

学校代码: 10126

学号: 31436037

分类号:

编号:



内蒙古大学
INNER MONGOLIA UNIVERSITY

硕士学位论文

MASTER DISSERTATION

集装箱码头泊位-岸桥-集卡调度优化研究

学 院: 数学科学学院

专 业: 数学

研究方向: 运筹学与控制论

姓 名: 商晓婷

指导教师: 曹瑾鑫 教授



学校代码: 10126

学号: 31436037

分类号: _____

编号: _____

论文题目

集装箱码头泊位-岸桥-集卡调度优化研究

学 院: 数学科学学院

专 业: 数学

研究方向: 运筹学与控制论

姓 名: 商晓婷

指导教师: 曹瑾鑫教授

2017 年 3 月 25 日

**THE INTEGRATED OPTIMIZATION OF
BERTH-QUAY CRANE-YARD TRUCK
IN CONTAINER TERMINALS**

Xiao Ting Shang

Supervised by Professor Jin Xin Cao

School of Mathematical Sciences,
Inner Mongolia University, Hohhot, 010021

March, 2017

原创性声明

本人声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除本文已经注明引用的内容外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得内蒙古大学及其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：商晓婷

指导教师签名：孙世元

日 期：2017.5.31

日 期：2017.6.1

在学期间研究成果使用承诺书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：内蒙古大学有权将学位论文的全部内容或部分保留并向国家有关机构、部门送交学位论文的复印件和磁盘，允许编入有关数据库进行检索，也可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编学位论文。为保护学院和导师的知识产权，作者在学期间取得的研究成果属于内蒙古大学。作者今后使用涉及在学期间主要研究内容或研究成果，须征得内蒙古大学就读期间导师的同意；若用于发表论文，版权单位必须署名为内蒙古大学方可投稿或公开发表。

学位论文作者签名：商晓婷

指导教师签名：孙世元

日 期：2017.5.31

日 期：2017.6.1

集装箱码头泊位-岸桥-集卡调度优化研究

摘要

集装箱码头是水陆运输的枢纽,在全球运输物流中起着重要作用.为降低集装箱码头的运营和管理成本,提高码头资源作业效率是关键.集装箱码头的资源主要包括泊位、岸桥、集卡等,各个资源之间的作业具有紧密的联系.因此,对于各种资源的集成优化进行研究是非常重要的和有意义的.本文从以下两个角度研究了集装箱码头的作业调度优化,主要包括:

(1)泊位和岸桥的集成优化研究.泊位和岸桥是集装箱码头的主要昂贵资源,并且具有紧密的作业联系.基于前辈学者的研究,我们将一些现实因素考虑在内,主要包括:理想泊位的偏差、岸桥作业之间的影响、岸桥移动所需的准备时间等.首先,我们建立了一个确定性的整数线性规划模型.然而岸桥是处于室外进行作业,环境不确定因素频繁发生,从而影响岸桥的作业效率.为了使计划调度可以吸收不确定性因素,随后我们提出了具有稳健性的鲁棒优化模型,从而使模型对不确定性因素具有免疫性.针对问题的计算复杂度,我们设计了遗传算法和插入启发式算法进行求解.

(2)岸桥和集卡的集成优化研究.岸桥的装卸作业和集卡的水平运输作业紧密衔接.前辈学者的研究一般采用集卡的单向循环,简单易行,但单向循环会增加空驶率和降低作业效率.针对这种现象,我们将集卡双循环策略引入岸桥和集卡的集成优化研究.从一个岸桥和多个集卡、多个岸桥和多个集卡两个角度,提出了整数线性规划模型.在多个岸桥和多个集卡的研究中,所建模型还考虑了一些现实因素:集装箱之间具有优先顺序、岸桥之间不可交叉、岸桥作业的安全距离等.针对问题的计算复杂度,我们设计了遗传算法进行求解,并进行数值计算.

综上所述,本文通过对集装箱码头的资源调度优化研究,建立了相应的资源集成优化模型,并设计了可行的求解算法.最后通过数值计

算进行验证,结果表明,该研究对提高集装箱码头的资源利用效率等提供了非常有价值的参考.

关键词: 集装箱码头;泊位;岸桥;集卡;鲁棒优化;遗传算法

THE INTEGRATED OPTIMIZATION OF BERTH-QUAY CRANE-YARD TRUCK IN CONTAINER TERMINALS

ABSTRACT

Container terminal is the key hub of water and land transportation, which plays an important role in the global transportation logistics. In order to reduce the operation and management cost of container terminals, the key strategy is to improve the efficiency of resource operation. The main resources of container terminals are berth, quay crane, yard truck, etc, and the operations of them have closed relationship. So it is very important and meaningful to study the integrated optimization of various resources. This paper studies the operations of container terminals from the following two main problem:

1) The integrated optimization of berth and quay crane. Berth and quay crane are the main expensive resources of container terminals, and the work of them are connected closely. Based on previous studies, we will consider some realistic factors, including the berth deviation, the operation influence of quay cranes, the quay crane setup time, etc. Firstly, we propose a deterministic integer linear programming model. However, due to the outdoor operation of quay crane, the uncertain data occurs frequently, which will have a non-negligible effect to the efficiency of quay crane. To make the planned schedule absorb these uncertain data, we then put forward robust optimization models to grant the planned schedule immunity. In view of the computational complexity of the problem, we design a genetic algorithm and an insertion heuristic algorithm to

obtain solutions.

2) The integrated optimization of quay crane and yard truck. The loading and unloading operations of quay cranes have a osculatory connection with the transportation of yard trucks. Previous researches generally used the single-strategy of yard truck, which will increase the empty running rate and reduce the operation efficiency. Based on this phenomenon, we will introduce the dual-strategy of yard truck into the integrated optimization of quay crane and yard truck. This paper proposes an integer linear programming model for the case of one quay crane, and another for the case of multiple quay cranes. In the case of multiple quay cranes, the model considers some practical factors, the priority sequence of container terminals, the quay crane interference, the safety distance between two adjacent quay cranes, etc. From the computational complexity, we design genetic algorithms to obtain solutions, and conduct numerical experiments.

In summary, by studying the integrated optimization of container terminal resources, this paper establishes respective models and designs feasible solution algorithms. Besides, numerical experiments are shown to verify that the research provides a very valuable reference to increase the operation efficiency of container resources.

KEYWORDS: container terminals; berth; quay crane; yard truck; robust optimization; genetic algorithm

目 录

中文摘要	I
英文摘要	III
目录	V
第一章 绪论	1
1.1 研究的背景	1
1.2 研究问题的描述	2
1.3 国内外研究现状	3
1.3.1 泊位分配	4
1.3.2 岸桥分配和调度	5
1.3.3 运输车辆调度	6
1.3.4 资源整合优化研究	7
1.3.5 不确定性优化研究	8
1.4 既有研究总结	9
1.5 本文内容安排	9
第二章 研究涉及理论基础	11
2.1 遗传算法	11
2.1.1 编码	11
2.1.2 遗传算子	12
2.2 鲁棒优化	13
第三章 泊位-岸桥整合优化	16
3.1 问题描述	16
3.2 问题假设	17
3.3 模型建立	17
3.3.1 确定性模型建立	19
3.3.2 鲁棒优化模型	21

3.3.3	带有价格约束的鲁棒优化模型	21
3.3.4	模型转化	22
3.3.5	约束违反概率边界	23
3.4	遗传算法	25
3.4.1	染色体表示	25
3.4.2	初始化	26
3.4.3	解码和适应度评价	26
3.4.4	选择	27
3.4.5	交叉	28
3.4.6	变异	28
3.5	插入启发式算法	28
3.5.1	插入启发式算法的一个算例	29
3.5.2	QC资源水平和空间转移	32
3.6	数值计算	34
3.6.1	算例基准和参数设置	34
3.6.2	算例计算结果和分析	35
3.6.3	Γ_i 对实验结果的影响	41
3.6.4	约束违反概率边界	41
3.7	本章结论	42
第四章 岸桥集卡的集成优化研究		44
4.1	问题描述	44
4.2	问题假设	45
4.3	一个QC和多个YT	45
4.3.1	模型建立	45
4.3.2	遗传算法	49
4.3.3	数值计算	51
4.4	多个QC和多个YT	51
4.4.1	模型建立	54
4.4.2	遗传算法	57
4.4.3	数值计算	60

4.5 本章小节	63
第五章 总结与展望	64
参考文献	66
作者攻读硕士期间的研究成果	71
致谢	72

第一章 绪论

§1.1 研究的背景

在经济全球化和一体化的大背景下,企业面临的市场竞争越来越激烈.传统的获利领域—资源领域和人力领域,其增值潜力空间越来越狭窄.此时,在经济的刺激下,世界交通运输物流领域快速持续发展,成为继资源领域和人力领域的又一获利领域.为了保持和更新企业的竞争优势,企业着手于挖掘物流运输的潜在利润.作为历史最为悠久的远距离运输方式之一,水路运输一直以其运费低、运载量大的特点受到个人和企业的青睐.其中,现代国际物流有80%左右是通过海运完成.由此可见,发达的航运业对国际贸易的发展发挥着至关重要的作用.为了实现成本低、时间短、安全便捷的特点,自上世纪50年代中期以来,现代集装箱运输得到了蓬勃的发展.随着国际大环境的稳定、国内外经济的快速发展、国内政策改革开放等的进一步实施,国际贸易得到迅猛的发展,随之而来,集装箱的吞吐量的增长势头愈发迅速.近年来,我国集装箱的吞吐量已经成功超越美国,居世界首位.中港网发布的2015年全球十大集装箱港吞吐量统计排名中,中港港口包揽七席,完成世界集装箱吞吐量的69.53%.

集装箱运输在运输和物流产业都处于重要位置,并且集装箱码头在多式联运网中占据了不可或缺的地位.集装箱运输是一项复杂的系统工程,它包括运输船队、集疏运网络、中转站场等.集装箱港口的竞争力取决于地理位置、腹地经济条件等客观因素和港口的技术条件、作业效率和服务水平等主观因素.要在新一轮的港口竞争中取得优势,港口的物流作业必须系统化、合理化,进而提供优质的服务水平并且提高码头的利益收入.

提高集装箱码头作业效率的措施主要有两方面:一是增加码头作业设备的数量,二是提高既有设备的作业效率.增加作业设备数量是应对集装箱吞吐量迅速增加的可行途径,但是增加作业设备数量除增加投资运营成本外,对码头陆域纵深长度、陆域运输能力等都提出

了更高的要求.此外,目前我国的码头单位作业设备数量配备情况均高于欧美国家.因此,在作业设备数量一定的条件下,合理地配置资源进行装卸作业是提高码头作业效率的有效途径.

§1.2 研究问题的描述

集装箱港口是远洋运输和内陆运输的枢纽,既为集装箱运输系统提供集散站,又为转换集装箱运输方式提供缓冲池.在港口区域,不仅有货主、货运代理、船东、船舶代理等公司,还有商品批发零售商、产品的包装公司、以及陆上运输公司、海关、商检等各种企业、机构等.集装箱港口俨然已成为分拨中心、配送中心和物流加工中心,提供仓储、装卸、包装、运输、加工、配送等一系列服务.集装箱码头是港口的前沿,主要负责集装箱装卸、临时堆存和集装箱的提接等.集装箱码头系统主要包括闸口检验系统、堆场作业系统、岸边作业系统、港内运输系统等.闸口检验系统负责对进出港车辆和集装箱进行检验登记;堆场作业系统用来负责集装箱的核查、堆码、提取以及暂存;港内运输系统负责堆场和岸边的对接;岸边作业系统用来处理船舶的停靠和装卸.集装箱码头的主要资源包括泊位(Berth)、岸桥(Quay Crane, QC)、集卡(Yard Truck, YT)、堆场空间(Yard Space)、场吊(Yard Crane)等.本文主要研究泊位、岸桥、集卡等设备的整合优化调度问题.

集装箱码头的业务主要包括进口和出口集装箱,如图 1.1 所示.在进口集装箱物流作业中,码头的主要任务是岸桥卸载集装箱,集卡从岸边运送集装箱至堆场,由场桥完成卸载暂存至堆场,最后待货主取货时再由场桥装载集装箱完成交付.在出口集装箱物流作业中,码头的主要任务是接受集装箱,由场桥完成卸载暂存至堆场,待到达出口时间再由场桥装载至集卡运输至岸边,最后岸桥完成对集装箱的装载.

与其他生产制造业相比,集装箱码头的特点一协调性、动态性、不确定性,对码头作业提出了更高的要求.协调性主要是由于多种运输方式的交汇,作业过程涉及多个机构和组织;动态性主要由于各种信息随时间经常变化,如船期、天气等;不确定性主要是由于调度涉

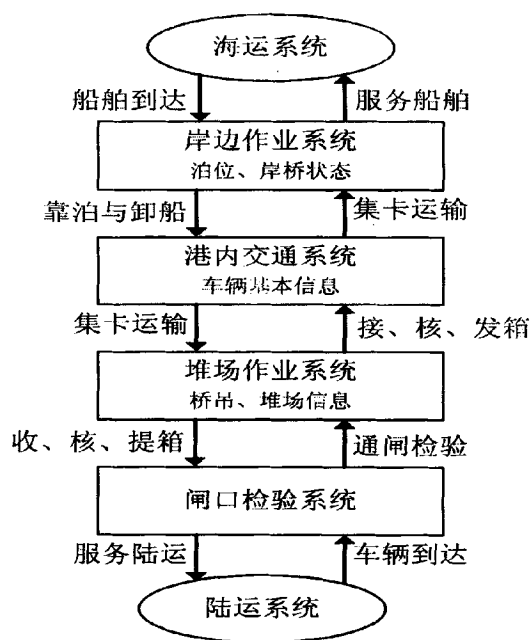


图 1.1: 集装箱码头物流链

Fig. 1.1: The of container terminals

及多种不确定因素,如到港时间、作业效率、港内拥堵等.

通过上述对问题的描述分析发现,集装箱码头是由多部门多层次连续作业的生产部门.因此,对集装箱码头的资源进行整合化的优化研究是企业 and 学术界需解决的重要问题.此外,任何系统中都存在随机性、模糊性等不确定因素,而这些随机因素可能会对决策产生重要的影响,这些问题也不免出现在集装箱码头.所以,在整合调度的基础上应该适当将不确定因素考虑在内并做出相应的策略调整.

§1.3 国内外研究现状

随着国内外集装箱码头建设的现代化水平的提高,企业对集装箱码头的进出口作业模式提出了新的要求.关于如何对码头资源进行合理地配置和管理,近年来国内外企业和学者们都做了很多研究^{[1][2][3]}.

§1.3.1 泊位分配

泊位空间是码头的重要稀缺资源之一,因此泊位分配问题 (Berth Allocation Problem, BAP) 对码头作业影响颇为重要.若泊位分配不合理,将会带来巨大的经济损失.为此,国内外很多学者对 BAP 做了深入的研究.根据泊位的不同布局, BAP 形成了离散型 BAP 和连续型 BAP.在离散型泊位中,岸线被分割成若干区间段,即泊位.同一时间内,仅可停泊一艘船只,如图 1.2(a) 所示.在连续型泊位中,岸线没有明显的泊位界线,船只可以停泊在满足物理限制的任意位置,如图 1.2(b) 所示.根据是否考虑船只的到达时间, BAP 形成了静态 BAP 和动态 BAP.在静态 BAP 中,船只的到达时间是在计划周期之前,在构建模型时可以不考虑到达时间.在动态 BAP 中,已知船只的到达时间,但时间是在计划周期之内,在构建模型时,船只的停泊时间应在到达时间之后.

文献 [4] 针对香港国际码头的资源充分利用问题,提出了一个离散

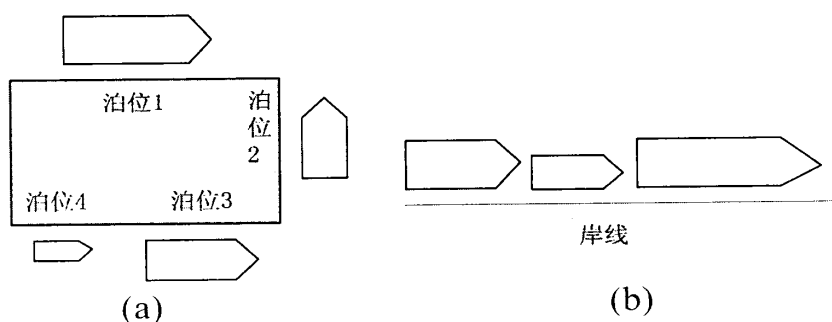


图 1.2: 泊位系统

Fig. 1.2: The systems of berth

BAP 模型,并设计了一种启发式算法来求解这个问题.文献[5]将船只的优先顺序考虑在内,以最小化的等待时间和作业时间之和为目标函数,研究了静态离散 BAP 问题.随后,文献 [6] 提出了一个与 [5] 具有同样目标函数的动态 BAP,并设计出 Lagrange 松弛算法进行求解.文献 [7] 研究了连续 BAP 问题,提出了一个以最小化的惩罚函数为目标的混合整数规划模型.在此研究中,惩罚函数包括由于船只离港的延迟所增加的花费和由于船只与理想泊位发生偏离所导致的额外作业花费.为了解

决这个问题,他们提出了一个模拟退火算法来获得问题的最优解.文献[8]研究了动态离散BAP问题,将这个问题视为一个带有时间窗的多站点车辆路径问题.文献[9]研究了具有缩进泊位的多功能集装箱码头的BAP,并设计遗传算法(Genetic Algorithm, GA)进行求解.文献[10]以最小化的加权的每个船只的完工时间为目标函数,研究了动态连续BAP问题,并提出了两种贪婪随机自适应方法用来搜索近似最优解.

§1.3.2 岸桥分配和调度

岸桥分配问题(Quay Crane Assignment Problem, QCAP)是指在可行的泊位基础上,根据船舶作业量的大小分配给各船只岸桥进行装卸作业.由于所分配的岸桥数量会严重影响船只的在泊时间,因此很多学者将BAP和QCAP一起进行研究.岸桥调度问题(Quay Crane Scheduling Problem, QCSP)需要确定分配给船只的每个岸桥的作业范围,起始时间和结束时间.

文献[11]在假设船只被划分为不同的贝位,并且每个岸桥只能同时服务一个贝位的基础上,以最小化的延迟最小花费为目标函数研究了QCSP.文献[12]提出了一个混合整数规划模型用以研究QCSP,设计了分支定界算法来求得问题的近似最优解,并设计了一个启发式搜索算法来克服计算复杂度.文献[13]研究QCSP时,提出了带有干扰约束的修正优化模型,并设计出一个应用分支定界算法来搜索子集的启发式求解算法.文献[14]将每个贝位的优先顺序考虑在内,为QCSP提出了一个混合整数模型,并采用一个近似算法来求得问题的近似最优解.文献[15]考虑了非干扰约束的两个岸桥的调度问题,并提出GA来求解这个问题.文献[16]给出了一个较为简单的混合整数模型来解决QCSP,并给出了数值计算分析.随后,文献[17]针对[16]提出的问题,提出了一个分支定界算法.文献[18]提出了一个混合整数规划模型用以处理缩进泊位的基于分组的QCSP,以最小化的任务完工时间作为目标函数,并设计了分解启发式算法和禁忌搜索算法来进行求解.此外,该研究还考虑了两个不同的特征:一是在缩进泊位中,岸桥可以从船只的两侧同时服务船只;二是装卸任务的作业时间取决于分配给的岸桥数量.

§1.3.3 运输车辆调度

水平运输设备调度就是在泊位和岸桥调度之后,利用集卡完成集装箱从船舶到后方堆场的空间转移.常见的水平运输设备包括YT、叉车(Straddle Carrier, SC)、自动引导车(Automated Guided Vehicle, AGV)、自动提升车(Automated Lift Vehicle, ALV)等.目前港内运输车辆的优化研究主要是对YT和AGV的调度,主要包括数量的分配和路径的优化.

随着码头吞吐量的飞速增长,经营管理者为了节约劳动力成本并提高作业效率,着手于提高码头的自动化水平,采用高度自动化集成的装卸和搬运设备.在自动化码头中,经常采用的是AGV进行水平搬运.文献[19]利用仿真模型比较了自动化码头的4种不同AGV分派准则.文献[20]提出了一个前瞻AGV分派方法,以最小化的AGV行程时间和岸桥的等待时间为目标函数,并设计出启发式算法来解决这个问题.文献[21]研究了在自动化码头中的AGV行驶路线和作业调度的优化.

在集卡调度(Yard Truck Scheduling Problem, YTSP)研究中,从运作模式的角度分为作业线模式和作业面模式:从循环策略的角度分为单循环和双循环.作业线模式又称为静态分配模式,是指分派一个车队特定服务于某一岸桥,各岸桥之间不能共享YT.作业面模式又称为动态分配模式,是指将所有YT车队在所有岸桥之间共享,可以缩短YT的空驶距离,提高作业效率.图1.3给出了YT作业单循环策略和双循环策略的区别.单循环策略的一个回路中是由一次空载和一次满载构成,简单便于遵守;而双循环策略的一个回路是由两次满载构成,明显降低了空驶率,提高了YT运输效率.文献[22]以最小化的作业时间研究了YT分派问题,并设计了GA来求得问题的近似最优解.文献[23]在作业时间依赖于作业顺序的基础上研究了YT分派问题.文献[24]为YT分派问题提出了一个整数规划模型,并设计了GA搜索问题的近似最优解.将在高峰时期改变YT的到达时间的难度以及YT的等待花费考虑在内,[25]提出了一个分散决策模型,并使用Lingo解决了这个非线性模型.

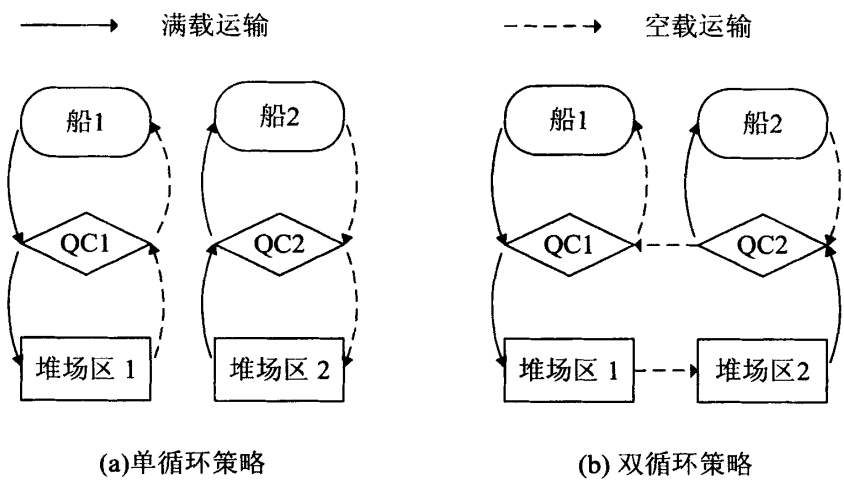


图 1.3: YT 循环策略

Fig. 1.3: The strategies of YTs

§1.3.4 资源整合优化研究

泊位-岸桥整合优化研究. 泊位和岸桥两类资源的分配和使用具有相关性, 岸桥的分配必须与停泊计划相协调, 船只的停泊时间取决于岸桥的能力分配. 对于 BAP 和 QCAP 的整合优化研究称为泊位岸桥集成调度问题 (Berth Allocation and Quay Crane Assignment Problem, BACAP). 文献 [26] 首先提出并研究了 BACAP 问题, 以最小化的总作业成本为目标函数建立了一个整数规划模型. 该模型是基于船只的停泊时间与所分配的岸桥数量呈反比的假设, 并由一个两阶段的求解过程解决. 文献 [27] 以最小化的总服务时间为目标函数研究了 BACAP, 在作业的过程中允许岸桥数量的变化. 鉴于问题的复杂性, 他们提出了基于 GA 的启发式算法获取近似最优解. 文献 [28] 研究 BACAP 时, 将一些现实的因素考虑在内, 例如分配给同一船只的岸桥边际效率的下降、由实际泊位与理想泊位产生的偏差引起的作业时间的增加. 为了解决这个问题, 他们提出了一种启发式算法, 一种局部优化策略和两种超启发式算法. 文献 [29] 提出了一个 BACAP 的混合整数模型, 并设计 GA 来求得问题的近似最优解. 文献 [30] 以最小化的到达船只的加权服务时间为目标函数解决 BACAP, 并设计 GA 算法进行求解. 文献 [31] 以最小化的花费和最大化

的 QC 价值为目标函数,提出了一种解决策略化 BAP 的方法 (BACAP). 为了得到计算时间短、质量高的解,他们设计了一种有偏随机 GA. 文献 [32] 提出了一种新颖的推广的集合分割公式继续 [28] 的研究,考虑了时变和非时变的岸桥分配策略. 文献 [33] 提出了一个非线性的混合整数模型研究连续的 BAP 和带有 QC 覆盖范围的 QCAP,并利用一种新颖的基于时空冲突分析的启发式算法得到高质量的泊位-岸桥计划. 文献 [34] 研究了泊位分配,带有 QC 准备时间的允许时变 QC 分配和调度. 他们将泊位偏离的额外花费考虑在目标函数内,并设计了剪枝计划步骤进行求解. 关于 BACAP 更多的研究及变形请参考 [32] 和 [35].

岸桥-集卡整合优化研究. 集装箱码头经常依据 QC 的分配和调度情况来分派 YT, QC 的作业顺序决定了 YT 的作业流程; YT 的作业效率又会反过来影响 QC 的作业效率和总的服务时间. 对 QCSP 和 YTSP 的整合优化研究称为岸桥集卡集成调度问题 (Quay Crane and Yard Truck Problem, QCYTP). 文献 [36] 研究了装卸同时进行的 QCYTP, 以最小化的作业时间为目标函数建立了协同优化模型,并设计了 GA 进行求解. 文献 [37] 研究了只考虑一个 QC 的 QCYTP,并设计了 GA 进行求解. 基于 [37] 的基础上, [38] 设计出一种 GA 和一种改进 Johnson 规则的启发式算法来求解,给出了两种闭合下界用以估计解的精确性. 文献 [39] 以最小化的进口集装箱的完工时间为目标函数的混合整数线性规划模型用以处理 QCYTP,并设计了一种改进的粒子群优化算法进行求解. 文献 [40] 基于混合流水车间调度的基础上,提出了一种新的 QCYTP 数学模型,并设计出一种结合贪心算法的 GA 进行求解.

§1.3.5 不确定性优化研究

社会和生产系统存在很多复杂性和不确定的信息和问题. 随着问题复杂性和规模扩大性的增加,系统的精确性和有效性会降低,不确定性和模糊性会随之上升. 码头资源的作业环境大部分是在室外,尤其是 QC,很多情况下环境的变化是超出控制范围的. 此时,码头设备的工作效率会严重受到外部不确定因素的影响,例如环境的温度、湿度、盐碱度、冰雪、风力等. 这些不确定因素可能会使原定计划无效,

但它们却又是不可避免的.

文献[41]以最小化的船只平均等待时间为目标函数在随机性的环境下研究了BACAP,并设计GA搜索最优解.文献[42]提出了一个多目标模型来处理船只作业时间随机的BAP,并提出一种基于GA的启发式算法和一种剪枝算法求解这个问题.文献[43]研究了船只的到达时间和作业时间都具有不确定性的BAP,并设计启发式算法进行求解.文献[44]研究不确定的BACAP时提出了一个具有两个目标函数的模型,最小化的总服务时间和最大化的鲁棒性,并设计GA进行求解.文献[45]研究了船只作业时间不确定的策略型BAP时提出了两种随机模型来处理不确定性,并设计了一些超启发式算法进行求解.文献[46]研究了岸边作业具有随机性的BAP, QCAP和QSCP,提出了一个随机规划模型,并设计了分解算法进行求解.

§1.4 既有研究总结

集装箱码头的优化研究已经受到国内外学者的广泛关注.通过对以上研究的总结,可以发现:对集装箱码头资源调度优化研究的数量颇多,范围颇广,但仍然存在一些不足.对于BACAP,考虑QC准备时间和工作效率不确定的研究非常有限;对于QCYTP,考虑QC作业的实际约束和双循环的YT策略的研究也非常有限.然而这些因素对于作业计划调度都是非常重要的.针对以上两个亟需解决的问题,本文对集装箱码头的资源整合优化做出了系统的研究,以便弥补目前研究的不足.

§1.5 本文内容安排

第一章 绪论.本章主要阐明了本文的研究背景、研究问题的描述.

国内外研究现状和对既有研究的总结.

第二章 理论基础.本章主要介绍了本文研究所需的理论基础:鲁

棒优化、遗传算法.

第三章 泊位和岸桥的整合调度优化研究. 本章主要研究了 BACAP 问题以及不确定条件下的 BACAP 问题, 提出了数学整数规划模型, 并设计了 GA 和插入启发式算法进行求解.

第四章 岸桥和集卡的整合调度优化研究. 本章主要研究了采用双循环策略的 QCYTP, 提出了数学整数规划模型, 并设计了 GA 进行求解.

第五章 总结与展望. 本章主要给出了本研究的总结和进一步的研究计划.

第二章 研究涉及理论基础

§2.1 遗传算法

GA是一种强有力且应用广泛的随即搜索和优化方法.在解决工业工程领域的优化问题上,GA的优势显而易见,并具有处理组合优化和调度问题的完整理论.近年来,有很多学者已经利用GA去求解港口优化问题,例如文献[30]利用GA去求解确定性的BACAP,文献[44]设计GA去求解不确定性下的鲁棒BACAP.

GA是在模拟达尔文的自然进化论和孟德尔的遗传变异论的自然界生物进化的生物学基础上,去求解最优值的一类自组织、自适应人工智能技术. GA对种群通过遗传机制模拟自然进化过程而不断产生新一代种群,并使新一代的种群有更好的性质^[47]. 一般来说,遗传算法有5个基本组成部分^[48]: 1)问题的解的遗传表示; 2)创建解的初始种群的方法; 3)根据个体适应值对其进行优劣判定的评价函数; 4)用来改变复制过程中产生的子个体遗传组成的遗传算子; 5)遗传算法的参数值.

§2.1.1 编码

编码问题即问题的遗传表示,是指将问题的解编码成为染色体.

根据使用何种符号作为基因的等位基因,常编码方式可分为二进制编码、实数编码、整数或字母排序编码等. 由于实数编码基因型空间中的拓扑结构与其表现型空间中的拓扑结构一致,实数编码比二进制编码及其他编码更为有效^[49]. 根据编码的结构可分为一维编码和多维编码. 一维编码在实践中较为常见,而多维编码在实际问题当中表示解比较自然.

每提出一种编码方式,就需要验证该编码是否能建立有效的搜索. 评价编码有效性的原则有: 不冗余、合法性、完备性、Lamarckian性质和因果性. 不冗余是指从编码到解的映射是一对一的; 合法性是指对编码的任意排列都对应着一个解; 完备性是指任意解都对应着一个编

码; Lamarckian 性质是指某个基因的等位基因的含义不依赖于其他基因; 因果性是指由于变异带来的基因型空间中的小扰动在表现型空间中也对应着小扰动.

§2.1.2 遗传算子

遗传算子主要包括选择、交叉、变异.

根据一定的选择算子, 从父代种群中挑选出来一代新的种群. 常用的选择方法有: 轮盘赌选择、锦标赛选择、稳态复制、排序与比例变换等. 其中, 文献 [50] 提出的轮盘赌选择是最常用、最有名的选择方式, 它的基本原理是根据每个染色体的适应值所占的比例来确定改个体的选择概率. 下面给出轮盘赌选择的基本步骤:

- 步 1: 产生一个 $[0,1]$ 的随机数 rd ;
- 步 2: 计算每一个染色体的适应值 $\text{fit}(c_i)$ 和整个种群的适应值之和 $\sum_i \{\text{fit}(c_i)\}$;
- 步 3: 计算每个染色体的选择概率 p_i : $p_i = \text{fit}(c_i) / \sum_i \{\text{fit}(c_i)\}$;
- 步 4: 计算每个染色体的累计概率 h_i : $h_i = \sum_{j=1}^i \{p_j\}$;
- 步 5: 如果 $rd < h_1$, 则选中第一个染色体, 否则选中第 i 个满足 $h_{i-1} < rd < h_i$ 的染色体.

交叉算子在 GA 中占有重要的位置, GA 的性能在很大程度上依赖于交叉算子的性能. 当产生的随机数小于预设的交叉概率时, 这个个体就被选中根据一定的交叉规则进行交叉操作. 常用的交叉规则有单点交叉、多点交叉、均匀交叉、顺序交叉等. 对于调度问题经常会用到排列编码, 而对于排列编码而言, 顺序交叉是避免非法子代的产生的常用交叉规则. 顺序交叉的主要步骤如下:

- 步 1: 从一个父代中随机选择交叉位置的集合;
- 步 2: 通过将集合的基因复制到与其子代相对应的位置上产生原型子代;
- 步 3: 将另一父代中去掉子代中已有的基因, 剩下的顺序包含了原型子代需要的基因;
- 步 4: 根据从左到右的顺序将剩余基因放入原型子代中的剩

余位置,产生一个子代.

变异算子是根据一定的变异概率通过改变一个或多个基因进行算法搜索.对于防止局部收敛和出现早熟现象,变异算子起了非常重要的作用.常用的变异方式有单点变异、交换变异、倒置变异、翻转变异、位移变异、基于局部搜索的变异等.

§2.2 鲁棒优化

无论是在可处理性上还是在可能性的边界上,鲁棒优化在处理不确定性的问题上都具有优势.对于可处理性,如果原问题在多项式时间内是可以解决的,那么它的鲁棒问题在多项式时间内也是可以解决的;对于可能性的边界,当不确定性系数符合一些自然概率分布时,可以找到一个确保鲁棒优化解可行的概率保证.

对于一般线性优化问题:

$$\begin{aligned} \max \quad & \mathbf{c}'\mathbf{x} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \\ & \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u}. \end{aligned} \quad (2.2.1)$$

其中,我们假设不确定性只对矩阵 \mathbf{A} 有影响,目标函数中的 \mathbf{c} 不受影响.

文献 [51] 给出了在不确定因素下的鲁棒优化模型:

$$\begin{aligned} \max \quad & \mathbf{c}'\mathbf{x} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_j a_{ij}x_j + \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij}y_j \leq b_i \quad \forall i \\ & -y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j \\ & \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \\ & \mathbf{y} \geq \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

其中 \hat{a}_{ij} 是不确定随机变量, J_i 是矩阵 \mathbf{A} 的第 i 行中受不确定因素影响的下标集合.

文献[51]给出的鲁棒模型有最高的保护性,但也具有最高的保守性,以致于鲁棒优化解的目标函数值较原问题差很多. 为了克服这种强保守性,文献[52]提出了以下鲁棒模型:

$$\begin{aligned}
 & \max \quad \mathbf{c}'\mathbf{x} \\
 & \text{s.t.} \quad \sum_j a_{ij}x_j + \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij}y_j + \Omega_i \sqrt{\sum_{j \in J_i} a_{ij}^2 z_{ij}^2} \leq b_i \quad \forall i \\
 & \quad -y_{ij} \leq x_i - z_{ij} \leq y_{ij} \quad \forall i, j \in J_i \\
 & \quad \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \\
 & \quad \mathbf{y} \geq \mathbf{0}
 \end{aligned} \tag{2.2.3}$$

文献[52]的鲁棒模型不再具有那么强的保守性,却将模型转化为了非线性模型,增加了求解和应用的难度. 为降低求解难度,文献[53]给出了一个具有低保守性的线性鲁棒优化模型:

$$\begin{aligned}
 & \max \quad \mathbf{c}'\mathbf{x} \\
 & \text{s.t.} \quad \sum_j a_{ij}x_j + z_i \Gamma_i + \sum_{j \in J_i} p_{ij} \leq b_i \quad \forall i \\
 & \quad z_i + p_{ij} \geq \hat{a}_{ij}y_j \quad \forall i, j \in J_i \\
 & \quad -y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j \\
 & \quad l_j \leq x_j \leq u_j \quad \forall j \\
 & \quad p_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in J_i \\
 & \quad y_j \geq 0 \quad \forall j \\
 & \quad z_i \geq 0 \quad \forall i
 \end{aligned} \tag{2.2.4}$$

其中, $\Gamma_i \in [0, |J_i|]$. 此外, [53] 还给出了约束违反的概率边界:

$$P\left(\sum_j \tilde{a}_{ij}x_j^* \geq b_i\right) \leq P\left(\sum_{j \in J_i} \gamma_{ij}\eta_{ij} \geq \Gamma_i\right) \leq \exp\left(-\frac{\Gamma_i^2}{2|J_i|}\right) \tag{2.2.5}$$

其中, $\tilde{a}_{ij} \in [a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$,

$$r^* = \arg \min_{r \in S_i^* \cup \{r_i^*\}} \hat{a}_{ir}|x_r^*|,$$

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} 1, & \forall j \in S_i^* \\ \frac{\hat{a}_{ij}|x_j^*|}{\hat{a}_{ir}|x_r^*|}, & \forall j \in J_i \setminus S_i^*. \end{cases}$$

第三章 泊位-岸桥整合优化

§3.1 问题描述

在实际情况中,岸桥沿岸线移动的速度非常缓慢,所以岸桥的准备时间在制定计划的过程中是不可忽略的.尤其在紧急情况、优先水平、长岸线、复杂的布局等情况下.此外,岸桥的准备时间会影响作业的开始时间和结束时间,因此会影响岸桥的分配甚至致使不可行的调度.本章将岸桥的准备时间考虑在内,提出了一个确定性的 BACAP 模型.

另外,岸桥的工作环境是在室外,因此岸桥的工作效率会受到一系列外部因素的影响,例如环境温度、湿度、盐碱度、冰雪、风力等.这些外部因素经常会发生,并且可能会使原调度无效.然而频繁的调度调整将会降低工作效率和提高花费.因此,提出一个可以对抗不确定因素的 BACAP 模型非常重要.本章给出了两种鲁棒模型处理岸桥效率不确定情况下的 BACAP.

在本文中,时间被划分为 1-h 为一个单位,岸线被划分为 10-m 为一个分段. BACAP 可以描述成一个时空的二维问题,如图 3.1 所示. 每个矩形的高度和宽度分别代表了船只的宽度和船只的被服务时间.每个小矩形的左下角的点代表了船只的停泊位置和作业开始时间.灰色的矩形块表示船只的岸桥分配,并且矩形的数量表示所分配的岸桥数量.从计算的复杂度而言,BAP 已经被证明为 NP 难问题^[36],则 BACAP 是一个更为复杂的问题.那么处理不确定的 BACAP 需要面临更为复杂的问题.要想有效求解大型 BACAP,提出有效的算法是非常必要的.

在本章的研究中,考虑到岸桥在岸线的移动时间,我们提出了一个确定性的 BACAP 模型.意识到经常出现的不确定性会导致确定性模型不可行,我们提出了两个鲁棒优化模型来处理不确定因素.考虑到问题的计算复杂度,我们提出了 GA 和插入启发式算法来获得问题的近似最优解,并通过实验算例表明,所提出的模型和算法皆有效.

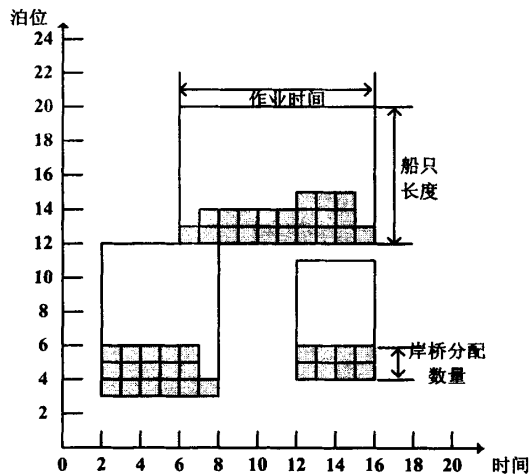


图 3.1: BACAP的一个例子解释

Fig. 3.1: An example illustration for BACAP

§3.2 问题假设

1. 船只的到达时间已知,作业时间晚于船只到达时间.
2. 为方便计算,连续的岸线和时间以固定的长度被分割.
3. 船只一旦靠泊,在作业完成之前将不得再移动.
4. 泊位连续,并且泊位的长度大于任何一艘船只的长度.
5. 在确定性的场景下,岸桥的作业效率没有差别.
6. 每一艘船只都有同时进行作业的最小和最大数量岸桥限制.

§3.3 模型建立

首先给出模型建立所需的符号.

输入数据:

-
- V 集装箱码头被服务船只的集合, $V = \{1, 2, \dots, N\}$, 其中 N 是船只的数量
- Q 可以同时作业的 QC 数量
- L 以 10-m 为单位的泊位段 (岸线的长度)
- T 以 1-h 为单位的时间段集合, $T = \{0, 1, \dots, H-1\}$, 其中 H 时间片段的数量
- T_1 集合 $\{0, 1, \dots, H-2\}$
- T' QC 工作效率受不确定因素影响的时间段集合
- l_i 船只 $i \in V$ 的长度, 以 10-m 为一个单位
- b_i^0 船只 $i \in V$ 的理想泊位
- m_i 船只 $i \in V$ 的岸桥需求量, 以一个岸桥时为单位
- r_i^{\min} 所商定的同时服务船只 $i \in V$ 的最小 QC 数量
- r_i^{\max} 所允许的同时服务船只 $i \in V$ 的最大 QC 数量
- R_i 船只 $i \in V$ 的 QC 可分配数量区间, $R_i = [r_i^{\min}, r_i^{\max}]$
- a_i 船只 $i \in V$ 的到达时间
- μ 加权系数, $\mu \in [0, 1]$
- α QC 效率干扰指数
- β 泊位偏离因素
- M 一个很大的正数
-

决策变量:

-
- b_i 整数, 船只 $i \in V$ 的泊位
- s_i 整数, 船只 $i \in V$ 的开始作业时间
- e_i 整数, 船只 $i \in V$ 的结束作业时间
- r_{it} 二进制数, 当在 $t \in T$ 时刻, 至少有一个 QC 分配给船只 $i \in V$ 进行作业时为 1, 其他情况为 0
- r_{itq} 二进制数, 在 $t \in T$ 时刻, 恰有 $q \in R_i$ 个 QC 分配给船只 $i \in V$ 进行作业时为 1, 其他情况为 0
- Δb_i 二进制数, 船只 $i \in V$ 的理想泊位和实际泊位之间的偏差
- $\Delta b_i = |b_i^0 - b_i|$
-

- w_{it} 整数, 在 $t \in T_1$ 时刻, 准备分配给船只 $i \in V$ 的 QC 数量
 u_{it} 二进制数, 在 $t \in T_1$ 时刻, 至少有一个 QC 准备分配给船只 $i \in V$ 时为 1, 其他情况为 0
 y_{ij} 二进制数, 如果船只 i 停泊在船只 j 的前面为 1, i.e., $b_i + l_i \leq b_j$, $\forall i, j \in V, i \neq j$, 其他情况为 0
 z_{ij} 二进制数, 如果船只 i 的结束时间不晚于船只 j 的开始时间时为 1, $\forall i, j \in V, i \neq j$, 其他情况为 0

船只的作业时间不仅受到泊位偏离的影响, 而且会受到所分配岸桥的相互干扰的影响. 根据文献 [54], 给定一个干扰指数 α , 分配给一个船只的 q 个 QC 的作业效率定义为 q^α 岸桥时. 给定一个泊位偏离因素 β , 岸桥的工作需求量为 $(1 + \beta \cdot \Delta b_i) \cdot m_i$, 因此所需的最短作业时间可表示为:

$$d_i^{\min} = \left\lceil \frac{1 + \beta \cdot \Delta b_i}{(r_i^{\max})^\alpha} \cdot m_i \right\rceil, \quad \forall i \in V. \quad (3.3.1)$$

§3.3.1 确定性模型建立

将 QC 的准备时间考虑在内, 建立确定性的 BACAP 模型 $[\mathcal{P}_1]$.

$$[\mathcal{P}_1] \quad \min Z_1 = \sum_{i \in V} [\mu(e_i - s_i) + (1 - \mu)(s_i - a_i)] \quad (3.3.2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{t \in T} \sum_{q \in R_i} q^\alpha \cdot r_{itq} \geq (1 + \beta \cdot \Delta b_i) \cdot m_i \quad \forall i \in V \quad (3.3.3)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{q \in R_i} q \cdot r_{itq} + \sum_{i \in V} w_{it} \leq Q \quad \forall t \in T_1 \quad (3.3.4)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{q \in R_i} q \cdot r_{i(H-1)q} \leq Q \quad (3.3.5)$$

$$\sum_{q \in R_i} r_{itq} = r_{it} \quad \forall i \in V, t \in T \quad (3.3.6)$$

$$M \cdot (1 - u_{it}) + \left[\sum_{q \in R_i} q \cdot r_{i(t+1)q} - \sum_{q \in R_i} q \cdot r_{itq} \right] \geq 1 \quad \forall i \in V, t \in T_1 \quad (3.3.7)$$

$$M \cdot u_{it} - \left[\sum_{q \in R_i} q \cdot r_{i(t+1)q} - \sum_{q \in R_i} q \cdot r_{itq} \right] \geq 0 \quad \forall i \in V, t \in T_1 \quad (3.3.8)$$

$$M \cdot (1 - u_{it}) + w_{it} \geq \sum_{q \in R_i} q \cdot r_{i(t+1)q} - \sum_{q \in R_i} q \cdot r_{itq} \quad \forall i \in V, t \in T_1 \quad (3.3.9)$$

$$-M \cdot (1 - u_{it}) + w_{it} \leq \sum_{q \in R_i} q \cdot r_{i(t+1)q} - \sum_{q \in R_i} q \cdot r_{itq} \quad \forall i \in V, t \in T_1 \quad (3.3.10)$$

$$-M \cdot u_{it} + w_{it} \leq 0 \quad \forall i \in V, t \in T_1 \quad (3.3.11)$$

$$\sum_{t \in T} r_{it} = e_i - s_i \quad \forall i \in V \quad (3.3.12)$$

$$(1 + t) \cdot r_{it} \leq e_i \quad \forall i \in V, t \in T \quad (3.3.13)$$

$$t \cdot r_{it} + H \cdot (1 - r_{it}) \geq s_i \quad \forall i \in V, t \in T \quad (3.3.14)$$

$$\Delta b_i \geq b_i - b_i^0 \quad \forall i \in V \quad (3.3.15)$$

$$\Delta b_i \geq b_i^0 - b_i \quad \forall i \in V \quad (3.3.16)$$

$$b_j + M \cdot (1 - y_{ij}) \geq b_i + l_i \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (3.3.17)$$

$$s_j + M \cdot (1 - z_{ij}) \geq e_i \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (3.3.18)$$

$$y_{ij} + y_{ji} + z_{ij} + z_{ji} \geq 1 \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (3.3.19)$$

$$b_i \in \{0, 1, \dots, L - l_i\} \quad \forall i \in V \quad (3.3.20)$$

$$s_i \in \{a_i, \dots, H - 1\}, e_i \in \{a_i, \dots, H\} \quad \forall i \in V \quad (3.3.21)$$

$$w_{it} \in \{0, 1, \dots, Q\} \quad \forall i \in V, t \in T_1 \quad (3.3.22)$$

$$u_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T_1, i \in V \quad (3.3.23)$$

$$r_{itq}, r_{it}, y_{ij}, z_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T, q \in R_i, i, j \in V, i \neq j \quad (3.3.24)$$

目标方程 (3.3.2) 是在给定加权系数 μ 后, 最小化计划期的所有船只的作业时间和等待时间的加权和. 约束 (3.3.3) 在考虑了 QC 干扰和泊位偏离的前提下, 确保了每个船只的岸桥需求量. 约束 (3.3.4)-(3.3.5) 确保了在同一时刻至多可以对 Q 个 QC 进行调度. 约束 (3.3.6) 保证了相应变量 r_{it} 和 r_{itq} 的连续分配. 约束 (3.3.7)-(3.3.11) 考虑了 QC 在岸线移动的准备时间, 约束 (3.3.7)-(3.3.8) 给出了变量 u_{it} 和 r_{itq} 的关系, 约束 (3.3.9)-(3.3.10) 给出了变量 w_{it} 和 r_{itq} 的关系, 约束 (3.3.11) 保证了若 $u_{it} = 0$, 则 $w_{it} = 0$. 约束 (3.3.12)-(3.3.14) 确定了不考虑优先顺序的作业开始时间和结束时间. 约束 (3.3.15)-(3.3.16) 是用来计算船只实际泊位与理想泊位的偏差. 约束 (3.3.17)-(3.3.19) 用来避免船只的时空交叉. 约束 (3.3.20)-(3.3.24) 给出了决策变量的取值范围.

§3.3.2 鲁棒优化模型

模型 $[P_1]$ 是一个将 QC 在岸线上移动的时间考虑在内的确定性模型. 然而, 由于由于不确定性导致的 QC 作业效率的变动可能会导致原计划的调度无效. 为了对抗 QC 作业效率的不确定性, 我们提出了一个鲁棒优化模型. 考虑到分配给同一船只的 q 个 QC 的平均作业效率是 q^α 岸桥时, 最大作业效率是 q 岸桥时, 最小的作业效率是 0 岸桥时. 因此, 我们假设: 岸桥作业效率是以 q^α 为均值, 误差为 $\hat{q} = \min\{q^\alpha, q - q^\alpha\}$ 的对称分布. 所以, 用 \bar{q} 表示在不确定条件下的实际 QC 作业效率, 并且 $\bar{q} \in [q^\alpha - \hat{q}, q^\alpha + \hat{q}]$. 引入辅助变量 $\chi_{itq}, \forall t \in T, q \in R_i, i \in V$, 来保证最高的鲁棒性. 约束 (3.3.3) 被转化为可以吸收不确定因素的鲁棒优化约束:

$$\sum_{t \in T} \sum_{q \in R_i} q^\alpha \cdot r_{itq} - \sum_{t \in T'} \sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot \chi_{itq} \geq (1 + \beta \cdot \Delta b_i) \cdot m_i, \quad \forall i \in V \quad (3.3.25)$$

$$\chi_{itq} \geq r_{itq}, \quad \forall t \in T, q \in R_i, i \in V. \quad (3.3.26)$$

随后, 我们可以得到鲁棒优化模型 $[P_2]$:

$$\begin{aligned} [P_2] \quad \min \quad & Z_2 = \sum_{i \in V} [\mu(e_i - s_i) + (1 - \mu)(s_i - a_i)] \\ \text{s.t.} \quad & (3.3.4) - (3.3.26). \end{aligned}$$

§3.3.3 带有价格约束的鲁棒优化模型

鲁棒优化模型 $[P_2]$ 通过保证在参数最坏的情况下的解的可行性来处理不确定性的 BACAP. 然而, 可行性经常以性能为代价, 鲁棒优化具有太多保守性. 为了解决这种过度保守性, 文献 [53] 提出了另外一个带有价格约束的鲁棒优化模型, 这个模型既是线性的又不会过分影响目标函数值. 价格约束 Γ_i 的引入是用来调节解的保守性水平, 它可以不是整数, 在区间 $[0, |T'|]$ 上取值, 其中 $|T'|$ 是集合 T' 的基数. 直观上讲, 就是允许 $\lfloor \Gamma_i \rfloor$ 个系数发生变化, 并且有一个系数变化 $(\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \cdot \hat{q}$. 用 η_i 表示由价格约束 Γ_i 决定的最大化的不确定性, S_i 表示基数等于 $\lfloor \Gamma_i \rfloor$ 的不确定性时刻的集合, χ_i 是属于集合 $T' \setminus S_i, \forall i \in V$ 的一个时刻. 基于文献 [53] 提出的一般情况, 由价格约束 Γ_i 决定的船只 i 的最大的不确定因素 η_i 可以表示为以下方程:

$$\eta_i(r_{itq}, \Gamma_i) = \max_{\{S_i \cup \{\chi_i\} \mid S_i \subseteq T', |S_i| = \lfloor \Gamma_i \rfloor, \chi_i \in T' \setminus S_i\}} \left\{ \sum_{t \in S_i} \sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot r_{itq} + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{q} \cdot r_{i\chi_i q} \right\}. \quad (3.3.27)$$

因此为了得到一个带有价格约束的鲁棒优化模型,约束 (3.3.25) 可以转化成约束 (3.3.28):

$$\sum_{t \in T} \sum_{q \in R_i} q^\alpha \cdot r_{itq} - \max_{\{S_i \cup \{x_i\} | S_i \subseteq T', |S_i| = \lfloor \Gamma_i \rfloor, x_i \in T' \setminus S_i\}} \left\{ \sum_{t \in S_i} \sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot x_{itq} + \sum_{q \in R_i} (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{q} \cdot x_{ixiq} \right\} \geq (1 + \beta \cdot \Delta b_i) \cdot m_i, \quad \forall i \in V. \quad (3.3.28)$$

§3.3.4 模型转化

为了得到一个线性优化模型,我们需要继续整理非线性约束 (3.3.28). 给定一个解 $\{r_{itq}^* | \forall t \in T, q \in R_i, i \in V\}$, 引入辅助变量 g_{itq} , $\forall t \in T, q \in R_i, i \in V$, 因此约束 (3.3.28) 的第 i 个保护方程 (3.3.29)

$$\eta_i(r_{itq}^*, \Gamma_i) = \max_{\{S_i \cup \{x_i\} | S_i \subseteq T', |S_i| = \lfloor \Gamma_i \rfloor, x_i \in T' \setminus S_i\}} \left\{ \sum_{t \in S_i} \sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot r_{itq}^* + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{q} \cdot r_{ixiq}^* \right\} \quad (3.3.29)$$

等价于下面的线性优化问题:

$$\eta_i(r_{itq}^*, \Gamma_i) = \max \left\{ \sum_{t \in T'} \sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot r_{itq}^* \cdot g_{itq} \right\} \quad (3.3.30)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{t \in T'} \sum_{q \in R_i} g_{itq} \leq \Gamma_i \quad (3.3.31)$$

$$0 \leq g_{itq} \leq 1, \quad \forall t \in T', q \in R_i. \quad (3.3.32)$$

我们引入对偶变量 $p_{itq}, v_{iq}, \forall t \in T', q \in R_i, i \in V$. 由强对偶性可知, 方程 (3.3.30)-(3.3.32) 的对偶问题可以表述为 (3.3.33)-(3.3.35), 并且两问题的目标函数值重合.

$$\min \quad \sum_{t \in T'} \sum_{q \in R_i} p_{itq} + \Gamma_i \cdot \sum_{q \in R_i} v_{iq} \quad (3.3.33)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{q \in R_i} v_{iq} + \sum_{q \in R_i} p_{itq} \geq \sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot r_{itq}^*, \quad \forall t \in T', i \in V \quad (3.3.34)$$

$$\sum_{q \in R_i} p_{itq} \geq 0, \sum_{q \in R_i} v_{iq} \geq 0, \quad \forall t \in T', i \in V. \quad (3.3.35)$$

因此, 约束 (3.3.29) 的等价线性形式可以表示成约束 (3.3.34)-(3.3.36).

$$\sum_{t \in T} \sum_{q \in R_i} q^\alpha \cdot r_{itq} - \Gamma_i \cdot \sum_{q \in R_i} v_{iq} - \sum_{t \in T'} \sum_{q \in R_i} p_{itq} \geq (1 + \beta \cdot \Delta b_i) \cdot m_i, \quad \forall i \in V \quad (3.3.36)$$

所以,我们得到了带有价格约束的线性鲁棒优化模型 $[\mathcal{P}_3]$:

$$\begin{aligned}
 [\mathcal{P}_3] \quad & \min Z_3 = \sum_{i \in V} [\mu(e_i - s_i) + (1 - \mu)(s_i - a_i)] \\
 \text{s.t.} \quad & (3.3.4) - (3.3.24), (3.3.26), (3.3.36) - (3.3.37) \\
 & \sum_{q \in R_i} v_{iq} + \sum_{q \in R_i} p_{itq} \geq \sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot x_{itq}, \quad \forall t \in T', i \in V. \quad (3.3.37)
 \end{aligned}$$

§3.3.5 约束违反概率边界

在 3.4 节中提到,当有 $[\Gamma_i]$ 个系数发生改变,一个系数改变 $(\Gamma_i - [\Gamma_i]) \cdot \hat{q}$ 时,模型 $[\mathcal{P}_3]$ 的解仍然可行.在本小节中,我们将进一步提出即使超过 $[\Gamma_i]$ 个系数发生变化,模型 $[\mathcal{P}_3]$ 的解也依然具有高概率的可行性.

我们定义随机变量 $\xi_{it} = (q^a - \hat{q})/\hat{q} \in [-1, 1], \forall i \in V, t \in T'$, 服从某个未知的对称分布.基于文献 [53] 给出的一般形式,下面的定理给出了约束违反的概率边界,并证明了模型 $[\mathcal{P}_3]$ 的鲁棒性.

定理 $\{r_{it}^* | \forall t \in T, q \in R_i, i \in V\}$ 是优化模型 $[\mathcal{P}_3]$ 的一个解. S_i^* 和 χ_i^* 分别是使方程 (3.3.29) 达到最大值的集合和时刻.违反约束 (3.3.25) 的第 i 个约束的概率满足:

$$P\left(\sum_{t \in T} \sum_{q \in R_i} \tilde{q} \cdot r_{itq} < (1 + \beta \cdot \Delta b_i) \cdot m_i\right) \leq P\left(\sum_{t \in T'} \sum_{q \in R_i} \gamma_{it} \cdot \xi_{itq} \geq \Gamma_i\right) \leq \exp\left(-\frac{\Gamma_i^2}{2|T'|}\right) \quad (3.3.38)$$

其中,

$$\gamma_{it} = \begin{cases} 1, & t \in S_i^* \\ \frac{\sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot r_{itq}^*}{\sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot r_{it\lambda^*q}^*}, & t \in T' \setminus S_i^* \end{cases}$$

和

$$\lambda^* = \arg \min_{\lambda \in S_i^* \cup \{\chi_i^*\}} \hat{q} \cdot r_{i\lambda q}^*.$$

证明.

$\{r_{it}^* | \forall t \in T, q \in R_i, i \in V\}, S_i^*$ 和 χ_i^* 是模型 $[\mathcal{P}_3]$ 的解. 首先, 不等式 (3.3.38) 的左半部分的证明如下:

$$\begin{aligned}
 & P\left(\sum_{t \in T} \sum_{q \in R_i} \tilde{q} \cdot r_{itq}^* < (1 + \beta \cdot \Delta b_i) \cdot m_i\right) \\
 &= P\left(\sum_{t \in T} \sum_{q \in R_i} q^\alpha \cdot r_{itq}^* - \sum_{t \in T'} \sum_{q \in R_i} \xi_{it} \cdot \hat{q} \cdot r_{itq}^* < (1 + \beta \cdot \Delta b_i) \cdot m_i\right) \\
 &\leq P\left(\sum_{t \in S_i^*} \sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot r_{itq}^* + \sum_{q \in R_i} (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{q} \cdot r_{i\lambda_i^* q}^* < \sum_{t \in T'} \sum_{q \in R_i} \xi_{it} \cdot \hat{q} \cdot r_{itq}^*\right) \quad (3.3.39)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= P\left(\sum_{t \in S_i^*} \sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot r_{itq}^* \cdot (1 - \xi_{it}) + \sum_{q \in R_i} (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{q} \cdot r_{i\lambda_i^* q}^* < \sum_{t \in T' \setminus S_i^*} \sum_{q \in R_i} \xi_{it} \cdot \hat{q} \cdot r_{itq}^*\right) \\
 &\leq P\left(\sum_{t \in S_i^*} \sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot r_{i\lambda_i^* q}^* (1 - \xi_{it}) + \sum_{q \in R_i} (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{q} \cdot r_{i\lambda_i^* q}^* < \sum_{t \in T' \setminus S_i^*} \sum_{q \in R_i} \xi_{it} \cdot \hat{q} \cdot r_{itq}^*\right) \quad (3.3.40)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\leq P\left(\sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot r_{i\lambda_i^* q}^* \left(\sum_{t \in S_i^*} (1 - \xi_{it}) + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor)\right) < \sum_{t \in T' \setminus S_i^*} \sum_{q \in R_i} \xi_{it} \cdot \hat{q} \cdot r_{itq}^*\right) \\
 &= P\left(\Gamma_i < \sum_{t \in T' \setminus S_i^*} \frac{\sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot r_{itq}^*}{\sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot r_{i\lambda_i^* q}^*} \cdot \xi_{it} + \sum_{t \in S_i^*} \xi_{it}\right) \\
 &= P\left(\Gamma_i < \sum_{t \in T' \setminus S_i^*} \xi_{it} \cdot \gamma_{it}\right).
 \end{aligned}$$

不等式 (3.3.38) 的右半部分提供了一个不依赖于解 $\{r_{itq}^* \mid \forall t \in T, q \in R_i, i \in V\}$ 的上界, 证明如下:

令 $\theta > 0$. 然后

$$P\left(\sum_{t \in T'} \xi_{it} \cdot \gamma_{it} \geq \Gamma_i\right) \leq \frac{E\left[\exp\left(\theta \cdot \sum_{t \in T'} \xi_{it} \cdot \gamma_{it}\right)\right]}{\exp(\theta \cdot \Gamma_i)} \quad (3.3.41)$$

$$= \frac{\prod_{t \in T'} E[\exp(\theta \cdot \xi_{it} \cdot \gamma_{it})]}{\exp(\theta \cdot \Gamma_i)} \quad (3.3.42)$$

$$= \frac{\prod_{t \in T'} 2 \int_0^1 \sum_{k=0}^{\infty} [(\theta \cdot \gamma_{it} \cdot \xi)^{2k} / (2k)!] dF_{\xi_{it}}(\xi)}{\exp(\theta \cdot \Gamma_i)} \quad (3.3.43)$$

$$\begin{aligned}
 & \leq \frac{\prod_{i \in T'} \sum_{k=0}^{\infty} \left[(\theta \cdot \gamma_{ii})^{2k} / (2k)! \right]}{\exp(\theta \cdot \Gamma_i)} \\
 & \leq \frac{\prod_{i \in T'} \exp(\theta^2 \cdot \gamma_{ii}^2 / 2)}{\exp(\theta \cdot \Gamma_i)} \\
 & \leq \exp\left(|T'| \cdot \frac{\theta^2}{2} - \theta \cdot \Gamma_i\right). \tag{3.3.44}
 \end{aligned}$$

□

注.

1. 由不等式 (3.3.28) 得到不等式 (3.3.39), 因为 r_{iiq}^* 满足

$$\sum_{i \in T} \sum_{q \in R_i} q^\alpha \cdot r_{iiq}^* - \left\{ \sum_{i \in S_i^+} \sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot x_{iiq} + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \sum_{q \in R_i} \hat{q} \cdot x_{ixiq} \right\} \geq (1 + \beta \cdot \Delta b_i) \cdot m_i, \quad \forall i \in V.$$

2. 不等式 (3.3.40) 满足 $1 - \xi_{ii} \geq 0$ 和 $\lambda^* = \arg \min_{\lambda \in S_i^+ \cup \{x_i^*\}} \hat{q} \cdot r_{iiq}^*$.

3. 不等式 (3.3.41) 满足 Markov 不等式. 等式 (3.3.42)-(3.3.43) 满足随机变量 ξ_{ii} 的独立正态分布假设. 不等式 (3.3.44) 满足 $\gamma_{ii} \leq 1$. 取 $\theta = \Gamma_i / |T'|$, 便可得到不等式 (3.3.38) 的右半部分.

§3.4 遗传算法

由于前文已经详细介绍了 GA, 下面直接给出适合本问题的 GA 详细过程.

§3.4.1 染色体表示

在本小节的研究中, 可能性的解采用非负实数的编码机制. 第一行染色体表示船只的排列, 第二行表示泊位, 第三行表示最小的岸桥分配限制 r_i , 在区间 $[r_i^{\min}, r_i^{\max}]$ 上取值. 需要指出的是在作业期间船只可能会有不同的 QC 数量分配. 因此每一时刻的 QC 数量在区间 $[r_i, r_i^{\max}]$ 上随机取值. 图 3.2 给出了一个染色体结构的示例, 可以看出船只的排列顺序是 (5, 4, 3, 6, 1, 2), 泊位分别是 (4, 9, 1, 15, 23, 12), 最小化的 QC 分配限制分别是 (3, 2, 2, 1, 2, 3).

船只序列	5	4	6	6	1	2
船只泊位	4	9	1	15	23	12
QC限制	3	2	2	1	2	3

图 3.2: 染色体结构示例

Fig. 3.2: An example of the chromosome structure

§3.4.2 初始化

GA 以一群初始化的个体作为第一代. 为了简化第一代染色体的生成, 一系列随机产生的染色体被当作第一代. 船只的排列是一个随机的序列; 泊位在区间 $[0, L - l_i]$ 内随机产生; 最小的 QC 分配限制在区间 $[r_i^{\min}, r_i^{\max}]$ 内随机产生. 第一代的所有染色体的产生都依据这个规则, 直到染色体的数量达到种群的大小初始化结束.

§3.4.3 解码和适应度评价

根据染色体的结构, 船只的排列被用作派遣规则. 因此, 我们使用以下解码方法: 按照染色体的顺序, 从左到右地依次访问基因. 由于 QC 的准备时间, 需要在时间区间 $[s_i - 1, e_i - 1)$ 判断是否有 r_i 个 QC 可利用. 对于每个染色体, 如果在时间区间 $[s_i, e_i)$ 上泊位 b_i 闲置, 并且在时间区间 $[s_i - 1, e_i - 1)$ 上 r_i 个可利用 QC, 则在最早的开始作业时间 s_i 调度船只 i . 否则, 船只 i 的开始时间将会向后推迟一个单位. 在这种情形下, 就不会违反约束. 如果 QC 分配给船只 i , 以避免其他船只再使用这些 QC, 可利用 QC 的数量将会减少. 同时, 还需保证没有其他的船只在船只 i 的作业期间停靠在泊位 $[b_i, b_i + l_i]$.

一旦分配给船只 i 一个有效的开始作业时间 s_i , 等待时间和作业时间也随之分别确定. 令 c_i 表示一个染色体, $Z(c_i)$ 表示该染色体的目标函数值. 由于本节研究的目标函数为最小化的所有船只的加权服务时间和, 因此我们采用目标函数的倒数作为适应度评价函数: $fit(c_i) = 1/Z(c_i)$.

§3.4.4 选择

根据一定的选择概率, 一个子代 (Offspring) 的种群将从一个父代 (Parent) 种群中筛选出来, 其性能要优于父代种群. 在本研究中, 选择机制采用轮盘赌选择. 轮盘赌选择是依据适应度函数值的概率分布选择新的种群的选择机制^[55].

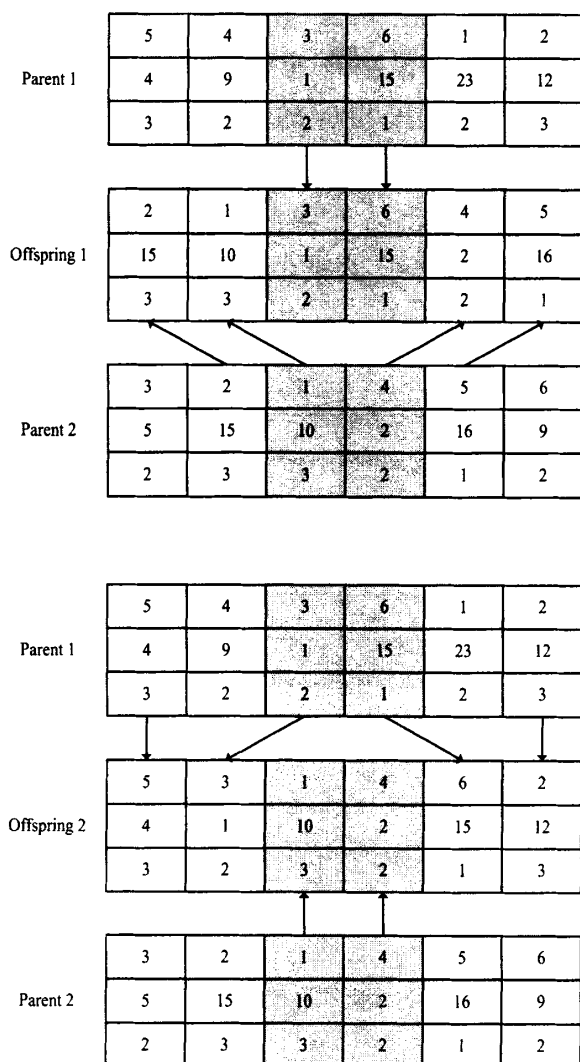


图 3.3: 染色体交叉示例

Fig. 3.3: An example of the chromosome crossover

§3.4.5 交叉

为了避免产生不合法的子代,本节研究采用顺序交叉.图 3.3 给出了一个染色体交叉的示例.

§3.4.6 变异

由于非负整数和多层编码的方式,对于选中的变异列我们采用多种层次的变异方式.在第一行中,使用交叉变异,即交换选中列的基因.在第二行中,半数的染色体采用理想泊位变异,即理想泊位替换原始泊位;另外半数的染色体根据相应的初始化的原则采用随机变异.在第三行中,半数的染色体采用最大数目的 QC 变异,即最大 QC 数目分配 r_i^{\max} 替换原始的 QC 数目分配;另外半数的染色体根据相应的初始化的原则采用随机变异.图 3.4 给出了染色体变异的一个示例,其中第二行和第三行都采用随机变异.

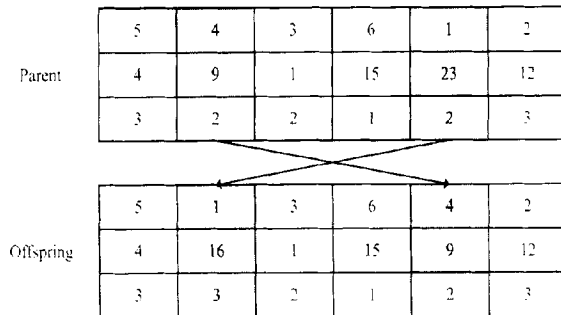


图 3.4: 染色体变异示例

Fig. 3.4: An example of the chromosome mutation

§3.5 插入启发式算法

受到文献 [28] 的结构启发式算法的启发,本节给出了一个插入启发式算法来求解 BACAP. BACAP 的本质是要求得使目标函数达到最小值的泊位 $b_i, \forall i \in V$ 、开始作业时间 $s_i, \forall i \in V$ 和分配的 QC 数量. 此算法的设计是基于先到先得和最大 QC 需求量的原则,也就是说优先顺序序

列 (V_1, V_2, \dots, V_N) 是由到达时间 a_i 和 QC 作业量 m_i 共同决定的. 如果两个船只有相同的到达时间, 具有较大 QC 需求量的船只优先被服务. 但是, 如果具有较大 QC 需求量的船只插入失败而另一艘具有较小 QC 需求量的船只有可行的插入计划, 那么优先顺序发生变化, 并且这个可行的插入计划就是这艘具有较小 QC 需求量的调度计划. 插入启发式算法的伪代码如算法 1 所示.

在进行初始化时, 船只 v_i 总的作业时间设为无穷, 开始时间设为船只的到达时间. 常数 K^1 由方程 $K^1 = \max_{i \in V} \{d_i^{\min}\}$ 得到. 选择泊位时, 应选择避免了时空冲突且具有最小泊位偏差的泊位 b_{v_i} . 在选择 QC 分配时, 在 t 时刻, 若有 $idle_t > r_{v_i}^{\max}$, 则有 $r_{v_i}^{\max}$ 个 QC 分配给船只; 否则, $idle_t(r_{v_i}^{\min})$ 个 QC 分配给船只. 并且, 这个过程将会持续到满足 QC 需求量. 一旦给定 QC 分配, 作业的结束时间也随之确定, 则船只 v_i 的总服务时间也可以得到. 当满足终止条件时, 船只 v_i 的插入过程结束, 并返回最优解.

§3.5.1 插入启发式算法的一个算例

为了详细阐释这个算法, 我们给出了一个算例, 在 $L = 20$, $T = 12$, $Q = 6$, $\beta = 0.1$, $\alpha = 0.9$ 的集装箱码头对 4 艘船只进行调度. 权重系数设为 $\mu = 0.6$, 常数 $K^1 = 3$. 每艘船的数据如表 3.1.1 所示.

表 3.1: 示例的船只数据

Tab. 3.1: Example vessel data

i	l_i	m_i	b_i^0	r_i^{\min}	r_i^{\max}	a_i
1	5	6	5	1	2	3
2	5	6	12	1	2	6
3	4	5	8	1	2	4
4	7	8	1	2	3	6

首先, 我们考虑确定性模型 $[P_1]$. 船只 1 (V_1) 的调度和船只 3 (V_2) 的调度如 3.5(a) 所示, 接下来插入船只 4 (V_3) 和船只 2 (V_4). 根据船只的优先顺序, 船只 4 优先考虑. 在时刻 $t = s_{V_3} - 1 = a_{V_3} - 1$ 闲置 QC 的数量是

算法 1: 插入启发式算法

1. 初始化: $z_{V_i}^* \leftarrow \infty, j \leftarrow i, s_{V_j} \leftarrow a_{V_j}, K^1 \leftarrow \lfloor \max_{i \in V} \{d_i^{\min}\} \rfloor$
 2. **while** $s_{V_j} < a_{V_j} + K^1$ **do**
 3. 计算 $s_{V_{j-1}}$ 时刻的可利用QC 数量: $idle_{s_{V_{j-1}}} = Q - \sum_{k=1}^{j-1} \left(\sum_{q \in R_i} q \cdot r_{k(s_{V_{j-1}})q} \right)$;
 4. **if** $idle_{s_{V_{j-1}}} \geq r_j^{\min}$ 且有可利用泊位 **then**
 5. 选择泊位偏差最小的泊位 b_{V_j} ;
 6. QC 分配;
 7. 计算花费 z_{V_j} ;
 8. $z_{V_i}^* \leftarrow \min(z_{V_j}, z_{V_i}^*)$;
 9. **else**
 10. **while** $j < N - 1, a_{j+1} = a_j, z_{V_i}^* = \infty$ **do**
 11. $j \leftarrow j + 1$;
 12. **if** $idle_{s_{V_{j-1}}} \geq r_j^{\min}$ 且有可利用泊位 **then**
 13. 选择泊位偏差最小的泊位 b_{V_j} ;
 14. QC 分配;
 15. 计算花费 z_{V_j} ;
 16. $z_{V_i}^* \leftarrow z_{V_j}$;
 17. 优先顺序 $(\dots, V_i, \dots, V_j, \dots)$ 替换为
 18. (\dots, V_j, V_i, \dots) ;
 19. $j \leftarrow N, t \leftarrow 2 \cdot T$;
 20. **End if**
 21. **end while**
 22. **if** 如果具有相同到达时间的船只没有可行的调度 **then**
 23. $j \leftarrow i$;
 24. **end if**
 25. **end if**
 26. $s_{V_j} \leftarrow s_{V_j} + 1$;
 27. **end while**
 28. **return** 船只 V_i 的最优解.
-

$idle_{sv_3-1} = Q - \sum_{k=1}^{j-1} \left(\sum_{q \in R_i} q \cdot r_{k(s_{i,3}-1)q} \right) = 2$, 大于 $r_{V_3}^{\min}$. 但是, 此时却没有船只4可利用的泊位, 如图 3.5(b) 所示. 由于和船只4有相同的到达时间, 接下来我们尝试插入船只2, 发现最小的泊位偏差是 $\Delta b_2 = 2$, 此时泊位是 $b_2 = 14$. 所以相对应的 QC 需求量由 $m_2 = 6$ 增加至 $(1 + \beta \cdot \Delta b_2) = 7.2$. 如图 3.5(c) 所示, QC 具体分配为 $r_{262} = r_{272} = r_{282} = r_{292} = 1$, 此时 $2^{0.9} \times 4 = 7.46$ 满足了 QC 分配量. 因此, 原始优先序列 (1, 3, 4, 2) 替换为新的优先序列 (1, 3, 2, 4). 接下来继续考虑船只4 (现在是 V_4) 的调度. 因为 $idle_6 = Q - \sum_{k=1}^3 q \cdot r_{v_k 6q} = 1$, $idle_7 = Q - \sum_{k=1}^3 q \cdot r_{v_k 7q} = 3$, $s_{V_4} = 8, b_{V_4} = b_{V_4}^0$, QC 调度如图 3.5(d) 所示. 因此, $z_{V_4}^* = z_{V_4} = 0.6 \times 3 + 0.4 \times 2 = 2.6$. 如果 $s_{V_4} = 9, z_{V_4} = 0.6 \times 3 + 0.4 \times 3 = 3.0$. 所以 $z_{V_4}^* = 2.6$, 算法终止于 $Z_1^* = 9.8$.

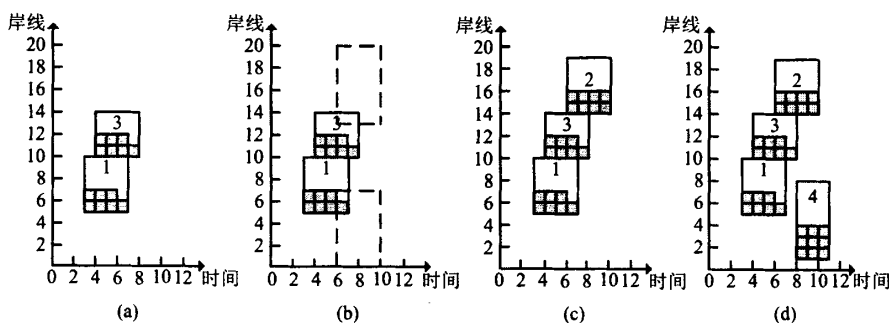

 图 3.5: 模型 $[P_1]$ 的船只位置

 Fig. 3.5: Example positioning of vessels for model $[P_1]$

接下来, 我们考虑鲁棒优化模型 $[P_2]$. 假设 $T' = \{8, 9, 10, 11\}, \forall i \in V$. 船只1和船只3不受不确定因素的影响, 因此它们的调度和确定性模型 $[P_1]$ 的调度一样, 如图 3.6(a) 所示. 对于船只2, 由于 $2^{0.9} \times 2 + [2^{0.9} - (2 - 2^{0.9})] \times 2 = 7.19 < 7.2$, 确定性模型的解将不再可行. 为了满足 QC 的需求量, 可行的 QC 分配如图 3.6(a) 所示, 且 $z_{V_3}^* = 0.6 \times 5 = 3.0$. 对于船只4, 由于 $[3^{0.9} - (3 - 3^{0.9})] \times 3 = 7.13 < 8$, 确定性模型的解也失效. 可行的调度如图 3.6(b) 所示, 最后返回的最优解 $z_{V_4}^* = 3.2$. 鲁棒优化模型 $[P_2]$ 的算法终止于 $Z_2^* = 11.0$, 显然大于确定性模型的目标值.

最后, 我们解决带有价格约束的鲁棒优化模型. 我们假设 $\Gamma_i = 1, \forall i \in V$.

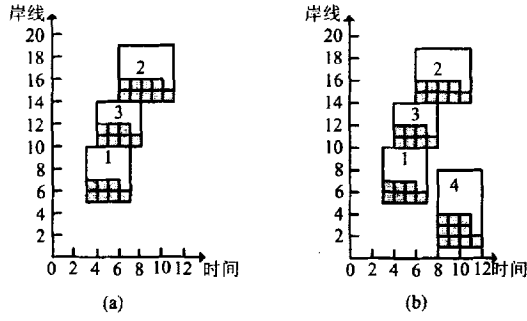

 图 3.6: 模型 $[P_2]$ 的船只位置

 Fig. 3.6: Example positioning of vessels for model $[P_2]$

对于船只 2, $\max_{i \in T'} \left\{ \sum_{q \in R_2} (q - q^a) \cdot r_{iiq} \right\} = 2 - 2^{0.9} = 0.134$, 并且 $2^{0.9} \times 4 - 0.134 = 7.326 > 7.2$. 因此船只 2 的调度为 $r_{262} = r_{272} = r_{282} = r_{292} = 1$, 花费为 $z_{V_3}^* = 2.4$ 如图 3.7(a) 所示. 对于船只 4, $\max_{i \in T'} \left\{ \sum_{q \in R_4} (q - q^a) \cdot r_{iiq} \right\} = 3 - 3^{0.9} = 0.312$, 并且 $3^{0.9} \times 3 - 0.312 = 7.75 < 8$. 因此船 4 的可行调度为 $r_{383} = r_{393} = r_{3(10)3} = r_{3(11)1} = 1$, 花费为 $z_{V_4}^* = 0.6 \times 4 + 0.4 \times 2 = 3.2$, 如图 3.7(b) 所示. 带有价格约束的鲁棒模型的算法终止于 $Z_3^* = 10.4$, 介于模型 $[P_1]$ 和模型 $[P_2]$ 的目标函数值之间.

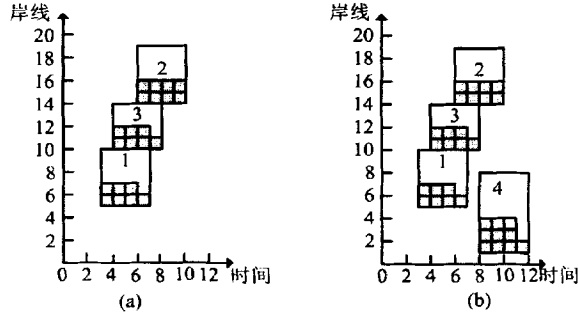

 图 3.7: 模型 $[P_3]$ 的船只位置

 Fig. 3.7: Example positioning of vessels for model $[P_3]$

§3.5.2 QC资源水平和空间转移

给定一个优先顺序, 插入启发式算法就会产生一个可行的泊位调度. 插入较早的船只可以优先停在理想泊位上. 为了减弱较早插入船只的优先性, 进行了 QC 资源的水平和船只的空间转移, [28] 曾经采用过

同样的方法.

第一个改善方法是QC资源水平转移. 给定优先顺序 (V_1, V_2, \dots, V_N) , 在范围 R_{V_i} 的资源限制下插入船只 V_1 . 接下来, 没有QC资源限制地插入剩余船只 V_2 到 V_N . 由于对船只 V_1 的QC资源限制, 其他的船只得到了较高优先性的QC分配. 如果最后有剩余的QC, 那么再将这些QC重新分配给船只 V_1 . 这种限制持续进行到船只 V_{N-1} , 产生最优解.

另一个改善是空间转移. 给定优先顺序 (V_1, V_2, \dots, V_N) 和常数 $K_i^2 < b_{V_i}$, $K_i^3 < L - b_{V_i} - l_{V_i}$, 船只 V_i 被依次插入在泊位 $\{b_{V_i} - 1, \dots, b_{V_i} - K_i^2, b_{V_i} + 1, \dots, b_{V_i} + K_i^3\}$. 一旦插入船只 V_i , 随后的船只的调度根据插入启发式算法也随之产生. 这个过程一直持续到船只 V_{N-1} .

在给定常数 $K_1^2 = 3, K_1^3 = 0$ 的情况下, 图 3.8(a) 给出了插入启发式算法的解和船只 1 的转移过程. 新的泊位集合为 $\{4, 3, 2\}$. 如果 $b_{V_1} = 4$, QC 需求量增加为 $m_{V_1} \cdot (1 + 1 \times \beta) = 6.6$, QC 的分配为 $r_{132} = 1, r_{142} = 1, r_{152} = 1, r_{162} = 1$. 随后的船只插入情况如图 3.8(b) 所示, 所有船只的花费为 9.2. 如果 $b_{V_1} = 3$, 船只 1 的泊位偏差增加至 2, 然而此时船只 3 和船只 1 的泊位偏差下降为 0, QC 分配如图 3.8(c) 所示. 如果 $b_{V_1} = 2$, 因为插入式启发算法促使它们选择具有最小的泊位偏差的泊位, 所以船只 3 和船只 1 没有发生变化, QC 的分配情况如图 3.8(d) 所示. 因此, 船只 1 的最优泊位为 $b_{V_1} = 3$.

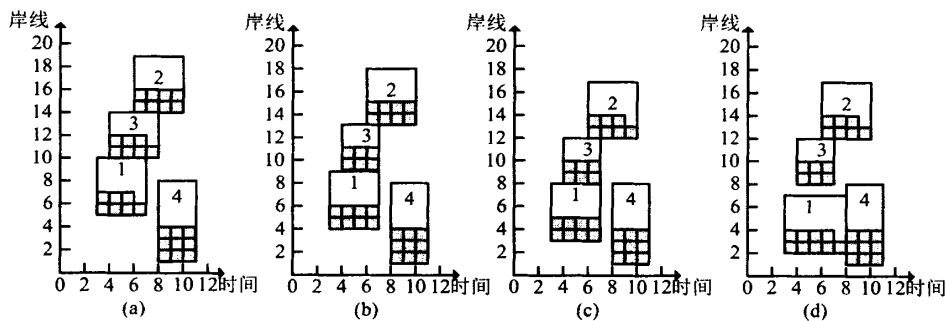


图 3.8: 发生空间转移后的调度

Fig. 3.8: Schedule of after spatial shift

§3.6 数值计算

在本节中,我们将给出一系列数值计算以测试所提出方法和理论的性能.

§3.6.1 算例基准和参数设置

本章所使用的是由[28]提供的算例基准来进行数值实验.算例将所有船只分为三类:小型船(Feeder)、中型船(Medium)、大型船(Jumbo).在每个算例中,有60%的小型船,30%的中型船,10%的大型船.该基准由30个算例组成,包括20艘船只、30艘船只、40艘船只各10个.计划期间 T 被设置为一周(168h).码头的相关信息为 $L = 100(1000m)$, $Q = 10$.

相关的参数设置如下:

- 1) 加权系数 $\mu = 0.6$;
- 2) QC作业效率的干扰指数 $\alpha = 0.9$;
- 3) 泊位偏离因素 $\beta = 0.01$;
- 4) QC作业效率受不确定因素影响的集合 $T' = \{0, 1, 2, \dots, 47\}$.

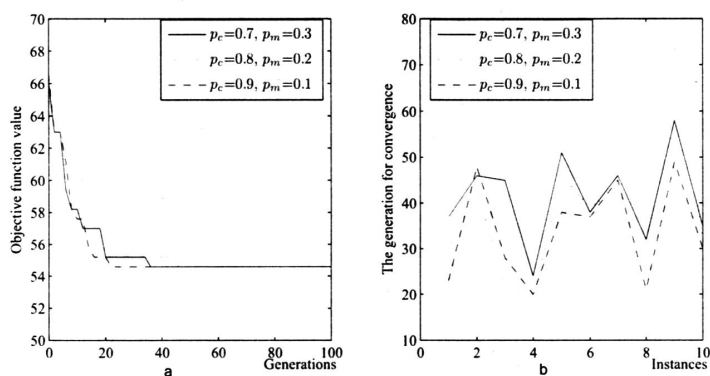


图 3.9: GA 的收敛性能

Fig. 3.9: Convergence performance of the GA

由于GA的性能依赖于相关遗传操作,所以GA的参数会影响收敛性能.图3.9给出了GA的收敛性能,图3.9(a)给参数一个在不同参数下具有代表性的算例的收敛速度,图3.9(b)给出了10个算例的平均收敛代

数.从图 3.9 中可以看出,GA 的收敛速度受到交叉概率和变异概率的影响,其中 $p_c = 0.9, p_m = 0.1$ 表现出较好的性能.在本章的研究中,GA 的数值实验采用交叉概率 $p_c = 0.9$,变异概率 $p_m = 0.1$.

§3.6.2 算例计算结果和分析

§3.6.2.1 与 MS 和 Iris 的比较

确定性模型 $[P_1]$ 和插入启发式算法是基于 [28] 发展而来的.但是, $[P_1]$ 使用了不同的目标函数、考虑了 QC 在岸线移动的准备时间、且假设到达时间已知,这样使得 [28] 的问题转化成了一个新的问题.为了与 [28]、[32] 进行比较,我们将模型 $[P_1]$ 的准备时间设置为 0,将到达时间替换为最早的开始时间,并使用与 [28] 相同的目标函数.这样,经转化得到的模型 $[P]$ 和 [28] 的模型一致,即模型 $[P]$.接下来,我们要给出模型 $[P]$ 的 GA 和插入启发式算法的结果.插入启发式算法求解模型 $[P]$ 不需要发生变化,然而,GA 却需要进行一些小的修改. GA 的解码规则导致了几乎每个船只将会产生加速花费,这将会降低 GA 的性能.因此,我们将 GA 算法中最早的开始时间替换为期待到达时间.这个调整只是在模型 $[P]$ 中,剩余的问题仍然使用之前提出的 GA.

输入数据:

c_i^1, c_i^2, c_i^3 给定船只 i 每 1000 USD 单位,单位时间的服务花费

c^4 每 1000 USD 单位,单位 QC 时间的作业花费

EFT_i 船只 i 的期待完成时间

LFT_i 船只 i 的免惩罚最迟完成时间

ΔETA_i 整数,为了赶上停泊时间,船只 i 需要加速的时间

$$\Delta ETA_i = (ETA_i - s_i)^+$$

ΔEFT_i 整数,船只 i 的停滞时间, $\Delta EFT_i = (e_i - EFT_i)^+$

决策变量:

u_i 二进制数,如果船只 i 的完工时间超过 LFT_i 时为 1, 否则为 0.

$$\begin{aligned}
 [\mathcal{P}] \quad \min \quad & Z = \sum_{i \in V} \left(c_i^1 \cdot \Delta ETA_i + c_i^2 \cdot \Delta EFT_i + c_i^3 \cdot u_i' + c^4 \cdot \sum_{t \in T} \sum_{q \in R_t} q \cdot r_{itq} \right) \\
 \text{s.t.} \quad & (3.3.3), (3.3.6), (3.3.12) - (3.3.20), (3.3.24) \\
 & \sum_{i \in V} \sum_{q \in R_t} q \cdot r_{itq} \leq Q \quad \forall t \in T \\
 & \Delta ETA_i \geq ETA_i - s_i \quad \forall i \in V \\
 & \Delta EFT_i \geq e_i - EFT_i \quad \forall i \in V \\
 & M \cdot u_i' \geq e_i - LFT_i \quad \forall i \in V \\
 & s_i \in \{EST_i, \dots, H-1\}, e_i \in \{EST_i, \dots, H\}.
 \end{aligned}$$

表 3.2 给出了 GA、插入启发式算法、文献[28]、文献[32]的结果. 列 3、4、6、7、9、11、13 给出了总服务花费, 列 7、10、12、14 给出了计算误差. 由于插入启发式算法的计算时间都小于 1 s, 因此我们只给出了 GA 的计算时间.

为了比较这些启发式算法的整体性水平, 计算误差和计算时间都采用 10 组算例取平均. 从解的质量而言, GA 和插入启发式算法要优于 [28] 的改善后的结构式启发算法, 但是略差于 [28] 的其他两种启发式算法. 需要指出的是性能最好的解几乎都是由 [32] 得到. 从解的计算时间而言, 插入启发式算法和 [28] 的改善后的结构式启发算法是相当的, 因为它们的计算时间都小于 1 s. 此外, GA 和插入启发式算法的计算时间都要小于 [28] 的其他两种启发式算法.

GA 和插入启发式算法是为本研究的三种模型所设计的, 而 [28] 和 [32] 的启发式算法仅是为模型 $[\mathcal{P}]$ 所设计, 而不适合本章所研究问题.

§3.6.2.2 计算结果

表 3.3 - 3.5 分别给出了模型 $[\mathcal{P}_1]$ - $[\mathcal{P}_3]$ 的 20, 30, 40 艘船只算例的计算时间和目标函数值. 对于小规模算例 ($N = 20$), 模型 $[\mathcal{P}_1]$ 中仅有 4 个算例 (e.g., $n = 1, n = 2, n = 5, n = 6$), 模型 $[\mathcal{P}_2]$ - $[\mathcal{P}_3]$ 中仅有 3 个算例 (e.g., $n = 2, n = 5, n = 6$), 利用 CPLEX 在规定时限内取得了最优值. 对于大多数的中型规模算例 ($N = 30$), CPLEX 已经不能在规定时限内解决. 对于大型规模算例 ($N = 40$),

表 3.2: GA 和插入启发式算法处理模型 $[P]$ 的性能

Tab. 3.2: Performance of the GA and the insertion heuristic algorithm on problem $[P]$

N	n	UB_{best}	LB_{best}	Gap^0	GA	Gap^1	T_{GA}	IH	Gap^2	CH	Gap^3	Z_{MB}	Gap^4	T_{MB}
20	1	84.1	84.1	0.00	90.5	0.08	10.0	84.5	0.00	86.1	0.02	85.1	0.01	11
	2	53.9	53.9	0.00	56.8	0.05	8.4	53.9	0.00	53.9	0.00	53.9	0.00	4
	3	76.3	76.3	0.00	82.7	0.08	10.9	79.8	0.05	87.3	0.14	77.4	0.01	11
	4	76.2	76.2	0.00	80.7	0.06	10.1	79.6	0.04	79.7	0.05	77.9	0.02	12
	5	56.8	56.8	0.00	56.8	0.00	8.9	56.8	0.00	56.8	0.00	56.8	0.00	10
	6	57.6	57.6	0.00	57.6	0.00	9.0	57.6	0.00	57.6	0.00	57.6	0.00	4
	7	68.0	68.0	0.00	76.8	0.13	9.9	69.8	0.03	69.9	0.03	68.9	0.01	17
	8	56.1	56.1	0.00	57.2	0.02	9.1	60.8	0.08	69.6	0.24	56.1	0.00	13
	9	75.1	75.1	0.00	76.4	0.02	10.2	75.9	0.01	76.3	0.02	75.5	0.01	14
	10	89.3	88.4	0.01	96.3	0.09	10.2	95.3	0.08	101.1	0.14	93.0	0.05	10
Ave.				0.00		0.04	9.7		0.03		0.06		0.01	10.6
30	11	139.8	139.1	0.01	168.2	0.21	29.3	151.8	0.09	152.6	0.10	147.8	0.06	51
	12	81.8	81.8	0.00	84.0	0.03	29.9	86.4	0.06	86.4	0.06	82.5	0.01	36
	13	102.4	102.4	0.00	105.2	0.03	33.1	105.4	0.03	107.6	0.05	104.5	0.02	41
	14	99.1	99.1	0.00	102.8	0.04	32.4	109.5	0.10	113.2	0.14	105.8	0.07	22
	15	154.2	145.1	0.06	159.3	0.10	36.6	164.4	0.13	173.8	0.20	157.4	0.08	79
	16	115.4	111.6	0.03	120.0	0.08	37.3	125.9	0.13	127.6	0.14	118.5	0.06	40
	17	102.6	102.6	0.00	107.0	0.04	33.8	107.4	0.05	110.2	0.07	104.2	0.02	41
	18	121.9	120.0	0.02	136.8	0.14	34.6	131.4	0.10	131.4	0.10	125.5	0.05	20
	19	165.2	161.6	0.02	176.1	0.09	43.9	180.4	0.12	185.0	0.14	173.8	0.08	41
	20	132.5	129.6	0.02	139.1	0.07	37.2	135.9	0.05	140.5	0.08	135.2	0.04	58
Ave.				0.02		0.08	34.8		0.09		0.11		0.05	42.9
40	21	223.1	178.3	0.20	225.8	0.27	100.6	244.4	0.37	216.3	0.21	215.0	0.21	311
	22	171.0	166.1	0.03	198.1	0.19	75.4	189.0	0.14	189.0	0.14	178.8	0.08	163
	23	264.4	196.7	0.26	286.2	0.46	115.6	287.7	0.46	325.7	0.66	264.3	0.34	373
	24	302.2	245.4	0.19	326.8	0.33	110.0	350.4	0.43	360.2	0.47	326.6	0.33	325
	25	148.1	141.2	0.05	162.6	0.15	98.1	162.0	0.15	162.0	0.15	155.1	0.10	206
	26	245.0	208.8	0.15	290.0	0.39	106.5	273.0	0.31	273.1	0.31	259.6	0.24	298
	27	184.9	176.0	0.05	215.3	0.22	106.2	233.0	0.32	233.0	0.32	200.8	0.14	209
	28	315.2	215.3	0.32	351.1	0.63	139.6	346.7	0.61	408.5	0.90	286.2	0.33	373
	29	226.7	186.0	0.18	225.0	0.21	96.1	232.5	0.25	268.4	0.44	219.4	0.18	202
	30	187.8	175.0	0.07	238.8	0.36	109.3	262.4	0.50	280.8	0.60	240.9	0.38	209
Ave.				0.05		0.32	105.7		0.35		0.42		0.23	266.9

UB_{best} / LB_{best} : 由文献 [28] 和 [32] 所得的最好的上/下界;

IH: 由插入启发式算法所得的上界; T_{GA}/T_{MB} : GA/文献 [28] 的计算时间;

Z_{MB} : 文献 [28] 的三种启发式算法所得的最优值;

$Gap^0 = (UB_{best} - LB_{best}) / LB_{best}$, $Gap^1 = (GA - LB_{best}) / LB_{best}$, $Gap^2 = (IH - LB_{best}) / LB_{best}$, $Gap^3 = (CH - LB_{best}) / LB_{best}$, $Gap^4 = (Z_{MB} - LB_{best}) / LB_{best}$;

表 3.3: 模型 $[\mathcal{P}_1]$ 的结果
Tab. 3.3: Results for model $[\mathcal{P}_1]$

算例		CPLEX		GA			Heuristic		
N	n	UB_1	LB	UB_1	Time (s)	Gap (%)	UB_1	Time (s)	Gap (%)
20	1	109.8	109.8	110.0	7.84	0.2	113.4	0.16	3.3
	2	88.0	88.0	88.0	7.82	0.0	88.4	0.14	0.5
	3	110.8	99.7	106.2	9.98	6.5	111.4	0.14	11.7
	4	101.1	96.1	102.6	8.91	6.8	104.2	0.16	8.4
	5	89.0	89.0	89.0	8.92	0.0	89.0	0.15	0.0
	6	99.0	99.0	99.0	8.44	0.0	99.0	0.13	0.0
	7	103.0	101.2	103.4	8.52	2.2	105.6	0.15	4.4
	8	90.4	88.6	89.6	7.51	1.1	92.4	0.17	4.3
	9	101.2	95.1	97.2	7.76	2.0	103.8	0.13	9.2
	10	106.6	100.2	104	8.05	3.8	111.8	0.14	11.6
	Ave.				8.38	2.3		0.15	5.3
30	11	—	146.8	161.8	21.58	10.2	169.2	0.25	15.3
	12	134.4	129.7	135.2	15.07	4.2	138.2	0.24	6.6
	13	—	144.4	148.4	26.23	2.8	154.0	0.31	6.7
	14	144.6	137.9	141.6	23.37	2.7	152.6	0.26	10.7
	15	—	154.1	166.2	27.93	7.9	171.8	0.23	11.5
	16	—	139.4	148.0	25.24	6.2	151.4	0.24	8.6
	17	—	143.9	147.6	22.44	2.6	154.4	0.26	7.3
	18	—	141.4	149.6	24.95	5.8	150.0	0.24	6.1
	19	—	167.2	181.4	21.75	8.5	194.2	0.23	16.2
	20	—	151.0	155.4	28.16	2.9	167.0	0.23	10.6
	Ave.				23.67	5.4		0.25	10.0
40	21	—	184.4	223.0	56.36	20.9	244.4	0.29	32.5
	22	—	185.0	212.2	82.72	14.7	223.6	0.32	20.9
	23	—	177.1	238.6	73.16	34.7	251.2	0.36	41.8
	24	—	193.3	252.6	69.00	30.9	272.8	0.38	41.1
	25	—	176.1	204.0	61.17	15.8	213.4	0.34	21.2
	26	—	194.8	237.0	70.37	21.7	247.6	0.43	27.1
	27	—	194.2	237.0	65.15	22.0	249.4	0.35	28.4
	28	—	204.6	266.6	61.34	30.3	265.0	0.37	29.5
	29	—	182.5	204.4	53.91	12.0	220.4	0.40	20.8
	30	—	199.0	224.6	53.44	12.9	255.2	0.34	28.2
	Ave.				64.67	21.6		0.36	29.2

UB_1/LB_1 : 在 10-h 内, 模型 $[\mathcal{P}_1]$ 的上/下界;

Gap = $(UB_1 - LB_1)/LB_1$;

Time(s): 计算时间, 以 s 为单位;

—: 在 10-h 内, 没有找到可行解.

表 3.4: 模型 $[P_2]$ 的结果
Tab. 3.4: Results for model $[P_2]$

算例		CPLEX		GA			Heuristic		
N	n	UB_2	LB_2	UB_2	Time (s)	Gap (%)	UB_2	Time (s)	Gap (%)
20	1	113.0	110.9	113.0	8.23	1.9	119.6	0.17	7.8
	2	89.2	89.2	89.4	8.39	0.2	92.6	0.16	3.8
	3	116.0	100.8	109.2	7.92	8.3	113.6	0.15	12.7
	4	—	96.7	106.6	7.52	10.2	114.6	0.15	18.5
	5	89.6	89.6	89.6	8.65	0.0	89.6	0.16	0.0
	6	100.8	100.8	100.8	8.17	0.0	100.8	0.19	0.0
	7	104.2	102.5	105.8	9.10	3.2	107.8	0.14	5.2
	8	94.6	91.8	97.2	7.89	5.9	99.4	0.16	8.3
	9	102.4	96.3	102.0	8.24	5.9	108.6	0.14	12.8
	10	—	105.1	112.8	8.73	7.3	119.6	0.15	13.8
	Ave.				8.28	4.3		0.17	8.3
30	11	183.4	148.9	168.6	25.62	13.2	172.2	0.24	15.7
	12	136.0	131.2	139.4	16.57	6.3	142.4	0.25	8.6
	13	—	146.1	151.8	27.99	3.9	158.8	0.28	8.7
	14	146.8	139.2	147.0	22.98	5.6	157.2	0.26	12.9
	15	—	156.8	178.0	22.95	13.5	181.2	0.25	15.6
	16	—	141.9	158.4	28.77	11.6	159.8	0.24	12.6
	17	—	144.4	153.8	25.65	6.5	159.6	0.24	10.5
	18	—	142.9	157.0	26.95	9.9	157.2	0.26	10.0
	19	—	171.2	195.8	28.77	14.4	204.0	0.23	19.2
	20	—	152.8	159.8	21.44	4.6	172.0	0.20	12.6
	Ave.				24.77	9.0		0.25	12.6
40	21	—	188.6	259.4	76.28	37.5	269.0	0.36	42.6
	22	—	187.9	220.2	97.92	17.2	233.2	0.36	24.1
	23	—	185.0	256.2	87.97	38.5	271.8	0.38	46.9
	24	—	195.1	264.2	131.20	35.4	285.2	0.37	46.2
	25	—	176.8	210.2	95.60	18.9	219.2	0.39	24.0
	26	—	197.4	250.2	72.68	26.8	262.8	0.35	33.1
	27	—	196.6	243.8	61.63	24.0	255.6	0.37	30.0
	28	—	207.8	275.2	73.01	32.4	277.2	0.36	33.4
	29	—	185.5	221.0	62.09	19.1	240.2	0.35	29.5
	30	—	200.9	238.8	60.20	18.9	263.6	0.34	31.2
	Ave.				81.86	26.9		0.36	34.1

UB_2/LB_2 : 在 10-h 内, 模型 $[P_2]$ 的上/下界;

Gap = $(UB_2 - LB_2)/LB_2$;

Time(s): 计算时间, 以 s 为单位;

—: 在 10-h 内, 没有找到可行解.

表 3.5: 模型 $[P_3]$ 的结果
Tab. 3.5: Results for model $[P_3]$

算例		CPLEX		GA			Heuristic		
N	n	UB_3	LB_3	UB_3	Time (s)	Gap (%)	UB_3	Time (s)	Gap (%)
20	1	111.0	109.8	111.0	164.18	1.1	116.4	4.91	6.0
	2	89.2	89.2	89.4	117.80	0.2	91.0	5.25	2.0
	3	110.4	100.2	107.4	111.86	7.2	112.2	4.70	12.0
	4	—	96.6	103.4	129.80	7.0	114.6	4.08	18.6
	5	89.6	89.6	89.6	147.29	0.0	89.6	4.52	0.0
	6	100.8	100.8	100.8	151.88	0.0	100.8	5.48	0.0
	7	103.6	101.8	104.6	143.92	2.8	106.8	4.71	4.9
	8	92.6	89.8	92.6	102.98	3.1	94.0	4.99	4.7
	9	—	95.7	99.6	126.29	4.1	104.6	4.26	9.3
	10	—	102.1	109.4	114.02	7.2	115.8	4.10	13.4
	Ave.				131.00	3.3		4.70	7.1
30	11	188.6	150.2	168.0	319.70	11.9	175.2	6.75	16.6
	12	143.6	131.2	135.8	196.48	3.5	139.0	7.33	6.0
	13	—	145.0	149.8	261.62	3.3	155.4	8.14	7.2
	14	146.4	138.6	143.4	205.81	3.5	153.2	7.52	10.5
	15	—	154.1	170.4	245.14	10.6	175.2	8.92	13.7
	16	—	141.5	153.0	213.81	8.1	153.8	6.93	8.7
	17	150.6	144.6	149.6	223.40	3.5	155.4	7.43	7.5
	18	—	142.7	153.4	289.18	7.5	152.6	7.53	6.9
	19	—	169.8	186.6	286.28	9.9	195.2	6.38	15.0
	20	—	149.4	156.4	319.95	4.7	169.0	6.57	13.1
	Ave.				256.17	6.7		7.35	10.5
40	21	—	187.5	251.6	464.67	34.2	259.4	9.47	38.4
	22	—	186.6	222.8	408.79	19.4	220.2	9.26	18.0
	23	—	184.4	250.0	593.81	35.6	262.2	9.32	42.2
	24	—	194.3	262.4	443.91	35.1	278.4	8.47	43.3
	25	—	176.2	206.2	453.45	17.0	215.6	7.63	22.4
	26	—	195.2	244.0	468.17	25.0	258.8	8.94	32.6
	27	—	196.2	240.2	463.10	22.4	252.6	8.65	28.8
	28	—	205.2	274.6	644.32	33.8	266.8	9.17	30.0
	29	—	182.7	216.4	480.20	18.4	237.0	7.32	29.7
	30	—	200.0	235.0	498.40	17.5	260.8	8.37	30.4
	Ave.				491.90	25.8		8.66	31.6

UB_3/LB_3 : 在 10-h 内, 模型 $[P_3]$ 的上/下界;

Gap = $(UB_3 - LB_3)/LB_3$;

Time(s): 计算时间, 以 s 为单位;

—: 在 10-h 内, 没有找到可行解.

CPLEX 已经找不到可行的整数解. 显然的是, CPLEX 随着算例规模的增大计算时间迅速增加, 解的质量迅速下降. 然而, GA 和插入启发式算法对所有算例都可以获得可行的整数解. 从求解质量而言, GA 要优于插入式启发算法; 从求解计算时间而言, 插入启发式算法显然较 GA 更有竞争力. 通过比较这 3 个模型发现, 模型 $[P_3]$ 的约束 (3.3.30) 较模型 $[P_1]$ 的约束 (3.3.3) 和模型 $[P_2]$ 的约束 (3.3.25) 有较高的复杂度. 所以, 在 GA 和插入启发式算法中, 模型 $[P_3]$ 比模型 $[P_1]$ 和 $[P_2]$ 需要更多的计算时间, 正如这三个表格所呈现的计算时间一致.

此外, 几乎所有的鲁棒模型的目标函数值都要大于确定性模型的目标函数值, 这也意味着不确定性会提高目标函数值从而改变计划调度. 这也就是说, 确定性模型 $[P_1]$ 的调度受到不确定性因素影响后很可能将会无效. 比较表 3.4 和表 3.5 发现, 模型 $[P_2]$ 的函数值要差于模型 $[P_3]$. 由于模型 $[P_2]$ 的过度保守性, 模型 $[P_3]$ 更适合处理不确定性.

§3.6.3 Γ_i 对实验结果的影响

在之前的章节中提到过, 价格约束 Γ_i 在区间 $[0, |T'|]$ 上取值, 并且可以控制模型 $[P_3]$ 的保守程度. 图 3.10 详细给出了 Γ_i 对 10 个算例的平均值的影响, 并呈现了 CPLEX、GA、插入启发式算法中确定性模型失效的算例个数. 很容易发现, 平均目标函数和失效调度算例随着 Γ_i 的增加而增加. 当 $\Gamma_i = 8$ 时, 三种方法的确定性模型的失效算例均达到 10. 也就是说, 在不确定性环境下, 确定性模型的调度失效.

§3.6.4 约束违反概率边界

价格约束 Γ_i 控制着约束违反的概率. 在上一小节中, 我们给出了由价格约束 Γ_i 决定的约束边界, 在本小节中, 我们给出模型 $[P_3]$ 中不同 Γ_i 的具体分析. 表 3.6 给出了使违反约束概率边界控制在 1% 的范围内的 Γ_i 取值. 当 $|T'| = 168$ 时, 我们只需令 $\Gamma_i = 39.4$, 也就是说只有 23.5% 的不确定性数据, 就可以保证违反约束的概率小于 1%. 对于不确定性数据非常少的约束, 就需要全部的保护. 图 3.11 给出了 $|T'| = 168$ 的约束违反概率的边界. 开始时, 约束违反概率边界随着 Γ_i 的增大迅速减小, 最后在非

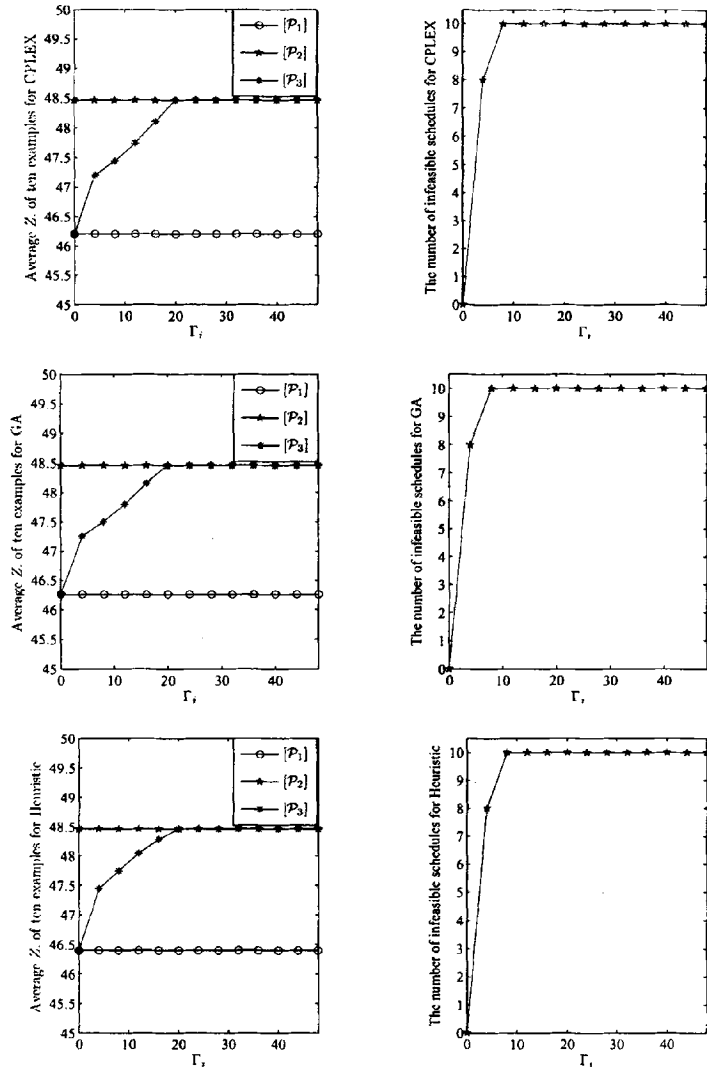


图 3.10: Γ_i 对实验结果的影响

Fig. 3.10: Impact of Γ_i on experimental results

常接近 0 处几乎稳定.

§3.7 本章结论

针对具有密切联系的 BAP 和 QCAP 问题, 本章的研究是以一种综合

表 3.6: 使约束违反概率的边界小于1%的 Γ_i 取值

Tab. 3.6: Choice of Γ_i so that the probability of constraint violation is less than 1%

$ T' $	5	10	15	24	48	72	96	120	144	168
Γ_i	5	9.6	11.8	14.9	21.1	25.8	29.8	33.3	36.5	39.4

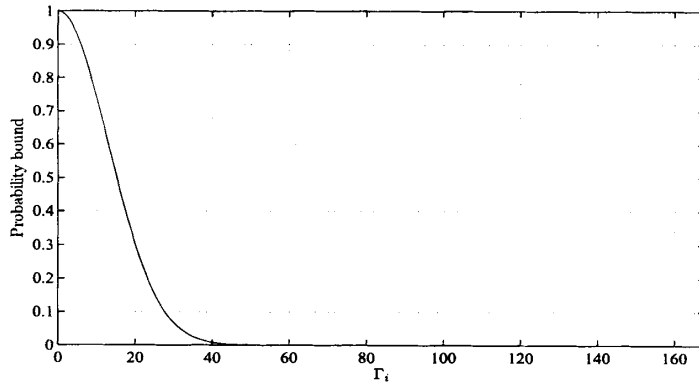


图 3.11: $|T'| = 168$ 的约束违反概率边界

Fig. 3.11: Probability bound of constraint violation for $|T'| = 168$

的方法来处理这两个问题.将 QC 在岸线上移动的准备时间考虑在内,本章首先提出了一个确定性的 BACAP 模型.

然而,由于 QC 作业的环境非常特殊,调度的可行性会受到环境不确定性的影响.为了确保既定计划在不确定条件下的可行性,本章提出了一个鲁棒优化模型来处理数据的不确定性.基于这个鲁棒优化模型,本章又提出了一个带有价格约束的鲁棒优化模型,可以控制鲁棒优化的保守性水平.鉴于 BACAP 是一个 NP 难问题,本章提出了一个 GA 和一个插入启发式算法来求得问题的近似最优解.数值实验表明,本章提出的模型是合理的、非常重要的,并且提出的算法是非常有效的.从计算时间的角度而言,插入启发式算法远小于 GA,从解的质量而言,GA 要优于插入启发式算法.

第四章 岸桥集卡的集成优化研究

§4.1 问题描述

QCSP 和 YTSP 是集装箱码头的两个重要的子问题调度. 如图 4.1 所示, QC 负责从船只上卸载集装箱 (将集装箱装载至船只上), YC 负责将集装箱从 YT 上卸载至堆场 (从堆场装载至 YT), YT 负责 QC 和 YC 之间的集装箱水平运输. 具体地讲, 卸载过程主要包括: 1) QC 从船只上卸载进口箱至 YT, 2) YT 将进口箱水平运输至 YC, 3) YC 卸载进口箱至指定的堆场; 装载过程主要包括: 1) YC 从堆场取出出口箱装载至 YT, 2) YT 将出口箱水平运输至 QC; 3) QC 将出口箱装载至船只. QC 和 YT 之间存在的任何延误都会降低作业效率, 因此本章研究将 QCSP 和 YTSP 进行整合研究, 称之为 QCYTP.

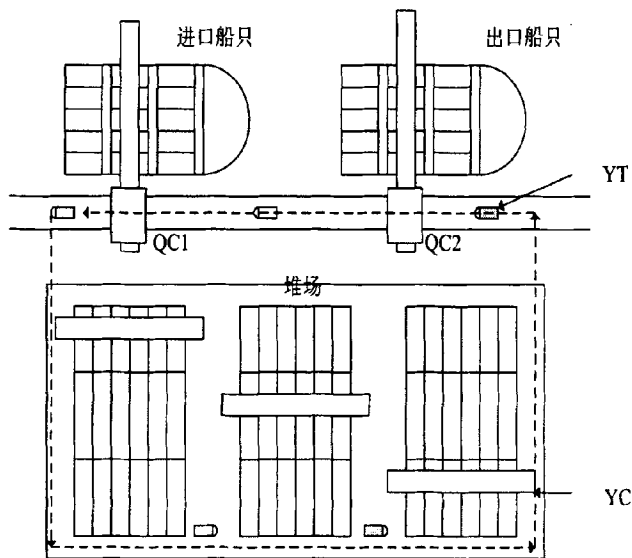


图 4.1: 集装箱码头作业

Fig. 4.1: Operations in container terminals

基于集装箱码头的装卸流程, 研究常采用 YT 作业的方式有单循环和多循环, 现有的研究多以单循环为主. 但是, 双循环的利用会显然提

高作业效率. 因此本章研究采用 YT 双循环的策略研究 QCYTP. 鉴于问题的计算复杂度, 本章提出 GA 来求解这个 QCYTP.

§4.2 问题假设

1. 同一时刻, QC 和 YT 至多服务一个集装箱.
2. 进/出口箱在船只和堆场的位置都是已知的.
3. 不考虑 YT 的拥堵和 YC 的工作量限制.
4. QC/YT/YC 对于任意集装箱的作业效率是已知的, 并且所有的 QC/YT/YC 都是无差别的.

§4.3 一个 QC 和多个 YT

在众多调度研究中, 一系列 QC 分配给船只进行装卸作业. 船只被划分为一些贝位, 相邻贝位分配给一个 QC, 每个贝位要装卸集装箱的集合是给定的. 在本章的研究中, 我们以 YT 双循环的模式仅考虑一个装载进口集装箱 (Inbound Container) 的 QC 和一个卸载出口集装箱 (Outbound Container) 的 QC.

§4.3.1 模型建立

下面给出模型所需的一些输入符号和决策变量.
输入符号:

-
- N^- 进口集装箱的集合, $N^- = \{1, 2, \dots, n^-\}$,
 其中 n^- 是进口集装箱的数量;
 N^+ 出口集装箱的集合, $N^+ = \{1, 2, \dots, n^+\}$,
 其中 n^+ 是出口集装箱的数量;
 T 是集装箱码头所有 YT 的集合;
 p_{ir} 进口集装箱 i 的堆场至出口集装箱 r 的堆场所需的
 YT 运输时间; $\forall i \in N^-, r \in N^+$
 vtv 从出口船只到进口船只所需的 YT 运输时间;
 vtl_i^- 从进口船只到进口集装箱 i 的所在堆场位置所需的
 YT 运输时间; $\forall i \in N^-$
 ltv_i^+ 从出口集装箱 r 的所在堆场位置到出口船只所需的
 YT 运输时间; $\forall r \in N^+$
 ltl_{ir} 从进口集装箱 i 所在的堆场位置到出口集装箱 r 所在的
 堆场位置所需的 YT 运输时间;
 hq_i^- 卸载进口集装箱 i 的所需 QC 时间; $\forall i \in N^-$
 hq_r^+ 装载出口集装箱 r 的所需 QC 时间; $\forall r \in N^+$
 l_i^- 进口集装箱 i 在进口船只的位置; $\forall i \in N^-$
 l_r^+ 出口集装箱 r 在出口船只的位置; $\forall r \in N^+$
 hy^- 卸载进口集装箱的所需 YC 时间;
 hy^+ 装载出口集装箱的所需 YC 时间;
 g QC 移动一个单位距离所需的时间;
 M 一个足够大的正数.
-

决策变量:

-
- x_{ij}^- 如果 QC 卸载进口箱 i 后的作业是进口箱 j 则为 1, 否则为 0;
 $\forall i \in \{0, \dots, n^-\}, j \in \{1, \dots, n^- + 1\}$
 x_{rj}^+ 如果 QC 装载出口箱 r 后的作业是出口箱 j 则为 1, 否则为 0;
 $\forall r \in \{0, \dots, n^+\}, j \in \{1, \dots, n^+ + 1\}$
 y_{itj} 如果 YT t 运输进口箱 i 后的进口箱作业是 j 则为 1, 否则为 0;
 $\forall i \in \{0, \dots, n^-\}, j \in \{1, \dots, n^- + 1\}, t \in T$
 z_{ir} 如果进口箱 i 和出口箱 r 两两配对则为 1, 否则为 0;
 $\forall i \in N^-, r \in N^+$
-

- cq_i^- QC 卸载进口箱 i 的完成时间; $\forall i \in N^-$
 ct_i^- YT 运输进口箱 i 的完成时间; $\forall i \in N^-$
 $cq_{i'}^+$ QC 装载出口箱 i' 的完成时间; $\forall i' \in N^+$
 $ct_{i'}^+$ YT 运输进口箱 i' 的完成时间; $\forall i' \in N^+$
 ct_i YT 运输与进口箱 i 配对的出口箱的完成时间; $\forall i \in N^-$
 c^- 进口船只的完工时间;
 c^+ 出口船只的完工时间;
 c 所有船只的完工时间.

首先我们假设进口箱的数量和出口箱的数量相等, 即 $n^- = n^+$, 且一个进口箱和一个出口箱两两配对. 因此, 卸载进口箱的顺序和配对的顺序决定了装载出口箱的顺序. 一个用来解决双循环的 QC-YT 的混合整数规划模型 $[P_4]$ 如下所示.

$$[P_4] \quad \min c \quad (4.3.1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in N^-} x_{0i}^- = 1 \quad (4.3.2)$$

$$\sum_{i \in N^-} x_{i(n^-+1)}^- = 1 \quad (4.3.3)$$

$$\sum_{j=0}^{n^-} x_{ji}^- = 1, \quad \forall i \in N^- \quad (4.3.4)$$

$$\sum_{j=1}^{n^-+1} x_{ij}^- = 1, \quad \forall i \in N^- \quad (4.3.5)$$

$$\sum_{i \in N^-} y_{0ti} = 1, \quad \forall t \in T \quad (4.3.6)$$

$$\sum_{i \in N^-} y_{it(n^-+1)} = 1, \quad \forall t \in T \quad (4.3.7)$$

$$\sum_{j=1}^{n^-+1} \sum_{t \in T} y_{itj} = 1, \quad \forall i \in N^- \quad (4.3.8)$$

$$\sum_{j=0}^{n^-} \sum_{t \in T} y_{jti} = 1, \quad \forall i \in N^- \quad (4.3.9)$$

$$\sum_{i \in N^-} z_{ii'} = 1, \quad \forall i' \in N^+ \quad (4.3.10)$$

$$\sum_{i' \in N^+} z_{ii'} = 1, \quad \forall i \in N^- \quad (4.3.11)$$

$$\sum_{i' \in N^+} x_{0i'}^+ = 1 \quad (4.3.12)$$

$$\sum_{i' \in N^+} x_{i'(n^++1)}^+ = 1 \quad (4.3.13)$$

$$\sum_{j'=0}^{n^+} x_{ji'}^+ = 1, \quad \forall i' \in N^+ \quad (4.3.14)$$

$$\sum_{j'=1}^{n^++1} x_{ji'}^+ = 1, \quad \forall i' \in N^+ \quad (4.3.15)$$

$$cq_i^- \geq cq_j^- - M \cdot (1 - x_{ji}^-) + hq_i^- + g \cdot |l_i^- - l_j^-|, \quad \forall i, j \in N^- \quad (4.3.16)$$

$$cq_i^- \geq hq_i^- - M \cdot (1 - x_{0i}^-), \quad \forall i \in N^- \quad (4.3.17)$$

$$ct_i^- \geq cq_i^- + vl_i^- + hy^-, \quad \forall i \in N^- \quad (4.3.18)$$

$$ct_i^- \geq ct_j^- - M \cdot \left(1 - \sum_{i \in T} y_{jii}\right) + vl_i^- + hy^-, \quad \forall i, j \in N^- \quad (4.3.19)$$

$$ct_{i'}^+ \geq ct_i^- - M \cdot (1 - z_{ii'}) + ltl_{i'}^+ + hy^+ + ltv_{i'}^+ + vtv, \quad \forall i \in N^-, i' \in N^+ \quad (4.3.20)$$

$$ct_i \geq ct_{i'}^+ - M \cdot (1 - z_{ii'}), \quad \forall i \in N^-, i' \in N^+ \quad (4.3.21)$$

$$cq_{i'}^+ \geq cq_j^+ - M \cdot (1 - x_{ji'}^+) + hq_{i'}^+ + g \cdot |l_{i'}^+ - l_j^+|, \quad \forall i', j' \in N^+ \quad (4.3.22)$$

$$cq_{i'}^+ \geq ct_{i'}^+ + hq_{i'}^+, \quad \forall i' \in N^+ \quad (4.3.23)$$

$$c^- \geq ct_i^-, \quad \forall i \in N^- \quad (4.3.24)$$

$$c^+ \geq cq_{i'}^+, \quad \forall i' \in N^+ \quad (4.3.25)$$

$$c \geq \max\{c^-, c^+\} \quad (4.3.26)$$

$$x_{ij}^-, x_{ji'}^+, y_{iij}, z_{ii'} \in \{0, 1\} \quad (4.3.27)$$

$$cq_i^-, ct_i^-, cq_{i'}^+, ct_{i'}^+, ct_i, c^-, c^+, c \geq 0. \quad (4.3.28)$$

模型是以最小化的所有船只的完工时间为目标函数(4.3.1). 约束(4.3.2)-(4.3.5)定义了QC卸载进口集装箱的序列. 约束(4.3.6)-(4.3.9)定义了YT运输进口集装箱的顺序. 约束(4.3.10)-(4.3.11)确定了唯一的进出口集装箱对. 约束(4.3.12)-(4.3.15)定义了QC装载出口集装箱的序列. 约束(4.3.16)-(4.3.17)给出了QC卸载进口集装箱完工时间, 约束(4.3.18)-(4.3.19)给出了YT运输进口集装箱的完工时间. 约束(4.3.20)给出了YT运输出口集装箱的时间. 约束(4.3.21)给出了与进口集装箱*i*配对的出口集装箱

的YT运输完工时间.约束(4.3.22)-(4.3.23)给出了QC装载出口集装箱的完工时间.约束(4.3.24)给出了出口船只的完工时间,约束(4.3.25)给出了进口船只的完工时间,约束(4.3.26)给出了总的完工时间.约束(4.3.27)-(4.3.28)给出了决策变量的取值范围.

然而在实际的集装箱作业中,更常见的是进口集装箱和出口集装箱数量不相等的情况,即 $n^- \neq n^+$.不失一般性,我们假设进口箱的数量多于出口箱的数量,即 $n^- > n^+$.在这种情况下,将有 $n^- - n^+$ 个进口集装箱没有配对的出口集装箱,因此在运输这些进口集装箱时将会空载返回进口船只.为了实现模型的一一配对,我们人为地加入 $n^- - n^+$ 个虚拟集装箱.这样一来,我们还需要加入输入变量 ltv_i^- , $\forall i \in N^-$ 表示YT从进口集装箱 i 的堆场位置空载返回至进口船只所需时间.接下来我们给出模型 $[P_4]$ 的一个拓展模型 $[P_5]$.

$$\begin{aligned}
 [P_5] \quad & \min c \\
 \text{s.t.} \quad & (4.3.2) - (4.3.9), (4.3.12) - (4.3.28) \\
 & \sum_{i'=1}^{n^-} z_{ii'} = 1, \quad \forall i \in N^- \quad (4.3.29) \\
 & \sum_{i \in N^-} z_{ii'} = 1, \quad \forall i' \in \{1, 2, \dots, n^-, \dots, n^+\} \quad (4.3.30) \\
 & ct_i^+ \geq ct_i^- - M \cdot (1 - z_{ii'}) + ltv_i^-, \quad \forall i \in N^-, i' \in \{n^+ + 1, \dots, n^-\} \quad (4.3.31)
 \end{aligned}$$

约束(4.3.29)-(4.3.30)确定了带有虚拟出口集装箱的唯一的集装箱对.约束(4.3.31)给出了虚拟出口集装箱的YT运输完工时间.

§4.3.2 遗传算法

基于本节研究问题的计算复杂度,我们设计GA进行求解.

染色体表示.针对本节的具体研究,我们采用双层的非负整数编码来表示问题的可行解.染色体的第一层编码表示QC卸载进口集装箱的序列,第二层编码表示与进口集装箱以一一配对的出口集装箱.如果进口集装箱和出口集装箱的数量不相等,我们会添加一些虚拟的集装箱使进出口集装箱一一配对.图4.2给出了一个染色体结构的例

子,其中卸载进口集装箱的顺序是(3, 6, 1, 4, 5, 2),进出口集装箱对是(3,2), (6,3), (1,4), (4,6), (5,1), (2,5).染色体的解码规则服从于YT派遣规则,即将集装箱分配给第一个闲置的YT.

3	6	1	4	5	2
2	3	4	6	1	5

图 4.2: 染色体结构示例

Fig. 4.2: An example of the chromosome structure

染色体初始化.GA采用一系列的初始解作为第一代.为了简化初始代的产生过程,一系列的染色体随机产生.在进行初始化时,两层染色体分层独立产生,每一层都是一组随机的序列.

适应度函数.本节研究的目标函数是最小化的完工时间,所以我们采用目标函数的倒数作为适应度函数: $eval = 1/c$.

选择.本节研究采用轮盘赌选择从父代种群选出子代种群.

Parent 1	<table><tr><td>3</td><td>6</td><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>2</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>6</td><td>1</td><td>5</td></tr></table>	3	6	1	4	5	2	2	3	4	6	1	5	<table><tr><td>3</td><td>6</td><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>2</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>6</td><td>1</td><td>5</td></tr></table>	3	6	1	4	5	2	2	3	4	6	1	5	Parent 1
3	6	1	4	5	2																						
2	3	4	6	1	5																						
3	6	1	4	5	2																						
2	3	4	6	1	5																						
Offspring 1	<table><tr><td>6</td><td>2</td><td>1</td><td>4</td><td>5</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>6</td><td>1</td><td>5</td></tr></table>	6	2	1	4	5	3	2	3	4	6	1	5	<table><tr><td>3</td><td>6</td><td>1</td><td>4</td><td>2</td><td>5</td></tr><tr><td>4</td><td>1</td><td>3</td><td>6</td><td>2</td><td>5</td></tr></table>	3	6	1	4	2	5	4	1	3	6	2	5	Offspring 2
6	2	1	4	5	3																						
2	3	4	6	1	5																						
3	6	1	4	2	5																						
4	1	3	6	2	5																						
Parent 2	<table><tr><td>6</td><td>5</td><td>1</td><td>4</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>4</td><td>1</td><td>3</td><td>6</td><td>2</td><td>5</td></tr></table>	6	5	1	4	2	3	4	1	3	6	2	5	<table><tr><td>6</td><td>5</td><td>1</td><td>4</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>4</td><td>1</td><td>3</td><td>6</td><td>2</td><td>5</td></tr></table>	6	5	1	4	2	3	4	1	3	6	2	5	Parent 2
6	5	1	4	2	3																						
4	1	3	6	2	5																						
6	5	1	4	2	3																						
4	1	3	6	2	5																						

图 4.3: 染色体交叉示例

Fig. 4.3: Illustration of crossover

交叉.针对本节研究的具体编码,我们采用顺序交叉以避免非法子代的产生.染色体的两层是独立的,所以选择染色体的任何一层是随机、不依赖的.图 4.3 给出了一个染色体交叉的例子,其中选择第一层

染色体进行交叉.

变异.在本节的研究中,变异采用在两层染色体中实行交叉变异.图 4.4 给出了一个染色体变异的例子,其中第一层染色体选中的变异列是第 2 列和第 5 列, 第二层染色体选中的列是第 1 列和第 4 列.

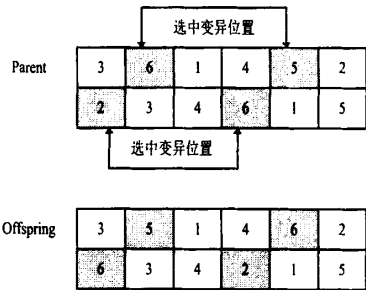


图 4.4: 染色体变异示例

Fig. 4.4: Illustration of mutation

§4.3.3 数值计算

我们用 20 组随机产生的算例来评估 GA 所求的解的质量.对于小规模算例, CPLEX 可以在规定时限内求得问题的精确解.然而,随着问题规模的变大, CPLEX 的计算时间迅速增长, 不能在合理的时间内得到问题的可行解.

表 4.1 给出了进出口集装箱相等时的算例计算结果.表 4.2 给出了进出口集装箱不等时的计算结果.从这两个表格中可以看出, GA 可以在合理时间内得出所有算例的可行解. 对于小规模算例, GA 的计算误差非常接近于 0, 这也就是说此时 GA 得到的解非常接近于问题的全局最优解.对于大规模算例的大多数算例, GA 的计算时间和所求的解的质量都优于 CPLEX. 此外, CPLEX 对于大规模算例不能在可接受的时间内给出质量较好的解, 甚至不能给出整数解.

§4.4 多个 QC 和多个 YT

基于上一节给出的一个 QC 和多个 YT 的 QCYTP 模型, 接下来我们给

表 4.1: 进出口集装箱数量相等时的计算结果

Tab. 4.1: Results of computational tests for same number cases

算例 n	规模 ¹	CPLEX				GA		
		LB	UB	Gap ² (%)	Time(s) ³	UB	Gap(%)	Time(s)
1	$3 \times 3 \times 1$	693	693	0	0.28	693	0	0.12
2	$3 \times 3 \times 2$	443	443	0	0.17	443	0	0.13
3	$4 \times 4 \times 1$	955	955	0	1.00	955	0	0.17
4	$4 \times 4 \times 2$	533	533	0	0.91	533	0	0.12
5	$5 \times 5 \times 1$	1142	1142	0	0.56	1142	0	0.19
6	$5 \times 5 \times 2$	667	667	0	23.07	673	0.9	0.19
7	$5 \times 5 \times 3$	510	510	0	6.10	510	0	0.19
8	$6 \times 6 \times 1$	1406	1406	0	5295.2	1415	0.6	0.22
9	$6 \times 6 \times 2$	775	775	0	1264.3	780	1.9	0.21
10	$6 \times 6 \times 3$	577	577	0	1611.2	600	4.0	0.23
11	$7 \times 7 \times 2$	911	915	0.4	7200.0	930	2.1	0.28
12	$10 \times 10 \times 4$	663	881	34.4	7200.0	876	32.1	0.57
13	$13 \times 13 \times 4$	897	1117	24.5	7200.0	1076	20.0	0.87
14	$15 \times 15 \times 5$	996	1246	25.1	7200.0	1130	13.5	0.72
15	$20 \times 20 \times 6$	1295	1765	36.3	7200.0	1364	5.3	1.55
16	$25 \times 25 \times 7$	1296	2024	56.2	7200.0	1592	22.8	2.51
17	$30 \times 30 \times 8$	1292	2766	114.1	7200.0	2022	56.5	3.02
18	$35 \times 35 \times 8$	1288	3959	174.8	7200.0	2422	88.0	2.71
19	$40 \times 40 \times 8$	1288	- ⁴	-	7200.0	3299	156.1	4.82
20	$40 \times 40 \times 10$	1290	-	-	7200.0	3529	173.6	3.36

规模¹: 进口箱的数量 \times 出口箱的数量 \times YT的数量;

Gap²: $Gap = (UB - LB) / LB \times 100$;

Time(s)³: 计算时间, 以 s 为单位;

-⁴: 在 2-h 内没有找到整数解.

表 4.2: 进出口集装箱数量不等时的计算结果

Tab. 4.2: Results of computational tests for the different number cases

算例		CPLEX				GA		
n	规模 ¹	LB	UB	Gap ² (%)	Time(s) ³	UB	Gap(%)	Time(s)
1	$3 \times 2 \times 1$	560	560	0	0.28	560	0	0.15
2	$4 \times 2 \times 1$	691	691	0	0.95	691	0	0.14
3	$4 \times 3 \times 1$	800	800	0	1.11	800	0	0.17
4	$4 \times 3 \times 2$	446	446	0	1.06	446	0	0.17
5	$5 \times 2 \times 1$	796	796	0	12.96	796	0	0.18
6	$5 \times 3 \times 1$	981	981	0	13.01	986	0.5	0.19
7	$5 \times 4 \times 2$	588	588	0	10.97	608	3.4	0.18
8	$6 \times 3 \times 1$	1106	1106	0	2046.0	1123	1.5	0.19
9	$6 \times 4 \times 1$	1262	1262	0	1274.0	1274	1.0	0.22
10	$6 \times 5 \times 2$	730	730	0	1446.1	742	1.6	0.21
11	$7 \times 6 \times 2$	911	915	0.4	7200.0	930	2.1	0.28
12	$10 \times 8 \times 4$	589	639	8.5	7200.0	657	11.5	0.35
13	$13 \times 10 \times 4$	659	862	30.8	7200.0	752	14.1	0.99
14	$15 \times 13 \times 5$	805	1041	29.3	7200.0	940	16.8	0.81
15	$20 \times 15 \times 6$	802	1144	42.6	7200.0	986	22.9	1.28
16	$25 \times 20 \times 7$	895	1656	85.0	7200.0	1211	35.3	2.40
17	$30 \times 25 \times 8$	1092	2077	90.2	7200.0	1422	30.2	3.40
18	$35 \times 30 \times 8$	1288	3312	157.1	7200.0	1773	37.7	4.09
19	$40 \times 35 \times 8$	1288	- ⁴	-	7200.0	2386	85.2	4.50
20	$40 \times 35 \times 10$	1290	4592	284.5	7200.0	2158	67.5	3.68

规模¹: 进口箱的数量 \times 出口箱的数量 \times YT 的数量;

Gap²: $Gap = (UB - LB) / LB \times 100$;

Time(s)³: 计算时间, 以 s 为单位;

-⁴: 在 2-h 内没有找到整数解.

出多个 QC 的 QCYTP 模型. 在这个模型中, 我们还考虑了一些实际问题: 集装箱的优先顺序、QC 之间的妨碍、QC 作业的安全距离. 其中, 集装箱的优先顺序确保了一些集装箱需要在其他集装箱之前进行作业, QC 之间的妨碍是因为 QC 在同一岸线上移动, 彼此之间不得交叉, QC 作业的安全距离是确保两个相邻 QC 同时作业时应该保持适当的距离确保安全.

为了严谨地建立数学模型, 在上一节的模型假设的基础上我们还需要添加一些问题的假设:

1. QC 和 YT 出现资源短缺时, 则需要互相等待.
2. 同一组的集装箱若存在优先顺序, 则优先顺序是已知的.
3. 所有的 QC 是从左到右按照升序进行排列.

§4.4.1 模型建立

基于上一节的符号和模型, 我们需要添加或修改一些变量并重新构建模型.

输入符号:

- K^- 卸载进口集装箱的 QC 集合;
- K^+ 装载出口集装箱的 QC 集合;
- Φ^- 受优先顺序约束的进口集装箱的集合;
- Φ^+ 受优先顺序约束的出口集装箱的集合;
- l_0 相邻 QC 之间的安全距离.

决策变量:

- x_{ikj}^- 如果 QC k 卸载进口集装箱 i 后的作业是卸载进口集装箱 j , 则为 1, 否则为 0; $\forall i \in \{0, 1, \dots, n^-\}, j \in \{1, 2, \dots, n^- + 1\}, k \in K^-$
- x_{irkj}^+ 如果 QC k' 装载出口集装箱 i' 后的作业是装载出口集装箱 j' , 则为 1, 否则为 0; $\forall i' \in \{0, 1, \dots, n^+\}, j' \in \{1, 2, \dots, n^+ + 1\}, k' \in K^+$
- p_{ij}^- 如果卸载进口集装箱 j 的开始时间晚于卸载进口集装箱 i 的结束时间, 则为 1, 否则为 0; $\forall i, j \in N^-$
- $p_{i'j'}^+$ 如果装载出口集装箱 j' 的开始时间晚于装载出口集装箱 i' 的结束时间, 则为 1, 否则为 0; $\forall i', j' \in N^+$.

接下来我们给出进出口集装箱数量相等时的多个 QC 的 QCYTP 模型 $[\mathcal{P}_6]$.

$$[\mathcal{P}_6] \quad \min c$$

$$\text{s.t. } (4.3.6) - (4.3.11), (4.3.18) - (4.3.21), (4.3.23) - (4.3.26), (4.3.28).$$

$$\sum_{i=1}^{n^-+1} x_{0ki}^- = 1, \quad \forall k \in K^- \quad (4.4.1)$$

$$\sum_{i=0}^{n^-} x_{ik(n^-+1)}^- = 1, \quad \forall k \in K^- \quad (4.4.2)$$

$$\sum_{k \in K^-} \sum_{j=1}^{n^-+1} x_{ikj}^- = 1, \quad \forall i \in N^- \quad (4.4.3)$$

$$\sum_{j=1}^{n^-+1} x_{ikj}^- = \sum_{j=0}^{n^-} x_{jki}^-, \quad \forall i \in N^-, k \in K^- \quad (4.4.4)$$

$$\sum_{i'=1}^{n^++1} x_{0k'i'}^+ = 1, \quad \forall k' \in K^+ \quad (4.4.5)$$

$$\sum_{i'=0}^{n^+} x_{i'k'(n^++1)}^+ = 1, \quad \forall k' \in K^+ \quad (4.4.6)$$

$$\sum_{k' \in K^+} \sum_{j'=1}^{n^++1} x_{i'k'j'}^+ = 1, \quad \forall i' \in N^+ \quad (4.4.7)$$

$$\sum_{j'=1}^{n^++1} x_{i'k'j'}^+ = \sum_{j'=0}^{n^+} x_{j'k'i'}^+, \quad \forall i' \in N^+, k' \in K^+ \quad (4.4.8)$$

$$cq_i^- \geq cq_j^- - M \cdot (1 - \sum_{k \in K^-} x_{jki}^-) + hq_i^- + g \cdot |l_i^- - l_j^-|, \quad \forall i, j \in N^- \quad (4.4.9)$$

$$cq_i^- \geq hq_i^- - M \cdot (1 - \sum_{k \in K^-} x_{0ki}^-), \quad \forall i \in N^- \quad (4.4.10)$$

$$cq_{i'}^+ \geq cq_{j'}^+ - M \cdot (1 - \sum_{k' \in K^+} x_{j'k'i'}^+) + hq_{i'}^+ + g \cdot |l_{i'}^+ - l_{j'}^+|, \quad \forall i', j' \in N^+ \quad (4.4.11)$$

$$cq_j^- - d_j^- \geq cq_i^-, \quad \forall (i, j) \in \Phi^- \quad (4.4.12)$$

$$M \cdot (1 - p_{ij}^-) \geq cq_i^- - (cq_j^- - d_j^-), \quad \forall i, j \in N^- \quad (4.4.13)$$

$$cq_j^- - d_j^- - cq_i^- \leq M \cdot p_{ij}^-, \quad \forall i, j \in N^- \quad (4.4.14)$$

$$(l_i^- - l_j^-) \cdot (i - j) + M \cdot (p_{ij}^- + p_{ji}^-) \geq (i - j) \cdot l_0, \quad \forall i, j \in N^-, i \neq j \quad (4.4.15)$$

$$cq_{j'}^+ - d_{j'}^- \geq cq_{i'}^+, \quad \forall (i', j') \in \Phi^+ \quad (4.4.16)$$

$$M \cdot (1 - p_{i'j'}^+) \geq cq_{j'}^+ - (cq_{i'}^+ - d_{j'}^-), \quad \forall i', j' \in N^+ \quad (4.4.17)$$

$$cq_{j'}^+ - d_{j'}^- - cq_{i'}^+ \leq M \cdot p_{i'j'}^+, \quad \forall i', j' \in N^+ \quad (4.4.18)$$

$$(l_{i'}^+ - l_{j'}^+) \cdot (i' - j') + M \cdot (p_{i'j'}^+ + p_{j'i'}^+) \geq (i' - j') \cdot l_0, \quad \forall i', j' \in N^+, i' \neq j' \quad (4.4.19)$$

$$x_{ikj}^-, x_{i'k'j'}^+, y_{iij}, z_{iir}, p_{ij}^-, p_{i'j'}^+ \in \{0, 1\}. \quad (4.4.20)$$

约束 (4.4.1)-(4.4.4) 定义了进行卸载作业的 QC 的调度和 QC 卸载进口集装箱的顺序. 约束 (4.4.5)-(4.4.8) 定义了进行装载作业的 QC 的调度和 QC 装载出口集装箱的顺序. 约束 (4.4.9)-(4.4.10) 给出了 QC 卸载进口集装箱的完工时间, 约束 (4.4.11) 给出了 QC 装载进口集装箱的完工时间. 约束 (4.4.12) 保证了 QC 卸载进口集装箱的优先顺序. 约束 (4.4.13)-(4.4.15) 保证了进行卸载作业的 QC 的禁止跨越和安全距离. 约束 (4.4.16) 保证了 QC 装载出口集装箱的优先顺序. 约束 (4.4.17)-(4.4.19) 保证了进行装载作业的 QC 的禁止跨越和安全距离. 约束 (4.4.20) 给出了决策变量的取值范围.

接下来, 我们将模型 $[P_6]$ 推广到进出口模型数不相等的情形. 同样我们假设进口集装箱的数量大于出口集装箱的数量, 并加入 $n^- - n^+$ 个虚拟出口集装箱以实现一一配对. 下面给出推广模型 $[P_7]$.

$$[P_7] \quad \min c$$

s.t. (4.3.6) – (4.3.9), (4.3.18) – (4.3.21), (4.3.23) – (4.3.26), (4.3.28), (4.4.1) – (4.4.20)

$$\sum_{i'=1}^{n^-} z_{iir} = 1, \quad \forall i \in N^- \quad (4.4.21)$$

$$\sum_{i \in N^-} z_{iir} = 1, \quad \forall i' \in \{1, \dots, n^+, \dots, n^-\} \quad (4.4.22)$$

$$ct_{i'}^+ \geq ct_i^- - M \cdot (1 - z_{iir}) + lv_i^-, \quad \forall i' \in \{n^+ + 1, \dots, n^-\}, i \in N^-. \quad (4.4.23)$$

约束 (4.4.21)-(4.4.22) 确定了带有虚拟出口集装箱的进出口集装箱对. 约束 (4.4.23) 给出了虚拟从出口集装箱的 YT 运输时间, 即与虚拟出口集装箱配对的进口集装箱空载返回进口船只的时间.

§4.4.2 遗传算法

由前面的假设我们知道, QC 在岸线上从左到右程升序排列. 基于本节研究的问题复杂度, GA 在编码时, 我们规定处于相同贝位的集装箱会被分配给同一 QC.

染色体表示. 对本节研究问题进行求解主要是求得进口 QC 卸载进口箱的顺序、出口 QC 装载出口箱的顺序和 YT 运输进出口集装箱的顺序. 该问题 GA 的染色体表示由三个子染色体构成: QC 卸载进口集装箱的调度、QC 装载出口集装箱的调度、进出口集装箱配对及 YT 运输集装箱的调度. 图 4.5 给出了染色体结构的示例, 表示了一个有 8 个进口集装箱, 3 个卸载 QC, 8 个出口集装箱, 3 个装载 QC, 3 个 YT 的染色体. 在这个例子中, 各种资源的作业顺序如下所示:

进口船只: QC 1: 1→2; QC 2: 3→4; QC 3: 7→8→5→6;

出口船只: QC 1: 2→1; QC 2: 4→3→6→5; QC 3: 7→8;

YT 1: (1→2) → (5→8) → (6→5);

YT 2: (2→4) → (7→6); YT 3: (3→3) → (4→1) → (7→6) → (8→7).

卸载进口箱的顺序	1	2	3	4	7	8	5	6
QC 的调度	1	1	2	2	3	3	3	3

装载出口箱的顺序	2	1	4	3	6	5	7	8
QC 的调度	1	1	2	2	2	2	3	3

进出口集装箱对	1	2	3	4	7	8	5	6
	2	4	3	1	6	7	8	5
YT 的调度	1	2	3	3	2	3	1	1

图 4.5: 染色体表示示例

Fig. 4.5: An example of chromosome representation

染色体初始化. 一系列随机产生的染色体构成初始代, 且三个子染色体相互独立. 在第一个子染色体, 一系列符合卸载进口集装箱优先顺序的序列随机产生构成第一行, 基于相同贝位的进口集装箱被分配给同一 QC 的原则随机产生 QC 调度构成第二行. 第二个子染色体的生

成与第一个子染色体的生成类似.在第三个子染色体中,YT的分配和调度是随机产生的.

适应度函数.本节研究是以最小化的完工时间为目标函数,所以采用目标函数的倒数作为适应度函数 $fit = 1/c$.

选择.本节研究采用轮盘赌选择从父代种群选出子代种群.

交叉.染色体的各子染色体是独立的,所以选择任一子染色体的任何一层是随机、不依赖的.针对本节研究的具体编码避免非法子代的产生,第一个、第二个子染色体以及第三个子染色体的集装箱配对部分,我们采用顺序交叉;第三个子染色体的YT调度,我们采用两点交叉.需要说明的是,前两个子染色体的QC分配和调度编码保持不变,即交叉随机发生在QC卸载进口箱的顺序、QC装载出口箱的顺序、进出口集装箱的配对或YT的分配调度.图4.6给出了一个第一、二个子染色体交叉的示例,图4.7给出了一个第三个子染色体交叉的示例.

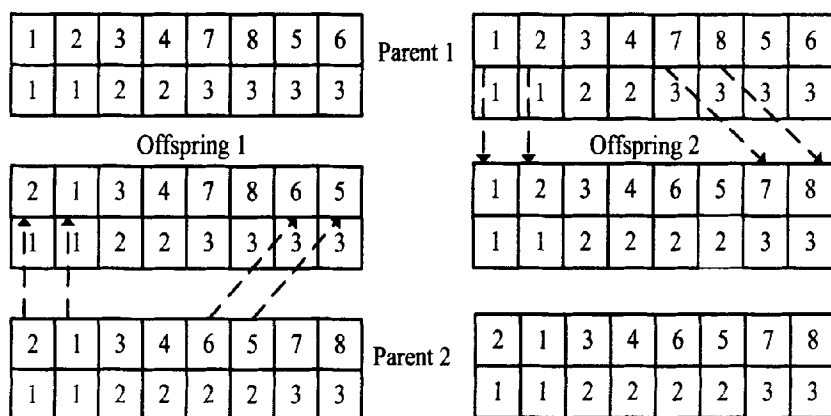


图 4.6: 染色体交叉示例 1

Fig. 4.6: Illustration 1 for crossover

变异.在本节的GA中,50%的染色体实行交换变异,50%的染色体按照种群初始化时的规则进行变异.在进行变异时,各子染色体变异位置是随机的.图4.8给出了一个染色体变异的例子.

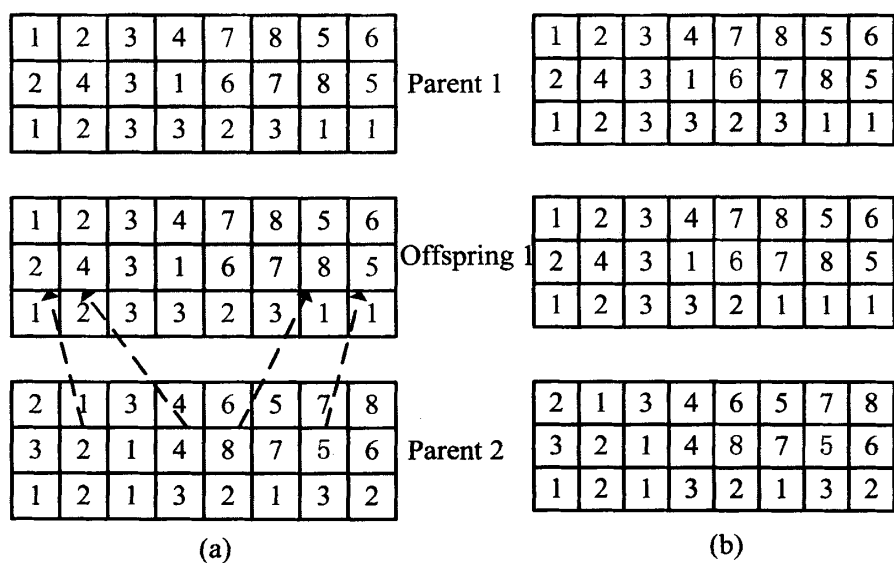


图 4.7: 染色体交叉示例 2

Fig. 4.7: Illustration 2 for crossover

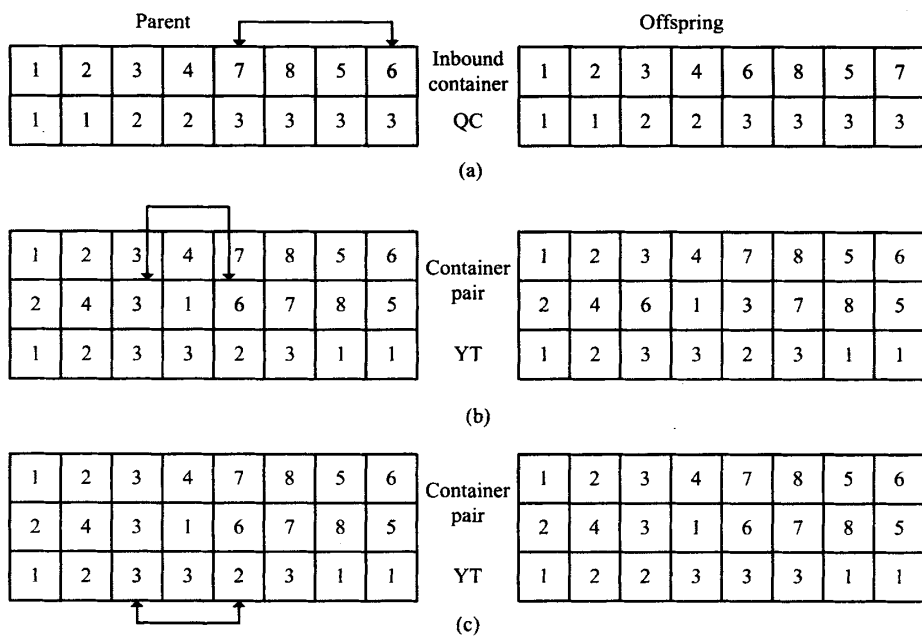


图 4.8: 染色体变异示例

Fig. 4.8: An illustration for crossover

§4.4.3 数值计算

为了验证模型的可解性和算法的可行性,我们随机产生了两组包括规模大小不同的算例进行数值计算.

表 4.3 给出了进出口集装箱数量相等时的情况,表 4.4 给出了进出口集装箱不等时的情况.从这两个表格可以看出,对于所有的算例,GA 都可以找出可行整数解.对于小规模算例,CPLEX 展示出了较好的性能,可以在规定时限内给出质量较优的整数解,甚至是最优整数解.然而,随着规模的增加,CPLEX 的性能显著下降,在规定限内找不到优质的解,甚至是可行的整数解.但是,无论从算例的计算的时间还是计算解的质量,GA 都是可行的.

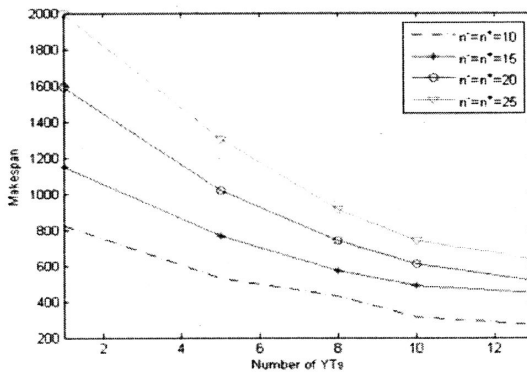


图 4.9: YT 的数量对目标函数值的影响

Fig. 4.9: Effect of the number of YTs on objective function

此外,为了进一步对模型进行研究,我们评估了 YT 的数量对模型目标函数值的影响.文献 [12][13][37][38] 等进行研究时, YT 和 QC 的比例控制在 2.5-3.5 之间,因此本节利用比例值为 2.5 进行研究.图 4.9 给出了 YT 的数量对目标函数值的影响.可以看出,对于小规模算例,增加 YT 的数量对降低目标函数值的影响很小.然而,对于大规模的算例 YT 数量的增加对降低目标函数值有明显的作用.当 YT 的数量超过 10 后,影响渐渐变弱.

表 4.3: 进出口集装箱数量相等时的计算结果

Tab. 4.3: Results of computational tests for same number cases

算例	规模 ¹	CPLEX			GA		
		LB	UB	Gap ² (%)	UB	Gap(%)	Time(s) ³
1	6 × 1 × 1 × 1	1216	1216	0	1216	0	0.733
2	8 × 1 × 1 × 2	849	849	0	853	0.47	1.482
3	10 × 2 × 1 × 3	791	787	0.51	799	1.52	1.504
4	10 × 2 × 2 × 4	613	568	7.92	627	10.39	1.633
5	12 × 2 × 1 × 3	750	503	49.11	805	60.04	1.735
6	12 × 2 × 2 × 5	612	553	10.67	628	13.56	1.656
7	12 × 1 × 2 × 4	700	603	16.09	740	22.72	1.947
8	15 × 2 × 2 × 5	709	659	7.59	745	13.05	2.058
9	15 × 2 × 2 × 4	861	663	29.86	871	31.37	1.926
10	15 × 3 × 2 × 5	705	646	9.13	737	14.09	1.963
11	20 × 2 × 2 × 4	1211	449	169.71	1138	153.45	3.813
12	20 × 2 × 2 × 6	1399	577	142.46	899	55.81	3.370
13	20 × 2 × 3 × 6	909	557	63.20	855	53.50	3.167
14	25 × 3 × 3 × 8	1288	369	249.05	880	138.48	4.388
15	25 × 2 × 3 × 6	1810	369	390.51	1076	191.60	4.466
16	25 × 2 × 2 × 6	1900	371	412.13	1120	201.89	4.109
17	30 × 2 × 2 × 8	1750	269	550.56	1092	305.95	5.128
18	30 × 2 × 2 × 6	- ⁴	269	-	1368	408.55	5.461
19	30 × 2 × 2 × 4	-	262	-	1673	538.55	5.655
20	30 × 3 × 2 × 6	-	233	-	1353	480.69	5.974

规模¹: 进/出口集装箱的数量×进行卸载作业的QC的数量×进行装载作业的QC的数量×YT的数量;

Gap²: $Gap = (UB - LB)/LB \times 100$; Time(s)³: 计算时间, 以 s 为单位;

-⁴: 在5-h内没有找到整数解.

表 4.4: 进出口集装箱数量不等时的计算结果

Tab. 4.4: Results of computational tests for different number cases

n	算例 规模 ¹	CPLEX			GA		
		LB	UB	Gap ² (%)	UB	Gap(%)	Time(s) ³
1	$6 \times 4 \times 1 \times 1 \times 2$	544	544	0	544	0	0.670
2	$8 \times 6 \times 2 \times 2 \times 3$	541	485	11.51	574	18.35	0.904
3	$10 \times 6 \times 2 \times 2 \times 3$	625	579	7.94	639	10.36	1.074
4	$10 \times 8 \times 2 \times 2 \times 4$	528	502	5.18	561	11.75	1.154
5	$12 \times 8 \times 2 \times 2 \times 4$	560	497	12.68	597	20.12	1.216
6	$12 \times 10 \times 2 \times 2 \times 4$	639	597	7.04	646	8.21	1.404
7	$12 \times 10 \times 2 \times 2 \times 5$	550	403	36.48	574	42.43	1.522
8	$14 \times 12 \times 2 \times 2 \times 5$	658	434	51.61	658	51.61	1.748
9	$14 \times 12 \times 3 \times 2 \times 6$	540	322	67.70	577	79.19	1.684
10	$16 \times 12 \times 3 \times 2 \times 6$	566	364	55.49	596	63.74	1.977
11	$16 \times 14 \times 3 \times 2 \times 6$	663	485	36.70	664	36.91	2.075
12	$16 \times 14 \times 3 \times 2 \times 7$	593	379	56.46	565	49.08	2.191
13	$18 \times 14 \times 4 \times 3 \times 8$	732	392	86.73	574	46.43	2.327
14	$18 \times 16 \times 4 \times 3 \times 10$	501	389	28.79	480	23.39	2.341
15	$18 \times 16 \times 4 \times 3 \times 8$	609	281	53.86	601	113.88	2.583
16	$25 \times 20 \times 4 \times 3 \times 10$	763	281	171.53	699	148.75	3.514
17	$26 \times 24 \times 4 \times 3 \times 10$	918	277	231.41	781	181.95	4.118
18	$28 \times 25 \times 4 \times 3 \times 10$	- ⁴	324	-	846	161.11	4.588
19	$28 \times 25 \times 5 \times 4 \times 10$	-	298	-	779	161.41	4.923
20	$30 \times 25 \times 5 \times 4 \times 10$	-	296	-	798	169.59	6.433

规模¹: 进口集装箱的数量 \times 出口集装箱的数量 \times 进行卸载作业的QC的数量 \times 进行装载作业的QC的数量 \times YT的数量;

Gap²: $Gap = (UB - LB) / LB \times 100$; Time(s)³: 计算时间, 以 s 为单位;

-⁴: 在5-h内没有找到整数解.

§4.5 本章小节

本章主要研究了 QCYTP, 并从一个 QC 和多个 YT、多个 QC 和多个 YT 分别建立了线性整数规划模型. 为了提高运输的效率和降低空载率, 我们率先将 YT 双循环策略应用于模型之中. 在多个 QC 和多个 YT 的模型中, 我们还考虑了一些非常重要的现实因素: 集装箱之间的优先顺序、QC 之间不可交叉、QC 之间的安全距离等. 基于问题的计算复杂度, 本章分别提出了适合各模型的 GA. 经过数值计算表明, 本章所提出的模型和算法对解决 QCYTP 是非常重要和可行的.

第五章 总结与展望

本文主要研究了集装箱码头泊位-岸桥-集卡资源的整合优化.研究主要分为泊位-岸桥的整合优化(BACAP)、岸桥-集卡调度研究(QCYTP).核心内容如下.

对于BACAP研究,由于QC在岸线的移动速度限制,QC的准备时间对于QC的分配非常重要.首先我们将QC的准备时间考虑在内,提出了一个确定性的整数线性规划模型.而QC的特殊作业环境会经常受到不确定性因素的影响,可能会造成确定性计划调度失效.然而频繁的计划调整会降低作业效率和提高作业成本,因此我们提出了鲁棒模型以吸收问题的不确定性.针对问题的计算复杂程度,我们提出了GA和插入启发式算法进行求解以获得问题的近似最优解.经过数值计算表明,不确定性的BACAP研究是非常重要的,并且本研究所提出的模型和算法是可行的.

对于QCYTP研究,为了提高资源利用率和降低码头花费,我们率先考虑YT双循环建立了整数线性规划模型.该部分研究主要分为一个QC和多个YT、多个QC和多个YT.在多个QC和多个YT研究中,我们还考虑了一些重要的现实因素:集装箱之间的优先顺序、QC之间不可交叉、QC之间的安全距离等.基于问题的计算复杂度,分别提出了适合各模型的GA进行求解.经过数值计算表明,本章所提出的模型和算法对解决QCYTP是非常重要和可行的.

以上工作对集装箱码头资源整合优化进行了一些初步的研究,虽然取得了一些成果.但是在这个领域中,还存在着些许问题可以进一步完善.作者今后需要进一步完善的方向主要包括:

1. 将泊位、岸桥、集卡、场桥等码头资源进行整合研究,进一步改善系统的连续性.
2. 除用鲁棒优化进行处理不确定性外,尝试利用动态规划等处理问题的不确定性.
3. 开发精确算法进行求解,降低计算时间、提高解的质量.

总之,集装箱码头泊位-岸桥-集卡整合优化研究已经有了较大的发

展,但仍然有很多问题需要进一步完善.我们相信,随着资源优化调度研究和算法设计的不断深入,集装箱码头资源优化研究理论和方法会得到进一步的完善.

参考文献

- [1] IFA Vis, R Koster. Transshipment of containers at container terminals: an overview[J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, **147**: 1-16.
- [2] D Steenken, S Voß, R Stahlbock. Container terminal operation and operations research - a classification and literature review[J]. *Operational Research Spectrum*, 2004, **26**: 3-49.
- [3] R Stahlbock, S Voß. Operations research at container terminals: a literature update [J]. *Operational Research Spectrum*, 2008, **30**: 1-52.
- [4] KK Lai, K Shih. A study of container berth allocation [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 1992, **26**: 45-60.
- [5] A Imai, K Nagaiwa, CW Tat. Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 1997, **31** (1): 75-94.
- [6] A Imai, E Nishimura, S Papadimitriou. The dynamic berth allocation problem for a container port [J]. *Transportation Research Part B*, 2001, **35**(4):401-417.
- [7] KH Kim, KC, Moon. Berth scheduling by simulated annealing [J]. *Transportation Research Part B*, 2003, **57**: 541-560.
- [8] JF Cordeau, G Laporte, P Legato, L Moccia. Models and tabu search heuristics for the berth-allocation problem [J]. *Transportation Science*, 2005, **39**(40): 526-538.
- [9] A Imai, E Nishimura, M Hattori, S Papadimitriou. Berth allocation at indented berths for mega-containerships [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, **179**(2): 579-593.
- [10] DH Lee, JH, Chen, JX Cao. The continuous berth allocation problem: a greedy randomized adaptive search solution [J]. *Transportation Research Part E*, 2010, **46**: 1017-1029.
- [11] CF Dagnazo. The cranes scheduling problem [J]. *Transportation Research Part B*, 1989, **23**(3):159-175.
- [12] KH Kim, YM Park. A crane scheduling method for port container terminals [J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, **156**: 752-768.

- [13] C Bierwirth, F Meisel. A fast heuristic for quay crane scheduling with interference constraints [J]. *Journal of scheduling*, 2009, **12**(4): 345-360.
- [14] DH Lee, HQ Wang. An approximation algorithm for quay crane scheduling with handling priority in port container terminals [J]. *Engineering optimization*, 2010, **42** (12): 1151-1161.
- [15] MH Hakam, WD Solvang, T Hammervoll. A genetic algorithm approach for quay crane scheduling with non-interference constraints at Narvik container terminal [J]. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 2012, **15**(4): 269-281.
- [16] N Al-Dhaheri, A Diabat. The quay crane scheduling problem [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2015, **36**: 87-94.
- [17] N Kenan, A Diabat. A branch-and-price algorithm to solve a quay crane scheduling problem [J]. *Procedia Computer Science*, 2015, **61** (2): 527-532.
- [18] JH Chen, DH Lee, JX Cao. Heuristic for quay crane scheduling at indented berth [J]. *Transportation Research Part E*, 2011, **47**:1005-1020.
- [19] CI Liu, PA Ioannou. A comparison of different AGV dispatching rules in an automated container terminal[C]. *The IEEE 5th Conference on Intelligent Transportation System 2002*, Singapore, IEEE, 2002.
- [20] KH Kim, JW Bae. A look-ahead dispatching method for automated guided vehicles in automated port container terminals [J]. *Transportation Science*, 2004, **38**(2): 224-234.
- [21] 康志敏. 集装箱自动化码头AGV路径优化和调度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [22] K Bish, FY Chen, YT Leong, BL Nelson, JWC Ng, D Simchi-Levi. Dispatching vehicles in a mega container terminal [J]. *Operational Research*, 2005, **27**(3): 491-506.
- [23] C Ng, KL Mak, YX Zhang. Scheduling trucks in container terminals using a genetic algorithm [J]. *Engineering Optimization*, 2007, **39**(1): 33-47.
- [24] J He, W Zhang, Y Huang, W Yan. A simulation optimization method for internal trucks sharing assignment among multiple container terminals[J]. *Advanced Engineering Informatics* , 2013, **27**(4): 598-614.

- [25] H Phan, KH Kim. Negotiating truck arrival times among trucking companies and a container terminal[J]. *Transportation Research Part E*, 2015, **75**: 132-144.
- [26] YM Park, KH Kim. A Scheduling method for berth and quay cranes[J]. *Operational Research Spectrum*, 2003, **25**: 1-23.
- [27] A Imai, HC Chen, ENishimura, S Papadimitriou. The simultaneous berth and quay crane allocation problem[J]. *Transportation Research Part E*, 2008, **44**(5): 900-920.
- [28] F Meisel, C Bierwirth. Heuristic for the integration of crane productivity in the berth allocation problem [J]. *Transportation Research Part E*, 2009, **45**: 196-209.
- [29] DH Lee, HQ Wang. Integrated discrete berth allocation and quay crane scheduling in port container terminals [J]. *Engineering Optimization*, 2010, **42**(8): 747-761.
- [30] M Rodriguez-Molins, F Barber, M Sierre, J Puente, M Salido. A genetic algorithm for berth allocation and quay crane assignment[J]. *Lecture notes in computer science* , 2012, **7637**: 601-610.
- [31] E Lalla-Ruiz, J Gonzalez-Velarde, B Melicn-Batistaa, J Moreno-Vega. Biased random key genetic algorithm for the tactical berth allocation problem[J]. *Applied Soft Computing* , 2014, **22**: 60-76.
- [32] C Iris, D Pacino, S Popke, A Larsen. Integrated berth allocation and quay crane assignment problem: set partitioning models and computational results[J]. *Transportation Research Part E* , 2015, **81**: 75-97.
- [33] F Li, JB Sheu, ZY Gao. Solving the continuous berth allocation and specific quay crane assignment problems with quay crane coverage range[J]. *Transportation Sciences* , 2015, **49**(4): 968-989.
- [34] Y Turkogullari, ZC Taskin, N Aras, IK Altinel. Optimal berth allocation, time-variant quay crane assignment and scheduling with crane setups in container terminals[J]. *European Journal of Operational Research* , 2016, **254**(3): 985-1001.
- [35] C Bierwirth, F Meisel. A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals[J]. *European Journal of Operational Research* , 2015, **244**: 675-689.
- [36] 计明军, 靳志宏. 集装箱码头集卡与岸桥协同调度优化[J]. 复旦学报(自然科学版), 2007, **04**: 476-480-488.

- [37] DH Lee, JX Cao. Integrated quay crane and yard truck schedule for inbound containers[C]. *International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management* , 2008, Japan.
- [38] JX Cao, QX Shi, DH Lee. Integrated quay crane and yard truck schedule problem in container terminals[J]. *Tsinghua Science and Technology* , 2010, **15**(4): 467-474.
- [39] L Tang, J Zhao, J Liu. Modeling and solution of the joint quay crane and truck scheduling problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, **236**(3): 978-990.
- [40] N Kaveshgar, N Huynh. Integrated quay crane and yard truck scheduling for unloading inbound containers[J]. *Int. J. Production Economics*, 2015, **159**: 168-177.
- [41] PF Zhou, HG Kang. Study on berth and quay-crane allocation under stochastic environments in container terminal[J]. *Systems Engineering-Theory Practice* , 2008, **28**(1): 161-169.
- [42] J Karafa, MM Golias, S Ivey, GKD Saharidis, N Leonardos. The berth allocation problem with stochastic vessel handling times[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , 2013, **65**(1-4): 473-484.
- [43] M Golias, I Portal, D Konur, E Kaisar, G Kolomvos. Robust berth scheduling at marine container terminals via hierarchical optimization[J]. *Computers & Operations Research* , 2014, **41**: 412-422.
- [44] M Rodriguez-Molins, L Ingolotti, F Barber, M Salido, M Sierra, J Puente. A genetic algorithm for robust berth allocation and quay crane assignment[J]. *Progress in Artificial Intelligence* , 2014, **2**(4): 177-192.
- [45] L Zhen. Tactical berth allocation under uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research* , 2015, **247**: 928-944.
- [46] C Iris, JG Jin, DH Lee. Quayside operations planning under uncertainty[C]. *European conference for operational Research 2015*. Glasgow, United Kingdom, Technical Program, 2016.
- [47] 张文修, 梁怡. 遗传算法的数学基础(第二版)[M]. 西安交通大学出版社: 西安, 2000.
- [48] 玄光南, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 清华大学出版社: 北京, 2003.
- [49] LJ Eshelman, JD Schaffer. Real-coded genetic algorithms and intervalschemata[J]. *Foundations of Genetic Algorithms* , 1993, **48** (2): 187-202.

- [50] JH Holland. Adaptation in natural and artificial systems[M]. MIT Press: MA, USA, 1992.
- [51] AL Soyster. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming [J]. *Operations Research* , 1973, **21** (5):1154-1157.
- [52] A Bental, A Nemirovski. Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data[J]. *Mathematical Programming* , 2000, **88** (3): 411-424.
- [53] D Bertsimas, M Sim. The price of robustness[J]. *Operations Research* , 2004, **52**:35-53.
- [54] P Schonfeld, O Sharafeldien. Optimal berth and quay crane combinations in container ports[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* , 1985, **111**(6): 1060-1072.
- [55] M Gen, R Cheng. Genetic algorithms and engineering design[M]. John Wiley&Sons: Singapore, 2007.
- [56] M Brad, G David. Genetic algorithms, tournament selection, and the effects of noise[J]. *Complex Systems* , 1995, **9**:193-212.

作者攻读硕士期间的研究成果

• 学术论文

[1] Xiao Ting Shang, Jin Xin Cao, Jie Ren. A robust optimization approach to the integrated berth allocation and quay crane assignment problem. *Transportation Research Part E & Logistics Transportation Review*, 2016, 94: 44-65. (SCI, 2.67)

[2] Jin Xin Cao, Xiao Ting Shang, Xue Ru Yao. Integrated quay crane and yard trucks schedule for the dual-cycling strategies. *The 17th COTA International Conference of Transportation Professionals, Shanghai, China*. (CPCI/EI, 已接收)

[3] Integrated schedule of quay cranes and yard trucks in container terminals. (已完成, 修改中)

• 参加科研项目情况

先进的集装箱港口物流系统仿真与优化方法研究. 国家自然科学基金【71262008】. 参与者.

致谢

时光匆匆流逝,硕士三年时光很快就要画上一个句号了.回想三年前,刚来到这个城市,有些青涩和迷茫;这三年中,我成长了很多,渐渐有了些许淡定和成熟的痕迹.这段路,不可说完美,但也是在最宝贵的三年里留下了奋斗的汗水和美好的回忆.

首先感谢我的导师曹瑾鑫教授,他渊博的知识、高尚的品德、严谨的科学态度和对学术的不懈追求时刻影响着我、激励着我.本文的工作是在曹老师的精心指导下完成的,从选题到完成,每一步都倾注了导师大量的心血,在此,谨向曹老师致以崇高的敬意和衷心的感谢!感谢曹老师三年来对我的关心与帮助!

感谢陈国庆教授,他严谨的治学态度、渊博的专业知识、精益求精的工作作风感染着我;诲人不倦的高尚师德,严以律己、宽以待人的崇高风范影响着我.这些高尚的品质将使我终身受益.感谢数学科学学院为我们提供的良好学习环境,感谢三年来数学科学学院高彩霞老师、乌彩英老师等所有老师的关怀与帮助.

感谢桃枫、王洋、李夏溪、王日栋、吕常亮、刘慧莲、任洁、薛聪聪、姚学儒、何玲玲等情同手足、荣辱与共的师兄师姐师弟师妹们.感谢你们在学习和生活上给予我的帮助.感谢305优化控制实验室的谷海波、湛智宇、温春燕等所有兄弟姐妹们,是你们让我在枯燥的学习和科研环境中得到无限的快乐,感谢你们陪我度过了三年快乐的硕士时光.

感谢557宿舍的姐妹们—吕娜、袁亚萍、石燕茹.我们来自不同的地区,感受着祖国文化的地区差异;我们学着不同的专业,体验着学术领域的五彩缤纷.每天晚上的夜谈,不仅开阔了我们的眼界,更增进了我们的友谊.这些无数个朝夕相处的快乐日子都将成为别后梦里的珍藏,让我们以感恩的心在未来的日子里共同成长,请你们珍重,愿我们的友情地久天长!

感谢我最亲爱的朋友—李鹏同学.风风雨雨一同走过,平凡的日子里给予我关心和照顾,困苦繁忙的日子里给予我帮助和包容.七年的陪伴、照顾和理解,我会铭记心中!

感谢我的父母和家人,正是他们生活上的照顾和精神上的支持,才使我克服重重困难,顺利完成学业.他们和善的为人、正直的品格、开明的理念、严谨的家风是对我成长的鞭策;他们对美好生活的向往,是我一直以来不懈追求的动力.这份爱,给予我在这条道路上继续前行的力量;这份情,是我用尽此生无以

回报的无私奉献.

最后感谢评阅和出席本论文答辩会的各位专家,感谢您在百忙之中给予的指导和提出的宝贵意见!

商晓婷

于内蒙古大学数学科学学院

二零一七年三月