

分类号 _____

密 级 _____

U D C _____

单位代码 10151 _____

基于启发式算法的集装箱堆场优化研究

张仁星

指导教师 陈佳 职称 教授

学位授予单位 大 连 海 事 大 学

申请学位级别 工学硕士 学科与专业 管理科学与工程

论文完成日期 2011 年 5 月 论文答辩日期 2011 年 6 月 25 日

答辩委员会主席 陈 燕



**An Optimization Research on Container Yard Based on
Heuristic Algorithm**

A thesis Submitted to

Dalian Maritime University

In partial fulfillment of the requirements for the degree of

Master of Engineering

by

Renxing Zhang

(Management Science and Engineering)

Thesis Supervisor: Professor Chen Jia

May 2011

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“基于启发式算法的集装箱堆场优化研究”。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：张仁星

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：张仁星 导师签名：张仁星

日期：2011 年 6 月 25 日

摘 要

随着经济全球化的发展,各国各地区之间的联系也变得越来越密切,贸易往来也越来越频繁。在国际贸易中,海运方式占有重要的地位,尤其是集装箱运输。因其具有运输速度快、方便装卸、机械化程度高、作业效率高等特点,能够提高运输效率、降低成本、最大限度地满足客户需求,在现代运输中占有无法比拟和替代的地位和作用。然而集装箱运输吞吐量的持续增长,给港口码头企业生产带来了巨大的压力,为了提高集装箱港口的竞争力,使得港口高效而经济运作,就必须要对港内的所有作业资源进行合理地优化配置,其中包括集装箱堆场作业、场桥及其它作业机械工作资源的合理分配,使岸桥的等待时间减少,进而缩短船舶在港的停靠时间,提高集装箱港口作业能力。

本文以集装箱码头堆场为研究对象,针对场桥机械资源的分配调度问题展开研究。首先对集装箱堆场的作业流程进行了详细的调研,并查阅了大量相关的国内外文献资料。在集装箱堆场的模型研究中,大部分都使用启发式调度模型,主要是考虑场桥的作业时间,以场桥完成作业任务所用的时间最少作为目标函数。但是堆场中集装箱的到达具有随机性,因此场桥的作业也是随机性的,虽然能够使场桥的作业时间最短,但是集装箱可能还没有到达,导致场桥的空转,浪费资源。基于以上考虑,本文提出的模型是以场桥的利用率最大作为目标函数,这样使得场桥资源能够得到最大化的利用。通过对比,选择了启发式作为模型基础,然后针对场桥作业的特征,改进了模型,提出了以场桥机械利用率最大化为目标的场桥分配调度模型,并对模型进行求解,得到较优的场桥分配方案。

最后本文结合某港口码头堆场实际的场桥分配数据,应用该模型对其进行优化,通过与原有分配方案的比较得出,优化后的分配方案具有更高的场桥利用率。

关键词: 集装箱堆场; 作业调度; 遗传算法; 场桥

ABSTRACT

With the development of economic globalization, the links between various countries and regions are becoming increasingly close, and trade is also becoming more frequent. In international trade, method of shipping plays an important role, especially container transport. Because it has features of fast speed, being easy to handle, high degree of mechanization, high operating efficiency, and can improve transport efficiency, reduce costs, satisfying customer needs maximally, it has irreplaceable and unmatched status and role in the modern transport. However, continued growth in the throughput of container transport, gives port production tremendous pressure, to improve the competitiveness of container ports, and to make the port operate efficiently and economically, we must optimize the allocation of all operations and all resources on the port reasonably, including the rational allocation of container yard operations, field bridge and other work resource of operating machine, so we can to reduce the waiting time of the bank bridge, then shorten the time of the ship docking time in the port and improve the capacity of the container port operations.

This paper regards the container terminal yard as the research object, and researches the issue of distribution and scheduling of the field bridge machinery resources. First of all I made a detailed research about processes on the container yard, and access to a large number of the relevant domestic and foreign literature data. In the model research of the container yard, heuristic models are most used, mainly considering the operating time of the field bridge and the least the time that field bridge complete the assignments as the objective function. But the arrival of the container in yard is random, so the field bridge work is also random, although the operation time of field bridge can be shortest, but the container may not reach, leading to the field bridge idling and wasting of resources. Based on the above considerations, the model proposed in this paper regards the maximum utilization of the field bridge as the target function, in order to make the field bridge source be to maximize use. By contrast, I choose the heuristic as a model base, then towards characteristics of the field bridge operations, improve the model, propose the bridge field distribution and scheduling model whose object is maximizing utilization of the field bridge machines, and solve the model, then get the optimum

distribution program of the field bridge.

Finally, with the actual field bridge distribution data in some port yard, the paper optimize it by this model, by comparison with the original distribution scheme, we found that the optimized allocation scheme has a higher utilization rate of the field bridge.

Key Words: Container Yard; Job Scheduling; Genetic Algorithms; Field Bridge

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景及意义	1
1.1.1 中国集装箱运输的发展	1
1.1.2 信息技术在集装箱港口的应用	2
1.1.3 本论文研究的意义	4
1.2 集装箱堆场国内外研究现状	4
1.2.1 国外集装箱堆场研究现状	4
1.2.2 国内集装箱堆场研究现状	5
1.3 本文的主要工作及组织结构	6
1.3.1 本文的主要工作	6
1.3.2 本文的组织结构	7
第 2 章 作业调度问题及其相关的启发式算法研究	9
2.1 作业调度问题概述	9
2.1.1 概念	9
2.1.2 作业调度问题的分类及其特点	10
2.1.3 Flow-shop 作业调度	11
2.1.4 Job-shop 作业调度	12
2.2 集装箱堆场的资源配置	12
2.2.1 集装箱堆场的空间资源	13
2.2.2 集装箱堆场的机械资源	14
2.3 启发式算法问题研究	15
2.3.1 启发式问题概述	15
2.3.2 人工神经网络算法	16
2.3.3 禁忌搜索算法	18
2.3.4 模拟退火算法	19
2.3.5 遗传算法	20
2.3.6 算法适用性分析	21
2.4 遗传算法	22
2.4.1 遗传算法的基本原理	22
2.4.2 遗传算法的结构	23
2.4.3 遗传算法的基本流程框架	26

2.4.4 遗传算法的特点	27
第 3 章 基于遗传算法的堆场作业调度模型研究	29
3.1 集装箱堆场作业调度概况	29
3.1.1 集装箱堆场概况	29
3.1.2 集装箱堆场的功能	30
3.1.3 集装箱堆场的作业流程	31
3.2 堆场作业调度模型建立	32
3.2.1 问题的描述	32
3.2.2 模型的建立	34
3.2.3 模型解集的说明	36
3.3 基于遗传算法的模型求解	38
3.4 本章小节	40
第 4 章 集装箱堆场调度模型的应用研究	41
4.1 集装箱堆场系统概述	41
4.2 集装箱堆场调度模型算法在实际系统中的应用	45
4.2.1 实现过程中所用的一些数据结构	45
4.2.2 算法的实现	47
4.3 应用结果分析与比较	51
第 5 章 总结与展望	58
参考文献	59
攻读学位期间公开发表论文	67
致 谢	69

第 1 章 绪论

1.1 课题背景及意义

海运集装箱运输的发展是人类运输史上的一次重大变革,是全球社会化大生产发展的产物。集装箱运输将复杂而零星的小包件货物整批的装入集装箱,经由水陆空进行不间断的联合运输,将货物从发货方直接运送到收货方手里,真正意义上的实现了“门到门”的服务,极大的提高了货物运输的效率,降低了运输成本,同时也减少了货物在运输过程中的损耗,最大限度的满足了货主的需求^[1]。集装箱运输是一种先进的运输方式,给社会的进步与发展带来了巨大的促进作用,是以往任何一种运输方式都无法比拟的。随着经济全球化的发展,各国之间的贸易往来也越来越频繁,对于货物运输的需求也在不断增加,由于现代集装箱运输具有运输量大、机械化程度高、装卸快捷、货物损耗小、适合多式联运等优点,自从 20 世纪 50 年代出现,在短短的几十年之间得到了蓬勃的发展^[2]。

1.1.1 中国集装箱运输的发展

随着我国改革开放的进一步深化,市场经济体制的进一步完善,国民经济的发展取得了突飞猛进的进步,我国与世界各国各地区的贸易往来也取得了长足的发展,随之而来的是集装箱吞吐量的高速增长。近 30 年来,我国的集装箱运输事业发展迅猛,年吞吐量位居世界首位,成为世界海上集装箱运输的一个重要枢纽。上海港在 2010 年完成集装箱吞吐量 2905 万标箱,超越新加坡港,首次跃居世界第一,与此同时全国共有 10 个港口跻身世界亿吨大港的行列。集装箱港口作为社会经济发展的重要基础设施,有力的支撑了社会、经济和贸易的发展,进一步促进了人们生活水平的提高。

近年来,我国在全球国际贸易地位的提升和对外贸易的扩大使得集装箱港口码头的业务也开始面向国际化,为国外的轮班船舶提供服务。为了促进经济贸易的发展、调整产业结构和运输结构、扩大对外开放的力度,我国的集装箱码头基础设施也有了显著的改善。同时随着集装箱运输船舶的超大型化发展,集装箱港口码头的基础设施建设也发生了根本性的变化,为了适应航运船舶大型化发展的

趋势和更好的提供装卸服务,我国主要的枢纽港也朝着大型化、规模化的方向发展。进一步改善港口服务设施,合理规划建设集装箱港口码头的基础设施,保障集装箱码头的服务质量,调整港口的整体功能,向多功能、规模化、集装箱化趋势发展,真正发挥主枢纽港的作用。对外贸易的持续增长给集装箱运输事业带来了前所未有的机遇,我们也应该抓住这个机遇大力发展集装箱运输事业。改革开放政策实施以来,我国在加快自身港航事业发展的同时,也加快了对外开放的步伐。港口建设在引进外资方面也得到了快速的发展,航运领域的市场准入政策也向外开放^[3]。港口设施的不断完善以及运输能力的不断增加为集装箱事业的进一步发展创造了优越的条件,从而为对外贸易的稳步发展提供了坚实的保障。

虽然我国的集装箱运输事业和港口建设取得了骄人的成绩,但是目前我国的集装箱港口普遍还存在着效率低下、提供的服务不够专业化等一系列问题。集装箱码头港口的服务水平与国外的先进水平相比还存在着较大的差距,港口的竞争力更多的是体现在费用上^[4]。其主要的原因可以归为两方面,一方面是由于资金和技术条件的限制,一些先进的港口操作设备没有采用,这样即便是全负荷工作也无法满足需求,极大地限制了整个港口的吞吐量的提高;另一方面是港口的管理方面,在作业安排、资源配置、调度控制等方面还是采用经验的管理方法,没有一套有效的科学管理方法,这样就导致管理效率低下、信息交流不顺畅等,成为制约港口操作效率提升的一个瓶颈。

1.1.2 信息技术在集装箱港口的应用

现代信息技术的蓬勃发展和全球信息网络的兴起,使得集装箱港口运输的管理从传统的工业化时代进入了一个新的信息化时代。如今,信息技术已经在集装箱港航运输企业和各大码头港口得到了广泛的应用^[5]。当前先进的港口码头应用于操作生产和基础管理方面的信息技术主要包括码头操作系统(Terminal Operating System, 简称 TOS)、无线终端(Radio Data Terminal, 简称 RDT)、电子数据交换系统(Electric Data Interchange, 简称 EDI)、无线射频技术(Radio Frequency Identification, 简称 RFID)等信息技术^[6]。

码头操作系统是港口码头生产管理的核心,主要用于管理码头生产作业的各

个工艺环节,包括船期计划安排、码头资源安排、堆场控制、装卸船舶控制等。先进的动态实时 TOS 系统能够实时反应港口码头的动态信息,为码头作业计划制定和调整、作业任务的控制、收发箱管理、集港疏港等提供最优方案,为客户提供高质量的服务^[7]。

无线终端技术主要是运用于控制岸桥、场桥龙门吊、叉车和堆场拖车等装卸设备上,指挥司机进行相应的操作。一般来说,无线终端都是配合 TOS 系统使用的,控制中心的操作指令通过无线信号传输到这些终端设备上,司机则根据这些终端设备上的操作指令进行操作,并将结果传回 TOS 控制中心。无线终端技术的利用彻底改变了传统的用对讲机指挥生产作业的调度模式,达到了实时确认集装箱位置的变化和装卸状态^[8]。

电子数据交换系统主要是用于集装箱港口码头与外界的数据交换,EDI 的基本功能主要包括数据转换、数据格式化和报文通讯,EDI 在集装箱码头的信息化过程中起着非常重要的作用。传统的信息传递过程需要经过许多的环节,每一个环节都利用着一套非标准的信息格式,这样就导致了口岸通关速度大大降低。EDI 系统就是将这些传输的数据进行标准化,在通商口岸建立一个公共的信息平台,将所有的进出口货物的数据采用标准格式进行传输,使得同一信息实现依次输入多次利用,最大化的实现信息资源的共享、整合和标准化,保证了信息传输的准确性和一致性^[9]。

无线射频技术是一种非接触式自动识别技术,通过射频信号自动识别目标对象并获取数据,不需要人工的才参与,能够适用于各种不同的恶劣环境下。RFID 技术可以识别高速运行中的物体并能够同时识别多个电子标签,操作简单快捷^[10]。RFID 技术是一项很成熟的技术,已经广泛应用于高速公路收费站,以其远距离、非接触式和运动中自动识别等独特的技术优势,应用于港口集装箱码头管理中。在集装箱上安装智能电子标签,实时掌握集装箱的动态信息,对其进行监控和调度,实现了集装箱的自动识别和对集装箱运输过程的实时跟踪,提高了港口码头集装箱的周转速率,大大加快了通关速度,为建设数字化集装箱港口奠定了坚实的技术基础^[11]。

1.1.3 本论文研究的意义

国际贸易额的进一步扩大,使得集装箱吞吐量持续增长。集装箱港口码头为了能够处理更多的业务已经是满负荷运作,尽管如此仍不能有效满足日益增长的吞吐量,还是显得相形见绌。扩大集装箱港口的吞吐量的途径主要有两条,其中一个扩大集装箱港口的场地面积,包括增加泊位、扩大堆场,并添加机械设备;另一个途径就是优化集装箱港口的资源配置,在利用现有资源的情况下加强管理,提高单位时间的作业效率,最终达到增加吞吐量的目的。由于目前港口土地资源紧张,在一定时期内港口的规模是很难再增长的,提高吞吐量的方法主要是通过优化港口的资源来实现。集装箱堆场作为集装箱港口系统的一个重要的资源,其作业效率的高低将会直接影响到港口码头的整体作业效率。优化集装箱堆场的资源配置,提高堆场的作业效率,将缩短船舶的停靠时间,进而缩短运行周期,降低成本。因此针对集装箱堆场的资源利用情况进行优化研究具有重要的现实意义和理论意义。本文将以集装箱堆场作为研究对象,重点研究场桥的作业流程,通过数学模型的建立并利用遗传算法进行求解,得到最优的作业计划,希望研究的成果能够为我国集装箱堆场的资源配置提供一定的指导和决策依据。

1.2 集装箱堆场国内外研究现状

集装箱运输的出现对于海上货物运输具有重要的意义,是人类的运输史上的一座里程碑,从其出现到蓬勃发展仅仅用了几十年的时间。在这期间许多的研究学者和科研工作者们投入了大量的时间和精力,从不同的层面和角度对集装箱相关问题进行了研究。而集装箱堆场作为集装箱运输系统的重要组成部分,其作业效率的高低将直接影响到整个集装箱港口的作业效率和船舶的在港停靠时间,因此许多学者对集装箱堆场相关问题进行了大量的研究。目前对集装箱堆场的研究主要集中在堆场空间资源的分配利用和场内机械资源的利用两个方面,下面就对近年来集装箱堆场的主要研究问题,从国内两个方面来进行阐述。

1.2.1 国外集装箱堆场研究现状

国外对于集装箱堆场的研究起步比较早,也取得了一定的研究成果。在堆场

空间资源配置方面的研究上, Taleb-Ibrahimi 等人利用了仿真的技术研究了出口箱堆放区域在不同的原则安排下, 堆场的高度、堆场利用率和捣箱率之间的关系^[12]。Mcdowill 在文献[13]中讨论了集装箱港口的作业流程, 并建立了一个成本模型来解决集装箱堆场的堆存问题。Castilho 和 Daganzo 研究了进口集装箱的堆场问题, 提出了进口箱的两种堆放策略, 其中一种策略是按照集装箱到达的时间一次堆放, 另一种策略是按照集装箱的大小分类进行堆放^[14]。Kim 在研究倒箱翻箱方面引进了加权计算方法用来计算期望翻箱次数, 为集装箱分配合理的位置使得翻箱次数最少^[15]。Peter 和 Erhan 运用混合整数线性规划建立模型分析研究了集装箱堆场的最优堆存方案, 使船舶在港挂靠时间最短, 并利用遗传算法对模型进行了求解^[16]。在堆场设备资源的研究方面, Chung 最早提出了场桥移动路径选择问题, 主要是为了减少场桥在作业过程中的不必要移动以使得场桥的工作效率得到提高^[17]。Lai 和 Lam 利用模拟仿真的方法研究了场桥的配置策略, 并比较了在不同的配置策略下场桥的使用率、吞吐量和作业等待时间等相关问题^[18]。Gambardella 采用网络流的思想研究了堆场资源的配置问题, 运用混合整数规划模型对桥吊、场桥、叉车等堆场机械资源进行配置^[19]。在场桥移动最优路径方面, Kim 研究了单个场桥的最优路径问题, 利用混合整数规划模型使场桥在集装箱堆放区的总移动时间最小, 但是实际的作业中往往是多台场桥同时开工作业, 它们之间是相互影响的, 因此该模型的现实意义不是很大^[20]。Kozan 和 Prseton 通过建立整数规划模型使场桥的各箱区总工作时间最大化来解决场桥资源配置问题^[21]。

1.2.2 国内集装箱堆场研究现状

由于集装箱堆场在集装箱运输系统中占有重要的地位, 近些年来国内也有许多学者对集装箱堆场问题展开了研究。郝聚民、纪卓尚等利用图搜索技术和模式识别理论建立了随机条件下出口箱混合顺序作业堆场贝优化模型, 并阐述了对出口集装箱堆场优化的重要意义^[22]。杨淑琴和张运杰等人运用启发式算法建立了以翻箱量最小为目标的优化模型来合理安排出口集装箱箱位, 采用的放箱原则是出口箱先到港、尽量轻箱在下重箱在上, 以达到装船作业时翻箱率最小的目的^[23]。徐建华研究了一种利用择箱指数来寻求集装箱最佳堆存高度和最佳布置, 使得堆

场的空间利用率和取箱率获得最佳的优化结果^[24]。宋天威对集装箱的堆码方式进行了探讨,以上海港军工路集装箱码头堆场为例提出了两种堆码方式,一种方式是六箱并列堆放,车道安排在堆垛的旁边;另一种方式是两排三箱并列堆放,车道留在中间^[25]。徐亚、陈秋双等人对倒箱作业的落箱问题进行了研究,采用了一种改进的启发式算法对其进行求解,降低了集装箱堆场的倒箱率^[26]。计三友、高悦文在考虑了集装箱重量等级分布的条件下,建立了出口箱区堆存模型,并利用搜索技术求解该模型^[27]。魏众、申金升等人提出了轮胎式场桥优化调度混合整数规划调度理论,研究了在固定作业量前提下场桥调度的优化问题,为集装箱港口的实际作业管理提供了指导^[28]。何军良、宓为建提出了一种基于整数规划模型和爬山算法的场桥调度策略,将场桥的调度和堆场空间分配作为一个整体进行考虑,构建堆场系统的动态调度模型^[29]。高鹏以集装箱堆场的提箱作业作为研究对象,建立了以总作业成本最小为目标的多阶段决策优化模型,设计了内外两层嵌套的优化算法,内层算法用于实现最短路径搜索,外层算法用于倒箱策略的优化^[30]。

1.3 本文的主要工作及组织结构

1.3.1 本文的主要工作

集装箱运输系统是由多个子系统组成,协调好每一个环节才能够发挥出集装箱运输的优势。但是不少的码头管理者更注重船舶的装卸和泊位的管理,而忽略了堆场管理。码头堆场处于码头前沿和后方堆场之间,起到一个缓冲区的作用,其作业效率的高低将直接影响到整个码头港口的效率。在堆场管理中场桥作为主要的资源,其作业效率和利用率直接决定了堆场的装卸效率和经营成本。如果堆场拥有足够多的场桥就能够快速准确地完成作业任务,但是堆场资源是有限的,如何充分利用有限的资源来满足更高的作业要求,产生较大的吞吐量,就成为研究的重点。

本文的主要研究堆场资源的调度,重点研究场桥的配置问题,通过合理的配置场桥使得堆场的场桥利用率达到最大,降低经营成本,提高码头综合竞争力。通过对码头堆场业务的调查分析,利用建模工具建立码头堆场调度模型,以场桥

利用率最大化为目标函数，并且用启发式算法中的遗传算法进行模型的求解，最终得到最优的场桥分配方案。

有关堆场场桥研究的文献在建立模型方面主要是考虑场桥的作业时间，大多数是以所有场桥完成装卸任务所用时间最少为目标函数。但是由于集装箱的到达具有随机性，因此场桥作业也具有随机性，这样即使场桥完成作业任务时间最短，但是集装箱还没有到达。基于以上考虑本文提出场桥利用率最大化目标，使得场桥资源能够得到充分的利用，这是本文的主要特点。

1.3.2 本文的组织结构

本文共分为五个章节，分别对论文的研究背景、国内外研究现状、基础理论知识、启发式算法和模型的建立，集装箱堆场管理系统等几个部分进行了分析研究，具体包括：

本文的组织结构如下：

第 1 章：主要介绍了课题的背景及意义、国内外研究现状，并在章节的最后给出了本文的组织结构。

第 2 章：阐述了作业调度问题的一些基本概念，介绍了集装箱堆场的资源配置情况，并对启发式问题进行了说明，介绍了一些常用的智能优化算法，最后重点论述了遗传算法。

第 3 章：阐述了集装箱堆场作业调度的具体情况，概括了堆场的基本功能和作业流程，在此基础上建立了堆场调度模型，该调度模型主要是研究堆场中场桥的配置问题，并且利用遗传算法对模型进行了求解。

第 4 章：阐述了集装箱堆场系统的概况，将模型应用于实际的码头堆场中，并对结果进行了分析与比较。

第 5 章：总结与展望。

论文的内容和结构见图 1.1：

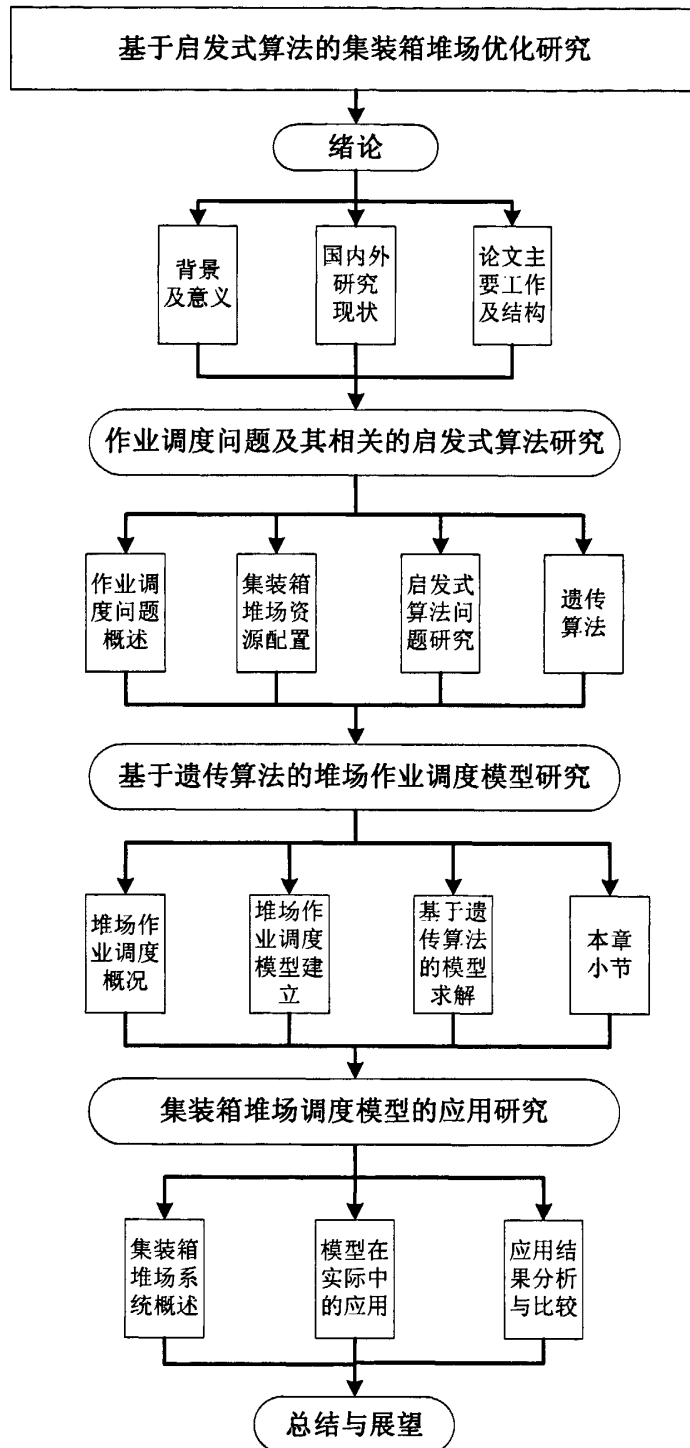


图 1.1 论文内容和结构

Fig. 1.1 Content and Structure of the paper

第2章 作业调度问题及其相关的启发式算法研究

2.1 作业调度问题概述

2.1.1 概念

调度就是对一个可用的资源集在时间上进行加工任务集的分配，并要满足一定的性能指标。典型的调度问题一般包括一个待完成的作业集、每个作业由若干个工序组成操作集、完成每一个操作所需要的资源集，并且操作应该是按照某一种可行的工艺次序进行加工。调度的目标是如何合理地将资源分配给每个作业，并合理的安排作业的加工次序和作业开始时间，使得约束条件被满足，同时对一些既定的性能指标进行优化。

调度理论最早是起源于对车间生产计划和控制的研究，许多的专家和学者从不同的广度与深度对调度理论进行研究，经过几十年的研究与探索，逐渐发展成为一个比较完善的科学理论，在企业实际的生产过程中得到了广泛的应用^[31]。有效的调度方法研究与应用是提高企业生产效率的关键和基础，优化调度方案，可以大大提高生产效益和资源的利用率，从而增强企业的竞争力。尽管调度问题最早是从生产制造业领域提取出来的，但是这并不意味着它只是仅仅应用于生产制造中。事实上，调度问题的应用范围已经远不止于在生产制造业中，在航运管理、企业管理、工业自动化控制等诸多领域都有着广泛的应用。调度问题中所提到的一些概念，例如工件和机器设备，都是抽象的概念，代表着极为广泛的具体对象，如操作人员、服务机构和作业设施等都可以称为“机器设备”，而被服务的客户、任务和零件统称为“工件”^[32]。

生产调度问题就是在一定时间内，进行可用共享资源的分配和生产任务的排序，以满足某些指定的性能指标^[33]。一般说来，生产调度问题就是按时间分配资源来完成任务的问题，可以描述为：针对于某一项可分解的工作，在一定的约束条件下（约束条件可以是所占用资源的约束、加工时间的约束、加工顺序的约束等），以获得制造生产产品时间或者是成本的最优。从数学规划的角度来说，调度问题就是在等式或者是不等式约束条件下，对目标函数进行的优化操作。

2.1.2 作业调度问题的分类及其特点

调度问题根据研究的侧重点的不同有多种分类方式。

(1) 按照资源约束条件的种类和数量的不同进行划分

① 单资源调度(single resource constrained): 只有一种资源约束的生产能力调度。单资源生产调度是指在车间生产环境中, 只有设备资源的数量不能同时满足所有可加工工序立即被加工的要求。

② 双资源调度(dual resource constrained): 同时有两种资源约束着的生产能力调度。在车间调度中, 机床设备往往是制约资源之一, 车间的工人数量有限或者是某种类型的操作工具有限, 因此这两种资源可以是机床设备和工人或者是工具。

③ 多资源调度(multiple resource constrained): 同时有着两种以上的生产所需资源制约着的生产能力调度。这些约束资源包括, 机床设备、员工、物料运送系统和辅助资源等。

单资源调度是双资源调度的特例, 双资源调度又是多资源调度的特例, 所以多资源调度是最复杂的一种调度。

(2) 按照零件和车间的构成划分

① 流水车间调度(Flow shop): 在这种车间中, 每个零件都有相同的加工路径, 这样, 机床设备的布局就如同流水线一样, 零件一次从流水线的一端进入, 最后从另一端流出。

② 作业车间调度(Job shop): 在这种车间中, 机床设备的布局可以是任意的, 因此零件的加工路径也是任意的, 并且各零件的工序内容和数量也是任意的。这是一种最一般化的车间调度形式。

③ 开放式车间调度(Open shop): 在这种车间中, 每个零件的工序之间的加工顺序是任意的, 因此, 零件的加工可以从任意一道工序开始, 在任意一道工序结束。

④ 单车间调度(Single shop): 在这种车间中, 每个零件只能有一道工序。

(3) 按照零件的加工特点划分

① 静态车间调度(Static schedule): 所有的零件在开始调度时刻已经准备就绪,

调度过程中不考虑出现的意外情况。

② 动态车间调度(Dynamic schedule): 调度过程应考虑到在调度过程中出现的各种意外情况。这种调度方式要求调度在有突发事件出现后,能立即根据当时的车间加工能力,对待加工的零件重新展开调度,以确保在任何时刻,都能保持车间的加工性能指标处于最优或次优状态。

调度问题具有以下几个特点:

(1) 复杂性: 由于生产车间中工件、机器、缓存及搬运系统之间相互影响、相互作用,每个作业又要考虑它的加工时间、操作顺序、交货期等,因而相当复杂。调度问题是在等式或不等式约束下优化性能指标,在计算量上往往是 NP 完全问题,即随着问题规模的增大,对于求解最优化的计算量呈指数增长,使得一些常规的最优化方法往往无能为力。

(2) 动态随机性: 在实际的生产调度系统中存在很多随机的和不确定的因素,比如作业到达时间的不确定性、作业的加工时间也有一定的随机性,而且系统中常出现一些突发偶然事件,如设备的损坏/修复、作业交货期的改变、紧急定单等。

(3) 多目标性: 实际的计划调度往往是多目标的,并且这些目标间可能发生冲突。生产调度的性能指标可以是成本最低、库存费最少、生产周期最短、生产切换最少、设备利用率最高、最短的延迟,最小的提前期或者拖期惩罚、三废最少等。这种多目标性导致调度的复杂性和计算量急剧增加。

(4) 多约束性: 生产车间中资源的数量、缓存的数量、工件的加工时间和加工顺序都是约束。此外还有一些人为的约束,如要求各机器上的负荷平衡等等。

2.1.3 Flow-shop 作业调度

Flow-Shop (Flow Shop scheduling problem 简称 FSP) 调度问题,也被称为同序作业调度问题,是许多实际流水线生产作业调度的简化模型,是一种典型的 NP-hard 问题;广泛应用于流程工业和离散制造工业中,具有一定的代表性。流水车间调度问题最早源于 1954 年 Johnson 发表的一篇关于流水作业调度的文章^[34],后来许多学者对流水车间调度问题进行了研究并提出了许多的解决方法。流水车间调度问题可以分为三类,分别是确定型流水车间调度问题、随机型流水车间调

度问题和模糊型流水车间调度问题。在确定型流水车间调度问题中,所做的假设是加工时间是确定的已知量。在随机型流水车间调度问题中,加工时间是随机的,按照一定的概率分布而变化的^[35];在模糊型流水车间调度问题中,每一个工件的模糊交货期表示为决策者对工件完工时间的满意度^[36]。

相对于不同的流水车间调度问题,也有着不同的求解方法,迄今为止,学者们提出了各种各样的优化方法来求解流水车间调度问题。这些优化方法大体上可以分为三大类:精确计算方法、构造型求解法和智能算法^[37]。精确计算方法有规划法^[38],主要适用于求解的问题规模比较小的情况下。构造型方法是一种从局部最优解中寻找全局最优解的方法,适用于进行局部搜索。相对于前两种求解方法,在解决流水车间调度这类 NP-hard 问题上,利用智能优化算法得到的近似解更令人满意,因此成为学术界研究关注的重点。这些智能算法包括遗传算法^[39]、禁忌搜索算法、模拟退火算法、微粒子群算法、蚁群算法、文化算法^[40]等。

2.1.4 Job-shop 作业调度

Job-Shop (Job Shop scheduling problem 简称 JSP) 调度问题也是一类典型的调度问题,是生产制造企业中广泛存在的一种调度问题。Job Shop 调度问题可以简单的描述为:给定一批待加工的工件和加工工件所需要的设备资源,每个工件的加工过程包括多道加工工序,每一道工序需要在一台给定的设备上非间断地加工某一段时间,每一台设备一次只能加工一道工序。调度问题就是把工序分配给机器上的某段时间,问题的目标就是找到最小时间长度的调度方案。Job Shop 调度是每一个工件按照特定的设备次序进行加工,相对于 Flow Shop 调度问题更加接近于实际的生产制造过程调度,自然也就更加复杂,所以成为了学术界的一个研究热点。

2.2 集装箱堆场的资源配置

集装箱堆场的资源主要包括两大类,即堆场的空间资源和堆场的机械设备资源。空间资源主要是指存放集装箱的场地容量,机械设备资源是指在堆场上进行作业的机械,包括场桥、正面吊、空箱叉车和场地拖车。其资源结构如图 2.1 所示。

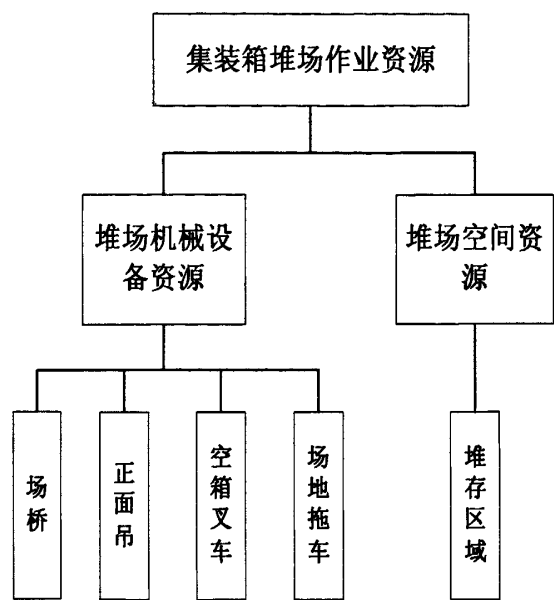


图 2.1 集装箱堆场作业资源

Fig. 2.1 Operation resources of the container yard

2.2.1 集装箱堆场的空间资源

集装箱堆场是集装箱港口的重要组成部分，为等待装船的集装箱和从船舶上卸载下来的集装箱提供堆放的场地，同时也是进行集装箱交接和临时保管集装箱的地方。集装箱堆场的主要功能是在集装箱运输过程中起到一个缓冲的作用，这种缓冲的作用分为进口和出口两种情况。对于出口来说，堆场的作用就是将所有等待出口装船的客户集装箱先集中到一起来，这些集装箱包括通关的和未通关的。等到通关截止时间之后，就不再接收新的集装箱，这时所有通关的集装箱就等待船舶停靠以后就可以装船了。对于进口来说，堆场就是临时存放从船舶上卸载下来的集装箱，这些集装箱存放在最靠近船舶的堆场，这样有利于加快船舶的卸载速度。等所有集装箱卸载完毕以后，再进行进口集装箱的疏港。也就是说，堆场是集装箱通关上船前的统一集结地和船舶到港后卸载集装箱的临时存放地，这样便于船舶公司、港口码头和海关等进行管理^[41]。

集装箱堆场有多种类型，一般分为前方堆场和后方堆场。

集装箱前方堆场是指在集装箱码头前方，为加速船舶装卸作业，暂时堆放集

装箱的场地。其作用是：当集装箱船到港前，有计划有次序地按积载要求将出口集装箱整齐地集中堆放，卸船时将进口集装箱暂时堆放在码头前方，以加速船舶装卸作业^[42]。前方堆场一般占堆场总面积的比例较大，大小应该根据集装箱码头所采用的装卸系统不同而定，同时也会因堆放的层数不同而不一样。它最靠近码头前沿，其设计的面积应该大于泊位上停靠的最大集装箱船装载量的两倍。

集装箱后方堆场是指集装箱重箱或空箱进行交接、保管和堆存的场所。集装箱后方堆场是集装箱装卸区的组成部分。是集装箱运输“场到场”交接方式的整箱货办理交接的场所。事实上，后方堆场和前方堆场没有严格明显的分界线，仅仅只是一种地理位置上的相对概念。后方集装箱堆场，是码头港口集装箱装卸系统的补充部分，对集装箱码头的集疏港、集装箱中转运输、拆装箱作业，发挥了巨大的作用^[42]。

集装箱堆场的布局一般遵循 PSCW 原则，所谓 PSCW 原则是指对同一目的港(Port)、同一尺寸(Size)、同一种类(Category)的集装箱按照重量级别(Weight)堆放在堆场的同一贝上^[43]。堆场的场地上都是用白色或是黄色的线条画成的长方形格子，叫作箱位，它是集装箱堆场的最小组成单位，并且用相应的箱位号来表示集装箱在堆场中的具体位置。箱位号是由箱区、贝位、行号和层号来表示的，堆场由若干箱区组成，每个箱区由若干个贝位组成。每个贝位包括若干排和若干层，这些组成了箱位，堆场中的所有箱位就组成了堆场的堆存空间资源。

2.2.2 集装箱堆场的机械资源

集装箱堆场机械资源主要承担集装箱在堆场的装卸作业和堆码作业等，根据港口码头不同的装卸工艺，堆场机械也各不相同。一般来说，可以分为水平运输机械和场地装卸机械。水平运输机械主要是指集装箱牵引车，也称为拖车或者拖头。场地装卸机械主要包括场桥、正面吊和空箱叉等^[45]。

集装箱牵引车主要用来完成集装箱在堆场内的水平运输任务，包括从后方堆场运送集装箱到口岸等待装船和从口岸将卸载下来的集装箱运送到堆场指定的位置堆放。一般来说，一辆拖车一趟运输可以装载一个 40 尺的集装箱或者是两个 20 尺的集装箱。拖车按照规划好的场地路线行驶，完成集装箱在泊位与场地之间的

空间位移。

场桥又称为龙门吊，由底梁和前后两片门框组成的门架，并通过梯形架连接的前后拉杆进行悬挂，支撑在车轮上。运行小车通过起升钢丝绳悬挂专用集装箱吊具沿门框上横梁上的轨道运行，配合底盘车进行集装箱的堆码和装卸作业。场桥又分为轨道式场桥和轮胎式场桥。轨道式场桥作业效率略高于轮胎式场桥，一般采用电力驱动，故障率低，作业能耗少，但由于场桥的底盘移动依赖于轨道所以难以进行跨场机动，购置成本也高于轮胎式场桥。轮胎式场桥采用柴油机动力，故障率较高，作业能耗较大，但便于机动，购置成本较低。场桥是码头场地作业的主力机械^[44]。

正面吊和空箱叉也是码头常用机械，具有机动灵活、造价低廉等优点，但作业回旋半径大、堆场面积利用率低、故障率较高且维修复杂，作业效率低于场桥。一般用于完成场内短距离搬运和现场临时作业，是码头场地作业的辅助机械^[44]。

2.3 启发式算法问题研究

2.3.1 启发式问题概述

启发式算法，从直观的角度可以理解为受某些事物的启发而提出的一些算法。很早以前，受大自然的启发，人们就已经从自然界的运行规律中找到许多解决实际问题的方法。现在的启发式算法也并不是全部都来自自然规律的启发，更多的是人们在面对具体问题时所积累的经验和方法。启发式算法可以这样定义：一个基于直观或经验构造的算法，在可接受的花费代价下给出待求解问题的一个可行解，该可行解与最优解之间的偏差程度不一定事先可以预计^[46]。启发式算法并不能保证所得解的最优性，甚至在多数情况下，无法阐述所得解同最优解之间的近似程度^[47]。

启发式算法的计算量一般都是很大的，所以启发式算法是伴随着计算机技术的发展而发展的。二十世纪六七十年代以来，启发式算法成为解决组合优化问题，尤其是 NP 完全问题的有效方法。随着对启发式算法研究的深入，启发式算法也经历了从简单到复杂，从单一到混合的发展阶段。启发式算法可以分为传统启发式

算法、元启发式算法和混合启发式算法^[48]。

一般将构造性算法和改进性算法称为传统启发式算法。构造性算法是从空解开始,迭代地将解添加到解集合中,直到生产完整的解。这类算法是一些简单的启发式策略,生成的解质量较差,一般用于构造其他优化算法的初始解。改进性算法是不断地用当前解的领域解中的更优解来取代当前解,从而改进解的质量,但这类算法常常导致搜索过程陷入局部最优。

元启发式算法又被称作现代启发算法或智能优化算法,它是一种通用的启发式策略,用来指导传统的启发式算法朝着可能含有高质量解的搜索空间进行搜索,具有鲁棒性强、通用性强等特点。元启发式算法通过对自然现象的模拟和生物智能的学习,提出一类新的求解和搜索问题解的方法,能够弥补传统启发式算法的缺陷。Osman 和 Voss 等人[49]指出,元启发式算法是一个迭代过程,它通过将探索和利用搜索空间的这些不同的概念有机的结合起来,从而指导附属的启发式搜索,并利用学习策略来组织信息,以便能够有效的找到高质量的近似最优解。每一次迭代过程中,它可能操纵一个完整的单一解或一组解,启发式方法可以是高层次的过程,也可以是一个简单的局部搜索,或者只是一种简单的构造方法。

混合启发式算法是不同元启发式算法之间的融合、元启发式算法与传统启发式算法的结合以及元启发式算法与人工智能和运筹技术的结合。混合启发式算法在处理现实世界中超大规模的问题时表现出了更好的有效性和高效性,能够弥补单一元启发式算法的不足之处。混合启发式算法的研究属于前沿学科,还没有比较完整的理论来作为指导。因此,高效的混合启发式算法研究将成为该领域的一个热点,是现代优化技术领域的一个发展趋势。

2.3.2 人工神经网络算法

人工神经网络(Artificial Neural Network 简称 ANN)是在对人类大脑的神经系统认知的基础上构造的能够实现某些功能的神经网络,是模仿人的神经元系统而构造的智能化数据处理。神经网络依靠系统的复杂性,通过调整网络内部的大量节点之间的相互连接关系,从而达到分布式并行处理信息的目的。人工神经网络的研究,最早可以追溯到1943年心理学家 W.S.McCulloch 和数理逻辑学家 W.Pitts

建立了神经网络的数学模型,称为 MP 模型^[50]。他们通过 MP 模型提出了神经元的形式化数学描述和网络结构方法,证明了单个神经元能执行逻辑功能,从而开创了人工神经网络研究的时代。60 年代人工神经网络得到了进一步的发展,更加完善的神经网络模型被研究者们提出,包括感知器和自适应线性元件等。1982 年,美国加州工学院物理学家 J.J.Hopfield 提出了 Hopfield 神经网络模型,引入了“计算能量”概念,给出了网络稳定性判断^[51]。1984 年,他又提出了连续时间 Hopfield 神经网络模型,为神经计算机的研究做了开拓性的工作,开创了神经网络用于联想记忆和优化计算的新途径,有力地推动了神经网络的研究,1985 年,又有学者提出了波耳兹曼模型,在学习中采用统计热力学模拟退火技术,保证整个系统趋于全局稳定点。1986 年进行认知微观结构地研究,提出了并行分布处理的理论^[52]。人工神经网络虽然还比不上生物神经网络那样复杂,但是汲取了生物神经网络的优点,具有一些固有特性^[53]。

人工神经具有分布存储和容错的能力,信息并不是存储在同一个地方的,而是按照信息的内容分布在整个网络中,每个神经元可能存储多种信息的部分内容。在神经网络中,采用“联想”的方法获得存储的知识,也就是当一个神经网络输入一个激励的信息时,在已经存在的网络信息中寻找与其最匹配的存储知识作为其解输出。其容错能力表现在当有部分信息不全时,即数据不全、丢失或者甚至有错的信息,它仍能够恢复出原来正确的完整信息,系统仍能正常运行下去。

人工神经网络具有大规模并行处理的能力,在结构上神经网络就表现为并行的,网络中的各个单元可以同时进行类似的处理过程,因此,神经网络中信息的处理是在大量单元中平行而又有层次的进行的,具有很高的运算速度。

人工神经网络的自学习、自适应和自组织的能力。神经网络是一种变结构的系统,这种结构决定了它能够对周围环境的适应和对外界事物的学习能力。神经元之间的连接方式多种多样,连接强度具有很强的可塑性,相当于突触传递信息能力的变化。因此,神经网络通过学习和训练进行自组织以适应不同的信息处理要求。

神经网络是大量神经元的集体行为而不是各个单元行为的简单相加,表现出

复杂非线性的动态特性。对于一些环境信息复杂多变、知识背景不明朗和推理规则不明确的问题,用神经网络处理能够收到很不错的效果。通过神经网络的学习,能够从典型事例中学会处理具体事例,从而给出较满意的解答。

2.3.3 禁忌搜索算法

禁忌搜索算法也叫做 Tabu 搜索算法(简称 TS 算法),是一种亚启发式随机搜索算法,它从一个初始的可行解出发,选择一组特定的搜索方向进行试探,选取那些让目标函数值变化最多的方向进行移动^[54]。它是一种全局性领域搜索算法,能够模拟人类的记忆能力进行寻优,通过局部的领域搜索机制和相应的禁忌法则来避免迂回搜索,并且通过破禁水平来释放一些被禁忌的优良状态,进而保证了多样化的有效搜索,最终实现了全局优化。在多种广泛的应用中,禁忌搜索算法已经被证明是可以非常有效的解决一些计算复杂度非常高的优化类问题^[55-56]。

禁忌搜索算法的基本思想是,首先确定一个初始的可行解,初始解的确定可以利用其它的一些启发式算法。当初始解确定以后就可以定义可行解的领域移动集,然后从领域移动中挑选出一个可以改进当前解的移动,然后继续从新的解开始搜索。如果这个搜索过程中,只接受比当前解更好的解,那么搜索就有可能陷入循环的危险。因此,必须采用一些方法来控制避免陷入循环之中。构造短期循环记忆表-禁忌表,就可以避免陷入循环和局部最优的问题。禁忌表中存放刚刚进行过的领域移动,这些移动被称为禁忌移动,在之后的若干次循环中是禁止的,以免回到原先的解,这些循环完了以后就可以释放这些禁忌移动。禁忌表实际上是一个循环表,在整个搜索过程中被循环的修改,使得禁忌表始终保持着领域的移动。最后还必须设定一个停止准则以免陷入死循环中,当迭代内所发现的最好解无法改进或者无法离开它时,则算法停止^[57]。

禁忌搜索算法是由多种策略组成的混合式启发式算法,每种策略都是一种启发过程,对整个禁忌搜索过程起着关键的作用。禁忌搜索的策略包括邻域移动、禁忌表、选择策略、破禁策略、停止规则、长期表和频率等。邻域移动是从一个解产生另一个解的路径,是保证产生好的解和搜索速度的最重要因素之一;禁忌表的主要目的是阻止搜索过程中出现循环和避免陷入局部最优,是禁忌搜索算法

的核心，其表的大小在很大程度上影响着搜索速度和解的质量，禁忌表的另一个作用是通过调整禁忌表的大小使搜索发散或收敛；选择策略即优化规则，是对当前邻域移动的选择一个移动而采用的规则；破禁策略是指一个渴望水平的函数选择，当一个禁忌移动能够把搜索带到一个从未搜索过的区域，就应该接受该移动即破禁而不受禁忌表的限制；停止规则主要是定义搜索停止的条件；长期表能够把算法搜索带到能够改进解的区域，保持局部的强化和全局多样化之间的平衡，在加强与好解有关性质的同时还能够把搜索带到未搜索过的区域；在长期的记忆中，频率起着非常重要的作用，使用频率的目的就是通过了解同样的选择在过去做了多少次来重新指导局部选择^[58]。

2.3.4 模拟退火算法

模拟退火算法(Simulated Annealling 简称 SA 算法)是源于模拟固体退火原理演变而来的，将固体加温到一定的温度，再让其逐渐冷却，在加温的过程中，固体的内部粒子随着温度的升高变得无序，当冷却时内部粒子将逐渐趋向于有序稳定，在每一个温度点都能够达到一个平衡态。1953 年 Metropolis 等提出了模拟退火的思想^[59]，而 Kirkpatrick 等人在 1983 年将该算法成功的应用于组合优化，并取得了很好的效果^[60]。模拟退火算法在温度下降的过程中，结合 Metropolis 准则的概率在局部最优解附近概率性的跳出并最终趋于全局最优^[61]。

模拟退火算法是基于物理退火过程和组合优化过程的相似性，严格按照着 Monte Carlo 迭代思想的一种随机寻优优化算法。模拟退火算法的基本步骤是从一个较高的初始温度开始，利用 Metropolis 准则在解空间中进行概率性突跳抽样从而进行随机搜索，随着温度的不断下降，对解空间进行重复抽样，最终将目标函数收敛于全局最小值^[59]。模拟退火算法主要是由两部分组成即 Metropolis 准则和退火程序，前者判断是否以一定的概率接受较差的解，使得最终的解有可能达到全局最优解，后者是帮助降温以达到退火效果。算法的基本流程描述如下^[62]

Step1:定义模型中所有参数的取值范围，并确定一个随机初始模型，并计算其目标函数值；

Step2: 对于当前的模型按照定义规则进行扰动生成新的模型，计算新模型的

目标函数值;

Step3: 若新模型的目标函数值优于原来的函数值, 则接受新模型; 若新模型的函数值劣于原来的值就以某一个概率接受新的模型;

Step4: 在某一个温度下, 重复一定次数的扰动和选择性接受过程;

Step5: 利用退火程序逐渐来降低温度;

Step6: 重复步骤 2~5, 直到收敛条件满足为止。

从模拟退火算法的基本流程来看, 初始温度的选择、新模型的产生函数、接受函数、退火程序、抽样稳定准则以及模拟退火接受准则等因素将会影响算法的优化结果^[63]。模拟退火算法具有质量高、降温速率较慢、终止温度较低以及在每一个温度水平上都有很多的抽样特性, 这导致模拟退火算法的优化过程较长, 这是该算法的最大缺点^[64]。

2.3.5 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithms, 简称 GA)是比较成熟的智能化优化算法, 用于求解启发式问题。20 世纪 60 年代末到 70 年代初期, 由 Holland 教授以及其同事、学生进行的研究形成一个比较完整的理论体系, 主要是从生物自然界的复杂适应性开始, 试图去解释这种现象, 模拟自然进化的机制来构造人工模型, 运用于实际问题的求解。经过将近 20 多年的发展, 遗传算法领域的研究也取得了丰硕的成果, 尤其是计算机人工智能和人工生命科学的兴起更是使得遗传算法得到了广泛的关注。

遗传算法主要思想是从问题的可能潜在解集的种群开始, 通过编码操作将实际问题转换成遗传算法问题域, 而种群则是由经过基因编码的一定数量染色体组成。初始种群的产生一般是随机的, 初始解产生后根据生物自然的优胜劣汰、适者生存的原理, 逐渐进化产生越来越好的近似解。在这个进化过程中根据每一个个体的适应度大小来挑选个体, 并借助于遗传算子进行选择、交叉和变异, 产生出新的解集种群。随着进化过程的演进产生的后代种群将比前一代更加适应环境(表现为适应度值的变化), 最终产生近似最优个体, 经过解码得到实际问题的近似最优解。本文的模型求解将运用遗传算法, 所以将在下一个小节对遗传算法做

更进一步的详细说明。

2.3.6 算法适用性分析

在求解启发式问题的过程中,由于传统的求解方法在多项式时间内无法得到问题的最优解,随着问题规模的扩大,其求解复杂度也呈指数增长。解决这一类问题必须借助于启发式算法,本文列举了四种启发式优化算法,人工神经网络算法、禁忌搜索算法、模拟退火算法和遗传算法,比较分析各个算法对不同问题的适用性,并阐述选择遗传算法的原因。

人工神经网络算法是通过模拟人脑神经系统的结构和机制建立起一种计算模型,利用大量简单的神经元组成网络,实现大规模的并行计算^[82]。其非线性拟合能力很强,可以映射到任意复杂的非线性问题,并且学习规则简单,有很好的灵活性,在计算机实现方面也很便捷。但是缺陷也是很明显,对于整个推理的过程和推理规则无法做出解释,太过依赖于外部条件,当数据不充分存在不确定性时,神经网络将无法工作。同时它将所有的问题都进行数字化,推理的过程就是数值计算,因此其最终得到的结果必然会导致信息的丢失。

禁忌搜索算法实际上是局部搜索算法的扩展,通过禁止重复前面的工作进行搜索。在搜索过程中对已得到的局部最优解进行标记,并在异步迭代中避开这些局部最优解,从而跳出局部最优解^[82]。但是禁忌搜索算法太过于依赖初始解,一个好的初始解可以在解空间中搜索到更好的解,而一个差的初始解将会降低禁忌搜索的收敛速度,得到解的质量也相对较低^[83]。

模拟退火算法是一种新的智能优化算法,在各个领域已经得到了广泛的应用。模拟退火算法在某一初始温度下,随着温度的下降,利用概率突跳的特性在解空间中随机寻找最优解,能够在局部最优解中以某一概率跳出趋向于全局最优^[84]。模拟退火算法只有在满足收敛条件时才能够保证以概率 1 收敛到全局最优解,然而在实际的应用中却无法实现,同时算法状态的产生和接受操作也仅保留一个解,缺少历史搜索信息,并行性较差。因此模拟退火算法的参数选择是一个难题,只有通过一些启发式准则或者大量的实验数据得到^[84]。

遗传算法是进化类算法中发展最成熟、应用范围最广的优化算法。遗传算法

比经典的启发式算法更好,同时比传统的优化算法具有更强的鲁棒性和灵活性,它不仅能够解决某一个特定的问题,也可以适应不同的问题形式。遗传算法并不是直接对问题本身进行操作,而是以问题参数的编码作为操作对象,利用染色体和基因的概念,求解一些无数值概念的优化问题^[85]。求解的过程并不需要太多外部的信息,直接是用由目标函数转变而来的适应度函数就能确定进一步搜索的方向;具有天生的并行性,能够同时在多个点进行信息搜索^[83]。

2.4 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithms, 简称 GA),是一种基于达尔文的自然进化理论和孟德尔的遗传变异理论等生物机制的全局随机搜索优化技术,最早是由美国密西根大学的教授 Holland 在 1975 年提出的^[65]。它直接对结构对象进行操作,不受搜索空间限制性的约束,也不需要其他的辅助信息,其初始解是一群候选解,而不是单一的初始解;具有内在的隐并行性和更好的全局寻优能力,运用概率化的寻优方法,能够自动获取和指导优化搜索的空间,自适应的调整搜索的方向,并不需要给定的搜索规则。遗传算法在形式上与其他的启发式算法一样,也是一种迭代的方法^[66]。它采用种群搜索的方法,通过对当代种群进行自然选择和优胜劣汰,在继承原有的优秀特性的基础上,生成具有更好性能指标的下一代种群。这种搜索方法并不是简单的随机搜索方法,而是通过对染色体的评价和对染色体中基因信息的分析,利用这些已有的信息来知道搜索,逐渐使得种群进化到包含或者接近最优解的状态^[67-68]。

遗传算法产生以来越来越受到人们的关注,这是由于遗传算法在解决人工智能领域、组合优化问题、信号处理、自适应处理和人工生命、大规模数据处理等领域各方面一系列复杂难问题时所表现出来的独特性,作为一种随机搜索算法,相对于其他算法具有自身的显著特色,其中算法演化的并行性、对全局优化问题的有效性和实用性,以及对问题求解的稳健性是其他算法无法比拟的^[69-70]。

2.4.1 遗传算法的基本原理

遗传算法与自然界的进化和遗传有很大的相似性,自然界的进化是通过染色

体上的基因信息进行作用的,以此来寻找到更加适应于自然环境的优质染色体,使得后代的适应能力更强^[71]。遗传算法并不需要对求解的具体问题进行认知,它只是需要对算法产生的染色体进行分析,依据设计好的适应度函数进行评价,选择使得适应度值较优的染色体进行遗传操作^[72]。这样就使得优质的基因向下传导了,产生的后代就具有了更好的性能。在遗传算法中,问题的初始解一般是通过随机的方式产生的,这些染色体,即一串的数字编码,形成初始的种群;然后利用适应度函数为每一个个体算出适应度值,将适应度值低的个体淘汰,保留适应度值高的个体,让其参加遗传操作;经过遗传操作的个体集合将形成新一代的种群,再利用这个新的种群进行下一轮的进化^[73]。

2.4.2 遗传算法的结构

遗传算法的基本机构主要包括四个部分:问题的编码与译码、适应度函数的设计、遗传操作和参数的控制。Holland 教授提出的遗传算法通常被人们称为简单遗传算法(简称为 SGA)^[65],可以说这是所有其他改进遗传算法的基础。因此我们对算法的基本结构的讨论也就是在 SGA 的基础上进行的。

(1) 编码与译码

编码方式是遗传算法首要解决的第一个问题,也是很重要的一步。编码就是把一个问题的可行解从其解空间转换到遗传算法所能够处理的一个搜索空间的转换方法,译码恰好相反,就是由遗传算法的解空间向具体实际问题的解空间转换。遗传算法的编码方式有很多种,这些不同的编码方式对于不同的问题具有特定的适用范围^[74]。最早的编码方式主要是用二进制进行编码的,与生物染色体的结构类似的,个体中的每一个编码位就代表一个基因位,即 0 或 1。之后为了便于说明问题解的代表意义,出现了整数编码和浮点数编码,即个体中的每一个基因位取一定范围内的整数或者是浮点数。采用实数进行编码能够提高算法的求解效率和解的质量,尤其是在一些变量较多的情况下。还有一种编码方式是混合编码,混合了二进制编码和实数的编码。在实际问题的求解过程中,决策变量往往是多种多样的,可能有表示状态的变量,适合于用二进制编码,但是又存在实数变量,若是用二进制编码,会增加个体实数变量的长度,影响到遗传算法的求解效率。

因此,在这种情况下,利用混合编码方式是一种最好的选择^[75]。

(2) 适应度函数

为了衡量群体中每个个体的适应能力大小,引进一个能够对问题中所有的个体染色体进行度量的函数,就叫做适应度函数。用遗传算法来求解问题时,主要是通过适应度函数值的大小来区别每一个体的优劣程度。适应度值大的个体将会有更大的机会进行繁殖,适应度值低的个体将会被淘汰。一般来说,取高于群体平均适应度值的个体来进行交叉操作,而用低于平均适应度值的个体来进行变异操作,这样一代代的提高群体的平均适应度值和最优个体的性能。由此可见适应度函数在遗传算法中起到了一个决定性的作用^[76]。遗传算法在进化搜索过程中基本不利用外部信息,仅仅只是凭借着适应度函数值,利用种群每个个体的适应度来进行搜索。因此适应度函数的设计将直接影响到遗传算法的收敛速度^[77]。适应度函数的设计应该尽量简单,这就使得计算的复杂度变小。遗传算法对群体中个体的评价主要取决于其适应度值的大小,与它的解的结构没有什么关系,这正体现了遗传算法优胜劣汰的特点。

适应度函数是驱动遗传算法的动力,从生物学的角度来看,适应度相当于生物的生存能力,在遗传过程中具有重要的意义。适应度函数与求解的问题的目标函数具有一定的关系。多数情况下,我们直接就将目标函数作为适应度函数。但是这并不是说目标函数就是适应度函数,它们之间存在着一种映射的关系。将所求解问题的目标函数与个体的适应度函数建立映射关系,即可在群体进化过程中实现对问题目标函数的优化。

(3) 遗传操作

遗传操作就是模拟生物基因遗传,在遗传算法中,通过对问题解空间的编码形成了遗传算法解空间的初始种群,遗传操作的任务就是按照种群中每个个体的适应度函数值对其进行操作,从而实现优胜劣汰的进化过程。遗传操作可以使得问题的解一步一步的逼近最优解。种群中个体的遗传算子操作都是在随机扰动的前提下进行的,因此个体向最优解进化的规则也是随机的。但是这种随机操作并不是传统意义上的随机搜索方法,它们两者之间是有区别的,遗传操作进行的是

高效且有向的搜索而不是像一般随机搜索方法所进行的无方向搜索。遗传操作主要包括三个基本的遗传算子：选择算子、交叉算子和变异算子。遗传算子构成了遗传算法的核心，使得遗传算法具有着强大的搜索能力，其中交叉算子是遗传算法中最主要的遗传操作。

① 选择算子 从生物进化角度来看，选择的实质就是个体染色体基因的复制，它是生物能够保持性状而达到物种稳定的最主要的原因。在遗传算法中，选择算子就相当于一个筛子，对种群中的个体依据适应度值进行筛选。将高适应度值的个体选中，使得其基因得以遗传到下一代中去，而低适应度值的个体将被淘汰。选择算子的功能是定向进化，经过选择算子多次的定向积累，种群中的个体就会迅速的接近使得目标函数值高的区域，形成高质量的种群。

② 交叉算子 生物进化过程中，两个同源染色体通过重组交叉，产生了新的染色体，由于新的基因出现，从而形成了新的个体或物种。这种生物繁殖的过程在遗传算法中的模拟就是交叉算子，交叉操作是遗传算法中最主要的遗传操作。交叉算子可以看成是母体空间到个体空间的随机映射，它的作用方式是，随机的确定一个或多个分量位置作为交叉点，将一对母体的两个个体分为若干个片段，再以某一个杂交概率交换相应的片段得到新的个体。根据杂交点的多少，杂交算子可以分为单点杂交、两点杂交、多点杂交和均匀杂交等。

③ 变异算子 遗传算法在选择算子和交叉算子的作用下已经可以达到种群进化的作用，但是在遗传过程中，可能会丢失一些重要的遗传基因或者是找到一些新的基因。因此仅仅只是靠这两种遗传操作所获得的解可能还只是局部最优解，缺乏全局搜索的能力，引进变异算子就可以解决这个局限性。变异算子按照变异概率随机对染色体中的基因进行突变来实现，变异概率一般都是很小的，这样以便保持种群发展的稳定性。变异算子可以看成是个体空间到个体空间的随机映射，常见的变异算子包括位点变异、插入变异、对换变异、边界变异、非均匀变异和高斯变异等形式。

(4) 参数控制

在遗传算法中，参数的设计对算法的搜索性能有着重大的影响，参数在初始

阶段若是能够合理设计和有效的控制,就使得算法发挥最佳的的作用,在随机搜索过程中能够迅速的逼近最优解。这些参数主要有种群规模、交叉概率、变异概率和终止条件的控制。在标准的遗传算法中,这些参数是固定不变的。但是随着研究的进一步深入,发现这些参数可以随着遗传算法的进化过程而相应地发生变化,这种自适应的遗传算法具有更高的鲁棒性和全局最优性。在实际的操作中,参数的设定与问题的类型是密切相关的,问题的目标函数越复杂,参数的选择也就越困难。从理论上来说,有效参数的差异性会随着问题特征的变化而表现出很大的差异性。因此,我们不可能找到一组适用于所有问题的最佳参数,遗传算法控制参数的设定必须与具体的问题相结合^[78]。

2.4.3 遗传算法的基本流程框架

标准的遗传算法(SGA)的基本流程为

第一步:参数的初始化,采用某一种的编码方式对所求解的问题空间域进行编码,完成染色体串到问题解空间的一一映射;

第二步:采用某一种方式(可以是随机的方式)产生一组初始的种群;

第三步:计算种群中的每一个个体的适应度函数值;

第四步:依据某种规则从初始种群中选择某一个子群作为产生后代的母体进行交叉操作,再用变异算子作用于子代产生新的子代;

第五步:用选择算子从子代中选出下一代种群;

第六步:如果终止条件成立,则停止;否则就转到第三步;

遗传算法的基本流程框架如图 2.2 所示。

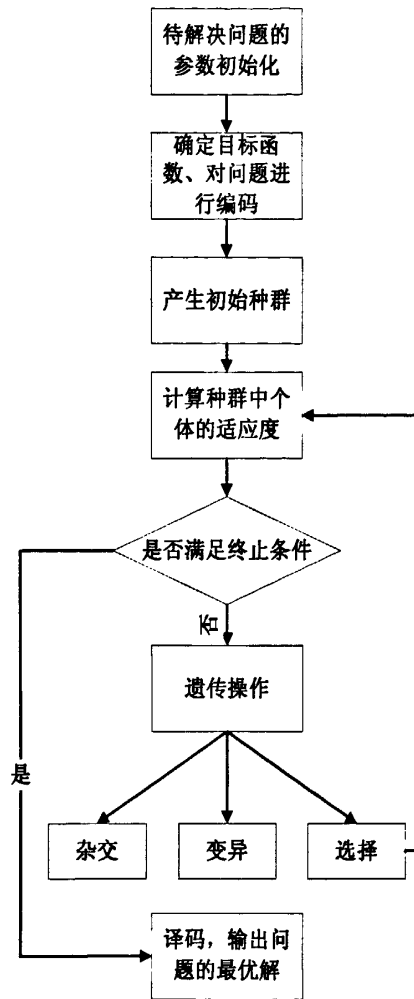


图 2.2 遗传算法的基本流程图

Fig. 2.2 Flow chart of Genetic Algorithm

2.4.4 遗传算法的特点

遗传算法是进化类算法中产生最早、影响最大、运用得最广泛的算法，它几乎囊括了进化类算法的所有的优点。它与传统的优化类算法相比具有许多的不同之处，其中最主要的特点体现在以下几个方面。

(1) 遗传算法的初始解是从一群，搜索过程是从一个集合中开始的，而不是像传统的优化方法那样从单一点开始搜索，因此遗传算法的搜索过程能够有效的跳出局部解集区域的限制，去寻找全局的最优解。

(2) 遗传算法并不需要借助外部的信息来进化操作，只需要计算个体的适应

度函数值。

(3) 遗传算法具有显著的隐并行性，虽然在每一代中只是针对有限的个体进行遗传操作，但是处理的信息量却是种群规模的高次方。

(4) 遗传算法具有很强的鲁棒性，这是其他算法所不具备的。即使在很大的噪点环境下，遗传算法对于同一个问题的多次求解得到的结果也是相似的，这样保证了解的稳定性，不会随着周围环境的变化而出现太大的波动。

(5) 遗传算法非常容易与其他的一些智能算法相结合，适用于一些超大规模并行计算的领域，可以有效的解决一些较复杂的优化问题，还具有很强的通用性。

第3章 基于遗传算法的堆场作业调度模型研究

3.1 集装箱堆场作业调度概况

集装箱堆场是连接海上运输和陆地运输的集装箱集散中转站,是港口码头各种资源和作业活动交汇的地方,同时也是港口码头的作业前沿,承担着集装箱的交接、存储、货物运输等主要业务,是集装箱运输过程中一个不可或缺的重要组成部分。

3.1.1 集装箱堆场概况

港口码头内所有堆存集装箱的场地构成堆场,堆场上用黄线或者白线画成的长方形的格子称为场位,并标有相应的编号以便唯一确定。集装箱必须存放在场位范围内,根据场位的最大高度层叠堆放集装箱。由于一些集装箱的特殊要求需要设置专用的集装箱场位,例如冷藏箱场位需要配备电源插座设施。根据堆场作业的类型不同,堆场可以划分为不同的作业箱区,尽管每个港口对堆场的具体划分不同,但是大体上都可以分为以下这些区,包括重箱堆存区、空箱堆存区、拆箱和装箱区、制冷区、残箱区、修理区等。

集装箱堆场的管理主要包括出口箱的集港和进口箱的疏港,堆场管理的效率高低决定了这些集装箱在港口码头内的停留时间,应该尽量提高堆场的作业效率,使得集装箱在港口内停留的时间最少,以腾出更多的空间接收新的集装箱,同时也降低了成本。

集装箱港口码头的主要业务是为船舶停靠提供泊位,对集装箱进行装卸作业,为集装箱运输提供服务,完成集装箱货物位置的空间位移。为了对集装箱进行有效的空间位移,需要动用港口内的一些资源,包括人力、机械、场地空间等。堆场在整个码头生产过程中都起着重要的作用,集装箱的装卸、集港、疏港都需要用到堆场资源。集装箱卸船业务是利用岸桥将集装箱从船舶上卸载下来放置在场内拖车上,运送到指定的堆场暂时堆放。装船是将已经堆放在堆场内准备出口的集装箱用场桥搬运到拖车上,再由拖车运送到码头前沿,用岸桥吊装到船舶指定的舱位。集港是为了装船做好提前准备的业务,在船舶还没有到港的时候,就要

求货主将货物运送到港口，并通过检查桥进行通关检查，然后按照分配好的堆场场位进行堆放，等待装船。疏港也叫做提箱业务，是指集装箱从船舶上卸载下来以后，货主办理完各项手续以后，将集装箱提走。港口的业务流程如图 3.1 所示。

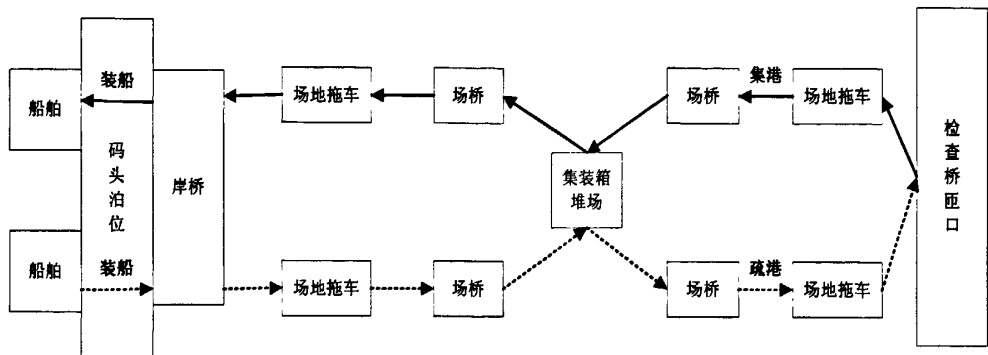


图 3.1 港口的业务流程

Fig. 3.1 Business flow diagram of container port

3.1.2 集装箱堆场的功能

集装箱堆场在港口码头上起着缓冲的作用，是对装卸船舶提供临时堆存集装箱的场所，也是保管集装箱、同货主交接集装箱的地方，用以暂时的将集装箱集中地堆放，以利于港口其他各项作业的顺利进行。它的主要功能包括^[79]：

(1) 集装箱堆存功能。集装箱从新箱出厂到旧箱彻底报废的整个生命周期过程，都涉及到集装箱的堆存，堆存的需求也同样也伴随着整个运营过程。轮船公司在其经营活动中，从船舶运输到将集装箱交给货主前都需要堆场作为过渡环节，因此无论是空箱还是重箱都需要在堆场进行堆存。船公司都需要在其经营的航线上的各大港口口岸储备大量的空箱，以满足货运的需求，集装箱堆场就成为一个集装箱的存储站。

集装箱公共堆场可能同时存放若干家经营人的集装箱，又由于每个公司对堆场提供的堆存服务的具体要求不完全一致，再加上集装箱种类多种多样、状态也会经常发生变化(如重箱拆箱后成为空箱、空箱装箱后成为重箱、坏箱修复后成为好箱等)，这些都要求集装箱堆场要有较高的管理水平，要有一套较为完善的集装箱管理体系。

(2) 集装箱货运功能。集装箱货物的装箱和拆箱工作需要在集装箱货运站完成,有时还要涉及到拼箱,就是将不同货主的货物拼凑到一起用同一个集装箱装运,这些工作都需要在货运站中进行。一般来说集装箱货运公司都有许多较大的仓库和堆场,货运公司接收货主发来的货物,将等待出口的货物集中起来,根据一定的规范进行积载配货,装入集装箱中,最后将集装箱运送到码头堆场等到装船。由于这些货运公司都有相当规模集装箱堆场,因此来说,集装箱的货运业务也是集装箱堆场的综合功能之一。

(3) 集装箱交接功能。集装箱的交接在集装箱的运输过程中也是非常重要的一个环节,若交接环节出现问题可能会影响到集装箱的正常运输业务。在集装箱出口时,船公司应向货主提供适载和适货的集装箱,即通常所说的完好的集装箱;托运人或其代理人在船公司堆场提取空箱时,应该对集装箱进行检查,并在相应的《设备交接单》上与堆场经营人一起签字确认;堆场的集装箱交接功能也因此伴随着其业务的开展而产生。

(4) 集装箱检查和修理功能。集装箱的使用寿命一般在 10 年左右。在这段时间之内,无论是由于集装箱的自然消耗和损坏,还是人为损坏,除了失去修理价值,在集装箱投入正常的营运之前,这些损坏的箱子,都必须修理;一般集装箱的检验和修理都要在陆上堆场完成。

3.1.3 集装箱堆场的作业流程

集装箱堆场的作业流程比较复杂,涉及到众多的人员、机械设备以及其他的港口资源,需要进行合理的安排和调度。港口工作人员的素质、设备设施的性能、港口硬件软件设施以及信息化的程度都对该流程的运行效率有着重要的影响作用。集装箱堆场的业务流程大体上可以分为两部分,即堆场外部的业务活动和堆场内部的作业,下面将详细介绍这两个部分的业务流程。

堆场外部的作业主要包括船舶公司向港口码头发送船舶的信息以及航班动态,在集装箱船舶到达港口之前,船舶公司需要将船舶的一些基本信息通过 EDI 发送给港口码头,这些信息包括船舱位置布局结构图、舱单信息、船舶集装箱积载图、船舶航行日期以及航线等。港口码头根据船公司传过来的船舶预计到达日

期安排好船舶的停靠泊位和码头的作业计划安排,根据船舱位置布局结构图、舱单信息和船舶积载图安排卸船计划和集装箱的堆存计划。船舶停靠到泊位以后,需要进行现场作业,安排岸桥、场桥、集卡、拖车以及相应的人力进行卸船作业,按照之前制定好的卸船计划和集装箱堆存计划进行操作,由码头理货员和港口作业指挥员进行监督管理。卸船完成以后,港口根据货主的预约取货时间和方式,安排提箱计划和提货计划^[80]。

堆场内部的作业流程是一个十分复杂的过程,主要涉及到国际集装箱的进出口,大体上可以分为三个阶段,进场阶段、验货阶段和提箱阶段。进场阶段主要是安排集装箱进入堆场,业务员根据货主的委托单制作申请表,需要经过报批、审核、报关计划、车队调度、安排场地等环节;进场卡口的业务员对进场的车队进行信息的核对,主要是检查集装箱的外表铅封,确认无误以后,将车号和箱号录入进系统;正面吊叉车司机接到中控系统传过来的信息,核对车号和箱号进行卸箱操作,安排箱位落箱后进行手持确认,同时在中控大厅可以看到实时监控信息。验货阶段主要涉及到是商检验货和海关验货,集装箱进场以后根据货主的委托信息安排验货区,将箱位信息发给正面吊司机,根据要求验货的箱位和排号进行摆箱;海关验货需要提取需要海关检验的集装箱号,并将箱号信息发送给正面吊司机,进行摆箱;摆箱完毕以后,报检员和检疫员到具体的箱位上进行验货,生成商检验货记录和海关验货记录,堆场现场调度员再与报关员和海关进行报检。提箱阶段主要是客户根据检验的结果办理提箱的一系列手续,手续办理完成后进场提走货物^[80]。

3.2 堆场作业调度模型建立

3.2.1 问题的描述

集装箱船舶运输成为当前国际货运的主要形式,因此如何有效的提高运输效率,降低生产成本就成为货主最关注的一个问题。船舶的运输时间主要包括海上航运时间和在港停靠时间,随着日益增长的集装箱吞吐量,为了最大限度的满足货运的需求,船舶的发展也开始走向超大型化和高速化的趋势。船舶的大型化发

展必然导致集装箱装载量的变大,在港停靠时间也将延长,占整个运输时间的比重也提高。船舶的这种发展趋势对于集装箱码头的作业效率提出了更高的要求,全面提升码头的作业效率,缩短船舶在港停靠时间成为当前亟待解决的问题。而集装箱码头的堆场系统的效率对于整个码头作业效率的提升具有重要的影响作用,本文将以堆场系统作为研究对象,重点研究堆场场桥机械设备的分配情况,尽可能的提高堆场的作业效率,最大化港口集装箱的吞吐量。

场桥对集装箱进行作业的时间主要包括两个部分对集装箱的装卸时间和对集装箱的定位时间即从一个作业贝跨到另一个作业贝,或者是在不同的箱区之间进行移动。由于场桥对每一个集装箱的操作可以看成是一样的,所以场桥的作业时间主要是取决于场桥的空转时间,制定合理的作业顺序,减少场桥的空转时间是提高堆场作业效率非常重要的一个因素。堆场的作业顺序问题就是一个安排调度问题,是在满足一定的约束条件下将所有待作业的集装箱合理的分配给场桥,并确定场桥对每一个集装箱的作业顺序,减少空转时间,使堆场的吞吐量最大化。该问题是典型的组合优化问题,是从一个离散的集合中寻求最优解的问题,其求解过程具有相当的复杂性,求解难度随着问题规模成指数增长,已被证明是一种 NP-hard 难题。随着国际贸易的快速增长和船舶超大型化发展的趋势,集装箱的吞吐量也越来越大,因此集装箱堆场场桥装卸作业顺序问题的求解也是越来越复杂 [44]。

通过对集装箱堆场业务的深入调查和对作业调度理论的研究,集装箱堆场作业顺序安排问题与作业车间调度问题具有一定的相似性,本文在第二章已经对作业车间调度问题(Job-shop)进行了阐述。堆场集装箱作业顺序安排问题中的每一个贝位可以看成是 Job-shop 中的一个工件,每一个贝中的具体集装箱可以看成是该工件的一道工序,而集装箱堆场中的场桥可以看成是 Job-shop 中的加工设备。尽管与 Job-shop 问题有相似的地方,但是由于港口码头的作业环境与车间作业环境的差别以及场桥物理结构的复杂性使得堆场集装箱作业要比车间作业要复杂的多。每一个集装箱可以分配给任何一个场桥,但是受限于集装箱的空间位置和场桥的位置,其分配也是有一定的限制。在 Job-shop 中加工设备之间是并行的关

系且相互之间没有制约性,但是在集装箱堆场作业过程中,轨道式场桥只能沿着轨道移动,轮胎式场桥可以跨场地作业,为了保证作业过程中的安全性,任意两个相邻间作业的场桥必须要有一定的安全距离。

集装箱港口堆场一般来说都是划分为不同的箱区,每个箱区有若干个贝位,每一个贝位上一般堆放 5-8 排、堆高最高不超过 8 层的集装箱^[81]。集装箱的堆放是按照一定的规则来堆放而不是任意堆放的,根据本文第二章中集装箱空间资源小节的描述可知,集装箱的堆放遵循 PSCW 原则,即同一目的港、相同尺寸、同一种类、同一重量的集装箱堆放在堆场的同一贝上^[43],对于同一批次的货物尽量堆放在同一箱区,便于管理。由于每次作业进行装卸的集装箱量非常大,若是以箱作为单位进行运算求解则会使得模型的求解难度加大,算法的空间复杂度和时间复杂度也会增大。本文引用了的“段”的概念^[44],来降低运算的复杂性。“段”是介于箱与贝之间的一个适中的作业单位,段位的划分还没有一个标准,主要是靠经验来操作的。一般来说将可以连续作业的集装箱归为一个作业段,段内的集装箱可以是同一目的港的箱,相同尺寸的箱等,段内的集装箱作业时间几乎可以看成是一样的。引入了段的概念后,就可以把段作为一个工件的工序,而对于同一个段内的集装箱作业就按照从上到下、从左到右的顺序进行。

3.2.2 模型的建立

(1) 模型的假设条件

由于集装箱作业问题是一个复杂的问题,涉及到许多的因素,为了使得问题简化并且突出核心部分,我们首先需要做以下的一些假设,不同的场桥、场地拖车之间的作业能力是相同的,作业效率并不会因为其他的因素的影响而发生变化。每一个场地的作业箱量是已知的,可以通过对装卸清单分时段、分场地进行统计而得到。

(2) 符号说明

$\text{Machine}=\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$: 表示堆场中所有场桥机械构成的集合,其中 m 表示分配给作业段的最大场桥数,场桥还并具有一些属性, Capacity 表示场桥的最大

作业能力, *Position* 表示场桥的位置。 P_m 代表场桥 M_m 在时段 t 时的位置, 可以用场地号 *YardNo* 和贝位号 *BayNo* 来定位。

$Time=\{T_1, T_2, \dots, T_i\}$: 表示堆场中作业的时段, 堆场的作业安排调度一般是按照一个小时为一个时段, 一天 24 个时段。

$ContainerYard=\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$: 表示堆场拥有的场地, 根据堆场的设计划分为不同的场地。

$Segment_i=\{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{ij}\}$: 表示场地 S_i 中所拥有的作业段构成的集合, 段的划分一般是在同一个场地, 尽量不要跨场地划分段, 其中 j 代表每一个场地所有段的数量。 S_{ij} 作业段拥有 *YardNo*、*BayNoStart*、*BayNoEnd*、*SegmentNo*、*ContainerNum* 等属性。其中 *YardNo* 表示作业段所在的场地; *BayNoStart*、*BayNoEnd* 分别表示段所在的开始贝号和结束贝号, 作业段是跨贝的; *SegmentNo* 表示作业段编号; *ContainerNum* 表示作业段所拥有的集装箱数量。

(3) 目标函数及约束条件

$$Max E = \frac{\sum_i \sum_j TEU_{ij}}{\sum_i \sum_j M_{ij}.Capacity} \quad (4.1)$$

约束条件方程式

$$\bigcup_{i=1}^n S_i = ContainerYard \quad (4.2)$$

$$\bigcup_{j=1}^n S_{ij} = Segment_i \quad (4.3)$$

$$M_{i}.Capacity \leq MaxTEU \quad \{M_i \mid \forall M_i \in M\} \quad (4.4)$$

$$\sum_i Craners(i, t) \leq MaxCraners \quad (4.5)$$

$$\sum_i YardCraners(i, t, y) \leq MaxPut(y) \quad (4.6)$$

$$\sum_i \sum_j S_{ij}.ContainerNum = TotalNum \quad (4.7)$$

$$\{ | Ptj.BayNo - Pti.BayNo | > 1.5bay \mid Ptj.YardNo = Pti.YardNo \wedge (i = 1, 2, \dots, m-1; j = i+1) \} \quad (4.8)$$

(4) 数学模型的解释及说明

(4.1)是目标函数表示所有场桥的实际作业量与场桥的作业能力之间的比值,即使得堆场中场桥的利用率最大;(4.2)约束了场地的集合,所有的场地并集要等于集装箱堆场所拥有的堆场;(4.3)约束了作业段的集合,某一个场地的作业段并集要等于该场地的所分配的作业段;(4.4)约束条件表示场桥机械的工作量最大不能超过其拥有的作业能力;(4.5)约束了堆场长桥机械资源的有限性,分配给所有作业段的场桥总数不能够超过其堆场所拥有的场桥数;(4.6)约束了每一个场地中的作业段所分配到的场桥总数不能够超过场地所允许摆放的最大场桥数;(4.7)约束了所有的作业段的作业箱量总和应该等于码头堆场所堆放的集装箱总数;(4.8)约束了在同一个场地上作业的场桥之间的安全距离,即场桥的场位号相同,其贝位号之差的绝对值要大于一个贝位的距离。

3.2.3 模型解集的说明

定义模型的解集:

$$X = \{ (Ti, Sjk, Mm, N) \} \quad (\forall Ti \in Time \wedge \forall Djk \in Segment \wedge \forall Mm \in Machine)$$

解集是由一系列四元组构成,其中 Ti 表示场桥作业的时段, Sjk 表示场桥的作业段, Mm 表示场桥机械, N 代表该时段分配给场桥的作业的集装箱数量。解的含义是在 Ti 时段为 Sjk 作业段分配场桥 Mm , 其作业量是 N 个集装箱。

模型的解就是通过一张二维表来表示, X 坐标轴代表场桥的作业时段, Y 坐标轴代表作业段, 在方格中填上场桥的编码, 表示在该时段为该作业段分配的场桥。以下通过一个简单的算例来进行解释说明, 假设作业时间一共有四个时段, 在这四个时段中为四个作业段分配场桥, 如何分配使得场桥的整体利用率最大。每一个作业段的任务是已知的, 每一个场桥在一个时段的作业能力也是已知的。当作业段在同一个场地时, 同一个时段为这两个作业段分配场桥还应该考虑两个场桥之间的作业距离是否在安全距离之外, 只有在安全距离之外的才可以安排, 否则就不能够给这两个段同时安排两台场桥进行作业。段的作业集合也用一个四

元组来表示 Segment(YardNo, BayNoStart,BayNoEnd, ContainerNum), 分别代表该作业段所在的场地号, 开始的贝位号, 结束的贝位号和集装箱的数量。

Segment(S11,S12,S21,S22)={(1,1,7,40),(1,9,19,80),(2,1,11,50),(2,13,23,70)}

场桥一个时段的最大作业量我们约定为 30TEU, 假设有四个时段, 若是为每一个作业段都安排一台场桥, 场桥分配如下表 3.1 所示。

表 3.1 初始场桥分配表
Tab. 3.1 Initial allocation table of yard crane

	T1	T2	T3	T4
S11 (40)	M1 (30)	M1 (10)	M1	M1
S12 (80)	M2 (30)	M2 (30)	M2 (20)	M2
S21 (50)	M3 (30)	M3 (20)	M3	M3
S22 (70)	M4 (30)	M4 (30)	M4 (10)	M4

作业段 Sij 括号里面的数字代表该作业段的集装箱数, 场桥机械括号里面的数字代表给场桥分派的作业量, 按照最大作业能力进行分派。同时应该满足所有的约束条件, 否则就重新调整资源进行指派。该指派的解集表示就是

$X=\{(T1,S11,M1,30), (T2,S11,M1,10), (T3,S11,M1,0), (T4,S11,M1,0),$
 $(T1,S12,M2,30), (T2,S12,M2,30), (T3,S12,M2,20), (T4,S12,M2,0),$
 $(T1,S21,M3,30), (T2,S21,M3,20), (T3,S21,M3,0), (T4,S21,M3,0),$
 $(T1,S22,M4,30), (T2,S22,M4,30), (T3,S22,M4,10), (T4,S22,M4,0)\}$

$$E = \frac{30+10+30+30+20+30+20+30+30+10}{30 \times 4 \times 4} = \frac{240}{480} = 50\%$$

另一种指派方案是只给四个作业段分配两台场桥, 位于同一个场地的作业段共享一台场桥。其分配方案如下表 3.2 所示。

表 3.2 场桥分配表

Tab. 3.2 Allocation table of yard crane

		T1	T2	T3	T4
S11 (40)	M1 (30)	M1 (10)			
S12 (80)			M1 (20)	M1 (30)	M1 (30)
S21 (50)	M2 (30)	M2 (20)			
S22 (70)			M2 (10)	M2 (30)	M2 (30)

解集表示为

$$X=\{(T1,S11,M1,30), (T2,S11,M1,10), (T2,S12,M1,20), (T3,S12,M1,30),$$

$$(T4,S12,M1,30), (T1,S21,M2,30), (T2,S21,M2,20), (T2,S22,M2,10),$$

$$(T3,S22,M2,30), (T4,S22,M2,30)\}$$

$$E = \frac{30+10+20+30+30+30+20+10+30+30}{30 \times 10} = \frac{240}{300} = 80\%$$

3.3 基于遗传算法的模型求解

利用遗传算法对模型进行求解主要需要解决的问题包括染色体的编码、适应度函数的设计、遗传算子的设计和参数的控制。

(1) 染色体的编码。利用遗传算法来求解模型，首先需要做的是进行编码工作。对问题的解空间进行转换，将其转换到遗传算法的解空间，通过对结果集的编码来实现。染色体的编码方式采用组合数字的方式来进行编码，不考虑每个场桥的作业量，利用六位数字来对结果集进行编码，每两位作为一个最小的编码单位，不能够分割，其中前两位表示时段，例如 T1 时段用 01 表示，中间两位表示作业段的下标，例如 S11 表示为 11，最后两位表示安排的场桥，例如安排了 M1 就表示为 01，所以根据该编码方案解(T1,S11,M1,30)就表示为(011101)。所以根据以上列举的例子可以得到初始的解集编码

$$\{(011101), (021101), (031101), (041101), (011202), (021202), (031202), (041202),$$

$$(012103), (022103), (032103), (042103), (012204), (022204), (032204), (042204)\}$$

(2) 适应度函数的设计。模型的目标是最大化堆场中场桥的利用率，是一个

最大化问题，目标函数值越大适应度也就越高。不同的解集通过适应度函数的计算，进行比较，适应度高的个体被保留下来，而那些适应度低的个体将被淘汰。本文采用目标函数作为适应度函数，要求在堆场中进行作业的所有的场桥的总利用率达到最大。

(3) 遗传算子。遗传算法最关键的是进行遗传操作，这些遗传操作包括：选择、交叉和变异。

选择算子就是采用何种策略来挑选个体，本文采用的选择算子就是将适应度值最大的两个个体直接复制进入下一代进行繁殖。

交叉算子采用单点交叉的方式，由于编码的形式是由六位数值组成，并且每两位数值作为一个最小组成成分不能够分割，所以交叉操作时也只能以最小单位进行。初始种群中是由许多的场桥分派组成的集合，交叉操作可以是种群内部以最小组成单位进行，也可以是在种群之间以每一个场桥分派为单位进行。例如在个体内部有两个场桥分派方案(011101) 和(012102)分别表示在第一个时段给作业段 S11 分配场桥 M1 和在第一个时段给作业段 S21 分配场桥 M2，随机选择交叉点位进行交换，选择第三个位置作为交叉点位，变为(011102) 和(012101)。进行交叉以后的分派方案就变为在第一时段为作业段 S11 分配场桥 M2 和在第一时段为作业段 S21 分配场桥 M1。交叉操作以后的分配方案应该满足所有的约束条件，不能出现一些例如在一个时段同一个场桥分配给不同的作业段和同一个作业段在同一个时段分配了两台场桥的情况。如果进行遗传操作后的方案不满足约束条件或者是出现了以上一些情况，则可以将改个体的适应度值设为无穷小，使之在下一轮之前被淘汰。

变异算子就是对随机选择的染色体片段的某个基因位进行变异，使之变成不同的个体，本文采用的变异算子是通过表格的操作来实现变异的。

根据表 3.2 的场桥安排方案，通过随机选择一个场桥对其当前位置进行变换，将其调整到空白处或者是与其他的场桥互换来实现变异，例如将 T1 时段给 S11 安排的场桥 M1 变换到下一个空白处，即 T1 时段给 S12 安排场桥 M1，这样就得到一个新的场桥安排方案。变异后产生的新方案必须要符合所有的约束条件，并且

不能出现冲突的情况。新的场桥安排方案见表 3.3 所示。

表 3.3 新场桥分配表
Tab. 3.3 New allocation table of yard crane

	T1	T2	T3	T4
S11		M1		
S12	M1	M1	M1	M1
S21	M2	M2		
S22		M2	M2	M2

3.4 本章小节

这一章主要是通过介绍了集装箱堆场的工艺流程，对堆场的情况做了一个细致的说明。利用数学的方法对堆场中场桥的分配问题进行了建模，建立了以场桥利用率最大化为目标函数的场桥机械分配模型。并且利用了比较成熟的启发式算法—遗传算法进行求解，由于是对多个时段多个作业任务段的场桥安排，所以解集是一组场桥安排的集合。本文提出的场桥利用率最大化的目标是考虑到通过合理的安排堆场机械使得其利用率提高，降低场桥的作业成本，同时也降低了场桥的空转时间，使得码头堆场的场桥资源得到最大化的利用，提高堆场集装箱通过能力，使得集装箱在场地的停留时间尽可能的少。同时也为集装箱的装卸提供较高的服务能力，减少船舶的在港停留时间。

一些参考文献中对堆场问题建模的目标函数是最小化作业时间最长的场桥作业时间，本文提出的模型的目标函数没有涉及到场桥的作业时间问题。由于集装箱的集港过程是一个在一段时间内的随机过程，集装箱的到达没有确定的时间，因此不能够只强调堆场机械作业时间的最小化。即使场桥的作业时间缩短了，但是集装箱却没有到达，场桥只能空转，使得场桥的利用率变得低下，不能够有效充分的利用堆场资源。所以基于以上的一些考虑本文提出目标函数为最大化场桥机械的利用率，使得场桥得到最大化的利用。

第 4 章 集装箱堆场调度模型的应用研究

4.1 集装箱堆场系统概述

集装箱堆场系统是集装箱管理系统中的一个子系统，主要对集装箱的堆场进行管理，主要功能包括制作收箱计划、场地流机安排、残箱管理、堆场查询、场内移箱、制作作业工班表、历史信息查询和堆场场地管理。堆场管理的业务流程图如图 4.1 所示。

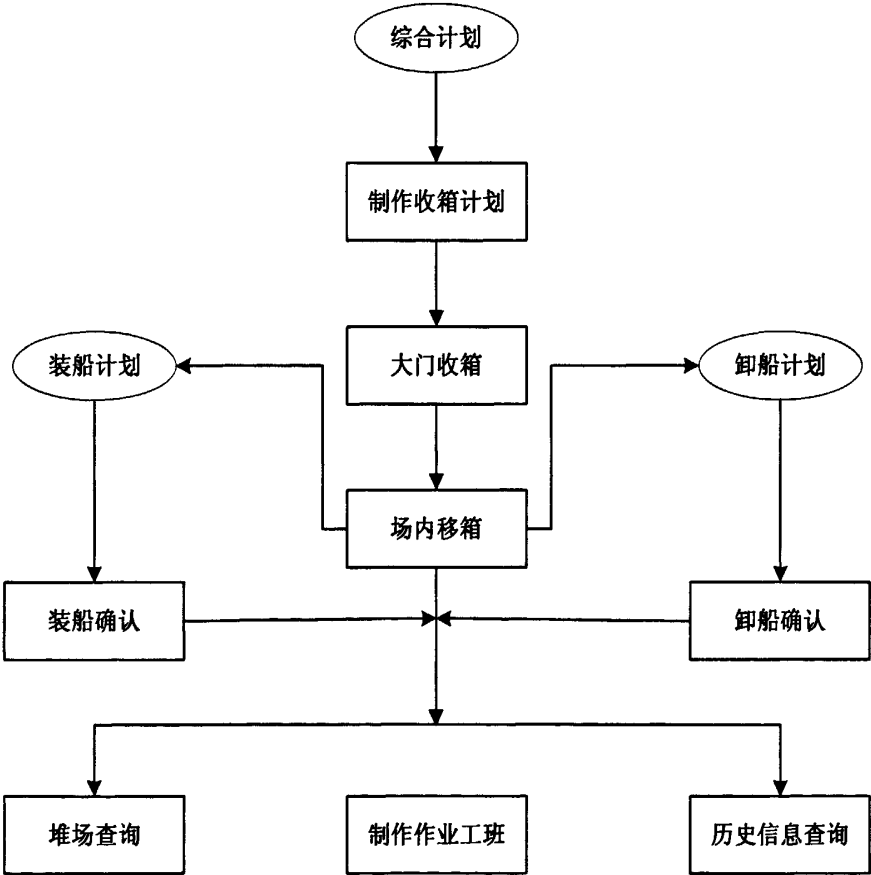


图 4.1 堆场管理业务流程图

Fig. 4.1 Business flow chart of container yard management

其总体的功能结构图如图 4.2 所示。

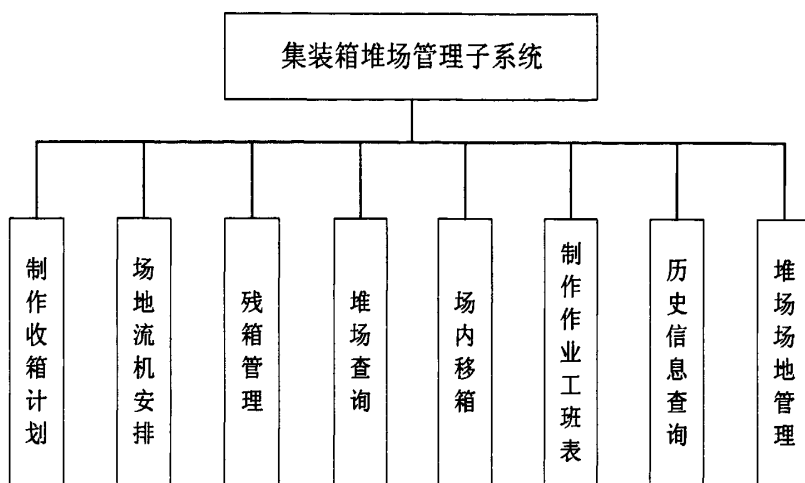


图 4.2 堆场功能结构图

Fig. 4.2 Functional structure chart of container yard

其中制作收箱计划主要是根据船舶航次、舱单、分目的港、分箱型、分重量等级等不同的标准来划分场地位置。堆场计划员根据将要集港的船名、航次的舱单数据或者是根据船公司传过来的 EDI 数据得到该船名航次的箱量、箱型、到达港、重量等级信息，在集港收箱之前预先对集装箱进行计划。堆场计划的操作界面图如图 4.3 所示。

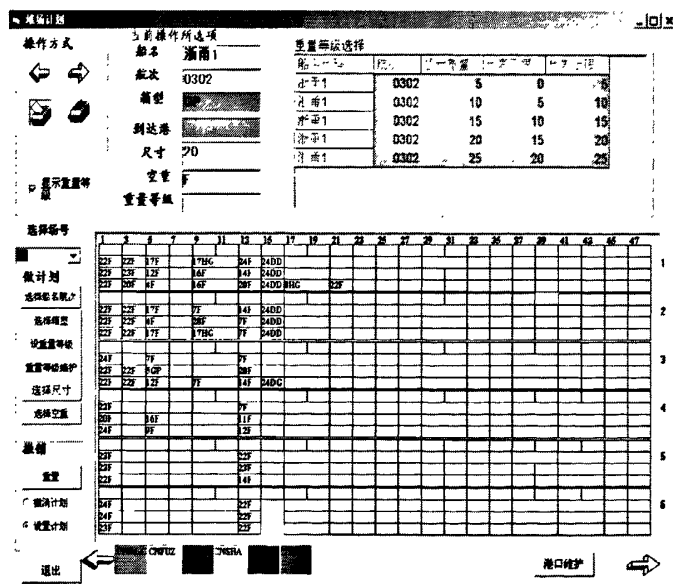


图 4.3 堆场计划操作界面

Fig. 4.3 Operator interface of container yard plan

场地流机安排主要是安排堆场的作业机械，包括场桥、叉车和正面吊，首先需要选择计划日期，然后选择机械号，其中以 C 开头的代表场桥、以 Z 开头的代表正面吊、以 K 开头的代表靠背机械，选择需要为其安排作业机械的作业场号，班次一共分为三个时段(0-8 表示次日的 0-8 时，8-16 表示次日的 8-16 时，16-24 表示当日的 16-24 时)，场位区域的选择用贝位表示，机械作业被安排在某两个贝号之间。例如选择机械号 C01，选择场号 35，班次 0-8，贝位 01-19，表示安排 C01 场桥在 0-8 时在 35 场地的 01-19 贝作业。单击每一个具体的机械将显示出该机械当日所承当的所有作业任务计划。场地流机安排如图 4.4 所示。

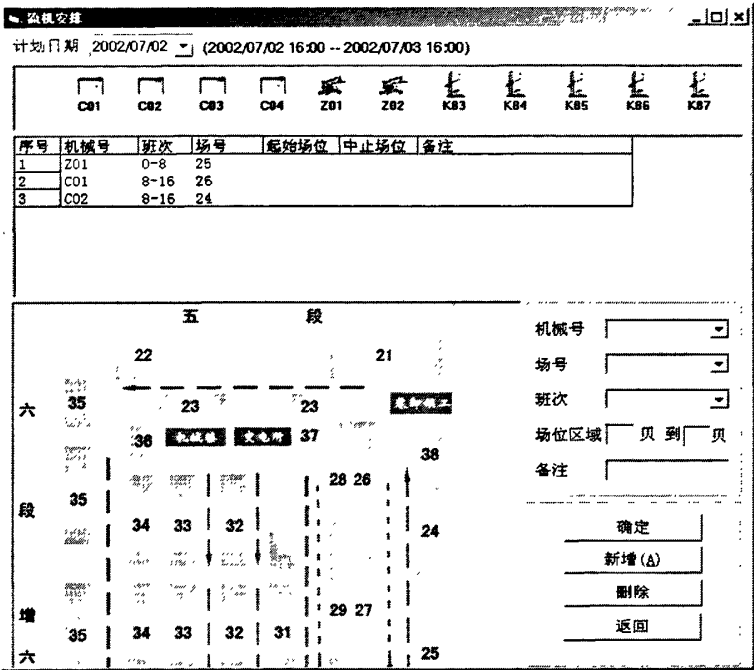


图 4.4 流机安排

Fig. 4.4 Machine allocation

残箱管理主要是对损坏的集装箱进行的管理，用于维护残损箱的信息。可以通过查历史按钮查询残箱的历史记录。如图 4.5 所示。

残箱管理						
查询 编辑 打印 新增 删除 返回						
头	158	条记录	当前记录	查历史	整理数据	
箱名代码	航次	箱号	计划员	残箱说明	残箱时间	
BEASER	2245H	CCL02038440	蔡建国	右侧破损	11/04/2002	
LIANJIAN	2245H	CCL02044611	米中泽	箱前门破	10/28/2002	
LIANGAN	2255S	CCL02384571	郭海梅	前门凹	11/24/2002 15:	
LIANGAN	2255H	CCL02461317	张忠德	右前凹	12/11/2002	
LIANGAN	2255S	CCL02491672	郭海梅	前门破	11/24/2002 16:	
LIANGAN	2255H	CCL03028955	张忠德	左前凸	12/11/2002	
LIANGAN	2255H	CCL03094854	张忠德	右侧门框杆弯	12/11/2002	
TAOYUAN	2332H	CCL03263065	吴凤书	左侧门框弯、前门破损	04/15/2003	
LIANGAN	2255H	CCL04182137	海大宽	右前破	12/09/2002	
LIANGAN	2244H	CCL06027320	王合明	顶破	10/21/2002	
LIANGAN	2300W	CCL05137800	张占魁	门左前凹、右前凸	01/01/2003	
LIANGAN	2300W	CCL07509835	张占魁	前门凹	01/01/2003	
金海虹16	0211	CLHU2001055	张占魁	门框杆弯	11/22/2002	
豫中78	0235	CLHU2072416	张忠德	箱门框杆弯	11/17/2002	
QUAN CHENG	0311	CLHU2407595	张宇琴	顶破	03/09/2003 15:	
豫中78	0236	CLHU2640210	董连杰	少两个门把	11/16/2002 17:	
小安洲	639A	CLHU2759024	张宇琴	顶凸	02/18/2003 20:	
CAPECOOK	255E	CLHU2834920	郭海梅	前门皮边卷	10/11/2002 11:	
小安洲1	829A	CLHU2979100	刘小波	前门凹	11/13/2002 20:	
小安洲	540A	CLHU2979184	李忠强	右前凹	03/03/2003 12:	
金海虹16	0211	CLHU8062145	张占魁	门框杆弯	11/22/2002	
SHUN CHENG	0311	CLHU8249516	冯旭	箱右前破	03/16/2003 16:	
金海虹16	0211	CLHU8372602	张占魁	前门凹	11/22/2002	
金海虹8	0238	CLHU8372670	吕月秋	门框杆弯	11/09/2002 13:	
金海虹16	0211	CLHU8512052	张占魁	前门凹	11/22/2002	
小安洲1	839A	CLHU8514102	董连杰	底前破	04/05/2003 14:	
BE DA 8	0234	CPI00097655	黄爱成	左前凸	11/29/2002	
SHUN CHENG	024B	CTL04627704	姚伯强	前门破	12/07/2002	
SUNWYFALH	301E	DM04500296	李忠强	前门凹	01/06/2003 11:	
LIANGAN	2302H	ENC05124830	李春田	右前破	01/08/2003	
BE DA 8	0234	FEA07556266	黄爱成	大前破	11/29/2002	
BE DA 8	0234	FEA07559771	黄爱成	箱门左前破	11/29/2002	
BE DA 8	0234	FEA07560490	黄爱成	右前破	11/21/2002	

图 4.5 残箱管理

Fig. 4.5 Damaged container management

场内移箱主要是对场内摆放的集装箱进行堆放位置的调整，需要选择移箱方式，主要有机械移箱，表示此次的移箱操作是由一个机械来完成整个过程；集卡移箱表示此次的移箱的吊箱的放箱分别是由不同的机械来完成的。移箱目的表示移箱后的集装箱位置，计划作业时间是此次移箱的计划时间，班次表示此次移箱计划的作业班次，如图 4.6 所示。

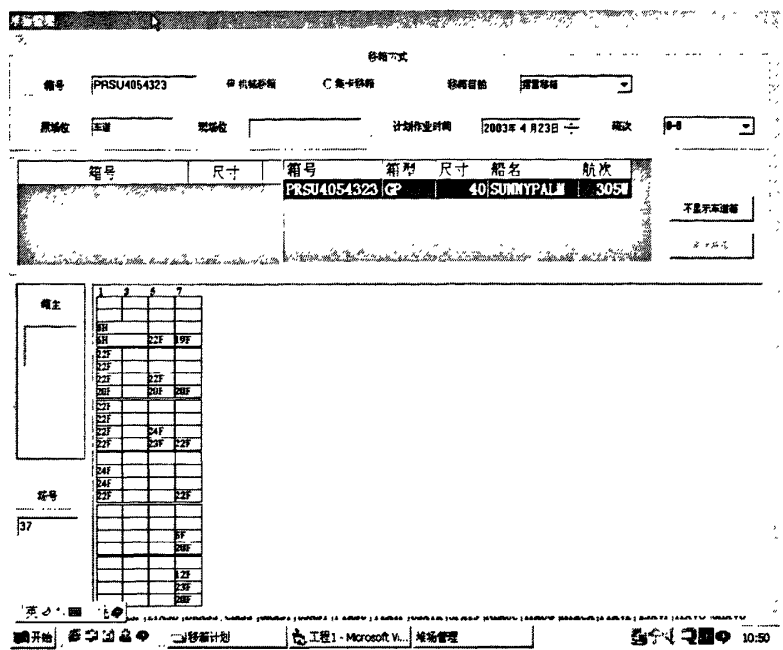


图 4.6 堆场管理

Fig. 4.6 container yard management

移箱计划列表显示了所有的移箱计划，包括此次移箱操作的箱号、尺寸、原来所处的场位编号和目的场位编号，每做一条移箱计划移箱列表里面则会多出一个箱子的信息，具体如图 4.7 所示。

箱号	尺寸	源场位	目标场地
OOLU3133534	20	21-1-17B	21-1-45B

图 4.7 移箱计划列表

Fig. 4.7 Lists of move container plan

4.2 集装箱堆场调度模型算法在实际系统中的应用

我们将第三章建立的集装箱堆场场桥分配模型应用于实际的集装箱堆场管理系统中，并且利用 C#.NET 语言来实现，下面介绍具体的实现过程。

4.2.1 实现过程中所用到的一些数据结构

本文利用遗传算法对所建立的模型进行求解，首先需要定义一些在求解过程

中用到的数据结构,主要是堆场中的一些实体,包括作业段、场桥等。

SegmentInfo 表示一个作业段的类,用于描述每一个作业段的信息,结构定义形式如下:

```
Type {
    SegmentID: number    任务段编号
    YardNo: number       作业段所在的场地编号
    BayNoStart: number   作业段所在的开始贝号
    BayNoEnd: number     作业段所在的结束贝号
    ContainerNum: number  任务段内包含的集装箱数量
    CraneNum: number     该任务段分配的场桥数量
}
```

Machine 表示一个场桥的类,用于描述长桥机械的信息,结构定义形式如下:

```
Type {
    MachineID: number    场桥编号
    Status: string       当前状态(正在作业或空闲)
    Capacity: number     场桥单位时间的最大作业量
    Position: [number,number] 场桥的当前作业位置,可以用场地号和贝位号唯一确定
}
```

在实现过程中还有一些常量需要根据实际的情况和经验来获得,在整个求解的过程中这些常量的值是保持不变的,用到的一些常量如下表 4.1 所示。

表 4.1 常量表

Tab. 4.1 Table of constant

常量	含义	说明
Pn_size	种群规模	是整数类型
max_yc	最大遗传世代数	是整数类型
rst_long	染色体长度	是整数类型
mutation	变异概率	是双精度类型
crossover	交叉概率	是双精度类型
CQ_num	场桥的数量	是整数类型

表 4.1 常量表(续)

Tab. 4.1 Table of constant(continue)

常量	含义	说明
S[i][j]	是第i个场地的第j个段	S是类SegmentInfo的二维数组
M[i]	表示第i个场桥	M是类Machine的一维数组

4.2.2 算法的实现

遗传算法的实现有很多的实例，其主要是对适用于遗传算法问题的抽象的实现，具有一般性和通用性。针对不同的具体问题，需要进行适当的变换。利用遗传算法来解决集装箱码头堆场场桥的分配问题，主要是根据具体的问题域来构建算法的实现，实现的过程主要有以下的一些步骤。

(1) 初始解的产生，可以利用第三章中提到的场桥分配表格来随机产生一组有效的初始解，再利用下标编码的方式进行问题域的转换。在算法的实现中可以利用 C#语言中的 ArrayList 类来存储初始解。每一个解为一个染色体，也叫做个体即一个 ArrayList 实例，所有的个体就构成种群。利用第三章中用到的场桥分配表格 4.2 为例。

表 4.2 场桥分配表

Tab. 4.2 Allocation table of yard crane

	T1	T2	T3	T4
S11 (40)	M1 (30)	M1 (10)		
S12 (80)		M1 (20)	M1 (30)	M1 (30)
S21 (50)	M2 (30)	M2 (20)		
S22 (70)		M2 (10)	M2 (30)	M2 (30)

根据该场桥分配表格可以得到问题的一个初始解

$$X=\{(T1,S11,M1,30), (T2,S11,M1,10), (T2,S12,M1,20), (T3,S12,M1,30),$$

$$(T4,S12,M1,30), (T1,S21,M2,30), (T2,S21,M2,20), (T2,S22,M2,10),$$

(T3,S22,M2,30), (T4,S22,M2,30)}

利用下标编码的方式进行编码可以得到编码的结果

{(011101), (021101), (031101), (041101), (011202), (021202), (031202), (041202),
(012103), (022103), (032103), (042103), (012204), (022204), (032204), (042204)}

在算法的实现中就将定义一个染色体类 Chromosome, 用于表示其中一个可行的场桥分配方案。

产生初始解的函数为 InitializeGeneration()

```
Public void InitializeGeneration()
{
    this_Generation=new System.Collections.ArrayList();
    for(int i=0;i<Pn_size;i++)
    {
        Chromosome newParent=new Chromosome ();
        this_Generation.Add(newParent);
    }
}
```

(2) 适应度值的计算, 适应度函数就是目标函数, 即场桥的利用率。

(3) 新一代的群体, 通过遗传操作(选择、交叉、变异、替换)进行循环不断产生新的个体, 即子代个体。按照适应度来选择两个父代染色体作为双亲染色体, 在算法中定义 iParentFather 和 iParentMother 作为被选择的双亲。按照交叉概率由双亲染色体交叉形成两个新一代的个体, 若交叉不能够完成则由双亲直接复制产生两个子代染色体。按照变异概率让染色体的某一个基因位产生突变形成新的染色体。新一代个体的产生的方法为 CreateNextGeneration(), 具体的代码如下所示

```
Public void CreateNextGeneration()
{
    next_Generation=new new System.Collections.ArrayList();
    next_Generation.clear();
    Chromosome bestChromosome=null;
    if( directIn() )//函数 directIn()用于判断适应度最好的染色体是否直接加入
```

到新一代的群体中去

```
{
    bestChromosome=getBsetChromosome();//返回适应度最大的个体
}
for(int i=0;i<Pn_size;i=i+2)//循环生成新的个体，每一次生成两个
{
    //第一步，选择父代中的两个优秀染色体(适应度值大的个体)
    int iFather=0;
    int iMother=0;
    //利用轮赌选择法进行选择
    iFather=RouletteSelection();
    iMother= RouletteSelection();
    Chromosome Dad=( Chromosome) this_Generation[iFather];
    Chromosome Mum=( Chromosome) this_Generation[iMother];
    Chromosome child1=new Chromosome();
    Chromosome child2=new Chromosome();
    //第二步，根据交叉概率决定是交叉产生下一代还是直接产生
    if(m_Random.NextDouble()<this. crossover)
    {
        CrossOver(Dad,Mum, ref child1, ref child2);//进行交叉操作产生新
                                                的一代个体
    }
    else
    {
        child1=Dad;
        child2=Mum;
    }
    //第三步，参照变异概率决定是进行变异
    if(m_Random.NextDouble()<this. mutation)
```

```

    {
        Mutation(child1);
        Mutation(child2);
    }
    //计算适应度
    this.calculatefit(child1);
    this.calculatefit(child2);
    next_Generation.Add(child1);
    next_Generation.Add(child2);
}
if(bestChromosome!=null)
{
    next_Generation.Insert(0, bestChromosome);
}
//用子代去替换父代
this_Generation.Clear();
for(int j=0;j<Pn_size;j++)
{
    this_Generation.Add(next_Generation[j]);
}
}

```

(4) 选择优秀染色体的方法有很多, 例如有轮赌选择法、竞赛选择法、分级选择法、稳定状态选择法等等, 本文主要利用了轮赌选择法, 父代的选择是根据其适应度值做出的, 适应度越大被选中的概率就越高, 可以想象一下将所有的染色体放置在轮赌的圆盘上面, 每一个染色体所占据的大小与其适应度值是成正比例关系的。然后开始仍弹子, 弹子最终落到哪个地方就将对应的染色体选出来。显而易见, 适应度大的染色体被选到的机会也就越大。首先需要计算所有染色体的适应度之和, 用 S 表示; 在区间 $(0, S)$ 上随机产生一个数 r ; 在群体中从适应度最小的染色体开始, 把它的适应度加到 s 上去, 如果 s 小于 r , 就停止循环返回当前

的染色体。具体的算法实现伪代码如下所示。

```
Private int RouletteSelection()
{
    double randomFitness= m_Random.NextDouble()*sumFitness;
    int idx=-1;
    int i=0;
    double partOfFitness= sumFitness;
    int last=Pn_size-1;
    while(i<=last)
    {
        partOfFitness=partOfFitness-((Chromosome)this.this_Generation[i]).Fitness;
        if(randomFitness> partOfFitness)
        {
            idx=i;
            break;
        }
        i++;
    }
    return idx;
}
```

4.3 应用结果分析与比较

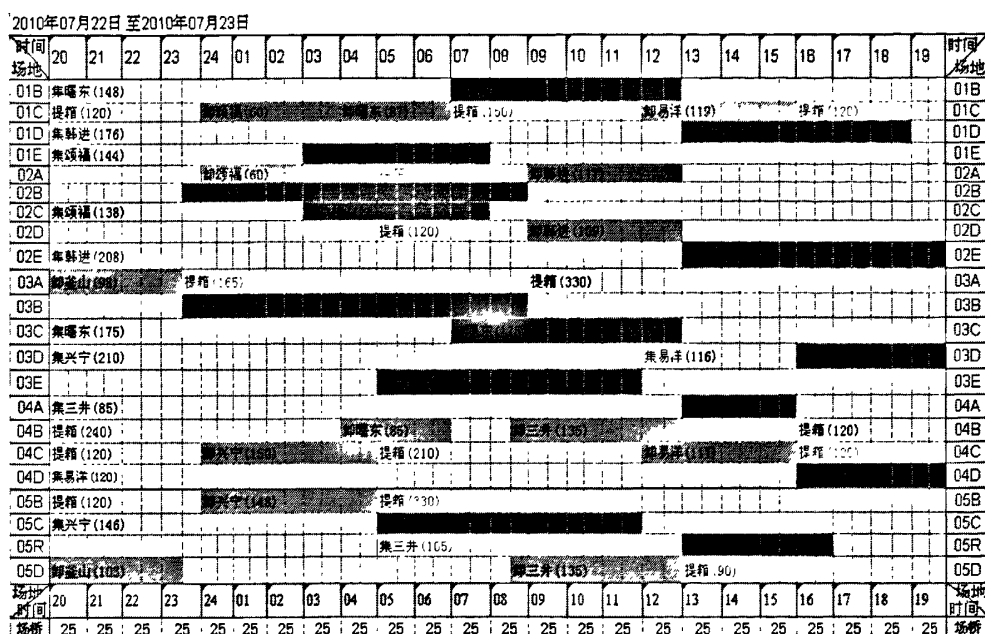
本文以某一集装箱港口码头堆场的实际场桥分配数据为例子，通过应用本文提出的模型来优化，并进行比较。以该港口堆场 2010.07.22 20:00~2010.07.23 20:00 的时间段为一个周期来进行说明，在这个周期内需要为 7 个航班船舶作业，具体的工班作业表如下表 4.3 所示。

表 4.3 工班作业表

Tab. 4.3 Table of shift assignment

船名航次	停靠泊位	类别	作业箱量
曙东 SHUDO N006/S007	35 段	进口	172
		出口	323
韩进阿玛西斯 ANASI 031E/032W	36 段东	进口	226
		出口	384
兴宁 19 XN19 0518/1519	36 段西	进口	298
		出口	356
三井团结 UNITY 010N/011S	37 段东	进口	270
		出口	190
东方颂福 SOONF 029W/029E	37 段西	进口	120
		出口	282
易洋 YIYNG 0524W/0525E	37 段西	进口	236
		出口	236
釜山快航 EASLZ 487/488	38 段	进口	201
		出口	742

根据堆场的作业安排计划，可以得到具体的堆场作业任务分布图，昼夜堆场作业计划表如下图 4.8 所示



为每一个作业计划安排好机械后的昼夜作业计划表如下图 4.9 所示

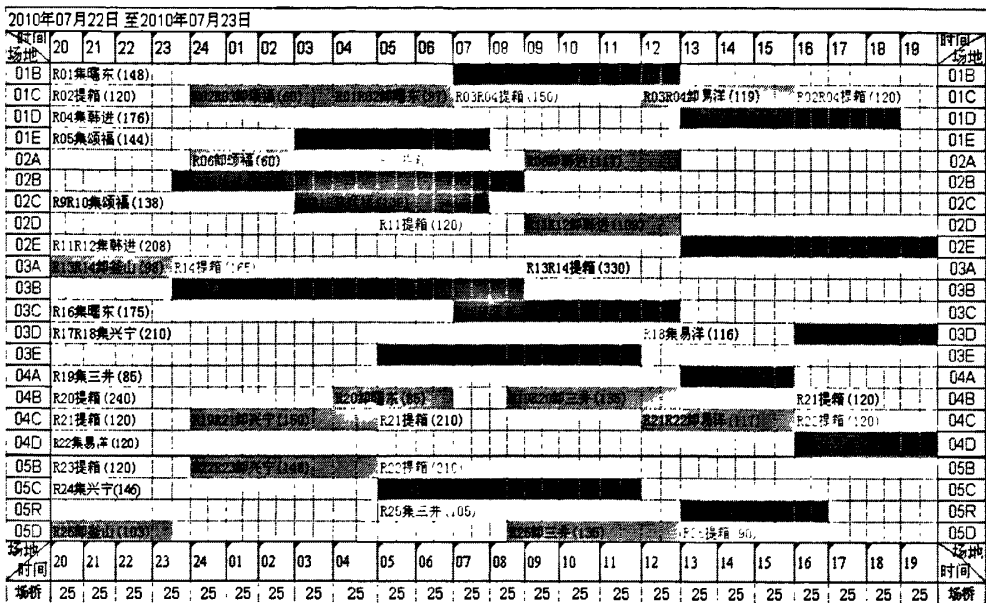


图 4.9 安排场桥后的昼夜堆场作业计划

Fig. 4.9 Day and night operation plan of container yard under allocation yard crane

场桥出勤计划如图 4.10 所示

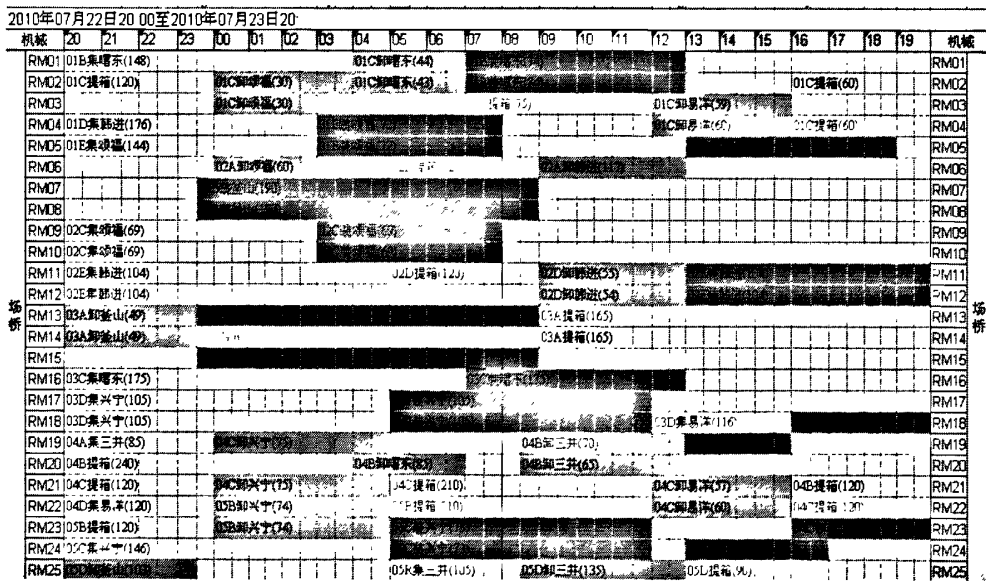


图 4.10 场桥出勤计划

Fig. 4.10 Yard crane participation plan

分配后的场桥利用率为：

$$E = \frac{\sum_i \sum_j TEU_{ij}}{\sum_i \sum_j M_{ij}.Capacity} = \frac{\sum_i \sum_j TEU_{ij}}{30 \times 24 \times 25} = \frac{8162}{18000} = 45.34\%$$

应用堆场调度优化模型建立场桥分配方案，并利用遗传算法求解，通过对机械安排工作的交换，尽量将分配给机械的任务靠前安排，这样可以减少机械的空转时间。其中截取场桥安排图的一小部分，通过优化可以将 RM02 卸颂福的作业安排给 RM03，这样可以保证 RM03 连续作业，同时卸曙东任务可以提前进行。原场

桥作业图如图 4.11 所示

机械	20	21	22	23	00	01	02	03	04	05	06
RM01	01B集曙东(148)								01C卸曙东(44)		
RM02	01C提箱(120)				01C卸颂福(30)				01C卸曙东(43)		
RM03					01C卸颂福(30)						

图 4.11 原场桥作业

Fig. 4.11 Initial yard crane operation

优化后的场桥作业图如图 4.12 所示

机械	20	21	22	23	00	01	02	03	04	05	06
RM01	01B集曙东(148)					01C卸曙东(44)					
RM02	01C提箱(120)					01C卸曙东(43)					
RM03	01C卸颂福(30)				01C卸颂福(30)						

图 4.12 优化后的场桥作业

Fig. 4.12 Optimization yard crane operation

第一代遗传操作后的场桥出勤图如图 4.13 所示

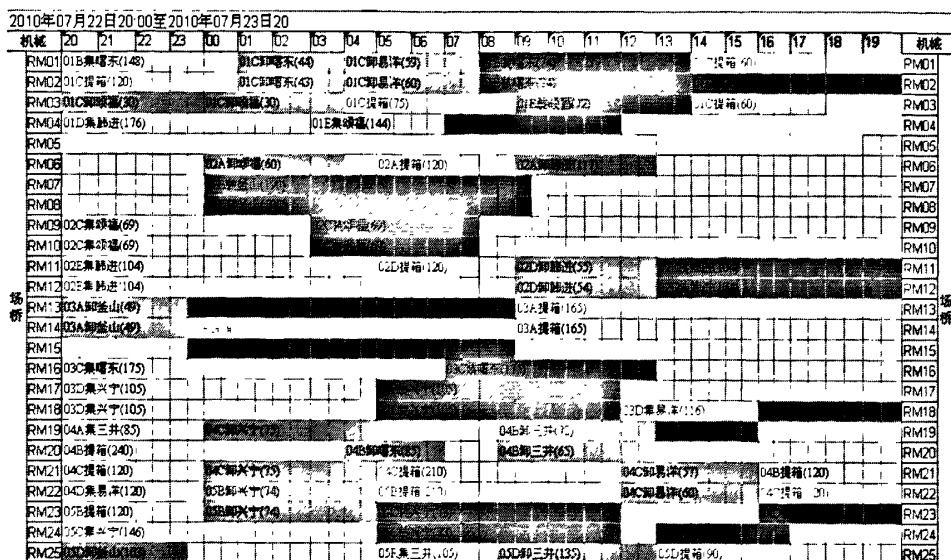


图 4.13 第一代遗传操作后的场桥出勤计划

Fig. 4.13 yard crane participation plan of first genetic manipulator

经过第一次遗传操作后的场桥利用率为：

$$E = \frac{\sum_i \sum_j TEU_{ij}}{\sum_i \sum_j M_{ij} \cdot Capacity} = \frac{\sum_i \sum_j TEU_{ij}}{30 \times 24 \times 25} = 48.65\%$$

第二次遗传操作后的场桥出勤结果图如图 4.14 所示

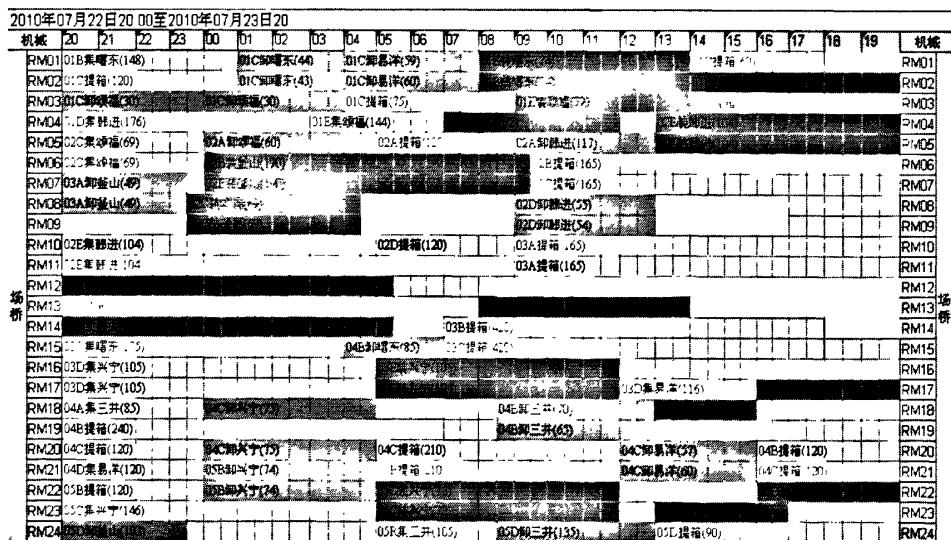


图 4.14 第二代遗传操作后场桥出勤计划

Fig. 4.14 yard crane participation plan of second genetic manipulator

经过第二次遗传操作后的场桥利用率为：

$$E = \frac{\sum_i \sum_j TEU_{ij}}{\sum_i \sum_j M_{ij} \cdot Capacity} = \frac{\sum_i \sum_j TEU_{ij}}{30 \times 24 \times 25} = 52.61\%$$

经过多代遗传迭代以后的最终场桥出勤图如图 4.15 所示

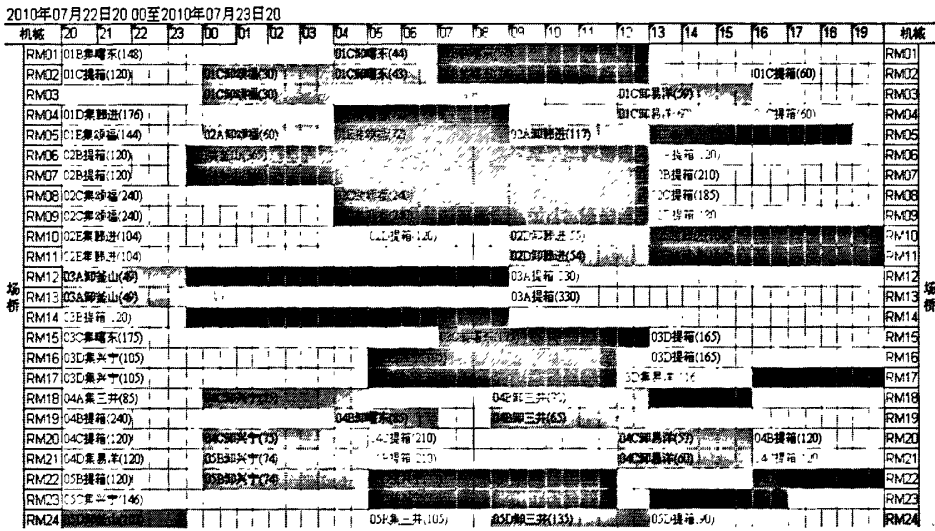


图 4.15 最终的场桥出勤计划

Fig. 4.15 yard crane participation plan of final

最终的场桥利用率为：

$$E = \frac{\sum_i \sum_j TEU_{ij}}{\sum_i \sum_j M_{ij} \cdot Capacity} = \frac{\sum_i \sum_j TEU_{ij}}{30 \times 24 \times 24} = 62.42\%$$

可以看出通过优化后场桥的利用率得到了很大的提高，这样就使得堆场管理的成本降低了，从而增强了整个港口码头的竞争能力。

第5章 总结与展望

本文是以集装箱港口码头堆场的作业资源配置为研究对象，主要研究了场桥机械资源的配置，提出了以场桥利用率最大化为目标函数的资源配置模型，并基于启发式方法的遗传算法来求解该模型，实验证明了该模型在解决堆场场桥配置问题上能够提高场桥的利用率，最大化的利用有限的资源。

同时引进了“段”的概念，将具有相似作业类型的集装箱归为一个段，以段为基本单位安排场桥，在段内则依据制定好的策略来进行操作，这将简化问题，使得计算量变小，这是本文的一个与众不同之处。对于场桥资源配置问题的研究更多的是关注于场桥作业时间上，模型的建立是以场桥作业时间最小化为目标函数。由于堆场的作业是以一个时间段来计划的，只需要在该时间段内完成计划的任务，本文提出的模型目标函数是提高场桥的利用率，这样与实际的情况更加符合。

本文采用了作业调度优化技术以及启发式相关理论对集装箱堆场资源配置问题进行了详细的研究，希望研究的结果能够为港口码头的堆场管理实际运作提供一定的指导，辅助其进行决策。

论文的不足之处：由于集装箱码头堆场系统是一个复杂的大系统，涉及到的因素很多，对于堆场的一些操作细节没有考虑，模型的建立只是单目标的，还应该在场桥利用率最大化的情况下考虑其他的一些目标，进行多目标模型的建立。

在课题进一步的研究中将考虑一下一些方面的问题：

(1) 在堆场作业调度模型的建立方面应该考虑更多的因素建立多目标的模型，这样能够将问题考虑的更加全面。

(2) 在场桥资源配置上可以为重点作业线和重点船舶优先分配，保证重点作业的优先完成，基于优先级的场桥资源分配计划。

参 考 文 献

- [1] 宗蓓华, 真虹. 港口装卸工艺学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [2] 孙凤山. 港口发展集装箱物流的优势和途径[J]. 港口经济, 2007, 2: 33-35.
- [3] 张丽丽. 集装箱港口发展趋势[J]. 中国新技术新产品, 2009, 20: 202.
- [4] 乌英, 廖立新. 集装箱港口发展现状及趋势[J]. 中国物流与采购, 2008, 13: 70-71.
- [5] 王维圳. 集装箱堆场分配问题的启发式方法研究: (硕士学位论文). 天津: 天津大学, 2008.
- [6] 朱静霞. 中国港口集装箱码头信息技术应用现状与展望[J]. 中国远洋航务, 2006, 8: 58-60.
- [7] 于明顺, 张安波, 王夕众. 集装箱码头操作系统建设[J]. 集装箱化, 2007, 9: 14-17.
- [8] 徐锡章. 无线终端系统在上海集装箱码头有限公司(SCT)成功运行[J]. 中国港口, 2000, 1: 35.
- [9] 刘艳琴. 我国港航 EDI 系统建设与成就[J]. 水运科学研究, 2009, 1: 5-9.
- [10] 王登清. RFID 技术在港口集装箱领域的应用研究[J]. 物流技术, 2008, 9: 120-122.
- [11] 刘华琼. 基于 RFID 的港口集装箱作业仿真调度研究: (硕士学位论文). 大连: 大连海事大学, 2008.
- [12] Tabel-Ibrahimi M, De Castilho B, Daganzo C F. Storage space vs handling work in container terminals[J]. Transportation Research: Part B, 1993, 27(4): 13-22.
- [13] McDowill E, Martin G. A study of maritime container handling Oregon state university sea grant college program ads Corvallis[J]. Oregon, 1985(97): 1-10.
- [14] De Castilho B, Daganzo C F. Handling strategies for import container at marine terminals[J]. Transportation Research: Part B, 1993, 27(3): 151-166.
- [15] 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): 89-101.
- [16] Peter P, Erhan K. An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals[J]. Computers and Operations Research, 2001, 28(3): 983-995.
- [17] Chung Y G, Randhawa S U, McDowell E D. A simulation analysis for a transtainer-based container handling facility[J]. Computers and Industrial Engineering, 1988, 14(2): 113-125.
- [18] Lai K, Lam K. A study of container yard equipment allocation strategy in Hong Kong[J]. International Journal of Modeling and Simulation, 1994, 14(3): 134-138.
- [19] Gambardella L M, Rizzoli A E, Zaffalon M. Simulation and planning of an intermodal

- container terminal[J]. Simulation, 1998, 71(2):107-116.
- [20] Kim K H, Kim K Y. An optimal routing algorithm for a transf crane in port container terminals[J]. Transportation Science, 1999, 33(1):17-33.
- [21] Kozan, Prseton. Generic algorithm to schedule container transfer at multimodal terminals[J]. International Transaction in Operational Research, 1999, 14(9):311-328.
- [22] 郝聚民, 纪卓尚, 林焰. 混合顺序作业堆场 BAY 优化模型[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(1):102-105.
- [23] 杨淑琴, 张运杰, 王志强. 集装箱堆场问题的一个数学模型及其算法(英文)[J]. 大连海事大学学报, 2002, (28):115-117.
- [24] 徐建华. 用择箱指数法优化集装箱货场的利用效率和取箱效率[J]. 港口装卸, 1991, 72:46-51.
- [25] 宋天威. 集装箱码头堆场堆码方式的研讨[J]. 集装箱港站, 2000, 10(2):8-10.
- [26] 徐亚, 陈秋双, 龙磊. 集装箱倒箱问题的启发式算法研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(14):3666-3669.
- [27] 计三有, 高悦文. 集装箱堆场减少倒箱率方法研究[J]. 水运工程, 2006, 8:53-56, 61.
- [28] 魏众, 申金升. 港口集装箱码头轮胎式龙门吊优化调度研究[J]. 中国工程科学, 2007, 9:22-24.
- [29] 何军良, 宓为建, 严伟. 基于爬山算法的集装箱堆场场桥调度[J]. 上海海事大学学报, 2007, 28(4):11-15.
- [30] 高鹏, 金淳, 韩庆平. 提箱作业优化问题的嵌套启发式算法[J]. 系统管理学报, 2008, 17(2):203-209.
- [31] 蔡元龙. 面向敏捷制造的制造单元控制结构及控制技术研究(博士学位论文). 北京:北京航空航天大学, 1999.
- [32] 高守玮, 一类 Flowshop 生产调度问题及其优化方法之分析与研究:(硕士学位论文). 上海:上海交通大学, 2007
- [33] 王万良, 吴启迪. 生产调度智能算法及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [34] Johnson, S. Optimal two-and-three stage production schedules with setup times included. Naval Research Logistics Quarterly, 1954, vol. 1:61-68.
- [35] Dudek, R., S. Panwalkar and M. Smith. The lessons of flow shop scheduling research. Operations Research. 1992, 40:7-13.
- [36] Ishibuchi, H., N. Yamamoto, T. Murata, and . H. Tanaka. Gencitic Algorithms and

neighborhood search algorithms for fuzzy flowshop scheduling problems. Fuzzy Sets and Systems. 1994. 67:81-100.

[37] Dong X Y, Huang H K, Chen P. Study on heuristics for the permutation flowshop with sequence dependent setup times[C]. Las Vegas, USA:EEE IRI 2009, 2009.

[38] Lomnicki Z A. A branch-and-bound algorithm for the exact solution of the three-machine scheduling problem[J]. Operations Research Quarterly, 1965, 16(1):89-100.

[39] Tailland E. Some efficient heuristic methods for the flow shop sequencing problem[J]. European Journal of Operational Research, 1990, 47(1):65-74.

[40] Chen S H, Chang P C, Zhang Q F. A self-guided genetic algorithm for flowshop scheduling problems[C]. Singapore:2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation(CEC 2009), 2009.

[41] 武德春, 武晓. 集装箱运输实务(第2版)[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.

[42] <http://baike.baidu.com/view/238855.htm>.

[43] 郝黎民. 混合顺序作业堆场 BAY 优化模型[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(1):102-105.

[44] 徐斌. 基于 Agent 的集装箱码头实时系统的研究:(博士学位论文). 大连:大连理工大学, 2010.

[45] 陶奇钧. 集装箱堆场机械选型配置研究[J]. 港口装卸, 2002, (01):1-6.

[46] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.

[47] C. Reeves. Modern heuristic techniques for combinatorial problems[M]. Oxford:Blackwell Scientific Publications, 1993.

[48] 陈萍. 启发式算法及其在车辆路径问题中的应用:(硕士学位论文). 北京:北京交通大学, 2009.

[49] S. Voss, S. Martello, I. Osman. Meta-heuristics :advances and trends in local search paradigms for optimization[M]. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 1999.

[50] 朱大奇, 史慧. 神经网络原理及应用[M]. 北京:科学出版社, 2006.

[51] 张青贵. 神经网络导论[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004.

[52] 魏海坤. 神经网络结构设计的理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.

[53] 袁曾任. 人工神经元网络及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.

[54] 王凌. 智能算法及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2001.

- [55] Glover F. Tabu search-Part I[J]. ORSA Journal on Computing. 1989, 2(2):196-206.
- [56] 摄伟. 基于禁忌搜索算法的区域电网无功优化:(硕士学位论文). 西安:西安科技大学, 2008.
- [57] 许传玉. 系统可靠性优化研究及禁忌算法在其中的应用:(硕士学位论文). 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2000.
- [58] 杨博. 禁忌搜索算法在冷藏供应链配送网络中的应用研究:(硕士学位论文). 上海:上海海事大学, 2005.
- [59] Metropolis N, Rosenbluth A W, Rosenbluth M N. Equations of state calculations by fast computing machines[J]. J Chem Phys, 1953, 21:1087-1091.
- [60] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 15:220-671.
- [61] 王伟, 殷志祥. 基于模拟退火算法的可逃逸粒子群算法[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(5):1326-1328.
- [62] 蒋龙聪, 刘江平. 模拟退火算法及其改进[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(2):135-140.
- [63] 李景叶, 陈小宏. 用改进的模拟退火算法进行叠后时移地震数据反演[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(4):392-395.
- [64] 陈华根, 李丽华, 徐惠平. 改进的非常快速模拟退火算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(8):1121-1125.
- [65] Holland. J. H. Adaptation in Natural and Artificial System. Cambridge, MA: Press, 1992.
- [66] 明亮. 遗传算法的模式理论及收敛理论:(硕士学位论文). 西安:西安电子科技大学, 2006.
- [67] 云庆夏, 黄光球, 王战权. 遗传算法和遗传规划[M]. 北京:冶金工业出版社, 1997.
- [68] 刘勇, 康文山, 陈毓屏. 非数值并行算法:遗传算法[M]. 北京:科学出版社, 1995.
- [69] Z. Mchelewich. Genetic Algorithms+Data Structure=Evolutionary Programming[M]. New York:Springer-Verlag, 1996.
- [70] T. Back and H. P. Schwefel. An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization. Evolutionary Computation. 1993, 1(1):1-23.
- [71] 杨振强, 王常虹, 庄显义. 自适应复制、交叉和突变的遗传算法[J]. 电子科学学刊, 2000, (01):112-117.
- [72] 丁秉民, 张传生, 刘辉. 遗传算法纵横谈[J]. 信息与控制, 1997, 26(01):40-47.

- [73] Srinivas.M, Patnaik L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms. IEEE Trans on SMC , 1994, SMC-24(4):656-667.
- [74] 信昆仑, 刘隲庆. 混合编码遗传算法基于面向对象方法的实现及应用[J]. 计算机工程与应用, 2003, (21):36-38.
- [75] 陈永建, 周艳. 遗传算法编码方式的应用及其改进算法的研究[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2008, (2):76-78.
- [76] 刘英. 遗传算法中适应度函数的研究[J]. 兰州工业高等专科学校学报, 2006, (3):1-4.
- [77] 刘勇, 康立山, 陈镇屏. 非线性并行算法-遗传算法[M]. 北京:科学出版社, 1995.
- [78] 傅颖勋, 遗传算法的研究与改进:(硕士学位论文). 北京:北京邮电大学, 2010.
- [79] 吴翊. 集装箱堆场的功能[J]. 集装箱化, 1998(3):22-24.
- [80] 张莉. D 港集装箱码头堆场系统业务流程现状、问题及对策[J]. 物流技术, 2009(28):44-46.
- [81] 胡艳红, 孙俊清, 韩梅. 基于 GATS 混合算法的龙门吊优化调度研究[C]. Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, 2010:5473-5477.
- [82] 戴书文. 组合优化中启发式算法的研究分析[J]. 淮南职业技术学院学报, 2005(1):72-74.
- [83] 徐宁, 李春光, 张建. 几种现代优化算法的比较研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002(12):100-103.
- [84] 张伟, 李守智, 高峰. 几种智能最优化算法的比较研究[C]. Proceedings of the 24th Chinese Control Conference, 2005:1316-1320.
- [85] 尤晓清, 邱矩平, 林苗. 仿生智能算法的比较分析[J]. 福建电脑, 2009(1):13-14.

附 录

场桥计划安排表详细数据表

场桥代码	开始作业时间	结束作业时间	作业位置	作业箱量	备注
RM01	2010-07-22 20:00	2010-07-23 01:00	01B	148	曙东—集港
RM01	2010-07-23 07:00	2010-07-23 13:00	01B	74	曙东—装船
RM01	2010-07-23 04:00	2010-07-23 07:00	01C	44	曙东—卸船
RM02	2010-07-22 20:00	2010-07-23 00:00	01C	120	提箱操作
RM02	2010-07-23 07:00	2010-07-23 13:00	01B	74	曙东—装船
RM02	2010-07-23 00:00	2010-07-23 04:00	01C	30	颂福—卸船
RM02	2010-07-23 04:00	2010-07-23 07:00	01C	43	曙东—卸船
RM02	2010-07-23 16:00	2010-07-23 20:00	01C	60	提箱操作
RM03	2010-07-23 00:00	2010-07-23 04:00	01C	30	颂福—卸船
RM03	2010-07-23 07:00	2010-07-23 12:00	01C	150	提箱操作
RM03	2010-07-23 12:00	2010-07-23 16:00	01C	59	易洋—卸船
RM04	2010-07-23 12:00	2010-07-23 16:00	01C	60	易洋—卸船
RM04	2010-07-23 16:00	2010-07-23 20:00	01C	60	提箱操作
RM04	2010-07-22 20:00	2010-07-23 03:00	01D	176	韩进—集港
RM04	2010-07-23 03:00	2010-07-23 08:00	01E	72	颂福—装船
RM05	2010-07-22 20:00	2010-07-23 00:00	01E	144	颂福—集港
RM05	2010-07-23 03:00	2010-07-23 08:00	01E	72	颂福—装船
RM05	2010-07-23 13:00	2010-07-23 19:00	01D	176	韩进—装船
RM06	2010-07-23 00:00	2010-07-23 03:00	02A	60	颂福—卸船
RM06	2010-07-23 05:00	2010-07-23 09:00	02A	120	提箱操作
RM06	2010-07-23 09:00	2010-07-23 13:00	02A	117	韩进—卸船
RM07	2010-07-22 23:30	2010-07-23 09:00	02B	190	釜山—装船
RM08	2010-07-22 23:30	2010-07-23 09:00	02B	190	釜山—装船
RM09	2010-07-22 20:00	2010-07-23 00:00	02C	69	颂福—集港
RM09	2010-07-23 03:00	2010-07-23 08:00	02C	69	颂福—装船

RM10	2010-07-22 20:00	2010-07-23 00:00	02C	69	颂福—集港
RM10	2010-07-23 03:00	2010-07-23 08:00	02C	69	颂福—装船
RM11	2010-07-22 20:00	2010-07-23 05:00	02E	104	韩进—集港
RM11	2010-07-23 05:00	2010-07-23 09:00	02D	120	提箱操作
RM11	2010-07-23 09:00	2010-07-23 13:00	02D	55	韩进—卸船
RM11	2010-07-23 13:00	2010-07-23 20:00	02E	104	韩进—装船
RM12	2010-07-22 20:00	2010-07-23 05:00	02E	104	韩进—集港
RM12	2010-07-23 09:00	2010-07-23 13:00	02D	54	韩进—卸船
RM12	2010-07-23 13:00	2010-07-23 20:00	02E	104	韩进—装船
RM13	2010-07-22 20:00	2010-07-22 23:30	03A	49	釜山—卸船
RM13	2010-07-22 23:30	2010-07-23 09:00	03B	181	釜山—装船
RM13	2010-07-23 09:00	2010-07-23 20:00	03A	165	提箱操作
RM14	2010-07-22 20:00	2010-07-22 23:30	03A	49	釜山—卸船
RM14	2010-07-22 23:00	2010-07-23 05:00	03A	165	提箱操作
RM14	2010-07-23 09:00	2010-07-23 20:00	03A	165	提箱操作
RM15	2010-07-22 23:30	2010-07-23 09:00	03B	181	釜山—装船
RM16	2010-07-22 20:00	2010-07-23 04:00	03C	175	曙东—集港
RM16	2010-07-23 07:00	2010-07-23 13:00	03C	175	曙东—装船
RM17	2010-07-22 20:00	2010-07-23 05:00	03D	105	兴宁—集港
RM17	2010-07-23 05:00	2010-07-23 12:00	03E	105	兴宁—装船
RM18	2010-07-22 20:00	2010-07-23 05:00	03D	105	兴宁—集港
RM18	2010-07-23 05:00	2010-07-23 12:00	03E	105	兴宁—装船
RM18	2010-07-23 12:00	2010-07-23 16:00	03D	116	易洋—集港
RM18	2010-07-23 16:00	2010-07-23 20:00	03D	116	易洋—装船
RM19	2010-07-22 20:00	2010-07-23 00:00	04A	85	三井—集港
RM19	2010-07-23 00:00	2010-07-23 05:00	04C	75	兴宁—卸船
RM19	2010-07-23 08:30	2010-07-23 13:00	04B	70	三井—卸船
RM19	2010-07-23 13:00	2010-07-23 16:00	04A	85	三井—装船
RM20	2010-07-22 20:00	2010-07-23 04:00	04B	240	提箱操作
RM20	2010-07-23 04:00	2010-07-23 07:00	04B	85	曙东—卸船

附 录

RM20	2010-07-23 08:30	2010-07-23 13:00	04B	65	三井—卸船
RM21	2010-07-22 20:00	2010-07-23 00:00	04C	120	提箱操作
RM21	2010-07-23 00:00	2010-07-23 05:00	04C	75	兴宁—卸船
RM21	2010-07-23 05:00	2010-07-23 12:00	04C	210	提箱操作
RM21	2010-07-23 12:00	2010-07-23 16:00	04C	57	易洋—卸船
RM21	2010-07-23 16:00	2010-07-23 20:00	04B	120	提箱操作
RM22	2010-07-22 20:00	2010-07-23 00:00	04D	120	易洋—集港
RM22	2010-07-23 00:00	2010-07-23 05:00	05B	74	兴宁—卸船
RM22	2010-07-23 05:00	2010-07-23 12:00	05B	210	提箱操作
RM22	2010-07-23 12:00	2010-07-23 16:00	04C	60	易洋—卸船
RM22	2010-07-23 16:00	2010-07-23 20:00	04C	120	提箱操作
RM23	2010-07-22 20:00	2010-07-23 00:00	05B	120	提箱操作
RM23	2010-07-23 00:00	2010-07-23 05:00	05B	74	兴宁—卸船
RM23	2010-07-23 05:00	2010-07-23 12:00	05C	73	兴宁—装船
RM23	2010-07-23 16:00	2010-07-23 20:00	04D	120	易洋—装船
RM24	2010-07-22 20:00	2010-07-23 01:00	05C	146	兴宁—集港
RM24	2010-07-23 05:00	2010-07-23 12:00	05C	73	兴宁—装船
RM24	2010-07-23 13:00	2010-07-23 17:00	05R	105	三井—装船
RM25	2010-07-22 20:00	2010-07-22 23:30	05D	103	釜山—卸船
RM25	2010-07-23 05:00	2010-07-23 08:30	05R	105	三井—集港
RM25	2010-07-23 08:30	2010-07-23 13:00	05D	135	三井—卸船
RM25	2010-07-23 13:00	2010-07-23 16:00	05D	90	提箱操作

攻读学位期间公开发表论文

[1] 张仁星, 陈佳, 王晓营. Optimizing design on container yard based on multi-layer architecture, Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE) 高级计算机理论与工程国际会议, 2010, 10, EI 检索.

[2] 王晓营, 徐斌, 张仁星. An improved MVC used in container terminal management system, Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE) 高级计算机理论与工程国际会议, 2010, 10, EI 检索.

致 谢

在本论文完成之际，我衷心地感谢在本论文撰写期间给予指导、帮助和支持的各位师长、同学和朋友。

本文是在我的导师陈佳教授的精心指导下完成的。论文从选题到完成的整个过程中，无不倾注着导师的心血。在论文完成之际，本人再次感谢陈老师平素对我的关怀，感谢她给我提供了大量的实践和锻炼机会，使我在实际动手能力和社会阅历方面都有了很大的提高。在此向陈老师表示深深的敬意和感谢，并真诚的祝愿她身体健康、工作顺利、家庭幸福！

同时，也要特别感谢徐斌老师在论文撰写过程中给予的帮助和指导，感谢徐斌老师在技术上给我的耐心辅导和讲解，使我克服了一个又一个的技术难关。此外，我还要感谢管理科学与工程学科的所有老师的辛勤培养；感谢管理科学与工程研究生 2009 级的同学，是他们在学习和生活中给了我无尽的支持和帮助；感谢我尊敬的师兄师姐们，从他们那所学到的知识和经验将是我这一生的财富；同时谢谢亲爱的师弟师妹们，是他们对我论文的最后完成给予了无私的帮助，衷心希望他们能够学业有成、工作顺利！

还要感谢我的父母和亲人，是他们的关心、爱护、鼓励和支持使我得以顺利完成今天的学业，祝愿他们身体健康，万事如意！

最后，谨向百忙之中抽出宝贵时间评审本论文的专家、学者致以最诚挚的谢意！

