



大连海事大学

DALIAN MARITIME UNIVERSITY



Y3369095

硕士学位论文

MASTER DISSERTATION

(全日制学术学位)

论文题目: 集装箱码头自动升降车调度与堆场箱位分配
集成优化

英文题目: Integrated Optimization Model For Automated Lifting Vehicles
Scheduling And Yard Allocation At Automated Container Terminals

作者: 吕家智

指导教师: 曾庆成 教授

学位类别: 工学硕士

专业名称: 交通运输规划与管理

研究方向: 交通运输规划与管理技术

2018年3月



分 类 号 _____
U D C _____

密 级 _____
单位代码 10151

大 连 海 事 大 学
硕士学位论文

集装箱码头自动升降车调度与堆场箱位分配
集成优化

吕家智

指 导 教 师 曾庆成 职 称 教 授

学位授予单位 大 连 海 事 大 学

申请学位类别 工学硕士 学科（专业） 交通运输规划与管理

论文完成日期 2017 年 12 月 答辩日期 2018 年 3 月

答辩委员会主席

**Integrated Optimization Model For Automated Lifting
Vehicles Scheduling And Yard Allocation At Automated
Container Terminals**

A thesis Submitted to

Dalian Maritime University

In partial fulfillment of the requirements for the degree of

Master of Engineering

by

Lv Jiazhi

(Transportation Planning and Management)

Thesis Supervisor: Professor Zeng Qingcheng

December 2017

大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：本论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，撰写成硕士学位论文“集装箱码头自动升降车调度与堆场箱位分配集成优化”。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。

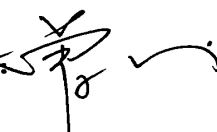
学位论文作者签名： 梁智

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： 梁智 导师签名： 

日期：2018 年 3 月 10 日

摘要

随着经济全球化、区域一体化进程的加快,世界贸易量快速增长,而集装箱运输作为海运进出口贸易的主要运输方式,其作用也越来越明显。国内外各大集装箱码头为了增强竞争力,提高作业效率,都在积极引进先进技术以便实现码头的自动化作业,集装箱码头采用全自动化或半自动化的趋势越来越明显,自动化集装箱码头进入新一轮的快速发展时期。

研究自动化集装箱码头各作业环节之间的相互关系,集成优化各个作业环节,以提高码头整体作业效率,对增强我国集装箱码头整体竞争力意义重大。目前,针对自动化集装箱码头调度优化问题,已有大量学者应用现代优化算法进行求解,但如何实现各作业环节之间的协同优化、如何处理各约束之间的相互关系、从而使数学模型更加符合实际,使求解算法求解效率更高,依然是集装箱码头整体优化的难题。

因此,针对目前研究中的问题,本文首先分析了自动化集装箱码头作业系统,包括码头布局、作业流程、作业设备、装卸工艺等,并对自动化集装箱码头水平搬运系统和堆场作业系统进行分析;然后本文针对自动化集装箱码头中的水平搬运环节和堆场作业环节,以最小化最大完工时间为目标,考虑了各环节装卸作业设备数量、作业时间、作业顺序等诸多因素,建立自动升降车调度与堆场箱位分配集成优化模型。为了求解模型,设计了针对本文所研究问题特性的改进遗传算法。最后,利用不同规模的算例在求解时间和求解质量方面,将本文所提出的算法与精确解及下界值进行了比较。结果表明,本文提出的算法能够有效改善运算效率,并能够在合理时间内对大规模算例求出近似最优解。

关键词: 自动化集装箱码头; 自动升降车调度; 堆场箱位分配

ABSTRACT

With the acceleration of economic globalization and regional integration, the world trade volume has been growing rapidly. As a major mode of transport for the import and export of seaborne shipping, container shipping has also become more and more important. In order to enhance competitiveness and improve operational efficiency, many container terminals at home and abroad are actively introducing advanced technologies in order to realize the automated operation of terminals. The trend of using fully automated or semi-automated container terminals is becoming more and more obvious. The automated container terminal has entered a new round of rapid development.

It is of great significance to study the interrelationship among the operation links of automated container terminals and to integrate and optimize all operation links to improve the overall operation efficiency of the terminals and to enhance the overall competitiveness of container terminals in our country. At present, a lot of scholars have applied modern optimization algorithms to solve the problem of automated container terminal scheduling optimization. However, how to achieve the optimization of each operation link and how to deal with the relationship between the constraints so that the mathematical model is more realistic and the solution algorithm is more efficient, is still the problem of overall optimization of container terminal.

Therefore, in view of the current research problems, this paper analyzes the automated container terminal operating system, including terminal layout, operation flow, operation equipment, loading and unloading technology, and analyzes the automated container terminal horizontal handling system and yard operating system; then aiming at the horizontal handling and yard operations of automated container terminals, an integrated scheduling and synchronization optimization method is proposed to minimize the maximum completion time and take into account the constraints of the number of loading and unloading equipment, working time, work order and so on. In order to solve the model, an improved genetic algorithm is designed for the characteristics of the problem studied in this paper. Finally, the algorithm proposed in this paper is compared with the exact solutions and lower bounds in solving the problem of time and solving the quality problems by using different scale examples. The results show that the heuristic proposed in this paper can improve the computational efficiency and find the approximate

optimal solution to the large-scale study in a reasonable time.

Key Words: Automated Container Terminal; ALV Scheduling; Yard Allocation

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 国内外研究现状及分析	2
1.2.1 岸桥调度问题研究综述	3
1.2.2 水平搬运设备调度问题研究综述	3
1.2.3 堆场作业问题研究综述	4
1.2.4 各环节集成调度问题研究综述	5
1.3 论文结构	7
1.4 研究技术路线	8
第 2 章 自动化集装箱码头作业系统概况	10
2.1 自动化集装箱码头简介	10
2.1.1 自动化集装箱码头的优点	10
2.1.2 自动化集装箱码头与传统集装箱码头的区别	10
2.2 自动化集装箱码头作业系统分析	11
2.2.1 自动化集装箱码头作业流程	11
2.2.2 自动化集装箱码头作业设备	13
2.2.3 自动化集装箱码头装卸工艺	15
2.3 自动化集装箱码头水平搬运系统介绍	16
2.3.1 自动化集装箱码头 AGV 系统	16
2.3.2 自动化集装箱码头 ALV 系统	17
2.4 自动化集装箱码头堆场作业系统介绍	17
2.4.1 自动化集装箱码头堆场集装箱布局与堆存规则	17
2.4.2 自动化集装箱码头堆场作业设备调度规则	19
2.4.3 影响堆场作业效率的因素	19
2.5 本章小结	20

第 3 章 ALV 调度与堆场箱位分配集成优化模型	22
3.1 问题描述	22
3.2 模型构建	22
3.2.1 模型假设.....	22
3.2.2 模型构建.....	23
3.3 本章小结	30
第 4 章 求解算法.....	31
4.1 遗传算法简介	31
4.2 遗传算法设计	32
4.2.1 染色体编码.....	32
4.2.2 初始种群生成.....	32
4.2.3 计算目标函数.....	33
4.2.4 计算适应度函数.....	34
4.3 遗传操作	35
4.3.1 选择.....	35
4.3.2 交叉.....	35
4.3.3 变异.....	37
4.4 本章小结	38
第 5 章 算例分析.....	39
5.1 参数设置	39
5.2 模型下界	40
5.3 小规模算例	40
5.4 大规模算例	40
5.5 本章小结	42
第 6 章 总结与展望.....	43
6.1 总结	43
6.2 展望	43
参 考 文 献.....	45

目 录

攻读学位期间公开发表论文.....	49
致 谢.....	49

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

近年来,受经济全球化进程加快的影响,世界范围内货物贸易量迅速增长。据统计,世界贸易中有 90%以上采用海运方式运输,而集装箱运输作为海运进出口贸易的主要运输方式,承担着其中超过 50%的货物运输^[1]。随着集装箱运输在世界范围内的进一步发展以及集装箱运输网络的不断完善,集装箱化比例会不断增加,各集装箱码头吞吐量也将随之急剧增长,给集装箱码头造成了很大的压力。

据统计,集装箱船舶约有 60%的时间停泊在码头,于是,船舶在港时间的长短成为了决定集装箱运输效率的重要因素^[2]。各大集装箱码头如果想要吸引更多的船舶靠泊,则必须提升自身码头的装卸作业效率,缩短船舶在港时间,从而增加码头的竞争力。

目前,码头经营者如果想要提高集装箱码头装卸作业效率,可以从以下方面入手:

1、增加码头作业设备数量。增加码头作业设备数量是一种有效提高码头作业服务效率的途径,但是与此同时需要为其配备大量的作业人员,导致运营成本和管理难度增大;

2、采用自动化作业设备。随着科学信息技术、自动化技术的迅速发展,传统集装箱码头向自动化集装箱码头(Automated Container Terminal, ACT)转变发展的趋势越来越明显。采用自动化设备能够降低人为操作不确定因素对码头整体作业效率的影响,提高码头整体服务水平,从而增加码头竞争力;

3、对码头各环节作业进行合理调度。

因此,在限制码头作业设备数量的条件下,采用新型自动化作业设备以及对集装箱码头各环节作业设备进行合理调度是提高作业效率,改善服务水平,从而缩短船舶在港时间的重要途径。另外,合理的作业调度计划可以确保整个集装箱码头生产作业系统中各个环节都有序进行,从而保证了集装箱码头作业系统整体的稳定性。

1.1.2 研究意义

船舶的大型化发展对集装箱码头的装卸作业效率提出了更高的要求,然而,随着各大码头集装箱装卸量越来越多,传统的集装箱码头无论是在装卸工艺、设备配置、设备调度还是码头布局上,对想要进一步提高码头整体的装卸作业效率都存在一定局限。因此,为了提升码头自身的竞争力,提高装卸效率,国内外各大集装箱码头都在积极引进先进技术,不断优化作业设备调度方法,持续改善码头装卸工艺,以便实现码头的自动化作业。由此可见,采用现代化技术来实现集装箱码头自动化的趋势已经愈发明显,集装箱码头装卸作业的自动化、智能化和信息化已然成为提高码头竞争力的关键因素。在此背景下,积极研究探索自动化码头各作业环节之间的相互关系,以实现优化各个作业环节,提高码头整体作业效率,是适应集装箱码头发展的新趋势且具有重要的现实意义。

自动化集装箱码头作业系统通常由岸边装卸船作业、水平搬运作业和堆场作业三个重要作业环节组成,各个作业环节之间相互影响、相互制约。在优化集装箱码头各作业环节时,理论上讲,每个作业环节的优化模型都属于 NP-hard 问题。由于 NP-hard 问题的复杂性,在模型构建、求解所需时间、所得解的质量等方面,都存在一定难度和挑战。而如果想要对码头内各作业环节进行集成优化,显而易见,问题的复杂程度及求解难度会进一步提高。由此可见,集装箱码头整体作业调度优化问题是多目标、多约束的复杂组合优化问题,不仅需要考虑各作业环节之间的相关关系,还要考虑各种复杂的约束条件。目前,针对集装箱码头调度优化问题,已有大量学者应用例如遗传算法、模拟退火算法、神经网络算法等现代优化算法进行求解,但如何实现各作业环节之间的协同优化、如何处理各约束之间的相互关系、从而使数学模型更加符合实际,使求解算法求解效率更高,依然是集装箱码头整体优化的难题,其对于集装箱码头整体作业系统效率的提高具有广泛的实际意义和应用价值。

1.2 国内外研究现状及分析

集装箱码头一直是国内外学者研究的热点。由于集装箱码头是由多个作业环节构成的复杂系统,所以国内外学者针对各个作业环节从不同的角度展开了大量的研究。其中,Steenken 等^[3]、Stahlbock 和 Voß^[4]、Carlo 等^[5]对集装箱码头运营调

度相关研究进行了文献综述。接下来本文针对已有的岸桥调度、水平搬运设备调度和集装箱堆场堆存位置优化相关研究进行简要回顾与分析。

1.2.1 岸桥调度问题研究综述

在集装箱码头多种装卸作业设备中，能否对岸桥进行合理调度是制约码头效率的主要瓶颈，也是决定集装箱码头吞吐能力的主要因素^[6]。因此，国内外许多学者针对在集装箱码头中如何优化岸桥调度进行了研究。其中，Daganzo^[7]以最小化船舶总延误成本为目标函数，针对码头前沿岸桥作业环节建立模型；Peterkofsky 和 Daganzo^[8]在 Daganzo^[7]的基础上，为了减少船舶在港时间，加快码头装卸作业，将码头前沿装卸作业视为多个相同机器并行作业问题，按照调度理论建立模型，并采用分枝定界法进行求解；Kim 和 Park^[9]针对岸桥调度问题，在建立模型时考虑多种约束，并采用两种求解方法进行求解；Lee 等^[10]考虑了岸桥在进行作业时，相互之间存在干扰的情况，在此基础上建立模型并采用遗传算法求解。

1.2.2 水平搬运设备调度问题研究综述

水平搬运设备是衔接码头前沿作业和堆场作业环节的重要设备，其合理的调度会影响各环节作业设备在对接时的等待时间。目前，在自动化集装箱码头常见的水平搬运设备有 AGV (Automated Guided Vehicle, 自动导引车) 和 ALV (Automated Lifting Vehicle, 自动升降车) 两种。国内外学者无论是针对自动化集装箱码头还是传统集装箱码头的水平运输环节都进行了大量的研究。其中，曹庆奎等^[11]针对港口集卡路径优化问题，以集卡路径总成本最小为目标建立模型，并利用遗传蚁群算法进行求解；曾庆成和杨忠振^[12]为了最小化岸桥等待时间，研究集卡调度问题并建立了动态的集卡调度模型，提出一种基于 Q 学习算法的新方法对模型进行求解；Rashidi 和 Tsang^[13]将 AGV 调度问题转化为最小成本流模型，采用两种不同的算法——NSA+和 GVS 进行求解；Kim 和 Bae^[14]以 AGV 行驶时间和岸桥延误时间最小为目标，对 AGV 调度进行优化研究，提出混合整数规划模型；Angeloudis 等^[15]研究在不确定条件下的 AGV 调度问题，并设计算法对问题进行求解，实现对 AGV 的实时控制；Briskorn 等^[16]针对 AGV 调度问题基于库存管理提出一种新的建模思路，并采用精确算法进行求解；Kim 和 Kim^{[17][18]}研究了单一水平搬运设备的路径优化问题，以最小化设备行驶时间为目标建立模型，并采用动态规划优化算法进行

求解; Kim 和 Kim^[19]针对同一问题,采用束搜索算法对模型进行求解。另外, Lee 等^[20]主要研究了水平搬运设备中常见的 AGV 和 ALV,建立混合整数规划模型,并采用分支定界法、切割平面法等对模型进行求解; Bae 等^[21]通过仿真实验,对 AGV 和 ALV 的运营效率进行了比较; Yang 等^[22]通过建立垂直布局的自动化集装箱码头仿真模型,分析了与 AGV 相比,ALV 的数量变化对码头效率的影响; Nguyen 和 Kim^[23]采用一种新的思路研究 ALV 调度问题,考虑了缓冲区容量的约束并将其转化为时间窗约束以便于求解; 余孟齐和韩晓龙^[24]考虑缓冲区约束,则同时考虑了 ALV 和岸桥,建立了以 ALV 行驶时间和岸桥作业延误时间之和最小为目标函数的混合整数规划模型; 汤鹏飞等^[25]在考虑岸桥缓冲区容量限制的基础上,同样考虑了缓冲区容量的约束,研究 ALV 调度问题,并以岸桥延误时间和等待时间、ALV 行驶时间的总时间最小为目标建立数学模型,并采用遗传算法进行求解。

1.2.3 堆场作业问题研究综述

堆场是集装箱码头用来堆存集装箱的区域,堆场作业设备的合理调度以及集装箱在堆场堆存位置的合理分配对改善作业环节有效衔接效果明显。因此,许多学者针对堆场作业环节开始大量的研究。其中, Vis 和 Carlo^[26]以最小化 ASC(Automated Stacking Crane, 自动化场桥)作业时间为目标,研究穿越式双 ASC 在单个箱区内的合作调度问题; Park 等^[27]提出了基于局部搜索的启发式算法求解双 ASC 协调作业问题; Domdorf 等^[28]以高峰作业期,最大化场桥作业效率,防止作业延误为目标,研究场桥调度方法; He 等^[29]考虑场桥作业效率和能源消耗之间的平衡,针对场桥调度问题,同时考虑作业效率和能源消耗,将场桥调度问题转化为具有软时间窗的车辆路径优化问题,并以最小化场桥作业延误时间及能源消耗为目标函数建立模型; Li 等^[30]考虑场桥之间相互干扰、安全距离、同时存取集装箱等约束条件,建立连续时间混合整数规划模型; Gharehgozli 等^[31]以场桥完成所有作业任务所需移动时间最短为目标,建立连续整数规划模型,并采用两阶段求解算法对模型进行求解; 张笑菊等^[32]以最小化场桥装卸作业的移动时间及翻箱时间为目标,建立出口集装箱装船顺序优化模型,并设计启发式算法求解。

由于港口土地资源有限,而堆场在码头中占据大部分土地,因此堆场箱区集装箱的堆存位置是重要资源,目前,已有许多学者针对集装箱堆场堆存位置展开了广

泛研究。Chen 等^[33]以最小化堆场使用面积为目标,设计遗传算法求解一般的堆场分配问题。Kim 和 Kim^[34]通过分析当集装箱到达率为常量、周期性变化和动态变化时,研究如何为进口集装箱分配堆存位置已达到期望翻箱总量最小。Preston 和 Kozan^[35]以设备作业的准备时间和运输时间之和最小为目标,研究在不同集装箱装卸作业调度的情况下,为集装箱分配最优的堆存位置。Nishimura 等^[36]研究中转集装箱在堆场的堆存位置分配问题,并采用拉格朗日松弛算法进行求解。Lee 等^[37]研究中转码头堆场堆存位置分配问题,为减少交通拥堵,提出一种新的工作量平衡方法,为减少翻箱,提出将集装箱分组的新策略,建立混合整数规划模型,并采用 Cplex、序列法和列生成方法进行求解。Zhang 等^[38]采用滚动计划的方法研究堆存位置分配问题,建立双层混合整数规划模型,在每一个计划区间内,问题被分解成两层:第一层决定每个堆场箱区内堆存的集装箱总量,第二层决定每条船的集装箱数量。Bazzazi 等^[39]在 Zhang 等^[38]的研究基础上,进一步考虑空箱和冷藏箱,并设计遗传算法进行求解。

1.2.4 各环节集成调度问题研究综述

由于集装箱码头是由多个作业环节组成的复杂系统,各个作业环节之间是否能够相互协调作业会在很大程度上影响码头整体的作业效率。因此,除了对集装箱码头单个环节的研究,国内外学者针对个各作业环节的集成优化也进行了诸多研究。其中,Tang 等^[40]考虑岸桥和内集卡的协同作业,以最小化完工时间为目标,建立混合整数规划模型,并采用一种新的改进粒子群算法求解。Chen 等^[41]针对岸桥与集卡的集成调度问题,设计了一种三阶段求解算法,第一阶段优化岸桥调度计划,第二阶段根据第一阶段求解的任务优先级顺序进行集卡路径优化,第三阶段通过析取图得出完整的调度方案。Kaveshgar 和 Huynh^[42]针对进口集装箱卸船作业,对岸桥和集卡进行集成调度研究,同时考虑诸如任务优先级、岸桥之间的相互干扰等约束条件,建立混合整数规划模型。周静娴和胡志华^[43]同时针对 ALV 和岸桥调度集成优化问题,考虑时间窗约束,建立双目标混合整数规划模型。

Cao 等^[44]针对进口集装箱的堆场内集卡和场桥,进行集成优化,并采用基于本德分解方法的算法进行数学模型的求解。Lau 和 Zhao^[45]针对岸桥调度作业已知的情况,研究自动化集装箱码头 AGV 和场桥的集成调度问题,并通过遗传算法进行

求解。

Kozan 和 Preston^[46]研究堆场堆存位置和作业设备调度集成问题,提出了一种利用位置和传输反馈来求解模型的迭代搜索算法。Lee 等^[47]研究在双循环装卸作业模式下,针对车辆调度和堆存位置分配问题,以延误惩罚和行驶时间加权总成本最小为目标,建立模型并设计混合插入算法进行求解。Bish^[48]将集装箱码头车辆调度问题和堆存位置分配问题进行集成研究,以最小化最大完工时间为目标建立模型,并设计启发式算法进行求解。Zeng 等^[49]提出了一种集装箱码头装卸作业调度仿真优化方法。Luo 和 Wu^[50]针对集装箱码头中 AGV 调度以及集装箱在堆场的堆存位置分配问题,同时考虑装船和卸船作业,进行集成优化。BISH 等^[51]研究 AGV 调度和堆场分配问题,并考虑岸桥的装卸调度,采用启发式算法进行求解,并对算法性能进行了分析。宓为建等^[52]同时考虑进口集装箱在堆场位置分配与 ALV 路径优化问题。

陈超等^[53]以集卡行驶距离最短为目标函数,构建离散泊位状况下泊位-集卡-箱区协调调度混合整数规划模型。陈超等^[54]为了最小化码头整体运营成本,建立混合交叉作业模型并设计了双层遗传算法求解模型。Wu 等^[55]考虑了多种不同类型作业设备,同时还考虑了集装箱在堆场的堆存策略,建立线性混合整数规划模型,为了减少求解时间,还建立了非线性混合整数规划模型,并通过算例对两种模型进行了比较。曾庆成等^[56]研究同贝同步装卸调度问题,并将其抽象为一类特殊的混合流水线问题,建立同贝同步装卸的优化调度模型,并设计基于禁忌搜索与启发式分配规则的求解算法对模型进行求解。

目前,为了提高作业效率及作业设备的利用率,在实际集装箱码头中,很多已经采用双循环装卸模式,国内外学者针对双循环装卸模式也展开了一定研究。其中,Goodchild 和 Daganzo^[57]提出一种方法评估采用双循环装卸作业模式的集装箱码头的岸桥操作量和作业时间的减少,研究表明,双循环装卸作业模式可以显著改善码头的生产效率。Zhang 和 Kim^[58]在 Goodchild 和 Daganzo^[57]的基础上,考虑了舱口和舱口内堆垛的排序问题。Lee 等^[59]研究在双循环装卸作业模式下,集装箱中转码头的车辆派遣问题。胡祥培等^[60]建立了同贝同步装卸作业的整数规划模型,设计了基于遗传算法和贪婪规则的混合求解算法。

综上所述,可以发现,集装箱码头作业系统作为一个由多个作业环节组成的整体,只有各环节相互协调作业,才能最大化码头的效率。而在目前已有的研究中,大多数研究还是集中在单个作业环节的优化上,针对集装箱码头的集成优化研究在模型建立、约束处理及求解方法上仍存在一定问题。另外,在已有研究中,关于集装箱码头采用双循环装卸作业模式的研究还很少。

1.3 论文结构

本文具体由以下六章内容构成:

第一章为引言。本章从研究背景和研究意义入手,分析本文研究的必要性,接着简要介绍本文各章主要研究内容及整体的研究思路。另外,将国内外学者针对集装箱码头展开的研究,按照岸桥调度问题、水平搬运设备调度问题、堆场作业问题及各环节集成调度等不同研究角度进行总结与分析,为本研究后续章节提供理论基础。

第二章对自动化集装箱码头作业系统概况进行了介绍。首先,分析了与传统集装箱码头相比,自动化集装箱码头的主要区别及优势;接着又从作业流程、作业设备及装卸工艺等方面对自动化集装箱码头作了较为详细的介绍;最后对码头内联系较为紧密的两个作业环节,也是本文的主要研究对象——水平搬运系统和堆场作业系统进行了介绍。

第三章介绍数学模型的建立。首先对本文所研究问题进行简要描述,然后为了便于模型的构建,提出了一些假设条件,最后建立了以最小化最大完工时间最短为目标函数的混合整数规划模型。

第四章介绍了本文设计的基于遗传算法的启发式求解算法。首先简要概述了传统遗传算法的步骤,然后详细论述了本文在传统遗传算法的基础上,针对本文研究问题的特点所设计的遗传算法。

第五章为算例分析。本章的目的在于通过不同规模的算例验证本文建立的模型和设计的算法的正确性和有效性。

第六章对全文进行总结和展望。阐述了本文的主要结论,并针对本研究存在的不足,对今后的研究方向进行了展望。

1.4 研究技术路线

本文的研究技术路线如图 1.1 所示, 首先, 针对自动化集装箱码头作业系统中的各个作业环节进行了分析; 然后, 本文在国内外学者针对集装箱码头已有研究的基础上, 为了方便建立数学模型, 提出一些假设, 然后考虑诸如作业设备数量、作业时间等约束, 以最小化最大完工时间建立了针对自动化集装箱码头中水平搬运环节和堆场作业环节的集成优化模型; 接着, 在传统遗传算法的基础上, 结合本文研究对象的特点, 提出了基于遗传算法的启发式算法用于求解模型; 为了验证本文所建模型的正确性以及所设计算法的有效性, 进行了不同规模的数值算例, 并对求解时间和求解质量进行了比较; 最后, 对全文的研究进行总结归纳, 并针对本研究的不足, 提出未来可进一步研究的方向。

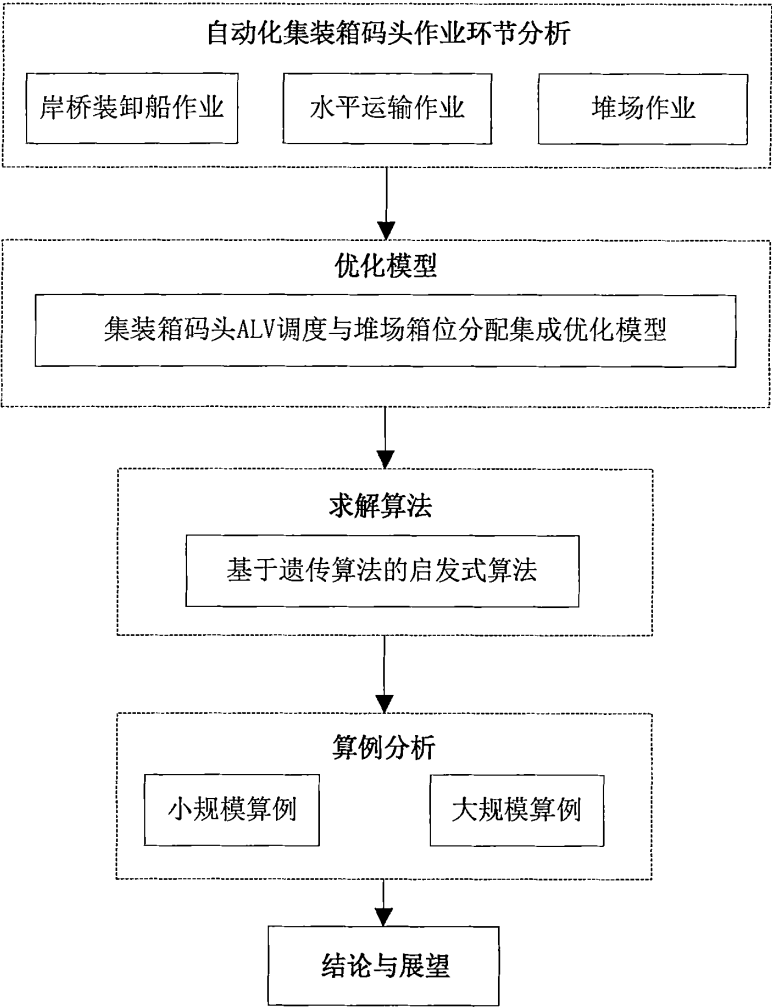


图 1.1 研究技术路线

Fig. 1.1 Research technical route

第2章 自动化集装箱码头作业系统概况

2.1 自动化集装箱码头简介

2.1.1 自动化集装箱码头的优点

为了降低运输成本，越来越多的船舶经营人采用大型化船舶进行集装箱运输，并对在港停留时间提出了更高的要求，从而加速船舶周转。国内外各个集装箱码头为了提高服务水平和作业效率，逐渐向作业自动化和管理信息化转型。

对比传统集装箱码头，自动化集装箱码头具备以下优点：

（1）减少劳动力成本和运营费用。在自动化集装箱码头中，原来在传统集装箱码头中需要由人工劳动力完成的作业任务大部分都由自动化设备替代，从而减少了人工费用，另外，自动化作业系统能够提升运营效率，进而降低码头整体运营费用；

（2）提高沟通效率。自动化集装箱码头除了采用自动化作业设备外，在码头管理系统方面，也应用了大量的数字信息技术，以此来保证信息在港口内部企业之间、港口与客户之间流动的高速、高效，从而保证集装箱装卸作业速度；

（3）提高码头内土地利用率。在自动化集装箱码头中，水平搬运设备无需进入堆场内部，从而极大提高了堆场土地面积的利用率；

（4）绿色环保。自动化集装箱码头中作业设备多采用电力驱动，可以减少污染，更加的绿色环保；

（5）24小时高效连续作业。由于码头作业的特殊性，需要保持24小时连续作业，以保证港内的集装箱能够快速周转，在港停留船舶能够尽快离港，与传统集装箱码头采用人工劳动力相比，自动化集装箱码头采用自动化作业设备，效率更高，稳定性更好。

2.1.2 自动化集装箱码头与传统集装箱码头的区别

与传统集装箱码头相比，自动化集装箱码头在布局形式、装卸工艺、自动化水平、初始投资等很多方面都存在明显区别，具体如表2.1所示：

表 2.1 自动化集装箱码头与传统集装箱码头的区别

Tab. 2.1 The difference between the automated container terminal and the traditional container terminal

区别	传统集装箱码头	自动化集装箱码头
码头布局形式	水平布局	垂直布局
装卸工艺	岸桥-集卡-轮胎式场桥	岸桥-AGV/ALV-自动化轨道式场桥
信息技术	相对较少	无线局域网、数字信息技术等
信息交换	相对独立	同步协调
自动化水平	相对较低	相对较高
初始投资	相对较小	相对较大
生产能力	相对较小	相对较大
对环境的影响	有污染	绿色环保、节能减排

2.2 自动化集装箱码头作业系统分析

2.2.1 自动化集装箱码头作业流程

（一）进口流程

在船舶到港前，码头计划工作人员根据船公司发来的船舶近期计划，制定泊位计划，并确定船舶进口箱的堆存箱区、作业设备。另外，还需编制卸船作业顺序单和堆场堆存计划。在船舶到港靠泊后，首先按照卸船顺序单由岸桥进行卸船作业，再由水平搬运设备将进口集装箱按照计划好的作业线路运输至指定堆场，最后由场桥根据堆场计划将水平搬运设备运来的进口集装箱存放至指定箱位。

如图2.1所示，集装箱货物进口流程具体可分为以下步骤：

- 1) 集装箱船舶到港靠泊；
- 2) 岸桥从船上卸下目标进口箱；
- 3) 由水平运输搬运设备将进口集装箱送至目标堆场；
- 4) 由场桥将水平搬运设备运输过来的集装箱堆放至堆场指定箱位；
- 5) 外部集卡集港，行驶至堆场提取进口集装箱，再通过码头闸口出港；
- 6) 收货人验收集装箱货物。

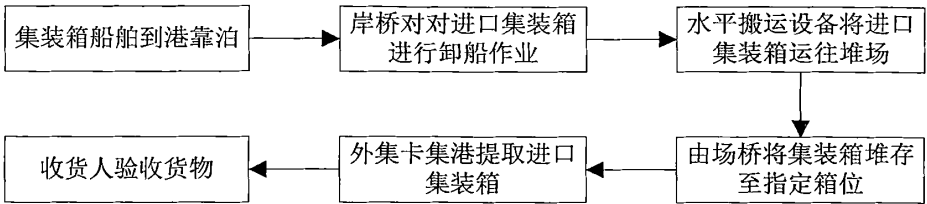


图2.1 集装箱进口流程

Fig.2.1 Container import process

(二) 出口流程

在进行码头装船作业前，配载员需要根据配船图、装箱单、场站收据进行配载，还需编制装船作业顺序单。在进行装船作业时，首先堆场根据装船作业顺序进行发箱，由场桥将出口集装箱装到水平搬运设备上，然后由水平搬运设备将出口集装箱运至码头前沿指定岸桥处，再由岸桥将出口集装箱装载至船上指定箱位。当堆场中所有待装船出口集装箱全部被装载至船舶时，装船作业结束，船舶驶离码头，前往目的港。

如图2.2所示，集装箱货物出口流程具体可分为以下步骤：

- 1) 货主或货运代理人 与船公司或船舶代理人联系订舱，确定船舶航次及舱位等；
- 2) 提取空箱，并将需要出口装船的货物装入集装箱；
- 3) 由外部集卡将待出口的集装箱运送至码头堆场，卸箱完成后，空车经闸口离开码头；
- 4) 目标集装箱船舶到港靠泊；
- 5) 由场桥将待装船集装箱从箱位提取出来；
- 6) 水平搬运设备将待装船的集装箱从堆场运输至码头前沿；
- 7) 由岸桥将待装船集装箱装船；
- 8) 装船完毕，集装箱船舶驶离码头，前往目标港。

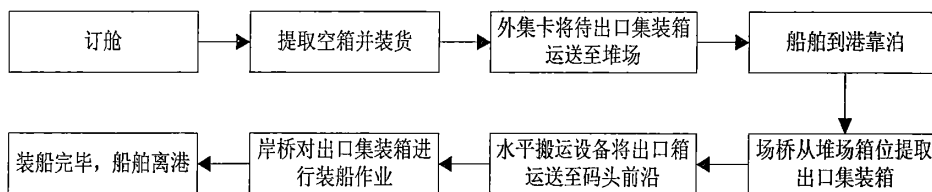


图2.2 集装箱出口流程

Fig.2.2 Container export process

2.2.2 自动化集装箱码头作业设备

如图2.3所示, 自动化集装箱码头作业设备主要包括三类: 码头前沿装卸设备、水平搬运设备和堆场作业设备。

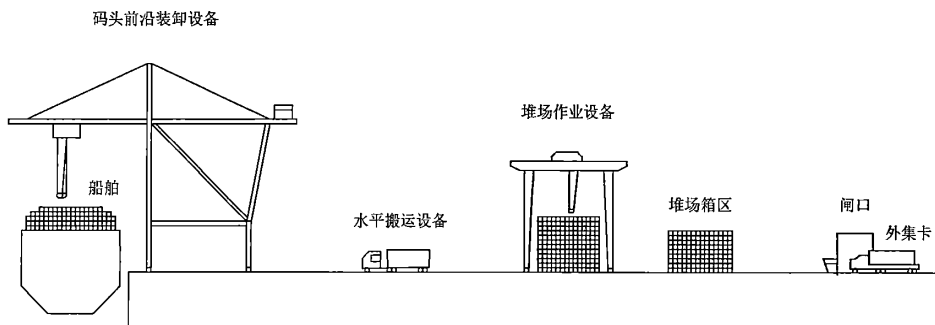


图2.3 集装箱码头作业设备

Fig.2.3 Container terminal operation equipment

(一) 码头前沿装卸设备

自动化集装箱码头前沿装卸作业设备主要采用岸壁集装箱装卸桥 (Quay Crane, QC, 简称岸桥) 对船舶进行装卸作业, 其主要工作是将进口集装箱从船舶卸载到码头前沿以及将出口集装箱装载至船舶指定箱位。岸桥作为集装箱码头最大型、成本最高的装卸作业设备, 其配置情况会决定码头能够进行装卸作业的最大船型。

在自动化集装箱码头中, 受岸桥作业条件及自身结构的限制, 目前只实现了岸桥的半自动化运作, 例如岸桥陆侧的对位操作以及双小车岸桥陆侧小车作业等, 岸桥全自动化技术仍在探索之中, 未广泛应用于实际的集装箱码头作业之中。

（二）水平搬运设备

自动化集装箱码头水平搬运设备主要采用AGV、ALV对集装箱进行运输作业，其主要工作是将进口集装箱从码头前沿运输到堆场以及将出口集装箱从堆场运输至码头前沿。

AGV作为自动化集装箱码头水平运输的主要设备，它能够在计算机的监控下，按照码头内路径规划以及作业要求，沿着固定路线将集装箱运输至指定地点，自动完成一系列装卸作业。目前，一些自动化集装箱码头采用ALV替代AGV进行水平搬运作业。通过在岸桥下方和堆场箱区前设置缓冲区，ALV可以直接从缓冲区内提箱和卸箱，从而减少ALV与QC、AYC（Automated Yard Crane，自动化场桥）之间的等待时间，加快码头整体作业速度。已有研究表明，与AGV相比，ALV的单位作业成本更少，更能提高码头整体的生产作业效率^{[21][22]}。

由于自动化集装箱码头水平搬运设备能够连续不间断地作业，保证了自动化集装箱码头作业系统的连续性，因此在国内外很多自动化集装箱码头都得到了广泛的应用。

（三）堆场作业设备

按照行走方式的不同，自动化集装箱码头堆场作业设备可以分为自动化轨道式龙门吊（Automated Rail-Mounted Gantry Crane，ARMG）或自动化轮胎式龙门吊（Automated Rubber-Tyred Gantry Crane，ARTG）两种，其主要工作是负责堆场集装箱的装卸、搬运以及堆放。

其中，自动化轨道式龙门吊在码头内只能沿着固定轨道行驶，其可移动范围是有限的。但与自动化轮胎式龙门吊相比，自动化轨道式龙门吊稳定性更高，更容易实现全自动化作业。因此，现有的自动化集装箱码头大都采用自动化轨道式龙门吊进行堆场装卸作业。

与自动化轨道式龙门吊相比，自动化轮胎式龙门吊在码头内行驶路线更加灵活，机动性更好，更加方便实现在不同堆场之间或同一堆场不同箱区之间的转移作业，但其稳定性较差。随着技术的进步，目前轮胎式龙门吊的自动化程度也在不断提高。

2.2.3 自动化集装箱码头装卸工艺

在码头作业经营过程中,装卸工艺是码头生产作业的基础,能够极大地影响码头整体的生产作业效率,是码头现代化的标志。合理的码头装卸工艺不仅能够更加安全、经济地完成码头装卸作业,还能够提高码头整体的装卸作业效率。随着船舶大型化的发展以及港口之间竞争的日趋激烈,各大港口都在积极探索更加安全高效的码头装卸工艺方案。

按照各作业环节采用的作业设备的种类不同,目前,常见的装卸工艺有以下几种:

(一) 岸桥+AGV+ARMG

采用这种装卸工艺的集装箱码头,首先,由岸桥将集装箱从船舱内吊起卸载至在岸桥下方等候的 AGV 上;然后,由 AGV 将目标箱运输至指定堆场;最后,由 ARMG 将目标箱从 AGV 上提起并堆存至指定箱位,同时,AGV 返回继续完成下一个作业任务。荷兰鹿特丹港联合(ECT)码头采用的就是此种装卸工艺方案;鹿特丹港 Europe Combined Terminals (ECT) 的 Euromax 自动化集装箱码头在此种工艺方案的基础上,采用双小车岸桥进行岸边装卸船作业,加快了作业循环速度;;德国汉堡港的 CAT 自动化集装箱码头在此基础上,堆场作业采用穿越式 ARMG,即在堆场为每一箱区配备两台一高一低的 ARMG,这两台 ARMG 运行在两个不同的平行轨道上,能够相互穿越,提高了堆场装卸作业效率。

(二) 岸桥+AGV+ARTG

在此种装卸工艺方案中,将方案(一)中的ARMG替换为ARTG。日本 Tobishima 自动化集装箱码头采用的就是此种装卸工艺方案。

(三) 岸桥+ALV+ARMG

在此种装卸工艺方案中,水平运输作业由ALV完成。APM Maasvlakte II 自动化集装箱码头采用的就是此种装卸工艺方案。

在设计集装箱码头装卸工艺方案时,应尽量减少装卸作业次数,以减少作业设备的磨损和能源的消耗,从而减少码头装卸作业成本。在设计集装箱货物运输路线时,应尽量缩短运输的时间和空间。同时,应考虑码头不同作业环节之间的协调性,

以保证码头整体作业系统能够高效的生产运作。

2.3 自动化集装箱码头水平搬运系统介绍

如图2.4所示，自动化集装箱码头由岸边装卸船作业、水平搬运作业和堆场作业等三个环节组成，其中，在水平搬运环节通常采用的设备是AGV和ALV两种。

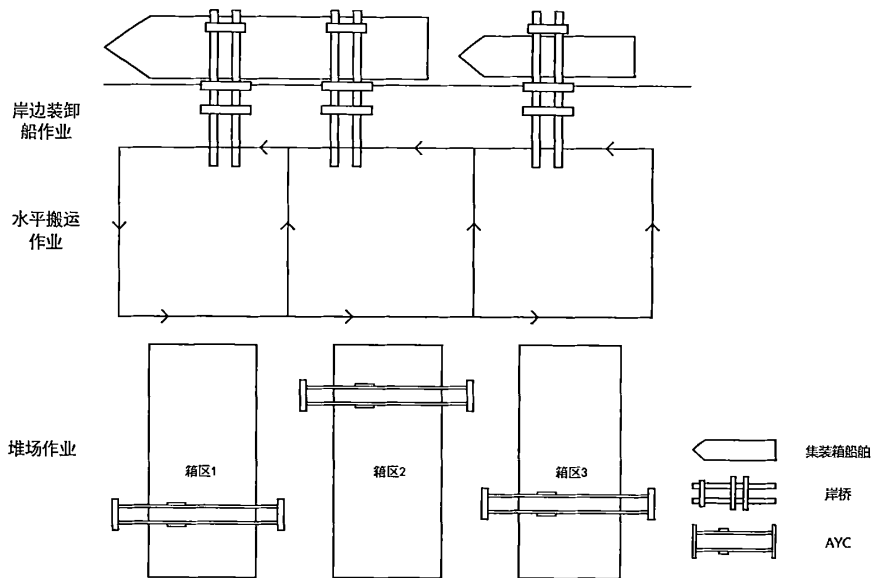


图2.4 自动化集装箱码头作业环节

Fig.2.4 Automated container terminal operation

2.3.1 自动化集装箱码头 AGV 系统

采用 AGV 作为水平搬运设备的自动化集装箱码头，

AGV 的作业流程如下（以进口集装箱为例）：首先，AGV 根据中控室的指令行驶至岸桥下方，通过岸桥上探测器向中控室的反馈，中控室能够保证 AGV 准确停在指定位置；在岸桥将进口集装箱卸载至指定 AGV 后，中控室向 AGV 发送一系列指令，包括安全避碰、行驶路径、作业顺序等，以保证 AGV 将目标箱运输至堆场；当 AGV 行驶到堆场前交接区域后，中控室向 ASC 发送取箱指令，最后由 ASC 根据指令将目标箱堆存至指定箱位。

2.3.2 自动化集装箱码头 ALV 系统

采用 ALV 作为水平搬运设备的自动化集装箱码头，ALV 的作业流程如下（以出口集装箱为例）：首先，ASC 根据中控室指令将目标出口集装箱从箱位提取后，放至堆场前缓冲区，等待 ALV 到达后，直接从堆场前缓冲区提起目标箱运输至码头前沿，到达岸桥下方后，ALV 将目标箱直接卸至海侧缓冲区，最后由岸桥将目标箱从海侧缓冲区直接提起装至船舱。需要注意的是，如果缓冲区容量已满，则 ALV 需要等待，直至缓冲区有容量堆存集装箱，ALV 将目标箱放至缓冲区后才可继续完成下一个作业任务。

作为自动化集装箱码头重要组成部分，水平搬运系统运行效率在很大程度上会影响码头整体的装卸作业效率，因此，有必要建立一套成熟的水平搬运系统，对水平搬运配备数量、行驶路线、调度规则、任务分配以及交通控制等进行合理规划和设计。

2.4 自动化集装箱码头堆场作业系统介绍

集装箱码头中堆场主要用于集装箱的装卸、堆存及交接。另外，由于船舶和车载货量相差悬殊，堆场能够起到缓冲作用，在一定程度上保证了码头作业的连续性。

由此可见，堆场在集装箱码头系统中是非常重要的作业环节，因此，为了适应船舶大型化的趋势，提高码头整体的装卸作业效率，一些国内外集装箱码头都逐渐着手建设其自动化堆场。采用自动化堆场作业设备代替人工完成堆场的装卸作业任务，实现集装箱码头堆场的无人化、智能化、自动化作业，从而在减少了堆场劳动力成本的同时，也大大地提高了堆场的装卸作业效率，从而提高了码头整体的服务水平。

2.4.1 自动化集装箱码头堆场集装箱布局与堆存规则

堆场作为集装箱码头生产作业系统中非常重要的一个环节，其作业效率将会直接影响码头整体的作业效率，而合理的堆场箱区布局及集装箱堆存规则不仅能够减少堆场的翻箱率，从而提升堆场作业设备的装卸作业效率，还能提高堆场的利用率，降低码头整体的生产作业成本。

（一）堆场布局原则

在考虑堆场布局时，应合理利用码头空间资源，最大化空间利用率，同时，平面布局尽量紧凑，以降低作业设备的水平移动距离。针对码头各个作业区域的空间划分，应尽量满足相互之间互不干扰，保证各作业环节都能够正常进行生产作业。例如，集装箱维修保养区应布置在靠近维修车间的区域，一方面便于取送和维修，另一方面，也可以减少对码头内部装卸作业的干扰。

另外，在设计堆场布局时，应根据货量、航次、客户、船舶的重要性，对重要客户、重点船舶、重点航次的集装箱优先安排进行装卸作业，并选择靠近泊位的箱区进行堆存，以减少作业设备的移动距离，从而一方面保证了重要客户、重点航线的装卸作业效率，提高了服务水平，稳定了客源和货源，另一方面，也提高了作业设备的利用率，减少了码头的运营成本。

在设计堆场布局时，不仅要满足目前装卸作业的要求，也要考虑码头未来的发展趋势，以适应码头长期发展的需要。

（二）堆场堆存原则

堆场堆存集装箱的基本原则就是在保证集装箱堆放安全的前提下，尽量降低翻箱率以提高堆场的作业效率。

- 1) 不同尺寸的集装箱分开堆存；
- 2) 进口箱、出口箱和中转箱应分开堆存，其中，对于中转箱，应采取集中堆放，以减少由于临时转船转港而产生的翻箱作业，保证船舶装卸作业效率；
- 3) 冷藏箱、危险品箱等特种箱应堆存在专用箱区；
- 4) 集装箱应按目的港、航次、重量不同分开堆存，例如在同一贝位内可以堆放目的港相同、吨级相同的集装箱；
- 5) 对于某一条船的出口箱和进口箱，应相对集中地安排堆场堆存箱位，从而在装卸船作业时，避免了场桥的频繁移动，缩短了场桥在作业过程中的移动距离，提高了装卸船作业效率；
- 6) 集装箱堆存箱位应尽量靠近泊位，以减少水平运输距离；
- 7) 重箱和空箱应分开堆放在不同箱区。其中，对于空箱，可按照其所属公司、箱型等分开堆放；对于重箱，应尽量按航次、船名、提单号等集中堆放；另外，

为了便于设备装船作业，重箱通常堆放在靠近车道的两排；

- 8) 不同尺寸的集装箱应分开堆存，不可以混堆在同一贝位，且同一贝位中不能进行同排混放。

2.4.2 自动化集装箱码头堆场作业设备调度规则

目前，针对自动化集装箱码头堆场作业设备常见的调度规则有以下两种：

（一）先到先服务原则（FCFS）

先到先服务原则是指按照到达堆场的先后顺序，依次服务各水平搬运设备进行装卸作业。这种调度原则的优点是能够降低水平搬运设备的等待时间，但是如果相继到达的水平搬运设备位于不同的箱区，则需要堆场作业设备在不同的箱区之间度多次移动，这将增加堆场作业设备的移动成本，而且堆场作业设备在箱区之间移动时，由于其体积较大，移动缓慢，会占用大量的时间和空间，容易造成堆场拥堵和作业设备之间相互碰撞。所以，当堆场作业设备在箱区之间移动时，不仅需要考虑设备的移动路径，还需考虑设备之间的安全间隔距离。

（二）邻近作业原则（Nearby）

邻近作业原则是指为每台堆场作业设备分配其负责装卸作业的固定箱区，每台堆场作业设备只为其作业范围内的水平搬运设备进行装卸作业，不会服务于在其范围外的其他作业。这种调度原则的优点是能够降低堆场作业设备的移动成本，但是如果某个箱区的堆场作业设备出现超负荷运作时，则会大大增加水平搬运设备在堆场的等待时间，进而也会增加岸桥的等待时间。因此，在为每台堆场作业设备分配装卸任务时，应注意作业顺序的安排以及作业量分配的均衡性，以保证最大化堆场作业设备的利用率，从而提高堆场作业效率。

2.4.3 影响堆场作业效率的因素

堆场作为码头重要的作业环节，其作业效率直接影响着码头整体的服务水平，因此，需要对影响堆场作业效率的因素进行分析，并针对这些影响因素，找出能够提高堆场作业效率的方法。

（一）分配作业任务量

集装箱堆场作业设备被分配到的作业任务量会直接影响其作业效率。当堆场装卸作业任务较多时，每台场桥都会被分配到任务，因此设备利用率高，装卸作业效率高；而当堆场装卸作业任务较少时，就会出现设备闲置的情况，因此设备利用率低，装卸作业效率低。

（二）作业设备调度

集装箱堆场作业设备调度方法会直接影响其作业效率。如果采用先到先服务的调度原则，容易导致作业设备跨场作业，行驶距离增加，也容易导致堆场拥堵，影响作业效率；如果采用邻近作业原则，则会导致水平搬运设备等待时间较长。

（三）作业设备配置数量

集装箱堆场作业设备配置数量会直接影响堆场作业效率。如果作业设备配置过多，一方面会出现设备闲置的情况，降低设备利用率，另一方面会增加设备相互碰撞的风险，两种情况都会导致堆场作业效率下降；如果作业设备配置过少，可能会出现每台设备被超负荷分配任务，设备可能需要跨场作业，会增加堆场拥堵的风险。

（四）堆存策略

堆场堆放集装箱的策略会直接决定作业设备的行走路径，因此会影响堆场的作业效率。如果采用分开堆存，容易导致作业设备行驶距离增加，作业效率下降；如果采用集中堆存，容易导致作业设备之间相互干扰，作业速度下降。另外，不同的堆存策略会产生翻箱率的问题，翻箱会增加作业设备的作业量，设备有效利用率降低。

因此为了提高堆场作业效率，首先，需要考虑装卸作业任务在堆场作业设备之间分配的均衡性；其次，应根据码头实际需要，配置合适数量的作业设备，最大化设备利用率；另外，应合理安排堆场布局，以减少翻箱率及作业设备行驶路径问题；最后，提高码头的自动化水平，提升服务水平。

2.5 本章小结

本章针对自动化集装箱码头作业系统进行了概括论述。首先将自动化集装箱码头与传统集装箱码头进行了比较，可以发现，自动化集装箱码头优势明显并且是

未来的发展趋势；然后对自动化集装箱码头的布局、作业流程、作业设备、装卸工艺进行了简要介绍；接着分别介绍了自动化集装箱码头水平搬运系统中 AGV 系统和 ALV 系统；最后从堆场布局、堆存规则、调度规则以及作业效率影响因素方面对自动化集装箱码头堆场作业系统进行了介绍。

第3章 ALV 调度与堆场箱位分配集成优化模型

3.1 问题描述

在自动化集装箱码头中,如果想要提高码头整体的装卸作业效率,从而增强码头的竞争力,则必须对码头各装卸设备进行合理调度,以使码头各作业环节之间能够高效衔接,相互合作。其中,对于堆场作业系统和水平搬运作业系统来说,由于堆场通常为进口集装箱预留若干分散的堆存位置,以均衡各箱区作业量,最大化场桥利用率,而集装箱在堆场的堆存位置会影响水平搬运设备在完成两个连续作业任务时的行驶距离。综上所述,可以看出,自动化集装箱码头中的堆场作业系统和水平搬运作业系统是两个紧密联系、相互影响的作业环节,因此,有必要对水平搬运设备调度问题和堆场箱位分配问题进行集成优化。然而,自动化集装箱码头作业系统是一个复杂的系统,码头内各个作业设备的数量、所需作业时间以及作业顺序等多方面条件的约束,无论是在建立数学模型还是求解,模型方面,都极具挑战性。

因此,本文针对自动化集装箱码头中的水平搬运环节和堆场作业环节,以最小化最大完工时间为目标,考虑了各环节装卸作业设备数量、作业时间、作业顺序等诸多因素,建立 ALV 调度与堆场箱位分配集成优化模型。

3.2 模型构建

3.2.1 模型假设

- 1) 集装箱在船舶上的堆存位置已知,岸桥装卸集装箱的顺序、作业类型及作业时间已知,如表 3.1 所示为岸桥装卸集装箱的顺序;
- 2) 码头内集装箱数量及各作业设备数量已知;
- 3) 码头内各作业设备单次至多装卸一个集装箱;
- 4) ALV 在海侧和陆侧缓冲区之间的行驶时间已知;AYC 在陆侧缓冲区和堆场任意箱位之间的行驶时间已知;
- 5) 不考虑 ALV 行驶时路径拥堵情况;
- 6) 堆场容量足够大,能够堆存所有进口集装箱;
- 7) QC、AYC 在作业时相互之间不存在干扰;

- 8) 进、出口集装箱分开堆存且每台 AYC 只能够装卸进口箱或出口箱其中一种;
- 9) 码头内陆侧和海侧缓冲区均无容量限制;
- 10) 不考虑 ALV 和 QC 提、放箱时间。

表 3.1 岸桥装卸顺序
Tab. 3.1 Quay crane loading and unloading sequence

岸桥	任务箱	作业类型	船舶堆存位置 贝位-列-层	作业时间(s)
QC 1	(1, 1)	卸船	02-01-05	129
	(2, 1)	装船	04-06-03	124
	(3, 1)	卸船	02-05-05	154
	(4, 1)	装船	04-04-02	130
QC 2	(1, 2)	装船	02-03-02	102
	(2, 2)	卸船	05-01-04	149
	(3, 2)	装船	06-03-05	142
	(4, 2)	卸船	04-03-03	141

3.2.2 模型构建

模型参数定义为:

L 、 D 、 N 分别表示出口集装箱、进口集装箱、进出口集装箱的集合, $N = D \cup L$;

k 、 $l \in K$ 表示码头内岸桥的集合;

$b \in P$ 表示码头堆场内堆存位置的集合;

(i, k) 、 (j, l) 分别表示岸桥 k 作业的第 i 个集装箱、岸桥 l 作业的第 j 个集装箱;

N_k 表示岸桥 k 作业集装箱的总数量;

v 表示码头内 ALV 的总数量;

c 表示码头内 AYC 的总数量;

$h_{(i,k)}$ 表示岸桥完成集装箱 (i, k) 所需的作业时间;

O_s 表示包括虚拟开始作业 (s, l) 在内的码头作业集合;

O_F 表示包括虚拟结束作业 (F, I) 在内的码头作业集合；

$O = O_S \cup O_F$ ，表示包括 (S, I) 和 (F, I) 在内的码头作业集合；图 3.1 展示了在四种不同情况下的虚拟开始作业和结束作业；

$q_{(i,k)}$ 表示岸桥 k 开始作业第 i 个集装箱的时间；

$d_{(i,k)}$ 表示 AYC 开始作业 (i, k) 箱的时间；

$p_{(i,k)}$ 表示 ALV 开始作业 (i, k) 箱的时间；

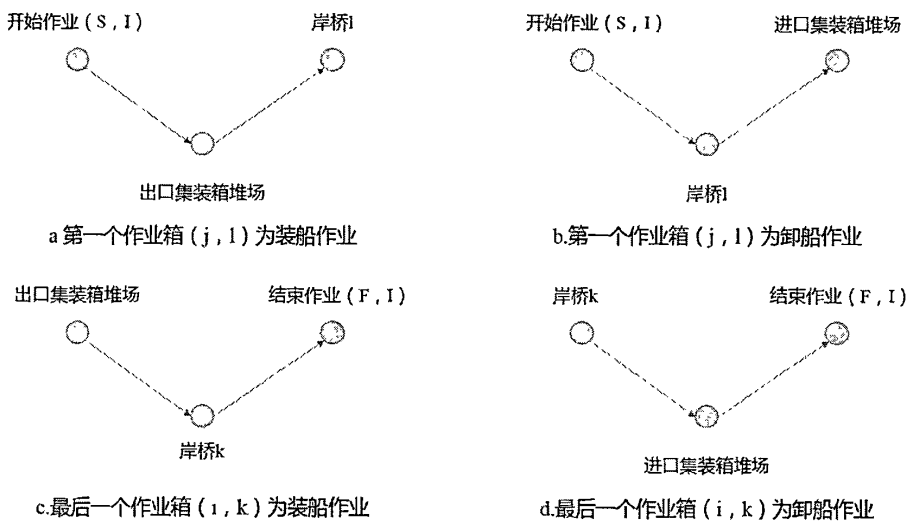


图3.1 四种不同情况下的开始和结束作业

Fig.3.1 Start and end jobs in four different situations

AYC 码头堆场内任意两点之间的行驶时间参数设置如表 3.2 所示：

表 3.2 AYC 行驶时间参数
Tab. 3.2 AYC driving time parameters

	进口箱堆存箱位	进口箱陆侧缓冲区	出口箱堆存箱位	出口箱陆侧缓冲区
进口箱陆侧缓冲区	φ_{Ti}^b	——	——	——
进口箱堆存箱位	——	φ_b^{Ti}	——	——
出口箱陆侧缓冲区	——	——	φ_{Te}^S	——
出口箱堆存箱位	——	——	——	φ_s^{Te}

ALV 在码头内任意两点之间的行驶时间参数设置如表 3.3 所示：

表 3.3 ALV 行驶时间参数
Tab. 3.3 ALV driving time parameters

	岸桥 k 下方 海侧缓冲区	出口箱陆侧 缓冲区	岸桥 1 下方 海侧缓冲区	进口箱陆侧 缓冲区
出口箱陆侧 缓冲区	t_{Te}^{kB}	——	t_{Te}^{lB}	t_{Te}^{Ti}
岸桥 k 下方 海侧缓冲区	——	t_{kB}^{Te}	t_{kB}^{lB}	t_{kB}^{Ti}
进口箱陆侧 缓冲区	t_{Ti}^{kB}	t_{Ti}^{Te}	t_{Ti}^{lB}	——
岸桥 1 下方 海侧缓冲区	t_{lB}^{kB}	t_{lB}^{Te}	——	t_{lB}^{Ti}

决策变量定义为:

$$x_{(i,k)}^{(j,l)} = \begin{cases} 1 & \text{集装箱}(i,k)\text{和}(j,l)\text{由同一台ALV作业且}(i,k)\text{为}(j,l)\text{的紧前作业, 则为1} \\ 0 & \text{否则, 为0} \end{cases}$$

$$\sigma_{(i,k)}^{(j,l)} = \begin{cases} 1 & \text{集装箱}(i,k)\text{和}(j,l)\text{由同一台AYC作业且}(i,k)\text{为}(j,l)\text{的紧前作业, 则为1} \\ 0 & \text{否则, 为0} \end{cases}$$

$$y_{(i,k)}^b = \begin{cases} 1 & \text{进口集装箱}(i,k)\text{堆存在箱区}b, \text{则为1} \\ 0 & \text{否则, 为0} \end{cases}$$

根据以上问题假设以及模型参数的设置, 建立ALV调度与堆场箱位分配集成优化混合整数规划模型如下:

$$Min : Max_k (q_{(N_k,k)} + h_{(N_k,k)}) \quad (3.1)$$

$$\sum_{(j,l) \in O_F} x_{(i,k)}^{(j,l)} = 1, \forall (i,k) \in N \quad (3.2)$$

$$\sum_{(i,k) \in O_S} x_{(i,k)}^{(j,l)} = 1, \forall (j,l) \in N \quad (3.3)$$

$$\sum_{(j,l) \in N} x_{(S,I)}^{(j,l)} = v \quad (3.4)$$

$$\sum_{(i,k) \in N} x_{(i,k)}^{(F,I)} = v \quad (3.5)$$

$$\sum_{(i,k) \in DU(S,I)} \sigma_{(i,k)}^{(j,l)} = 1, \forall (j,l) \in D \quad (3.6)$$

$$\sum_{(j,l) \in DU(F,I)} \sigma_{(i,k)}^{(j,l)} = 1, \forall (i,k) \in D \quad (3.7)$$

$$\sum_{(i,k) \in LU(S,I)} \sigma_{(i,k)}^{(j,l)} = 1, \forall (j,l) \in L \quad (3.8)$$

$$\sum_{(j,l) \in LU(F,I)} \sigma_{(i,k)}^{(j,l)} = 1, \forall (i,k) \in L \quad (3.9)$$

$$\sum_{(j,l) \in DorL} \sigma_{(S,I)}^{(j,l)} = c \quad (3.10)$$

$$\sum_{(i,k) \in DorL} \sigma_{(i,k)}^{(F,I)} = c \quad (3.11)$$

$$\sum_{b \in B} y_{(i,k)}^b = 1, \forall (i,k) \in D \quad (3.12)$$

$$\sum_{(i,k) \in D} y_{(i,k)}^b \leq 1, \forall b \in B \quad (3.13)$$

$$q_{(i+1,k)} - q_{(i,k)} \geq h_{(i,k)}, \forall (i+1,k), (i,k) \in N, i=1,2,\dots,N_k-1 \quad (3.14)$$

$$d_{(i,k)} + \sum_{b \in P} \varphi_b^b * y_{(i,k)}^b + \sum_{b \in P} \varphi_b^{Ti} * y_{(i,k)}^b \leq d_{(j,l)} + M * (1 - \sigma_{(i,k)}^{(j,l)}), \forall (i,k) \in DU(S,I), \forall (j,l) \in DU(F,I) \quad (3.15)$$

$$d_{(i,k)} + \varphi_s^{Te} + \varphi_{Te}^S \leq d_{(j,l)} + M * (1 - \sigma_{(i,k)}^{(j,l)}), \forall (i,k) \in LU(S,I), \forall (j,l) \in LU(F,I) \quad (3.16)$$

$$p_{(i,k)} + t_{Te}^{kB} + t_{Te}^{Ti} \leq p_{(j,l)} + M * (x_{(i,k)}^{(j,l)} - 1), \forall (i,k) \in LU(S,I), \forall (j,l) \in LU(F,I) \quad (3.17)$$

$$p_{(i,k)} + t_{Te}^{kB} + t_{Te}^{IB} \leq p_{(j,l)} + M * (x_{(i,k)}^{(j,l)} - 1), \forall (i,k) \in LU(S,I), \forall (j,l) \in DU(F,I) \quad (3.18)$$

$$p_{(i,k)} + t_{Te}^{Ti} + t_{Te}^{Te} \leq p_{(j,l)} + M * (x_{(i,k)}^{(j,l)} - 1), \forall (i,k) \in DU(S,I), \forall (j,l) \in LU(F,I) \quad (3.19)$$

$$p_{(i,k)} + t_{Te}^{Ti} + t_{Te}^{IB} \leq p_{(j,l)} + M * (x_{(i,k)}^{(j,l)} - 1), \forall (i,k) \in DU(S,I), \forall (j,l) \in DU(F,I) \quad (3.20)$$

$$q_{(i,k)} + h_{(i,k)} + t_{Te}^{Ti} \leq d_{(i,k)}, \forall (i,k) \in D \quad (3.21)$$

$$d_{(i,k)} + \varphi_s^{Te} + t_{Te}^{kB} \leq q_{(i,k)}, \forall (i,k) \in L \quad (3.22)$$

$$x_{(i,k)}^{(j,l)}, \sigma_{(i,k)}^{(j,l)}, y_{(i,k)}^b \in \{0,1\}, \forall (i,k), (j,l) \in O, \forall b \in B \quad (3.23)$$

$$q_{(i,k)}, d_{(i,k)} \cdot p_{(i,k)} \geq 0, \forall (i,k) \in N, i=1,2,\dots,N_k, \forall k \in K \quad (3.24)$$

其中，式（3.1）为模型的目标函数，其中 $q_{(N_k,k)} + h_{(N_k,k)}$ 表示每个岸桥完成最后一个作业的时间，因此式（3.1）即表示最小化最大完工时间；

式（3.2）表示对于任意一个集装箱 $(i,k) \in N$ ，在其后面都存在一个由同一台ALV作业的集装箱 $(j,l) \in O_F$ ；

式 (3.3) 表示对于任意一个集装箱 $(j, l) \in N$ ，在其前面都存在一个由同一台ALV作业的集装箱 $(i, k) \in O_s$ ；式 (3.2) - (3.3) 共同保证了ALV作业的连续性；

式 (3.4) - (3.5) 保证ALV的总数量等于 v ；

式 (3.6) 表示对于任意一个集装箱 $(j, l) \in D$ ，在其前面都存在一个由同一台AYC作业的集装箱 $(i, k) \in D \cup (S, l)$ ；

式 (3.7) 表示对于任意一个集装箱 $(i, k) \in D$ ，在其后面都存在一个由同一台AYC作业的集装箱 $(j, l) \in D \cup (F, l)$ ；

式 (3.8) 表示对于任意一个集装箱 $(j, l) \in L$ ，在其前面都存在一个由同一台AYC作业的集装箱 $(i, k) \in L \cup (S, l)$ ；

式 (3.9) 表示对于任意一个集装箱 $(i, k) \in L$ ，在其后面都存在一个由同一台AYC作业的集装箱 $(j, l) \in L \cup (F, l)$ ；式 (3.6) - (3.9) 共同保证了AYC作业连续性；

式 (3.10) - (3.11) 保证AYC的总数量等于 c ；

式 (3.12) 保证对于任意一个集装箱 $(i, k) \in D$ ，在其卸船后，只能堆存在堆场的一个箱位上；

式 (3.13) 保证对于堆场的任意一个箱位 $b \in B$ ，其至多能够堆存一个集装箱；

式 (3.14) 保证对于由同一台岸桥 k 连续完成的任意两个作业任务 (i, k) 和 $(i+1, k)$ ，两者的作业时间间隔应大于等于岸桥完成作业任务 (i, k) 所需的作业时间 $h_{(i,k)}$ ；

式 (3.15) 表示当作业任务 (i, k) 和 (j, l) 均为卸船作业且由同一台AYC作业时，两者之间的作业时间间隔应至少等于AYC在堆场前缓冲区和 (i, k) 箱堆存位置 b 之间的往返行驶时间；

式 (3.16) 表示当作业任务 (i, k) 和 (j, l) 均为卸船作业且由同一台 AYC 作业时, 两者之间的作业时间间隔应至少等于 AYC 从 (i, k) 箱堆存位置到堆场前缓冲区的行驶时间和 AYC 从堆场前缓冲区到 (j, l) 箱堆存位置的行驶时间之和;

式 (3.17) 表示当作业任务 (i, k) 和 (j, l) 均为装船作业且由同一台 ALV 作业时, 两者之间的作业时间间隔应至少等于 ALV 在出口箱堆场前缓冲区和岸桥 k 下方的缓冲区之间的往返行驶时间之和;

式 (3.18) 表示当作业任务 (i, k) 为装船作业, (j, l) 为卸船作业且由同一台 ALV 作业时, 两者之间的作业时间间隔应至少等于 ALV 从出口箱堆场前缓冲区到岸桥 k 下方的缓冲区的行驶时间和从岸桥 k 下方的缓冲区到岸桥 l 下方的缓冲区的行驶时间之和;

式 (3.19) 表示当作业任务 (i, k) 为卸船作业, (j, l) 为装船作业且由同一台 ALV 作业时, 两者之间的作业时间间隔应至少等于 ALV 从岸桥 k 下方的缓冲区到进口箱堆场前缓冲区的行驶时间和从进口箱堆场前缓冲区到出口箱堆场前缓冲区的行驶时间之和;

式 (3.20) 表示当作业任务 (i, k) 和 (j, l) 均为卸船作业且由同一台 ALV 作业时, 两者之间的作业时间间隔应至少等于 ALV 从岸桥 k 下方的缓冲区到进口箱堆场前缓冲区的行驶时间和从进口箱堆场前缓冲区到岸桥 l 下方的缓冲区的行驶时间之和;

式 (3.21) 表示对于任意一个集装箱 $(i, k) \in D$, 在 AYC 和 QC 开始作业之间的时间间隔应至少等于 QC 完成作业所需时间 $h_{(i,k)}$ 和 ALV 从岸桥 k 下方的缓冲区到进口箱堆场前缓冲区的行驶时间之和;

式 (3.22) 表示对于任意一个集装箱 $(i, k) \in L$, 在 AYC 和 QC 开始作业之间的时间间隔应至少等于 AYC 从 (i, k) 箱堆存位置到出口箱堆场前缓冲区的行驶时间和 ALV 从出口箱堆场前缓冲区到岸桥 k 下方的缓冲区的行驶时间之和;

式 (3.23) 和式 (3.24) 对模型中相关变量的取值范围及变量类型进行了约束。

3.3 本章小结

本章在前几章的基础上对自动化集装箱码头 ALV 调度与堆场箱位分配问题进行了量化研究, 以最小化最大完工时间为目标, 考虑 QC、ALV 和 AYC 单个设备作业时间及多个设备协同作业时的作业时间约束、ALV 和 AYC 配备数量以及堆场箱位堆存容量等诸多约束条件, 建立混合整数规划模型, 并对模型的假设条件、参数及各约束条件进行了相关必要的说明。

第4章 求解算法

根据求解算法所求解结果的精确性，可将求解算法分为精确求解算法和启发式算法两类。精确求解算法通常是利用LINGO、CPLEX等软件，通过遍历解空间内所有可行解，从中选择一个或多个最优解，但随着问题规模的扩大，遍历解空间需要耗费大量时间。针对大规模问题，特别是NP-hard问题，具有多层次、多组合、多约束、以及动态性等特点，想要在可接受范围内求解精确解变得十分困难，因此，目前很多学者采用现代智能优化智能算法或者启发式算法对此类问题进行求解。采用启发式算法所求得满意解是在可接受的求解时间范围内所求得的较优解，通过采用一定的启发式算法进行定向搜索或者缩小解空间的范围，从而减少求解时间。

4.1 遗传算法简介

遗传算法（Genetic Algorithms, GA）是针对具有特定种群（Population）规模的群体，根据适者生存、优胜劣汰的原则，通过选择（Selection）、交叉（Crossover）以及变异（Mutation）等机制，进行逐代进化，经过若干代进化后，最终得到满意解。它是由美国Michigan 大学Holland教授于1975年首次提出。

在遗传算法每一代的种群中，每个个体由每条染色体表示，每个染色体对应着问题的一个解，而染色体上基因序列的表达就是染色体编码。在进行编码之后，需要根据模型中的约束条件，生成初始种群，并计算初始种群中每个个体的适应度值（Fitness），按照适应度值的大小进行选择操作。在选择两个父代个体后，进行交叉操作产生新的子代个体，同时为了保证种群的多样性，还需要针对每个个体进行变异操作。不断循环此过程，进行迭代优化，使初始种群不断向提高种群适应度的方向进化，直到满足遗传算法的终止条件为止。通常情况下，遗传算法的终止条件可以设置为遗传的代数、获取满意解等。

目前，遗传算法被广泛应用于多个学科领域，例如：自动控制领域、人工神经网络、图像处理、机器学习等，还能够求解组合优化问题、生产调度问题等，具有较强的鲁棒性，为求解复杂系统问题提供了一种通用框架。

4.2 遗传算法设计

4.2.1 染色体编码

如前文所述，本文有三个决策变量，为了方便后续遗传算法的遗传操作以及合理地描述模型，采用矩阵编码的方式对染色体进行编码。本文采用矩阵编码设计一个三行n列的二维染色体（其中，n为待作业任务数），其中，每一行表示一个决策变量，每一列表示一个待作业的任务。为了更直观的理解本文所采用的矩阵编码，图4.1给出了一个示例。如图4.1所示，染色体设计为一个3×10的矩阵，表示有10个集装箱待作业，其中奇数号箱为进口集装箱，偶数号箱为出口集装箱；染色体的第一行中每个基因代表ALV的编号，如图所示，有3台ALV，分别编号为1、 2、 3；染色体的第二行中每个基因代表AYC的编号，如图所示，有4台AYC，分别编号为1、 2、 3、 4，由于模型中约束每台AYC只能作业一种类型的集装箱（进口集装箱或者出口集装箱），所以在此设计进口集装箱由1号和2号AYC作业，出口集装箱由3号和4号AYC作业；染色体的第三行中每个基因代表集装箱在堆场箱区内所堆存的箱位编号，如图所示，堆场有10个堆场箱位，分别编号为1、 2、 ...、 10，其中，1至5号箱位堆存进口集装箱，6至10号箱位堆存出口集装箱。

	集装箱编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
分配ALV	2	3	2	1	2	3	1	3	2	1
分配AYC	1	3	2	4	2	3	1	4	2	3
堆存位置	5	7	2	9	4	10	3	6	1	8

图4.1 染色体表示

Fig.4.1 Chromosome representation

4.2.2 初始种群生成

在确定编码形式后，需要根据模型中的约束条件，生成初始种群。考虑到本文ALV调度与堆场箱位分配集成优化模型的特点，在生成初始种群时，首先，针对染色体的第一行，由于染色体的第一行中每个基因代表ALV的编号，因此需要满足模

型中约束条件 (3.2) 和 (3.3) 对ALV作业连续性的约束, 以及约束条件 (3.4) 和 (3.5) 对ALV数量的约束; 其次, 针对染色体的第二行, 由于染色体的第二行中每个基因代表AYC的编号, 因此需要满足模型中约束条件 (3.6) 至 (3.9) 对AYC作业连续性的约束, 以及约束条件 (3.10) 和 (3.11) 对AYC数量的约束; 最后, 针对染色体的第三行, 由于染色体的第三行中每个基因代表集装箱在堆场箱区内所堆存的箱位编号, 因此需要满足模型中约束条件 (3.12), 以保证每个进口集装箱在其卸船后, 堆场箱区内有且仅有一个箱位供其堆存; 同时满足约束条件 (3.13), 保证码头堆场箱区内每个箱位至多只能容纳一个集装箱。最后即可根据模型中的各个约束条件生成 N 个初始个体, 构成种群规模为 N 的初始种群。

4.2.3 计算目标函数

在生成初始种群后, 就可以根据每个个体表示出的三个决策变量以及模型中的约束条件, 求出其相对应的目标函数。由于本文采用ALV作为水平搬运设备, 所以在求解本文的目标函数时, 只需考虑同一设备在连续完成两个作业任务时的约束, 确定其可用时间, 而无需考虑设备之间的等待时间。如图4.2所示, 首先根据岸桥装卸集装箱的顺序将集装箱进行编号, 然后判断目标箱为进口集装箱还是出口集装箱, 判断目标箱类型后, 依次确定为该箱作业的QC、ALV、AYC及相对应的作业设备可用时间, 并以此确定目标箱作业完成时间, 最后, 如果该类集装箱(进口集装箱或者出口集装箱)未全部完成, 则反复执行以上步骤; 如果全部完成, 则比较最后一个进口箱和最后一个出口箱的完工时间, 取较大者作为总完工时间。

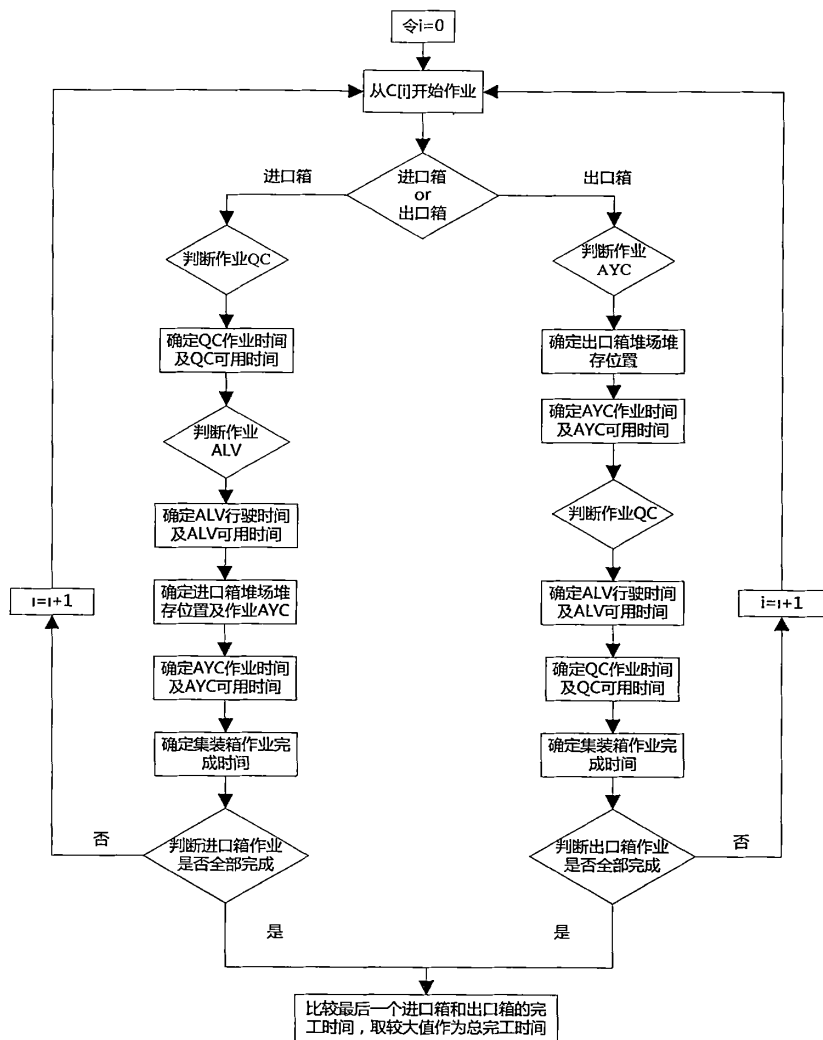


图4.2 目标函数求解流程

Fig.4.2 The objective function solving process

4.2.4 计算适应度函数

适应度函数是对每个个体对环境适应能力的度量函数，能够体现个体在遗传迭代优化中被使用的概率，因此，在设计适应度函数时，应考虑每个个体相对应的目标函数。本文所研究问题的目标函数为最小化最大完工时间，因此，目标函数值越小，即最大完工时间越短，适应度函数值应该越大，表示该个体适应能力越强。

所以，本文取目标函数值的倒数作为适应度函数。

4.3 遗传操作

4.3.1 选择

对于每一代种群，为了使种群不断进化，本文采用轮盘赌选择法（Roulette Wheel Selection）对初始种群进行选择，通过选择操作，能够将适应度值较大的个体直接遗传到下一代或者通过交叉将其部分基因遗传给子代。采用轮盘赌选择法，如公式（4.1）所示，每一代种群中的每个个体被选中的概率与其对应的适应度值成正比：

$$P_i = f_i / \sum_{k=1}^N f_k \quad (4.1)$$

其中， f_i 代表个体 i 的适应度值， N 表示种群规模。

轮盘赌选择法按照如下步骤进行：

- （1）针对初始种群中的每个个体，计算其适应度值；
- （2）将每个个体根据其适应度值的大小，刻画在同一个圆盘上，每个个体所占圆盘面积与其适应度值大小成正比；
- （3）求出所有个体适应度值的总和及每个个体的适应度值与总和的比值，进行累加；
- （4）在0-1之间随机产生一个数，并找到其落在步骤（3）中的哪个区域，这个区域对应的个体则被选中。

4.3.2 交叉

本文有三个决策变量，由于模型中对每个决策变量的约束条件严格程度不同，因此本文采取不同的交叉算子对染色体的不同行，即不同的决策变量进行交叉操作。针对染色体的前两行，由于模型中的ALV既可以作业进口集装箱也可以作业出口集装箱，每台AYC只能作业进口箱或出口箱一种类型的集装箱，因此采用单点交叉算子，可以保证不产生不可行解。如图4.3所示，首先，在选择的两个父代个体的染色体前两行中随机选择交叉点的位置，然后将两个父代个体在交叉点前后的基因进行互换重组，进而生成两个新的子代染色体。

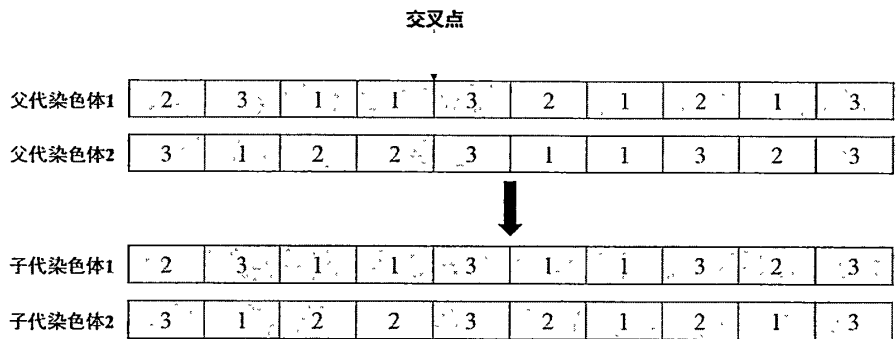


图4.3 10个集装箱3台ALV分配的单点交叉算子

Fig.4.3 Single point crossover operator of three ALV distribution in 10 containers

针对染色体的第三行，其中的每个基因代表集装箱在堆场箱区内所堆存的箱位编号，由于模型中要求进口箱只能堆存一个箱位且每个箱位只能堆存一个集装箱，如果采用常用的单点交叉、双点交叉，交叉后会产生不可行解，比如出现一个箱位堆存两个集装箱或者一个集装箱堆存在两个箱位上，因此，为了保持个体的可行性，针对染色体的第三行，本文采用均匀排序交叉算子对染色体进行交叉操作。由于本文假设出口箱堆存位置已知，所以只需对进口集装箱堆存位置进行交叉操作即可。如图4.4所示，父代染色体1表示针对五个进口集装箱，它们在堆场的堆存箱位编号分别为2、3、5、1、4，在采用均匀排序交叉算子对其进行交叉操作时，首先，随机生成一串含有5个基因的二进制数列，然后，对应父代染色体1中各位置的基因，将子代染色体1的基因取二进制数列基因值为1相对应位置的基因，子代染色体2的基因取二进制数列基因值为0相对应位置的基因，其余基因补0；然后，将子代染色体1中还未存在而在父代染色体2中已经存在的基因按照在父代染色体2中的顺序依次替换子代染色体1中基因为0的位置，将子代染色体1中已经存在而在子代染色体2中还未存在的基因按照在父代染色体2中的顺序依次替换子代染色体2中基因为0的位置，从而生成两个新的子代个体。

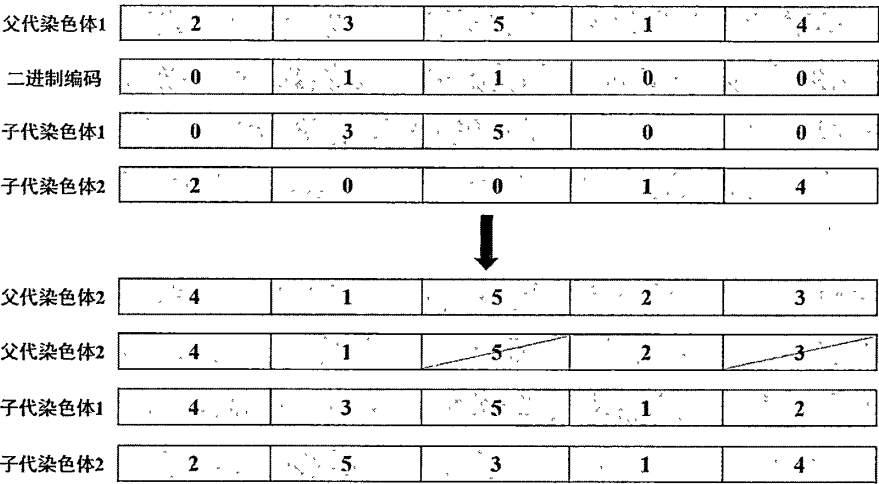


图4.4 5个堆存位置的均匀排序交叉算子

Fig.4.4 The uniform sorting operator of 5 stacked locations

4.3.3 变异

本文采用交换变异算子进行变异操作。如图4.5所示，在染色体上随机选择两个变异点，交换对应的基因，生成新的子代染色体。其中，由于模型中假设每台AYC只能作业进口集装箱或者出口集装箱其中一种类型，因此如果针对染色体的第二行进行交换变异，则在选择变异点的时候，为了避免产生不可行解，只能同时对两个同种类型的集装箱进行交换变异；如果针对染色体的第三行进行交换变异，由于出口集装箱在堆场堆存箱位已知，因此在选择变异点的时候，为了避免产生不可行解，只能同时对两个进口集装箱进行交换变异。

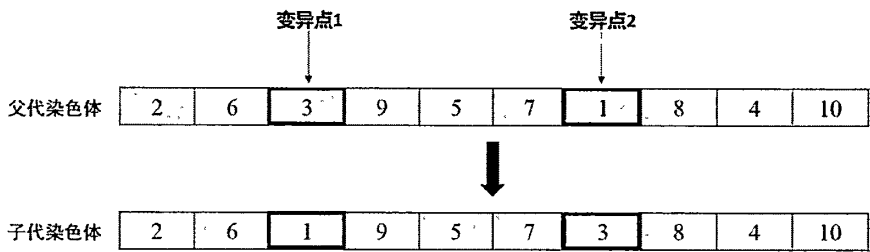


图4.5 交换变异

Fig.4.5 Exchange mutation

4.4 本章小结

本章针对本文所研究问题的特点，在传统遗传算法的基础上进行了一定的改进，提出适用于解决本文所研究问题的遗传算法。本文从染色体编码开始，依次详细介绍了初始种群生成、计算适应度函数，接着又对本文采用的交叉算子、变异算子进行了解释说明，并针对经过遗传操作可能产生不可行解的情况进行了特殊处理。

第 5 章 算例分析

本章将采用不同规模的实际算例对本研究提出的模型及算法的有效性进行验证。进行实验的软件环境为Microsoft Visual Studio 2010版本，CPLEX_STUDIO 12.6.2版本，实验的硬件环境为Intel(R) Celeron(R) CPU B815 1.60GHz的处理器，内存为6GB的PC。

根据集装箱、ALV、QC和AYC数量不同，设计不同的算例，将每个算例用CPLEX和本文设计的算法进行求解，并对求解计算时间和函数值进行比较。针对每一个算例，采用相同的参数运行本文设计的算法10次并取计算时间和函数值的平均值，以保证算例分析的严谨性。

5.1 参数设置

- (1) 集装箱数量取值范围为[6,200]，ALV数量设置为2台、3台或4台，AYC数量设置为2台或4台，QC数量设置为2台；
- (2) 岸桥单位作业时间服从 $U(100,180)$ 的均匀分布，AYC在陆侧缓冲区和集装箱堆存箱位之间的行驶时间服从 $U(40,160)$ 的均匀分布，ALV在陆侧缓冲区和海侧缓冲区任意两点之间的行驶时间如表5.1所示^[45]；

表5.1 ALV在海、陆侧缓冲区任意两点之间行驶时间
Tab. 5.1 ALV travel times between two points of the sea and land buffers

	1	2	3	4
1	0	30	85	115
2	80	0	55	115
3	85	115	0	80
4	115	145	30	0

注：点 1 和点 2 代表海侧缓冲区，点 3 和点 4 代表陆侧缓冲区。

(3) 遗传算法的参数设置如表5.2所示：

表5.2 遗传算法参数设置

Tab. 5.2 Parameter setting of GA

参数	值
种群规模	500
最大进化代数	200
交叉率	0.75
变异率	0.15

5.2 模型下界

在本文建立的数学模型中，式（3.14）-式（3.20）表示岸桥、AYC和ALV在连续完成两个作业任务之间的时间约束。假设在理想情况下，即各个作业设备在连续完成两个作业任务之间没有等待，求解出在此情况下的完工时间，并将平均值作为模型下界值。为了验证本文所设计的遗传算法的求解质量和有效性，在大规模算例中，需要将本文设计的算法所求得的目标函数值与模型下界值进行比较。

5.3 小规模算例

如表5.3所示，当算例规模在20个集装箱以内时，随着规模的逐渐扩大，在求解时间方面，本文提出的算法明显优于CPLEX，并且本文提出的算法所求得的近似最优解与CPLEX求得的精确解之间的平均误差仅为3.82%，与下界值之间的平均误差为8.19%；同时，由表5.3还可以发现当算例规模超过20个集装箱时，在可接受的求解时间范围内，CPLEX已经无法求解，而本文提出的算法依然能够在很短的时间内，求解得到近似最优解。综上所述，可以看出本文所提出的算法在求解小规模算例时，能够在短时间内求得满意的最优解。

5.4 大规模算例

如表5.4所示，可以发现，随着算例规模的逐渐扩大，本文提出的启发式算法在较短时间内依然能够求得近似最优解，并且与下界值之间的平均误差仍在可接受范围内，为7.13%。从而进一步验证了本文所提出的启发式算法在求解大规模算

例时仍然具有一定的的正确性及有效性。

表5.3 小规模算例结果对比
Tab. 5.3 Small-scale test results

算例	集装箱	ALV/QC/AYC	CPLEX			本文算法		GAP 1(%)	GAP 2(%)
			计算时间	函数值 (s)	下界值	计算时间	函数值		
			(s)		(s)	(s)	(s)		
1	6	2/2/2	0.88	460	445	0.08	478	3.87	7.34
2	8	2/2/2	1.40	514	496	0.11	536	4.28	8.16
3	10	3/2/2	60.45	804	765	0.16	825	2.59	7.86
4	20	3/2/2	83.18	1691	1620	0.19	1768	4.54	9.15
5	26	3/2/2	/	/	2175	0.21	2359	/	8.46

注：GAP1=（本文算法函数值-CPLEX 函数值）/ CPLEX 函数值*100%； GAP2=（本文算法函数值-下界值）/ 下界值*100%。

表5.4 大规模算例结果对比
Tab. 5.4 Big-scale test results

算例	集装箱	ALV/QC/AYC	本文算法		下界值	GAP (%)
			计算时间	函数值		
			(s)	(s)	(s)	
6	30	3/2/2	0.35	2832	2630	7.68
7	30	4/2/2	0.42	2617	2490	5.12
8	40	3/2/2	0.57	4538	4154	9.25
9	40	3/2/4	0.63	4271	3939	8.44
10	60	3/2/2	0.75	6580	6128	7.38
11	60	4/2/2	0.83	6275	5867	6.96
12	80	3/2/4	0.98	9928	9102	9.08
13	80	4/2/4	1.27	9746	9236	5.52
14	100	3/2/4	1.31	12200	11491	6.17
15	100	4/2/4	1.50	11876	11062	7.36
16	200	3/2/4	3.24	27560	25800	6.82
17	200	4/2/4	3.66	26980	25518	5.73

注：GAP=（本文算法函数值-下界值）/ 下界值*100%。

5.5 本章小结

本章运用定量的方法对本文提出的基于遗传算法的启发式算法的有效性进行了验证。在获取自动化集装箱码头实际参数后,对本文提出的算法参数进行赋值,然后针对不同算例规模,进行大量数值实验,并将本文算法求得的近似最优解与采用CPLEX求解的精确解及下界值进行比较,算例结果表明本文提出的算法在求解不同规模的算例时,均能够在较短时间内获得近似最优解,并且与精确解及下界值的误差都在可接受的范围内。

第 6 章 总结与展望

6.1 总结

本文主要针对自动化集装箱码头中的 ALV 调度和堆场箱位分配问题进行了研究。本文从研究背景入手,随着集装箱码头之间的竞争越来越激烈,各大集装箱码头都在积极引进自动化技术以提高码头的装卸效率和服务水平。由于集装箱码头是由多环节组成的复杂作业系统,因此码头经营者如果想要提高码头整体的装卸作业效率,则需要考虑如何合理调度各环节作业设备,以实现各环节相互协调作业。其中,由于水平搬运环节和堆场作业环节是紧密联系的两个环节,有必要对其进行集成优化。现对本研究进行如下总结:

(1) 本文在对国内外相关文献进行阅读和分析的基础上,从码头布局、作业流程、作业设备、装卸工艺、调度规则等多个方面对自动化集装箱码头作业系统进行了介绍;

(2) 在已有研究的基础上,提出一种 ALV 调度和堆场箱位分配集成调度优化方法,并建立目标函数为最小化最大完工时间的混合整数规划数学模型;

(3) 为求解模型,设计基于遗传算法的启发式算法,为了验证本文建立的模型及提出的启发式算法的正确性和求解质量,设计了不同算例的规模,并将求解结果与 CPLEX 求解的精确解及下界值进行比较。

6.2 展望

本文的研究内容在理论与实践方面都具有一定价值,为自动化集装箱码头水平搬运环节和堆场作业环节优化提供了新的建模与求解思路。但由于时间及精力有限,未来可以在以下方面对本研究的深度和广度进行进一步的完善和加强,以更加符合自动化集装箱码头实际作业情况:

(1) 本文假设码头内缓冲区无容量限制,但实际上,由于码头土地面积有限,需要考虑缓冲区容量的限制,因此需要进一步研究;

(2) 本文没有考虑各环节作业设备在作业过程中相互之间的干扰问题,如 ALV 在行驶过程中的拥堵问题,岸桥之间的安全作业距离等,这些问题在实际自动化集装箱码头都是存在的,为了使研究更加贴合实际,需要进一步研究;

(3) 本文只为进口集装箱安排了堆存箱位，而没有考虑 AYC 在作业过程中的翻箱问题，需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 康志敏. 集装箱自动化码头AGV路径优化和调度研究[D]. 武汉理工大学, 2011.
- [2] 钱继锋. 集装箱码头“岸桥-集卡-堆场”作业计划的优化[D]. 北京交通大学, 2014.
- [3] Steenken D, Voß S, Stahlbock R. Container terminal operation and operations research-a classification and literature review[J]. OR spectrum, 2004, 26(1): 3-49.
- [4] Stahlbock R, Voß S. Operations research at container terminals: a literature update[J]. OR spectrum, 2008, 30(1): 1-52.
- [5] Carlo H J, Vis I F A, Roodbergen K J. Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 236(1): 1-13.
- [6] 曾庆成. 集装箱码头装卸作业集成调度模型与方法[D]. 大连海事大学, 2008.
- [7] Daganzo C F. The crane scheduling problem [J]. Transportation Research Part B, 1989, 23(3):159-175.
- [8] Peterkofsky R I, Daganzo C F. A branch and bound solution method for the crane scheduling problem [J]. Transportation Research Part B Methodological, 1990, 24(3):159-172.
- [9] 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.
- [10] Lee D H, Wang H Q, Miao L. Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2008, 44(1):124-135.
- [11] 曹庆奎, 赵斐. 基于遗传蚁群算法的港口集卡路径优化[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(7):1820-1828.
- [12] 曾庆成, 杨忠振. 集装箱码头集卡调度模型与Q学习算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(1):1-4.
- [13] Rashidi H, Tsang E P K. A complete and an incomplete algorithm for automated guided vehicle scheduling in container terminals[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2011, 61(3):630-641.
- [14] Kim K H, Bae J W. A Look-Ahead Dispatching Method for Automated Guided Vehicles in Automated Port Container Terminals[J]. Transportation Science, 2004, 38(2):224-234.
- [15] Angeloudis P, Bell M G H. An uncertainty-aware AGV assignment algorithm for automated container terminals[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2010, 46(3):354-366.
- [16] Briskorn D, Drexl A, Hartmann S. Inventory-based dispatching of automated guided vehicles

- on container terminals[J]. OR Spectrum, 2006, 28(4): 611-630.
- [17] Kim K H, Kim K Y. An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals[J]. Transportation Science, 1999, 33(1): 17-33.
- [18] Kim K Y, Kim K H. A routing algorithm for a single straddle carrier to load export containers onto a containership[J]. International Journal of Production Economics, 1999, 59(1): 425-433.
- [19] Kim K H, Kim K Y. Routing straddle carriers for the loading operation of containers using a beam search algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering, 1999, 36(1): 109-136.
- [20] Le H M, Yassine A, Moussi R. DCA for solving the scheduling of lifting vehicle in an automated port container terminal[J]. Computational Management Science, 2012, 9(2):273-286.
- [21] Bae H Y, Choe R, Park T, et al. Comparison of operations of AGVs and ALVs in an automated container terminal[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011, 22(3):413-426.
- [22] Yang C H, Yong S C, Ha T Y. Simulation-based performance evaluation of transport vehicles at automated container terminals[J]. Operations Research-Spectrum, 2004, 26(2):149-170.
- [23] Nguyen V D, Kim K H. A dispatching method for automated lifting vehicles in automated port container terminals[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(3):1002-1020.
- [24] 余孟齐, 韩晓龙. 有限缓冲空间下岸桥和自动升降车的集成调度[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2016, 38(1):101-105.
- [25] 汤鹏飞, 梁承姪, 丁一,等. 考虑岸桥缓冲区的ALV调度优化问题研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015, 40(6):1540-1550.
- [26] Vis I F A, Carlo H J. Sequencing Two Cooperating Automated Stacking Cranes in a Container Terminal[J]. Transportation Science, 2010, 44(2):169-182.
- [27] Park T, Choe R, Ok S M, et al. Real-time scheduling for twin RMGs in an automated container yard[J]. Operations Research-Spectrum, 2010, 32(3):593-615.
- [28] Dorndorf U, Schneider F. Scheduling automated triple cross-over stacking cranes in a container yard[J]. Operations Research-Spectrum, 2010, 32(3):617-632.
- [29] He J, Huang Y, Yan W. Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption[J]. Advanced Engineering Informatics, 2015, 29(1):59-75.
- [30] Li W, Wu Y, Goh M. A Continuous-Time Model for Multiple Yard Crane Scheduling with Last-Minute Job Arrivals[J]. International Journal of Production Economics, 2012, 136(2):332-343.
- [31] Gharehgozli A H, Yu Y, Koster R D, et al. An exact method for scheduling a yard crane[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 235(2):431-447.

- [32] 张笑菊,曾庆成,杨忠振. 基于堆场混合堆存的集装箱码头装船顺序优化模型[J]. 系统工程理论与实践,2016,36(09):2374-2382..
- [33] Chen P, Fu Z, Lim A, et al. The general yard allocation problem[C]//Genetic and Evolutionary Computation Conference. Springer Berlin Heidelberg, 2003: 1986-1997.
- [34] Kim K H, Kim H B. Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals[J]. International Journal of Production Economics, 1999, 59(1): 415-423.
- [35] Preston P, Kozan E. An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals[J]. Computers & Operations Research, 2001, 28(10): 983-995.
- [36] Nishimura E, Imai A, Janssens G K, et al. Container storage and transshipment marine terminals[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2009, 45(5): 771-786.
- [37] Lee L H, Chew E P, Tan K C, et al. An optimization model for storage yard management in transshipment hubs[J]. Operations Research-Spectrum, 2006, 28(4):107-129.
- [38] Zhang C, Liu J, Wan Y, et al. Storage space allocation in container terminals[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37(10): 883-903.
- [39] Bazzazi M, Safaei N, Javadian N. A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(1): 44-52.
- [40] Tang L, Zhao J, Liu J. Modeling and solution of the joint quay crane and truck scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 236(3):978-990.
- [41] Chen L, Langevin A, Lu Z. Integrated scheduling of crane handling and truck transportation in a maritime container terminal[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 225(1):142-152.
- [42] Kaveshgar N, Huynh N. Integrated quay crane and yard truck scheduling for unloading inbound containers[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 159(3):168-177.
- [43] 周静娴,胡志华. 自动化集装箱码头ALV水平作业任务调度优化[J]. 大连海事大学学报, 2015, 41(4):81-89.
- [44] Cao J X, Lee D H, Chen J H, et al. The integrated yard truck and yard crane scheduling problem: Benders' decomposition-based methods[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2010, 46(3):344-353.
- [45] Lau H Y K, Zhao Y. Integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals[J]. International journal of production economics, 2008, 112(2): 665-682.
- [46] Kozan E, Preston P. Mathematical modelling of container transfers and storage locations at seaport terminals[J]. OR Spectrum, 2006, 28(4): 519-537.

- [47] Lee D H, Cao J X, Shi Q, et al. A heuristic algorithm for yard truck scheduling and storage allocation problems[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2009, 45(5): 810-820.
- [48] Bish E K. A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 144(1): 83-107.
- [49] Zeng Q, Yang Z. Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container terminals[J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(6):1935-1944.
- [50] Luo J, Wu Y. Modelling of dual-cycle strategy for container storage and vehicle scheduling problems at automated container terminals[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2015, 79:49-64.
- [51] Bish E K, Chen F Y, Yin T L, et al. Dispatching vehicles in a mega container terminal[J]. Operations Research-Spectrum, 2005, 27(4):491-506.
- [52] 宓为建, 李央央, 胡鸿韬. 集装箱堆场分配与自动化装载小车路径联合优化[J]. 上海海事大学学报, 2015, 36(4):16-21.
- [53] 陈超, 邱建梅, 台伟力. 出口箱随机入港下的码头泊位-集卡-箱区协调调度模型[J]. 交通运输工程学报, 2014(6):92-99.
- [54] 陈超, 张哲, 曾庆成. 集装箱码头混合交叉作业集成调度模型[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(03):92-100.
- [55] Wu Y, Luo J, Zhang D, et al. An integrated programming model for storage management and vehicle scheduling at container terminals[J]. Research in Transportation Economics, 2013, 42(1):13-27.
- [56] 曾庆成, 陈子根, 黄玲. 集装箱码头同贝同步装卸调度的多阶段混合流水线模型[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(04):499-505.
- [57] 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.
- [58] Zhang H, Kim K H. Maximizing the number of dual-cycle operations of quay cranes in container terminals[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(3): 979-992.
- [59] Lee L H, Chew E P, Tan K C, et al. Vehicle dispatching algorithms for container transshipment hubs[J]. Operations Research-Spectrum, 2010, 32(3):663-685.
- [60] 胡祥培, 孙玉姣, 曾庆成. 集装箱码头同贝同步装卸作业的序列优化模型[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(03):623-634.

攻读学位期间公开发表论文

- [1] 鲁渤, 吕家智, 曾庆成. 集装箱码头 ALV 调度与堆场位置分配集成优化模型
[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(5):1349-1359.

致 谢

在本科和研究生近七年的生活，必将是我人生中最难忘的、也是最美好的记忆。在此，我要向在这么多年给予我帮助的所有人表示我最诚挚的感谢！

首先，要感谢我的导师。老师学术能力强，学术态度严谨，对待学生态度和蔼，感谢老师从我保研开始，对我在学习、生活上的帮助与关心，也感谢老师对我的信任，给与我不断锻炼与成长的机会，很开心自己这么幸运遇见这么优秀的导师！

感谢在校期间，所有教过我课程的老师 and 指导员，是你们的无私付出，才让我有扎实的理论基础，是你们的关怀，让我对学习有浓厚的兴趣，是你们的理解与帮助，让我在遇到困难时，感到温暖，勇往直前！

感谢我所有的朋友，是你们丰富了我的大学生活，你们也是我最宝贵的财富！感谢你们当我在生活上、学习上遇到烦心事时，为我分忧解难，一起帮助我渡过难关！

最后，感谢我的家人，感谢你们对我的付出，感谢你们对我的理解，感谢你们对我的支持！未来，我会更加努力，不辜负你们对我的期望！



大连海事大学
DALIAN MARITIME UNIVERSITY

硕士学位论文