003, 84:283-292.
  - [18] K.H.Kim, H.B.Kim. The optimal sizing of the space and handling facilities for import containers. *Transportation Research B*, 2002, 36: 821-835.
  - [19] W.C.Ng, K.L.Mark. Yard crane scheduling in port container terminals. *Applied Mathematical Modeling*, 2005, 29: 263-267.
  - [20] W.C.Ng, K.L.Mark, Y.X.Zhang. Scheduling trucks in container terminals using a genetic algorithm. *Engineering Optimization*, 2007, 39(1): 33-37.
  - [21] C.Zhang. Resource planning in container storage. (博士论文). 香港: 香港大学, 2000, 4.
  - [22] Bish E.K., Leong T, LI C, SimChi-Levi D. Analysis of a new vehicle scheduling and location problem. *Naval Research Logistics*, 2001, 48(5):363-385.
  - [23] Evers J J M, Koppers S A J. Automated guided vehicle traffic control at a container terminal. *Transportation Research A*, 1996, 30(1):21-34.
  - [24] Van M.R. Operational control of internal transport. ERIM Ph.D. theories Research in Management, 2000, 1:13-17.
  - [25] Bose J. Vehicle dispatching at seaport container terminals using evolutionary algorithms, *Proceeding of 33th Hawaii International Conference of System Seienees, Hawaii*, 2000:33-36.
  - [26] A.Narasimhan, U.S.Palekar. Analysis and algorithms for the transtainer routing problem in container port operations. *Transportation Science*, 2002, 36(1): 63-78.
  - [27] Vis, I F A, Koster R, Roodbergen K J, Peeters L W P. Determination of the number of automated guided vehicles required at a semi-automated container terminal. *Journal of the Operational Research Society*, 2001, 52:409-417.
  - [28] 韩晓龙. 集装箱港口龙门吊的最优路径问题. *上海海事大学学报*, 2005, 26(2):39-41.
  - [29] 刘艳, 周鹏飞, 康海贵. 集装箱堆场箱位分配模糊优化研究. *水运工程*, 2009, (11): 1-5.

- [30] 陈璐等. 集装箱码头装卸作业的调度控制模型及算法设计. 控制理论与应用, 2006, 23:874-878.
- [31] Steenken D, Henning A, Freigang S, Voss S. Routing of straddle Carriers at a container terminal with the special aspect of internal moves, OR Spelctrum, 1993, 15(3):167-172.
- [32] Bodin L D, Golden B L, Assad A A. Hall M O, Routing and scheduling of vehicles and crews. Computers and Operations Research, 1983, 10(2):63-211.
- [33] 王丽颖. 用动态规划模型求解最短路径问题的研究. 白城师范学院学报, 2008, 22(6):12-15.
- [34] 吕显强, 张宏伟. 集装箱码头分派车辆的整数规划模型. 大连水产学院学报, 2004, 19(6).
- [35] 孙晓燕, 李自良, 彭雄风, 傅亚力, 梁志强. 利用动态规划法求解运输问题的最短路径. 机械设计与制造, 2010, 2:223-224.
- [36] 吕聪颖, 赵刚彬, 周春光. 求解 0-1 背包问题的动态规划法分析. 南阳理工学院学报, 2011, 3(2):17-21.
- [37] 郑怡, 赵海良, 徐永. 基于 Matlab 的动态规划问题. 重庆工学院学报(自然科学), 2008, 22(5):152-155.
- [38] 费蓉, 崔杜武. 中国邮递员问题的动态规划算法研究. 计算机研究与发展, 2005, 42(2):294-299.
- [39] 马立肖, 王江晴. 遗传算法在组合优化问题中的应用. 计算机工程与科学, 2005, 27(7):72-82.
- [40] 余雷. 组合优化技术在堆场作业计划中的应用. 集装箱化, 2008, 1:32-34.
- [41] 韩骏, 孙晓娜, 靳志宏. 集装箱码头泊位与岸桥协调调度优化. 大连海事大学学报, 自然科学版, 2008, 34(2): 117-121.
- [42] J. L. Richard, C. Q. Zhang. A routing algorithm for a single transfer crane to load export containers onto a containership. Computers & Industrial Engineering, 1997, 33: 673-676.
- [43] C. Bake. High time for straddles. Cargo Systems, 1998, 10: 23-26.
- [44] Bae J. W., Kim K. H., A dispatching method for automated guided vehicles to minimize delays of containership operations. International Journal of Management Seienee, 1999, 5(1):1-25.
- [45] Lai K. K., Lam K. A study of container yard equipment allocation strategy in Hong Kong[J]. International Journal of Modeling and Simulation, 1994, 14(3):134-138.

- [46] Kap Hwan Kim, Young-Man Park. A Crane Scheduling Method for Port Container Terminals. *European Journal of Operational Research Part E*, 2004, 156:752-768.
- [47] 魏众, 申金升等. 港口集装箱码头轮胎式龙门吊优化调度研究. *中国工程科学*, 2007, 9:22-24.
- [48] 杨鹏, 柴小燕, 孙俊清. 码头场桥协同调度研究. *计算机工程与应用*, 2011, 47(1) 231-233.
- [49] 严伟, 宓为建, 茆道方, 何军良. 一种基于最佳优先搜索算法的集装箱堆场场桥调度策略. *中国工程机械学报*, 2008, 6(1):95-100.
- [50] 李斌, 李文峰. 面向哈佛体系结构的码头场桥作业调度. *计算机工程与应用*, 2011, 46(22):17-25.
- [51] 何军良, 严伟, 宓为建. 基于爬山算法的集装箱堆场场桥调度. *上海海事大学学报*, 2007, 28(4):11-15.
- [52] 陈欢, 李文峰, 张煜, 梁晓磊. 基于 Anylogic 离散事件的集装箱堆场场桥调度建模与仿真. *技术与方法*, 2010, 17:49-51.
- [53] 罗勋杰, 樊铁成. 集装箱码头操作管理. 大连:大连海事大学, 2010.
- [54] 罗勋杰, 樊铁成. 集装箱码头控制优化管理. 大连:大连海事大学, 2010.
- [55] 陈春晓. 出港集装箱装载方案研究. 长沙:中南大学, 2008.
- [56] 林艺明. 集装箱码头调度问题研究. 上海:上海海事大学, 2007.
- [57] 王凌. 智能优化算法及其应用. 北京:清华大学出版社, 2004:121-159.
- [58] 唐焕文. 实用最优化方法. 大连:大连理工大学出版社, 2003:145-173.
- [59] 吴祈宗. 运筹学与最优化方法. 北京:机械工业出版社, 2003:301-342.
- [60] 张民, 王向军, 周方俊. 一种新的进化规划算法[J]. *海军工程大学学报*, 2008, 20(3):40-43.
- [61] 庞峰. 模拟退火算法的原理及算法在优化问题上的应用:(硕士论文). 吉林:吉林大学, 2006. 12
- [62] 徐俊. 免疫智能在优化中研究及其在数字图像中应用. 无锡:江南大学, 2008.

附录 算例

|      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |  |  |  |  |  |
|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|--|--|--|--|--|
| 算例 1 | 任务计划 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   |     |     |     |    |     |  |  |  |  |  |
|      |      | I   | III | II  | I   | II  |     |     |     |    |     |  |  |  |  |  |
|      |      | 37  | 26  | 41  | 23  | 29  |     |     |     |    |     |  |  |  |  |  |
|      | 堆存状态 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |    |     |  |  |  |  |  |
|      |      | I   | III | I   | II  | III | II  | I   | II  |    |     |  |  |  |  |  |
|      |      | 17  | 8   | 22  | 25  | 18  | 21  | 21  | 24  |    |     |  |  |  |  |  |
| 算例 2 | 任务计划 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   |     |     |     |    |     |  |  |  |  |  |
|      |      | II  | III | II  | I   | III |     |     |     |    |     |  |  |  |  |  |
|      |      | 31  | 27  | 21  | 43  | 32  |     |     |     |    |     |  |  |  |  |  |
|      | 堆存状态 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |    |     |  |  |  |  |  |
|      |      | III | II  | III |     | I   | III | I   | II  |    |     |  |  |  |  |  |
|      |      | 15  | 28  | 16  |     | 21  | 28  | 22  | 24  |    |     |  |  |  |  |  |
| 算例 3 | 任务计划 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |     |     |    |     |  |  |  |  |  |
|      |      | III | I   | II  | III | II  | I   |     |     |    |     |  |  |  |  |  |
|      |      | 29  | 37  | 31  | 47  | 25  | 23  |     |     |    |     |  |  |  |  |  |
|      | 堆存状态 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9  | 10  |  |  |  |  |  |
|      |      | I   | II  | III | II  | I   | III | II  | III | I  | III |  |  |  |  |  |
|      |      | 21  | 19  | 18  | 24  | 11  | 17  | 13  | 22  | 28 | 19  |  |  |  |  |  |
|      | 任务   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   |     |    |     |  |  |  |  |  |
|      |      | I   | II  | I   | III | II  | I   | III |     |    |     |  |  |  |  |  |

|      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |     |     |
|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|
| 算例 4 | 计划   | 38  | 34  | 27  | 33  | 33  | 42  | 26  |     |     |     |    |     |    |     |     |
|      | 堆存状态 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11 | 12  |    |     |     |
|      |      | II  | I   | III | I   | II  |     | II  | I   | III | I   | I  | III |    |     |     |
|      |      | 13  | 6   | 11  | 30  | 26  |     | 28  | 22  | 24  | 17  | 32 | 24  |    |     |     |
| 算例 5 | 任务计划 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |     |     |    |     |    |     |     |
|      |      | I   | III | II  | III | I   | II  | III | I   |     |     |    |     |    |     |     |
|      |      | 26  | 31  | 35  | 41  | 39  | 21  | 27  | 28  |     |     |    |     |    |     |     |
|      | 堆存状态 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11 | 12  | 13 | 14  | 15  |
|      |      | I   | II  | III | I   |     | I   | III | II  | III |     | II | I   | II | III | I   |
|      |      | 12  | 16  | 21  | 23  |     | 17  | 28  | 15  | 30  |     | 8  | 24  | 17 | 20  | 17  |
| 算例 6 | 任务计划 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |     |    |     |    |     |     |
|      |      | III | I   | III | II  | I   | II  | III | I   | II  |     |    |     |    |     |     |
|      |      | 29  | 42  | 36  | 36  | 17  | 19  | 31  | 33  | 33  |     |    |     |    |     |     |
|      | 堆存状态 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11 | 12  | 13 | 14  | 15  |
|      |      | III | I   | II  | I   |     | III | II  | III | I   |     | II | III | I  | II  | III |
|      |      | 28  | 16  | 17  | 28  |     | 18  | 26  | 15  | 29  |     | 27 | 16  | 19 | 18  | 19  |
| 算例 7 | 任务计划 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11 |     |    |     |     |
|      |      | I   | III | I   | II  | III | I   | II  | III | I   | III | II |     |    |     |     |
|      |      | 21  | 44  | 45  | 46  | 44  | 37  | 43  | 29  | 32  | 30  | 28 |     |    |     |     |
|      | 堆存   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11 | 12  | 13 | 14  | 15  |
|      |      | 16  | 17  | 18  |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |     |     |

|             |                  |          |          |          |          |          |          |          |         |         |          |          |          |          |          |          |
|-------------|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|             | 状态               | I        | II       | I        | III      | II       | III      | I        | III     |         | I        | II       | I        | III      | II       | III      |
|             |                  | I        | II       | III      |          |          |          |          |         |         |          |          |          |          |          |          |
|             |                  | 27<br>25 | 17<br>26 | 11<br>18 | 16       | 30       | 28       | 26       | 25      |         | 26       | 15       | 20       | 30       | 29       | 30       |
| 算<br>例<br>8 | 任务<br>计划         | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8       | 9       | 10       | 11       | 12       |          |          |          |
|             |                  | I        | II       | III      | I        | IV       | III      | II       | III     | I       | IV       | III      | I        |          |          |          |
|             |                  | 23       | 32       | 36       | 29       | 41       | 15       | 34       | 25      | 37      | 31       | 40       | 36       |          |          |          |
|             | 堆<br>存<br>状<br>态 | 1<br>16  | 2<br>17  | 3<br>18  | 4<br>19  | 5<br>20  | 6<br>21  | 7<br>22  | 8       | 9       | 10       | 11       | 12       | 13       | 14       | 15       |
|             |                  | I        | IV       |          | III      | I        | II       | I        |         | III     | II       | IV       | I        | II       | IV       | III      |
|             |                  | 4        | 13<br>14 |          | 24<br>26 | 30<br>29 | 12<br>28 | 26<br>25 |         | 20      | 18       | 19       | 21       | 10       | 26       | 18       |
| 算<br>例<br>9 | 任务<br>计划         | 1<br>16  | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8       | 9       | 10       | 11       | 12       | 13       | 14       | 15       |
|             |                  | III<br>V | II       | V        | I        | III      | IV       | V        | II      | I       | V        | II       | IV       | III      | I        | IV       |
|             |                  | 30<br>34 | 22       | 23       | 17       | 21       | 20       | 32       | 32      | 26      | 29       | 13       | 30       | 20       | 32       | 32       |
|             | 堆<br>存<br>状<br>态 | 1<br>16  | 2<br>17  | 3<br>18  | 4<br>19  | 5<br>20  | 6<br>21  | 7<br>22  | 8<br>23 | 9<br>24 | 10<br>25 | 11<br>26 | 12<br>27 | 13<br>28 | 14<br>29 | 15<br>30 |
|             |                  | V        | IV       |          | I        | III      | V        | II       | III     | IV      | V        | I        |          | III      | V        | IV       |
|             |                  | II       |          | I        | IV       | V        | III      | II       |         | V       |          | IV       | II       | I        | IV       | III      |
|             | 任<br>务           | 1<br>16  | 2<br>17  | 3<br>18  | 4        | 5        | 6        | 7        | 8       | 9       | 10       | 11       | 12       | 13       | 14       | 15       |
|             |                  |          |          |          |          |          |          |          |         |         |          |          |          |          |          |          |

|          |                  |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |    |    |
|----------|------------------|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|----|
| 算例<br>10 | 计<br>划           | I  | V   | III | I   | II  | V  | IV  | III | II  | IV  | I  | V   | III | II | I  |
|          |                  | IV | II  | III |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |    |    |
|          |                  | 28 | 40  | 31  | 16  | 33  | 21 | 32  | 30  | 30  | 29  | 30 | 25  | 22  | 25 | 22 |
|          | 堆<br>存<br>状<br>态 | 36 | 20  | 36  |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |    |    |
|          |                  | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6  | 7   | 8   | 9   | 10  | 11 | 12  | 13  | 14 | 15 |
|          |                  | 16 | 17  | 18  | 19  | 20  | 21 | 22  | 23  | 24  | 25  | 26 | 27  | 28  | 29 | 30 |
| 算例<br>11 | 任<br>务<br>计<br>划 | I  | II  | III | IV  | V   |    | V   | I   | III | II  | IV | III | I   | II |    |
|          |                  | V  | III | IV  | I   | V   |    | III | II  |     | III | I  | IV  | V   | II | IV |
|          |                  | 18 | 27  | 29  | 19  | 7   |    | 15  | 21  | 16  | 20  | 23 | 9   | 26  | 14 |    |
|          | 堆<br>存<br>状<br>态 | 24 | 24  | 22  | 15  | 178 |    | 23  | 19  |     | 18  | 16 | 18  | 23  | 28 | 15 |
|          |                  | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6  | 7   | 8   | 9   | 10  | 11 | 12  | 13  | 14 | 15 |
|          |                  | 16 | 17  | 18  | 19  | 20  |    |     |     |     |     |    |     |     |    |    |
| 算例<br>11 | 任<br>务<br>计<br>划 | I  | V   | IV  | I   | III | II | IV  | III | V   | I   | II | III | IV  | V  | II |
|          |                  | I  | III |     | V   | IV  |    |     |     |     |     |    |     |     |    |    |
|          |                  | 31 | 36  | 53  | 15  | 51  | 39 | 28  | 27  | 35  | 23  | 30 | 44  | 38  | 29 | 47 |
|          | 堆<br>存<br>状<br>态 | 26 | 32  | 36  | 28  | 30  |    |     |     |     |     |    |     |     |    |    |
|          |                  | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6  | 7   | 8   | 9   | 10  | 11 | 12  | 13  | 14 | 15 |
|          |                  | 16 | 17  | 18  | 19  | 20  | 21 | 22  | 23  | 24  | 25  | 26 | 27  | 28  | 29 | 30 |
| 算例<br>11 | 任<br>务<br>计<br>划 | V  | II  | IV  | III | II  | V  | I   | IV  | III | II  | V  | I   | III | IV | II |
|          |                  | V  | I   | III | V   | IV  | II | I   | II  | IV  | II  | V  | IV  | III | I  | IV |
|          |                  | 18 | 28  | 16  | 29  | 30  | 29 | 21  | 23  | 27  | 26  | 26 | 25  | 19  | 27 | 15 |
|          | 堆<br>存<br>状<br>态 | 23 | 20  | 33  | 18  | 25  | 25 | 14  | 22  | 29  | 28  | 14 | 11  | 24  | 15 | 18 |
|          |                  | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6  | 7   | 8   | 9   | 10  | 11 | 12  | 13  | 14 | 15 |
|          |                  | 16 | 17  | 18  | 19  | 20  | 21 | 22  | 23  | 24  | 25  | 26 | 27  | 28  | 29 | 30 |



## 致 谢

在本文的研究和书写过程中，我得到了许多师长、同学的悉心指导和大力帮助。这里特别感谢我的导师计明军教授！从选题、算法设计、初稿修改到最终定稿的整个过程中，计老师付出了很多的心血，提出了很多的有益意见，也给予我许多启发，计明军老师对我的悉心指导和亲切关怀，严谨的治学态度，渊博的学识，宽厚大度、平易近人的作风，尤其对学生的理解和关心给我留下了极其深刻的印象。导师学而不厌、诲人不倦的敬业精神，以及乐于奉献的高尚品德使我终生难忘。在此，谨向导师计明军老师致以衷心的感谢和最崇高的敬意！

论文的研究过程是艰辛的，正是在我的老师、同学、朋友的鼓励 and 帮助下，我得以最终顺利完成此文。感谢交通运输管理学院的老们对我的关爱与照顾；感谢王清斌老师和杨永志老师的宝贵意见；感谢祝慧灵、郭文文、韩富富、孙丽萍、邹广群、程民富和吕尊路等同学对我论文写作及编程方面的指导；感谢我的同门和舍友在我的学习和生活中带给我的激励与鼓舞。

向所有关心、帮助我的老师和同学致以谢意，并衷心的祝愿你们生活幸福！最后，特别感谢辛辛苦苦为我操劳的亲人，感谢他们给予我生活上、学习上的支持和鼓励。

## 作者简介

姓 名：周文杰

性 别：女

出生年月：1990 年 01 月 04 日

民 族：汉族

籍 贯：山东省淄博市高青县

研究方向：集装箱码头场桥调度优化问题

简历：

学习经历

2005.9-2008.6 山东省高青县第一中学 理科 高中

2008.9-2012.6 青岛大学 数学科学学院 数学与应用数学 理学学士 本科

2012.9-2015.1 大连海事大学 交通运输管理学院 物流工程与管理 工学硕士 研究生