

分类号：TP391 520.6099

密级：

天津理工大学研究生学位论文

集装箱码头泊位和岸桥联合鲁棒调度的 建模与优化

（申请硕士学位）

学科专业：计算机软件与理论

研究方向：复杂系统建模与优化

作者姓名：张秀福

指导教师：孙俊清 教授

2014 年 1 月

**Thesis submitted to Tianjin University of Technology for
the Master's Degree**

**Modeling and Optimization of
Container Terminals Berth and Quay
Cranes Integrated Robust Scheduling
Problem**

By

Xiufu Zhang

Supervisor

Junqing Sun

January 2014

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，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 天津理工大学 或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了谢意。

学位论文作者签名： 签字日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津理工大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津理工大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编，以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复本和电子文件。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名： 导师签名：

签字日期： 年 月 日 签字日期： 年 月 日

摘要

随着经济全球化进程的不断加快,世界各国之间的贸易往来日趋频繁,集装箱海上运输已成为连接全球供应链的重要环节,集装箱码头作为集装箱海上运输与陆地运输的交汇点,在国际运输网络中扮演着越来越重要的角色。随着国际竞争的不断加剧、以及国际货物贸易量的不断增加,集装箱码头面临的挑战也越来越严峻,其资源优化作业问题已成为物流领域研究的热点问题,而如何合理有效地分配泊位和岸桥资源,尤其是提高泊位和岸桥作业计划在不确定环境下的抗干扰能力,受到了研究者和业界管理人员重视。因此,本文对不确定环境下的泊位分配和岸桥分配的联合鲁棒调度问题进行了研究,主要内容如下:

首先,研究了不确定环境下的连续泊位和岸桥联合鲁棒调度的预调度计划问题,提出了基于时间冗余策略的泊位和岸桥联合调度预分配模型。本文所提出的模型在引入缓冲时间作为鲁棒性指标的同时,引入船舶计划延误时间的加权和作为服务性指标,并以船舶的装卸作业量作为其靠泊服务权重,以体现决策者对于不同装卸量船舶的延误时间的重视程度。模型通过对预计到港船舶的计划靠泊时刻、靠泊位置和分配岸桥数量进行决策,以实现最小化所有靠泊船舶的延误时间加权和(服务性指标)、最大化缓冲时间(鲁棒性指标)的目标。由于服务性指标和鲁棒性指标存在着冲突,本文在以二者的加权和作为目标函数的前提下,通过调整权重参数对方案的鲁棒性和服务性进行权衡。

然后,对鲁棒泊位和岸桥联合调度模型进行了深入的分析,得到了该数学模型的可行解和最优解的一系列相关性质,证明了该问题一定存在一个最优的左下紧计划方案。因此,提出了一种基于改进遗传算法的求解最优(近似最优)左下紧方案的求解算法,并提出了一种对左下紧方案进行改进的松弛化处理方法。仿真实验结果证明了本文提出的模型和求解算法的有效性。

最后,建立了不确定环境下岸桥实时调度问题的数学模型,针对实际调度过程中不确定因素的干扰,通过对实时调度问题数学模型的求解得到了实时岸桥调度策略,仿真实验表明,岸桥的实时调整进一步提高了码头集装箱装卸作业的抗扰动能力。

关键词: 集装箱码头 泊位分配 岸桥调度 鲁棒性 遗传算法 实时调度

Abstract

With the accelerating process of economic globalization, the trade among countries in the world has become increasingly frequent and maritime container transport has become an important link of the global supply chain. As a meeting point of maritime and land transportation, container terminals play the more and more important roles in the international transportation network. With the increasing of international competition and international trade volume, the container terminals are confronted with the austere challenges, and the resource optimization assignment problem of the container terminals has become a hot topic in the field of logistics. The researchers and managers in the logistics industry have been paying more and more attentions to the issues such as how to reasonably and effectively allocate berth and quay cranes resources, and especially how to improve the anti-interference ability of the berth and quay scheduling plan under uncertain environment. This thesis focuses on the robust planning problem of berth and quay crane integrated scheduling. The main contents are as follow.

Firstly, the continuous berth and quay cranes integrated scheduling problem under uncertainty is studied. The mathematical model of berth and quay cranes integrated pre-scheduling plan based on time redundancy strategy is proposed. In the mathematical model the buffer time is introduced as the robustness metric and the weighted sum of the vessels' planning delay time as the service metric. The mathematical model takes the number of the containers which are loaded on or unloaded from a vessel as the weight parameter of the vessel to measure the attention which are paid to the vessel by the decision-maker. In order to minimize the sum of the delay time of all the vessels and maximize the buffer time, the decision-maker must make decisions for each vessel the berthing time, berthing position at the terminal and the number of the quay cranes allocated to it. Due to the conflicts between the service measure and robustness, this thesis takes a trade-off between two measures through adjusting the weight parameters on the premises that the weighted sum of two measures is considered as the objective function.

Then, the mathematical model of berth and quay cranes integrated pre-scheduling plan based on time redundancy strategy is deeply investigated and analyzed and some properties about the feasible solutions and the optimal solutions of the mathematical model are found. It is also found that there must exist an optimal "lower-left tight" plan. According the properties, an improved genetic algorithm is designed to search for optimal or approximately optimal "lower-left tight" plan and a relaxation approach is proposed to modified the "lower-left tight" plan. The effectiveness of the proposed model and the algorithm is verified by some simulation experiments.

Finally, the mathematical model of real-time quay cranes scheduling is proposed. To reduce disturbance of uncertain factors in the operation process of the berth and quay crane

integrated scheduling plan, the real-time scheduling strategy can be found through solving the mathematical model. The results of the simulation experiments show that the real-time scheduling of quay cranes can further reduce adverse effects of uncertain disturbances.

Key words: Container terminal, Berth allocation, Quay cranes scheduling, Robustness, Genetic algorithm, Real-time scheduling

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 集装箱码头概述及泊位岸桥调度国内外研究现状.....	3
1.2.1 集装箱码头的组成.....	3
1.2.2 集装箱码头的作业流程.....	5
1.2.3 当前集装箱码头泊位和岸桥调度问题的研究.....	6
1.3 本文的主要研究工作及创新之处.....	7
1.4 本文架构.....	8
第二章 泊位岸桥联合调度的鲁棒计划问题的模型与分析	10
2.1 问题提出.....	10
2.2 问题描述.....	10
2.3 数学模型.....	12
2.3.1 符号表示.....	12
2.3.2 数学模型的建立.....	14
2.4 模型性质的分析.....	16
2.5 本章小结.....	21
第三章 泊位岸桥联合调度的鲁棒计划问题的求解.....	22
3.1 模型求解方法.....	22
3.1.1 常用启发式搜索算法简介.....	22
3.1.2 模型求解方法的选择.....	25
3.2 泊位和岸桥联合鲁棒调度问题的改进遗传算法.....	25
3.2.1 染色体编码.....	26
3.2.2 解码策略.....	26
3.2.3 适应度函数和选择操作.....	26
3.2.4 交叉、变异操作.....	27
3.2.5 算法流程.....	28
3.3 左下紧方案改进.....	29
3.4 数值实验.....	31
3.4.1 确定性条件下的算法求解质量.....	31

3.4.2 不确定环境下的方案抗干扰能力.....	33
3.4.3 松弛后方案的抗干扰能力.....	34
3.5 本章小结.....	35
第四章 岸桥实时调度问题的建模与优化.....	36
4.1 问题提出.....	36
4.2 问题描述.....	37
4.3 数学模型.....	38
4.3.1 符号表示.....	38
4.3.2 数学模型的建立.....	38
4.4 模型的求解.....	39
4.5 仿真实验.....	39
4.6 本章小结.....	42
第五章 展望与总结.....	43
5.1 本文的主要研究成果.....	43
5.2 进一步研究方向.....	43
参考文献.....	45
发表论文和科研情况说明.....	48
致 谢.....	49

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

随着经济全球化进程的不断加快，国际上贸易交流和生产经营等活动越来越广泛，现代化港口建设在社会经济发展进程中的作用也变得越来越重要，港口资源配置和基础设施建设成为衡量一个国家海运吞吐量和展现国际竞争力的重要标志。在如今世界经济的发展发生了翻天覆地变化的背景下，特别是 2008 年以后西方经济受金融危机重创，世界经济中心开始从西欧向亚太地区转移，由此可断定世界经济将会在西太平洋海岸掀起一股热潮，这样对促进我国的港口建设和海运业发展势必创造良好的条件。

集装箱是指具有一定刚度、强度和规格专供运输周转使用的大型装货容器，集装箱化是六十年代初出现的现代化运输方式^[1]。由于具备独特的优越性，集装箱运输使得货物在运输和装卸等环节上都发生了重大改变，被称作 20 世纪的运输革命。集装箱运输最早开始于英国，在 1801 年，英国的詹姆斯-安德森博士就提出了将货物装入集装箱进行运送的构想，而在 1845 年，英国铁路部门便将集装箱运输的构想第一次在实际当中投入应用，它们采用互相交换装货车厢的方式，将车厢视为集装箱进行运输。19 世纪中叶，英国的兰开夏已出现将棉纱、棉布等放入一种带活动框架的载货工具中运输，这被认为是集装箱的雏形。

自六十年代出现，集装箱运输促进运输生产走向机械化、自动化。与传统运输相比，集装箱运输大大降低了人力搬运，进而带来的好处就是避免了人为或者自然因素造成的破损、受潮以及丢失等货运事故，减少了不必要的经济损失。由于相对于其它运输方式有更多的优势比如安全、迅速、简便、价廉，而成为现代化运输业发展的必然潮流。尽管集装箱船在世界商船总吨位中仅占 3%，但却占杂货运量的四分之一，一些国家的货物运输比重已达 80% 以上^[2]。

从 1966 年到 1983 年，人们日益认识到集装箱运输的优越性，特别是国际海上运输的快速发展，是世界交通运输进入集装箱化时代的关键时期。与传统的件杂货散运输方式相比，现代化的集装箱海上运输对促进全球经济一体化起着越来越重要的作用，适箱货物集装化运输成为国际间货物运输发展的必然趋势。作为海陆联运的枢纽站，集装箱码头是集装箱货物的交接点，也是货物在转换运输方式时的缓冲地带，因此，集装箱码头在整个集装箱运输过程中占有重要地位。随着海上集装箱运输业的快速发展，集装箱量有了突飞猛进的增长，集装箱码头的建设变得刻不容缓。世界各国政府对发展集装箱码头普遍给予了大量的政策性支持，班轮公司也不断加大投资经营集装箱码头的力度。

自上世纪 90 年代开始，以我国深圳、上海为代表的亚洲各主要港口的集装箱吞吐量不断攀升，相继进入世界 20 强行列。当时各港口现有的停靠泊位数目有限，纷纷建

设专用的集装箱泊位，到 1983 年海上运输量达到了 208 万 TEU，集装箱专用泊位数目则增加到 983 个。

20 世纪 70 年代世界主要港口的集装箱吞吐量年增长率达到 15%，专用泊位的前沿都配置了一定数量的岸桥，同时在鹿特丹港口的集装箱码头上出现了每小时可装卸 50TEU 的第二代集装箱岸桥。受 70 年代中期石油危机的影响，集装箱运输发展速度开始放缓，但是在船型、箱型、工艺、机械以及现代化管理上有了创新和突破，这也标志着世界集装箱运输朝着提升服务质量方向发展。

虽然我国的对外贸易受到了 08 年国际金融危机的影响，但是 2009 年的港口集装箱吞吐量依然达到 1.2 亿标箱，成为国际航运市场上降幅较小的国家。近年来，随着对外贸易量的扩大以及经济的迅猛增长，我国港口建设取得了跨越式的发展。作为我国对外贸易的重要口岸之一，上海港集装箱作业的现代化、信息化程度在全国沿海港口中位居前列。在 2010 年世界十大集装箱吞吐量排名中，凭借 2907 万 TEU，上海港第一次超过新加坡港居于世界首位。

1.1.2 研究意义

集装箱运输大大节省货物运输包装费用，有效简化装卸工人理货工作，总体上降低运输物流成本，从而减少货物运输费用，增大了集装箱码头经济收益。当前集装箱运输由传统港口向现代物流的转变，根本上说是生产方式的转变，符合全局经济利益最大化精神，有利于促进区域的经济发展，符合远洋运输国际化的标准。集装箱码头作为集装箱运输中的枢纽，也是集装箱物流链上一个非常重要的节点，它不仅是海运和陆运的中转枢纽，也是远洋运输的起点和终点。在集装箱码头调度系统中，泊位分配问题和岸桥调度问题是码头作业中的首要问题，其合理性与否关系到码头各项作业的顺利进行，进而影响海上运输的整体运营效率。

当前对集装箱码头泊位和岸桥调度的优化研究往往是对调度过程分开研究，这样取得结果更多的是局部最优而非整体最优。泊位分配和岸桥调度的优化是一个全局的系统工程，涉及到泊位和岸桥两种资源统筹安排，如果不从码头系统整体全局考虑，得到的优化方案未必就是满足全局最佳方案。另外，相较于离散型泊位分配(BAPD)将码头岸线划分为若干个逻辑上相互独立的泊位单元，连续性泊位分配(BAPC)将整个码头岸线看作一条连续的水平线，船舶可以停靠在任意满足其物理条件的位置上，一定程度上提高了集装箱码头泊位的利用率，这也是本文选择将连续性泊位分配作为研究内容的原因之一。

传统的研究更多的是基于确定环境下对泊位分配计划的制定进行研究，即计划装卸周期内船舶抵港时刻、装卸量已经确定的情况下进行装卸调度。在实际情况中，船舶因海上风浪、上一港口延误以及岸桥故障等因素影响，抵港时刻未必与计划时刻保持一致。当船舶比原计划提前抵港时，我们可以让抵港船舶在锚地等待靠泊；如果船舶比原计划延迟抵港时，原计划的顺利执行势必受阻。

实际过程中的不确定性往往使得原计划不再合理，甚至难以执行，计划人员不得不对其进行临时的调整，而码头其他的作业都是围绕在泊位和岸桥计划展开的，无论从时间上还是从经济上，这种临时调整都会大大降低码头装卸系统的运作效率。

综上所述，本文围绕当前集装箱码头系统泊位和岸桥调度优化问题研究中的不足，着重研究不确定情况下鲁棒连续泊位和岸桥联合实时调度的仿真优化问题，建立了基于冗余策略的泊位和岸桥联合调度鲁棒模型，并对最优解的相关性质分析，通过改进型的遗传算法进行求解，对实验结果进行了深入分析，最后在实时调度阶段通过对泊位分配计划松弛以及岸桥实时调整进一步吸收不确定性产生的干扰，具体将从以下几方面对不确定情况下鲁棒连续泊位和岸桥联合实时调度进行优化：

(1) 在制定连续泊位和岸桥联合调度计划时，兼顾到分配调度方案的鲁棒性指标和服务性指标的前提下，通过调整联合调度模型权重参数进行权衡决策，提高了系统在不确定环境下吸收扰动的能力，提升了码头装卸服务质量水平。

(2) 针对鲁棒泊位和岸桥联合调度模型，在分析最优解的相关性质的基础上，提出了一种基于改进遗传算法的求解方法。并通过仿真实验验证本文提出的模型和求解方法的有效性，并对实验结果进行了深入分析。

(3) 在实际调度阶段，制定了相应的实时调整策略，通过对泊位分配计划的松弛、以及岸桥的水平动态调整，进一步吸收了实际靠泊阶段不确定性产生的扰动，达到减小船舶在港延迟停留时间，增加对集装箱码头公司的满意度的目标。

集装箱泊位岸桥调度的仿真优化就是为了运用于实际过程当中可以提高到港船舶的装卸效率，降低集装箱码头工人劳动强度，减少运输过程中货损货差，提高全球集装箱货物运输的安全质量水平。期望本文对鲁棒泊位和岸桥联合实时调度的优化仿真，可以提高计划方案的抗干扰能力和在实际调度过程中的可执行度，提升码头公司的服务质量，获得更高的客户满意度和经济效益。

1.2 集装箱码头概述及泊位岸桥调度国内外研究现状

1.2.1 集装箱码头的组成

集装箱码头由多种设施构成的大型复杂系统，其基本组成部分包括：泊位、码头前沿、岸桥、堆场、集卡、货运站、控制室以及闸口等资源^[3]。为了最大限度地有效利用码头资源，发挥各装卸设备的作业效能，集装箱码头必须合理统筹分配各资源，使其协调一致，形成一个完整高效的集装箱码头作业系统^[4]。集装箱码头的布局大致如图 1-1 所示。

1. 集装箱码头的作业资源及其功能：

(1) 泊位(Berth)，是集装箱码头中最基本的硬件作业资源，是港口内专供集装箱船舶停靠和作业的场所，只有分配泊位以后才能对集装箱船舶进行靠泊和装卸作业^[5]。一般情况下，视其布置形式和位置，我们将集装箱码头岸线人为地划分为离散型泊位和连续型泊位，即一座集装箱码头可能有一个或几个泊位。泊位的数量和大小是衡量一个港

口或码头规模的重要标志。它有一定的长度限制，泊位长度包括船舶的长度和靠泊船舶之间必要的安全间隔，安全间隔值的大小是由船舶大小决定的，一个万吨级泊位安全间隔值为 15~20 米。

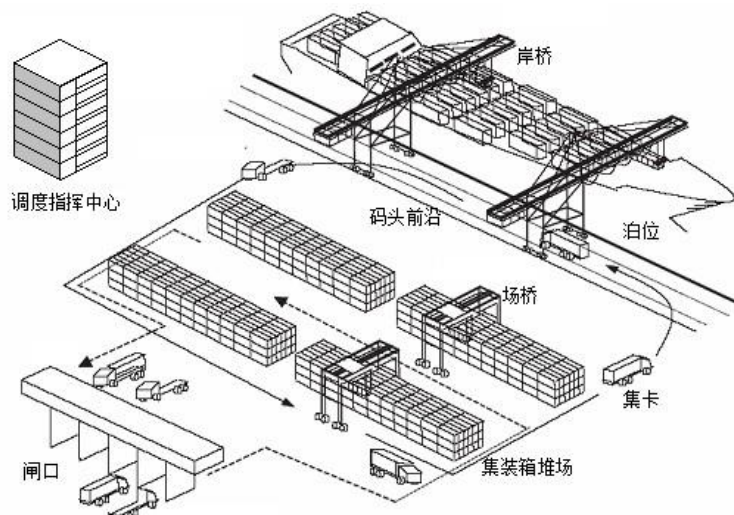


图 1-1 集装箱码头布局示意图

(2) 码头前沿(Wharf Surface, WS), 是指沿码头岸壁到集装箱编排场之间的码头面积^[6]。泊位岸线至集装箱堆场的这部分区域, 主要布置集装箱船舶装卸设备, 并为水平运输设备提供接卸集装箱的工作场所。该区域是集装箱码头中最繁忙的区域, 必须有一定的宽度, 以保证水平运输设备移动的通畅, 避免因交通阻塞影响船舶装卸作业的效率^[7]。码头前沿的宽度可根据岸边集装箱起重机的跨距和使用的其他装卸机械种类而定, 一般为 40 米左右。

(3) 集装箱岸桥(Quay Crane, QC), 称为岸边集装箱起重机, 是集装箱码头在岸边对船舶上的集装箱进行装卸的专用设备, 主要负责船舶集装箱的装卸工作, 主要由带行走机构的门架、拉杆和臂架等几部分组成。岸桥由电力驱动, 由于岸桥体积大、重量重, 一般沿与码头岸线平行的轨道行走。由于电缆长度有限, 其活动范围受到一定的限制, 不能跨越其他岸桥, 即岸桥在为船舶服务时, 它们的相对位置是不变的。

(4) 集装箱堆场(Container Yard, CY), 有些地方也叫场站, 是集装箱码头在办理集装箱装卸、转运、交接前对集装箱进行临时存放和保管的场所。它是集装箱运输关系方的重要组成, 在集装箱运输中起到重要作用, 其面积决定于泊位的吞吐能力、堆箱层数、装卸工艺等因素。对于海运集装箱出口来说, 堆场的作用就是把所有出口客户的集装箱在某处先集合起来, 到了截港时间之后, 再统一上船。为便于堆场装卸设备和水平运输设备在集装箱堆场中移动作业, 一般将其划分为若干个箱区^[8]。

(5) 集装箱龙门起重机(Gantry Crane), 简称场桥, 是水平桥架设置在两条支腿上构成门架形状的一种桥架型起重机, 是集装箱堆场装卸、堆码集装箱的专用机械。用于堆货区的搬运, 这种起重机在地面轨道上运行, 主要用在露天贮料场、船坞、港口和铁路货站等地进行搬运和安装作业。

1.2.2 集装箱码头的作业流程

面对集装箱运输的竞争趋势日益激烈，码头经营者只有进一步完善管理制度以适应集装箱运输的需要，才能有效地提高企业的经济效益^[9]。为适应码头集装箱船舶靠泊的流畅要求，集装箱码头经营者依据计划到港船舶的预计抵港时刻、预计装卸时间和预计靠泊位置等信息建立起一个装卸船管理系统。船舶公司也希望能尽量把抵港的集装箱船舶有条不紊地进行装卸，降低集装箱船舶在港停留时间。

1. 集装箱码头进口流程

进口流程是从进口集装箱卸船到被运出码头的作业过程，主要包括：

(1) 进口卸船过程

卸船作业指根据船舶预、确报，在船舶抵港前，预先做出堆场、机械、人力配置计划，当集装箱船舶进入集装箱港口时，由岸桥将相应船舶的进口集装箱从船上卸下，装载到码头前沿的集卡上，由集卡将其运送到堆场中指定的箱区，再由场桥将其卸入相应箱区的指定位置^[10]。

(2) 提箱作业过程

为了经济、合理的使用码头堆场和有计划的运输集装箱，促进集装箱的高效流转，堆场会制定集装箱作业计划，合理安排集装箱在堆场的堆存位置^[11]。提前向码头提出预约申请后，提箱车辆在提箱时由闸门录入提箱信息并指示提箱车辆到相应箱区进行提箱，由场桥将相应集装箱从堆场中取出，装载到提箱车辆上，再由提箱车辆通过检查口将其运出码头^[12]。

具体流程如图 1-2 所示。

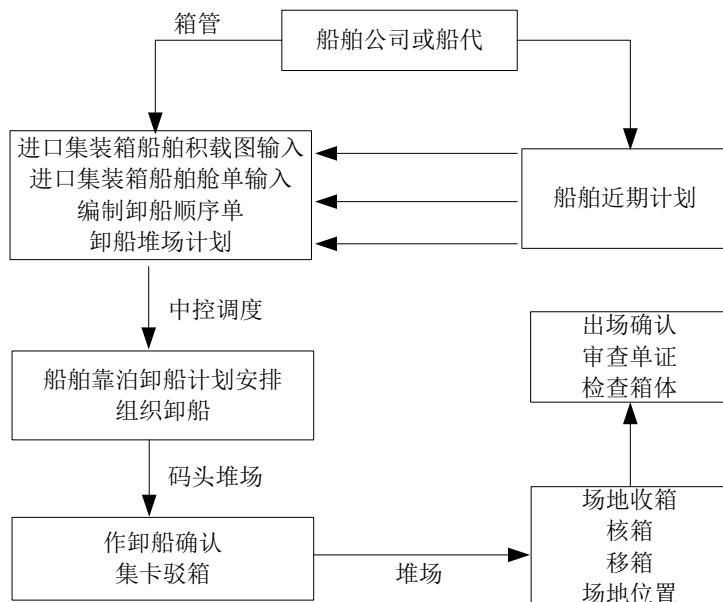


图 1-2 进口作业流程

2. 集装箱码头出口流程

出口流程是出口集装箱从运抵码头到装上相应船舶的作业过程，在集装箱出口货运业务中，码头主要负责集装箱的进箱作业、堆场作业以及出口装船作业，在每个阶段的作业情况与进口箱作业时类似，具体流程如图 1-3 所示。

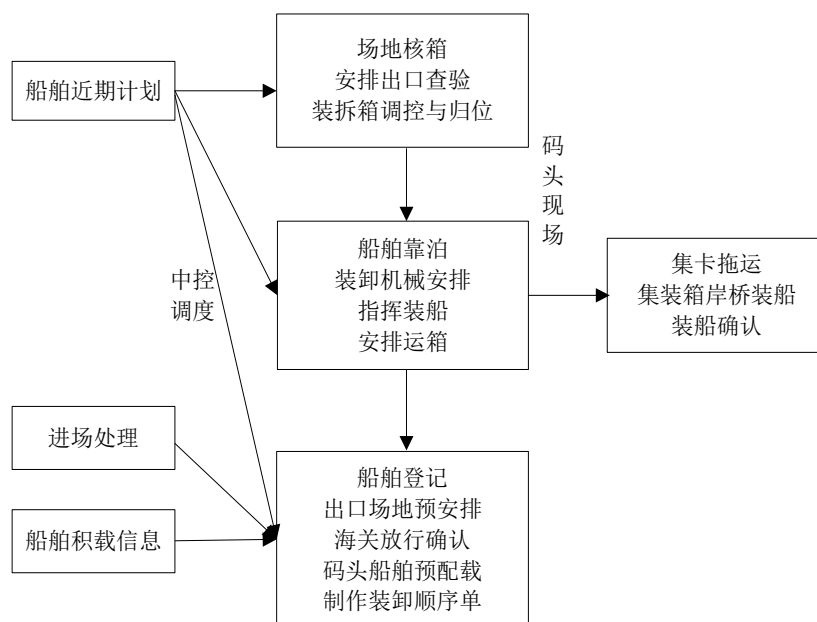


图 1-3 出口作业流程

1.2.3 当前集装箱码头泊位和岸桥调度问题的研究

目前国内外许多学者对集装箱码头优化问题从码头各资源配置角度展开了研究并取得了显著的理论成果，主要包括：泊位分配、岸桥调度、堆场管理、场桥调度和集卡调度等几个方面，由于泊位和岸桥作为集装箱码头的战略资源，其他各项作业都是围绕着泊位和岸桥计划展开的（如堆场空间分配、集卡路径优化等）。泊位分配与岸桥调度是集装箱码头作业系统中两个最关键的环节，合理地配置泊位和岸桥可以提高集装箱码头装卸的效率，减少船舶到港停留时间，提高集装箱码头总体竞争力，获得更大的经济效益。因此，泊位分配问题(Berth Allocation Problem, BAP)和岸桥调度问题(Quay Crane Scheduling Problem, QCSP)是码头作业中的首要问题，其合理性与否关系到码头各项作业的顺利进行，进而影响海上运输的整体运营效率^[13]。因而，本文将沿海大型集装箱枢纽港中的泊位和岸桥联合调度问题作为主要研究内容，主要服务对象为跨国航运公司的班轮业务。

在集装箱码头泊位分配和岸桥调度优化问题方面，中外学者进行了大量的研究，建立了一系列模型并优化求解。目前，在泊位分配方面，BAP 的相关研究成果主要集中在离散 BAP(BAPD)和连续 BAP(BAPC)。BAPD 类似于一类并行机调度问题(Parallel Machine Scheduling Problem)，将码头岸线划分为若干个逻辑上相互独立的泊位，任意一个泊位在任意时刻只能为一条船舶提供靠泊服务^[14]。Lai 和 Shih 针对 BAPD，提出了一种启发式算法，并对三种分配标准下的泊位分配方案进行了评估，但该文考虑的是静态 BAP^[15]。此后，Imai 等研究了真正意义上的动态 BAPD，允许船舶在计划期内动态抵港，

以最小化在港时间为目标建立了模型^[16]。Nishimura 等^[17]扩展了该问题，将泊位物理条件引入模型，并采用遗传算法进行求解。Imai 等研究了靠泊优先权下的动态 BAPD，并设计了一种基于遗传算法、禁忌搜索和模拟退火算法的混合算法^[18]。Cheong 等采用多目标进化算法求解 BAPD，模型中同时考虑了船舶作业最大完工时间、船舶在港等待时间和靠泊优先权违背程度等三个目标^[19]。而 BAPC 则可以看作是二维装箱问题(Packing Problem)，即将整个码头岸线看作一条连续的水平线，船舶可以靠泊在任意可以满足其物理条件的位置^[20]。与 BAPD 相比，BAPC 能更加充分地利用泊位资源，因此很多繁忙的现代化码头都采用连续泊位管理策略。Lim 和 Li 等基于图论研究了静态 BAPC^{[21][22]}。Park 和 Kim 针对动态 BAPC，采用拉格朗日松弛算法进行求解^[23]。Kim 和 Moon 研究了相似的问题，采用模拟退火算法求解模型，并分析了最优解的性质^[24]。Lee 等则在分析动态 BAPC 最优解性质的基础上，提出了两种贪婪随机自适应搜索算法^[25]。

在 QCSP 方面，由于岸桥是主要的装卸资源，其调度计划决定着泊位作业效率，因此，单独的 QCSP 相关研究较少，学术界更加关注 BAP 和 QCSP 的集成优化研究，即泊位和岸桥联合调度问题(Berth and Quay Cranes Integrated Scheduling Problem, BQCISP)^[26]。Park 和 Kim 利用整数规划建立了 BQCISP 模型，并采用两阶段法进行求解：第一个阶段制定泊位分配计划，第二个阶段制定岸桥调度计划^[27]。Song 等设计了类似的双层规划方法来解决 BQCISP，第一层采用遗传算法求解 BAP，第二层采用分支定界算法求解 QCSP^[28]。Imai 等在给定船舶服务岸桥数的情况下，决策其泊位分配和岸桥调度计划^[29]。Liang 等将岸桥服务数作为一个决策问题，以最小化岸桥移动次数作为目标，并采用多目标遗传算法求解 Pareto 解^[30]。

以上文献侧重确定性环境下的预计划制定，而忽略了实际运作中的不确定性（如：设施故障、恶劣天气等）。这些不确定性不仅给码头的运行带来了极大的隐患，而且严重影响着其作业计划的可靠性。针对这类问题，徐亚建立了基于冗余策略的 BAPC 鲁棒模型，引入缓冲时间作为鲁棒性指标^[31]。随后，Du 等对该问题进行了扩展研究，设计了基于反馈调整的求解策略^[32]；Zhen 等采用情景分析法，提出了基于鲁棒反应式策略的 BAP 模型，并设计出相应的启发式算法^[33]。这些研究对于不确定环境下的 BAP 取得了一定的成果，但是没有考虑岸桥对泊位作业的影响，而且对每个到港船舶不加区别地讨论其延误情况对码头服务性指标和客户满意度的影响，也没有体现出船舶装卸量对码头运作的重要性。

1.3 本文的主要研究工作及创新之处

本文选择集装箱码头运输系统中的泊位分配和岸桥调度问题作为主要研究内容，因为集装箱码头公司将泊位分配和岸桥调度问题看作码头作业中的首要问题，合理地配置泊位和岸桥可以提高集装箱码头装卸效率，减少抵港船舶在港停留时间，提高集装箱码头总体竞争力，获得更大的客户满意度和经济效益。

针对当前上述中外学者研究存在的问题，本文主要对不确定环境下的连续泊位和岸桥联合实时调度问题进行了深入研究，提出了基于冗余策略的泊位和岸桥联合实时调度

模型。首先,在引入缓冲时间作为鲁棒性指标的同时,引入船舶计划延误时间的加权和作为服务性指标,并以船舶的装卸作业量作为其靠泊服务权重,以体现决策者对于不同装卸量船舶的延误时间的重视程度。模型通过对预计到港船舶的计划靠泊时刻、靠泊位置和分配岸桥数量进行决策,以实现最小化所有靠泊船舶的延误时间加权和(服务性指标)、最大化缓冲时间(鲁棒性指标)的目标。由于服务性指标与鲁棒性指标存在着冲突,我们在以二者的加权和作为目标函数的前提下,通过调整权重参数对方案的鲁棒性和服务性进行权衡。然后,在给出最优解的相关性质分析基础上,提出了一种基于改进遗传算法的求解方法。在泊位和岸桥联合实时调度阶段,在抵港船舶装卸顺序不变和预期准时离港船舶不延迟的条件下,以一定频率对空闲或者过剩的工作岸桥进行统计,分配给预期可能延迟离港的船舶,从而总体上达到抵港船舶延迟离港总时间最小的目标。最后,通过仿真实验对本文提出的模型的可行性和求解方法的有效性进行了验证,并对实验结果进行了分析。

本文创新之处主要有以下几点:

(1) 研究了不确定环境下的连续泊位和岸桥联合调度问题,提出了基于冗余策略的泊位和岸桥联合鲁棒调度的预调度计划模型。该模型以船舶计划延误时间的加权和作为码头服务性指标、以装卸作业缓冲时间为鲁棒性指标,通过调整联合调度模型权重参数进行权衡决策,提升了调度计划方案在不确定环境下的抗干扰能力。

(2) 对泊位和岸桥联合鲁棒调度计划问题的数学模型进行了深入分析,得出了预调度计划模型的一系列相关性质,证明了该问题一定存在一个最优的左下紧方案,在此基础上,提出了一种基于改进遗传算法的求解最优(近似最优)左下紧方案的算法。并设计了一种对最优左下紧方案进行松弛化的改进方案。

(3) 建立了不确定环境下岸桥实时调度问题的数学模型,针对实际调度过程中不确定因素的干扰,制定了相应的实时调整策略,仿真实验表明,岸桥的实时调整进一步提高了码头集装箱装卸作业的抗扰动能力。

1.4 本文架构

不确定情况下的连续泊位和岸桥联合实时调度问题,在实际应用中有很强的现实意义,因此本文对这一问题进行了研究。

本文共划分为五章,第二到第五章具体研究内容如下:

第二章,不确定环境下连续泊位和岸桥联合调度的鲁棒计划问题的建模与分析。本章首先说明联合调度问题提出的背景,可以看出该研究很有现实意义,继而考虑到实际操作中由于客观因素的出现会产生一系列无法预见的干扰因素,为了更好地吸收干扰,提高计划调度方案的执行率,建立了不确定情况下连续泊位岸桥联合调度的鲁棒数学模型,接着对泊位和岸桥联合调度问题的最优解进行了性质分析。

第三章,泊位和岸桥联合调度的鲁棒计划问题的求解。本章比较了三种常用的启发式搜索算法(蚁群优化算法、禁忌搜索算法和遗传算法)的特点,并选择改进型遗传优化算法对该模型进行求解。结合鲁棒泊位岸桥联合调度问题自身的特点,设计了一种新

型的搜索算子，取代传统遗传算法的交叉和变异算子，随后给出了编码、解码、搜索算子的具体实现。最后对泊位和岸桥联合调度模型设计了不同的实验，并对实验数据做出了评价。

第四章，岸桥实时调度鲁棒优化问题建模及求解。本章对连续泊位和岸桥联合调度在实际过程中由于不确定因素的干扰，计划不可能完全实施，冗余工作时间的加入会对干扰因素的吸收产生一定的效果，但是相同冗余工作时间的设定，资源不完全匹配问题在所难免，此时，有必要以某一频率对闲置或者过剩的工作岸桥进行统计，在此调度过程中可以将闲置或过剩的岸桥实时分配给其他有可能延期离港的抵港船舶，实现抵港船舶延迟离港总时间最小的目标。本章建立了岸桥实时调度模型，并与未调度情况下的实验数据进行分析对比，确定泊位和岸桥联合实时调度具有总体最优。

第五章，结论与展望。对该论文所做的工作进行了总结，并指出进一步研究的方向。

第二章 泊位岸桥联合调度的鲁棒计划问题的模型与分析

泊位和岸桥作为集装箱码头最重要的资源，在集装箱码头调度系统中起着不可替代的作用。泊位分配与岸桥调度是集装箱码头作业系统中两个最关键的环节，合理地调度泊位和岸桥可以提高集装箱码头装卸效率，减少抵港船舶靠泊停留时间，提高集装箱码头总体竞争力，获得更大的经济效益^[34]。本章对不确定环境下的连续泊位岸桥联合调度问题进行研究，为不确定环境下集装箱码头物流运作活动的顺利进行和提高集装箱码头装卸效率做一些有益的探索。

2.1 问题提出

为保证抵港船舶装卸作业顺利进行，集装箱码头公司会根据船舶预期到港时刻、预期离港时刻以及装卸量大小等信息为计划期内到港船舶制定泊位和岸桥分配方案。由于码头泊位和岸桥等相关资源重要且数量有限，码头计划制定人员需要对泊位分配和岸桥调度方案进行统筹规划。

在实际情况中，计划期内到港船舶会因为上一港口延误、海上风浪以及岸桥故障等因素影响，实际抵港时刻未必就是计划时刻，实际装卸时间也未必与计划装卸时间一致。当船舶比计划提前到港时，我们可以让抵港船舶在锚地等待分配好泊位后再靠泊；如果船舶比计划延迟到港时，原计划能否顺利执行不可预知。

集装箱码头在作业过程中会遇到各种因素（比如恶劣天气、设备故障以及作业事故）的影响，务必使得原计划调度难以顺利实施。此时，不得不对原调度方案进行修改，而设备配置方案和装卸顺序也就需要随着进行调整，这将对整个码头作业系统造成巨大干扰，产生大量的额外成本。如何及时有效地处理干扰，使得干扰因素对码头作业系统造成的扰动最小，已成为码头集装箱作业调度亟需解决的问题。

2.2 问题描述

针对集装箱班轮作业，码头管理者依据计划期内每条船舶的预计到港时刻、预计离港时刻和预计装卸箱量等信息，为其分配适当的靠泊位置和靠泊时间，并调配适当数量的岸桥负责装卸^[35]。图 2-1 和图 2-2 给出了二维空间-时间平面上的泊位和岸桥联合调度计划描述。其中，纵坐标代表时间，横坐标代表码头岸线，岸线由若干个泊位段（横坐标上的刻度）组成。矩形代表靠泊船舶，矩形的高度表示船舶的预计装卸时间，宽度表示船舶的长度（即需要占用的泊位段数），矩形的上、下边缘对应的纵坐标分别表示船舶的计划靠泊时刻和计划完工时刻，矩形对应的横坐标表示船舶的计划靠泊位置。矩形内部每个阴影方块表示一个岸桥工时，而其列数表示为该船舶服务的岸桥数目。

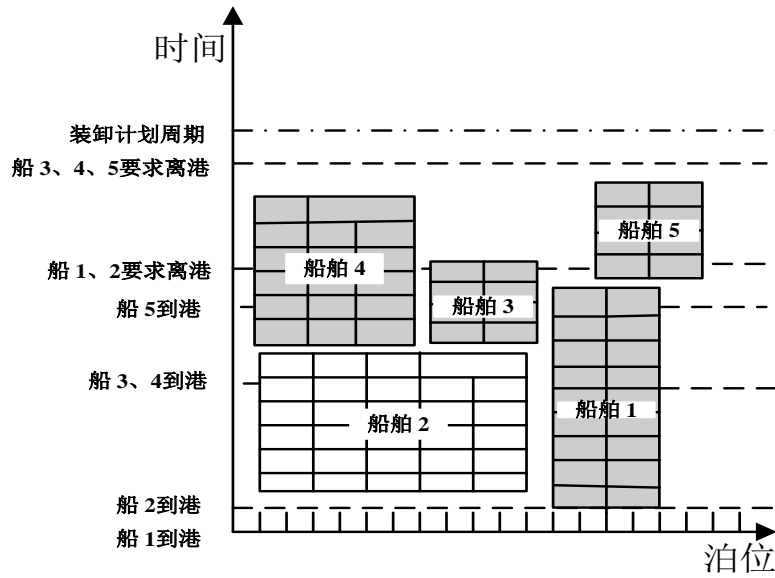


图 2-1 紧凑泊位分配方案一

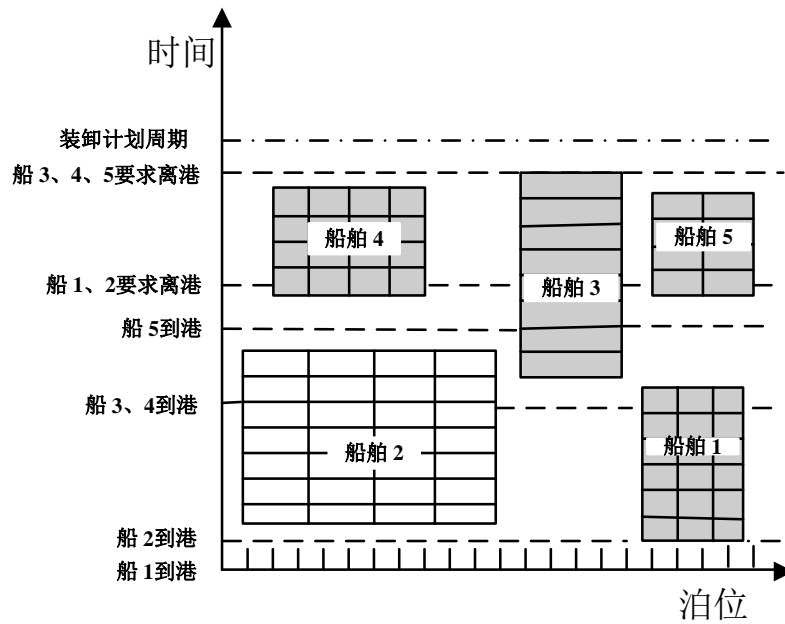


图 2-2 松散泊位分配方案二

一般情况下，码头以尽可能满足计划期内所有船舶的预计离港时刻为服务指标。而实际中的不确定性往往使得原计划不再合理，甚至难以执行，计划人员不得不对其进行临时的调整，而码头其它的作业都是围绕泊位和岸桥计划展开的，无论从时间上还是从经济成本上，这种临时调整会大大降低码头的运作效率^[36]。因此，单纯的以服务指标作为评价方案性能的指标是片面的，还应考虑方案在动态不确定环境下的抗干扰能力，即鲁棒性。

上图所示的两个泊位分配方案。从服务指标来看，两个泊位分配方案没有差别，即均没有延误船舶的预计离港时刻。而在不确定环境下，方案一相对方案二缺乏鲁棒性，即当船舶的实际到港时刻或装卸量发生波动时，其抗干扰能力较差。而方案二在不同船

船作业间留有充足的间隙，可以有效地吸收船舶到港延误，鲁棒性较强。可以看出，缓冲时间越长，方案的鲁棒性越强，但缓冲时间过长，会降低相应的服务性指标。因此，在进行泊位分配时，必须综合考虑服务性指标和鲁棒性指标，在两者之间进行权衡。

一般情况下在应对干扰方面我们有以下三种方式：简单修复、局部重调度和完全重调度，三种解决方案都对解决干扰事件有一定的效果，但是我们在建立模型时往往更多地考虑增加计划调度方案的鲁棒性，使得模型可以吸收干扰在鲁棒调度方面，最简单易行的方法是采用冗余策略^[37]。如根据岸桥随机故障的统计信息，适当增加设备的工作时间。与冗余策略相类似的还有就是码头泊位分配中缓冲时间的加入，在配置到同一泊位的前后装卸船舶之间加入了一个固定的缓冲时间，以此来应对实时操作中的短时延误。

基于以上分析，本文在以下假设基础上对连续泊位和岸桥联合调度计划问题进行研究：

1. 船舶的预计到港时刻、预计装卸量已知，船舶的计划靠泊时刻大于等于其预计到港时刻。以一个岸桥正常作业一小时为一个岸桥工时，预计装卸量以岸桥工时为单位，则船舶的预计装卸时间=预计装卸量/作业岸桥数量；

2. 每条船舶在其靠泊期间所能容纳的作业岸桥数存在限制，且同一时刻在岸线作业的岸桥总数也存在限制；

3. 集装箱码头的主要服务对象是集装箱班轮业务，船舶以一个计划期(通常是一周)为一个时间周期抵港并进行靠泊，即码头必须针对计划期(Planning Horizon)内所有预计到港船舶制定泊位和岸桥的联合调度计划，某一计划期的泊位和岸桥调度计划仍然适用于下一计划期，即前一计划期中到港船舶的计划完工时刻不会与下一计划期中到港船舶的计划靠泊时刻相冲突；

4. 船舶的预计离港时刻已知，若船舶晚于其预计离港时刻离港，将产生一定的延误惩罚。一般情况下，码头优先考虑为装卸量大的船舶安排靠泊服务；

5. 船舶的实际到港时刻和装卸量具有一定的不确定性；

6. 基于冗余策略，船舶的计划完工时刻定义为。

计划完工时刻=计划靠泊时刻+预计装卸时间+缓冲时间；

在一条船的计划完工时刻之前，泊位与岸桥联合调度计划中不允许安排其它船舶在相应泊位上靠泊。若船舶的计划完工时刻超过其预计离港时刻，则称该船舶为计划延误船舶，计划延误时间为计划完工时刻超出预计离港时刻的时间长度。

我们以计划期内预计到港船舶的总计划延误时间作为服务性指标，以缓冲时间长度作为鲁棒性指标，建立泊位和岸桥联合调度模型。

2.3 数学模型

2.3.1 符号表示

已知量：

N ：计划期内预计到港船舶的数量；

L ：岸线上泊位段总数（以1米为单位，则泊位段编号从左到右依次为 $1, 2, \dots, L$ ）；

H ：计划期长度（以 1 小时为单位，则周计划的情况下， $H=168$ ）；

Q ：岸线上岸桥的总数目；

a_i ：计划期内船舶 i 的预计到港时刻；

b_i ：计划期内船舶 i 的预计装卸量（单位：岸桥工时）；

d_i ：计划期内船舶 i 的预计离港时刻；

l_i ：计划期内船舶 i 靠泊需要占用岸线长度（泊位段数）；

Q_i^{\max} ：计划期内船舶 i 进行装卸作业所能容纳的最大岸桥数量；

Q_i^{\min} ：计划期内船舶 i 进行装卸作业所能容纳的最大岸桥数量；

M ：足够大的正数；

决策变量：

x_i ：船舶 i 的计划靠泊位置中最左端的泊位段编号；

y_i ：船舶 i 的计划靠泊时刻；

q_i ：船舶 i 在靠泊期间的预计分配岸桥数量；

θ ：缓冲时间长度；

辅助变量：

e_i ：船舶 i 的预计装卸结束时刻， $e_i = y_i + \lceil b_i / q_i \rceil$ ；

$$z_{ij}^x = \begin{cases} 1 & \text{if } x_j \geq x_i + l_i \\ 0 & \text{else} \end{cases};$$

$$z_{ij}^y = \begin{cases} 1 & \text{if } y_j \geq y_i + \theta \\ 0 & \text{else} \end{cases};$$

$$u_{y_i}^{e_i + \theta}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } y_i \leq t \leq e_i + \theta \\ 0 & \text{else} \end{cases};$$

$$v(l, t) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i \leq l \leq x_i + l_i \text{ and } y_i \leq t < e_i + \theta \\ 0 & \text{else} \end{cases};$$

$$T^{\max}(l) = \text{Max}\{t \mid v(l, t) = 1, 0 \leq t \leq 2H - 1\}, \quad 0 \leq l \leq L;$$

$$T^{\min}(l) = \text{Min}\{t \mid v(l, t) = 1, 0 \leq t \leq 2H - 1\}, \quad 0 \leq l \leq L;$$

$$w_i$$
：船舶 i 的服务权重， $w_i = b_i / \text{Max}\{b_j \mid j = 1, 2, \dots, N\}$ ；

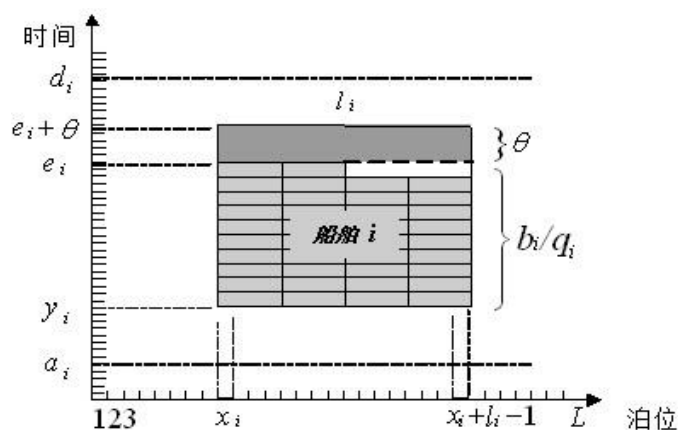
图 2-3 船舶 i 的二维装卸示意图

图 2-3 给出了在二维空间-时间平面上的部分符号说明:

其中, 矩形 i 中的那些小方格代表在计划期内假设船舶 i 上预计装卸一定数目的集装箱标箱, 排成 4 列, 意思为 4 辆岸桥同时为其作业, 以上图为例, 此时 b_i 取值为 38, q_i 取值为 4。图中符号与模型中的表示意义一致。

2.3.2 数学模型的建立

一般情况下,集装箱码头将靠泊船舶的总计划延误时间作为衡量其客户满意度的服务性指标。企业为了提升其客户满意度,提高码头企业的经营效益,在制定船舶与岸桥联合调度计划时,将最小化靠泊船舶的总计划延误时间作为其目标函数,即:

1. 最小化船舶的总计划延误时间:

$$\min \sum_{i=1}^N (e_i + \theta - d_i)^+ \quad (2-1)$$

但是, 对一个集装箱码头来说, 装卸作业量较大的靠泊船舶与装卸作业量较小的靠泊船舶相比, 其延误离港对码头的经营效益影响更大。因此, 决策者在制定船舶的泊位与岸桥联合调度计划时, 会更加重视降低装卸量大的船舶的延误离港时间。所以, 决策者根据船舶的预计装卸量大小, 在赋予每条船舶一个服务权重的基础上, 用船舶计划延误时间的加权和作为码头服务性指标更为合理, 即最小化靠泊船舶的总计划延误时间的加权和。因此, 可将下式作为其目标函数:

$$\min \sum_{i=1}^N (e_i + \theta - d_i)^+ w_i \quad (2-2)$$

由于码头的每条靠泊船舶的实际到港时间和需要装卸的集装箱量都存在着不确定性,因此,码头为了使得泊位和岸桥联合调度计划能够有效地吸收船舶到港时刻与装卸量的随机扰动的影响,使计划方案尽量避免临时调整,调度计划除了给每条靠泊船舶安排靠泊时刻和调度一定数量的岸桥,还给每条靠泊船舶在泊位上预留相同的装卸作业缓冲时间。显然,缓冲时间越长,泊位和岸桥联合调度计划的鲁棒性越强。因此,为了降

低计划的频繁调整,使得计划能够更好地得到顺利执行,码头必须尽可能地延长船舶的装卸作业缓冲时间。因此,将下式作为问题的另一个目标函数:

2. 最大化冗余工作长度:

$$\max \theta \quad (2-3)$$

式(3)等价于:

$$\min(-\theta) \quad (2-4)$$

显然,泊位与岸桥联合调度计划给船舶预留的装卸作业缓冲时间越长,靠泊船舶的计划延误时间加权和越大。所以,目标函数式(2-2)和目标函数式(2-4)相矛盾,其最优目标不可能同时实现,决策者需要在这两者之间进行权衡。因此,我们利用式(2-2)和式(2-4)的加权和表示问题的目标函数,即问题的目标函数如下式所示:

$$\min f = \lambda \sum_{i=1}^N (e_i + \theta - d_i)^+ w_i - \theta \quad (2-5)$$

其中,加权系数 $\lambda > 0$ 用来调节对服务性指标和鲁棒性指标的重视程度,特别当 $\lambda = M$ 时,相当于只考虑服务质量。

s.t.

$$x_i + l_i - 1 \leq L, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad (2-6)$$

$$x_i + l_i \leq x_j + M(1 - z_{ij}^x), \quad i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N, i \neq j; \quad (2-7)$$

$$e_i + \theta \leq y_j + M(1 - z_{ij}^y), \quad i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N, i \neq j; \quad (2-8)$$

$$z_{ij}^x + z_{ji}^x + z_{ij}^y + z_{ji}^y \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N, i \neq j; \quad (2-9)$$

$$\sum_{i=1}^N q_i \cdot u_{y_i}^{e_i + \theta}(t) \leq Q, \quad t = 1, 2, \dots, 2H - 1; \quad (2-10)$$

$$Q_i^{\min} \leq q_i \leq Q_i^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad (2-11)$$

$$T^{\max}(l) - T^{\min}(l) \leq H, \quad l = 0, 1, \dots, L - 1; \quad (2-12)$$

$$y_i \geq a_i, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad (2-13)$$

$$x_i \in Z^+, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad (2-14)$$

$$z_{ij}^x, z_{ij}^y \in \{0,1\}, \quad i=1,2,\dots,N, j=1,2,\dots,N, i \neq j; \quad (2-15)$$

$$\theta \in Z^+; \quad (2-16)$$

其中, 约束(2-6)表示船舶的计划靠泊位置不允许超过岸线的右边界; 约束(2-7)表示船 j 的计划靠泊位置最左端在船 i 的计划靠泊位置最右端的右侧; 约束(2-8)表示船 j 的计划靠泊时刻晚于船 i 的计划靠泊时刻; 约束(2-9)保证船 i 和船 j 的泊位分配不冲突; 约束(2-10)表示同一时刻的作业岸桥数量不允许超过岸线上的岸桥总数; 约束 2-(11)表示船舶 i 的服务岸桥数量限制; 约束(2-12)表示计划期内任意泊位段上的最晚完工时刻和最早靠泊时刻之差不能超过一个计划期长度, 即码头前一计划周期的泊位与岸桥联合调度计划方案与下一计划期内的调度计划方案不会冲突; 约束(2-13)保证任何一条船不能早于其预计到港时刻靠泊; 约束(2-14)~(2-16)为变量的取值约束。称式(2-5)~(2-16)为鲁棒泊位和岸桥联合调度问题(Robust for Berth and Quay Cranes Integrated Scheduling Problem, RBQCISP)的数学模型。

2.4 模型性质的分析

在对问题进行分析前, 首先给出问题 RBQCISP 的一个简单实例及其一个可行解。

一个 RBQCISP 模型的可行解的例子, 基本模型如图 2-4 所示。纵坐标为时间轴, 横坐标为码头岸线, 矩形代表抵港靠泊船舶, 里面方格数目即为该船舶预计装卸量, 单位为标箱。假设该集装箱码头连续泊位共有 70 个泊位段, 设定计划周期为 168 小时, 该时段内预计有 12 条船舶抵港进行装卸。

码头泊位及岸桥数量等已知信息如表 2-4 所示。

表 2-4 码头泊位信息表

码头泊位信息					
岸线泊位段数	70	岸桥总数目	15	Q^{\max}	6
计划期长度	168			Q^{\min}	3

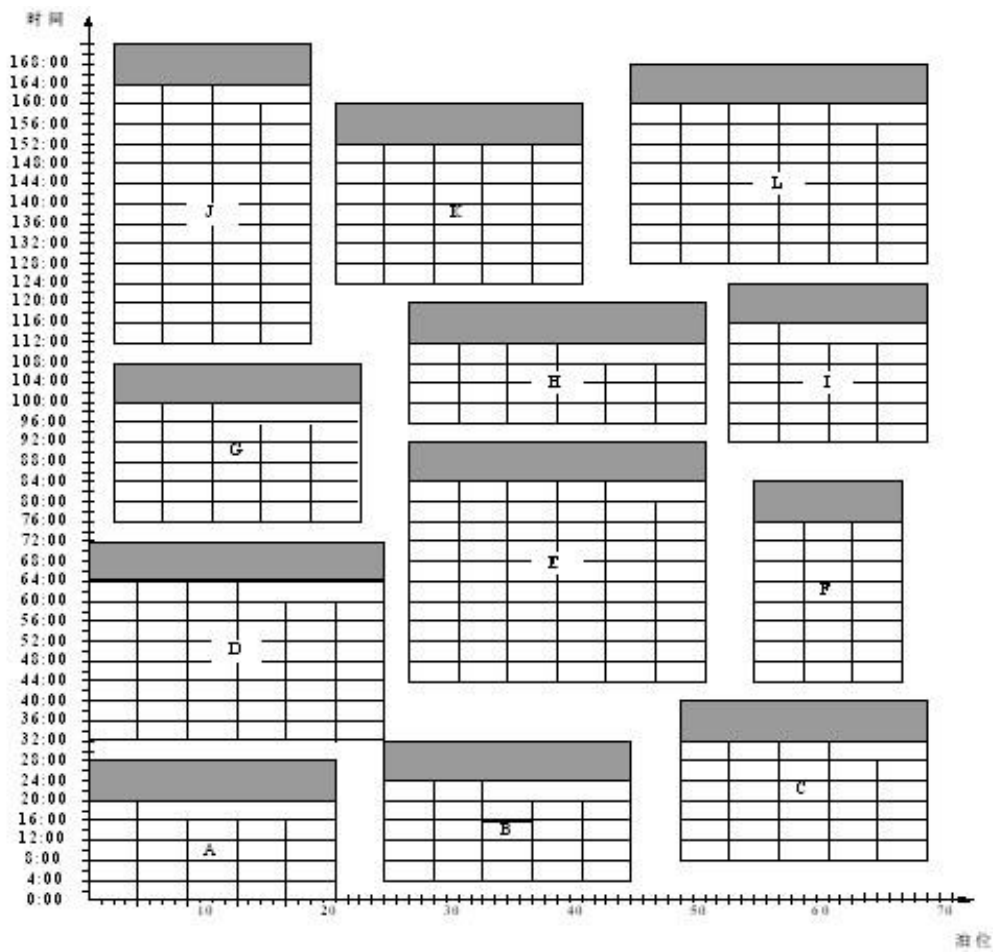


图 2-4 RBAQCISP 模型图

由船舶公司提供的计划期内船舶信息如表 2-5 所示。

表 2-5 计划期船舶信息

计划期船舶信息				
	预计抵港时刻	岸桥工时	要求离港时刻	占用岸线长度
船舶 A	0:00	21	30:00	20
船舶 B	3:00	22	40:00	20
船舶 C	7:30	28	42:00	20
船舶 D	27:45	38	74:00	24
船舶 E	42:00	49	94:00	24
船舶 F	43:00	24	88:00	12
船舶 G	75:00	27	110:00	20
船舶 H	95:00	21	122:00	24
船舶 I	92:30	51	124:00	16
船舶 J	110:00	50	174:00	16
船舶 K	123:00	35	162:00	20
船舶 L	127:00	46	170:00	24

由上述信息可得该模型解决方案之一如表 2-6 所示。

表 2-6 解决方案

解决方案			
	预计靠泊时刻	预分配岸桥数	停靠左端位置
船舶 A	0:00	5	1
船舶 B	4:00	5	25
船舶 C	8:00	5	49
船舶 D	32:00	6	1
船舶 E	44:00	6	27
船舶 F	44:00	3	55
船舶 G	76:00	5	3
船舶 H	96:00	6	27
船舶 I	92:00	4	53
船舶 J	112:00	4	3
船舶 K	124:00	5	21
船舶 L	128:00	6	45
冗余工作时间			8

针对上一节建立的 RBQCISP 模型，下面我们将给出解的一些性质分析。假设问题的可行解集合非空，令：

$$Cyc = \left\lceil \sum_{i=1}^N l_i / L \right\rceil \quad (2-17)$$

$$T^{\min} = \min_{1 \leq i \leq N} \{ \lceil b_i / Q_i^{\max} \rceil \mid i = 1, 2, \dots, N \} \quad (2-18)$$

$$\theta^{\max} = \lfloor H / Cyc \rfloor - T^{\min} \quad (2-19)$$

性质 1: 设 s 是问题 RBQCISP 的某一个可行方案， θ 是可行方案 s 的计划缓冲时间，则 $\theta \leq \theta^{\max}$ 。

证明：针对计划期 H ， $Num(l)$ 表示可行方案 s 中占用泊位段 l 的靠泊船舶的数量，令 $Num^{\max} = \max_{0 \leq l \leq L} \{ Num(l) \mid l = 1, 2, \dots, L \}$ ，设计划期内顺序号为 $i_1, i_2, \dots, i_{Num^{\max}}$ 的船舶占用了泊位段 l^* ，根据约束条件 (12) 得到 $Num^{\max} \cdot \theta + \sum_{j=1}^{Num^{\max}} \lceil b_{i_j} / r_{i_j} \rceil \leq H$ 。因为 $Cyc \leq Num^{\max}$ 且 $T^{\min} \leq \lceil b_{i_j} / r_{i_j} \rceil (1 \leq j \leq Num^{\max})$ ，所以 $Cyc \cdot (\theta + T^{\min}) \leq H$ ，即 $\theta \leq \theta^{\max}$ 成立，性质 1 得证。

该性质说明了问题 RBQCISP 的任意一个可行解的缓冲工作时间 θ 的上界为 $\theta^{\max} = \lfloor H / Cyc \rfloor - T^{\min}$ ，即 RBQCISP 的任意一个泊位与岸桥联合鲁棒调度计划的可行方案中，其缓冲工作时间 θ 的时长不可能超过 $\theta^{\max} = \lfloor H / Cyc \rfloor - T^{\min}$ 。所以 $\theta^{\max} = \lfloor H / Cyc \rfloor - T^{\min}$ 亦是其最优方案的缓冲工作时间 θ 的时长的上界。

由性质 1 显然可得：

性质 2: 若 $T^{\min} \cdot Cyc > H$ 成立或 $(\sum_{i=1}^N b_i) / Q > H$ 成立，则 RBQCISP 不存在可行解。

假设 i_1, i_2, \dots, i_N 是 H 的一个全排列，使得 $w_{i_1} \leq w_{i_2} \leq \dots \leq w_{i_N}$ 成立。

性质 3: 设给定 $\theta \in [0, \theta^{\max}]$ 下 RBQCISP 的最优方案为 $s^*(\theta)$ ，其对应的目标函数值为 $f^*(\theta)$ ，若系数 $\lambda > 1/\sum_{j=1}^k w_{i_j}$ ，且 $f^*(0) > \min_{0 \leq \theta \leq \theta^{\max}} f^*(\theta)$ 成立，则问题 RBQCISP 的最优方案对应的计划延误船舶数一定不超过 $k-1$ 。

证明：给定 $\lambda > 1/\sum_{j=1}^k w_{i_j}$ （其中 $1 \leq k \leq N$ ），问题 RBQCISP 的最优方案对应的目标函数值为 $f_\lambda^* = \min_{0 \leq \theta \leq \theta^{\max}} f^*(\theta)$ ， $f^*(0) > f_\lambda^*$ 。任意给定一个有 $k+m(m \geq 0)$ 条计划延误船舶的泊位分配方案 s ，不妨设其对应的计划延误船舶的顺序分别为 $1, 2, \dots, k+m$ ，其对应的目标函数值为：

$$f_\lambda(\theta) = \lambda \sum_{i=1}^{k+m} (e_i + \theta - d_i) w_i - \theta = \lambda \sum_{i=1}^{k+m} (e_i - d_i) w_i + (\lambda \sum_{i=1}^{k+m} w_i - 1) \theta \quad (2-20)$$

因为 $\lambda \sum_{j=1}^k w_{i_j} > 1$ ，所以 $\lambda \sum_{i=1}^{k+m} w_i - 1 > 0$ 。当 $\theta > 0$ 时，在不改变各个靠泊船舶的靠泊位置 x_i 、靠泊时刻 y_i 和靠泊船舶所分配的岸桥数量 y_i 的情况下，减小缓冲时间 θ 必然使得问题 RBQCISP 的目标函数值 $f_\lambda(\theta)$ 降低；当 $\theta = 0$ 时，必然有 $f_\lambda(0) \geq f^*(0)$ 成立，又由 $f^*(0) > f_\lambda^*$ 可得 $f_\lambda(\theta) \geq f_\lambda^*$ 。于是，任何计划延误船舶数大于等于 k 的泊位分配方案都不是问题 RBAQCSP 的最优方案，也就是说，当系数 $\lambda \sum_{j=1}^k w_{i_j} > 1$ 成立时，问题 RBQCISP 的最优方案对应的计划延误船舶数一定不超过 $k-1$ 。性质 3 得证。

性质 3 说明随着权重系数 λ 的增大，问题 RBQCISP 的最优方案 s^* 的计划延误船舶的数量是单调不增的，即在加权和目标函数中，赋予给服务性指标的权重越大，表示决策者越重视服务性指标，则问题 RBQCISP 的最优方案的计划延误船舶的数量越小。

性质 4: 将 $d_i - a_i - \lceil b_i / Q_i^{\max} \rceil (i=1, 2, \dots, N)$ 按从小到大顺序排序，依次赋给 $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \dots, \bar{\theta}_N$ ，若 $\lambda \sum_{j=1}^k w_{i_j} > 1$ （其中 $1 \leq k \leq N$ ），则 $\theta^* = \arg \min_{0 \leq \theta \leq \theta^{\max}} f^*(\theta) \leq \min\{\bar{\theta}_k, \theta^{\max}\}$ 成立。

证明：当 $\theta^{\max} \leq \bar{\theta}_k$ 成立时，由性质 1 可知命题显然成立。下面证明当 $\theta^{\max} > \bar{\theta}_k$ 成立时，该命题亦成立。设 $\lambda \sum_{j=1}^k w_{i_j} > 1$ （其中 $1 \leq k \leq N$ ），任意给定一个 $\theta > \bar{\theta}_k$ 的泊位与岸桥联合调度计划方案 s ，假设分配给顺序号为 i 的船舶的岸桥数目为 r_i ，其计划靠泊时间为 y_i ，显然有 $Q_i^{\min} \leq r_i \leq Q_i^{\max}$ 和 $y_i \geq a_i$ 成立，所以有 $d_i - a_i - \lceil b_i / Q_i^{\max} \rceil \geq d_i - y_i - \lceil b_i / r_i \rceil$ 成立，因此泊位与岸桥联合调度计划方案 s 中至少有 k 条计划延误船舶，由性质 3 可知，若 $f^*(0) > \min_{0 \leq \theta \leq \theta^{\max}} f^*(\theta)$ 成立，则方案 s 不可能是问题 RBAQCSP 的最优计划方案；若 $f^*(0) = \min_{0 \leq \theta \leq \theta^{\max}} f^*(\theta)$ 成立，则 $\theta^* = \arg \min_{0 \leq \theta \leq \theta^{\max}} f^*(\theta) = 0$ 。综上所述，则 $\theta^* = \arg \min_{0 \leq \theta \leq \theta^{\max}} f^*(\theta) \leq \bar{\theta}_k$ 必然成立。性质 4 得证。

性质 4 进一步给出了问题 RBAQCSP 的最优计划方案中工作缓冲时间 θ 的取值范围，即权重系数 λ 的值越大，最优计划方案中工作缓冲时间 θ 的取值范围越小，即上界越小。

性质 5: 在权重系数 λ 明确给定的情形下，设给定 θ 下问题 RBQCISP 的最优方案对应的船舶总计划加权延误时间为 $g^*(\theta) = \min \sum_{i=1}^n (e_i + \theta - d_i)^+ w_i$ ，则 $g^*(\theta)$ 在 $[0, \theta_{\max}]$ 上是单调不减的。

证明：设 $0 \leq \theta_1 < \theta_2 \leq \theta^{\max}$ ， s_1 和 s_2 分别为 $\theta = \theta_1$ 和 $\theta = \theta_2$ 时问题 RBQCISP 的最优方案，则 s_1 和 s_2 对应的船舶计划总加权延误时间的最小值分别为 $g^*(\theta_1)$ 和 $g^*(\theta_2)$ 。在不改变最优计划方案 s_2 中的 x_i 和 q_i ($i=1,2,3,\dots,N$) 的条件下，将 θ_2 降低到 θ_1 。若 y_i ($i=1,2,3,\dots,N$) 在可行的条件下可以适当下移，则可得 $\theta = \theta_1$ 条件下的可行解 $s_1^{\#}$ ，设其对应的船舶计划总加权延误时间的最小值为 $g^{\#}(\theta_1)$ ，则必然有 $g^{\#}(\theta_1) < g^*(\theta_2)$ ，又因为 $g^{\#}(\theta_1) \geq g^*(\theta_1)$ ，所以有 $g^*(\theta_1) < g^*(\theta_2)$ 成立。综上所述，必然可得 $g^*(\theta)$ 在 $[0, \theta_{\max}]$ 上是单调不减的。性质 5 得证。

性质 6: 给定加权系数 λ ，令 $n = \min\{k \mid \lambda > 1/\sum_{j=1}^k w_{i_j}, k=1,2,3,\dots,N\}$ ， $\bar{\theta}(\lambda) = \min\{\bar{\theta}_n, \theta^{\max}\}$ ， $m = \lceil \bar{\theta}(\lambda)/\delta \rceil$ ，则 $0 \leq \min_{1 \leq i \leq m} \{f^*(i\delta)\} - \min_{0 \leq \theta \leq \bar{\theta}(\lambda)} f^*(\theta) \leq \delta$ 。

证明：由性质 5 可知， $g^*(\theta)$ 在 $[0, \theta_{\max}]$ 上是单调不减的，则对于满足 $\theta + \Delta\theta \in [0, \theta_{\max}]$ 的 $\forall \theta \in [0, \theta_{\max})$ 和 $\forall \Delta\theta \in [0, \theta_{\max})$ ，有 $g^*(\theta) \leq g^*(\theta + \Delta\theta)$ 成立。因为 $\lambda > 0$ ，所以有 $\lambda g^*(\theta) - \theta \leq \lambda g^*(\theta + \Delta\theta) - \theta$ 成立。由 $f^*(\theta) = \lambda g^*(\theta) - \theta$ 可知， $f^*(\theta) \leq f^*(\theta + \Delta\theta) + \Delta\theta$ 。设 $0 \leq \theta_1 < \theta_2 \leq \bar{\theta}(\lambda)$ ，对于 $\Delta\theta \in (0, \theta_2 - \theta_1]$ ，有 $f^*(\theta_1 + \Delta\theta) \geq f^*(\theta_1) - \Delta\theta \geq f^*(\theta_1) - (\theta_2 - \theta_1)$ 成立，于是对于 $\theta \in [\theta_1, \theta_2]$ ，有 $f^*(\theta) \geq f^*(\theta_1) - (\theta_2 - \theta_1)$ 成立。设 $\theta^* = \arg \min_{0 \leq \theta \leq \bar{\theta}(\lambda)} f^*(\theta) \in [i\delta, (i+1)\delta]$ ，则 $f^*(\theta^*) \geq f^*(i\delta) - \delta$ ，即 $f^*(i\delta) - f^*(\theta^*) \leq \delta$ ，也就是说， $\exists 0 \leq i \leq m$ ，使得 $f^*(i\delta) - \min_{0 \leq \theta \leq \bar{\theta}(\lambda)} f^*(\theta) \leq \delta$ 。因为 $\min_{0 \leq \theta \leq \bar{\theta}(\lambda)} f^*(\theta) \leq \min_{1 \leq k \leq m} f^*(k\delta) \leq f^*(i\delta)$ 成立，所以有 $0 \leq \min_{1 \leq k \leq m} f^*(k\delta) - \min_{0 \leq \theta \leq \bar{\theta}(\lambda)} f^*(\theta) \leq f^*(i\delta) - \min_{0 \leq \theta \leq \bar{\theta}(\lambda)} f^*(\theta)$ 成立，故 $0 \leq \min_{1 \leq k \leq m} f^*(k\delta) - \min_{0 \leq \theta \leq \bar{\theta}(\lambda)} f^*(\theta) \leq \delta$ 成立。性质 6 得证。

定义 1: 在不改变空间-时间平面上其它矩形位置、以及作业岸桥的条件下，若船舶 A 对应的矩形在不穿越其它矩形的情况下，不能再向下或向左平移，则称该船舶 A 处于左下紧位置如图 2-5(a),(b)所示。

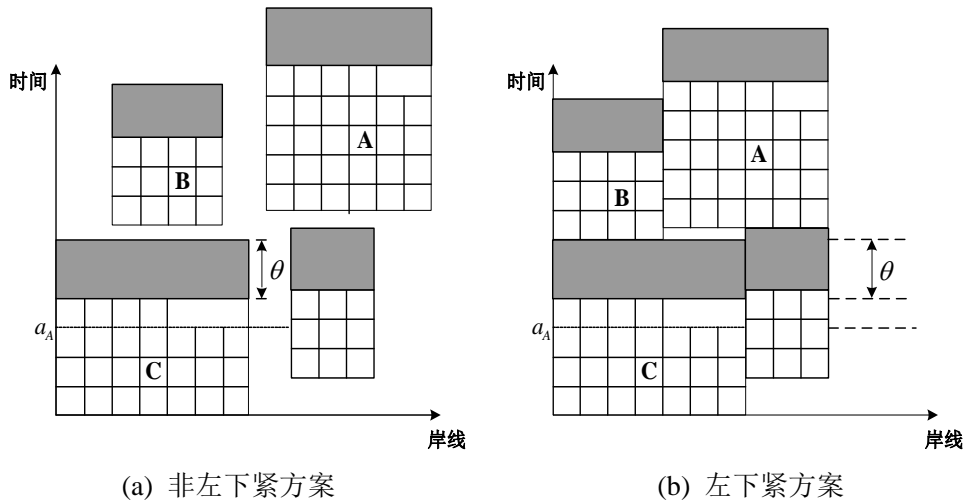


图 2-5 船舶 A 的方案对比

定义 2: 若方案中所有船舶均已处于左下紧位置，则称该方案为左下紧方案。

性质 7: 设给定 θ 下问题 RBAQCSP 的最优方案 $s^*(\theta)$ 对应的目标函数值为 $f^*(\theta)$ ，其所有左下紧的方案中最优方案对应的目标函数值为 $f^\#(\theta)$ ，则 $f^*(\theta) = f^\#(\theta)$ 。

证明：若给定 θ 下的最优方案 $s^*(\theta)$ 不是左下紧方案，则保持 θ 不变，将 $s^*(\theta)$ 中所有船舶对应的矩形尽量向下平移，直至任一个矩形都不能再向下平移为止，然后将所有矩形尽量向左平移，直至任一个矩形都不能再向左平移为止。重复这个过程，直至所有矩形都不能再向下或向左平移为止，从而得到 θ 所对应的一个左下紧的方案 $s^\#(\theta)$ ，其对应的目标函数值 $f^\#(\theta) \geq f^*(\theta)$ 。

显然，在上述过程中，矩形的向下和向左平移均不会增大船舶的计划延误时间。因为 θ 不变，所以 $f^\#(\theta) \leq f^*(\theta)$ ，从而得到 $f^\#(\theta) = f^*(\theta)$ ，即问题(RBAQCSP)在给定 θ 下存在一个最优方案是左下紧的。

由性质 7 可知，对于问题 RBAQCSP，一定存在一个左下紧的最优方案，所以，要求解问题 RBAQCSP，仅仅在其左下紧的方案中搜索即可，这大大降低了在可行解区域中的搜索范围，也便于算法的设计以及算法搜索最优解的时间的耗费。在下面一章里，我们将利用本节所得到的性质，设计一个改进的遗传算法对连续泊位岸桥联合调度问题进行求解。

2.5 本章小结

本章针对集装箱码头物流运作过程中经常出现的船舶到港时间和需要装卸的集装箱量存在随机扰动的情况，研究了泊位和岸桥联合鲁棒调度计划问题。建立了基于时间冗余策略的泊位和岸桥联合调度的预调度计划模型。分别将缓冲时间与船舶计划延误时间的加权和作为预调度计划模型的鲁棒性指标和服务性指标，通过对预计到港船舶的计划靠泊时刻、靠泊位置和分配岸桥数量进行决策，以实现最小化所有靠泊船舶的延误时间加权和（服务性指标）、最大化缓冲时间（鲁棒性指标）的目标。该模型中以服务性指标和鲁棒性指标的加权和泊位和岸桥联合调度问题的目标函数，通过调整权重参数来对调度计划方案的鲁棒性和服务性指标进行权衡。本章还对泊位和岸桥联合调度的预调度计划模型进行了深入的分析，得到了其可行解和最优解的一系列相关性质，证明了该问题一定存在一个最优的左下紧计划方案。

第三章 泊位岸桥联合调度的鲁棒计划问题的求解

上一章讨论建立了集装箱码头的泊位和岸桥联合鲁棒调度问题的数学模型，并通过分析得到了问题的一系列相关性质，尤其是指出了该问题若可行解存在，则问题一定存在一个“左下紧”的最优解（最优的泊位和岸桥联合调度方案）。显然，该问题是一个非线性的整数规划问题（组合优化问题）。通过进一步分析还可知，若规定任意一条靠港船舶无论何时为其分配泊位靠泊码头进行装卸作业，都固定为其分配相同数量的岸桥，则该问题就等价于一个泊位分配问题，且该泊位分配问题等价于 NP-hard 问题中的二维装箱问题。由此可见，本文中泊位和岸桥联合鲁棒调度问题也是一个 NP-Hard 问题。因此，不可能找到一个有效的最优算法对它进行求解。因此，本章将基于上一章中所得出的模型的性质，将讨论设计一种改进的遗传算法来搜索泊位和岸桥联合鲁棒调度问题的最优“左下紧”计划方案。下面先介绍几种常见的启发式搜索算法。

3.1 模型求解方法

在当前信息化时代，伴随着计算机技术的不断发展，以及数学理论与方法向各学科和各应用领域更深入、更广泛地渗透，最优化理论和技术对诸多问题的解决起着决定性的作用。组合优化问题是运筹学的一个重要分支，人们在资源分配、经济决策和能源开发等领域经常会遇到很多问题，它们都可以被描述为组合优化问题进行求解，譬如装箱问题、图着色问题、旅行商问题、0-1 背包问题等，都被证明为 NP-hard 问题。对于求解 NP-hard 问题的最优解，传统的优化算法计算时间太长抑或受问题的复杂度影响使得其计算时间随问题规模的增大以指数形式增长，而且用通常的近似算法求解得到的近似解不能保证其为最优解或可行解，甚至无法确定所得解同最优解的近似程度，因而确定性的优化算法已经不适合求解大规模组合优化问题^[38]。

由上面的分析可知，本文研究的问题为 NP-hard 问题，且是一种以全新的角度考虑的泊位、岸桥联合调度优化问题，因此有必要自行设计启发式搜索算法对该问题进行求解，下面先介绍几种常用的启发式搜索算法。

3.1.1 常用启发式搜索算法简介

1. 蚁群算法

蚁群优化算法(Ant Colony Optimization Algorithms, ACOA)是一种分布式智能模拟算法，其基本思想是模仿蚂蚁依赖信息素进行交流和协作而显示出的社会行为^[39]。作为群体智能算法其中的一种，蚁群优化算法可用于求解各种不同的组合优化问题，其特点主要表现在以下两方面，首先，它是一种从总体上进行优化的算法；其次，它是一种随机的通用试探法，兼具通用性和鲁棒性的优点。

蚁群优化算法源自于自然界中对蚂蚁群体寻找食物能力的模仿，是科学家在生产活动中受蚁群寻食行为的启发而产生的一种算法，同时它也是一种人工智能方法。在寻找食物的过程中，蚂蚁会在它们经过的路径上释放一些化学物质，在这里我们称其为“信息素”。蚂蚁就是通过释放和追随信息素的方式达到彼此交流和通信的目的，具体表现为同一蚁群中后来行走的蚂蚁则会感受到这些物质，并将其作为一种信号选择后面的行走路线，即相比于没有这些物质的路径，后来行走的蚂蚁更倾向于选择有这些物质的路径。然后后到者同样会释放一些信息素作为对原有的信息素的加强，如此重复循环下去。事实上，这种信息素表示蚂蚁在问题求解过程中的一种分布式的信息，是蚂蚁在问题求解过程中的一种经验累积。

蚁群优化算法的特点：

蚁群中的蚂蚁在寻食过程中将“信息素”作为媒介进行堆积或者削弱，间接异步地相互联系，我们可把该过程看作正反馈原理，这样就不至于陷入局部最优解，并且有利于加快进化过程，具备了较快地发现较优解的能力，这是蚁群优化算法的最大的特点。

其次，蚁群算法具有很强的并行性和鲁棒性，个体之间搜索过程彼此独立，仅通过信息交流和传递，在问题空间的多点可以同时开始进行独立的解搜索，有利于发现较好解，增加了算法的可靠性，具有较强的全局搜索能力。我们知道，单个个体容易收敛于局部最优，多个个体通过合作，可很快收敛于解空间的某一子集，有利于对解空间的进一步探索，从而发现较好解^[40]。所以它的求解结果不依赖于初始路线的选择，即蚁群算法对初始路线要求不高，而且在搜索过程中不需要进行人工的调整。

最后，存在的问题是该算法本身很复杂，一般情况下需要较长的搜索时间，也可能是搜索进行到一定程度后，所有个体发现的解完全一致，不能对解空间进一步进行搜索，不利于发现更好的解，即容易出现停滞现象。

2. 禁忌搜索算法

禁忌搜索(Tabu Search)算法是人工智能在组合优化算法中的一个成功应用，是一种亚启发式随机搜索算法，是局部领域搜索算法的推广。它的搜索流程是先找出一个初始可行解，然后以该可行解为基准方案选择一系列的特定搜索方向作为试探，最后选择可以让特定的目标函数值变化最多的移动。所谓禁忌就是禁止重复前面的工作，为了避免在邻域搜索时陷入局部最优解，禁忌搜索采用了一种灵活的记忆技术。禁忌搜索算法用一个禁忌表记录下优化过程中已经达过的局部最优点，在指导下一步的搜索方向时，利用禁忌表中已有的信息不再或有选择地搜索这些局部最优点，以此来跳出局部最优过程。

禁忌搜索算法是一种对人类思维过程进行模拟的智能搜索算法，通过记忆一些局部最优解进而接纳另一部分较差解，达到跳出局部邻域搜索的目的。对已搜索过的地方不会立即去搜索，而是去搜索其他地方，若没有找到最优解，可再选择已搜索过的地方。也就是为了获得更多的搜索区间，有意识地避开已经找到的一部分局部最优解，但不是完全隔绝。另外，为了找到全局最优解，禁忌搜索还采用“释放准则”的策略，不会执着于某一特定的区域。

禁忌搜索算法主要体现了集中和扩散两个策略。它的集中策略体现在局部搜索，即从初始解出发，在该解的邻域内寻求更好的解，当达到局部最优解时结束。局部搜索的缺点就是太贪婪地对某一个局部区域以及其邻域搜索。扩散策略通过禁忌表的功能来实现，禁忌表中记录下已经到达点的某些信息，算法通过对禁忌表中点的选择，到达一些没有搜索过的点，目的是为了跳出局部最优，从而实现更大区域的搜索。

禁忌搜索算法的特点：

与传统的优化算法相比，禁忌搜索算法的缺陷是对于初始解具有较强的依赖性。初始解的好坏不仅直接关系到禁忌搜索在解空间中搜索到的解的优劣，而且对禁忌搜索的收敛速度有着直接的影响。

此外，在搜索过程中可以接受劣解，新解不是在当前解的邻域中随机产生，而是非禁忌的最佳解，因此选取优良解的概率远远大于其他解。由于具有灵活的记忆功能和藐视准则，禁忌搜索算法搜索时能够跳出局部最优解，转向解空间的其他区域，从而增强获得更好的全局最优解的概率，所以禁忌搜索算法是一种局部搜索能力很强的全局迭代寻优算法。禁忌搜索迭代过程是串行的单操作，即在搜索过程中只能有一个初始解，在每一代也只能从一个解移动到另一解。

3. 遗传算法

遗传算法是一种源于自然界中生物进化过程的搜索启发式算法，通常用于解决计算机科学人工智能领域中最优化问题。我们知道，经过有性繁殖产生的生物个体，其适应环境变化成为最佳个体的过程，同时也是经历遗传、变异、淘汰等自然选择进行进化的过程。人们将生物体的进化过程看作搜索和优化过程，用搜索空间中的点模拟自然界中的生物个体，将求解问题的度量函数视作生物体对环境的适应能力，将生物的优胜劣汰过程类比为搜索和优化过程中用好的可行解取代较差解的迭代过程。可以看出遗传算法是一种借鉴了生物界的进化规律演化而来的随机搜索方法。

遗传算法是以决策变量的编码作为运算对象，在优化过程中借鉴生物学中染色体和基因等概念，模拟自然界中生物的遗传和进化等机理，应用遗传操作，求解无数值概念或很难有数值概念的优化问题。主要借用生物进化中“适者生存”的规律，更确切地说，它借鉴了生物进化的一些特征。首先，进化发生在解的编码上，按生物学的术语称这些编码为染色体，优化问题的一切性质都通过编码来研究，编码的目的主要是用于优化问题解的表现形式和便于后面遗传算法中的计算。其次，通过优化问题的目标而人为地构造适应度函数以选择较好的染色体，自然选择的概率分布主要是由适应度函数值的大小决定的，从而确定哪些染色体被淘汰，哪些染色体适应生存并组成种群进而产生一个超过平均数的后代作为繁衍下一代的群体。最后，新一代染色体的产生是一个生殖过程，通过编码之间基因片段的结合使得子女保持双亲的遗传基因特征。染色体结合的过程中一直伴随着基因的交叉和变异，随机的变异使得某些解的编码发生突变，会造成子代和父代的不同，使得解有更大的遍历空间。

遗传算法的特点：

遗传算法直接以目标函数作为搜索信息来评估个体，它基本上不用搜索空间的知识或其它辅助信息，而仅使用由目标函数变换来的适应度函数值就可确定进一步搜索的方

向和范围。适应度函数不需要目标函数的导数值等信息，即不仅不受连续可微的约束，而且其定义域可以任意设定，在此基础上进行遗传操作，这一特点使得遗传算法的应用范围大大扩展。

传统优化算法是从单个初始值迭代求最优解的，容易误入局部最优。与传统优化算法不同的是，遗传算法不是从单个解开始搜索，而是从问题解的串集开始，同时在多点进行信息搜索。它同时搜索由多个个体组成一个初始串集，对群体进行选择、交叉、变异等运算，产生出新一代的群体，继续搜索。由于具有天生的并行性，在有限时间内可对搜索空间中的多个解进行评估，覆盖面大，减少了陷入局部最优解的风险，利于全局择优。

遗传算法不是采用确定性规则，而是采用一种自适应概率搜索技术来指导它的搜索方向，其选择、交叉、变异等运算都是以一定的概率进行的，增加了其搜索过程的灵活性。自适应、自组织和自学习性等特点使得遗传算法可以利用进化过程获得的信息自行组织搜索，适应度大的个体具有较高的生存概率，并获得更适应环境的基因结构。理论和实践证明了在一定条件下遗传算法总是以概率 1 收敛于问题的最优解^[41]。遗传算法目前尚有许多问题需要解决，如算法本身的参数优化问题；如何改进操作手段来提高算法的效率；如何避免过早收敛以及遗传算法和其他优化算法的结合问题等。

3.1.2 模型求解方法的选择

三种算法的共同特点是鲁棒性较强，对基本算法模型稍加修改，便可以与多种启发式算法结合应用于其他问题，以改善算法的性能。

由于蚁群优化算法本身很复杂，一般情况下不仅需要较长的搜索时间，即容易出现停滞现象，而且在搜索过程中可能出现所有个体的解完全一致，不能对解空间进行广度搜索，如此难以发现更好的解。连续型泊位岸桥联合调度问题属于一种特殊的组合优化问题，作业时具有较多的约束条件，如相同泊位的任务不能同时作业，按照计划作业先后顺序对到港船舶进行装卸等，运用禁忌搜索算法进行搜索时，很难做到领域解的平滑变化，在当前解的临域往往不能形成有效解，算法的优势很难得到体现。因为天生具有很强的并行搜索能力，遗传算法采用群体搜索对全局进行搜索时，基本不依赖初始解的情况^[42]。综合比较，本文选择借鉴遗传算法的并行搜索框架来设计一种基于改进遗传算法的求解方法。

3.2 泊位和岸桥联合鲁棒调度问题的改进遗传算法

针对模型(RBQCISP)，我们设计一种基于改进遗传算法(Improved Genetic Algorithm, IGA)的求解算法，对方案的服务性和鲁棒性进行权衡。

3.2.1 染色体编码

编码采用自然数编码的方式，产生一个定长的染色体，其长度为计划期内预计到港的船舶数目。染色体的每个基因由 2 个子基因组成：子基因 A 由区间 $[1, N]$ 上的自然数组成，表示了船舶的解码顺序；子基因 B 由区间 $[Q_i^{\min}, Q_i^{\max}]$ 上的自然数组成，表示为子基因 A 所表示的船舶分配的岸桥数目。

在编码时，我优先考虑为预计到港时刻早的船舶安排解码，例如：假设计划期内 10 条预计到港船舶按其预计到港时刻依次编号为 1-10，图 3-1 给出了一条染色体编码。



图 3-1 染色体编码

上图中假设为船舶作业的岸桥数量上、下限分别为 1 和 4，以染色体的第一、三位基因为例，分别表示船舶 2 第一个解码，即安排靠泊作业，并为其分配 3 个作业岸桥，而船舶 1 第三个解码，为其分配 4 个作业岸桥。

3.2.2 解码策略

在解码过程中，按照子基因 B 所表示的岸桥数量，计算船舶的预计装卸时间，并以此为依据，按照子基因 A 中的船舶解码顺序，依次为计划期内预计到港船舶分配靠泊位置。图 3-2 给出了船舶 i 的解码流程。

图 3-2 中船舶 i 的可选靠泊时刻集合为 $\{a_i, a_i + 1, \dots, H - 1\}$ ，而为了最小化计划延误时间，由性质 2 可以得出应使船舶尽可能早的靠泊，因此，初始化 $y_i = a_i$ 。在给定船舶 i 的计划靠泊时刻 y_i 和预计分配岸桥数量 q_i 的情况下，按照左下紧的构造规则，选择计划靠泊位置 x_i ，若不存在满足左下紧要求的靠泊位置或可用岸桥数量不满足船舶 i 的要求，则依次选择新的计划靠泊时刻，重复上述过程，直到找到船舶 i 的左下紧方案。

3.2.3 适应度函数和选择操作

适应度函数综合考虑了计划期内预计到港船舶的总加权计划延误时间之和、缓冲时间。设 c 表示一条染色体，即一个泊位和岸桥联合调度方案，令 $d(c)$ 表示服务性指标：

$$d(c) = \sum_{i=1}^N (e_i + \theta - d_i)^+ w_i \quad (3-1)$$

由于 $d(c)$ 、 θ 之间的量纲差异较大, 因此, 我们对其进行归一化处理。令 d^{\min} 、 d^{\max} 、 θ^{\min} 、 θ^{\max} 分别表示于 $d(c)$ 和 θ 的上下限, 染色体 c 的适应度函数为:

$$fitness(c) = 1 / (\alpha_1 \frac{d(c) - d^{\min}}{d^{\max} - d^{\min}} + \alpha_2 \frac{\theta - \theta^{\min}}{\theta^{\max} - \theta^{\min}}) \quad (3-2)$$

为了避免种群中存在不可行的方案, 在进行选择操作时, 需要判断染色体 c 是否满足约束条件(2-6)-(2-16), 若满足, 则 c 是一个可行方案, 否则, c 为不可行方案。根据每个可行方案的适应度函数 $fitness(c)$, 我们采用轮盘赌算法选择下一代种群。

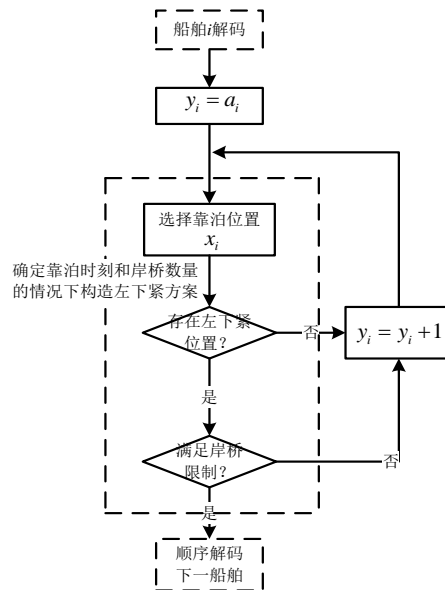


图 3-2 解码流程

3.2.4 交叉、变异操作

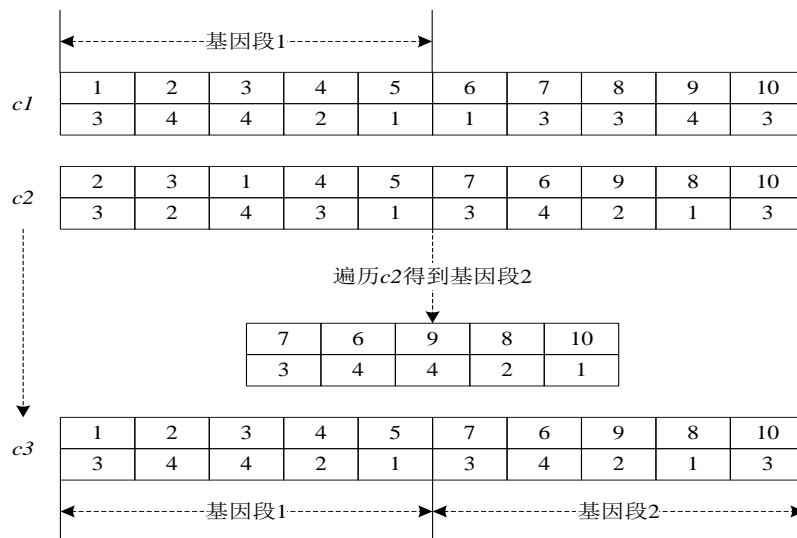


图 3-3 交叉操作

常见的交叉运算（如单点、双点交叉）容易造成上述解码过程中的重复解码现象，针对本文问题，我们设计如下交叉规则：

- 1) 设 c_1 和 c_2 为两条父染色体，从 c_1 随机选取前半段基因段，记为基因段 1；
- 2) 依次遍历 c_2 中的每个子染色体 A 是否存在于基因段 1 中，将不存在于基因段 1 中的染色体排列在一起，记为基因段 2；
- 3) 将基因段 2 排在基因段 1 之后，作为新染色体 c_3 ；
- 4) 交换 c_1 和 c_2 操作顺序，生成新染色体 c_4 ；

上述交叉运算可以用图 3-3 来说明，新一代染色体不存在重复解码的显现。

在变异操作方面，我们采用双点变异的方法，针对染色体 c_1 随机交换其任意相邻两位基因的前后顺序，形成新的染色体 c_2 ，如图 3-4 所示。

变异位									
2	3	1	4	5	7	6	9	8	10
3	2	4	3	1	3	4	2	1	3

2	3	4	1	5	7	6	9	8	10
3	2	3	4	1	3	4	2	1	3

图 3-4 变异操作

3.2.5 算法流程

令 $K = \min\{k \mid \lambda > 1 / \sum_{j=1}^k w_{i_j}, k = 1, 2, \dots, N\}$, $\bar{\theta}(\lambda) = \min\{\bar{\theta}_K, \theta^{\max}\}$ 模型求解不仅需要在给定 θ 的情况下，计算出近似最优解，还需要根据性质 1&4，对不同的 θ 取值进行权衡。设 n 为迭代次数， $\Delta\theta = [\bar{\theta}(\lambda) / n]$ ， θ 取值集合为 $\{0, \Delta\theta, 2\Delta\theta, \dots, \bar{\theta}(\lambda)\}$ ，模型求解流程如图 3-5 所示。

由 3-5 图知，局部寻优和全局寻优表示记录当前适应度最高的染色体，而 IGA 的停止条件为：当连续 k 次局部寻优得到相同的适应度值，则认为 IGA 已经达到收敛，需要对 $\theta + \Delta\theta$ 下的近似最优解进行计算。

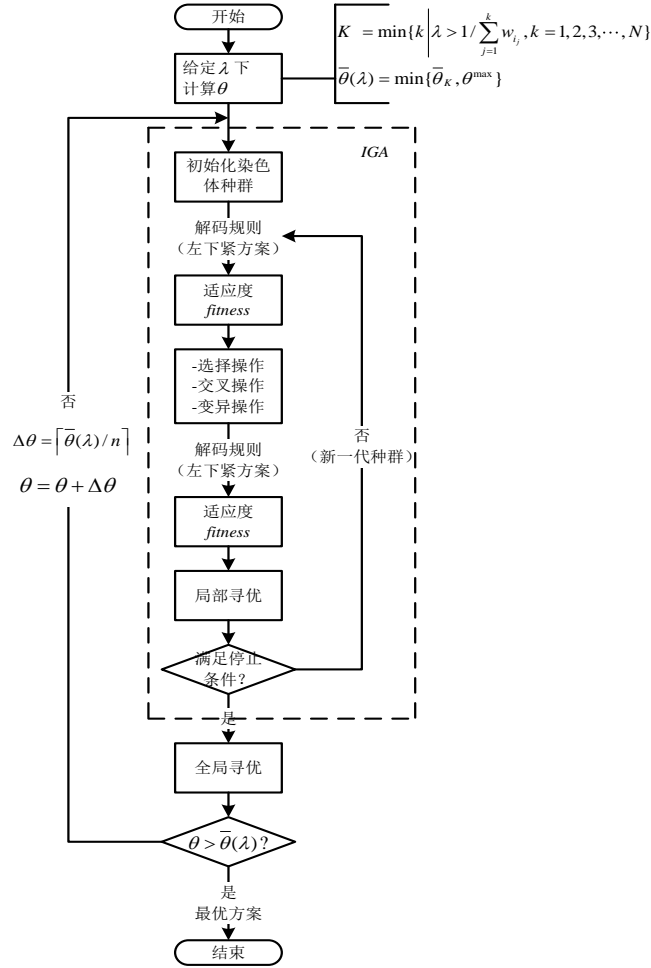


图 3-5 求解流程

令 $K = \min\{k \mid \lambda > 1 / \sum_{j=1}^k w_{ij}, k = 1, 2, \dots, N\}$, $\bar{\theta}(\lambda) = \min\{\bar{\theta}_K, \theta^{\max}\}$ 模型求解不仅需要给定 θ 的情况下, 计算出近似最优解, 还需要根据性质 1&4, 对不同的 θ 取值进行权衡。设 n 为迭代次数, $\Delta\theta = \lceil \bar{\theta}(\lambda)/n \rceil$, θ 取值集合为 $\{0, \Delta\theta, 2\Delta\theta, \dots, \bar{\theta}(\lambda)\}$, 模型求解流程如图 3-5 所示。

由 3-5 图知, 局部寻优和全局寻优表示记录当前适应度最高的染色体, 而 IGA 的停止条件为: 当连续 k 次局部寻优得到相同的适应度值, 则认为 IGA 已经达到收敛, 需要对 $\theta + \Delta\theta$ 下的近似最优解进行计算。

3.3 左下紧方案改进

上述求解流程得出的结果为左下紧基准方案, 左下紧方案促使船舶尽可能在二维装卸平面示意图左下方靠泊 (安全距离内), 然而左下紧基准方案未必就是该连续泊位岸桥联合调度模型的最优分配方案, 如图 3-6 所示。A、B、C 和 D 四条船舶按照左下紧方案靠泊在装卸码头, 由图可知, 船舶 A、D 左边与船舶 B、C 紧邻而右边剩有大量空余泊位闲置, 显而易见, 我们可以将左下紧基准方案靠泊的船舶进行松弛化处理, 如此

不但提高了集装箱码头的利用率，而且增大了连续泊位岸桥联合调度方案对动态不确定性扰动的吸收。

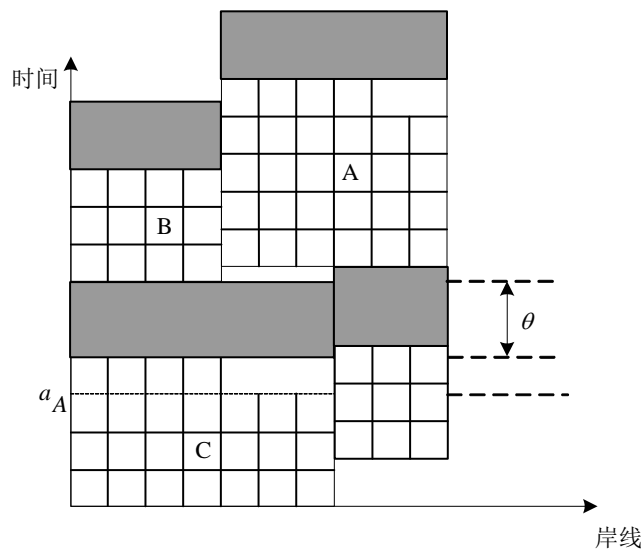


图 3-6 左下紧基准方案一

基于以上原因，在二维装卸平面示意图上，我们拟对连续泊位岸桥联合调度模型的左下紧基准方案进行松弛化处理，具体策略如下：

1) 首先，鉴于某一时段集装箱码头岸线上存在大量连续泊位闲置，我们对计划抵港船舶进行水平移动，达到将该闲置的连续泊位平均分配给此时抵港靠泊船舶的目的，即从集装箱码头靠泊位置上进行松弛化处理。

2) 其次，抵港船舶在水平方向移动后，纵向上势必会出现空白泊位，此时在满足装卸岸桥数量等约束的条件下，对计划期内下一时刻预计装卸的抵港船舶在空白泊位处进行纵向插入靠泊以等待装卸，同时，在条件允许情况下（不增加集装箱码头抵港船舶延误的总时间），可以增大同一泊位紧挨着装卸的船舶之间的缓冲时间（略大于冗余工作时间），也即从集装箱码头装卸船舶的缓冲时间上作松弛化处理。

根据以上松弛策略对上图左下紧基准方案调整后得到松弛基准方案二如图 3-7 所示。可以看出，不论是码头连续泊位整体利用率，还是松弛后调度方案的鲁棒性上，都有显著提高。

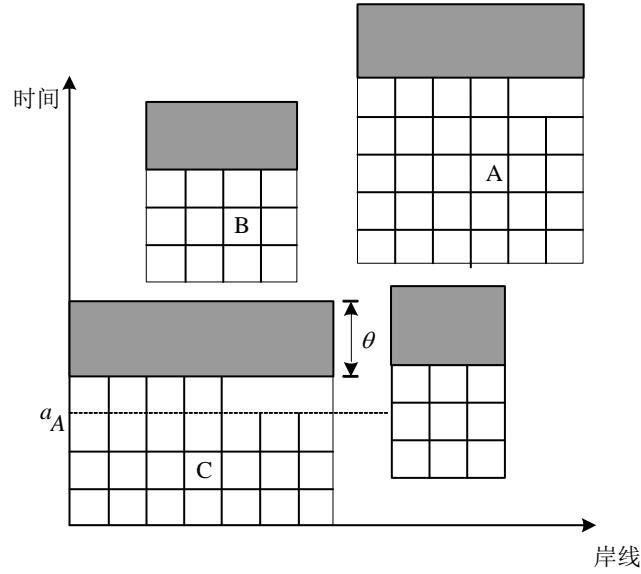


图 3-7 松弛基准方案二

3.4 数值实验

仿真实验根据天津港某集装箱码头的实际数据取值范围，随机产生问题实例，对本文模型和方法的有效性进行验证。以集装箱班轮的周计划为例：设 1 小时为一个单位时间，记为 1 unit time，计划期长度 H 为 168 unit time；10 米为一个泊位段，岸线长度 L 为 100 个泊位段；岸边可用岸桥数 Q 为 10。设船舶 i ($i=1,2,\dots,N$) 的预计到港时刻 a_i 在 $[0,168]$ （单位：unit time）上随机生成，预计装卸量 b_i 在 $[20,180]$ （单位：岸桥工时）上随机生成，长度 l_i 在 $[10,20]$ （单位：泊位段）上随机生成，要求离港时刻 d_i 在上随机生成。此外，考虑到船舶所能容纳的岸桥数量问题，我们假设长度在 $[10,15][a_i + b_i / Q_i^{\min}, a_i + b_i / Q_i^{\min} + 2]$ 的船舶，其作业岸桥数量的取值范围为 $[1,4]$ ，长度在 $[15,20]$ 的船舶，其作业岸桥数量的取值范围为 $[2,6]$ 。按照计划期内码头作业的拥挤程度，随机生成 30 个问题实例 P_1, P_2, \dots, P_{30} ： P_1, \dots, P_{10} 的预计到港船舶数量为 8， P_{11}, \dots, P_{20} 的预计到港船舶数量为 10， P_{21}, \dots, P_{30} 的预计到港船舶数量为 15。

实验分成三个部分：1) 考察确定性条件下，本文提出的 RBAQCSP 模型、及求解算法的求解质量；2) 在不确定环境下，考察本文所提出的基于冗余策略的泊位和岸桥联合调度方案的抗干扰能力；3) 针对每个左下紧方案，采用 3.3 中的改进策略对其进行松弛，并考察松弛后的方案的抗干扰能力。

算法采用 Matlab7.0 编程实现，所得结果均在 Inter(R) Core(TM) 2 CPU E7400 及 2GB 内存平台下测得。

3.4.1 确定性条件下的算法求解质量

在给定 $\theta=0$ ，即不考虑缓冲时间的情况下，针对实例 P_1, P_2, \dots, P_{30} ，采用本文提出的基于 IGA 的求解算法，得到基准方案 S_1, S_2, \dots, S_{30} 。求解结果如表 3-1 所示，其中，Cost 表示所得方案的计划延误时间之和，Time 表示 IGA 的迭代次数。

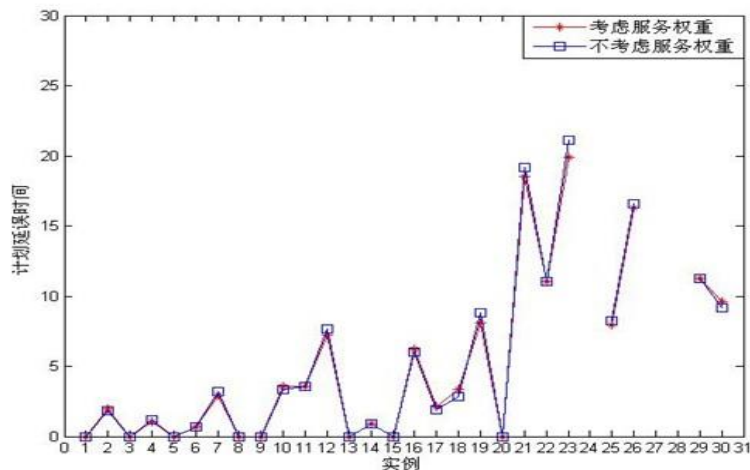
表 3-1 三种到港规模下的求解质量

实例	N=8		实例	N=10		实例	N=15	
	Cost	Time		Cost	Time		Cost	Time
1	0	89	11	3.59	115	21	18.56	148
2	1.95	144	12	7.25	115	22	11.07	91
3	0	101	13	0	79	23	19.9	190
4	1.07	67	14	0.89	107	24	-	-
5	0	90	15	0	101	25	7.94	130
6	0.71	90	16	6.21	121	26	16.32	201
7	2.93	173	17	2.1	99	27	-	-
8	0	107	18	3.36	175	28	-	-
9	0	64	19	8.12	125	29	11.26	62
10	3.56	128	20	0	51	30	9.6	104
Avg	1.02	105.3	Avg	3.15	118.9	Avg	13.52	132.28

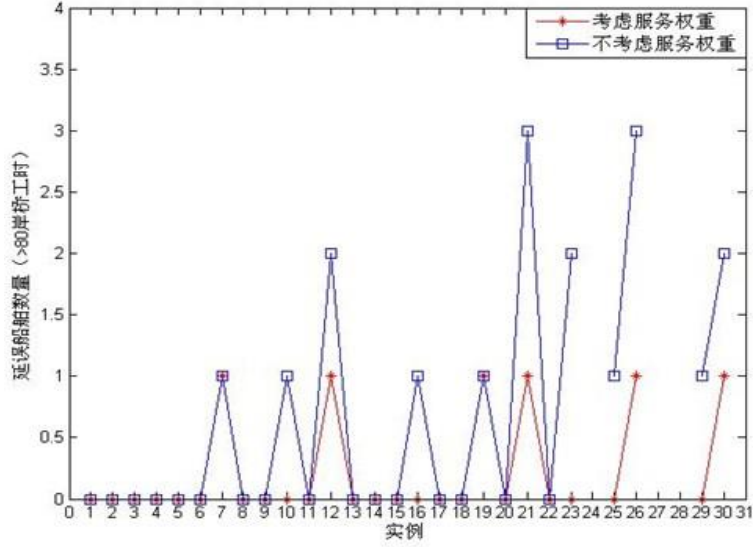
从表 3-1 中的数据可以看出，计划期内预计到港船舶数量决定着码头作业的拥挤程度，而拥挤程度的增加无疑会降低码头的服务性指标，同时增加算法的求解时间。相比 $N=8$ 的情况， $N=10$ 和 $N=15$ 下的计划延误时间分别平均增加了 208.82% 和 1225.49%，而算法的迭代次数相比分别平均增加了 12.92% 和 25.62%。此外，在 $N=15$ 的情况下，不仅计划延误时间显著增加，而且实例 P_{24} 、 P_{27} 、 P_{28} 不存在可行解，这是由于预计到港船舶的总作业岸桥工时过大，并且超过了码头一个计划期的最大作业能力，因此，根据性质 2 得出不存在满足约束条件(2-6)-(2-16)的可行方案。

模型的目标函数(2-5)中引入了船舶的服务权重 w_i ，将船舶的装卸量作为影响服务性指标的一个因素，而当 $w_i=1$ 时，表示不考虑船舶的装卸量对码头运作的影响。图 3-8 给出了 $N=10$ 的情况下，考虑服务权重和不考虑服务权重的情况下的求解结果对比。

从图 3-8(a)中可以看出，在考虑服务权重和不考虑服务权重的情况下，二者所得方案的计划延误时间近似，差异最大的（如实例 18）仅为 15.77%。而在船舶的延误数量方面（如图 3-8(b)所示），以装卸量作为服务权重的考虑可以明显降低中大型船舶的延误数量，尤其是装箱量超过 80 个岸桥工时的船舶，如实例 21 和 26，其装箱量超过 80 个岸桥工时的船舶延误数量均降低了 66.7%。



(a) 计划延误时间



(b) 大中型船舶的延误数量

图 3-8 求解结果对比

3.4.2 不确定环境下的方案抗干扰能力

为了验证方案的抗干扰能力，我们在给定 $\lambda = 1/5$ ，得到实例 P_1, P_2, \dots, P_{30} 的鲁棒泊位和岸桥调度计划，即基准方案 $S'_1, S'_2, \dots, S'_{30}$ 。针对每个实例 P_k 随机生成 20 个仿真情景 $R_1(P_k), R_2(P_k), \dots, R_{20}(P_k)$ ，其中，船舶 i 的实际到港时刻 a_i 在 $[a_i - 2, a_i + 4]$ 上随机生成，实际装卸时间 b_i 在 $[0.9b_i, 1.1b_i]$ 上随机生成。在不确定环境下，按照如下实时调度策略，依次在 $R_1(P_k), R_2(P_k), \dots, R_{20}(P_k)$ 下对 P_k 的基准方案 S_k 和 S'_k 进行调整，分别得到实时调度方案 $B_1(S_k), B_2(S_k), \dots, B_{20}(S_k)$ 和 $B_1(S'_k), B_2(S'_k), \dots, B_{20}(S'_k)$ ：

在基准方案中，若船舶 j 和船舶 i 的靠泊位置重叠，且船舶 j 早于船舶 i 靠泊，则定义船舶 j 为船舶 i 的计划优先船舶。当船舶 i 到港后，判断其是否满足：

- 1) 计划靠泊位置空闲；
- 2) 计划优先船舶已全部靠泊；

若 1)、2) 均满足，则立即靠泊于计划泊位；否则，船舶 i 继续等待，直到 1) 和 2) 同时满足，则立即靠泊于计划泊位。

用 DS_k 和 DS'_k 分别表示基准方案 S_k 、 S'_k 的计划延误时间， DB_{mk} 和 DB'_{mk} 分别表示实时调度方案 $B_m(S_k)$ 和 $B_m(S'_k)$ 所对应的实际延误时间，设 $\overline{DB_k} = (\sum_{m=1}^{20} DB_{mk}) / 20$ 和

$$\overline{DB'_k} = (\sum_{m=1}^{20} DB'_{mk}) / 20, \quad m=1, 2, \dots, 20, \text{ 结果表 3-2 所示。}$$

由表 3-2 中 DS_k 和 DS'_k 的比较可以看出，由于 RBQCISP 模型在同一靠泊位置相邻的靠泊船舶之间中加入了一定的缓冲时间，所得方案在服务性指标值上需要付出一定的代价，即计划延误时间大于不加缓冲时间的传统方案。而由 $\overline{DB_k}$ 和 $\overline{DB'_k}$ 可以看出，在不确定环境下本文方法所得方案的实际延误时间却明显小于传统方案，在 $N=8, 10, 15$ 的情况下，所测实例的实际延误时间分别平均降低了 14.4%、15.47% 和 15.07%。此外，由实

例 P_{26} 可以看出, 在不考虑缓冲时间的情况下, 该实例存在可行方案, 而引入缓冲时间使得预计到港船舶的计划作业时间增大, 从而导致该实例不存在可行方案。

表 3-2 不确定情况下的仿真结果

实例	N=8				实例	N=10			
	DS_k	DS'_k	\overline{DB}_k	$\overline{DB'_k}$		DS_k	DS'_k	\overline{DB}_k	$\overline{DB'_k}$
1	0	1.57	11.52	8.33	11	3.59	9.65	15.8	11.95
2	1.95	4.14	8.42	8.84	12	7.25	11.03	20.87	17.9
3	0	2.54	6.77	5.64	13	0	4.29	11.23	9.14
4	1.07	5.12	9.51	7.33	14	0.89	5.92	13.37	8.6
5	0	2.61	6.22	5.48	15	0	3.14	11.29	9.72
6	0.71	1.93	11.71	9.4	16	6.21	14.4	25.78	20.38
7	2.93	5.52	8.16	6.67	17	2.1	8.76	18.49	18.3
8	0	4.29	6.99	6.28	18	3.36	10.81	17.55	17.75
9	0	2.04	9.62	6.09	19	8.12	13.15	26.15	20.18
10	3.56	8.02	7.87	10.28	20	0	5.2	15.92	15.26
Avg	1.02	3.78	8.68	7.43	Avg	3.15	8.64	17.65	14.92

续表 3-2 不确定情况下的仿真结果

实例	N=15			
	DS_k	DS'_k	\overline{DB}_k	$\overline{DB'_k}$
21	18.56	27.33	37.26	31.47
22	11.07	20.67	25.32	10.19
23	19.9	30.95	43.7	38.48
24	-	-	-	-
25	7.94	15.12	19.94	20.97
26	16.32	-	25.91	-
27	-	-	-	-
28	-	-	-	-
29	11.26	21.14	33.13	29.3
30	9.6	27.33	36.76	31.25
Avg	13.52	23.76	31.72	26.94

3.4.3 松弛后方案的抗干扰能力

为了验证 3.3 中的方案改进策略, 我们对基准方案 $S'_1, S'_2, \dots, S'_{30}$ 进行松弛得到基准方案 $S''_1, S''_2, \dots, S''_{30}$, 并采用 3.4.2 中的仿真情景和实时调度策略对其进行模拟, 得到 S''_k 的实时调度方案 $B_1(S''_k), B_2(S''_k), \dots, B_{20}(S''_k)$, k 为实例编号。用 DB''_{mk} 表示实时调度方案 $B_m(S''_k)$ 所对应的实际延误时间, 设 $\overline{DB''_k} = \sum_{m=1}^{20} DB''_{mk} / 20$, $m = 1, 2, \dots, 20$ 。

通过比较 $\overline{DB''_k}$ 和 $\overline{DB'_k}$, 可以看出 3.3 中的方案改进策略可以在原有 RBQCISP 模型的基础上, 进一步提高方案在不确定环境下的抗干扰能力, 但提高的程度并不明显。如表 3-3, 虽然松弛后的方案在一定程度上增加了相邻靠泊船舶之间的时间和空间间隔, 但是 $\overline{DB''_k}$ 相比 $\overline{DB'_k}$, 在三种到港船舶规模下, 平均仅提高了 2.29%、0.8%、0.33%。

表 3-3 实际延误时间对比

实例	$N=8$		实例	$N=10$		实例	$N=15$	
	$\overline{DB_k'}$	$\overline{DB_k''}$		$\overline{DB_k'}$	$\overline{DB_k''}$		$\overline{DB_k'}$	$\overline{DB_k''}$
1	8.33	8.26	11	11.95	11.81	21	31.47	31.28
2	8.84	8.67	12	17.9	17.74	22	10.19	10.18
3	5.64	5.5	13	9.14	9.01	23	38.48	38.31
4	7.33	7.16	14	8.6	8.47	24	-	-
5	5.48	5.04	15	9.72	9.64	25	20.97	20.97
6	9.4	9.19	16	20.38	20.38	26	-	-
7	6.67	6.51	17	18.3	18.13	27	-	-
8	6.28	6.06	18	17.75	17.56	28	-	-
9	6.09	6.03	19	20.18	20.18	29	29.3	29.11
10	10.28	10.17	20	15.26	15.12	30	31.25	31.25
Avg	7.43	7.26	Avg	14.92	14.8	Avg	26.94	26.85

3.5 本章小结

本章首先介绍了几种常用的启发式搜索算法，并比较了它们各自的特点，在此基础上结合连续泊位岸桥联合调度模型的特征提出了一种基于改进遗传算法的求解方法。该算法将船舶解码顺序和对应船舶分配的岸桥数目分别作为两条子基因进行染色体编码，然后由子基因信息计算出抵港船舶的预计装卸时间，进而依次为计划期预计到港船舶分配靠泊位置，再依据算法流程对联合调度模型进行求解以找到船舶左下紧靠泊的最佳方案。最后，对求解得到的左下紧计划分配方案进行松弛化处理，得到一个最优的或近似最优的泊位和岸桥联合鲁棒调度计划方案。最后利用仿真数据实例，通过计算机仿真的方法分别对确定条件下所设计算法的求解质量、不确定环境下调度方案的抗干扰能力以及左下紧方案松弛后的抗干扰能力进行实验，验证了上一章提出的模型和本章中提出的求解方法的有效性，并对实验结果进行了深入分析。

但是，一个泊位和岸桥联合调度计划方案即使鲁棒性再强，当出现不可预测的事件引发的大的扰动或随机扰动过大时，就可能造成调度计划的无法顺利实施。因此，在计划方案的实际过程中，岸桥或泊位的实时调度是必不可少的。因此，下一章将讨论岸桥的实时调度问题。

第四章 岸桥实时调度问题的建模与优化

无论是制定连续泊位岸桥联合调度计划，还是对连续泊位岸桥调度方案进行松弛化处理，其目的都是为了在实际调度过程中可以最大程度地吸收动态不确定性干扰，提高集装箱码头装卸效率。然而，即使调度计划的鲁棒性再好，实际过程中仍有大量干扰事件不可预测，使得到港船舶的实际到港时间和需要装卸的集装箱量产生很大的随机扰动。因此，在计划的执行阶段，需要根据到港船舶的实际到港时间、装卸作业量以及在港船舶的装卸作业的实际情况，对泊位和岸桥的联合调度计划方案进行实时的动态调整，使得集装箱码头的装卸作业能够尽可能地吸收船舶实际到港时间和需要处理的装卸量的随机扰动，尽可能地降低到延期离港集装箱船舶的数量和集装箱船舶延期离港的时间。为了集装箱码头装卸作业实时调度方案的顺利执行，也为了问题处理的方便，本章仅讨论了集装箱码头岸桥的实时调度问题。

4.1 问题提出

制定计划方案的目的是在装卸作业开始前获得最优的泊位与岸桥调度计划，但集装箱码头在实际作业过程中经常会出现诸如设备故障、船舶延迟、操作事故等干扰事件，这些事件发生后需要对原有调度计划进行调整，以降低这些动态不确定性事件对整个集装箱码头操作系统的影响。如图 4-1 所示，如果船舶 2 由于意外事件（诸如遭遇海上风浪等情形）发生抵港延误，那么船舶 4、5 都要受到影响，此时需要实时采取相应的干扰应对方案，对原有计划进行调整。

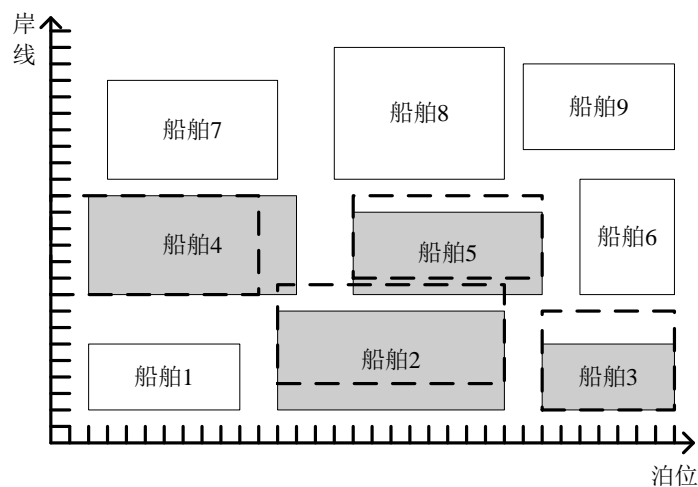


图 4-1 干扰事件对泊位分配计划的影响

针对该类问题的特点,有如下两种策略对连续泊位岸桥联合调度的干扰管理问题进行实时处理:

1) 泊位调整策略: 如果干扰事件影响较大,仅通过调度岸桥无法吸收干扰,或者吸收干扰效果较差,此时,需要对原调度方案中的泊位分配方案进行调整,表现为对装卸船舶的位置和顺序进行调整,在此基础上调整岸桥调度计划。如上图情形,船舶 2 抵港有延误时,我们将船舶 4 的停靠位置左移,船舶 5 不影响准时离港的前提下延迟靠泊,并在保证船舶 3 在要求离港时刻前将其多余的装卸岸桥分配给船舶 2,使得延迟离港船舶总时间最小。由于在实际调度过程中,重分配泊位和岸桥在成本和时间上均不可取,因而我们更倾向于在计划分配阶段对方案进行松弛化处理。

2) 岸桥调整策略: 此策略应对的情况是,当干扰事件影响较小,一般选择船舶的停靠位置和停靠顺序不变,通过调整岸桥调度计划的方式进行干扰管理,方法之一就是为预计延迟离港船舶调度临近装卸船舶的空闲或过剩的工作岸桥,如上图情形,船舶 2 抵港有延误时,我们在保证船舶 3 在要求离港时刻前将其多余的装卸岸桥分配给船舶 2,使得后续抵港的船舶 4、5 基本不受影响。

泊位调整方法实质为结合岸桥实时调整的松弛策略,由于在连续泊位岸桥联合调度计划方案的二维模型中,我们已经对泊位岸桥联合调度进行松弛化处理,这部分内容在上一章左下紧方案改进中有详细的描述,并通过实验进行了仿真,接下来我们重点讲解在动态不确定性环境下如何对岸桥进行实时调度。

4.2 问题描述

上一章中针对计划期内的预计到港船舶,制定了鲁棒的泊位和岸桥联合调度方案。而面对实际中的一些突发事件的扰动,即使方案的鲁棒性再强,也难以应对这种动态不确定性的影响,为了保证码头作业的稳定性和连续性,还需要制定相应的岸桥实时调度策略,以便对预订方案作出调整。

岸桥的实时调度是针对当前靠泊船舶进行的,可以基于以下假设,对岸桥实时调度问题进行研究:

1. 假设码头岸线的泊位和岸桥按照从左到右的顺序依次编号;
2. 避免岸桥的频繁移动,假设岸桥的实时调整需要固定的时间间隔;
3. 岸桥实时调整是针对当前状况的动态调整,主要考虑当前靠泊船舶的延误情况。

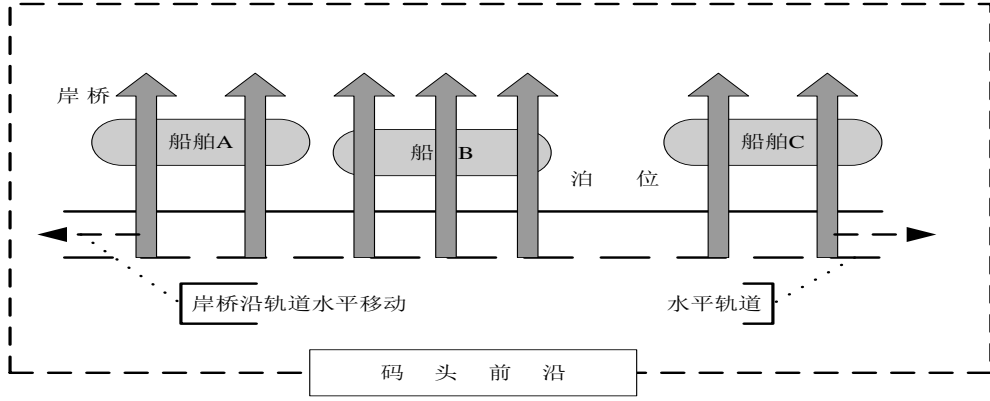


图 4-2 集装箱码头前沿岸桥水平移动作业图

4.3 数学模型

4.3.1 符号表示

已知量：

Q ：岸线上岸桥的总数目；

$\tilde{N}(t)$ ： t 时刻当前靠泊的船舶数量；

\tilde{y}_i ：船舶 i 的实际靠泊时刻；

$\tilde{b}_i(t)$ ： t 时刻船舶 i 剩余的实际装卸量（单位：岸桥工时）；

d_i ：计划期内船舶 i 的预计离港时刻；

Q_i^{\max} ：计划期内船舶 i 进行装卸作业所能容纳的最大岸桥数量；

Q_i^{\min} ：计划期内船舶 i 进行装卸作业所能容纳的最小岸桥数量；

Δt ：实时调度时间间隔（以1小时为单位，考虑岸桥不宜频繁移动的情况下， $\Delta t = 2$ ）；

H ：计划期长度（以1小时为单位，则周计划的情况下， $H = 168$ ）；

决策变量：

$x_{ij}(t)$ ：0-1变量， t 时刻岸桥 j 为船舶 i 服务， $x_{ij}(t) = 1$ ，否则 $x_{ij}(t) = 0$ ；

辅助变量：

$\tilde{e}_i(t)$ ： t 时刻船舶 i 的预计完工时刻， $\tilde{e}_i(t) = \tilde{y}_i + \tilde{b}_i(t) / \sum_{j=1}^Q x_{ij}(t)$ ；

4.3.2 数学模型的建立

岸桥的实时调度策略是针对当前靠泊船舶动态的调整其服务岸桥的过程，我们给出在 t 时刻针对靠泊船舶进行岸桥实时调度的目标函数：

$$\min \sum_{i=1}^{\tilde{N}(t)} (\tilde{e}_i(t) - d_i)^+ \quad (4-1)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^{\tilde{N}(t)} \sum_{j=1}^Q x_{ij}(t) \leq Q, \quad t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, 2H \quad (4-2)$$

$$Q_i^{\min} \leq \sum_{j=1}^Q x_{ij}(t) \leq Q_i^{\max}, \quad i = 1, \dots, \tilde{N}(t), t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, 2H \quad (4-3)$$

$$x_{ij}(t) \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, \tilde{N}(t), t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, 2H, j = 1, \dots, Q \quad (4-4)$$

其中，目标函数(4-1)表示最小化靠泊船舶的实际延误时间；约束(4-2)表示 t 时刻的作业岸桥数量不允许超过岸线上的岸桥总数；约束(4-3)表示 t 时刻船舶 i 的服务岸桥数量限制；约束(4-4)为决策变量的取值约束。

4.4 模型的求解

本章研究的岸桥实时调度问题可以看作是一类特殊的并行机调度问题，而并行机调度问题已被证明是 NP-Hard 问题。与并行机调度问题不同的是，本章中岸桥实时调度问题的求解规模一般较小，因此，我们利用 IBM ILGO CPLEX 12.2 进行求解。

由于目标函数(4-1)中的非线性在采用最优算法进行求解时较难处理，因此进行如下转换，得到等价的混合整数线性规划模型(MILP_MODEL)：

$$\min f = \sum_{i=1}^{\tilde{N}(t)} \delta_i \quad (4-5)$$

$$\delta_i \geq e_i(t) - d_i, \quad i = 1, 2, \dots, \tilde{N}(t) \quad (4-6)$$

$$\delta_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, \tilde{N}(t) \quad (4-7)$$

上述 MILP_MODEL 在 MATLAB 环境下采用 YALMIP 建模，利用 IBM ILGO CPLEX 12.2 作为求解器，采用其自带的最优算法进行求解。我们将在仿真实验中对 CPLEX 的求解性能进行深入分析。

4.5 仿真实验

由于本章工作是上一章的扩展研究，因此，我们首先在相同的泊位状况、岸桥可用工时数的情况下，针对 3.5 中的仿真实例 P_1, P_2, \dots, P_{30} ，采用上一章中的 RBQCISP 模型和算法，得到基准方案 $S'_1, S'_2, \dots, S'_{30}$ ，然后采用 3.3 中的改进策略，对 $S'_1, S'_2, \dots, S'_{30}$ 进行松弛，得到基准方案 $S'_1, S'_2, \dots, S'_{30}$ 。

我们同样以一小时为一个时间单位(1 unit time)，假设实时调度间隔时间 $\Delta t = 2 \text{ unit time}$ 。在不确定环境下，依次在 3.4.2 中的仿真情景 $R_1(P_k), R_2(p_k), \dots, R_{20}(P_k)$ 下，对基准方案 S_k' 和 S_k'' 进行模拟（ k 为实例编号）：

（1）模拟 3.4.2 中实时调度策略（记为策略 1），不考虑岸桥的实时调度，得到基准方案 S_k' 和 S_k'' 下的平均实际延误时间 $\overline{DB_k'}$ 和 $\overline{DB_k''}$ ；

（2）在策略 1 的基础上进一步采用本章的岸桥实时调度策略，为当前靠泊船舶的服务岸桥进行动态调配（记为策略 2），得到基准方案 S_k' 和 S_k'' 下平均实际延误时间 $\overline{DC_k'}$ 和 $\overline{DC_k''}$ 。

仿真结果如表 4-4 所示，由表中 $\overline{DB_k'}$ 和 $\overline{DC_k'}$ 、 $\overline{DB_k''}$ 和 $\overline{DC_k''}$ 的比较可以看出，所测的 30 个实例相比只采用泊位实时调度策略，其实际延误时间分别平均降低了 20.73% 和 24.05%。

此外，上一章的仿真实验中，分析了松弛后的方案相比左下紧方案，虽然在抗干扰能力方面有所提高，但提高的程度并不明显，如表 4-4， $\overline{DB_k''}$ 相比 $\overline{DB_k'}$ 平均提高了 0.88%。而松弛后的方案由于增加了相邻靠泊船舶之间的时间和空间间隔，从而在实时调度中增加了岸桥的调度空间，使得策略 2 下的船舶实际延误情况有明显改善（如图 4-3 所示）， $\overline{DC_k''}$ 相比 $\overline{DC_k'}$ 平均提高了 5.03%。

表 4-4 实际延误情况

实例	策略 1		策略 2	
	\overline{DB}_k'	\overline{DB}_k''	\overline{DC}_k'	\overline{DC}_k''
1	8.33	8.26	5.33	4.22
2	8.84	8.67	7.07	6.66
3	5.64	5.5	4.85	4.57
4	7.33	7.16	6.23	5.74
5	5.48	5.04	3.17	2.62
6	9.4	9.19	6.11	5.39
7	6.67	6.51	5.6	5.44
8	6.28	6.06	3.26	2.31
9	6.09	6.03	5.97	4.49
10	10.28	10.17	8.02	7.69
11	11.95	11.81	9.56	9.07
12	17.9	17.74	10.92	10.2
13	9.14	9.01	5.48	4.87
14	8.6	8.47	7.74	7.4
15	9.72	9.64	7.29	6.96
16	20.38	20.38	15.69	15.13
17	18.3	18.13	15.92	15.4
18	17.75	17.56	13.13	12.86
19	20.18	20.18	16.55	15.49
20	15.26	15.12	13.12	12.75
21	31.47	31.28	23.92	21.9
22	10.19	10.18	7.85	7.7
23	38.48	38.31	35.02	34.76
24	-	-	-	-
25	20.97	20.97	15.73	14.78
26	-	-	-	-
27	-	-	-	-
28	-	-	-	-
29	29.3	29.11	25.49	24.53
30	31.25	31.25	27.5	27.01
Avg	14.81	14.68	11.74	11.15

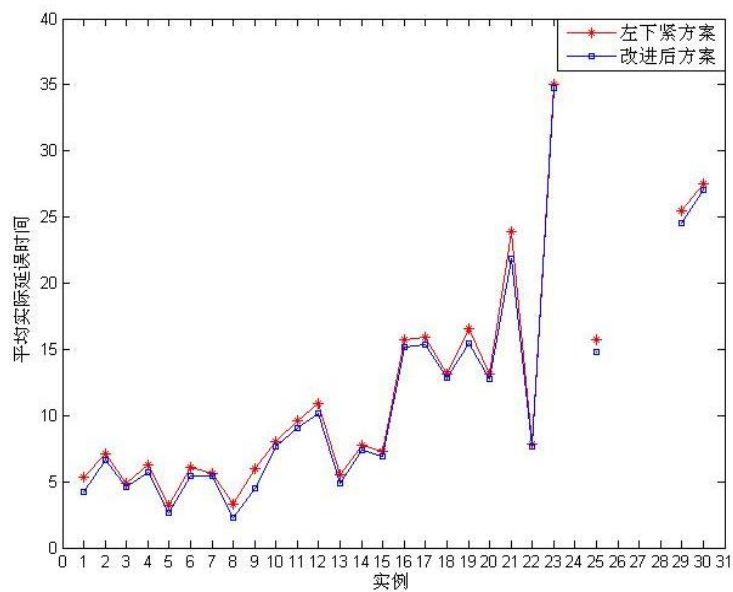


图 4-3 策略 2 下的实际延误时间比较

4.6 本章小结

本章讨论了泊位和岸桥联合调度计划在实际执行过程中,当出现不可预测干扰事件或前两章所讨论的随机扰动过大而使得计划方案无法顺利执行时,如何通过岸桥的实时调度来进一步降低扰动对集装箱码头装卸作业顺利进行的不利影响。本章中以最小化靠泊船舶的实际延误时间作为目标,建立了岸桥实时调度的数学建模,利用 IBM ILGO CPLEX 12.2 作为求解器,通过其内置的优化算法对问题进行求解。最后在和上章相同的泊位状况、岸桥可用工时数的情况下,以两个单位时间间隔实时调整岸桥并进行了仿真实验,得到岸桥实时调整后到港船舶实际延误情况与对岸桥不进行实时调度的结果相比较略有改善的结论。

第五章 展望与总结

泊位和岸桥作为集装箱码头主要的战略资源，对码头集装箱运输的重要性不可低估，而对于集装箱码头船舶公司来说，如何合理有效地利用好集装箱码头的泊位和岸桥资源，缩短抵港船舶在港停留时间，提升其国际竞争力，是解决集装箱码头赖以生存和发展的关键。我们优化集装箱码头泊位和岸桥联合实时调度问题的意义就在于此，制定一个考虑周全、合理高效的计划方案对于集装箱码头公司来说，在船舶实际调度阶段可以取得事半功倍的效果。

5.1 本文的主要研究成果

针对集装箱码头不确定因素的干扰，本文建立了泊位和岸桥联合实时调度优化模型。论文的主要创新性成果有：

(1) 研究了不确定环境下的连续泊位和岸桥联合调度问题，提出了基于冗余策略的泊位和岸桥联合鲁棒调度的预调度计划模型。该模型以船舶计划延误时间的加权和作为码头服务性指标、以装卸作业缓冲时间为鲁棒性指标，通过调整联合调度模型权重参数进行权衡决策，提升调度计划方案在不确定环境下的抗干扰能力。

(2) 分析得出了预调度计划模型的一系列相关性质，证明了该问题一定存在一个最优的左下紧方案，在此基础上，提出了一种基于改进遗传算法的求解最优（近似最优）左下紧方案的算法。并设计了一种对最优左下紧方案进行松弛化处理的改进方案。

(3) 建立了不确定环境下岸桥实时调度问题的数学模型，针对实际调度过程中不确定因素的干扰，制定了相应的实时调整策略，仿真实验表明，岸桥的实时调整进一步提高了码头集装箱装卸作业的抗扰动能力。

5.2 进一步研究方向

尽管本文在研究集装箱码头连续泊位和岸桥联合调度问题的优化建模方面取得了一些进展，尤其是针对连续泊位岸桥联合实时调度问题进行了较为深入全面的研究，并取得了一些研究成果，但由于集装箱码头调度管理系统是一个复杂的庞大系统，涉及到的因素很多，目前的工作仍属于前期阶段，从建模理论、技术和应用上仍有许多方面需要进一步完善，现归纳为以下几点：

(1) 本文在建立连续泊位岸桥联合调度模型时，仅考虑将最小化靠泊船舶的总计划延误时间作为其目标函数，对集装箱码头公司而言，这是不周密的。因为在计划调度方案中靠泊船舶的总计划延误时间最小，然而抵港船舶离港延误数量不一定最小。因此，在下一步的研究过程中，靠泊船舶的离港延误数量也应该作为一项优化目标进行研究。

此外,对所有到港靠泊船舶预留相同的冗余工作时间,这在实际制定计划方案过程中是不合理的,相对而言,我们应该为装卸量大而分配岸桥少的预计船舶制定更多的冗余工作时间。

(2) 本文在对鲁棒泊位岸桥联合调度模型求解时,鉴于某一时段集装箱码头岸线上存在大量连续泊位闲置,我们对计划抵港船舶进行水平移动,达到将该闲置的连续泊位平均分配给此时抵港靠泊船舶的目的,即对所得到的左下紧方案松弛化处理。在实际调度过程中,装卸量大的船舶面对动态不确定性干扰产生的影响更加复杂,因此,我们有必要为装卸量相对大的抵港船舶周围预留更多的空缺泊位以利于更好地吸收扰动。

(3) 本文在建立不确定环境下连续泊位岸桥联合实时调度模型时,针对实际调度过程中的动态不确定性干扰,提出通过实时调整岸桥以吸收该扰动因素,然而对岸桥实时调整还应考虑到集卡调度、场桥调度以及能源花费等问题。如何在出现异常的情况下,合理利用码头空闲的岸桥、场桥和集卡资源,充分考虑各环节之间的联系和各方面的影响因素,制定相关的联合调度策略,这也是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] 孙凤山. 港口发展集装箱物流的优势和途径[J]. 港口经济, 2007(02): 33-35.
- [2] 张越. 国际集装箱运输市场 2012 年回顾与 2013 年展望[J]. 中国水运, 2013(1): 20-21.
- [3] 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[J]. 大连海事大学学报, 2002(S1): 115-117.
- [4] 蔡芸. 港口集装箱物流系统仿真和优化方法的研究及应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- [5] 于汝民. 现代集装箱码头经营管理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [6] Chuqian Zhang, Yat-wah Wan, Jiyin Liu. Dynamic crane deployment in container storage yards [J]. Transportations Research Part B, 2002(36): 537-555.
- [7] 银路, 李天柱. 情景规划在新兴技术动态评估中的应用[J]. 科研管理. 2008(04).
- [8] Kozan E, Preston P. Genetic algorithm to schedule container transfers at multimodal terminals [J]. International Transactions in Operational Research, 1999, 6(3): 311-329.
- [9] 陈超, 曾庆成. 集装箱航线资产配置鲁棒优化模型[J]. 哈尔滨工程大学学报. 2009(01).
- [10] 王芳. 不确定性因素对我国农村居民现金消费支出的影响分析[J]. 数理统计与管理. 2006(04).
- [11] Kap Hwan Kim, Jong Wook Bae. Re-marshaling export containers in port container terminals [J]. Computers and Industrial Engineering, 1998(35): 655-658.
- [12] 计明军, 靳志宏. 集装箱码头集卡与岸桥协调调度优化[J]. 复旦学报(自然科学版). 2007(04).
- [13] 孙彬, 孙俊清, 陈秋双. 基于鲁棒反应式策略的泊位和岸桥联合调度[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(4): 1076-1083.
- [14] Monaco M F, Sammarra M. The berth allocation problem: a strong formulation solved by a lagrangean approach [J]. Transportation Science, 2007, 41(2): 265-280.
- [15] Lai K K, Shih K. A study of container berth allocation [J]. Journal of Advanced Transportation, 1992, 26(1): 45-60.
- [16] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S. The dynamic berth allocation problem for a container port [J]. Transportation Research Part B, 2001, 35(4): 401-417.
- [17] Nishimura E, Imai A, Papadimitriou S. Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 131(2): 282-292.
- [18] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S. Berth allocation with service priority [J]. Transportation Research Part B, 2003, 37(5): 437-457.
- [19] Cheong C, Tan K, Liu D, et al. Multi-objective and prioritized berth allocation in container ports[J]. Annals of Operations Research. 2010, 180(1): 63-103.

- [20] Du Y Q, Chen Q S, Quan X W, et al. Berth allocation considering fuel consumption and vessel emissions[J]. Transportation Research Part E, 2011, 47(6): 1021-1037.
- [21] Lim A. The Berth planning problem [J]. Operations Research Letters, 1998,22(2-3): 105-110.
- [22] Li C L, Cai X Q, Lee C Y. Scheduling with multiple-job-on-one-processor pattern [J]. IIE Transactions, 1998, 30(5): 433-445.
- [23] Park K T, Kim K H. Berth scheduling for container terminals by using a sub-gradient optimization technique [J]. Journal of the Operational Research Society, 2002, 53(9): 1054 – 1062.
- [24] Kim K H, Moon K C. Berth scheduling by simulated annealing [J]. Transportation Research Part B, 2003, 37(6): 541-560.
- [25] Lee D H, Chen J H, Cao J X. The continuous berth allocation problem: a greedy randomized adaptive search solution. Transportation Research Part E, 2010, 46(6): 1017-1029.
- [26] Moccia L, Cordeau J F, Gaudioso M, et al. A branch-and-cut algorithm for the quay crane scheduling problem in a container terminal [J]. Naval Research Logistics, 2006, 53(1): 45-59.
- [27] Park Y M, Kim K H. A scheduling method for berth and quay cranes [J]. OR Spectrum, 2003, 25(1): 1-23.
- [28] Song L, Cherrett T, Guan W. Study on berth planning problem in a container seaport: using an integrated programming approach [J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 62(1): 119-128.
- [29] Imai A, Chen H C, Nishimura E, Papadimitriou S. The simultaneous berth and quay crane allocation problem [J]. Transportation Research Part E, 2008, 44(5): 900-920.
- [30] Liang C, Guo J, Yang Y. Multi-objective hybrid genetic algorithm for quay crane dynamic assignment in berth allocation planning [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011, 22(3): 471-479.
- [31] Xu Y, Chen Q, Quan X W. Robust berth scheduling with uncertain vessel delay and handling time [J]. Annals of Operations Research, 2012, 192(1): 123-140.
- [32] Du Y Q, Xu Y, Chen Q S. A feedback procedure for robust berth allocation with stochastic vessel delays [C]. 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2010, 2210-2215.
- [33] Zhen L, Lee L H, Chew E P. A decision model for berth allocation under uncertainty [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 212(1): 54-68.
- [34] 曾庆成,胡祥培,杨忠振. 集装箱码头泊位分配-装卸桥调度干扰管理模型[J]. 系统工程理论与实践, 2010(11).
- [35] 徐亚. 集装箱码头作业调度优化模型与算法研究[D]. 天津: 南开大学, 2009.
- [36] 徐剑华. 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(4): 46-51.
- [37] 丁然,李歧强,孙同景. 不确定处理时间批处理过程的鲁棒调度新策略[J]. 系统工程理论与实践. 2006(04).
- [38] 陈秋双,杜玉泉,徐亚. 不确定环境下集装箱码头的扰动管理[J]. 物流技术. 2010(Z1).
- [39] 姜长. 动态信息素更新蚁群算法在指派问题中的应用[J]. 计算机工程, 2008,34(15): 187-189.

- [40] 韩骏,孙晓娜,靳志宏. 集装箱码头泊位与岸桥协调调度优化[J]. 大连海事大学学报. 2008(02).
- [41] 周鹏飞,康海贵. 面向随机环境的集装箱码头泊位-岸桥分配方法[J]. 系统工程理论与实践. 2008(01).
- [42] 孙彬,孙俊清,刘凤连,杨鹏,韩梅,冯美玲. 基于蚁群算法的鲁棒离散泊位分配问题的研究[A]. 第二十九届中国控制会议论文集[C]. 2010.

发表论文和科研情况说明

发表的论文:

- [1] Zhang Xiufu, Sun Junqing. Simulateing Approach Based Optimal Manpower planning in an Employee Leasing Center and the Approximate Algorithm, 《The 26th Chinese Control and Decision Conference》, 2013 年 10 月, 已录用待发表

致 谢

本论文的工作是在我的导师孙俊清教授的悉心指导下完成的，孙俊清教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢三年来孙俊清老师对我的关心和指导。

首先特别感谢孙俊清教授对我悉心指导，提供给我许多支持和帮助，使我能够顺利完成实验室的科研工作。另外，孙老师在学习上和生活中都给予了我很大的关心和帮助，孙老师以他敏锐的洞察力、渊博的知识储备、严谨的治学态度、精益求精的工作作风和对科学的献身精神给我留下了刻骨铭心的印象，这些使我受益匪浅，并将成为我终身献身科学和献身事业的动力，在此向孙俊清老师表示衷心的感谢。

孙彬老师对我论文里面模型的算法求解方面做了大量的指导工作，他不仅在学术上给我指引，而且在生活上予以帮助，从他身上我学到了很多知识。

宁红云教授对于我的科研工作和论文都提出了许多的宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

在实验室工作及撰写论文期间，程俊、魏正松等同学对我论文中的泊位分配绘图细节上给予了许多好的建议，在此向他们表达我的感激之情。

另外也感谢我的父母，他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。