



Y3346063

分类号: \_\_\_\_\_

密 级 \_\_\_\_\_

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

单位代码 \_\_\_\_\_ 10151 \_\_\_\_\_



大连海事大学

# 全日制应用型硕士研究生学位论文

集装箱码头堆场箱位分配与场桥调度协同优化研究

姚 茜

|         |             |
|---------|-------------|
| 指 导 教 师 | 范厚明 教 授     |
| 企 业 导 师 | 赵殿新 高级工程师   |
| 申请学位类别  | 工 程 硕 士     |
| 工 程 领 域 | 交通运输工程      |
| 学位授予单位  | 大 连 海 事 大 学 |

2017 年 6 月



分 类 号 \_\_\_\_\_

密 级 \_\_\_\_\_

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

单位代码 10151 \_\_\_\_\_

大 连 海 事 大 学  
工程硕士学位论文

集装箱码头堆场箱位分配与场桥调度  
协同优化研究

(学位论文形式：应用研究)

姚 茜

指 导 教 师 范厚明 职 称 教 授

企 业 导 师 赵殿新 职 称 高级工程师

学位授予单位 大 连 海 事 大 学

申请学位类别 工程硕士 工程领域 交通运输工程

论文完成日期 2017 年 4 月 答辩日期 2017 年 6 月

答辩委员会主席 

**Research on the Collaborative Optimization of Storage Space  
Allocation and Yard Crane Scheduling Problem in Container  
Terminal Yard**

**A thesis Submitted to  
Dalian Maritime University**

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

**by**

**Yao Xi**

**(Communications and Transportation Engineering)**

**Thesis Supervisor: Professor Fan Houming**

**Assistant Supervisor: Senior Engineer Zhao Dianxin**

**April 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 “集装箱码头堆场箱位分配与场桥调度协同优化研究”。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: 姚菡

## 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: 姚菡 导师签名: 范明

日期: 2017 年 6 月 13 日

## 摘要

随着经济全球化进程的加快，各国各地区间的贸易往来更加频繁，集装箱码头在全球集装箱运输网络中的节点作用越来越重要。集装箱吞吐量不断增长以及船舶大型化发展，对集装箱码头的运营效率提出了更高的要求。为了促进码头高效且经济运作，必须对码头资源进行合理有效的管理和调度，以减少车船的周转时间，降低码头运营成本。集装箱堆场在码头的日常运营管理中扮演着重要的角色，其作业效率直接影响码头整体的运营效率和运营成本，堆场空间资源如何分配以及机械资源如何调度是码头管理者极为关注的问题。另一方面，全球气候变化问题日趋严重，集装箱码头面临的节能减排压力也不断增大，建设绿色低碳港口是港口发展的必然趋势。因此，考虑能源消耗的集装箱码头堆场资源管理和调度优化研究十分必要。

本文对集装箱码头堆场作业系统进行了深入分析，包括堆场资源、作业效率影响因素以及能源消耗等。为实现堆场作业整体优化，本文采用分区域平衡策划方法进行场地策划，将出口箱的箱位分配问题和场桥调度问题结合在一起进行研究，以最小化送箱集卡在堆场等待时间和场桥作业总能耗为目标，建构堆场箱位分配与场桥调度协同优化模型，综合考虑场桥间安全距离和场桥作业量均衡约束。通过设计混合模拟退火遗传算法对模型进行求解，得到出口箱贝位分配方案和场桥作业方案。

本文通过改变场桥数量、贝位数量、待堆存出口箱箱量进行了大量的数值实验，以说明模型与算法的有效性和适用性。实验结果显示：与传统遗传算法相比，本文所设计的算法求解结果较优，且具有较快的收敛速度；与传统场地策划规则进行对比，本文采用的分区域平衡策划方法得到的贝位分配方案和场桥调度方案更优，可以有效减少集卡的等待时间，降低场桥作业能耗。

**关键词：集装箱码头堆场；箱位分配；场桥调度；能源消耗；作业量均衡**

## ABSTRACT

With the acceleration of economic globalization, the trades between various countries and regions become more frequent. As the nodes in the global container transportation network, container terminals are more and more important. The continuous increase of container throughput and the development of large-scale ship bring forward a higher demand for the operational efficiency of container terminal. In order to promote the efficient and economical operation, the terminal must carry out effective management and scheduling of resources to reduce the turnaround time of ships and trucks and reduce the operating costs of the terminal. Container yard plays an important role in the daily operation and management of the container terminal. The operating efficiency of container yard directly affects the operational efficiency and operation cost of the whole port. How to allocate the space resources of the yard and how to schedule the mechanical resources of the yard is a matter of great concern to the managers of the port. On the other hand, the problem of global climate change is becoming more and more serious. The pressure of energy saving and emission reduction faced by container terminals is also increasing. The construction of green and low-carbon port is the inevitable trend of port development. Therefore, it is very necessary to study the optimization of resource management and scheduling of the container terminal yard with energy consumption considered.

In this paper, the operating system of container terminal yard is thoroughly analyzed, including the resource of yard, the influencing factors of the operating efficiency and the energy consumption. In order to realize the overall optimization of the yard operation, this paper uses the method of the regional balance planning to make storage plan, integrating the storage space allocation problem for outbound and yard crane scheduling problem into a whole. Considering the safety distance and the workload balance between yard cranes, a collaborative optimization model of storage space allocation and yard crane scheduling problem in container terminal yard is

established with the objective of minimizing the waiting time of trucks and the energy consumption of yard cranes. A hybrid simulated annealing genetic algorithm is designed to solve the model, obtaining the schemes of bay allocation and yard crane scheduling for outbound containers.

In order to illustrate the effectiveness and applicability of the model and algorithm, this paper conducts a large number of numerical experiments by changing the number of yard cranes, the number of bays and the number of outbound containers. The experimental results show that the proposed algorithm in this paper has better results and a faster convergence speed than the traditional genetic algorithm. Compared with the traditional yard planning method, the method of the regional balance planning adopted in this paper gets better schemes of bay allocation and yard crane scheduling, which can effectively reduce the waiting time of trucks and the energy consumption of yard cranes.

**Key Words: Container Terminal Yard; Storage Space Allocation; Yard Crane Scheduling; Energy Consumption; Workload Balance**

## 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                  | 1  |
| 1.1 研究背景和研究意义 .....             | 1  |
| 1.1.1 研究背景 .....                | 1  |
| 1.1.2 研究意义 .....                | 3  |
| 1.2 国内外研究现状 .....               | 4  |
| 1.2.1 箱位分配研究综述 .....            | 4  |
| 1.2.2 场桥调度研究综述 .....            | 5  |
| 1.2.3 堆场资源协同优化研究综述 .....        | 6  |
| 1.2.4 研究现状综述 .....              | 7  |
| 1.3 研究内容和技术路线 .....             | 8  |
| 1.3.1 研究内容 .....                | 8  |
| 1.3.2 技术路线 .....                | 9  |
| 第 2 章 集装箱码头堆场作业系统 .....         | 11 |
| 2.1 集装箱码头堆场概述 .....             | 11 |
| 2.1.1 堆场的功能 .....               | 11 |
| 2.1.2 堆场的分类 .....               | 12 |
| 2.1.3 堆场作业类型 .....              | 13 |
| 2.2 集装箱码头堆场资源 .....             | 14 |
| 2.2.1 堆场空间资源 .....              | 15 |
| 2.2.2 堆场机械资源 .....              | 18 |
| 2.3 堆场作业效率影响因素分析 .....          | 20 |
| 2.4 堆场作业系统的能源消耗 .....           | 22 |
| 2.5 本章小结 .....                  | 23 |
| 第 3 章 堆场箱位分配与场桥调度协同优化模型建立 ..... | 24 |
| 3.1 问题描述 .....                  | 24 |
| 3.2 模型建立 .....                  | 25 |
| 3.2.1 模型假设 .....                | 25 |
| 3.2.2 符号说明 .....                | 25 |
| 3.2.3 目标函数 .....                | 27 |
| 3.2.4 约束条件 .....                | 27 |
| 3.3 多目标规划问题的处理 .....            | 29 |
| 3.4 本章小结 .....                  | 29 |



|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第 4 章 堆场箱位分配与场桥调度协同优化模型求解 ..... | 31 |
| 4.1 算法介绍 .....                  | 31 |
| 4.1.1 遗传算法 .....                | 31 |
| 4.1.2 模拟退火算法 .....              | 33 |
| 4.1.3 混合模拟退火遗传算法 .....          | 34 |
| 4.2 基于混合模拟退火遗传算法的模型求解 .....     | 36 |
| 4.2.1 染色体编码 .....               | 37 |
| 4.2.2 生成初始种群 .....              | 38 |
| 4.2.3 适应度函数 .....               | 38 |
| 4.2.4 遗传操作 .....                | 38 |
| 4.2.5 模拟退火操作 .....              | 40 |
| 4.2.6 算法终止规则 .....              | 40 |
| 4.3 本章小结 .....                  | 40 |
| 第 5 章 数值实验 .....                | 41 |
| 5.1 算例描述 .....                  | 41 |
| 5.2 算例求解 .....                  | 43 |
| 5.3 实验结果分析 .....                | 46 |
| 5.4 本章小结 .....                  | 48 |
| 第 6 章 结论与展望 .....               | 50 |
| 6.1 本文研究成果总结 .....              | 50 |
| 6.2 本文研究方向展望 .....              | 50 |
| 参考文献 .....                      | 52 |
| 攻读学位期间公开发表论文 .....              | 56 |
| 致    谢 .....                    | 57 |

## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究背景和研究意义

#### 1.1.1 研究背景

全球经济一体化促进各国之间的货物流动愈加频繁，推动了海运行业的发展。集装箱运输作为一种新型的运输方式，具有高效率、高安全、高效益等优点，能够更好的实现货物“门到门”的运输要求，广泛应用于国际贸易运输。集装箱码头作为水路与陆路运输的连接点，为集装箱船停靠和装卸作业提供了场所，在集装箱运输网络中占有重要地位，其营运效率直接影响海运供应链的整体运作效率。

全球贸易量的 90%是通过海上运输实现的，集装箱运输凭借自身的优势成为海上运输的重要组成部分。数据显示，全球集装箱海运量从 2002 年的 0.76 亿 TEU 增长至 2015 年的 1.777 亿 TEU，增长了 133.81%。随着我国市场经济的不断完善与发展，我国对外贸易量不断扩大，随之而来的我国港口货物和集装箱吞吐量出现迅猛增长，如图 1.1 所示。除了受到 2008 年全球经济危机的影响，2009 年我国集装箱吞吐量出现略微下滑外，从 2001 年到 2015 年，我国港口集装箱吞吐量基本呈现逐年快速上涨趋势，年平均增长率约 14.6%。集装箱吞吐量的增加给码头带来了机遇，同时也带来了挑战，一些码头出现生产超负荷的现象。为满足日益增长的集装箱作业量的需求，码头需要不断提升其运营管理水平，提高作业效率。目前，大部分港口堆场空间资源相对紧张，尽管港口的基础设施在不断的建设与完善，堆场空间资源紧张与港口集装箱吞吐量不断增加的矛盾愈加凸显。提高码头堆场通过能力最为直接有效的手段是扩建码头、增添相关作业设备，但由于地理因素及资金等的限制，这些措施短时间内无法实施。因此，在有限的条件下，若想提高码头的作业水平，只能最大程度的利用现有资源，实现堆场资源的科学优化管理。

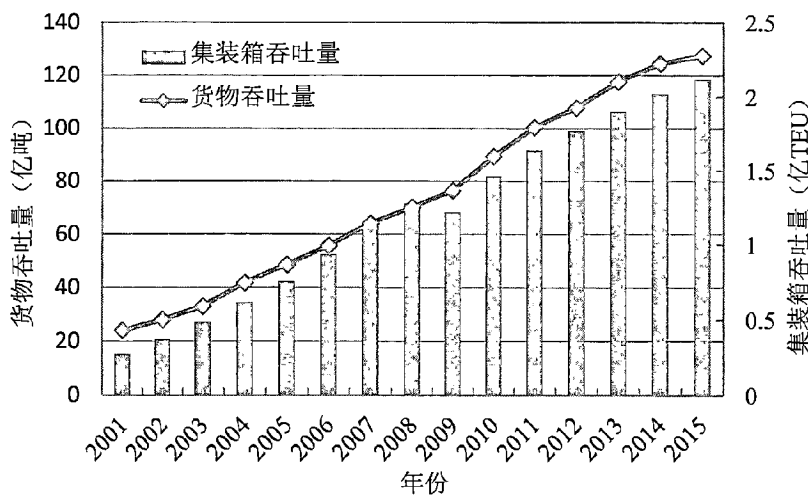


图 1.1 2001 年-2015 年我国港口货物和集装箱吞吐量

Fig. 1.1 Cargo and container throughput of Chinese port from 2001 to 2015

随着集装箱海运量的逐渐增长，大型船舶受到航运企业的青睐度提升，集装箱船呈现大型化发展趋势。第一艘专门设计建造的集装箱船出现于 20 世纪 60 年代，载箱量不到 1000TEU；80 年代出现了箱位数为 3000TEU 的集装箱船；90 年代中期，5000~6000TEU 的集装箱船开始投入运营；2006 年，马士基运营的艾玛-马士基号集装箱船，载箱量为 11000TEU。目前，世界上最大的集装箱船是由东方海外营运的“东方香港”号，理论载箱量高达 21413TEU，大型集装箱船的出现对集装箱码头的装卸配套设施和装卸工艺提出了更高的要求。除此之外，尽管我国港口集装箱吞吐量保持逐年涨，但近几年航运市场低迷，货运量增长放缓，码头间的竞争更加激烈，码头只有不断优化作业效率，提高服务质量，从而在竞争中处于优势地位，才能争取到越来越多的大型船舶到码头挂靠。

船舶大型化发展趋势下，每条船舶的集港箱量逐渐增多，在集港高峰时期会出现大量集卡同时到达港口的现象，港口需要投入更多的人力资源、堆场机械资源和空间资源，以满足大型船舶集港箱的堆存需求，集装箱堆场成为码头组织生产的关键环节。堆场的作业计划主要包括集装箱堆存计划和场桥作业计划，编制合理的堆存计划和场桥作业计划，提高堆场空间资源和机械资源利用率，对港口的管理运营具有重要意义。在集装箱堆场中，场桥是进行集装箱装卸作业的常用

设备，箱区单场桥作业效率渐渐不能满足大型船舶的集港需求，需要配置多台场桥同时进行作业，以缩短集卡在港周转时间，提高集港效率。

另一方面，随着工业化进程的加速，全球气候变化问题日趋严重，空气污染持续加剧，发展低碳经济迫在眉睫。2015年6月30日，我国正式公布《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》文件，承诺到2020年，与2005年相比，单位GDP对应的CO<sub>2</sub>排放量下降40%~45%；到2030年，单位GDP对应的CO<sub>2</sub>排放量较2005年下降60%~65%。交通运输行业是能源消耗大户，其碳排放量占全球碳排放总量的20%以上。国际海事组织发布的数据显示，2012年航运业CO<sub>2</sub>排放量高达7.96亿吨，约占全球CO<sub>2</sub>排放量的2.2%。为实现碳排放量的目标，交通运输行业尤其是航运业的碳减排是必然的发展趋势。集装箱码头是海上运输的重要节点，并且是典型的能源密集型行业，在码头生产作业中，岸桥、场桥和集卡等作业设备消耗大量的燃油和电力，产生大量的碳排放，严重污染环境。为了解决集装箱码头能源消耗高、环境污染大的问题，亟需优化码头的用能结构，对主要耗能作业环节进行控制，以降低码头能耗，减少碳排放。

### 1.1.2 研究意义

集装箱堆场作为码头的重要资源，其高效运作是提高码头集装箱吞吐量的关键因素。在船舶大型化、绿色低碳港口建设的背景下，集装箱堆场作业优化面临更加严峻的考验。如何选择合适的出口箱堆存策略，充分利用堆场空间资源；如何为出口箱分配最优的堆存位置，减少装船时的翻箱作业次数；如何在场桥调度模型中考虑场桥作业现实约束，使模型贴合实际；何如确定场桥作业任务的顺序，减少场桥的作业能耗，同时减少送箱集卡在堆场的等待时间，提高集港效率，这些都是码头堆场运营管理中必须解决的问题，研究这些问题具有重要的理论与现实意义。

#### （1）理论意义

集装箱码头堆场资源管理主要包括箱位分配、场桥的配置与调度，本文研究堆场箱位分配与场桥调度协同优化问题，考虑场桥间安全距离和场桥作业量均衡，把多资源协同和均衡理念抽象为数学优化模型，构建了以送箱集卡在堆场等待时间最小和场桥作业总能耗最小为目标的多目标规划模型，此研究可为集装箱码头

堆场系统协同优化作业提供理论指导。

## （2）实践意义

集装箱码头堆场箱位分配和场桥调度直接影响整个码头的运营效率和运营成本。如果箱位分配计划和场桥调度计划安排不合理，可能现场桥长距离跑位、场桥间相互干扰，或者场桥长时间空闲等现象，导致场桥作业效率低。本文对集装箱堆场箱位分配与场桥调度进行协同优化，为集装箱合理地分配堆存位置，确定场桥作业顺序，减少集卡等待时间，降低场桥作业能耗，提高堆场作业效率，提高码头的经济效益，提升其服务水平，促进绿色低碳港口建设。

## 1.2 国内外研究现状

码头集装箱吞吐量的逐年攀登和船舶大型化的发展，对堆场的作业能力提出了更高的要求，优化堆场的运作效率十分必要。目前国内外许多学者对堆场作业优化问题进行了研究，主要包括箱位分配、场桥调度以及堆场资源协同优化等。

### 1.2.1 箱位分配研究综述

集装箱堆场箱位分配问题大致可以分为两类：箱区分配优化问题和箱区具体箱位分配问题。针对堆场箱区分配问题，Zhang 等<sup>[1]</sup>运用确定性规划方法，对混堆模式下箱区分配问题进行研究，将该问题划分为两个阶段，第一阶段以平衡箱区作业量为目标，确定规划期各时段分配到各箱区的箱量，第二阶段以集卡在箱区和泊位间行驶距离最短为目标，确定分配到各箱区的各船舶的箱量。李建忠等<sup>[2]</sup>将上述模型的目标函数进行修改，以平衡箱区贝位间的作业量和最小化内集卡行驶距离为切入点，建立堆场空间资源分配优化模型。王斌<sup>[3]</sup>基于 Zhang 等<sup>[1]</sup>的研究，考虑进、出口箱数量的不确定性，将机会约束规划方法应用到第一阶段集装箱的箱区分配中。Bazzazi 等<sup>[4]</sup>对以 Zhang 等<sup>[1]</sup>的研究进行拓展，考虑集装箱类型对箱区分配决策的影响，建立堆场箱区分配模型。

Kim 和 Park<sup>[5]</sup>针对出口箱箱区分配问题建立混合整数线性规划模型，不仅考虑集卡在箱区和泊位间的行驶成本，同时对堆场装卸设备的移动成本进行优化。Lee 等<sup>[6]</sup>对中转码头的集装箱堆存箱区分配问题进行研究，为进口箱分配堆存箱区，确定场桥的最小配置数量，并提出作业量高低均衡策略，以减少交通拥堵。Sharif 和

Huynh<sup>[7]</sup>将蚁群算法应用到集装箱堆场的箱位分配研究,为每个集装箱分配堆存箱区。檀财茂等<sup>[8]</sup>通过建立箱区空间分配优化混合整数规划模型,为各子箱区分配航线,减少出口箱装船作业时引起的堆场拥堵,降低集卡能耗成本和能耗碳排放成本。

针对箱区具体箱位分配问题, Kim 等<sup>[9]</sup>考虑重箱先装船,基于出口箱的重量级,为其分配贝位内具体堆存箱位,以装船时翻箱量最小为目标,建立动态规划模型求解堆存方案,并运用决策树生成实时决策方案。Zhang 等<sup>[10]</sup>对箱位分配问题进行研究,通过一个反例说明 Kim 等<sup>[9]</sup>提出的翻箱量转换公式存在错误,并对其进行了修正。Kang 等<sup>[11]</sup>针对集装箱重量不确定性,采用模拟退火算法确定出口箱的堆存策略,减少装船时的翻箱量。Dekker 等<sup>[12]</sup>通过仿真实验对自动化码头堆场随机堆存和分类堆存两种策略进行研究,研究结果表明分类堆存策略比随机堆存策略更优。

Chen 等<sup>[13]</sup>、范灵芳等<sup>[14]</sup>提出出口箱箱位分配两阶段优化模型,第一阶段建立出口箱贝位分配模型,减少装船时集卡水平运输距离,并均衡各箱区的作业量,第二阶段为分配到各贝位的出口箱确定具体堆存箱位,最小化装船时的翻箱次数。周鹏飞和方波<sup>[15-16]</sup>考虑出口箱交箱时间的不确定性,建立堆场贝位分配和贝位内具体箱位分配的两阶段规划模型,最小化场桥的移动距离和翻箱数。陈超等<sup>[17]</sup>针对随机入港策略,提出出口集装箱箱区选择与箱位分配协调优化问题,最小化场桥作业成本以及装船作业时集卡完成单位集装箱作业任务的行驶时间。邵乾虔等<sup>[18]</sup>研究客户交箱时间不确定下的堆存作业优化问题,结合历史数据,利用马尔可夫链预测方法得到广义交箱序列,对堆存作业过程中单台场桥的移动距离和预期翻箱数进行优化。

### 1.2.2 场桥调度研究综述

根据研究复杂程度,集装箱堆场的场桥调度研究可以分为单场桥调度及多场桥调度两类。针对单场桥调度问题, Kim 等<sup>[19]</sup>研究出口箱装船时单台场桥的行走路径问题,确定场桥在每个贝位的提箱数量以及贝位作业顺序,以减少场桥总的作业时间。Kim 等<sup>[20]</sup>对单台场桥作业下集卡送箱和提箱的服务顺序问题进行研究,减少集卡服务迟延成本。韩晓龙<sup>[21]</sup>以龙门吊装船作业过程中行走时间最短为目标,

建立龙门吊行走路径混合整数规划模型。Ng 和 Mak<sup>[22]</sup>基于给定任务建立单场桥调度整数规划模型,以减少任务总的等待时间,并运用分支定界算法进行求解。Guo 等<sup>[23]</sup>基于预测的集卡到达信息,对单台场桥服务集卡送箱和提箱的作业顺序进行了优化,以减少集卡的等待时间。

关于多场桥调度研究,按照是否考虑场桥间的相互干涉划分为两类。未考虑场桥间的干扰约束的研究包括:Zhang 等<sup>[24]</sup>建立了箱区间多场桥调度混合整数规划模型,以减少计划期箱区总的未完成工作量。李建忠<sup>[25]</sup>对场桥的动态配置问题进行研究,以减少各箱区未完成工作箱量和场桥的闲置时间。Lee 等<sup>[26]</sup>研究装船作业中两台场桥的取箱调度优化问题,以总的装卸时间最小为目标建立数学模型,未考虑场桥间的干扰约束。He 等<sup>[27]</sup>采用滚动计划方法研究箱区间多场桥调度问题,最小化计划期总作业溢出量和场桥总的转场次数。He 等<sup>[28]</sup>,郑宇超等<sup>[29]</sup>考虑场桥作业效率和能源消耗的均衡问题,建立场桥调度双目标优化模型,以减少场桥完成任务组的迟延时间和能源消耗量。赵磊等<sup>[30]</sup>建立场桥均衡调度模型,均衡场桥作业箱量和作业时间。

考虑场桥间干扰约束的研究包括:Ng<sup>[31]</sup>,Mak 等<sup>[32]</sup>考虑相邻场桥间的相互干扰约束,以场桥任务完成时间最少为目标,建立多场桥调度模型。Li 等<sup>[33]</sup>对箱区内的同时存取箱作业进行优化,并使作业场桥满足安全距离约束。郑红星等<sup>[34-35]</sup>考虑场桥间不能相互跨越,建立混堆模式下箱区内多场桥调度模型,确定场桥任务作业顺序。随后,郑红星等<sup>[36]</sup>研究了混堆模式下箱区间的场桥调度问题,并考虑了场桥作业量的均衡约束。乐美龙和殷际龙<sup>[37]</sup>建立龙门吊调度混合整数规划模型,以减少集卡等待时间,考虑了龙门吊在实际作业中的不可跨越性约束。黄晓波等<sup>[38]</sup>对多台龙门吊在装船作业中的低碳路径优化问题进行研究,将龙门吊作业过程中的碳排放构成分为移动碳排放、装卸碳排放以及准备碳排放三种,以降低龙门吊碳排放量。

### 1.2.3 堆场资源协同优化研究综述

堆场资源协同优化问题包括堆场箱位分配与集卡调度协同优化、场桥与集卡调度协同优化、箱位分配与场桥调度协同优化等。Bish<sup>[39]</sup>研究了对多条船舶装卸问题,将该问题分为进口箱箱区分配和集卡调度两个阶段,以减少船舶在港服务

时间。Cao 等<sup>[40]</sup>建立了集卡调度和箱位分配集成优化整数规划模型，最小化船舶卸箱时间，并分别设计了遗传算法和贪婪启发式算法对模型进行求解。Lee 等<sup>[41]</sup>将集卡调度和箱位分配集成优化问题进行了拓展，建立了同时考虑船舶装箱和卸箱操作的混合整数模型，最小化集卡总的行驶时间和装卸箱操作迟延时间。Kozan 和 Preston<sup>[42]</sup>同时考虑集装箱在泊位与堆场间的运输过程和箱位分配过程，建立集成优化模型。Niu 等<sup>[43]</sup>运用群智能算法对集卡调度和箱位分配集成优化问题进行研究，最小化所有任务的迟延时间。

乐美龙等<sup>[44]</sup>考虑多台龙门吊实际作业中的相互干扰、安全距离以及工作优先等约束，对装船作业下的龙门吊与集卡协同调度问题进行研究，以最小化所有工作总完工时间为目标构建数学模型。Kim and Kim 等<sup>[45]</sup>提出包含空间成本、场桥投资成本、场桥和集卡作业成本的成本优化模型，确定进口箱堆存空间和场桥的配置数量。徐亚等<sup>[46]</sup>针对进口堆场客户取箱时间的不确定性，采用鲁棒反应式策略，建立堆场空间和场桥预调度模型，确定各进口箱区的堆存箱量和各场桥作业箱量，利用拉格朗日松弛算法求解预调度方案，再通过启发式算法修正预调度方案。Liang 等<sup>[47]</sup>建立了包括堆存子系统、场桥调度子系统和协调控制子系统的协调优化模型，为进口箱分配堆存箱区，并确定了场桥作业计划。

#### 1.2.4 研究现状综述

综上所述，目前集装箱堆场箱位分配问题和场桥调度问题的研究取得了重要进展，但多是对两类问题分别进行研究。关于箱位分配问题的研究主要涉及两方面，一方面是箱区分配优化研究，这种研究大多以平衡箱区作业量和集卡行驶距离最短为目标，为每个集装箱分配堆存箱区或确定各箱区堆存箱量；另一方面的研究是针对箱区内具体箱位分配问题，这类问题的研究多以最小化箱区翻箱量以及场桥移动距离为目标，且通常假设一个箱区仅由一台场桥进行作业，较少考虑箱区多场桥作业的情况。多场桥作业下的箱区箱位分配问题还有待探讨。

由上文中关于集装箱堆场场桥调度问题的研究可以看出，场桥调度的研究侧重于多场桥调度研究，多场桥调度问题的存在空间上不可相互跨越的现实约束和场桥间安全距离，问题较为复杂，一些学者在研究多场桥调度问题会忽略场桥间的相互干涉情况或者没有很好的满足场桥间安全距离的要求。此外，场桥调度问



题通常假设任务的堆存位置为已知，没有考虑堆存空间的分配问题，多是对场桥作业时间和计划期剩余工作量进行优化，很少考虑场桥作业均衡约束，且鲜有研究考虑作业设备能源消耗问题。

部分学者对堆场资源协同优化问题进行了研究，分析研究了堆场箱位分配、集卡调度、场桥调度多环节的协同优化，以实现堆场作业全局优化。从上文关于堆场资源协同优化的研究可以看出，堆场资源协同优化的研究主要集中在堆场箱位分配与集卡调度协同优化研究，堆场箱位分配与场桥调度协同优化的研究尚少，仅文献[46]和[47]对箱位分配和场桥调度协同优化问题进行了研究。文献[46]确定了各进口箱区的堆存箱量和各场桥作业箱量，但研究没有细化到具体的集装箱堆存任务，文献[47]为进口箱分配了堆存箱区，并明确了场桥的具体作业任务，两者均没有明确具体的堆存贝位，也没有考虑场桥间的相互干涉。因此，考虑场桥实际作业过程中的安全距离和场桥作业量均衡约束的箱位分配和场桥调度协同优化有待进一步研究。

## 1.3 研究内容和技术路线

### 1.3.1 研究内容

集装箱码头堆场作为集装箱水路换装作业的缓冲区域，是码头生产作业的关键环节，其作业效率直接影响码头的整体作业效率。堆场的空间资源和作业设备是堆场的主要资源，空间资源分配是否合理，直接决定装船时堆场的翻箱作业次数，影响船舶装卸效率，而作业设备是否充分有效利用，也直接决定堆场的作业效率以及营运成本，影响码头的生产作业水平。堆场的资源本身有限，如何合理有效利用堆场已有资源，提高堆场作业效率，成为了研究的重点。

本文以集装箱码头堆场的出口箱区为研究对象，研究堆场箱位分配和场桥调度协同优化问题，通过合理的出口箱堆存策略和场桥调度方案，优化堆场作业效率，提高码头经营管理水平。基于出口箱到达信息，本文考虑场桥作业均衡以及安全距离约束，采用分区域平衡策划方法，以最小化送箱集卡在堆场等待时间和场桥作业总能耗为目标，建立堆场箱位分配和场桥调度协同优化模型，并设计混合模拟退火遗传算法对模型进行求解，最终得到出口箱贝位分配方案和场桥作业

方案。具体章节结构如下：

第一章，绪论。介绍论文的研究背景和意义，分别从箱位分配研究、场桥调度研究以及堆场资源协同优化三方面进行文献综述，并陈述了论文的研究内容和技术路线。

第二章，集装箱码头堆场作业系统。概述了集装箱码头堆场的基本情况，分别对堆场空间资源和机械资源进行介绍，分析了堆场作业效率的主要影响因素，并对集装箱码头生产能耗情况进行阐述。

第三章，堆场箱位分配与场桥调度协同优化模型建立。首先对堆场箱位分配与场桥调度协同优化问题进行了描述，然后以最小化送箱集卡在堆场等待时间和场桥作业总能耗为目标建立协同优化模型，并对模型中的目标和约束给出解释说明。

第四章，堆场箱位分配与场桥调度协同优化模型求解。阐述了遗传算法、模拟退火算法的基本原理，在此基础上分析了混合模拟退火遗传算法的设计策略，并针对第三章构建的模型，设计了混合模拟退火遗传算法，对算法的步骤进行了详细描述。

第五章，数值实验。引入算例，对模型进行数值仿真实验，过对比分析分区域平衡策划和传统场地策划下的实验结果，以及通过改变场桥数量、贝位数量、待堆存出口箱箱量的数值实验，说明本文模型和算法的有效性。

第六章，结论与展望。总结本文的研究内容，指出研究中存在的不足，提出未来的研究方向。

### 1.3.2 技术路线

本文的技术路线如图 1.2 所示。

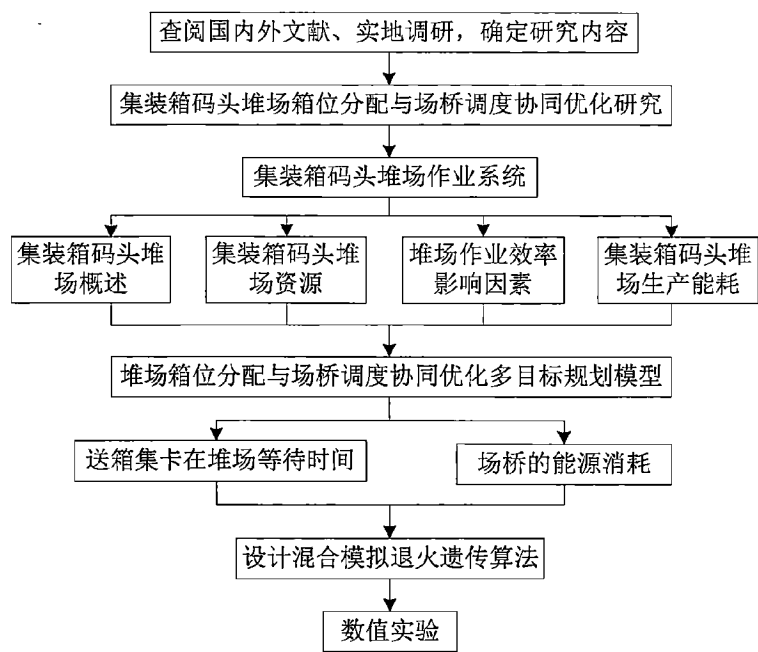


图 1.2 技术路线图

Fig. 1.2 Technology roadmap

## 第2章 集装箱码头堆场作业系统

### 2.1 集装箱码头堆场概述

集装箱码头作业系统主要包括闸口作业子系统、集卡水平运输子系统、堆场作业子系统和泊位子系统四部分。集装箱码头将作业子系统有效组织起来,使各个作业子系统连接畅通,以实现集装箱在码头的快速装卸作业。堆场作业子系统在集装箱码头的整个生产运作中发挥着重要的作用,优化堆场作业不仅有利于提高堆场的作业效率、降低堆场的运营成本,还能够间接提高泊位子系统的装卸效率,从而缩短船舶在港时间。

#### 2.1.1 堆场的功能

集装箱堆场是集装箱保管和集散的场地,是码头的主要占地区域,为集装箱水运与陆运起到衔接缓冲作用。它主要包括集装箱堆存、交接、货运、检验和修理等功能<sup>[48]</sup>。

##### (1) 集装箱堆存功能

出口集装箱在装船前需要在堆场进行临时堆存和保管,等待通关和装船,等到船舶到港进行装船时,再由码头统一安排作业机械进行装船作业。堆场堆存出口箱不仅便于海关对集装箱进行监管以及集装箱的通关操作,而且还有利于保证船舶的装卸效率,提高码头的通过能力。对于进口集装箱,从船上卸下后也暂时堆放在堆场,客户可以在免费堆存期内根据自身情况灵活安排提箱时间,超出免费堆存时间,码头会收取相应的堆存费。对于中转型集装箱码头,集装箱堆场还为中转箱提供堆放场地。在货运淡季时,船公司通常会在其经营航线所涉及的码头储备大量的空箱,为货运旺季做充足的准备。

##### (2) 集装箱交接功能

集装箱交接指集装箱堆场与提箱人或还箱人之间的交接,是集装箱经营人与用箱人之间责任的转移过程。以货物出口为例,货物可以用客户的集装箱装载或由船公司提供的集装箱装载,若采用船公司提供的集装箱,则需要去船公司存放空箱的码头堆场提取空箱,此时堆场与提箱人之间发生集装箱交接,在进行交接时应仔细检查集装箱是否适载和适货,如果集装箱完好,托运人或其代理人

场经营人一起在《设备交接单》上确认签字。货物装载完毕后，集装箱被送至码头，闸口对相关单证进行核对，检查集装箱的铅封是否完整以及外表状况是否完好，然后运至指定的箱区进行堆存，等待装船。

### （3）集装货运功能

码头堆场的日常业务还包括集装箱拆、拼箱作业，即堆场的货运功能，这些工作在集装箱货运站或拆装箱区完成。堆场的货运业务有助于拓宽码头的经营范围，进而提高码头的集装箱吞吐量。

### （4）集装箱检验和修理功能

集装箱在使用过程中会出现自然损耗和损坏，对于尚未失去修理价值的集装箱，在下次投入使用之前必须进行检验和修理。集装箱的检验和修理是集装箱堆场的一项重要工作，有利于提高集装箱的利用率，同时也促进了集装箱交接的顺利进行。

## 2.1.2 堆场的分类

集装箱码头堆场通常根据堆场的位置分为前方堆场和后方堆场。前方堆场靠近码头前沿，用于集装箱的暂时堆放，从而加快船舶装卸效率。它的主要作用是在船舶靠港前，根据配积载要求将出口箱有计划 and 次序的进行堆放，减少装船时的翻箱作业，卸船作业时先将进口箱暂时堆放在前方堆场，加速卸船效率，缩短船舶在港装卸时间。后方堆场是集装箱码头交接、堆存和保管重、空箱的场所，是办理整箱“场到场”交接方式的场所。前方堆场与后方堆场不存在严格的分界线，有些集装箱码头没有前后方堆场之分，统称为堆场。

此外，集装箱码头还有其他划分方式：根据货物种类，可将其分为普通箱区、冷藏箱区、危险品箱区、特种箱区；根据集装箱的状态，可将其分为重箱区、空箱区，空箱区具有空箱收集、交接、堆存以及保管的功能，在集装箱装卸区的空间不足时予以设立；根据进出口业务，可将其分为进口箱区、出口箱区；按照集装箱的中转类型，可将其分为国内中转箱区、国际中转箱区。集装箱堆场的划分不是固定的，可以根据码头堆场的业务进行相应的调整，比如如果没有中转业务，就无需划分中转箱区。

2.1.3 堆场作业类型

集装箱堆场日常的生产作业分为主要包括：卸船收箱作业、装船发箱作业、进箱收箱作业、提箱发箱作业<sup>[49]</sup>。堆场的作业类型也可以分为出口箱作业、进口箱作业以及中转箱作业<sup>[50]</sup>，作业流程图分别如图 2.1-2.3 所示，其中出口箱作业包括进箱收箱作业和装船发箱作业，进口箱作业包括卸船收箱作业和提箱发箱作业，而中转箱作业包括卸船收箱作业和装船发箱作业。

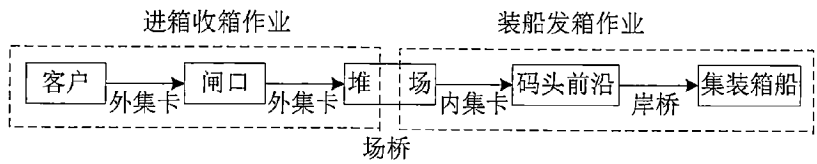


图 2.1 出口箱作业流程

Fig. 2.1 Flow of export container

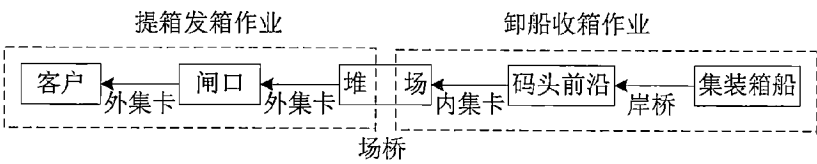


图 2.2 进口箱作业流程

Fig. 2.2 Flow of import container

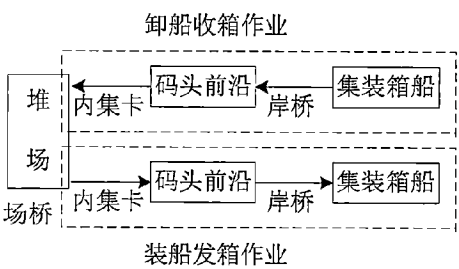


图 2.3 中转箱作业流程

Fig. 2.1 Flow of transfer container

卸船收箱作业是指船舶靠港后，岸桥将集装箱从船上卸至内集卡上，由内集卡运送到进口箱区，然后场桥按一定的堆码规则进行堆存的作业。堆场业务员在

收箱时，必须严格根据卸船顺序单对箱号进行核对，检查箱体外表状况和铅封，集装箱经检查和核对无误后再进行堆存。

装船发箱作业是指内集卡将出口箱从出口箱区运至码头前沿，船边验箱员检查箱体外表状况和铅封，并核对箱号，然后根据船舶配载图，岸桥司机将集装箱吊至指定的船上箱位进行堆放。

进箱收箱作业是指在集港期内，客户将出口集装箱运至堆场，按照堆场作业计划进行堆存的作业。外集卡抵达码头时，闸口工作人员核对车、箱信息，检查箱体外表铅封，经确认无误后为集装箱指定箱位，外集卡按照指定路线将集装箱运至堆场，场桥进行卸箱堆存作业。

提箱发箱作业是指客户将集装箱从堆场提走的作业。提箱前，客户先向码头申请提箱，然后持提货单到码头办理提货手续，经闸口验收后放行，打印提箱小票，堆场业务员根据提箱小票发箱。

堆场除了正常的生产作业，也难免出现集装箱在堆场内不必要的移动，包括转堆作业和翻箱作业。转堆作业是指将集装箱从箱区中的某一箱位转移至目标箱位的作业过程，翻箱作业是指为提取目标箱而将压在其上方的集装箱移到贝位其他位置，翻箱作业主要分为三种类型：出口箱装船时翻箱作业、提取进口箱时翻箱作业以及移箱时翻箱作业。转堆和翻箱作业都是不产生价值的作业方式，浪费不必要的人力、物力和财力，堆场需采取有效的管理方式对其进行控制，尽量减少转堆和翻箱作业。

## 2.2 集装箱码头堆场资源

集装箱码头属于资本密集型产业，合理配置码头资源有利于提高码头经济效益、降低码头运营成本，对码头运营管理至关重要。堆场占有集装箱码头的大部分资源，主要包括空间资源和机械资源，堆场资源管理即是对这两种资源进行优化管理。有效利用堆场资源，为集装箱安排恰当的堆存位置和作业机械，既有利于减少翻箱量，提高堆场作业效率，减少岸桥等箱时间，还能够提高堆场空间资源和机械资源的利用率，有助于提高码头集装箱通过能力，增强码头的竞争力。

2.2.1 堆场空间资源

堆场空间资源是指集装箱码头用于堆放集装箱的空间大小，堆场的堆存能力由堆场空间资源的大小决定。为了便于对堆场进行标准化管理，码头会将堆场划分为多个标准化的箱区，从贝、排、层三个维度对箱区进行进一步划分，得到多个存储空间，即堆场集装箱的最小堆存单元—箱位，堆场箱区示意图如图 2.4 所示。堆场空间资源管理主要包括箱区的划分和布局、集装箱堆存箱位的分配，箱区的划分和布局属于堆场设计层面的问题，集装箱堆存箱位的分配属于堆场运行层面的问题，是本文的研究范畴。本文下面从堆场箱位编号、堆存模式和堆放策略三方面详细介绍堆场的空间资源管理。

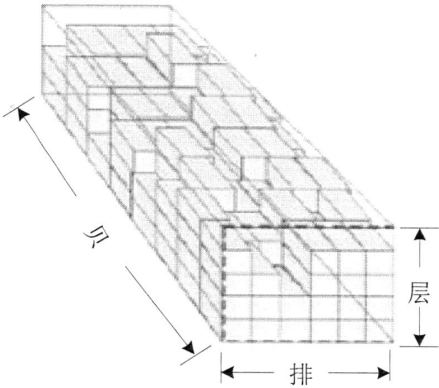


图 2.4 堆场箱区示意图

Fig. 2.1 Illustration of storage block

(1) 堆场箱位编号

在码头的实际作业中，为了准确定位堆场中堆放的每一个集装箱的位置，每个集装箱堆存箱位对应一个具体的编号，通过箱区号、贝位号、排号以及层号对堆存箱位进行唯一标识。

- 1) 箱区号。集装箱码头一般采用的箱区号是由一个英文字母和一个数字组成，英文字母表示泊位号，数字表示从海测到陆测堆场的顺序号。
- 2) 贝位号。贝位号通常由两位数字组成，奇数 01,03,05...用于表示堆存 20ft 集装箱的贝位，偶数 02,04,06...用于表示堆存 40ft 集装箱的贝位。每个箱区包含若干贝位，贝位的数量与箱区的长度有关。
- 3) 排号。排号用一位数字表示，贝位包含的排数由场桥的横向跨度决定，通



常贝位中的排数为六。

4) 层号。层号用一位数字表示,用来标识箱区的堆垛高度,堆垛高度由场桥的高度决定,一般为四层或五层。

以一个堆存箱位编号 A10324 为例进行说明,该编号表示 20ft 的集装箱堆放 A1 区 03 贝第二排第四层。

### (2) 堆存模式

根据进出口重箱是否分开堆放管理,集装箱码头堆场的堆存模式可分为分堆模式和混堆模式两种。

#### 1) 分堆模式

当集装箱码头堆场空间资源相对富裕时,堆场一般采用分堆模式,即将出口箱和进口箱在不同的箱区进行堆存,出口箱区的箱位仅堆存待装船的出口箱,而进口箱区的箱位仅堆存卸船后待提箱的进口箱。在此种堆存模式下,为了便于快速装船,出口箱区一般位于前方堆场,而进口箱区一般位于后方堆场,以方便客户提箱。分堆模式让堆场作业复杂程度降低,降低了堆场的管理难度,有助于减少堆存翻箱作业次数,提高客户服务水平。分堆模式的不足之处在于可能出现很多空箱位,导致空间资源的浪费。对于采取分堆模式的集装箱码头,可以根据码头进口箱和出口箱所占的比重来分配箱区面积,便于码头对重点箱区进行管理。

#### 2) 混堆模式

近年来,随着码头集装箱吞吐量的不断增长,一些集装箱码头的堆场空间资源逐渐紧张,如香港港、上海港、宁波北仑港等,为应对堆场堆存面积不足的问题,这些码头堆场采取混堆模式。所谓混堆模式是指堆场不将箱区划分为进出口箱区,每个箱区既能堆存出口箱同时也堆存进口箱。混堆模式最大的优点在于码头能够充分利用堆场的空间资源,提高空间资源的利用率。但是此种堆存模式的弊端也比较明显,一方面进出口箱混合堆放会增加装船时的翻箱作业次数,增加作业机械运行成本,另一方面混堆模式下同时存在内、外集卡装卸作业,使堆场作业流程复杂性增加,降低装卸作业效率。

### (3) 堆放策略

出口箱在进场堆存时一般遵循一定的规则,以减少后续装船时的翻箱作业次

数,根据出口箱的集港策略,可以将出口箱区堆放策略分为集中堆放和分散堆放。

1) 集中堆放。出口箱通常根据目的港 (port)、尺寸 (size)、种类 (category) 和重量级别 (weight) 进行分组堆放,即遵循 PSCW 原则的集装箱属于同类箱组。集中堆放是指将同一船舶、同类箱组的出口箱堆放在指定箱区的单个贝位或相邻的几个贝位中,这种堆放策略将贝位视为最小堆存单位,适合集中入港策略下的出口箱,便于为其分配堆存箱位,装卸时需要的作业机械数量较少,连续装卸作业时间较长,有助于提高设备作业效率和降低翻箱作业次数。但是该堆放策略对出口箱到港时间有较高要求,容易造成箱区拥堵,并且所需的堆存面积较大,当同类箱组的出口箱不能将一个贝位堆满时,会造成堆存箱位的浪费、堆场空间资源利用率低。

2) 分散堆放。分散堆放是指同类箱组的出口箱堆放以排/列/栈为单位进行堆放,这种堆存策略下出口箱可以零散分布在各个出口箱区,适合随机入港策略下的集装箱。分散堆放对出口箱到港时间没有硬性规定,有助于提高集卡和堆场作业机械的利用率,保证码头作业畅通,并且有利于实现对堆场空间资源的充分利用。但是在装船作业时,分散堆放策略下需要调用多台作业设备,设备能源消耗相对较大,作业计划较为复杂。

进口箱的堆放需要兼顾卸船作业和客户提箱作业,主要包括以下三种堆放策略:

1) 全场混堆。进口箱全场混堆是指不区分航次船名,随机将集装箱卸至进口箱区的某个空箱位,只需箱重满足下层集装箱的承重范围即可。这种堆放策略使堆场作业机械的灵活性得到极大提高,同时促进提升卸船作业效率,但客户提箱时翻箱率也会极高。

2) 按船名航次半混堆。该堆存策略下船名航次相同的进口箱进集中堆放,由于作业集中,箱区占用的作业机械较多,灵活性较差。与全场混堆策略相比,堆场堆存利用率略低,但客户提箱时翻箱率降低。

3) 分票堆存。进口箱分票堆存是指将船名航次相同、提单号相同的进口箱集中堆放,这种堆放策略对进口箱堆存作业计划要求较高,需要配备更多的作业机械,并且堆场堆存利用率不高,但客户提箱方便快捷。

### 2.2.2 堆场机械资源

堆场机械资源承担着堆场集装箱装卸、堆码和搬运等作业，码头不同的装卸工艺对应的堆场作业机械也各不相同，堆场主要的作业机械设备包括门式起重机、集装箱牵引车、正面吊、跨运车、叉车等。

#### (1) 门式起重机

门式起重机又称为龙门吊或场桥，分为轮胎式起重机和轨道式起重机两种，主要负责堆场集装箱装卸作业，是集装箱码头重要的装卸设备。

轮胎式起重机横跨 6 列集装箱和 1 列车道，可以堆码 3-4 层集装箱，能充分利用堆场面积，安装了转向装置，调度灵活，方便从一个箱区转移到另一个箱区，通用性强。轮胎式起重机一般采用柴油发电机驱动，具有较好的操作性能，运行平稳，便于维修保养，购置成本相对较低。但是轮胎式起重机作业能耗较大，容易出现故障，且重量较大，对堆场的轮压大，要求堆场地面的承载能力较强。为了降低燃油消耗成本，集装箱码头进行“油改电”改造，使轮胎式起重机主要能源消耗改为电力，“油改电”后的轮胎式起重机称为电动轮胎式起重机。

轨道式起重机一般采用电力驱动，作业效率略高于轮胎式起重机，作业能耗少，故障率相对较低，容易实现堆场自动化管理，且具有更大的跨度，可以横跨 12-16 列集装箱，堆码高度为 4-5 层，有助于提升堆场的堆存能力。但是轨道式起重机受特定轨道限制，机动灵活性差、难以进行跨场地作业，且购置成本较高。由于轨道式起重机灵活性低，大多数集装箱码头采用轮胎式起重机进行堆场内的装卸和堆码作业。

#### (2) 集装箱牵引车

集装箱牵引车又称为拖车，简称集卡，集卡又分为内集卡和外集卡。内集卡负责码头内集装箱的水平运输任务，以配合场桥和岸桥的装卸作业，包括将集装箱从堆场运至岸边等待装船，或将从船上卸下来的集装箱送至堆场进行堆存，通常一次可以装载两个 20ft 或一个 40ft 集装箱。外集卡负责集装箱的集港疏港作业，将集装箱经闸口运送到堆场堆存或将集装箱从堆场经闸口运离码头。

#### (3) 集装箱叉车

集装箱叉车是一种常用的空箱堆码机械设备，在吞吐量不大的集装箱码头负

责卸、堆码及短距离搬运作业，在大型集装箱码头主要用于拆装重箱以及短距离搬运等辅助性作业。集装箱叉车通过自身的行走完成集装箱的水平搬运作业，利用叉具的升降功能实现集装箱的堆码作业。

集装箱叉车造价低廉、灵活性高、适用性强，可一机多用，但是它一般只能堆码 2-3 层，转弯半径大，会占用较大的通道面积，造成堆场利用率不高，并且轮压大，增加场地建设成本。

#### （4）集装箱正面吊

集装箱正面吊在堆场使用频率非常高，可一机多用，常用于集装箱在堆场的堆码及短距离搬运作业，它起重量较大，可以堆码 3-4 层集装箱，作业效率比较快。与集装箱叉车相比，正面吊的吊具可以旋转和伸缩，堆码层数高，可以实现跨箱作业，更加机动灵活，并且造价低廉、轮压较低、稳定性好。但是它自重较大，对堆场地面的承载能力有一定的要求。

#### （5）集装箱跨运车

集装箱跨运车本身可以作为一种装卸工艺系统，既可以承担堆场集装箱堆码、装卸作业，也可以负责集装箱从岸边到堆场的水平运输作业。它机动性强，可以运输或堆码两个 20ft 或一个 40ft 集装箱，作业效率高，并且轮压较低、稳定性好，但是它堆垛高度低，造成堆场利用率低，且造价昂贵、故障率高。目前跨运车在我国使用较少，在欧洲集装箱码头应用广泛。

目前国内大部分集装箱码头采用轮胎式起重机进行堆场作业，本文研究的场桥调度问题也是针对轮胎式起重机。堆场内场桥的调度可以分为箱区间场桥调度和箱区内场桥调度。在堆场日常的生产作业中，堆场管理人员会先根据堆场每个箱区的任务量为箱区配备一定数量的场桥，当场桥完成了箱区内的任务或者箱区内场桥的作业能力富裕过剩，可被调度到其他作业繁忙的箱区。考虑到箱区大小的限制和场桥间的相互干涉，箱区内同时作业的场桥数量不超过 3 台。场桥在转场作业中动作缓慢，耗费时间长，频繁转场会阻断交通，在场桥的调度过程中应尽量减少场桥转场次数。箱区间场桥调度通常将任务组视作场桥最小的服务单位，确定任务组服务的先后顺序，并使任务组作业完成时间最短，而箱区内场桥调度是为了确定每台场桥具体负责的任务和作业任务的顺序，场桥作业任务的顺序直

接决定了场桥的移动距离和集卡在堆场的等待时间。

## 2.3 堆场作业效率影响因素分析

以往岸桥的装卸效率是影响集装箱码头通过能力的主要瓶颈，随着边装边卸、双箱吊等船舶装卸工艺的推广使用，岸桥的装卸效率得到极大提高，码头的作业瓶颈已逐渐转移，堆场作业效率成为主要的瓶颈，如何加快集卡周转、提高堆场作业效率，是码头运营管理中亟需解决的问题。为提高堆场作业效率，首先对影响堆场作业效率的各项因素进行分析。

### (1) 集装箱堆存计划

集装箱码头堆场需要为进场箱制定堆存计划，进场箱包括待装船出口箱和卸船进口箱。集装箱堆存计划制定不合理，会导致装船作业和客户提箱作业等环节的翻箱率提高。翻箱作业直接影响场桥作业效率，从而影响船舶装卸效率和客户提箱效率，最终影响集装箱码头的整体作业水平。以装船作业为例，如果在船舶装卸作业中翻箱作业次数过高，会增加内集卡在堆场的等待时间，当等待集卡数量过多时，就会造成堆场堵塞，增加码头前沿岸桥等箱时间，导致船舶在港时间增加。集装箱堆存计划还直接影响堆场机械设备的移动距离，一方面影响场桥移动距离，进而影响堆场的运营成本，另一方面内集卡的运输距离，进而影响船舶装卸效率。

为了优化船舶装卸效率，减少翻箱作业次数，提高堆场机械设备利用率，降低堆场运营成本，在为集装箱分配堆存箱位时，需遵循一定的堆存原则。进口箱和出口箱在堆存时遵循的原则不同，进口箱通常随机选取箱区的空箱位进行堆存，不区分航次船名，而出口箱为了实现快速装船，堆存原则更加复杂。目前针对出口箱的箱位分配问题已经形成了以下四项堆存原则<sup>[51-52]</sup>：

#### 1) 近船原则

出口箱的堆存箱区应该尽可能靠近其对应装船的泊位，堆存箱位与其对应装船泊位间的距离越短，内集卡水平运输距离也就相应越短，出口箱通常堆放在与其对应装船泊位垂直的箱区，此时较少的集卡配置数量便可使岸桥和场桥作业有效衔接，有利于降低码头内集卡运输成本、避免交通堵塞，提高船舶装卸效率。

## 2) 最小拥堵原则

当箱区配备多台场桥同时进行装船作业，应该避免场桥间出现相互干扰的现象，如果场桥的作业任务过于集中，可能导致箱区内的车道拥堵。为了避免出现拥堵，可以将同一船舶的出口箱适当分散堆存在不同的箱区，均衡场桥作业量，有利于提高码头作业效率和场桥利用率。

## 3) 集中原则

集中原则要求同类箱组的集装箱堆放在同一贝位或相邻的几个贝位。同类箱组的集装箱在装船作业时通常会接连进行装船，适当集中堆放有利于节省场桥的准备作业时间、减少场桥移动时间，从而减少场桥能源消耗。

## 4) 最小翻箱原则

翻箱作业占用机械设备、增加作业时间，还可能导致作业迟延，应尽量减少翻箱次数。集装箱分组堆放策略有助于减少翻箱次数，因此码头生产作业人员应根据船舶出口箱信息科学制定堆存计划，尽量避免不同箱组的集装箱进行混堆。

这四项原则既统一又矛盾，集中原则和最小翻箱原则是统一的，要求同类箱组的集装箱集中堆放，而最小拥堵原则要求集装箱适当分散堆放，与前两者相矛盾。在制定出口箱堆存计划时，应综合考虑这四项原则，制定出最佳堆存计划。

## (2) 场桥作业计划

场桥作业计划既要确定场桥的配置数量，也要确定场桥的作业顺序。为了配合岸桥作业、提高船舶装卸效率，一些码头会配置多台场桥同时作业，这种情况下如果场桥作业量分配不恰当，就会导致有的场桥作业繁忙，而有的场桥出现闲置，不利于场桥的有效利用，浪费人力物力。当码头可调配的场桥数量有限时，场桥难免会出现跨箱区作业。场桥转场作业耗时长，会降低堆场作业效率。可见，合理配置场桥对码头堆场的运营管理非常重要。

堆场在确定场桥的作业顺序时，两项常用的调度原则分别是先到先服务原则、临近原则。先到先服务原则下场桥优先服务先到达堆场的集卡，这种调度原则的最大优点是减少集卡在堆场的等待时间，因而广泛应用在堆场装卸作业中，但是可能导致场桥长距离跑位甚至频繁转场，进而增加场桥作业成本。临近原则下优先将离场桥位置近的任务分配给场桥，即使该项任务对应集卡到达时间晚于其他

集卡，该项调度原则能够减少场桥的移动距离，从而降低场桥的移动成本，但是会造成集卡长时间等待。对于装船作业而言，临近原则会增加岸桥等箱时间，降低装船作业效率。码头可以根据堆场的作业任务，有效结合先到先服务原则和临近原则，以实现堆场效益最大化。

### （3）闸口管理

集装箱码头闸口的管理对堆场的运营管理意义重大，闸口的数量和收箱速度直接影响堆场的作业效率。闸口数量和收箱速度的合理设置能使集卡快速通过闸口，减少集卡的等待时间，避免集卡在闸口的拥堵问题，同时提高场桥的利用率。码头闸口的通过能力通常远大于场桥的作业能力<sup>[53]</sup>，如果闸口不控制收箱速度，易造成堆场拥堵。码头可综合考虑堆场内场桥的配置数量和作业能力，通过集卡预约，对闸口通过集卡数量加以控制，减少堆场的交通压力。

## 2.4 堆场作业系统的能源消耗

在集装箱码头的日常生产运营中，装卸作业能源消耗占码头总能源消耗的比重最高，达到 80%以上，而生产能源消耗中，主要装卸设备耗能最大，其中岸桥用电耗能占 20%~30%，轮胎式起重机消耗燃油占 40%~50%<sup>[54]</sup>。集装箱码头生产设备主要消耗电力和燃油，消耗电力的生产设备主要包括轨道式起重机、电动轮胎式起重机，堆场消耗燃油的生产设备主要包括传统轮胎式起重机、集装箱牵引车、叉车、正面吊和跨运车等。除生产设备能源消耗外，堆场作业系统的能源消耗还包括辅助生产所产生的能源消耗，如冷藏箱能耗、照明、空调、通风、设备修理以及污水处理等。

在能源成本愈加高昂、气候与环境保护压力日渐增大的背景下，开发应用节能减排技术，加强港口绿色低碳建设，是港口的必经之路，也是提升港口核心竞争力的关键。集装箱码头堆场节能减排手段大致可以分为两类：技术手段和运营手段。

目前，集装箱码头积极开展节能减排工作，对主要耗能生产设备进行技术改进，取得了显著的效果，主要包括以下方面：一是船舶岸电技术，在船舶靠港期间，上海港、连云港港和鹿特丹港等使用岸电系统替代船舶辅机燃油发电，为靠

港船舶供电，以减少船舶在港废弃排放量；二是油改电技术，上海港、深圳港、天津港和大连港等通过“油改电”改造，将传统轮胎式起重机由柴油驱动改为电力驱动的电动轮胎式起重机，实现节能降耗，同时降低场桥的故障率；三是油改气技术，上海港、深圳港等深入推进港区内集装箱牵引车“油改气”工作，集装箱牵引车改用天然气作为燃料，大幅度降低了集装箱牵引车的废气排放量；四是混合动力改造技术，宁波港、盐田港等将传统轮胎式起重机改造成混合动力驱动，以降低能耗和废气排放。

集装箱码头节能减排运营手段是通过提高码头运营管理水平来实现节能减排的目的，涉及到码头日常具体的运营操作，码头资源管理是其中的一个方面，通过优化作业设备的配置与调度，以减少作业设备能源消耗。轮胎式起重机“油改电”技术在集装箱码头应用较广泛，电动轮胎式起重机节能优势明显，本文的场桥调度优化问题以电动轮胎式起重机为研究对象。场桥作业过程中的能耗主要由三部分构成：场桥装卸作业能耗、场桥移动能耗以及照明、空调等辅助设备能耗<sup>[28]</sup>。场桥装卸作业能耗由场桥作业任务量决定，场桥移动能耗取决于场桥在堆场内的移动距离，而辅助设备能耗由场桥作业时间确定。

## 2.5 本章小结

本文对集装箱码头堆场相关信息进行了介绍，包括堆场的功能、分类及作业类型。着重对堆场空间资源和机械资源进行概述，分析堆场的堆存策略和场桥调度策略。分析影响堆场作业效率的因素，找出制约堆场作业效率的“瓶颈”，同时对码头生产能耗进行分析，为下文堆场箱位分配与场桥调度协同优化模型的建立奠定了基础。



第 3 章 堆场箱位分配与场桥调度协同优化模型建立

3.1 问题描述

集装箱码头出口箱区集装箱的堆放一般遵循 PSCW 原则，以减少装船时的翻箱量，满足 PSCW 原则的同类集装箱堆放在堆场的同一贝上<sup>[55]</sup>。同类箱组通常堆放在同一区域，一些码头在进行场地策划时还特别要求同一条船舶的出口箱集中堆放在同一区域。在集港高峰期，码头会在箱区配置多台场桥同时进行收箱作业，以减少集卡周转时间，提高集港效率。当箱区多台场桥同时作业时，容易出现场桥作业量不均衡、场桥长距离跑位和场桥空耗等问题。同时，多台场桥在同一个箱区作业时还存在一些现实约束，如场桥间不能相互跨越，相邻作业场桥间需保持一定的安全距离，通常该安全距离为 160ft<sup>[33]</sup>，即相当于 8 个贝位。

为解决多台场桥联合作业问题，同时减少箱集卡等待时间，降低能源消耗，本文采用分区域平衡策划方法进行场地策划。所谓分区域平衡策划方法，是指根据箱区配置的场桥数量把箱区分为相应数量的大致相等的机械作业区域，在同一个作业区域可以堆存不同类别箱组的集装箱，并确保各作业区域中场桥作业箱量基本持平，以实现各场桥作业量均衡。图 3.1 为两台场桥分区域平衡策划下作业示意图，其中字母 A、B、C 和 D 分别表示四种不同箱组类别的集装箱。分区域平衡策划下的堆场箱位分配和场桥调度协同优化问题，充分考虑了集装箱堆放原则和场桥间安全距离要求，并且尽可能实现各场桥作业量均衡。

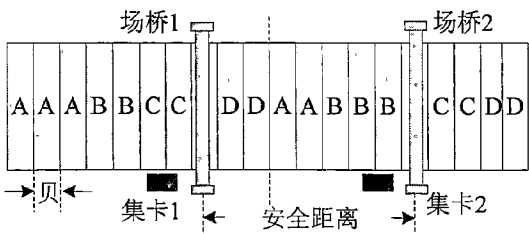


图 3.1 分区域平衡策划方法下场桥作业示意图

Fig. 3.1 Schematic representation of yard crane scheduling under the regional workload balance planning

本文研究的集装箱码头堆场箱位分配与场桥调度协同优化问题，是指码头方

通过网上预约平台和集卡 GPS 系统, 获悉计划期内堆场待堆存出口集装箱箱量、目的港和重量级等信息以及集卡到达时间以后, 为出口集装箱安排堆存位置, 并确定场桥作业顺序的协同优化问题, 问题考虑多台场桥在同一箱区内的调度优化, 场桥作业过程中需保持安全距离, 避免出现相互干扰, 同时考虑场桥作业量均衡和作业过程中的能源消耗, 建立送箱集卡等待时间和能源消耗多目标优化模型, 确定出口箱的堆存贝位和每台场桥的作业顺序。

## 3.2 模型建立

### 3.2.1 模型假设

本文建立的堆场箱位分配与场桥调度协同优化模型基于以下假设:

(1) 只考虑标准箱型 (20ft), 集装箱属于同一船舶待出口箱, 根据目的港、重量级和种类等属性将集装箱进行分组。

(2) 不同箱组的集装箱不能混堆在同一贝位, 贝内预留翻箱位。

(3) 箱区待堆存集装箱的数量、箱组类别和对应的集卡到达时刻可根据预约信息确定。

(4) 由于场桥体型较大, 单个箱区内配置的场桥数量不超过 3 台。

(5) 场桥在空间上具有不可跨越性, 且相邻场桥间必须保持安全作业距离。

(6) 将场桥对集装箱进行一次堆存作业 (move) 视为一次任务。

### 3.2.2 符号说明

(1) 输入参数

$B$  表示箱区总贝位数;

$N$  表示箱区待堆存出口集装箱数量或任务量 (单位: move);

$G$  为集装箱箱组数量;

$M$  表示箱区配置的场桥数量;

$b$  表示箱区贝位编号为  $b$ ,  $b \in [1, B]$ ;

$n$  表示箱区第  $n$  个待堆存出口集装箱或任务,  $n \in [1, N]$ ;

$g$  表示集装箱箱组类别为  $g$ ;

$m$  表示箱区第  $m$  个作业场桥,  $m \in [1, M]$ ;

$C_b$  表示贝位  $b$  的最大堆存箱量;

$N_b$  表示贝位  $b$  预留翻箱位的数量;

$C_{bg}^0$  表示贝位  $b$  堆放集装箱箱组  $g$  的初始箱量;

$N_0$  表示场桥完成作业任务量差额的最大值;

$l$  表示单位贝位的长度;

$L_{safe}$  表示相邻场桥间的安全距离;

$v$  表示场桥移动速度 (单位: m/min);

$t_{m0}^F$  用于定义场桥作业的初始时刻 0;

$B_{0m}$  表示场桥  $m$  初始位置对应的贝位编号;

$\mu$  表示场桥完成单位堆存任务的能耗 (单位: kW h/move);

$\varepsilon$  表示场桥单位时间对应的非工作能耗 (单位: kW h/min);

$\eta$  表示场桥单位距离对应的移动能耗 (单位: kW h/m);

## (2) 状态变量

$Q_m$  表示场桥  $m$  完成的作业任务量;

$t_{mi}^S$  表示场桥  $m$  第  $i$  次任务对应的送箱集卡到达堆场的时刻;

$t_{mi}^R$  表示场桥  $m$  到达第  $i$  次任务作业位置的时刻;

$t_{mi}^F$  表示场桥  $m$  第  $i$  次任务的完成时刻;

$T_m$  表示场桥  $m$  完成第  $i$  次堆存任务需要的时间;

$T_{(i-1)i}^m$  表示场桥  $m$  完成一个任务后移动到下一个任务的作业位置需要的时间,

$T_{01}^m$  为场桥从初始位置移动到第 1 个任务作业位置需要的时间;

$T_{mi}^W$  表示场桥  $m$  完成第  $i$  次任务时, 对应送箱集卡的等待时间;

$B_m$  表示场桥  $m$  第  $i$  次任务所在的贝位编号;

$P_m^t$  表示  $t$  时刻场桥  $m$  所处的贝位,  $t$  为作业任务期间任意时刻;

$Z_m$  表示场桥  $m$  任务完成时间;

(3) 决策变量

$$X_{nm} = \begin{cases} 1 & \text{集装箱堆存任务 } n \text{ 分配给场桥 } m \\ 0 & \text{集装箱堆存任务 } n \text{ 未分配给场桥 } m \end{cases}$$

$$Y_{ngb} = \begin{cases} 1 & \text{箱组类别为 } g \text{ 的集装箱 } n \text{ 分配给贝位 } b \\ 0 & \text{箱组类别为 } g \text{ 的集装箱 } n \text{ 未分配给贝位 } b \end{cases}$$

### 3.2.3 目标函数

$$f_1: \min F = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{Q_m} T_m^W \quad (3.1)$$

(3.1) 为目标一, 表示送箱集卡在堆场等待总时间最小。

$$f_2: \min E = N \cdot \mu + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{Q_m} T_{(i-1),i}^m \cdot v \cdot \eta + \sum_{m=1}^M Z_m \cdot \varepsilon \quad (3.2)$$

(3.2) 为目标二, 表示场桥完成所有任务的总能耗最小, 包括场桥堆存作业能耗、场桥移动能耗以及场桥非工作能耗, 如照明、空调等辅助设备能耗。

### 3.2.4 约束条件

$$\sum_{b=1}^B Y_{ngb} = 1 \quad (3.3)$$

约束 (3.3) 保证每个集装箱只能分配到一个贝位。

$$\sum_{n=1}^N \sum_{g=1}^G Y_{ngb} + N_b + \sum_{g=1}^G C_{bg}^0 \leq C_b \quad (3.4)$$

约束 (3.4) 表示贝位堆放箱量与贝位预留翻箱位之和不超过贝位的最大堆存箱量。

$$\sum_{m=1}^M X_{nm} = 1 \quad (3.5)$$

约束 (3.5) 保证每个集装箱堆存任务由且仅由一台场桥完成。

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M X_{nm} = \sum_{n=1}^N \sum_{g=1}^G \sum_{b=1}^B Y_{ngb} \quad (3.6)$$

约束 (3-6) 保证场桥作业任务数量之和与贝位增加的堆存箱数之和相等。

$$Q_m = \sum_{n=1}^N X_{nm} \quad (3.7)$$

约束 (3.7) 定义了  $Q_m$ ，用于计算各场桥作业任务量。

$$\sum_{m=1}^M Q_m = N \quad (3.8)$$

约束 (3.8) 保证各场桥作业任务量之和等于箱区待堆存出口箱数量。

$$|Q_m - Q_{m'}| \leq N_0 \quad m_1 \neq m_2 \text{ 且 } m, m' \in [1, M] \quad (3.9)$$

约束 (3.9) 保证场桥作业量之差不大于均衡底线。

$$P'_m - P'_{m-1} \geq L_{safe} \quad (3.10)$$

约束 (3.10) 表示场桥间安全作业距离要求。

$$t_{mi}^F = T_{mi} + \max\{t_{mi}^S, t_{mi}^R\}, \quad i = 1, 2, \dots, Q_m \quad (3.11)$$

约束 (3.11) 用于计算场桥各任务的完成时刻。

$$t_{mi}^R = t_{m(i-1)}^F + T_{(i-1)i}^m, \quad i = 1, 2, \dots, Q_m \quad (3.12)$$

约束 (3.12) 用于计算场桥到达各作业任务位置的时刻。

$$T_{(i-1)i}^m = \frac{|B_m - B_{(i-1)m}|}{v} \times l, \quad i = 1, 2, \dots, Q_m \quad (3.13)$$

约束 (3.13) 用于计算场桥从一个任务移动到下一个任务所需要的时间。

$$T_{mi}^W = t_{mi}^F - T_{mi} - t_{mi}^S, \quad i = 1, 2, \dots, Q_m \quad (3.14)$$

约束 (3.14) 用于计算送箱集卡的等待时间。

$$Z_m = t_{mQ_m}^F \quad (3.15)$$

约束 (3.15) 用于定义每台场桥任务完成时间。

### 3.3 多目标规划问题的处理

求解多目标规划问题较为复杂，在处理多目标规划问题时，一般先将多目标规划问题向单目标规划问题进行转化，然后再进行求解。常用的转化方法有很多，包括评价函数法（乘除法、线性加权法、平均和加权法、理想点法、极大极小法）、约束法、功效系数法和分层序列法。结合本文所构建数学模型的特征，选用评价函数法中的线性加权法处理多目标规划问题。由于目标函数  $f_1$  和  $f_2$  量纲不同，在进行转换前先对目标函数进行无量纲化处理。设  $J$  个不同箱位分配和场桥调度方案对应的集卡等待时间之和为  $\sum_{j=1}^J F_j$ ，消耗能源之和为  $\sum_{j=1}^J E_j$ ，无量纲化后的目标函数如下所示。

$$f_1' = \frac{f_1}{\sum_{j=1}^J F_j} \quad (3.16)$$

$$f_2' = \frac{f_2}{\sum_{j=1}^J E_j} \quad (3.17)$$

按照各目标的重要程度，预先给出权重系数  $w_1, w_2$ ，满足  $w_1 + w_2 = 1$ ，且  $w_1, w_2 \geq 0$ ，通过线性加权法转化后得到的单目标函数为：

$$\min f_3 = w_1 f_1' + w_2 f_2' \quad (3.18)$$

其中，出权重系数  $w_1, w_2$  可视码头堆场作业的具体情况设定。如果码头堆场作业比较繁忙，出现拥堵，则关键目标为提高堆场作业效率，减少送箱集卡的等待时间，此时可取  $w_1 > w_2$ ；如果码头堆场处于相对空闲的状态，可考虑取  $w_1 \leq w_2$ ；如果码头堆场处于作业平衡状态，可根据政府的节能减排激励政策和码头自身的发展战略设定权重系数。

### 3.4 本章小结

本章把集装箱码头堆场箱位分配与场桥调度协同优化问题抽象出来，综合考

考虑场桥作业安全间距和场桥作业量均衡约束，构建了送箱集卡等待时间和场桥作业能源消耗多目标优化模型，并运用线性加权法对多目标优化模型进行处理。

## 第4章 堆场箱位分配与场桥调度协同优化模型求解

### 4.1 算法介绍

#### 4.1.1 遗传算法

20 世纪 60 年代末至 70 年代初, 美国的 Holland 教授与其学生在模拟生物进化机制中受到启发, 创造出了一种自适应概率优化技术, 利用生物遗传及进化机制解决复杂系统优化问题。之后, Holland 等人将该优化技术在优化及机器学习等领域中进行应用推广, 并正式命名为遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)。遗传算法具有自适应性、并行性高效性和鲁棒性, 是一种全局随机搜索优化算法, 在组合优化、自动控制、生产调度、图像处理、信号处理和机器学习等领域得到广泛应用。

遗传算法的基本思想借鉴了达尔文的自然选择学说以及孟德尔的遗传学说, 将生物自然进化中的繁殖、变异、竞争和选择等四种基本形式引入到算法中<sup>[56]</sup>。遗传算法将问题的可行解集看作一个种群, 种群是由一定数目的个体 (染色体) 组成, 每条染色体的存在形式是经编码的基因串。通过基因编码生成初始种群, 然后依照自然界适者生存的原理, 种群逐代演化, 最后产生出近似最优解。在每一代的演化过程中, 根据问题的目标函数确定个体的适应度, 借助适应度大小选择个体, 再进行交叉、变异, 生产新的种群。这个过程模拟了种群的自然进化, 使后代个体对环境的适应性增强, 将末代种群中的最优个体进行基因解码, 得到的可行解可以作为问题的近似最优解<sup>[57]</sup>。

Holland 教授提出的遗传算法一般被称为基本遗传算法 (Simple Genetic Algorithm, SGA), 也称标准遗传算法或简单遗传算法, 基本遗传算法在运算过程中只使用基本的选择、交叉和变异算子, 操作过程简单, 是其他各种遗传算法的基础。遗传算法主要由四部分构成: 染色体编码与解码、个体适应度评价、遗传操作和运行参数的设计。

##### (1) 染色体编码与解码

染色体编码是遗传算法最先需要解决的问题, 编码方式直接决定染色体的结构, 进而影响后续的遗传操作。编码是将问题的可行解转换成遗传算法可以处理



操作的变量串,染色体由变量串构成,解码则是在遗传算法终止后,将编码的变量串还原成实际问题的解。二进制编码和实数编码是两种最常用的编码方式,实数编码又包括整数编码和浮点数编码。二进制的编码符号由0或1组成,SGA采用的是二进制编码。二进制编码和解码操作简单,便于实现交叉、变异等操作,但不能直接的反映所求问题,相比而言,实数编码适用于求解复杂优化问题。针对不同的实际问题,可以设计不同的编码方式来表示问题的可行解。

### (2) 个体适应度评价

遗传算法利用适应度来衡量个体适应能力的大小,用来计算个体适应度的函数称为适应度函数。遗传算法在进化搜索中仅利用个体适应度值搜索最优个体,不依靠其他外部信息,适应度函数直接影响遗传算法的收敛效果以及是否能搜索到最优解,对遗传算法的运算效果至关重要。通常情况,适应度函数是通过对目标函数进行变换得到的,适应度函数的设计需要满足单值、非负、连续和最大化的条件。

### (3) 遗传操作

遗传算法包括选择、交叉和变异三个基本操作,它们是遗传算法的核心,通过遗传操作保持个体的多样性,进行优胜劣汰、搜索最优个体。

选择操作是模拟生物自然进化过程,其实质是染色体复制。种群中个体被选择的概率取决于个体的适应度,个体适应度值高,被遗传到下一代的概率越大,而个体适应度值低,被遗传到下一代的概率则很小。常用的个体选择概率法分为两类:按比例的选择概率和基于排序的选择概率。按比例的选择概率是最常用的选择方法,SGA使用的是按比例选择方法。

交叉操作是模拟生物的基因重组过程,随机生成一个或多个交叉点,以一定的交叉概率将两个父代个体的部分基因进行替换,从而产生新的个体。交叉操作是获取新个体的重要手段,保证了可行解的多样性,增大遗传算法解的搜索空间。交叉算子包括单点交叉算子、两点交叉算子、多点交叉算子以及顺序交叉算子,SGA采用的是简单的单点交叉算子。

变异操作是模拟生物的基因突变过程,随机生成一个或多个基因位,以一定的变异概率将对应的基因变为其它基因。变异本身可以看作一种局部随机搜索,

增加了遗传算法的局部随机搜索能力，同时有利于保持种群的多样性。变异算子包括基本位变异算子、插入变异算子和换位变异算子等，SGA 使用的是基本位变异算子。

#### （4）运行参数的设计

遗传算法中运行参数的设计直接影响算法的性能，运行参数的设计应该合理恰当。这些参数主要包括种群大小、交叉概率、变异概率和算法终止进化代数。参数的取值不是固定不变的，针对具体的问题，可以通过大量的实验找到一组恰当的运行参数。

### 4.1.2 模拟退火算法

模拟退火算法（Simulated Annealing, SA）是通过模拟固体物质退火过程搜索全局最优解，它的基本思想最早是由 Metropolis 于 1953 年提出<sup>[58]</sup>。基于固体物质退火过程同组合优化问题的相似性，1983 年 Kirkpatrick 等将模拟退火算法成功应用于组合优化领域。模拟退火算法早期应用于组合优化，后来逐渐发展成为是一种通用的随机寻优算法，目前在工程领域中应用广泛，包括生产调度、信号处理、控制工程、超大规模集成电路、机器学习以及神经网络等。

当对固体物质进行物理退火操作时，一般先将它加热至充分高的温度，增强粒子的热运动，使粒子从较有序的结晶状态熔化为无序的液态，然后让其逐渐冷却，随着温度的降低，液体粒子运动趋向有序，并慢慢凝固成固态晶体。如果温度下降的足够缓慢，系统在每个温度都能够达到热平衡状态。当温度降到最低时，系统达到本身能量最低的状态，即基态，等价于能量函数的全局最小点<sup>[59]</sup>。固体物质退火过程中的能量函数相当于组合优化问题中的目标函数，粒子的状态相当于目标函数的解，而能量最低的状态等价于目标函数的最优解。

模拟退火算法由一个初始解和一个充分高的初始温度开始，对当前解按照“产生新解-Metropolis 准则判断-是否接受新解”进行反复迭代，并根据设定的降温规则进行降温，当达到算法终止规则时，当前解可视为问题的近似最优解，其主要构成要素包括以下几部分：

#### （1）状态空间

状态空间是也称解空间，是问题所有可行解的集合，也是模拟退火算法的搜

索空间。由于模拟退火算法克服了对初始解的依赖性，可以从状态空间中随机选取一个可行解作为初始解进行迭代。

### (2) 能量函数

一般将问题的目标函数看作能量函数，能量函数最小的点即为目标函数的最优解。

### (3) 邻域解的构造

邻域解的构造是指按照某种规则由当前解变换生成一个新解，可能生成的新解构成了当前解的邻域，邻域解的构造应尽可能使产生的新解遍布全部解空间，常用的邻域解构造方法包括部分元素互换、置换等。

### (4) Metropolis 准则

Metropolis 准则是一种新解接受机制，通过概率接受新状态。以最小化问题为例，最设在温度  $T$  时，粒子由当前状态  $i$  随机变化到新状态  $j$ ，当前状态和新状态对应的能量分别是  $E_i$  和  $E_j$ ，能量改变量  $\Delta E = E_j - E_i$ ，如果  $\Delta E < 0$ ，则接受新状态  $j$  作为当前状态继续参与迭代，否则以概率  $\exp(\frac{-\Delta E}{T})$  接受新状态  $j$ 。

### (5) 温度更新函数

温度更新函数是用来控制温度的下降方式，实际应用中最常用的温度更新函数为指数函数，即  $T_{\lambda+1} = k \cdot T_\lambda$ ， $\lambda \geq 0$ ， $0 < k < 1$ ，可以通过调整  $k$  的取值控制温度的下降速度。

### (6) 循环终止准则

模拟退火算法包含两层循环过程：内循环和外循环。内循环终止准则决定了每个温度下生产可行解的数目。外循环终止准则确定算法何时终止，即算法的终止规则。控制算法终止的方法包括设置算法终止温度、设置外循环次数和最优值不改进规则等。

#### 4.1.3 混合模拟退火遗传算法

遗传算法和模拟退火算法都是全局随机寻优算法，在解决复杂优化问题时表现出优良的求解性能，但二者也存在各自的局限性。遗传算法最为主要的问题在

于爬山能力弱，易出现过早收敛现象。在迭代初期，种群中个体的差异较大，由于遗传算法按照适者生存的原则选择子代，使得适应度高的个体更多的遗传到下一代，这样经过若干代的进化，子代种群中充斥着适应度高的个体，这些个体的基因通常相似度很高，导致种群多样性减少，算法搜索空间变窄，从而造成算法过早收敛，陷入局部最优解。

模拟退火算法的局限性表现在：模拟退火算法仅对状态空间的一个解进行操作，不能保留历史搜索信息；在每一个迭代温度下需通过控制内循环次数使得状态空间到达平衡态，这在求解实际问题时往往难以实现；在参数选取时，模拟退火算法要求初始温度充分高、退火速度足够小，导致算法运行速度慢，达到收敛状态时耗费的时间较长。

为了使遗传算法和模拟退火算法在实际应用中产生更好的效果，可以设计一个新的混合算法，将遗传算法和模拟退火算法进行有效结合，实现算法性能互补。模拟退火算法针对单个解进行迭代，而遗传算法对种群进行搜索，两种算法进行结合可以提高模拟退火算法的并行优化性能。模拟退火算法基于 Metropolis 准则接受新解，刚开始当前温度较高，接受恶化解的可能性较大，随着温度的降低，接受恶化解的概率不断减小，随着温度趋于零，不再接受恶化解，这种趋于零的概率突跳性能使算法跳出局部最优，最终取得全局最优解。构造混合模拟退火遗传算法能够有效利用模拟退火算法的爬山性能，有利于解决遗传算法过早收敛的问题，增强遗传算法的全局及局部搜索能力。

现在已经有一些设计策略用于构造混合模拟退火遗传算法，在设计混合算法时可以选取其中的一种策略或将几种策略相结合，主要的设计策略包括：

#### （1）改进模拟退火算法性能

整个混合算法分为遗传算法和模拟退火算法两个部分，首先执行遗传算法得到全局较优解，然后将其作为模拟退火算法的初始解进一步调整优化，最终获得最优解，使模拟退火算法充分利用遗传算法的全局信息。

#### （2）适应度函数模拟退火

借鉴模拟退火思想，对遗传算法中的适应度函数进行拉伸，Paul L Stoffa 提出的模拟退火遗传算法给出的适应度拉伸方法如下<sup>[60]</sup>：

$$f_u = e^{f_u/T} / \sum_{u=1}^U e^{f_u/T} \quad (4.1)$$

$$T = T_0(0.99^{Iter-1}) \quad (4.2)$$

式中  $f_u$  为个体  $u$  的适应度,  $U$  为种群大小,  $T$  为当前温度,  $T_0$  为初始温度,  $Iter$  为遗传代数。

在遗传算法的初期, 温度比较高, 拉伸作用不明显, 适应度相近的个体遗传到下一代的概率相近; 随着温度的不断降低, 拉伸作用增强, 增大了适应度相近个体之间的差异, 凸显了优秀个体的优势, 有利于克服遗传算法的早收敛问题。

### (3) 交叉概率和变异概率模拟退火

在进化初期, 为了避免遗传算法出现早收敛现象, 交叉概率和变异概率不宜过小, 从而保持种群的多样性; 而在进化后期, 由于个体接近最优解, 此时交叉概率和变异概率不宜过大, 否则可能导致无法收敛到最优解。一种利用模拟退火方法设计具有自适应性的交叉和变异概率的函数表达式如下<sup>[61]</sup>:

$$p_{c(m)}(T) = -0.2 \sin\left(\frac{1}{T \cdot Iter} \cdot \frac{\pi}{2}\right) + 0.3 \quad (4.3)$$

式中  $p_c$  和  $p_m$  分别表示交叉概率和变异概率,  $T$  为当前温度。

### (4) 改进遗传算法的选择生存策略

模拟退火算法中的 Metropolis 准则可用来改进遗传算法的选择生存策略, 分别对交叉、变异后的子代个体进行模拟退火操作, 或仅对经过交叉以及变异后的新个体进行模拟退火处理, 缓解遗传算法的选择压力。

## 4.2 基于混合模拟退火遗传算法的模型求解

针对堆场箱位分配与场桥调度协同优化模型的特点, 本文设计混合模拟退火遗传算法(SAGA)对模型进行求解, 将模拟退火思想引入到遗传算法进化过程中, 充分发挥模拟退火算法和遗传算法的优点。该混合算法首先生成初始种群, 然后利用遗传算子进行选择、交叉和变异操作, 再利用模拟退火算法对遗传算法产生的新种群进行处理, 具体算法流程如图 4.1 所示。

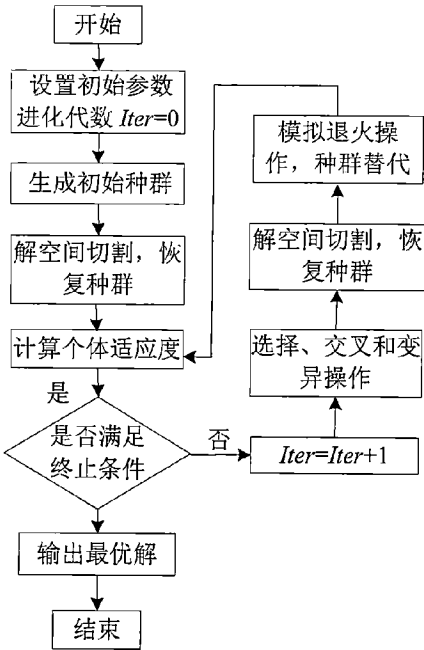


图 4.1 SAGA 流程图

Fig. 4.1 Flow chart of SAGA

4.2.1 染色体编码

采用实数编码方式对染色体进行编码，染色体长度为箱区待堆存的出口集装箱箱量，即场桥总的作业任务数，染色体的基因值为分配给集装箱的贝位编号。每一条染色体对应一个集装箱贝位分配方案，而对应的场桥作业方案可根据分区域平衡策划方法下场桥作业区域的贝位编号确定。图 4.2 对染色体编码给出了直观展示，此时箱区配备了两台场桥，10 个集装箱在贝位数为 40 的箱区进行堆存。染色体解码后可得到集装箱贝位分配方案和场桥作业方案，集装箱贝位分配方案为，场桥 1 作业方案为1→4→5→7→9，场桥 2 作业方案为2→3→6→8→10。

|           |   |    |    |    |    |    |    |    |   |    |
|-----------|---|----|----|----|----|----|----|----|---|----|
| 集装箱序号     | 1 | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9 | 10 |
| 集装箱分配贝位号  | 7 | 25 | 40 | 12 | 18 | 32 | 10 | 28 | 5 | 22 |
| 场桥序号      | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 2  | 2  | 2 | 2  |
| 场桥作业集装箱序号 | 1 | 4  | 5  | 7  | 9  | 2  | 3  | 6  | 8 | 10 |

图 4.2 染色体示意图

Fig. 4.2 Chromosome representation

### 4.2.2 生成初始种群

根据箱区内贝位的初始堆存状态和集装箱的箱组信息，随机生成一定数量满足约束（3.3）-（3.8）的个体。本文建立的堆场箱位分配与场桥调度协同优化模型要求相邻作业场桥间保持一定的安全距离，而随机生成的个体中会存在部分个体不满足安全距离的约束，需要将此类个体剔除。本文采取解空间切割策略，从生成的个体中删除不满足场桥间安全距离要求的个体，然后从满足条件的个体中选择一定数量的个体，使个体数量达到种群容量。

### 4.2.3 适应度函数

适应度可用于评价箱位分配方案和场桥调度方案的优劣程度，个体适应度值越大，其被选择的概率也越大。由于本文是求解目标函数的最小值，算法中取目标函数的倒数值作为适应度函数。考虑到模型中要求场桥作业任务量之差不大于均衡底线，而生成的初始种群中可能还存在一些个体不满足该约束，如果仍然采用解空间切割策略，可能导致剩余的可行个体数量很少，甚至为零。因此，本文在确定适应度函数时引入惩罚规则，将不满足场桥作业量均衡约束的个体进行明显区分，具体适应度函数如下所示：

$$f_u = \begin{cases} \frac{1}{f(u)}, & \text{个体满足均衡底线要求} \\ \frac{1}{f(u)+M}, & \text{个体不满足均衡底线要求} \end{cases} \quad (4.4)$$

式中  $f_u$  为个体  $u$  的适应度， $f(u)$  为个体  $u$  的目标函数， $M$  表示一个无穷大的正数。

### 4.2.4 遗传操作

在计算个体适应度后，分别进行选择、交叉和变异操作。

#### （1）选择操作

本文采用按比例选择中的轮盘赌选择方法执行选择操作，个体被选择的概率根据个体的适应度和种群适应度总和确定，可用式（4.5）表示，适应度值高的个体被选为父代个体进行交叉变异的可能性也越大。

$$P_u = \frac{f_u}{\sum_{n=1}^U f_u} \quad (4.5)$$

式中  $U$  为种群大小,  $P_u$  为个体  $u$  被选取的概率。

为了保证遗传算法终止时得到的结果是历代出现的适应度最高的个体, 本文将当前种群中适应度最高的个体完整的复制到下一代种群中。

## (2) 交叉操作

本文中染色体的基因值为贝位编号, 多个待堆存集装箱可以分配到同一个贝位, 所以每个贝位编号可以在一条染色体中出现多次。采用单点交叉方法或两点交叉方法, 交叉后的得到的个体均可满足模型约束。本文采用两点交叉方法, 以一定的交叉概率对父代进行交叉操作, 生产新的子代, 具体操作过程如图 4.3 所示。

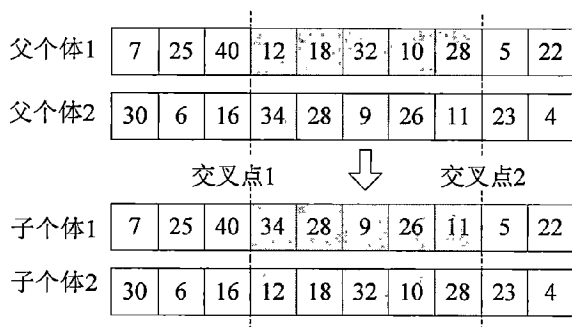


图 4.3 交叉操作示意图

Fig. 4.3 Representation of crossover

## (3) 变异操作

针对交叉操作得到的新子代个体, 本文采用简单的单点变异方法, 以一定的变异概率执行变异操作, 变异范围根据箱区各贝位初始堆存状态以及待堆存集装箱箱组类别确定, 操作过程如图 4.4 所示。



图 4.4 变异操作示意图

Fig. 4.4 Representation of mutation



#### 4.2.5 模拟退火操作

在种群进行交叉变异后,进行模拟退火操作。由于交叉变异后的个体可能不满足场桥作业安全距离约束,因此在模拟退火操作前进行解空间切割,用满足约束的可行解对不可行解进行替换。设交叉变异前的父代为  $p_1, p_2$ , 经过交叉、变异和解空间切割得到的子代个体为  $c_1, c_2$ , 分别计算父代与子代的适应度值  $f(p_i), f(c_i)$ , 然后比较大小。如果  $f(c_i) \geq f(p_i)$ , 则用子代个体  $c_i$  替代父代个体作为新解; 如果  $f(c_i) < f(p_i)$ , 则按 Metropolis 准则接受新解, 即生成一个  $(0,1)$  之间的随机数  $r$ , 若  $\exp(\frac{f(c_i) - f(p_i)}{T}) \geq r$ , 则接受子代个体  $c_i$  作为新解, 否则不接受子代个体, 其中  $T$  为当前温度。接着进行降温操作, 令  $T = T_0 \cdot k^{Iter-1}$ ,  $T_0$  为初始温度,  $k$  为退火系数,  $Iter$  为遗传代数, 然后用模拟退火操作处理后得到的种群替代上一代种群。

#### 4.2.6 算法终止规则

本文对混合模拟退火遗传算法预先设定最大迭代次数, 当算法的进化代数达到最大迭代次数时, 算法终止, 输出最优解, 得到集装箱贝位分配方案和场桥作业调度方案。

### 4.3 本章小结

本章首先分别对遗传算法和模拟退火算法的基本思想、构成要素、局限性等进行了阐述分析, 然后简单介绍了混合模拟退火遗传算法的设计策略。在此基础上, 针对堆场箱位分配与场桥调度协同优化模型的特点, 设计了混合模拟退火遗传算法, 并对算法的实施步骤进行了详细的介绍。

第 5 章 数值实验

前面两章分别研究了集装箱码头堆场箱位分配与场桥调度协同优化问题的模型和求解方法，本章以某个集装箱码头堆场为例，通过数值实验对模型和算法的有效性进行验证，确定出口箱箱位分配方案和多场桥调度方案，并对实验结果进行分析。

5.1 算例描述

本文设计的算例选取的箱区规模为 40 个贝位×6 排×4 层，箱区中配备两台场桥，每个贝位内预留 3 个箱位以满足装船时的翻箱需要，即实际每个贝位只有 21 个可堆存箱位。某计划期内箱区有 50 个出口箱堆存任务，集装箱箱组 and 对应集卡到达时刻等信息如表 5.1 所示，箱区初始堆存状态如表 5.2 所示。

箱区单位贝位的长度为 7m，场桥的移动速度为 100m/min，相邻作业场桥间的安全距离为 160ft，两台场桥的初始位置对应的贝位编号分别为 10 和 30。通常场桥装卸一个集装箱耗时 2-4min，本文假设场桥堆存集装箱耗费分钟服从均匀分布  $U(2,4)$ 。考虑到码头堆场任务繁重，目标函数的权重分别取值  $w_1=0.7, w_2=0.3$ 。

表 5.1 待堆存出口集装箱信息

Tab. 5.1 Information of outbound containers

| 集装箱 | 到达   | 箱 | 集装箱 | 到达   | 箱 | 集装箱 | 到达   | 箱 | 集装箱 | 到达   | 箱 |
|-----|------|---|-----|------|---|-----|------|---|-----|------|---|
| 箱   | 时刻   | 组 | 箱   | 时刻   | 组 | 箱   | 时刻   | 组 | 箱   | 时刻   | 组 |
|     | /min |   |     | /min |   |     | /min |   |     | /min |   |
| 1   | 1    | 4 | 14  | 15   | 1 | 27  | 34   | 1 | 40  | 58   | 2 |
| 2   | 2    | 3 | 15  | 15   | 3 | 28  | 34   | 2 | 41  | 60   | 2 |
| 3   | 4    | 4 | 16  | 19   | 3 | 29  | 37   | 4 | 42  | 62   | 4 |
| 4   | 6    | 2 | 17  | 21   | 1 | 30  | 39   | 2 | 43  | 65   | 4 |
| 5   | 7    | 1 | 18  | 21   | 2 | 31  | 40   | 4 | 44  | 65   | 4 |
| 6   | 7    | 3 | 19  | 22   | 4 | 32  | 43   | 1 | 45  | 69   | 4 |

| 集装箱<br>箱 | 到达<br>时刻<br>/min | 箱<br>组 | 集装箱<br>箱 | 到达<br>时刻<br>/min | 箱<br>组 | 集装箱<br>箱 | 到达<br>时刻<br>/min | 箱<br>组 | 集装箱<br>箱 | 到达<br>时刻<br>/min | 箱<br>组 |
|----------|------------------|--------|----------|------------------|--------|----------|------------------|--------|----------|------------------|--------|
| 7        | 7                | 1      | 20       | 24               | 2      | 33       | 46               | 1      | 46       | 70               | 1      |
| 8        | 8                | 2      | 21       | 24               | 3      | 34       | 47               | 3      | 47       | 72               | 2      |
| 9        | 9                | 2      | 22       | 28               | 1      | 35       | 53               | 1      | 48       | 74               | 2      |
| 10       | 9                | 1      | 23       | 28               | 4      | 36       | 54               | 3      | 49       | 77               | 1      |
| 11       | 12               | 4      | 24       | 31               | 3      | 37       | 55               | 4      | 50       | 80               | 4      |
| 12       | 12               | 2      | 25       | 33               | 1      | 38       | 56               | 3      | -        | -                | -      |
| 13       | 14               | 4      | 26       | 33               | 3      | 39       | 58               | 3      | -        | -                | -      |

表 5.2 箱区初始堆存状态

Tab. 5.2 The initial stacking state of block

| 贝位<br>号 | 初始<br>箱量 | 对应<br>箱组 | 贝位<br>号 | 初始<br>箱量 | 对应<br>箱组 | 贝位<br>号 | 初始<br>箱量 | 对应<br>箱组 | 贝位<br>号 | 初始<br>箱量 | 对应<br>箱组 |
|---------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|
| 1       | 1        | 1        | 11      | 10       | 3        | 21      | 6        | 1        | 31      | 9        | 3        |
| 2       | 18       | 1        | 12      | 20       | 3        | 22      | 3        | 1        | 32      | 5        | 3        |
| 3       | 11       | 1        | 13      | 17       | 3        | 23      | 18       | 1        | 33      | 1        | 3        |
| 4       | 12       | 1        | 14      | 13       | 3        | 24      | 10       | 1        | 34      | 1        | 3        |
| 5       | 18       | 1        | 15      | 5        | 3        | 25      | 3        | 1        | 35      | 13       | 4        |
| 6       | 19       | 2        | 16      | 11       | 4        | 26      | 4        | 2        | 36      | 16       | 4        |
| 7       | 2        | 2        | 17      | 18       | 4        | 27      | 10       | 2        | 37      | 13       | 4        |
| 8       | 1        | 2        | 18      | 16       | 4        | 28      | 15       | 2        | 38      | 10       | 4        |
| 9       | 2        | 2        | 19      | 14       | 4        | 29      | 14       | 2        | 39      | 17       | 4        |
| 10      | 7        | 2        | 20      | 10       | 4        | 30      | 11       | 2        | 40      | 6        | 4        |

5.2 算例求解

本文运用混合模拟退火遗传算法（SAGA）对模型进行求解，采用 matlab 进行编程，主要的参数设置：初始种群容量 100，交叉率 0.7，变异率 0.08，最大迭代次数为 100，模拟退火初始温度为 2000，退火系数为 0.9。

利用这些参数进行运算，SAGA 收敛过程如图 5.1 所示。从图 5.1 可以看出，当 SAGA 迭代至 25 代时，目标函数收敛于  $6.68 \times 10^{-3}$ ，此时送箱集卡总的等待时间为 300.63 min，场桥作业总能耗为 355.07 kW h，两台场桥作业任务量均为 25 箱。

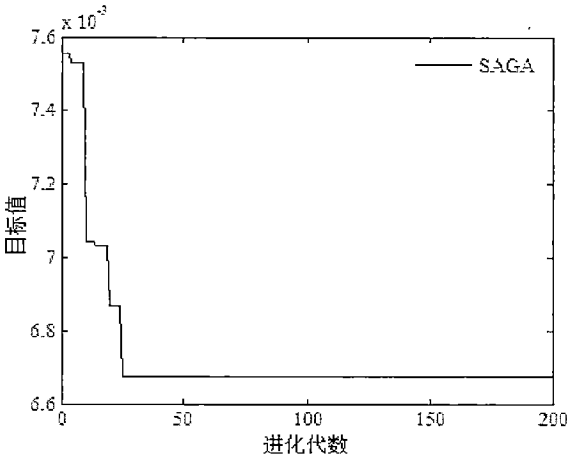


图 5.1 SAGA 收敛图

Fig. 5.1 Convergence process of SAGA

为了验证本文设计的 SAGA 的优越性，利用遗传算法（GA）对上述算例进行求解，将求解结果进行对比，SAGA 和 GA 采用相同的遗传参数，GA 的收敛过程如图 5.2。

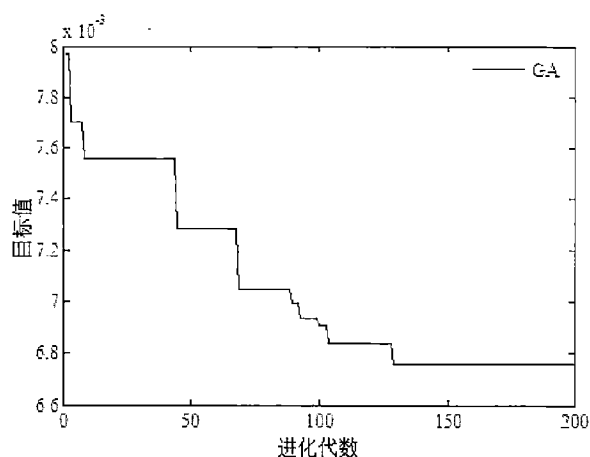


图 5.2 GA 收敛图

Fig. 5.2 Convergence process of GA

从图 5.2 可以看出, GA 进化至 129 代时, 目标函数收敛于  $6.76 \times 10^{-3}$ , 此时送箱集卡总的等待时间为 306.49 min, 场桥作业总能耗为 355.82 kW h, 两台场桥作业任务量分别为 24 和 26 箱。将两种算法的计算结果进行比较, 可以发现 SAGA 求解得到的场桥作业总能耗比 GA 少 0.75kW h, 且 SAGA 求解得到的送箱集卡总等待时间明显低于 GA, 使送箱集卡总的等待时间减少了 5.86min。从收敛效果看, SAGA 具有较快的收敛速度, 而 GA 收敛速度缓慢。因此, 本文设计的 SAGA 比 GA 更能实现送箱集卡等待时间和场桥作业能耗最小的多目标优化。

通过 SAGA 对模型进行求解, 得到的出口箱贝位分配方案和场桥调度方案如表 5.3 所示。根据贝位分配方案和场桥调度方案得到场桥在箱区内的实时行走路径, 如图 5.3 所示。从图 5.3 可以看出, 两台场桥的行走路径没有交叉点, 并且满足相邻场桥间 8 个贝位的安全距离要求, 说明求解的场桥调度方案可以避免场桥间的相互干扰。

表 5.3 出口箱贝位分配和场桥调度方案

Tab. 5.3 Schemes of bay allocation and yard cranes scheduling for outbound containers

| 场桥 1     |         |         |          |         |         | 场桥 2     |         |         |          |         |         |
|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| 作业<br>序号 | 集装<br>箱 | 贝位<br>号 | 作业<br>序号 | 集装<br>箱 | 贝位<br>号 | 作业<br>序号 | 集装<br>箱 | 贝位<br>号 | 作业<br>序号 | 集装<br>箱 | 贝位<br>号 |
| 1        | 2       | 13      | 14       | 30      | 6       | 1        | 1       | 40      | 14       | 26      | 34      |
| 2        | 4       | 8       | 15       | 32      | 3       | 2        | 3       | 35      | 15       | 28      | 27      |
| 3        | 5       | 1       | 16       | 33      | 3       | 3        | 6       | 34      | 16       | 29      | 36      |
| 4        | 7       | 4       | 17       | 35      | 1       | 4        | 8       | 27      | 17       | 31      | 27      |
| 5        | 10      | 4       | 18       | 36      | 13      | 5        | 9       | 27      | 18       | 34      | 32      |
| 6        | 12      | 9       | 19       | 42      | 16      | 6        | 11      | 35      | 19       | 37      | 38      |
| 7        | 14      | 1       | 20       | 43      | 18      | 7        | 13      | 35      | 20       | 38      | 32      |
| 8        | 17      | 4       | 21       | 44      | 16      | 8        | 15      | 34      | 21       | 39      | 31      |
| 9        | 20      | 9       | 22       | 46      | 5       | 9        | 16      | 32      | 22       | 40      | 27      |
| 10       | 22      | 1       | 23       | 48      | 7       | 10       | 18      | 27      | 23       | 41      | 28      |
| 11       | 24      | 13      | 24       | 49      | 4       | 11       | 19      | 35      | 24       | 45      | 35      |
| 12       | 25      | 2       | 25       | 50      | 18      | 12       | 21      | 34      | 25       | 47      | 29      |
| 13       | 27      | 5       | -        | -       | -       | 13       | 23      | 37      | -        | -       | -       |

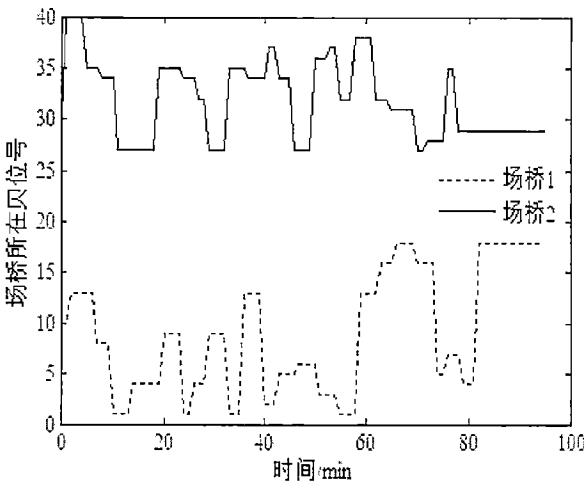


图 5.3 场桥行走路径

Fig. 5.3 The travel path of yard cranes

### 5.3 实验结果分析

本文采用分区域平衡策划方法进行场地策划，建立堆场箱位分配与场桥调度协同优化多目标模型。为了进一步验证本文模型和算法的有效性，将多目标模型和单目标模型的实验结果进行比较，对不同场地策划方法的实验结果进行比较，还通过改变场桥数量、贝位数量、待堆存出口箱箱量的数值实验进行比较分析。

#### (1) 多目标模型和单目标模型比较分析

仅考虑送箱集卡等待时间最小，其他约束条件不变，构建单目标模型，针对上述算例，运用 SAGA 对单目标模型进行求解，实验结果如表 5.4 所示。

表 5.4 多目标模型和单目标模型实验结果

Tab. 5.4 Computational results of single and multi-objective model

| 模型    | 集卡等待时间/min | 场桥作业能耗/kW h |
|-------|------------|-------------|
| 多目标模型 | 300.63     | 355.07      |
| 单目标模型 | 296.39     | 360.5       |

由表 5.4 可知，在完成 50 个待堆存集装箱任务时，多目标模型得到的集卡等待时间比单目标模型多 4.24 min，但减少了 5.43 kW h 的能耗。虽然本文建立的多目标优化模型没有实现集卡等待时间和场桥作业能耗的同时优化，但完成单位堆存任务对应的集卡等待时间仅增加了 0.0848 min，对堆场的作业效率影响很小，而节约能耗有利于码头贯彻节能减排政策、打造绿色低碳港口。

#### (2) 不同场地策划方法比较分析

集装箱码头堆场在进行出口箱堆存作业时，通常采用传统场地策划方法，即将满足 PSCW 原则的同类箱组出口箱堆放在同一区域，而在分区域平衡策划方法下，同类箱组出口箱可以堆放在箱区不同的机械作业区域。本文以贝位数为 40 的箱区配备两台场桥为例，针对不同规模的待堆存出口箱箱量，分别采用传统场地策划方法和分区域平衡策划方法进行数值实验，实验结果如表 5.5 所示。

表 5.5 不同场地策划方法实验结果

Tab. 5.5 Computational results of different space planning methods

| 出口箱<br>规模 | 传统场地策划方法 |        |         | 分区域平衡策划方法 |        |         |
|-----------|----------|--------|---------|-----------|--------|---------|
|           | 作业量      | 集卡等待   | 场桥作业    | 作业量       | 集卡等待   | 场桥作业    |
|           | 差额       | 时间/min | 能耗/kW h | 差额        | 时间/min | 能耗/kW h |
| 30        | 0        | 206.59 | 219.51  | 0         | 180.9  | 208.29  |
| 40        | 2        | 310.84 | 296.44  | 2         | 246.68 | 284.52  |
| 50        | 4        | 437.95 | 377.37  | 0         | 300.63 | 355.07  |
| 60        | 6        | 462.6  | 456.08  | 2         | 355.53 | 436.46  |
| 70        | 4        | 530.9  | 521.34  | 0         | 423.01 | 515.84  |

由表 5.5 可以看出，当待堆存出口箱箱量相同时，分区域平衡策划方法下集卡的等待时间和场桥作业能耗都低于传统场地策划方法，可以有效减少送箱集卡的等待时间，提高堆场的作业效率。传统场地策划方法下会出现场桥作业量差额不满足均衡底线的情况，可能造成场桥的长时间空耗，而分区域平衡策划方法有利于促进场桥作业量均衡。因此，分区域平衡策划方法求解得到的贝位分配方案和场桥调度方案优于传统场地策划方法。

(3) 不同场桥数量、不同贝位数量比较分析

考虑到三台场桥在贝位数为 40 的箱区同时作业存在的相互干扰较大，本文针对贝位数为 50、60 的箱区，分别进行数值实验，将箱区配备两台场桥和三台场桥的情况进行比较，实验结果如表 5.6 和 5.7 所示。

表 5.6 箱区 50 个贝位时不同场桥数量实验结果

Tab. 5.6 Performance on different number of yard cranes for 50-bay block

| 出口箱<br>规模 | 两台场桥       |             | 三台场桥       |             |
|-----------|------------|-------------|------------|-------------|
|           | 集卡等待时间/min | 场桥作业能耗/kW h | 集卡等待时间/min | 场桥作业能耗/kW h |
| 30        | 205.4      | 221.1       | 55.29      | 226.02      |
| 40        | 273.33     | 301.28      | 110.15     | 308.58      |
| 50        | 341.2      | 368.9       | 161.83     | 390.34      |
| 60        | 426.12     | 448.17      | 287.94     | 463.58      |
| 70        | 470        | 536.17      | 390.13     | 537.35      |



表 5.7 箱区 60 个贝位时不同场桥数量实验结果

Tab. 5.7 Performance on different number of yard cranes for 60-bay block

| 出口箱<br>规模 | 两台场桥       |             | 三台场桥       |             |
|-----------|------------|-------------|------------|-------------|
|           | 集卡等待时间/min | 场桥作业能耗/kW h | 集卡等待时间/min | 场桥作业能耗/kW h |
| 30        | 212.12     | 226.86      | 58.78      | 226.37      |
| 40        | 298.68     | 303.04      | 81.05      | 299.18      |
| 50        | 344.14     | 374.74      | 113.53     | 380.71      |
| 60        | 433.28     | 455.5       | 216.76     | 459.51      |
| 70        | 544.06     | 563.33      | 325.61     | 550.64      |

将表 5.6 和 5.7 进行对比，可以得出以下结论：

1) 对于相同的待堆存出口箱箱量和箱区贝位数量，两台场桥作业时的集卡等待时间明显长于三台场桥，但多数情况下，两台场桥作业能耗低于三台场桥，这是由于三台场桥作业时提高了堆场作业效率，但也更容易出现场桥空耗现象，造成非工作能耗较高。

2) 结合表 5.5，可以发现当箱区两台场桥进行作业时，随着箱区贝位数量的增加，集卡等待时间和场桥作业能耗均增加，这是由于箱区变长会导致场桥作业时移动距离增大，进而降低作业效率，增加集卡等待时间和场桥作业能耗。

3) 当箱区三台场桥进行作业时，可以发现绝大多数实验结果显示，贝位数为 60 的箱区集卡等待时间和场桥作业能耗低于贝位数为 50 的箱区，结论与箱区两台场桥作业相反。这是因为箱区三台场桥同时作业时，受场桥安全作业间距约束和作业均衡约束的影响更大，箱区贝位数为 60 时可行解空间较大，有利于得到较优的贝位分配方案和场桥调度方案。

## 5.4 本章小结

本章进行了大量的数值实验，对本文提出的模型和算法的有效性进行验证。首先对算例进行描述，然后分别采用 SAGA 和 GA 对模型进行求解，验证了 SAGA 的优越性，确定了出口箱贝位分配方案和场桥调度方案。最后，本文还将多目标

模型和单目标模型的实验结果进行比较，将传统场地策划方法和分区域平衡策划方法进行比较，同时分析场桥数量和箱区贝位数量对模型求解结果的影响，进一步验证模型和算法的适用性和有效性。

## 第6章 结论与展望

### 6.1 本文研究成果总结

集装箱码头堆场作为衔接集装箱水陆运输的集散中转站，对集装箱在码头乃至整个海运供应链中的周转效率至关重要。堆场的关键资源是空间资源和机械资源，空间资源和机械资源的调度是否合理直接影响堆场运作效率的高低。本文以堆场的空间资源和场桥资源为研究对象，主要解决箱区出口箱的贝位分配和场桥调度协同优化问题，主要研究成果总结如下：

(1) 采用分区域平衡策划方法进行场地策划，以最小化送箱集卡在堆场等待时间和场桥作业总能耗为目标，构建堆场箱位分配与场桥调度协同优化多目标规划模型，将出口箱的箱位分配问题和场桥调度问题结合在一起进行研究，使决策结果实现系统最优，同时考虑了场桥作业量均衡以及场桥间安全距离等实际约束，运用线性加权法对多目标优化模型进行处理。

(2) 考虑模型求解的复杂性，难以得出精确最优解，本文设计混合模拟退火遗传算法对模型进行求解，先利用遗传算子对生成的初始种群进行选择、交叉和变异操，然后利用模拟退火算法对遗传算法产生的新种群进行处理，充分发挥模拟退火算法和遗传算法的优点。

(3) 运用 Matlab 进行编程，对具体算例进行数值实验，还通过改变场桥数量、贝位数量、待堆存出口箱箱量的数值实验进行比较分析。实验结果显示，本文设计的混合模拟退火遗传算法收敛性优于传统遗传算法，且能更好实现送箱集卡等待时间和场桥作业能耗最小的多目标优化；本文采用的分区域平衡策划方法得到的贝位分配方案和场桥调度方案优于传统场地策划方法，可以有效减少集卡的等待时间，降低场桥作业能耗。

### 6.2 本文研究方向展望

本文的研究基于一定的假设前提，还存一些不足之处，未来的研究重点集中在以下几方面：

(1) 本文模型中假设送箱集卡到达时间为已知，但实际作业过程中受各种因

素的影响，集卡实际到达时间与预约到达时间存在差异，具有不确定性。后续研究可探讨集卡交箱时间不确定对实验结果的影响，建立动态箱位分配与场桥调度协同优化模型。

（2）本文的研究针对单箱区，只为出口箱分配了堆存贝位。进一步的研究可考虑箱区内具体箱位分配优化，将单箱区问题拓展为多箱区问题，考虑箱区选择对装船作业的影响。

（3）本文只研究了单一计划期内的码头堆场作业优化问题，进一步的研究可结合港口滚动计划周期进行优化研究，使研究内容更符合客观实际。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang C, Liu J, Wan Y W, et al. Storage space allocation in container terminals[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2003, 37(10):883-903.
- [2] 李建忠,丁以中,王斌. 集装箱堆场空间动态配置模型[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3):50-55.
- [3] 王斌. 集装箱码头堆场的一种动态随机堆存方法[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(4):147-153.
- [4] 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.
- [5] Kim K H, Park K T. A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 148(1):92-101.
- [6] Lee L H, Chew E P, Tan K C, et al. An optimization model for storage yard management in transshipment hubs[J]. OR Spectrum, 2006, 28(4):539-561.
- [7] Sharif O, Huynh N. Storage space allocation at marine container terminals using ant-based control[J]. Expert Systems with Applications An International Journal, 2013, 40(6):2323-2330.
- [8] 檀财茂,黄有方,何军良,等. 集装箱港口出口箱堆场空间优化分配研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(10):187-191.
- [9] Kim K H, Park Y M, Ryu K R. Deriving decision rules to locate export containers in container yards[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 124(1):89-101.
- [10] Zhang C, Chen W, Shi L, et al. A note on deriving decision rules to locate export containers in container yards[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 205(2):483-485.
- [11] Kang J, Ryu K R, Kim K H. Deriving stacking strategies for export containers with uncertain weight information[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2006, 17(17):399-410.
- [12] Dekker R, Voogd P, Asperen E V. Advanced methods for container stacking[J]. Or Spectrum, 2006, volume 28(4):563-586.
- [13] Chen L, Lu Z. The storage location assignment problem for outbound containers in a maritime terminal[J]. International Journal of Production Economics, 2012, 135(1):73-80.
- [14] 范灵芳,陈璐. 集装箱码头出口箱堆位分配算法[J]. 系统工程, 2011, 29(10):80-85.
- [15] 周鹏飞,方波. 动态环境下集装箱码头堆场出口箱箱位分配建模与算法研究[J]. 控制与决策, 2011, 26(10):1571-1576.
- [16] 周鹏飞,方波. 基于随机交箱序列的集装箱堆场出口箱箱位优选[J]. 沈阳工业大学学报, 2011, 33(6):678-685.
- [17] 陈超,台伟力,杨逸蓝,等. 出口箱随机入港下的箱区选择与箱位分配协调调度[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(4):544-557.

- [18] 邵乾虔,徐奇,边展,等. 考虑了交箱时间不确定性的场桥堆存作业优化[J]. 系统工程理论与实践,2015,35(2):394-405.
- [19] 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(1-3):425-433.
- [20] Kim K H, Lee K M, Hwang H. Sequencing delivery and receiving operations for yard cranes in port container terminals[J]. International Journal of Production Economics, 2003, 84(3):283-292.
- [21] 韩晓龙. 集装箱港口龙门吊的最优路径问题[J]. 上海海事大学学报, 2005, 26(2):39-41.
- [22] Ng W C, Mak K L. Yard crane scheduling in port container terminals[J]. Applied Mathematical Modelling, 2005, 29(3):263-276.
- [23] Guo X, Huang S Y, Wen J H, et al. Dynamic yard crane dispatching in container terminals with predicted vehicle arrival information[J]. Advanced Engineering Informatics, 2011, 25(3):472-484.
- [24] Zhang C, Wan Y W, Liu J, et al. Dynamic crane deployment in container storage yards[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2002, 36(6):537-555.
- [25] 李建忠. 码头堆场龙门起重机动态配置优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(1):70-74.
- [26] Lee D H, Zhi C Q M. Scheduling of two-transtainer systems for loading outbound containers in port container terminals with simulated annealing algorithm[J]. General Information, 2007, 107(1):115-124.
- [27] He J L, Chang D F, Mi W J, Yan W. A hybrid parallel genetic algorithm for yard crane scheduling[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010. 46(1): 136-155.
- [28] He J L, Huang Y F, 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.
- [29] 郑宇超,朱瑾,吴远焰,等. 港口码头场桥自动化调度建模仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33(9):440-445.
- [30] 赵磊,胡志华,李淑琴. 基于作业均衡的集装箱堆场箱区场桥作业调度[J]. 武汉理工大学学报,2013,35(1):69-74.
- [31] Ng W C. Crane scheduling in container yards with inter-crane interference[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164(1):64-78.
- [32] Mak K L, Sun D. A New Hybrid Genetic Algorithm and Tabu Search Method for Yard Cranes Scheduling with Inter-crane Interference[J]. World Congress on Engineering, 2009, 1(1):526-531.
- [33] Li W K, Wu Y, Petering M E H, Goh M, de Souza R. Discrete time model and algorithms for container yard crane scheduling[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 198(1):165-172.
- [34] 郑红星,于凯. 基于混合遗传算法的混堆箱区内场桥调度研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2013,13(5):150-158.

- [35] 郑红星,于凯,李芳芳,等. 考虑外集卡的混堆集装箱码头多场桥调度[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(12):3161-3169.
- [36] 郑红星,吴岳,杨文滔,等. 混堆模式下多箱区场桥联合调度[J]. 水运工程, 2015, 04:113-119+131.
- [37] 乐美龙,殷际龙. 堆场龙门吊调度问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(7):267-270.
- [38] 黄晓波,朱宁,朱建华,等. 考虑低碳的多台轮胎式龙门吊路径优化问题[J]. 交通信息与安全, 2016, 34(3):101-107.
- [39] Bish E K. A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 144(1):83-107.
- [40] Cao J X, Shi Q X, Lee D H. A Decision Support Method for Truck Scheduling and Storage Allocation Problem at Container[J]. Tsinghua Science & Technology, 2008, 13(S1):211-216.
- [41] Lee D H, Cao J X, Shi Q X, et al. A heuristic algorithm for yard truck scheduling and storage allocation problems[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2009, 45(5):810-820.
- [42] Kozan E, Preston P. Mathematical modelling of container transfers and storage locations at seaport terminals. OR Spectrum[J]. Operations Research-Spektrum, 2007, 28(4):87-105.
- [43] Niu B, Xie T, Tan LJ, Bi Y, Wang ZX. Swarm intelligence algorithms for Yard Truck Scheduling and Storage Allocation Problems[J]. Neurocomputing, 2016, 188:284-293.
- [44] 乐美龙,包节,范志强. 龙门吊与集卡协同调度问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(14):241-248.
- [45] Kim, K H., Kim H B., 2002. The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers. Transportation Research Part B Methodological, 36(9), 821-835.
- [46] 徐亚,张恒,全雄文,等. 基于鲁棒反应式策略的集装箱码头堆场和场桥联合调度[J]. 物流技术, 2016, 35(9):52-57.
- [47] Liang C, Gu T, Lu B, Ding Y. Genetic mechanism-based coupling algorithm for solving coordinated scheduling problems of yard systems in container terminals[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 89(C):34-42.
- [48] 吴翊. 集装箱堆场的功能[J]. 集装箱化, 1998(3):22-24.
- [49] Yun W Y, Yong S C. A simulation model for container-terminal operation analysis using an object-oriented approach[J]. International Journal of Production Economics, 1999, 59(1-3):221-230.
- [50] 张艳伟,石来德,宓为建,等. 集装箱码头出口箱集港堆存模型研究[J]. 中国工程机械学报, 2007, 5(1):32-38.
- [51] Woo Y J, Kim K H. Estimating the space requirement for outbound container inventories in port container terminals[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 133(1):293-301.
- [52] 陶莎,胡志华. 集装箱堆场出口箱箱位分配的多策略集成优化[J]. 大连海事大学学报, 2012,

35(3):59-63.

[53] 潘栋. DF 集装箱码头预约集港模式下场桥效率提升策略研究[D].大连海事大学, 2014.

[54] 张亚敏. 影响我国港口能源消耗的主要因素[J]. 交通节能与环保, 2012, 8(2):26-29.

[55] 李先,刘祥柏,李靖奎. 集装箱码头出口堆场减少倒箱策略研究[J]. 中国港口, 2013. 12:38-40.

[56] 张文修,梁怡. 遗传算法的数学基础[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2000.

[57] 王小平,曹立明. 遗传算法: 理论, 应用及软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002.

[58] 胡大伟,朱志强,胡勇. 车辆路径问题的模拟退火算法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4):123-126.

[59] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

[60] 乐秀璠,覃振成,尹峰. 基于自适应模拟退火遗传算法的多目标最优潮流[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 33(7):10-15.

[61] 王惠敏,刘刚. 基于模拟退火遗传算法的车辆调度优化[J]. 微计算机信息, 2010, 26(31): 232-233.



## 攻读学位期间公开发表论文

- [1] 范厚明,姚茜,马梦知. 多场桥分区域平衡策划下的集装箱堆场箱位分配问题[J]. 控制与决策, 2016, 31(9):1603-1608. (EI Accession number: 20163702800313)
- [2] 崔文罡,范厚明,姚茜,杨宇,马梦知. 基于模糊 Bow-tie 模型的油轮靠港装卸作业溢油风险分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12:1-7.
- [3] 崔文罡,范厚明,姚茜,杨宇,马梦知. 基于 ISM 的油船靠港装卸作业安全风险分析[J]. 上海海事大学学报, 2016, 04:20-26.
- [4] 范厚明,姚茜, 郭振峰. 集装箱堆场箱位分配及多场桥调度协同优化问题[J].上海交通大学学报. (2016.6.30 录用)

## 致 谢

时光飞逝，转眼在学校的学习生活即将结束。海事六年的学习生活给我留下了美好的回忆，在此我要向所有曾经给予我关怀和帮助的人致以最真挚的谢意。

首先，我要感谢我的导师范厚明老师。本文是在范老师的悉心指导下完成的，范老师严谨的治学态度、科学的工作方法以及深厚的理论功底使我受益匪浅，在他的谆谆教导下，我对学术研究的严谨性有了深刻的认识。在此，我对范老师致以最崇高的敬意及衷心的感谢。

其次，我要感谢交通运输管理学院的所有任课老师。感谢你们传授我专业知识，带给我知识财富。

再次，我要感谢与我朝夕相处的同学们和实验室的小伙伴。感谢你们在学习以及生活中给予我的关心、支持和帮助，尤其是马梦知师姐、蒋晓丹师姐和同届的杨宇同学，感谢你们为我研究生期间参与项目的顺利完成和论文的发表提供的宝贵意见和给予的帮助。

然后，我还要特别感谢我的父母，感谢你们对我的理解，并始终在身后默默支持着我。

最后，感谢在百忙之中评阅论文和参加答辩的各位专家、教授！

# 学汇百川 德济四海

