

硕士学位论文

集装箱码头堆场翻箱问题建模与优化研究

Research on Modeling and Optimization of Reshuffle Problem in
Container Yard

作者姓名: 赵金秋

学科、专业: 港口、海岸及近海工程

学 号: 21306219

指导教师: 周鹏飞 副教授

完 成 日 期: 2016 年 5 月

大连理工大学

Dalian University of Technology



大连理工大学学位论文独创性声明

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目：集装箱码头堆场集装箱问题建模与优化研究

作者签名：赵金秋 日期：2016 年 6 月 12 日

摘 要

近年来,由于我国日益完善的集装箱港口硬件设施,集装箱吞吐量快速增长,港口堆场的作业效率成为制约其发展的重要瓶颈。集装箱运输过程中,由于船舶到港、交通状况、集卡运输、天气变化等不确定性因素,会造成集装箱堆场运营中存在大量的翻箱作业。并且随着我国港口堆场轨道式龙门吊的广泛采用,堆场堆高不断增加,翻箱率也将更高。因此,研究有效减小码头翻箱率的方法变得越发迫切。

本文首先针对预约交箱机制下集装箱堆场箱位优选问题,提出了交箱次序与箱位分配的图表示法,基于图表示提出了压箱量和龙门吊大车行驶距离的期望的求解方法。在此基础上构建了基于图的集装箱堆场出口箱位优选模型,优化堆场龙门吊行车成本和压箱量。考虑图表示模型特点开发了禁忌搜索算法,利用图表示特性缩小搜索空间和优选搜索方向,提高了收敛速度。实验表明,提出的算法能够在合理的时间内获得满意解,较确定性模型减少堆场作业成本 20%以上。

本文接着针对集装箱混堆模式堆场出口收箱作业调度易受干扰问题,首先提出了出口收箱序列的干扰识别与扰动度量方法;然后构建了考虑关联扰动影响的出口箱位分配干扰管理模型,利用箱位偏离目标优化干扰影响,利用压箱量和龙门吊行驶距离目标优化收箱作业成本;考虑干扰恢复求解的不均衡性特点,设计了基于局部加速的禁忌搜索算法,利用局部搜索邻域控制搜索方向和范围,提高收敛效率。实验表明:干扰管理模型较重调度节约干扰成本 10%以上。

本文最后针对集装箱港口进口提箱的翻箱落位优选问题,开发了基于虚拟路径的三阶段启发式算法,首先利用启发式规则生成翻箱落位初始可行方案,然后利用阻碍箱的虚拟翻箱构建虚拟移箱路径,构建移箱路径冲突集合,在此基础上建立虚拟移箱路径的组合优化 0-1 规划模型,并开发了进化求解算法。实验表明,提出的启发式算法求解效果较 OH 算法改进 20%以上。

关键词: 集装箱码头; 堆场箱位优选; 翻箱落位; 干扰管理; 禁忌搜索

Research on Modeling and Optimization of Reshuffle Problem in Container Yard

Abstract

In recent years, with the increasingly mature container terminals and container throughput rapid growth, the efficiency of yard become an important bottleneck factor which restrict its development. There are a large number of reshuffle in container yard because of uncertainties such as weather variations. Also, the widely used in rail gantry and yard stacking increase aggravate the reshuffle. In conclusion, the study of effectively reducing reshuffle have become increasingly urgent.

First of all, based on the allocation of the container slots in yard, which is affected by container delivery appointment system, we proposed a two-dimensional graph representation of delivery sequence and slots allocation, and then suggested a solution of expected value of reshuffles and gantry crane traveling distances. An optimization model of export container slots in container yards is established based on graphs as to minimize the crane traveling distance and the reshuffles. A tabu-search algorithm was proposed under the consideration of the characteristics of graph representation to narrow down the searching space and to optimize searching direction, thus its convergence rate can be accelerated. The results show that a satisfied solution can be gained in a reasonable time by the algorithm. Besides, in contrast with the determinative model, this model can save more than 20% operation cost.

The next, considered the fact that operations tend to interference each other in container yards of mixture storage mode, we proposed an export operations sequence based method for recognizing disruption and measuring interference. An export container slots optimization disruption management model was built with respect to the related disruption influence, where the slots offset objective is for reducing the inference, the reshuffles and gantry crane traveling distance objective for saving the cost of the operation recovering. A tabu-searching based disruption recovery algorithm was developed with the local searching characteristic of model solution, where the local searching spaces are improved with searching directions and ranges to accelerate its convergence. Experiment results show that the proposed method can achieve 10% improvement than the rescheduling.

Lastly, considered the problem of retrieving inbound containers in terminals, a three-phase heuristic method is proposed. The first phase generates an initial feasible movement sequence of containers. The second phase generates the virtual movement path and

establishes the set of movement path conflict, which make use of virtual reshuffles. A binary integer programming model is proposed in the third phase to gain feasible movement sequences of the virtual movement paths, and then an evolutionary algorithm is developed. Numerical experiments show this heuristic can improve more 20% than the heuristic OH.

Key Words: Container Terminal; Slots Optimization; Reshuffle; Disruption Management; Tabu-search algorithm

目 录

摘 要	I
Abstract	II
1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	1
1.2.1 理论意义	1
1.2.2 现实意义	2
1.3 国内外研究现状	2
1.3.1 进口箱箱位优选相关研究	3
1.3.2 出口箱箱位优选相关研究	4
1.3.3 干扰管理研究	5
1.4 研究内容	7
1.4.1 出口箱位优选	7
1.4.2 混堆模式堆场的出口箱位优选干扰管理	7
1.4.3 进口箱翻箱落位优选	7
1.5 论文结构	8
2 集装箱码头堆场翻箱问题分析	10
2.1 集装箱翻箱问题的分类	10
2.2 集装箱翻箱问题的原因分析	11
2.3 减少集装箱翻箱的解决思路	12
2.4 本章小结	14
3 基于预约和图表示的出口箱位优选模型与算法	15
3.1 基于图的交箱序列与箱位分配表示	15
3.2 压箱量与大车行驶距离期望的求解	18
3.2.1 压箱量期望求解	18
3.2.2 龙门吊大车行驶距离期望求解	19
3.3 基于图表示的出口箱堆存模型	19
3.3.1 主要假设	19
3.3.2 数学表达	19
3.4 基于图的禁忌搜索算法	22

3.5	实验分析	24
3.5.1	实验设计	24
3.5.2	模型和算法的性能对比分析	25
3.5.3	预约影响效果分析	27
3.5.4	模型应用的参数分析	28
3.6	本章小结	29
4	混堆模式堆场的出口箱位优选干扰管理模型及算法	30
4.1	问题描述	30
4.2	干扰识别与度量	32
4.3	出口箱位优选干扰管理模型	32
4.3.1	主要假设	32
4.3.2	干扰关联影响度量	32
4.3.3	模型符号及定义	33
4.3.4	干扰恢复模型	33
4.4	禁忌搜索算法	35
4.5	实验与分析	37
4.5.1	实验设计	37
4.5.2	算法性能分析	37
4.5.3	模型性能分析	38
4.5.4	干扰恢复启动参数	40
4.6	本章小结	41
5	基于虚拟路径的进口箱翻箱落位启发式算法	42
5.1	问题描述	42
5.2	翻箱落位三阶段启发式算法	42
5.2.1	初始化阶段	43
5.2.2	虚拟翻箱阶段	43
5.2.3	移箱路径组合优选阶段	45
5.3	实验分析	47
5.4	本章小结	49
结 论	50
参 考 文 献	52
攻读硕士学位期间发表学术论文情况	55

致 谢 56

大连理工大学学位论文版权使用授权书..... 57

1 绪论

1.1 研究背景

随着世界经济全球化,生产贸易和资源调配在全球范围内进行,港口作为一种重要的战略资源也得到了高度重视,港口的发展也成为推进区域经济快速发展的中坚力量,是国民经济发展的助推剂。目前,全球运输的 90% 货物方式是海运,其中绝大多数货物都采用集装箱运输的形式,国内 90% 以上的外贸货物依靠港口流通,而集装箱运输以其低成本、装载量大、低货损、高效率的优点成为最主要的运输方式。因为集装箱枢纽港在海运体系中特别的地位和作用,各个国家都把集装箱枢纽港的发展作为其经济增长的重点,在资金、政策等多方面给以支持。而随着集装箱运输的增长,港口间的竞争变得越发激烈,优势来源除了港口自身的地理位置和腹地经济之外,码头的生产技术、运营效益、服务和管理水平也是竞争力的主要来源。

码头堆场是集装箱水路运输与陆路运输的连接节点,是进口箱、出口箱进行交接和存放的场所,尽可能的提高堆场利用率,可以降低集装箱码头运营成本。近年来,由于我国日益完善的集装箱港口硬件设施,集装箱吞吐量快速增长,港口堆场的作业效率成为制约其发展的重要瓶颈。我国集装箱码头堆场的管理方式仍以粗放式和经验式为主,再加之船舶到港、集卡运输、天气变化等带来的不确定性因素,造成港口堆场作业中存在大量无效的翻箱操作。特别海港码头多是高密度堆场,翻箱率普遍较高,如宁波某码头 14.1%^[1]。并且随着我国堆场轨道式龙门吊的广泛采用,堆场堆高不断增加,翻箱率也将更高。所以,研究有效减小码头翻箱率的方法变得越发迫切。

1.2 研究意义

1.2.1 理论意义

(1) 本论文针对客户交箱预约的码头,提出了交箱次序与箱位分配的图表示法,基于图表示提出了压箱量和龙门吊大车行驶距离的期望的求解方法,提供了利用预约和图解决堆场箱位优选问题的新思路。在此基础上构建了基于图的集装箱码头出口箱位优选模型,考虑图表示特征开发了禁忌搜索算法,利用图表示特性缩小搜寻空间和优选搜寻方向,丰富了禁忌搜索的应用范围。

(2) 本论文针对集装箱混堆模式堆场出口收箱作业调度易受干扰问题, 首先提出了出口收箱序列的干扰识别与扰动度量方法; 然后建立了考虑关联扰动影响的出口箱位优选干扰管理模型, 不仅为解决混堆模型下箱位优选问题提供了新思路, 并且有助于丰富干扰管理理论, 具有重要的理论价值。

(3) 本论文针对集装箱港口进口提箱操作中的翻箱落位问题, 避开翻箱量估计的条件假设, 提出了基于虚拟路径的三阶段启发式算法, 为解决翻箱落位优选问题提供新思路。

1.2.2 现实意义

随着世界贸易的开放化与一体化, 各大码头的集装箱吞吐量的迅速增加, 堆场资源变得紧张, 翻箱问题是影响集装箱港口运营效率的重要因素。降低堆场翻箱率, 既可以节约码头运作成本, 又可以加快集卡周转、减少船舶在港时间, 提高客户服务满意度。所以, 本论文研究的集装箱堆场翻箱率问题具有实际意义和经济意义, 具体表现在下面三点:

(1) 减少堆场翻箱作业, 能够改善船舶服务水平

减少集装箱港口翻箱作业, 能够提高操作机械装备的利用率, 降低无效作业时间, 从而缩短船舶在港停靠时间, 提高船舶服务质量, 因为在港停靠时间的长短直接关系到船公司和货物周转率, 影响船公司的运营效益和货主的切身利益。

(2) 减少堆场翻箱作业, 可以提升码头的经济效益

对于月均装船 100000 标准箱的集装箱港口, 翻箱率每降低 0.02, 整年可降低运作成本为: $100000 \text{ 标准箱/月} \times 0.02 \times 12 \text{ 个月} \times 50 \text{ 元/标准箱} = 1200000 \text{ 元}$ (每次翻箱费用按小箱吊装费的 0.5 计算)。节约额外工作时间: $100000 \text{ 标准箱/月} \times 0.02 \times 12 \text{ 个月} \times 2.5 \text{ min/标准箱} = 1000 \text{ h}$ (每次翻箱耗时按 2.5min 计算)。

(3) 减少堆场翻箱作业, 有利于完善丰富整个港口的生产调度系统

集装箱码头运作调度是一个庞大的系统工程, 翻箱优化作为其中一个重要的方面, 能够为完善丰富整个调度系统提供支撑, 使集装箱码头朝具备现代化的信息系统发展, 进而提升核心竞争力, 获得良好的管理方式与更大的经济效益。

1.3 国内外研究现状

集装箱港口的翻箱作业主要有三类: 客户取箱时的翻箱 (进口集装箱), 装船取箱时的翻箱 (出口集装箱) 以及码头内部理箱时的翻箱 (翻箱原因较多, 特例性强, 本论文不考虑此类翻箱)。箱位优选是减少进出口集装箱翻箱操作的主要方法。

1.3.1 进口箱箱位优选相关研究

针对进口集装箱的箱位优选可分两个阶段：交箱阶段 I) 卸船时，优选卸箱堆存位置，避免客户后提箱压先提箱；提箱阶段 II) 客户提箱时，如果存在翻箱操作，优化翻箱落箱位置，避免二次和多次翻箱。相关的研究有：

交箱阶段 I)，Zhang^[2]和周鹏飞^[3]分别利用整数规划和启发式算法优化箱位分配，其研究的关键问题是基于提箱时间估计翻箱量，但由于客户提箱时间随机性较强（大部分提箱时间可覆盖整个免费提箱期），统计规律不明显，这些条件限制了该方法的实施效果。基于所有箱提箱概率相同的假设，Kim 等^[4]分析了多种组合条件下完成贝内提箱作业的翻箱量，并给出了近似公式，在此基础上，文献^[5]探讨了不同进场模式下最小化翻箱量的堆高。Rommert 等^[6]仿真分析了一个自动集装箱码头的箱位分配规则，通过优选分配规则来降低翻箱量，基于规则的分配较为简单，但精度较低。

提箱阶段 II)，文献^[7]假设客户提箱序列已知，以优选提箱时的翻箱落箱位，降低二次翻箱量为目标，提出了两种优化方法：①基于分支定界的算法，该算法精度较高，但计算复杂度较大，不适于动态求解；②基于后续翻箱量估计最小原则的启发式算法，该方法的关键是对后续翻箱量的估计，算法精度取决于预估精度，该文对翻箱量的预估是基于后续待提箱以相同概率翻箱和落位假设的，没有利用提箱序列和贝内箱分布信息。徐亚等^[8]在此基础上改进了改启发式算法。基于确定的提箱序列假设，Caserta 等^[9]提出了基于 CM(Corridor Method)的翻箱落位近似算法，该方法也适用于出口箱流。Lee^[10]提出了三阶段启发式取箱优化算法来降低翻箱操作和作业时间，该算法允许跨贝翻箱，而实际中多数码头不允许跨贝翻箱。周鹏飞等^[11]基于 Petri 网构建了集装箱堆场进口集装箱提箱过程的翻箱仿真模型，给出集装箱港口翻箱概率经验公式，并提出了考虑各种翻箱概率的进口箱翻箱落位优化的启发式算法。Zhao 等^[12]的仿真研究表明客户提箱序列信息能够有效减少二次翻箱率。此外，对大客户箱可采取按货主分组堆存策略减少翻箱率，虽然该方法非常有效，但需要与提箱客户达成不按箱号提箱的协议。文献^[7]也探讨了分组堆存策略下落箱位的分配问题，翻箱率得以明显降低。

分析上述研究我们发现：出口箱箱位优选问题决策的重要依据是提交箱的先后序列（或称提交箱时间规律），如：文献[2,3]中的提交箱时间估计，文献[4,5]中均等提箱概率假设以及文献[7-10]中提箱序列假设等，如果能在决策前获得并有效利用提交箱的序列信息，翻箱率能得到大幅度降低。但在阶段 I)，由于卸船时通常集装箱提箱时间未知且其统计规律较少，相关的研究应用受限，实际中常采用基于堆高的启发式优化规则，

其优化效果取决于启发式规则与码头的适用情况，精度难于控制；在阶段 II 现有研究大多基于对二次翻箱量的估计，翻箱量的估计条件假设相对于现实问题过于严苛，如文献[4,5]在翻箱量估计的求解中假设提箱过程中所有箱的翻箱概率相同，而现实中集装箱的翻箱概率因其所处箱位与提取次序的不同而有差异，基于此假设的算法精度也会受到影响。此外集装箱的分组管理策略能够有效降低进口箱的翻箱量，但该方法通常只适用于大客户，并且需要事前签约定合同。

1.3.2 出口箱箱位优选相关研究

针对出口集装箱的箱位分配可分两个阶段：交箱阶段 I），客户交箱时，优化交箱堆存具体箱位，降低先装船的集装箱放在堆栈上方的箱量（压箱量），同时要考虑减少堆场龙门吊大车移动距离；提箱阶段 II），装船时，如果存在翻箱操作，优化翻箱落位，减少二次或多次翻箱量。相关的研究有：

交箱阶段 I），Zhang^[2]假设确定的交箱序列，利用数学规划方法优化了交箱箱位。文献^[3]提出了交箱箱位分配的启发式算法，算法精度受启发式规则的限制。Kim 等^[13]依据到港集装箱箱重分布概率假设，建立了动态规划模型，并利用最优解集构建了优化交箱箱位分配的决策树，保证轻箱压重箱的期望值最小化，Zhang^[14]修正了该文中的公式错误。类似地，Kang 等^[15]运用模拟退火算法和仿真技术相结合方法研究了到港集装箱重量信息随机条件下的出口箱位优选问题。上述两种方法都是基于确定的到港箱重分布概率假设，交箱序列随机生成。杨淑芹等^[16]考虑箱重属性，构建了单贝位内压箱量最小的集装箱堆存位置优选模型。类似地，陈庆伟等^[17]考虑目的港、箱重量和作业难度，设计启发式算法为进场箱优选箱位，减少装船作业时翻箱量。谢尘等^[18]以重压轻箱数最少为目标，建立了基于整数规划的箱位优选模型，并设计了分布式进化算法和启发式算法相结合的混合求解算法。张艳伟等^[19]对集装箱箱位分配策略进行了分析，提出了基于不同装船优先级的箱位分配决策模型框架。沈剑峰^[20]提出了基于知识模板箱位的分配方法，降低了压箱量，但未考虑堆场龙门吊影响，易造成龙门吊大车移动过于频繁，作业成本大幅增加，降低整体作业效率，成本较高。文献^[21,22]不考虑后续进场箱的影响利用局部搜索的方法来为当前箱优选箱位。Kozan 等^[23]提出了集装箱预翻问题的进化算法和禁忌搜索算法，该问题相当于进场集装箱同时到达港口的箱位分配问题。

提箱阶段 II），该阶段可结合装船取箱序列优化来研究，如：文献[24]设计了遗传算法来优化装船取箱和翻箱落箱位，该研究在计算翻箱量时只考虑了落位堆栈增加的翻箱量，未考虑后续可能对其他堆栈的影响。张维英等^[25]提出了基于 Kruskal 最小生成树的启发式取箱作业优化算法，来降低二次翻箱，但精度受启发式规则的局限。

分析上述研究我们发现：类似进口箱，出口箱箱位优选问题的关键本质上也是提交箱先后序列（时间规律），如：文献[14-19]中的轻重箱先后装船次序假设和交箱箱重分布假设，以及文献[25]中的装船序列等，如果缺乏或不完整其优化精度受限；遗憾的是进口箱流的提交箱序列同样难于确定，特别是阶段 I) 的客户交箱序列，且宜受到多种因素的干扰；阶段 II) 通常需结合装船取箱作业优化进行，否则受装船取箱和设备调度等问题的制约，优化空间较小。

上述分析表明：1) 进口箱提箱阶段的翻箱落位优选和出口箱交箱阶段箱位优选是减少堆场翻箱作业的主要途径，也是提高堆场龙门吊有效作业的重要手段，同时合理的出口箱位优选方案也可作为船舶配置和装船计划奠定良好的基础^[18]；2) 客户提交箱序列（提交箱时间规律）是其求解的重要依据，也是其精度提高的关键。但实际问题中的提交箱序列在决策前很难确定其保持不变，特别是内陆客户的提交箱序列。

1.3.3 干扰管理研究

随着 EDI、物联网等技术的发展及其在集装箱运输中的应用，许多集装箱港口逐步建立了提交箱预约机制。利用提交箱预约以及物联网对车、箱的监控信息，码头可以获得客户较为完备的提交箱序列信息。但这些提交箱序列会受客户自身、运输车队、交通状况等等不确定因素干扰，经常发生改变，使初始决策方案失效，甚至变得不可行。针对这种情况如果采取重调度的方法，方案改变较大不利于方案的执行，并且通常精度较高的重调度算法时间成本较大，不利于动态求解。因此，如何利用当前可获知的有关提交箱序列信息制定有效地箱位优选方案，并在干扰事件发生时利用较小成本（包括计算成本和目标成本）恢复方案，保持方案的有效性，是求解该问题的有效途径。这也是干扰管理求解问题的思路。

干扰管理是当前国际学术界前沿性研究方向，最早的干扰管理思想是 2001 年由 Clausen 等^[26]提出，Yu^[27-29]等将其成功应用于航空领域，此后对于干扰管理的研究取得了长足的发展，其核心思想是针对频繁发生的干扰事件，通过建立干扰管理模型和求解算法，以较小成本应对干扰事件，生成恢复方案。胡祥培教授较早地开展了干扰管理的研究，并对其研究现状进行了较为全面的述评^[30,31]。

干扰管理模型研究。构建干扰管理模型是求解干扰问题的基础，目前研究主要包括网络模型和数学模型两大领域：1) 在图模型研究方面，Yu 等^[27]提出了扩展的时空网络图模型来描述网络中各构成要素之间关系的网络流模型，并将其用于航空气调度，得到很好的实际效果。Li 等^[32]利用 pert 网建立的不确定性项目网络风险调度的预测模型，提

高了风险调度预测的精确性。Ehrhoff 等^[33]利用博弈树搜索思想和运筹学的优化方法提出了干扰恢复博弈树模型,利用干扰管理来增强原始调度计划安排的鲁棒性。2)在构建数学模型研究方面,由于数学模型可以针对不同情况,解决干扰管理中变幻无穷的问题,所以目前对干扰管理问题的建模大多采用数学模型的方式,比如:文献^[26]在最短路问题中的研究,王旭平等^[34]基于干扰管理思想建立的服务车辆路径问题扰动模型等,这些模型目标函数通常都考虑原方案的扰动最小。考虑到堆场箱位优选问题定量关系较为清晰,本论文将采用构建干扰管理数学模型的方法开展研究。

干扰管理算法研究。求解干扰管理问题的算法有精确求解算法、启发式求解算法和拍卖式求解算法。精确求解算法适合于小规模、结构较清晰的干扰管理问题,如:分支定界法、改进的分支定界法、动态规划算法等。尽管精确算法可以求解干扰管理模型,但是由于其耗时较长,当问题规模不断变大时,精确算法几乎不能在有限的时间内得到问题的满意解,不能满足干扰管理实时性求解的特点,所以很多学者提倡运用启发式算法求解干扰管理模型,主要有拉格朗日算法、小规模问题的 Dantzig-Wolfe 求解算法、大规模问题的禁忌搜索算法、局部搜索算法、优先选择的迭代搜索算法等。为了避免局部搜索算法偏离全局目标的问题,部分研究者考虑综合运用几种算法的优势来设计算法,如文献等^[35]将 ILS 算法与 VNS 算法结合提出了 SALS(Steepest Ascent Local Search)算法,算法能够利用 ILS 算法(快速得到近似解)与 VNS 算法(解搜索改进效率高)的优势,大大提高了干扰管理模型求解。拍卖式算法由 Bertsekas 在 1979 年提出,王京元等^[36]将其应用在运输问题中,Li 等^[37]考虑可能存在的可行网络图,改进“双向结合式”的拍卖启发式算法,提出并行的连续型拍卖启发式算法,用于求解公交车运营的干扰管理问题上。考虑到问题特点和求解要求本论文研究将重点采用启发式求解算法。

在码头生产调度领域,曾庆成等^[38]、杨春霞等^[39]和林庆福等^[40]针对泊位和岸桥调度问题分别构建了干扰管理模型并设计了有针对性的求解算法,实验显示了良好的调度效果。但目前在集装箱码头出口交箱、进口提箱作业范畴,相关研究未见报道,因为出口交箱和进口提箱中经常会出现非确定的干扰事件,如交通堵塞、天气变化等导致客户不能按时到达港口体交集装箱,这些事件会影响港口作业的正常运行,降低港口运作效率和服务水平,干扰管理思想未得到充分利用。

1.4 研究内容

1.4.1 出口箱位优选

从第三节的分析中可以看出,客户预约提交箱信息有助于改进出口箱位优选效果^[12],但即使建立预约机制的港口也难于获取准确的交箱时间(实际交箱时间受交通状况等多种因素影响具有不确定性),现有箱位优选确定性模型应用条件苛刻,实际问题难于满足,目前未见有考虑客户预约信息进行箱位优选的有效研究报道。本文将针对客户交箱预约机制的码头,提出基于图的出口交箱阶段堆场箱位优选模型和禁忌搜索算法。主要创新点:1)基于客户交箱预约信息构建了出口箱位优选期望值模型,利用客户交箱预约时段、箱重等信息改进了箱位优选性能,考虑客户交箱时间的不确定性提出了基于期望值的处理方法;2)基于图表示的箱位优选模型和禁忌搜索算法,提出基于图的交箱次序与箱位分配表示方法,在对箱位分配图表示分析的基础上构建了箱位优选模型,并开发了禁忌搜索算法,利用 Add_i^k 等图变量来优化算法搜索邻域并控制搜索方向。

1.4.2 混堆模式堆场的出口箱位优选干扰管理

实际中箱位优选的重要依据是堆取箱作业任务计划,而堆取箱作业任务取决于客户提交箱时间和箱量,其任务计划易发生扰动和偏差,造成机械等待和作业延迟等,因此箱位优选需有针对性地建立干扰响应与处理机制以减少干扰的不利影响。本论文将针对混堆模式的集装箱堆场出口箱位优选问题,基于干扰管理思想响应堆取箱任务计划偏差的干扰事件,构建干扰管理模型,优化干扰事件发生后的箱位分配恢复方案,减少堆场作业方案执行成本以及干扰影响。主要创新:1)考虑混堆模式下不确定事件的作业干扰影响,提出干扰识别与度量方法,并构建了基于箱位偏离的出口箱位优选干扰管理模型;2)针对干扰恢复求解实时性和局部性特点开发了基于局部加速的禁忌搜索算法。

1.4.3 进口箱翻箱落位优选

从第三节的分析中可以看出,翻箱落箱位置优化问题的研究大多基于对二次翻箱量的估计,翻箱量的估计条件假设相对于实际问题过于苛刻,基于此假设的算法精度受限。本论文避开翻箱量估计的条件假设,直接对移箱路径进行分析,在此基础上开发了基于虚拟路径的三阶段启发式算法来优化翻箱的落箱位置。主要创新体现在:利用虚拟箱及虚拟翻箱构建阻碍箱的虚拟移箱路径集合,进而利用虚拟移箱路径的组合优选模型和算法,来减少二次翻箱量。

1.5 论文结构

论文主要分为摘要、正文和参考文献 3 个部分。其中，正文又分为绪论、集装箱港口翻箱问题分析、基于预约和图表示的出口箱位优选模型与算法、混堆模式堆场的出口箱位优选干扰管理模型及算法、基于虚拟路径的进口箱翻箱落位启发式算法、结论与展望 6 部分内容。

第 1 章 论述了本文的研究背景和意义，总结归纳了国内外相关问题的研究现状，并进行了简单的分析，说明了其中存在的不足和本论文所要解决的问题，最后给出了本论文的结构。

第 2 章 对集装箱港口的翻箱问题进行分类，分析各类翻箱产生的原因，并给出了对应问题的解决思路。

第 3 章 针对预约交箱机制下集装箱堆场箱位优选问题，提出了交箱次序与箱位分配的图表示法，基于图表示提出了压箱量和龙门吊大车行驶距离的期望的求解方法，在此基础上构建了基于图的集装箱堆场出口箱位优选模型，优化堆场龙门吊行车成本和压箱量。考虑图表示模型特点开发了禁忌搜索算法，利用图表示特性缩小搜索空间和优选搜索方向，提高了收敛速度。

第 4 章 针对集装箱混堆模式堆场出口收箱作业调度易受干扰问题，首先提出了出口收箱序列的干扰识别与扰动度量方法；然后建立了考虑关联扰动影响的出口箱位优选干扰管理模型，利用箱位偏离目标优化干扰影响，利用压箱量和龙门吊行驶距离目标优化收箱作业成本；考虑干扰恢复求解的不均衡性特点，设计了基于局部加速的禁忌搜索算法，利用局部搜索邻域控制搜索方向和范围，提高收敛效率。

第 5 章 针对集装箱码头进口提箱过程中的翻箱落位问题，提出了基于虚拟路径的三阶段启发式算法，首先利用启发式规则生成翻箱落位初始可行方案，然后利用阻碍箱的虚拟翻箱构建虚拟移箱路径，构建移箱路径冲突集合，在此基础上建立虚拟移箱路径的组合优化 0-1 规划模型，并开发了进化求解算法。

第 6 章 总结论文的主要结论，阐明本文研究对集装箱港口运作管理的实际价值，并提出了以后的研究方向。

论文结构图如图 1.1 所示。

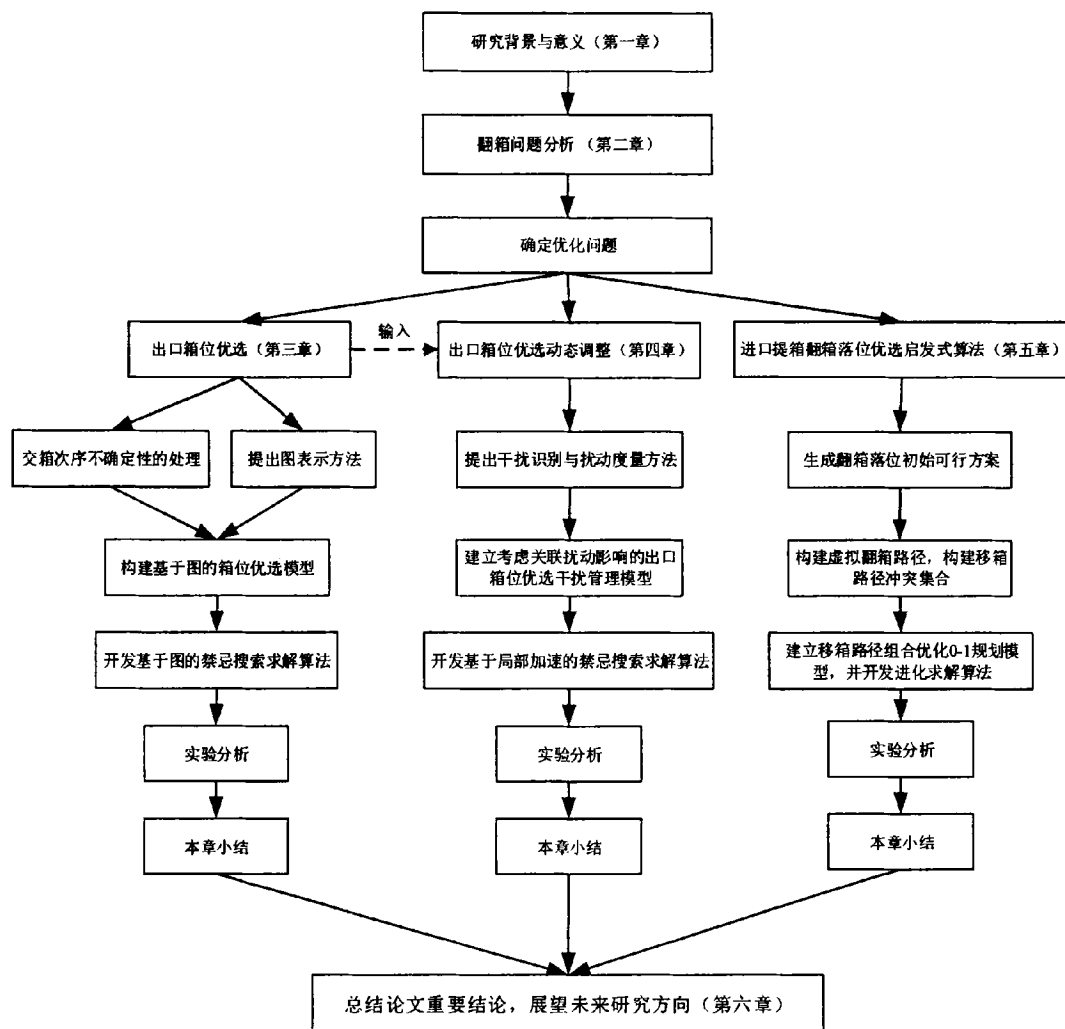


图 1.1 论文结构图

Fig.1.1 The structure of the essay

2 集装箱码头堆场翻箱问题分析

集装箱堆场是海运过程中交接箱的缓冲区，也是港口生产组织与协调的关键部分。现代码头间的竞争就是运营效率的竞争，所以必须提高集装箱港口的装卸效率。码头翻箱问题是影响堆场装卸效率的一个重要原因。图 2.1 是我国典型的集装箱堆场布置示意图，采用的龙门吊多层堆码作业工艺具有存放密度高和运营费用低等优点，但由于装卸机械的操作限制，以及集装箱堆栈的物理约束，每次只能提取每个堆栈最顶层的箱子，然而实际作业中，集装箱的堆存状态常与提取顺序不一致，必然会产生相当数量的“翻箱”。所谓“翻箱”是指因为较晚提取的集装箱位于较早提取的集装箱上方，而必须将较晚提取的集装箱翻倒至其他空箱位的操作。

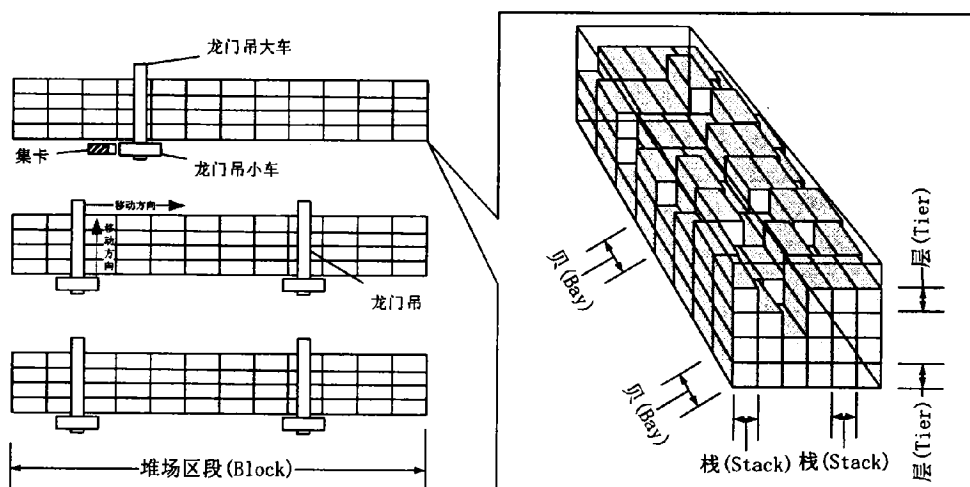


图 2.1 集装箱堆场堆存示意图

Fig.2.1 Representation of container yard storage

2.1 集装箱翻箱问题的分类

翻箱主要分为 3 种类型：装船时翻箱、提箱时翻箱及移箱时翻箱^[41,42]。其中移箱时的翻箱是由海关监督引起的，在集装箱出港之前，海关人员会对箱子内的货物进行随意检查，若待核验的集装箱上放存在其他箱子，于是需要翻箱。这种原因产生的翻箱操作无法控制，不在码头计划之内，所占翻箱比重不高，虽对堆场作业有一定的影响，但并不是主要的翻箱类型，故此类翻箱不在本文研究范围内。

装船翻箱是指进行装船操作时，集装箱装船次序与堆场堆存状态不相符造成的后装船箱压先装船箱而产生的翻箱，不在事先对堆放的集装箱进行预翻箱操作。装船作业开始后，若需提取的集装箱上方存有还未提走的集装箱，这就产生了压箱，为了提取目标箱，需要将上面的箱子翻倒至其它栈中，因此产生了翻箱。装船翻箱一般是因为出口箱进场箱位分配不合理或配载要求改变等，装船时翻箱直接影响码头服务效率，提高作业成本。为减少装船时的翻箱，加快装载速率，部分港口经常会在装船前执行预翻箱操作计划。优化装船前预翻箱操作计划尽管可以有效降低装船时的翻箱量，有助于提升船舶装载速度，但并不是所有港口都有足够的经费、空间及设备对每一条船舶进行预翻箱操作。

提箱翻箱是指客户进港提取进口箱时，客户提箱次序与堆场堆存状态不一致导致的后提箱压先提箱而产生的翻箱，若需要提取下面的箱子，就必须先把上面的箱子翻倒至其它堆栈中，这就产生了提箱翻箱操作。这种翻箱会降低港口作业效率，增加港口运营费用。

2.2 集装箱翻箱问题的原因分析

造成堆场翻箱的原因涉及海运过程中的各个环节，归纳起来，主要包括以下几个方面：

1、码头堆场方面

1) 为增加堆场利用率，将不同卸货港、重量、离港日期的箱子混堆而产生翻箱。

2) 客户在提箱或船舶配载中，由于码头计划人员没有周全细致的安排集装箱的堆存次序，在作业调度过程中出现脱节，造成翻箱操作。

3) 出口箱集箱过程中，堆场工作人员不能详尽、周全、合理的分配箱位，编写的集装箱堆存计划没能适用于船舶配载、客户提箱作业以及货物存放特点等要求，造成集装箱翻箱。

4) 在翻箱过程中，由于落箱栈选择不合理导致的二次翻箱，甚至三次翻箱。

2、船公司及代理方面

1) 船公司仓位分配不合理，使船的装载能力与订单量发生冲突，而临时甩箱或加箱，产生翻箱。

2) 船公司依据市场变化调整班轮类型与数量，若船公司没有及时了解堆场箱位安排而产生翻箱。

3) 集装箱提箱时,各涉及方由于虚假订舱、运输条件、费用矛盾或进口手续等问题相互推诿而产生翻箱。

4) 由于货物运输、班轮到港等诸多不确定因素,货代不能及时把握班轮和班期,因而无法准确控制集装箱集疏港的时间,造成不同种类箱子混堆而产生翻箱。

5) 中转船装船信息滞后造成的翻箱。

3、其他方面

其他方面主要是指动植物检查、海关等相关部门进行随机检查和海运过程中的一些突发状况造成的翻箱。

1) 动植物检验检疫,海关、商检等各相关部门对集装箱进行抽检时产生的翻箱操作,这种情况是不能控制的。

2) 由于应该对集装箱进行检查的相关部门没有协调好检查顺序,造成一个集装箱被多次检查而产生翻箱,这种情况是可以避免的。

3) 一些特殊箱(危险箱、冷藏箱等)必须存放在特定位置,如果箱位被占用会产生翻箱操作。

从集装箱翻箱原因可以看出,其中一些原因是堆场管理者不能控制的,如动植物检查检疫、特殊箱造成的翻箱是不可控制的。另有一些翻箱是由于船公司及船代与港口之间信息不畅通,工作人员在制定堆存计划、调度装卸机械时考虑不周造成的,这类翻箱作业是不合理的,是可以避免的。

2.3 减少集装箱翻箱的解决思路

从上文的分析中可以看出,造成装船翻箱和提箱翻箱的根本原因都是堆场堆存状态与提取次序不一致。造成两者不一致的原因大多是港口相关部门与船公司或船代的沟通协商不顺畅,不能及时共享集装箱信息,进行箱位安排;没能充分利用集装箱的信息,使制定的堆场计划不够周全和详细而导致翻箱。为从根本上减少翻箱,必须要获取准确的集装箱信息,凡是影响进出口集装箱提取顺序的相关信息应通过加强码头、客户、货代和船公司之间的沟通来获取。在集装箱进港前,及时获取相关信息,以此安排进行堆场作业计划,必定在高堆场利用率的情况下有效减少集装箱翻箱。

减少翻箱的关键是集装箱信息的获取,因此我们必须充分借助信息手段和全体员工对码头的作业流程进行优化,可以从以下几个方面着手:

1) 全员参与。堆场作业涉及环节较多,在对流程个别节点进行改造时,在码头内部合理调配各部门间的作业任务,在码头外部与船公司,拖车司机进行充分的沟通合作,让全体成员都参与到优化流程中,以达到优化整个作业环节的目的。

2) 客观科学的调度。箱位安排时,不再只靠调度员的经验来作决策。我们应充分利用集装箱的信息,设计科学合理的规则来安排箱位。只有在信息无法获取或不详这种万不得已的情况下才通过调度员的经验调配。

3) 交提箱预约的实施。客户通过预约平台向码头告知集装箱预期到港(离港)日期、航次、目的港、箱重等信息。码头可通过这些完善的信息提前做好周详的堆场计划,提前分配好堆场区域,为将要到达堆场的集装箱合理安排箱位,有效平衡堆场工作量、降低翻箱。

4) 及时的信息处理。作业流程每个环节的运行均会产生一些具体信息,负责该环节的工作人员必须在信息生成时立刻对其进行处理,并通过内信息管理系统对信息进行船舶与共享。这种做法既能避免其他环节工作人员重复处理信息时产生的差错,又能大大减少重复操作而增加的工作量。流程优化的关键前提是信息的准确性,因此,一旦与集装箱的相关信息出现了变更,就应及时进行处理,并通知相关的各个环节。

具体来讲,减少出口集装箱装船时的翻箱量的优化可分以下四个阶段:

- 1-1) 进场交箱时,为集装箱优选堆存箱位,尽量保证先装船箱放在堆栈上面;
- 1-2) 制定装船计划时,优化装船序列,减少下方箱早于上方箱装船的数量;
- 1-3) 装船计划确定后,一些码头会进行预倒箱作业,缩短装船时间;
- 1-4) 装船时,如果存在翻箱,通过优选落箱位置,减少二次或多次翻箱。

阶段 1-1) 充分利用客户交箱信息,合理分配箱位,不仅可以大大降低整个出口箱的翻箱量,而且可为装船设备调度和船舶配载奠定良好的基础;在阶段 1-2)、1-3)、1-4) 中的翻箱优化通常是基于装船序列的,一般采用基于规则的启发式算法来实现,优化空间小。

降低进口集装箱提箱时的翻箱量的优化可分为以下两个阶段:

- 2-1) 卸船时,优化分配卸箱堆存位置,避免客户后提箱压先提箱;
- 2-2) 客户提箱时,如果存在翻箱,优化翻箱落位置,避免二次或多次翻箱。

阶段 2-1), 由于卸船时通常集装箱提箱时间未知且其统计规律较少,相关的研究应用受限,实际中常采用基于堆高的启发式优化规则,其优化效果取决于启发式规则与

码头适用情况，进度难于控制；阶段 2-2）的多数研究基于对二次翻箱量的估计，但由于客户提箱随机性比较强，统计规律不明显，基于此估计的算法精度也会受到影响。

2.4 本章小结

翻箱率是影响港口运营的重要因素，能否有效减少翻箱量，直接决定了港口的运营效率、成本和利润。本章主要介绍了集装箱堆场翻箱问题的分类，对翻箱的形成原因进行了简单分析，提出了解决翻箱问题的思路。思路中提到的预约平台的实施是提前获取集装箱属性信息的有效手段，后面章节正式基于这一前提，针对阶段 1-1）和阶段 2-2）开展了集装箱港口翻箱问题的研究。

3 基于预约和图表示的出口箱位优选模型与算法

集装箱码头收箱（即客户交箱）阶段的出口箱位优选不仅影响堆场龙门吊堆取箱作业和外集卡排队，而且影响装船时的堆场翻箱，进而影响船舶装卸效率，是集装箱堆场作业优化的重要问题之一。堆场出口箱位优选需要考虑堆场以及客户交箱等信息条件。近年来，随着信息技术的发展及其在集装箱运输中的应用，国内外一些码头已逐步建立了客户提交箱预约系统，如洛杉矶港、温哥华港、天津港、大连港等^[43]。码头提交箱预约便于客户交箱信息收集，有利于堆场箱位优选和作业组织^[44]。如果能有效利用客户提交箱信息可改进箱位优化效果，大大降低翻箱等运作成本，提高堆场作业效率^[45]。

3.1 基于图的交箱序列与箱位分配表示

基于预约机制的码头出口箱收箱基本过程：客户根据船期及码头收箱要求，提前向码头预约交箱，预约时提供信息通常包括交箱时间、箱型、尺寸、目的港、箱主和预期箱重等；堆场调度人员根据交箱预约时间(次序)等条件制定箱位分配计划；客户交箱时，集卡根据指定路线到指派箱位卸箱，堆场龙门吊完成卸箱和堆垛作业，集卡离港。出口箱位优选是箱位分配计划的核心内容之一，主要考虑堆垛时龙门吊大车行驶成本与装船时的翻箱量等问题，通常堆场内的箱位优选可分解为两个耦合关联问题：贝位优选和栈位优选，前者主要优化完成收箱作业龙门吊作业成本（可用龙门吊大车行驶距离表示），后者主要优化根据长途重箱优先装船原则的后装船箱压先装船箱的总量。

基于集卡交箱预约可获得交箱次序、箱重及目的港等信息。装船时为了减少船舶中途翻箱通常船方要求目的港较远的集装箱先装，为了保持船舶稳定（较低的重心高度）要求较重的集装箱先装，且前者优先于后者。因此引入装船优先级变量(c)来表示装船优先级别，即： $c = d \times w_{\max} + w$ ，其中 w 为箱重等级， d 表示目的港远近次序， w_{\max} 为最大重量等级，优先级越大越优先装船。本文受文献[46]利用箱重与集装箱到港顺利构建二维坐标系的启发，提出了基于交箱次序和装船优先级三维坐标的箱位分配的图表示方法，并分析图和变量特征，用于后续模型构建和算法搜索控制，如图 3.1。图中 x 轴表示集装箱到港次序， y 轴表示集装箱装船优先级， z 轴表示堆场贝位编号，；图中实点表示集装箱， x - y 平面中折线表示堆栈（集装箱堆垛），用 S_i 表示箱 i 同折线(栈)的箱集合(包含箱 i)；折线上[]内的数字表示堆栈所在贝位编号，用 b_i 表示栈内箱 i 所分配的贝位； x - z 平面中虚线表示堆垛箱过程中龙门吊大车在贝位间的移动，称作“移动虚线”，

虚线水平时表示相邻的堆垛作业间无需大车移动，否则大车需要在相应贝位间移动。在交箱次序与箱位分配图中，栈位优选与贝位优选可分别转化为 x - y 平面中节点连线选择和折线标号选择，箱位优选指标压箱量和龙门吊大车行驶距离可分别表示为 x - y 平面中斜率为负的折线段总数和 x - z 平面中移动虚线连接的贝位距离总和。

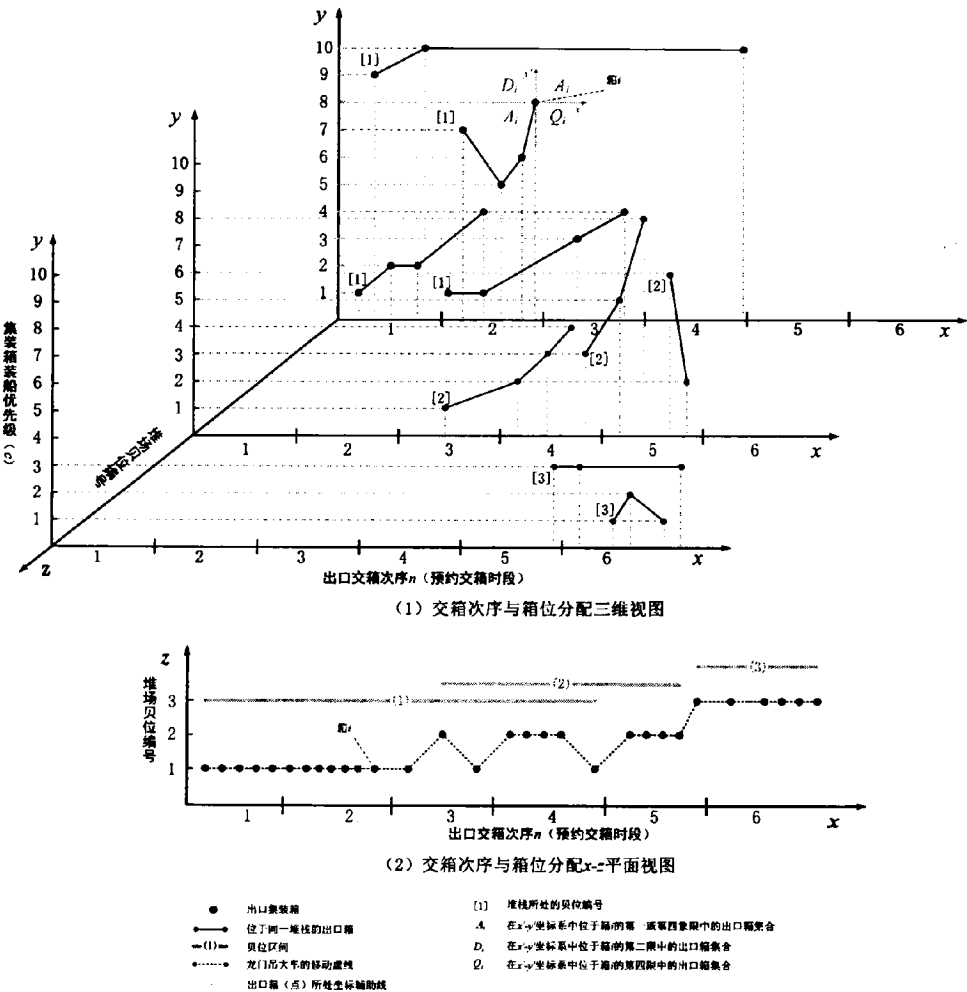


图 3.1 交箱次序与箱位分配图表示

Fig.3.1 Graph of container delivery sequence and slot allocation

x - y 平面中节点连线(栈)选择时，非负斜率的连线不产生压箱，同时斜率较小的堆存方案压箱量鲁棒性较好，如：箱 $i(n,c)$ 和 $j(n',c')$ 间连线(同栈)，若 $dx_i = n'_i - n_j \geq 0$ 和

$dy_i = c'_i - c_j \geq 0$, 不存在压箱, 当 dx 较大时交箱次序波动引发压箱的概率较小, 即箱 i 推迟到港或箱 j 提前到港而不影响与箱 i, j 交箱次序的时间范围广, dy 较小时折线不产生压箱的连线可选集较大, 即箱 j 上堆放无需翻倒箱的装船优先级范围大, 可用 $\sum_{i=1}^N r_i$ 来衡量堆存方案的鲁棒性, 其中 $r_i = dy_i/dx_i$ 。折线标号(贝)选择时, 考虑较近的堆栈折线选择同贝或邻近贝有助于减少龙门吊大车移动, 可控制邻近堆栈折线的标号(贝)选择范围, 排除过大的龙门吊大车移动集, 用折线标号(贝) b 的堆栈折线范围 $[Sc_b^-, Sc_b^+]$ 表示, 简称贝区间, 如图 3.1 x-z 平面中上方的水平范围线。

用符号表示图 3.1 x-y 坐标系中位于箱 i 右上(A_i^1)和左下(A_i^2), 左上(D_i)和右下方(Q_i)的集装箱集合, $A_i = A_i^1 \cup A_i^2$ 。显然, 若存在箱 i 的同堆栈箱位于其左下方, 即 $S_{t_i} \cap D_i \neq \emptyset$, 则箱 i 需翻倒, 本文称需翻倒箱为压箱, 不需翻倒箱为非压箱。令集合 $V_i = \bigcup_{j \in S_{t_i}} Q_j$, 则集合 V_i 内的箱连线到箱 i 所在折线(即分配箱到 i 箱所在栈), 分配箱将阻碍堆栈原有箱提取而成为压箱, 但不会影响堆栈原有箱的压箱或非压箱属性。令集合 $W_i = \Omega$ (全集), 若箱 i 为压箱: $= A_i \cup Q_i$, 否则: 则集合 W_i 内的箱连线到箱 i 所在折线(即分配箱到 i 箱所在栈), 分配箱不改变箱 i 的压箱或非压箱属性; 其补集 \bar{W}_i 内的箱连线到箱 i 所在折线(即分配箱到 i 箱所在栈), 分配箱将使箱 i 由非压箱变为压箱。定义箱集合 Add_i^k , 表示将集合内的箱连线到箱 i 所在折线(栈), 折线(栈)增加压箱量等于 k 的箱集合, 则:

$$\begin{aligned} Add_i^0 &= \bar{V}_i \cap_{j \in S_{t_i}} W_j \\ Add_i^1 &= V_i \bigcup_{j \in S_{t_i}} [\bar{W}_j \cap_{l \in S_{t_i} \setminus \{j\}} W_l] \\ Add_i^k &= \bigcup_{\substack{S \subseteq S_{t_i} \\ \text{且 } S \text{ 有 } k \text{ 个元素}}} \left\{ \left(\bigcap_{j \in S} \bar{W}_j \right) \cap_{j \in S_{t_i} \setminus S} W_j \right\}, \quad k \geq 2 \end{aligned}$$

图 3.2 给出了一个示例堆栈与其 Add_i^k 在图 1 x-y 坐标中的区域分布, 图中 i, j 和 z 表示已连线的堆栈箱, 数字表示该区域内的箱分配到堆栈内增加的压箱量(k)。图中若连接 p 箱到堆栈折线, 因为 p 箱早于 i 箱到达, 所以将堆存在 i 箱下方, 又因为 p 箱装船优先级低于 i 箱, 所以该区域箱分配到堆栈增加的压箱量为 0; 若连接 q 箱到堆栈折线, 因为 q 箱早于原有三箱的到达, 所以将堆存在最下方, 又因为 q 箱装船优先级高于所有箱, 因此新堆栈的压箱量为 3, 而原堆栈的压箱量为 1 (箱 j 压箱 z), 所以该区域箱分配到堆栈增加的压箱量为 2。

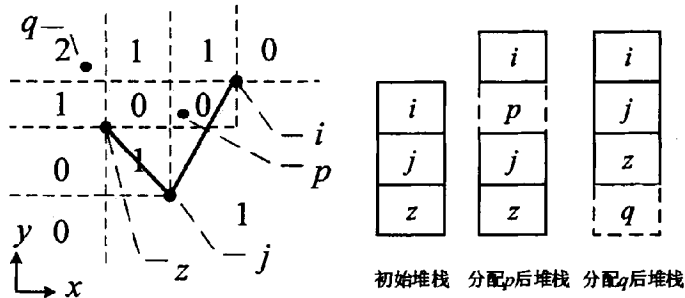


图 3.2 示例栈结构与压箱量增加图分布

Fig.3.2 Illustration of stack structure and reshuffle distribution

3.2 压箱量与大桥行驶距离期望的求解

上述分析表明交箱次序决定着压箱量与龙门吊大桥行驶距离, 客户预约交箱时间通常为时间段, 不同时间段的交箱次序可根据时段先后确定, 同预约时段内的交箱次序具有不确定性, 受交通状况、天气变化等多因素的影响。由于码头通常要求客户在预约时段内完成交箱, 如果不能完成需要提前取消预约, 因此这里假定客户实际交箱时间在预约时段内, 但不具有不确定性。这里交箱的先后次序是我们关心的, 而同预约时段内交箱在没有显著信息支撑条件下可近似假设服从同概率分布。

3.2.1 压箱量期望求解

不同预约时段箱的压箱关系可通过装船优先级和时段先后计算, 考虑同预约时段箱的实际到港先后次序的不确定性, 其压箱可通过数学期望表示。则压箱量期望可由堆栈内各箱的压箱期望求和解得, 求解公式表示为:

$$\sum_{i=1}^N (R_i + E_i) \quad (3.1)$$

其中: N 为总箱数; R_i 表示箱 i 不同预约时段箱的压箱量, $=1$, 若 $St_i \cap D_i \neq \emptyset$, $=0$, 否则; E_i 表示箱 i 同预约时段箱的压箱量期望, $=0$, 若 $R_i=1$, $=num_i/(num_i+1)$, 否则; 其中 num_i 为箱 i 同预约时段, 装船优先级大于箱 i 且分配到同栈的箱数, 即集合 $Te_i \cap St_i \cap (D_i \cup A_i^1)$ 的元素个数, Te_i 表示箱 i 所在预约时段的箱集合。其推导如下: 因为 num_i+1 个同预约时段箱中, 每个箱最先进场的概率均为 $1/(num_i+1)$, 箱 i 不是最先进场时将压其他箱, 有 num_i 个优先级高于箱 i 的集装箱, 所以其压箱期望为 $num_i/(num_i+1)$ 。

3.2.2 龙门吊大车行驶距离期望求解

考虑交箱次序的不确定性，龙门吊大车行驶距离期望求解公式表示为：

$$LE_m = \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{i'=1 \\ i' \neq i}}^N |b_i - b_{i'}| \times p_{i,i'}^{m-1,m} \quad (3.2)$$

式中 LE_m 为龙门吊大车第 m 次移动的距离期望； b_i 和 $b_{i'}$ 为箱 i 和 i' 分配的贝位； $p_{i,i'}^{k-1,k}$ 为箱 i 第 $k-1$ 个交箱，箱 i' 第 k 个交箱的联合概率。若交箱时刻在预约时段内概率分布相同，则：

$$p_{i,i'}^{k-1,k} = \begin{cases} 1/\Delta_i \times \Delta_{i'} & i' \notin Te_i, zt_i + 1 < k \leq zt_i + \Delta_i + 1 \text{ and } zt_{i'} < k \leq zt_{i'} + \Delta_{i'} \\ 1/\Delta_i (\Delta_i - 1) & i' \in Te_i, zt_i + 1 < k \leq zt_i + \Delta_i \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (3.3)$$

其中 zt_i 和 Δ_i 分别表示箱 i 所在预约时段前总箱量和时段内总箱量。如：1、2、3 和 4 号箱预约交箱时段为 1；5 和 6 号箱预约交箱时段为 2；7、8 和 9 号箱预约交箱时段为 3，则 $p_{2,4}^{1,2} = 1/(4-1) \times 1/4 = 1/12$ ， $p_{3,5}^{4,5} = 1/4 \times 1/2 = 1/8$ 。

3.3 基于图表示的出口箱堆存模型

3.3.1 主要假设

- 1) 根据集装箱交箱预约信息，可获得交箱时段、箱重、目的港等信息；
- 2) 交箱时间在交箱预约时段内服从相同概率分布；
- 3) 待分配箱型相同且属同一船舶，不同箱型箱可分开求解；
- 3) 装船优先级根据长途重箱先装原则确定，其计算详见第 2 部分。

3.3.2 数学表达

主要符号及变量说明：

N ：计划周期内进场箱总数

B, S, T ：分别为堆场段内贝位数，贝内堆栈数和额定栈高

b_0 ：龙门吊初始位置

F_k ：贝 k 的额定容量

M ：一个足够大的正数

$D_i, A_i^1, Te_i, p_{i,i'}^{m-1,m}$ ：见第 2、3 部分

x_{ij} (决策变量): =1, 若箱 $i \in St_j$; =0, 否则

y_i^k (决策变量): =1, 若箱 i 所分配贝位 b_i 为 k ; =0, 否则

h_i^m (中间变量): =1, 若箱 i 所在堆栈有 m 个箱; =0, 否则, $m \in \{1, 2, \dots, T\}$

R_i, E_i, num_i (中间变量): 见第 3 部分

目标函数:

$$\begin{cases} P_1 = \min \sum_{i=1}^N (R_i + E_i) \\ P_2 = \min \sum_{m=1}^N LE_m \end{cases} \quad (3.4)$$

目标 1 表示最小化总压箱量, 目标 2 表示最小化龙门吊大车行驶总距离。若龙门吊大车贝位行驶单位成本和翻箱单位成本分别取 c_1 和 c_2 , 目标函数可转化为单目标 $P = c_1 \times P_1 + c_2 \times P_2$.

约束条件:

$$LE_m \geq \sum_{i=1}^N \sum_{i' \neq i}^N \left| \sum_{k=1}^B (k \cdot y_i^k) - \sum_{k=1}^B (k \cdot y_{i'}^k) \right| \cdot p_{i,i'}^{m-1,m} \quad m \in \{2, 3, \dots, N\} \quad (3.5)$$

$$E_i \geq num_i / (num_i + 1) \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.6)$$

$$num_i \geq \left(\sum_{j \in Te_i \cap (D_i \cup A_i) \setminus i} x_{ij} \right) \cdot (1 - R_i) \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.7)$$

$$(1 - R_i) \cdot \sum_{j \in D_i} x_{ij} = 0 \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.8)$$

$$\sum_{j \in D_i} x_{ij} - R_i \geq 0 \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.9)$$

$$x_{ij} = x_{ji} \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.10)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N x_{ij} \leq T - 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.11)$$

$$x_{ih} + x_{jh} + x_{ij} \neq 2 \quad i < j < h \quad i, j, h \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.12)$$

$$\sum_{k=1}^B y_i^k = 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.13)$$

$$\sum_{i=1}^N y_i^k \leq F_k \quad k \in \{1, 2, \dots, B\} \quad (3.14)$$

$$\sum_{k=1}^B y_i^k \cdot y_j^k + (1 - x_{ij})M > 0 \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.15)$$

$$\sum_{m=1}^T \left[\left(\sum_{i=1}^N (h_i^m \cdot y_i^k) \right) / m \right] \leq S \quad k \in \{1, 2, \dots, B\} \quad (3.16)$$

$$\sum_{m=1}^T m \cdot h_i^m = \sum_{j=1}^N x_{ij} + 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.17)$$

$$\sum_{m=1}^T h_i^m = 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.18)$$

式(3.5)中 $\sum_{k=1}^B (k \cdot y_i^k)$ 表示分配给箱 i 的贝位 k , $\left| \sum_{k=1}^B (k \cdot y_i^k) - \sum_{k=1}^B (k \cdot y_i^k) \right|$ 表示相邻两进场箱所在贝位差, 约束表示完成第 m 个收箱作业龙门吊大车行驶距离的期望; 式(3.6)为同预约时段箱的压箱量期望约束; 式(3.7)中 $Te_i \cap (D_i \cup A_i^1)$ 表示箱 i 同预约时段且装船优先级大于箱 i 的箱集合, 与 $(1-R_i)$ 相乘使 $R_i=1$ 时, $E_i=0$; 式(3.8)和(3.9)为不同预约时段箱的压箱量约束, 即当 $\sum_{j \in D_i} x_{ij} = 0$ 时, $R_i=0$, 当 $\sum_{j \in D_i} x_{ij} \neq 0$ 时, $R_i=1$, 其中 D_i 为箱 i 的翻箱集合; 式(3.10)表示箱 i 和 j 的位置对称约束; 式(3.11)表示集装箱堆栈高度不能超过额定栈高; 式(3.12)表示两箱堆存关系的传递性约束; 式(3.13)表示分配给箱的贝唯一; 式(3.14)表示贝内总箱量不超过额定容量; 式(3.15)表示同堆栈箱位于同贝位; 式(3.16)表示贝内堆栈数约束; 式(3.17)和(3.18)保证中间变量 h_i^m 的取值要求。

式(3.6)为非线性约束, 可通过引进变量 $I_i^m \in \{0, 1\}$ 和常量 ex_m 将其转化为线性约束, 其中 $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, $m \in \{0, 1, \dots, T-1\}$, $ex_m = 1/m + 1$, 使 I_i^m 满足式(3.19)与式(3.20), 则约束(3.6)可表示为式(3.21)。

$$\sum_{m=0}^{T-1} I_i^m = 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.19)$$

$$\sum_{m=0}^{T-1} m \cdot I_i^m = num_i \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.20)$$

$$E_i \geq \sum_{m=0}^T ex_m \cdot I_i^m \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.21)$$

上述模型为二次整数规划模型, 约束中的二次项函数均为凸函数, 模型可利用 CPLEX 的分支定界等成熟算法进行求解, 但模型决策变量随问题规模 N 呈二次方增长, 计算复杂度随 N 呈指数增长。针对较大规模问题很难用通用算法在可接受的时间内获得近似解 (实验分析见 6.2 部分), 必须针对问题特点设计近似求解算法, 本文将基于图表示的特性设计禁忌搜索算法。

3.4 基于图的禁忌搜索算法

基于图的禁忌搜索算法基本思路：依据启发式规则生成初始解，基于解的箱位交换迭代搜索寻找模型近似最优解，利用基于图的搜索邻域选择控制搜索方向和空间，利用搜索禁忌保证搜索路径的多样化和解的全局性。禁忌搜索算法设计主要内容如下：

1) 评估函数选定：选用目标函数 $f(x) = c_1 \times P_1 + c_2 \times P_2$ 为评估函数，其值越小，对应的方案越好；评估值相同， $r_{obs} = \sum_{i=1}^N r_i$ 值越小，方案鲁棒性越好。

2) 初始解构建：采用启发式算法解得，启发式规则：在当前箱分配产生的压箱量为零的可选箱位集合中选取龙门吊最小移动的箱位，分配给当前箱。

3) 禁忌对象表(T)与禁忌长度(l)：禁忌对象 $T_{nbs} = (n, b, s)$ ， $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ ， $b \in \{1, 2, \dots, B\}$ ， $s \in \{1, 2, \dots, S\}$ ，表示箱 n 不能分配到堆栈(b, s)。禁忌表为禁忌对象组成的队列，前进后出，禁忌队列长度可根据堆场区段规模选定。

4) 领域集合 $H(x)$ ：控制箱位交换的集合，由箱与箱的位置交换和空箱位交换组成，基于图表示的邻域集合基于以下规则确定。

i) 箱与箱的位置交换：基于第 2 部分对交箱次序与箱位分配图表示的分析，考虑箱位交换对龙门吊大车移动与压箱量的影响，将箱位分配图中邻近箱作为交换箱对，表示为 (i, j) ，其中箱 i 和 j 满足以下条件：a) $|n_i - n_j| \leq Dis$ ，其中 n_i 和 n_j 分别为箱 i 和 j 的交箱次序， Dis 为控制参数；b) $j \in [Sc_{b_i}^-, Sc_{b_i}^+]$ 且 $i \in [Sc_{b_j}^-, Sc_{b_j}^+]$ ，其中 $[Sc_{b_i}^-, Sc_{b_i}^+]$ 为箱 i 所在贝区间；c) $i \in \bigcup_{k=0}^K Add_j^k$ 且 $j \in \bigcup_{k=0}^K Add_i^k$ ，其中 Add_j^k 为箱集合(见第 2 部分)， K 为控制参数。

ii) 空箱位交换，即箱分配到其它栈的空箱位：表示为 (i, z) ，其中箱 i 和栈 z 满足以下条件：a) $i \in [Sc_{b_z}^-, Sc_{b_z}^+]$ ，其中 $[Sc_{b_z}^-, Sc_{b_z}^+]$ 为栈 z 所在贝区间；b) $i \in \bigcup_{k=0}^K Add_z^k$ ，其中 K 为控制参数。

5) 交换实施集合 $S(x)$ ：为提高搜索效率，搜索迭代允许多对箱位交换，考虑领域集合 $H(x)$ 中的多对箱位交换可能产生冲突，定义 $H(x)$ 的子集(交换实施集合)，满足如下条件：i) 若 (i_1, j_1) 和 $(i_2, j_2) \in S(x)$ 则 $i_1 \neq j_2$ 且 $i_1 \neq i_2$ ；ii) 若 (i_1, z_1) 和 $(i_2, z_2) \in S(x)$ 则 $i_1 \neq i_2$ 且 $z_1 \neq z_2$ ；iii) 若 $(i, j) \in S(x)$ ，则其交换后的评估值不劣于当前解。

6) 藐视准则：若候选方案的评估值小于历史最优评估值，但被禁忌，则将其解禁。

7) 终止条件：迭代次数达到最大迭代次数($max\text{-}iter$)时，终止算法，输出方案。

8) 算法流程: 为描述方便定义如下符号, x^* 表示最优箱位优选方案, $f(x^*)$ 表示最优方案下的成本评估值, m 表示从 $H(x)$ 选取的一次邻域交换, $A(s, x)$ 表示破禁水平函数。算法流程如图 3.3 所示, 步骤如下:

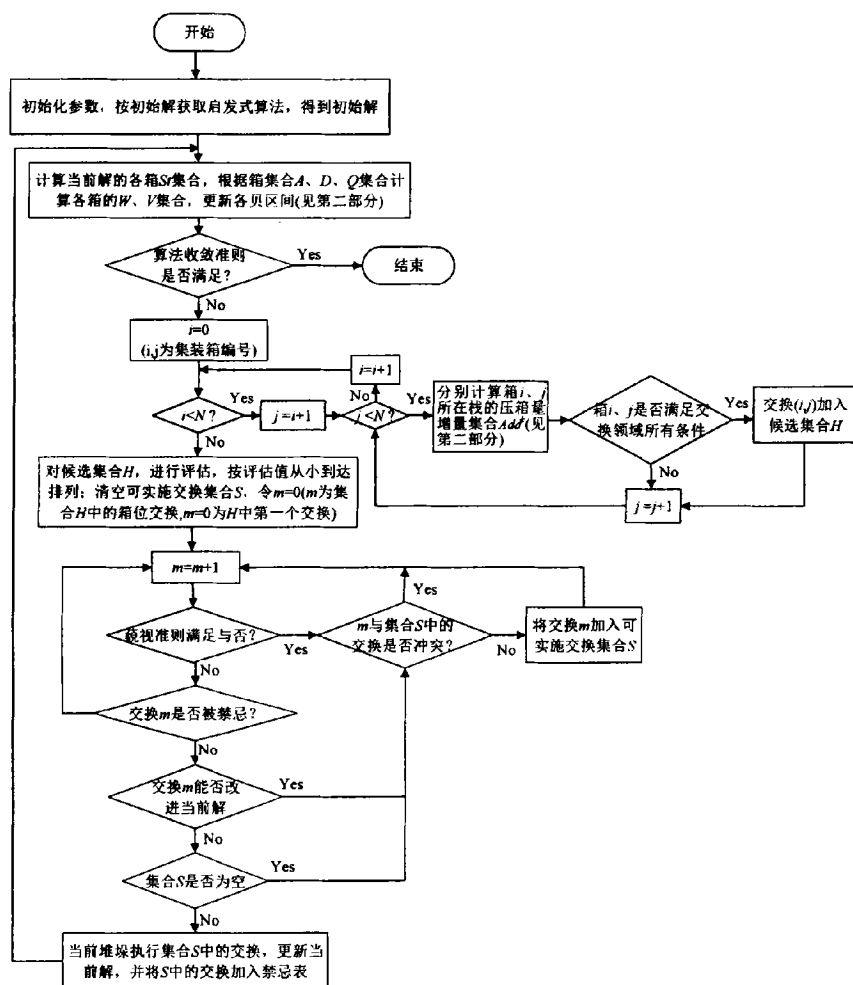


图 3.3 禁忌搜索算法流程图

Fig.3.3 Tabu-search algorithm flowchart

步骤 1. 给出算法参数, 利用启发式算法生成初始可行解 $x \in X$, 初始化参数: $T = \emptyset$, $x^* = x$, $f(x^*) = M$ (M 为充分大的正数), $A(s, x) = f(x^*)$, $k = 0$ 。

步骤 2. 计算当前解的各箱 St 集合, 根据箱集合 A 、 D 、 Q 计算各箱的集合, 令集合 $W_i = \Omega$ (全集), 若箱 i 为压箱: $= A_i \cup Q_i$, 否则: $V_i = \bigcup_{j \in St_i} Q_j$; 更新各贝区间。

步骤 3. 若 $f(x) = 0$, 终止算法, 输出最优方案; 否则 $k = k + 1$ 。

步骤 4. 若 $k > \max\text{-iter}$, 终止算法, 输出最优调度方案。

步骤 5. 计算各栈压箱量增量小于 K 的集合 $\bigcup_{k=0}^K Add_k^t$ (见第 2 部分)。

步骤 6. 根据领域选择条件, 针对各箱筛选可交换箱位, 生成交换箱位领域集合 $H(x)$, 按评估值从小到大排列; $m = 0, S(x) = \emptyset$ 。

步骤 7. $m = m + 1$, 若箱位交换 m 满足藐视准则且与 $S(x)$ 中的移动互不冲突, 转 11; 否则转 8。

步骤 8. 若箱位交换 m 能改进当前解(不劣于当前解), 转 9; 否则转 10。

步骤 9. 若 m 与 $S(x)$ 中的移动互不冲突且未被禁忌, 转 11; 否则转 7。

步骤 10. 若 $S(x) \neq \emptyset$, 转 12; 否则转 11。

步骤 11. 将 m 加入到 $S(x)$ 中, 更新破禁水平函数, 转 7。

步骤 12. $S(x)$ 中的箱位交换, 更新 x 和 $f(x)$ 。

步骤 13. 若 $f(x) < f(x^*)$, 更新最优调度方案 $x^* = x$ 。

步骤 14. 更新禁忌表 T , 转 2。

3.5 实验分析

3.5.1 实验设计

考虑实际码头需求, 试验箱区规模从 $6 \times 6 \times 4$ 到 $25 \times 6 \times 4$ (贝 \times 栈 \times 层), 布设一台龙门吊, 交箱预约时段数 F 从 3 到 50, 装船优先级分 10 级。算例生成: 交箱预约时段为 $1-F$ 的均匀分布整数, 装船优先级为 $1-10$ 的均匀分布整数, 实际交箱时间为预约交箱时段内的均匀分布数。实验平台为 CPU Pentium(R)D3.19GHz/2G, 算法采用 C++ 开发。试验中设大车移动单位成本与翻箱单位成本参数均取 1, 算法禁忌表长度 l 取进场箱总数, 后文没有注明的实验结果均为 5 次同组试验均值。图 3.4 给出了不同堆场规模问题的算

法迭代收敛趋势，可以看出算法迭代 30 步后目标值均趋于稳定，50 步近乎收敛，因此后文试验算法 *max-iter* 取 50 次。

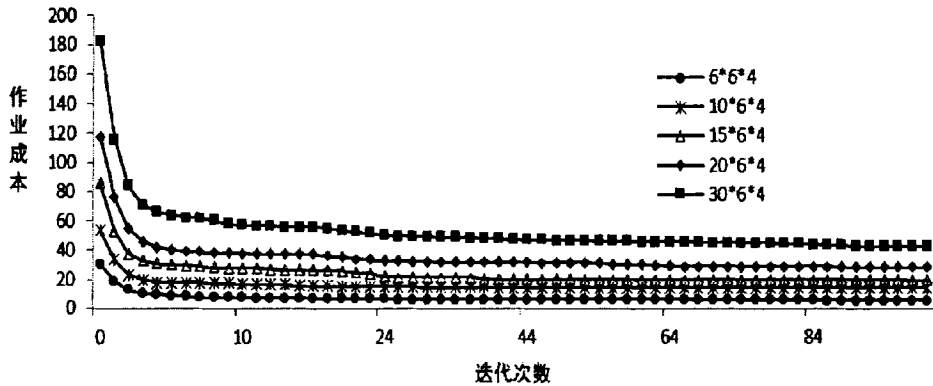


图 3.4 不同堆场规模问题的算法收敛趋势

Fig.3.4 Convergent tendency of algorithm in different blocks

3.5.2 模型和算法的性能对比分析

本文模型为 CPLEX 可求解的二次凸模型，表 3.1 给出了本文算法与 CPLEX12.6 求解效果对比。CPLEX 可得到小规模问题的精确解，算法时间消耗随问题规模急速增长，当箱量达到 18 时，时间消耗超过 12h，难以满足需要。本文算法与 CPLEX 求解小规模问题得到的最优解较接近，大车行驶距离最大误差为 1.28，翻箱率最大误差为 4.6%，CPU 时耗远小于 CPLEX，40 箱时 CPU 时耗仅为 30s，大规模问题 210 箱时 CUP 时耗约为 304s，可满足实际问题求解要求。表 3.2 给出了本文提出的利用图表示特性缩小搜索空间和优选搜索方向的禁忌搜索算法与一般禁忌搜索算法求解效果对比(不利用图特效控制搜索范围，随机选取部分邻域作为候选集)。针对小规模问题，两种算法求解效果与时间消耗差异不大，当箱量超过 32 时，本文算法的求解效果和时间消耗均明显优于一般禁忌搜索算法，作业成本改进 5%以上，并且随着问题规模的变大，本文算法的优势越明显。

表 3.1 本文算法与 CPLEX 对比结果

Tab.3.1 Results contrast between the algorithm and CPLEX

箱位规模(箱量)	大车行驶距离(/贝)		区段内翻箱率(/个)		算法消耗时间(/s)	
	本文算法	CPLEX	本文算法	CPLEX	本文算法	CPLEX

1×3×3(7)	0.00	0.0	0.057	0.01	0.56	2.83
2×3×3(12)	2.28	1.0	0.025	0.01	1.06	1335.88
1×5×4(15)	0.00	0.0	0.030	0.01	5.05	269.09
2×4×3(18)	2.34	*	0.056	*	3.85	44283
2×4×4(22)	2.61	-	0.053	-	6.84	-
3×4×4(40)	6.94	-	0.063	-	26.87	-
10×6×4(210)	12.53	-	0.298	-	304.78	-

注：1)*程序运行 12.3h 算法因内存溢出而终止；2)箱位利用率为 75%；3)表中结果为同组 10 个算例均值

表 3.2 本文算法与禁忌搜索算法对比结果

Tab.3.2 Results contrast between the algorithm and the Tabu without using characteristics of graph

箱位规模(箱量)	优化作业成本			平均每次迭代耗时(/s)	
	本文算法	禁忌搜索算法	改进百分比	本文算法	禁忌搜索算法
1×3×3(7)	0.50	0.50	0.00%	0.014	0.012
2×3×3(12)	2.00	2.00	0.00%	0.030	0.100
1×4×5(15)	1.50	1.50	0.00%	0.124	0.127
2×4×5(32)	8.36	8.80	4.93%	0.801	1.288
3×4×4(39)	8.32	8.98	7.42%	1.504	2.525
4×5×4(65)	16.45	17.46	5.78%	2.232	3.501
5×5×4(80)	12.85	13.90	7.53%	3.125	5.3823
6×6×4(120)	21.02	23.36	9.99%	17.319	27.877

注：1)禁忌搜索算法为不利用本文所提出的图特性进行直接搜索；2)改进百分比=(禁忌搜索算法-本文算法)/禁忌搜索算法

如果不考虑交箱预约的不确定性，可利用文献[47]的确定模型对问题进行求解，但方案执行时需处理由实际交箱偏差造成的箱位占用和悬空问题，处理方法：若计划箱位被占用则向上寻找空箱位，若计划箱位悬空则放入下层空箱位。图 3.5 给出了本文模型与文献[47]方法的对比，其中横坐标为预约时段数与总箱量的比值，纵坐标为 5 组 100 个算例的压箱量和大车行驶距离模拟平均值。结果显示，本文模型各组算例调度效果均优于确定模型，压箱量改进 25%以上，龙门吊行驶距离改进 15%以上。随着预约时段数与总箱量比值的减小，同一预约时段内交箱数量增多，集装箱到港次序不确定性增加，两个模型目标值均有所增加，但本文模型较确定型模型的优势愈发明显。图 7 给出了堆场区段规模为 6*6*4 时 120 个进场箱的 100 次仿真试验结果。结果表明，虽然确定模型求解目标值较本文提出模型低，但仿真执行目标值超出求解目标值较多，而本文提出模型的方案执行目标值与求解目标值较接近，仿真执行结果较确定模型平均改进 20%以上。

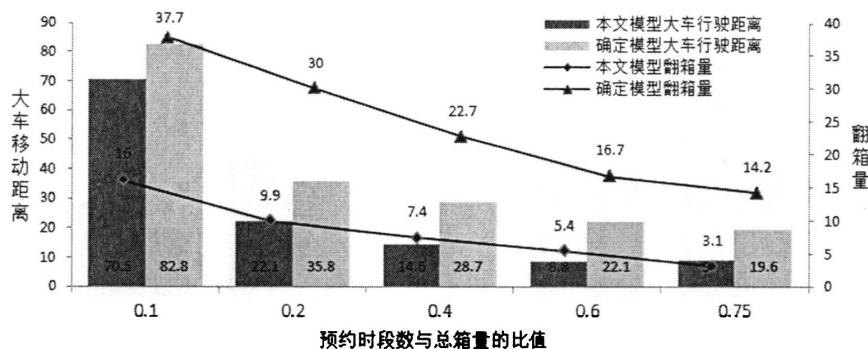


图 3.5 预约时段数下本文模型与确定模型效果对比

Fig.3.5 Results contrast between the model and deterministic model

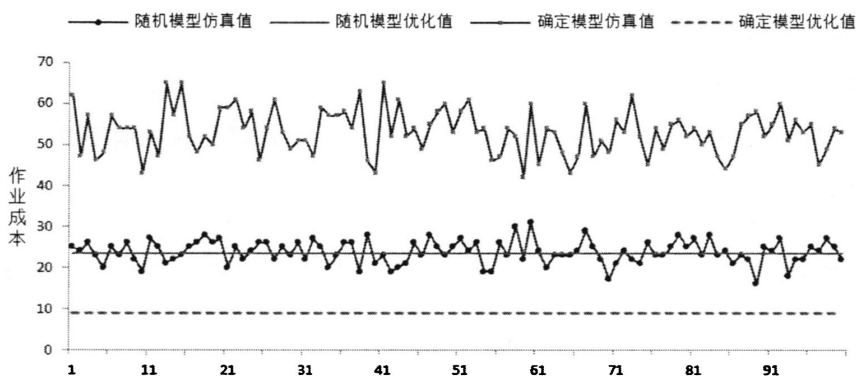


图 3.6 本文模型与确定模型仿真结果

Fig.3.6 Simulation results contrast between the model and deterministic model

3.5.3 预约影响效果分析

图 3.7 给出了本文预约模型与不考虑预约信息的实时调度方法的 4 组 80 次实验平均值对比，实时调度根据已到港集装箱次序动态搜索邻近不产生压箱的箱位分配给到港箱。堆场区段饱和度取 85%和 80%，其结果显示：不考虑预约信息的实时调度是基于局部的贪婪算法求解，无法考虑后续进场箱对当前箱位分配的影响，本文模型充分利用进场箱预约信息，基于全局搜索，利用图模型控制搜索领域与方向，提高了调度精度，改进达 28%以上。

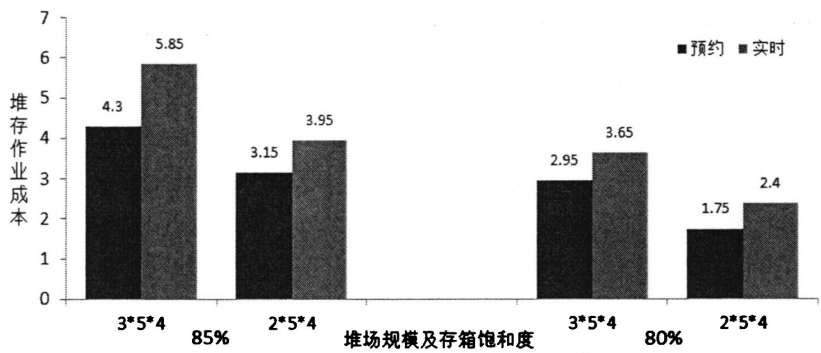


图 3.7 不同堆场规模下预约模型与实时调度效果对比

Fig.3.7 Results contrast between the model and real-time scheduling in different blocks

3.5.4 模型应用的参数分析

集装箱交箱次序(时间)是箱位优选的重要条件，其不确定性与预约时段划分的粒度有关，预约时段划分粒度越小，交箱次序不确定性越小，但过小粒度增加客户在预约时段内交箱难度。码头在实际运作中，合理的预约时段划分粒度有助于生产成本的降低。不同码头不同时期的出口箱数量不同，单纯分析预约时段划分的粒度不具有通用性，通过引入预约时段内的平均交箱数变量(下称平均时段交箱数)来考察预约时段划分对模型效果的影响更为合理。预约交箱总量不变时，预约时段划分粒度越小，平均时段交箱数量越小，反之亦然。从表 3.3 结果可看出作业成本随平均时段交箱数减少而明显减少，印证了交箱次序(时间)偏差对调度效果的影响，其中试验堆场规模为 6×6×4(120 箱)。图 3.8 给出了平均时段交箱数参数下 16 组 320 个算例执行效果变化趋势，可以看出随着平均时段交箱数减少，交箱次序不确定性降低，方案执行成本离散度降低，平均时段交箱数为 40 和 3 时，方案执行成本最大偏差分别为 22.6%和 4.7%，成本偏差在 5%以内的算例数分别为 20%和 85%。

表 3.3 不同平均预约时段交箱数的算例结果

Tab.3.3 Case results with different average container numbers

平均时段交箱数 (个)	40	24	17	11	9	5	4
翻箱率	11.59%	13.68%	12.78%	7.85%	5.76%	2.92%	2.50%
行驶距离 (贝)	75.81	28.44	15.97	8.86	17.75	12.20	6.50

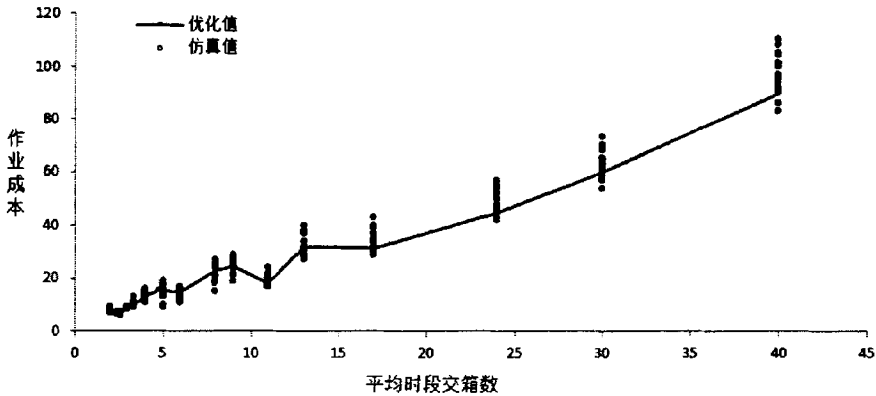


图 3.8 不同平均时段交箱数的作业成本趋势与偏差

Fig.3.8 Tendency of operation cost and deviation of different average container numbers

3.6 本章小结

集装箱码头堆场出口箱位优选是堆场作业计划的核心问题之一。针对交箱预约机制的码头出口箱位优选问题，本章提出了基于图的交箱次序与箱位分配表示方法，并在此基础上构建了集装箱堆场出口箱位优选模型，开发了基于图的禁忌搜索算法。实验表明：1)基于预约的出口箱位优选模型有效利用了客户交箱预约信息优化箱位分配，试验算例中较不考虑预约信息的动态调度方法节约作业成本 28%以上；2)利用预约信息得到的出口交箱次序具有不确定性，基于概率期望构建出口箱位优选模型可有效处理不确定偏差影响，试验算例较不考虑交箱次序偏差的确定模型压箱量减少 25%以上，龙门吊行驶距离减少 15%以上，总成本节约 20%以上；3)开发的禁忌搜索算法有效利用图特性缩小搜索空间和优选搜索方向，在合理时间内获得模型满意解，满足实际问题规模的求解需要；4)预约交箱时段粒度减少有助于出口箱位优选，降低堆场作业成本，但过小粒度增加客户在预约时段内交箱难度，可结合码头与客户条件选定预约时段划分粒度。

4 混堆模式堆场的出口箱位优选干扰管理模型及算法

近年来随着集装箱运输需求的不断发展,为了突破堆场瓶颈,提高堆场利用率和通过能力,越来越多的码头开始采用进、出口箱混堆的堆场作业模式,如上海港、香港港、宁波北仑港等。混堆模式下,进、出口箱同堆场堆存可以充分利用有限的箱位资源,提高了箱位利用率和堆场通过能力。比较而言,混堆模式作业复杂,且作业间易发生干扰和冲突,堆场资源调度与管理难度大,其模式优势需有效的协调调度和干扰处理机制配合才能实现。

4.1 问题描述

目前世界大中型集装箱堆场多采用龙门吊多层堆存形式,混堆箱区可同时堆存进出口箱,龙门吊作业包括堆箱、取箱以及倒箱等。其作业计划需考虑作业优先级,如船舶到港临近时段应优先安排出口收箱作业(堆箱),作业间隙可安排提(取)箱和倒箱等作业。

出口收箱作业计划时需考虑收箱需求、龙门吊作业成本、以及后续装船翻箱。如果收箱序列(即客户交箱)已知,出口收箱作业计划可转化为根据交箱序列依次为进场箱优选箱位问题。收箱序列可根据客户交箱预约或集卡动态信息近似确定,实际交箱序列具有动态不确定性,易发生扰动,如延迟或取消等。扰动发生不仅影响收箱计划执行,而且影响提箱和倒箱等其他作业,造成作业成本增加、作业时间窗延长等。图 4.1 和图 4.2 (a) 分别给出箱位及其作业计划(虚线)与扰动影响(实线)的示例。可以看出箱 4 和 13 作业延迟后,龙门吊大车行驶贝位数由 4 增加到 7;出口箱位重调度作业计划如图 4.2 (b) 所示,龙门吊总成本显著增加,大车行驶贝位数为 10。因此对不确定干扰事件的响应与处理除考虑收箱计划本身外,还需考虑干扰恢复方案对关联作业的影响。图 4.2 (c) 为基于干扰管理思想考虑恢复方案关联影响的作业计划,方案恢复的同时大幅降低了关联影响,龙门吊大车总行驶贝位数为 4。

本章针对出口收箱优先的混堆箱区计划阶段,考虑不确定条件下的多作业干扰影响,研究出口箱位优选问题,其基本求解思路为:首先识别不确定干扰事件,然后根据干扰事件启动干扰恢复模型求解,来处理不确定干扰事件。本文堆场作业机械为龙门吊,箱位优选目标考虑龙门吊作业成本与后续翻箱,箱位预分配方案已确定。

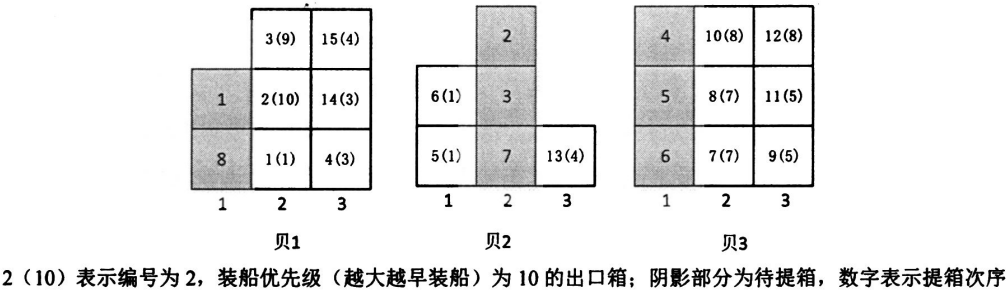


图 4.1 初始箱位分配计划

Fig.4.1 Initial slots allocation solution

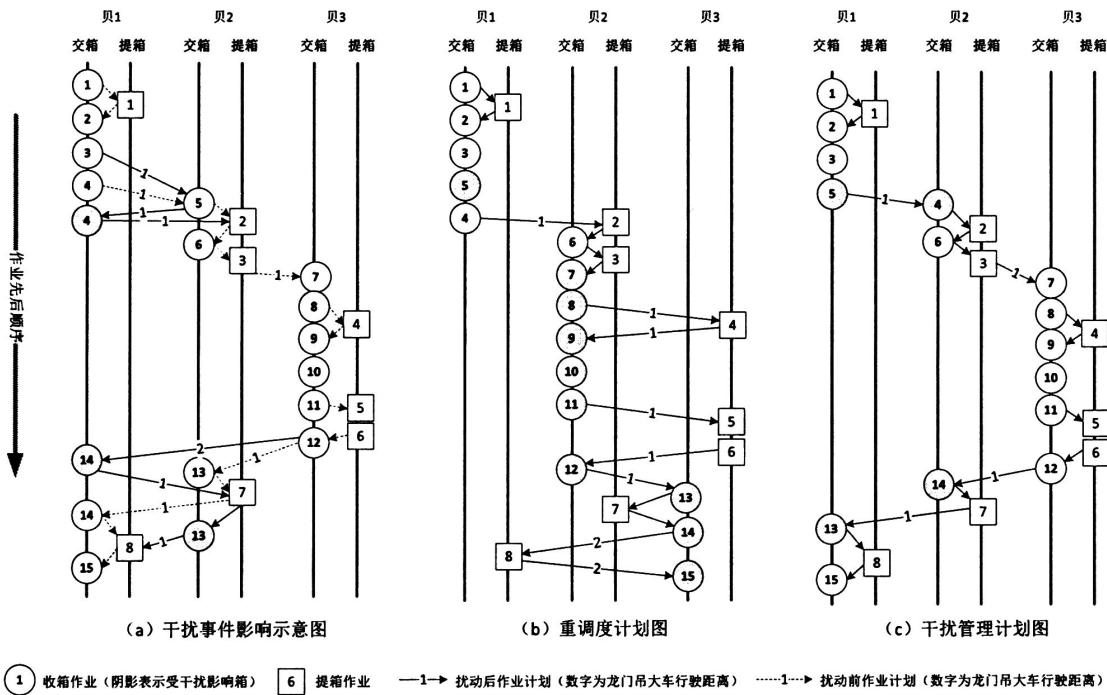


图 4.2 混堆模式作业计划与扰动恢复网络图

Fig.4.2 Illustration of operation planning and disruption recovery in mixture storage mode

4.2 干扰识别与度量

出口箱位优选不确定干扰事件主要由客户交箱提前或推迟扰动引发，属于小扰动累积事件，而频繁的计划调整不利于生产组织，因此首先应识别出需要响应和处理的干扰事件。考虑箱位优选特点，本文提出基于交箱序列偏差的干扰事件识别方法。出口箱位优选可基于箱编号或交箱次序进行，前者以箱编号为基础优选对应箱位，交箱序列对客户交箱扰动敏感，如图 4.3 所示，选取交箱序列受影响箱量作为其交箱序列偏差度量，用 ΔN 表示；后者以到港次序为基础优选到港箱的箱位，交箱序列实质为箱属性（装船优先级）序列，选取对应序位箱属性代表值的偏差加总作为其交箱序列偏差度量，表示为 $D_{ev} = \sum_{i=1}^{N'} |c'_i - c_i|$ ，其中 N' 为规划期内剩余箱量， c_i 和 c'_i 分别为扰动前后第 i 个到港箱的装船优先级。以交箱序列偏差 ΔN 或 D_{ev} 来度量扰动大小，并作为干扰事件识别变量。

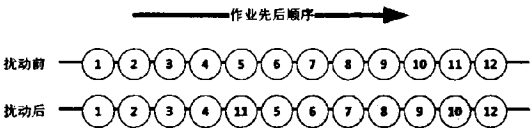


图 4.3 扰动前后交箱序列变化图（11 号箱提前）

Fig.4.3 The delivery sequence variation for the disruption

4.3 出口箱位优选干扰管理模型

4.3.1 主要假设

- 1) 堆场混堆作业模式下进出口箱可同贝不同栈堆存，规划时段内出口收箱作业优先；
- 2) 干扰事件前的堆场作业计划（包括收箱、提箱以及倒箱等作业）和出口箱位预分配方案已知，交箱干扰事件发生后恢复调整出口箱位优选计划。
- 3) 压箱量根据长途重箱优先装船原则计算，基本思路：根据长途重箱优先装船原则引入装船优先级变量(c)，即： $c = d \times w_{\max} + w$ ，其中 w 为箱重等级， d 表示目的港远近次序， w_{\max} 为最大重量等级，优先级越大越早装船。

4.3.2 干扰关联影响度量

混堆模式下出口箱位优选干扰恢复除箱位优选问题本身外，还需考虑作业箱位调整引起的龙门吊关联作业时间和成本的增加，后者与分配箱位所在贝以及关联作业有关，

可用扰动前后分配贝位的距离差加总来度量, 即: $B_w = \sum_{i=1}^N |b_i - b'_i|$, 其中 b_i 、 b'_i 分别为出口箱位预分配方案和干扰恢复第 i 个到港箱分配的贝位。

4.3.3 模型符号及定义

N_1, N_2 : 分别表示干扰恢复时已进场和计划未进场箱量

B, S, T : 分别为混堆箱区内贝位数, 贝内堆栈数和额定栈高

V_k : 贝 k 的额定容量

b_i : 堆存计划中第 i 个进场箱分配的贝位

D_i : 干扰事件发生后, 箱 i 的压箱集合 (即当箱 i 与 D_i 中的箱分配到同堆栈时, 产生压箱)

a_{ij} : $=1$, 若箱 i 和 j 堆存于同堆栈; $=0$, 否则, $i, j \in \{1, 2, \dots, N_1\}$

b_i^k : $=1$, 若箱 i 所在贝为 k ; $=0$, 否则, $i \in \{1, 2, \dots, N_1\}$

R_i (中间变量): $=1$, 若箱 i 需翻倒; $=0$, 否则; $i \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\}$

h_i^m (中间变量): $=1$, 若箱 i 所在堆栈有 m 个箱; $=0$, 否则, $i \in \{1, 2, \dots, N_1+N_2\}$, $m \in \{1, 2, \dots, T\}$

x_{ij} (决策变量): $=1$, 若箱 i 和箱 j 被分配到同堆栈; $=0$, 否则, $i \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\}$, $j \in \{1, 2, \dots, N_1+N_2\}$ 或 $i \in \{1, 2, \dots, N_1\}$, $j \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\}$

y_i^k (决策变量): $=1$, 若箱 i 所分配贝为 k ; $=0$, 否则, $j \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\}$

4.3.4 干扰恢复模型

基于干扰管理思想以较少的方案扰动和成本恢复出口箱位优选计划。利用 $\sum_{i=1}^N |b_i - b'_i|$ 作为方案干扰影响的度量函数, 成本度量包括翻箱量和龙门吊大车行驶距离。构建出口箱位优选问题干扰恢复模型的目标函数为:

$$\min \left\{ c_1 \cdot \sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} R_i + c_2 \cdot \left[\sum_{k=1}^B k \cdot (y_{N_1+1}^k - b_{N_1}^k) \right] + \sum_{i=N_1+2}^{N_1+N_2} \left[\sum_{k=1}^B k \cdot (y_i^k - y_{i-1}^k) \right] \right\} + c_3 \cdot \sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} \left[\sum_{k=1}^B k \cdot y_i^k - b_i \right] \quad (4.1)$$

其中 c_1 、 c_2 和 c_3 分别为翻箱一次、龙门吊大车行驶一个贝位, 以及箱位偏差一个贝位的成本效用代表值, 式中前两项分别表示完成收箱作业引起的压箱量和龙门吊大车行驶贝位数, 其中 $\sum_{k=1}^B (k \cdot y_i^k)$ 表示分配给箱 i 的贝为 k , $\left[\sum_{k=1}^B k \cdot (y_i^k - y_{i-1}^k) \right]$ 表示相邻进场箱所在贝位差, 第三项表示恢复方案的干扰关联成本。

约束条件:

$$x_{ij} = x_{ji} \quad i \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\}, j \in \{1, 2, \dots, N_1+N_2\} \text{ or } i \in \{1, 2, \dots, N_1\}, j \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\} \quad (4.2)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^{N_1+N_2} x_{ij} \leq T-1 \quad i \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\} \quad (4.3)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^{N_1} a_{ij} + \sum_{j=N_1+1, j \neq i}^{N_1+N_2} x_{ij} \leq T-1 \quad i \in \{1, 2, \dots, N_1\} \quad (4.4)$$

$$a_{ij} + x_{ih} + x_{jh} \neq 2 \quad i < j < h \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N_1\} \quad h \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\} \quad (4.5)$$

$$x_{ih} + x_{jh} + x_{ij} \neq 2 \quad i < j < h \quad i \in \{1, 2, \dots, N_1+N_2\} \quad j, h \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\} \quad (4.6)$$

$$\sum_{k=1}^B y_i^k = 1 \quad i \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\} \quad (4.7)$$

$$\sum_{i=1}^{N_1} b_i^k + \sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} y_i^k \leq V_k \quad k \in \{1, 2, \dots, B\} \quad (4.8)$$

$$\sum_{k=1}^B (y_i^k \cdot y_j^k) + (1 - x_{ij})M > 0 \quad i > j \quad i, j \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\} \quad (4.9)$$

$$\sum_{k=1}^B (y_i^k \cdot b_j^k) + (1 - x_{ij})M > 0 \quad j \in \{1, 2, \dots, N_1\} \quad i \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\} \quad (4.10)$$

$$(1-R_i) \cdot \sum_{j \in D_i} x_{ij} = 0 \quad i \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\} \quad (4.11)$$

$$\sum_{j \in D_i} x_{ij} - R_i \geq 0 \quad i \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\} \quad (4.12)$$

$$\sum_{m=1}^T \left[\left(\sum_{i=1}^{N_1} (h_i^m \cdot b_i^k) + \sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} (h_i^m \cdot y_i^k) \right) \div m \right] \leq S \quad k \in \{1, 2, \dots, B\} \quad (4.13)$$

$$\sum_{m=1}^T m \cdot h_i^m = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_1+N_2} x_{ij} + 1 \quad i \in \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\} \quad (4.14)$$

$$\sum_{m=1}^T m \cdot h_i^m = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_1} a_{ij} + \sum_{\substack{j=N_1+1 \\ j \neq i}}^{N_1+N_2} x_{ij} + 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, N_1\} \quad (4.15)$$

$$\sum_{m=1}^T h_i^m = 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, N_1+N_2\} \quad (4.16)$$

式 (4.2) 表示箱 i 和 j 的位置对称约束; 式 (4.3) 和 (4.4) 表示箱堆垛高度不超过额定高度; 式 (4.5) 和 (4.6) 表示两集装箱位置关系的传递性约束; 式 (4.7) 表示分配给箱的贝唯一; 式 (4.8) 表示贝内总箱量不超过额定容量; 式 (4.9) 和 (4.10) 表示

同栈箱位于同贝位；式 (4.11) 和 (4.12) 表示翻箱量约束，即当 $\sum_{j \in D_i} x_{ij} = 0$ 时， $R_i = 0$ ，当 $\sum_{j \in D_i} x_{ij} \neq 0$ 时， $R_i = 1$ ；式 (4.13) 表示贝内堆栈数约束；式 (4.14)、(4.15) 和 (4.16) 保证中间变量 h_i^m 的取值要求。

4.4 禁忌搜索算法

针对干扰恢复问题局部性特点，采用基于局部加速的禁忌搜索算法求解，使用禁忌表封锁近期搜索的区域，避免迂回搜索，同时赦免禁忌区域中的优良解，进而确保搜索的多样性，从而实现全局优化。其基本步骤为：

第 1 步：参数初始化。生成出初始解，禁忌表设为空。

第 2 步：判断是否满足终止条件要求。若满足，输出结果，算法停止；否则，继续。

第 3 步：对于候选解集中的最优解，判断其是否满足解禁准则。若满足，更新解禁准则，更新当前解，转第 5 步；否则继续以下步骤。

第 4 步：选择备选解集中未禁忌的优解作为当前解。

第 5 步：更新禁忌表。转第 2 步。

禁忌搜索算法技术要点与参数：

1) 适应度函数：衡量解优劣的标准，选用模型目标函数 $f(x)$ 为适应度函数，越小越优；

2) 初始解：选用扰动发生前箱位优选方案作为初始解；

3) 邻域 $H(x)$ ：控制箱位交换的集合，由箱与箱的位置交换和空箱位交换组成，邻域基于以下规则确定：i) 考虑扰动的局部性，交换箱对 (i, j) 需满足箱 $i \in C$ ，其中 C 为受扰堆栈中未进场箱集合；ii) 考虑箱位交换对龙门吊大车行驶与压箱量的影响，选邻近箱作为交换箱对，表示为 (i, j) ，且箱 i 和 j 满足 $|n_i - n_j| \leq D_{is}$ ，其中 n_i 和 n_j 分别为箱 i 和 j 的交箱次序， D_{is} 为控制参数；iii) 空箱位交换，即箱转移到其它栈的空箱位：表示为 (i, z) ，箱 i 和栈 z 满足 $i \in C$ 、 $z \in [\max\{0, b_i - q\}, \min\{B, b_i + q\}]$ ，其中 b_i 为箱 i 所在贝位， q 为控制参数。

4) 交换实施集合 $S(x)$ ：为提高搜索效率，搜索迭代允许多对箱位交换，考虑领域集合 $H(x)$ 中的多对箱位交换可能产生冲突，定义 $H(x)$ 的子集（交换实施集合），满足如下条件：i) 若 (i_1, j_1) 和 $(i_2, j_2) \in S(x)$ 则 $i_1 \neq j_2$ 且 $i_1 \neq i_2$ ；ii) 若 (i_1, z_1) 和 $(i_2, z_2) \in S(x)$ 则 $i_1 \neq i_2$ 且 $z_1 \neq z_2$ ；iii) 若 $(i, j) \in S(x)$ ，则其交换后的评估值不劣于当前解。

4.5 实验与分析

4.5.1 实验设计

本文以北方某码头资料为基础设计实验算例：预约交箱时间根据资料随机生成；出口箱位预分配方案利用文献[47]中的方法生成，将不增加龙门吊大车行驶距离的提箱和倒箱作业加入作业序列；实际交箱时间和序列利用正态分布 $N(t_k, \sigma)$ 模拟，其中 t_k 为箱 k 的预约交箱时间。方案评价指标为规划期内龙门吊大车行驶距离和压箱量总和。实验平台采用 CPU Pentium (R) D3.19GHz/2G，算法采用 C++开发。实验中模型成本效用代表值取 1:1:0.6（压箱量:龙门吊大车行驶:箱位偏差），算法参数 D_{is} 取 20， q 取 1，禁忌表长度 l 取进场箱总数，迭代次数取 50，后文没有注明的实验结果均为 5 次同组试验均值。

4.5.2 算法性能分析

本文模型为 CPLEX 可求解的二次凸模型，表 4.1 给出了本文算法与 CPLEX12.6 求解效果对比。CPLEX 可得到小规模问题的精确解，算法时间消耗随问题规模急速增长，当箱量达到 19 时，时间消耗超过 9h，难以满足实际需要。本文算法求解小规模问题得到较小的目标成本值，总目标误差值小于 0.5，且 CPU 时耗远小于 CPLEX，120 箱时 CPU 时耗仅为 3.26s，可满足实际问题求解要求。

表 4.1 本文算法与 CPLEX 对比结果
Tab.4.1 The comparisons between the algorithm and CPLEX

区段规模 (箱量)	大车行驶距离(/个)		压箱量(/个)		箱位偏差(/个)		总目标 误差值	算法耗时(/s)	
	本文 算法	CPLEX	本文 算法	CPLEX	本文 算法	CPLEX		本文 算法	CPLEX
1*4*3(9)	0	0	0.30	0.26	0	0	0.040	0.10	0.23
2*2*4(11)	1.22	1.26	0.80	0.52	0.68	0.56	0.312	0.21	99.80
2*3*3(12)	1.20	1.22	0.20	0.12	0.50	0.34	0.156	0.20	4.20
3*2*3(13)	2.46	2.28	0.78	0.64	0.62	0.42	0.440	0.28	124.2
2*3*3(15)	1.20	1.20	0.38	0.36	0.80	0.68	0.092	0.24	430.55
2*3*4(19)	1.00	*	1.54	*	1.36	*	-	0.38	33486
6*6*4(120)	23.24	-	5.42	-	23.48	-	-	3.26	-

注：1) *程序运行 9.3h 算法因内存溢出而终止；2) 箱位利用率为 85%；3) 表中结果为同组 50 个算例均值

4.5.3 模型性能分析

将本文模型与全局重调度进行对比来验证干扰管理模型的有效性，表 4.2 给出了不同问题干扰事件发生后不调整方案、重调度和干扰管理方案的对比结果，其中重调度是根据干扰事件发生后全局成本（压箱量与龙门吊大车行驶距离）最小设计（文献[47]），扰动恢复启动条件取 $Dev > 0$ 且 $\Delta N > 0$ 。表 4.3 给出了干扰管理方法对于重调度平均相对改进和最大相对改进值，可以看出由于交箱序列扰动，原方案压箱量和大车行驶距离大幅增加，计划执行过程中必须对干扰事件进行动态调整；重调度与干扰管理性能对比，问题规模大于 $3 \times 6 \times 4$ 时干扰管理明显优于重调度结果，平均改进 10% 以上，最大改进达到 50%；重调度与干扰管理求解时间均随问题规模增大而增加，干扰管理求解时间略低于重调度。此外，干扰管理堆存方案较多地保留原计划，减少了频繁指令成本和误差机率，以及指令修改给司机带来的情绪压力和误操作机率。

表 4.2 初始方案、重调度和干扰管理性能对比

Tab.4.2 The performance comparisons with initial solution, rescheduling and distribution management

堆场规模	初始方案				重调度				干扰管理优化			
	理论 压箱 量	实际 压箱 量	理论 大车 行驶	实际 大车 行驶	压箱 量	大车 行驶	箱位 偏差	计算 时间	压箱 量	大车 行驶	箱位 偏差	计算 时间
2×6×4	0	1.9	1.5	3.5	1.2	1.8	2.1	2.189	1.6	1.5	0.1	1.983
3×6×4	0.1	3.7	4.1	12.2	3.0	6.0	6.3	2.741	3.9	1.3	1.3	2.781
4×6×4	0.4	7.1	4.3	14.6	4.1	6.8	7.1	3.209	5.3	4.4	0.7	2.886
5×6×4	1.0	10.3	5.8	24.2	7.2	8.8	9.25	4.267	7.9	6.2	1.5	3.865
6×6×4	0.8	15	8	40	8.1	13.8	16.1	4.138	9.9	9.4	1.9	3.571
10×6×4	3.1	35.7	20.7	89.5	19.6	35.1	40.0	6.119	23.8	26	10.3	5.701
15×6×4	3.2	57.9	33.6	186.3	29.4	81.9	77.6	7.479	39.5	54.3	20.8	7.143
25×6×4	8.6	118	53.6	451.9	59.5	193	158.3	7.999	65	151	76.2	7.564

注：每组对比数据分别为 10 个算例的平均值，堆场饱和度约为 85%，进/出口箱堆栈数量约比为 1:3，压箱量与大车行驶单位：个；时间单位：s

表 4.3 干扰管理相对于重调度的改进程度表

Tab.4.3 The disruption management improvement relative to rescheduling

堆场规模 (贝*栈*层)	2×6×4	3×6×4	4×6×4	5×6×4	6×6×4	10×6×4	15×6×4	25×6×4
平均改进	-3.33%	10.00%	11.01%	11.88%	11.87%	21.16%	15.72%	14.46%
最大改进	25.00%	50.00%	41.18%	51.43%	27.59%	41.25%	46.38%	24.73%

注：方案成本=翻箱成本+龙门吊成本，改进程度=（重调度方案成本-干扰管理方案成本）/重调度成本

图 5 给出了出口箱堆场饱和度为 90%时,不同规模和进出口堆栈比,干扰管理相对于重调度的 100 个算例的精度改进趋势(精度改进=(重调度成本-干扰管理成本)/重调度成本)。可以看出,随问题规模的增加,干扰管理精度改进越大,优于重调度的算法比例也越大,当 $15\times 6\times 4$ 分布时干扰管理较优的算例比例达 82%。为了进一步分析干扰管理效果,表 4.4 对不同堆场规模、进出口箱堆栈数量比、出口箱堆场饱和度下,干扰管理效果与重调度进行了对比,每种情况 10 个算例取平均值。总体来看,干扰管理较重调度随进出口箱堆栈数量比值、堆场规模的增大改进效果越明显;当堆场规模达到 $15\times 6\times 4$ 时,干扰管理较重调度改进 10%以上。

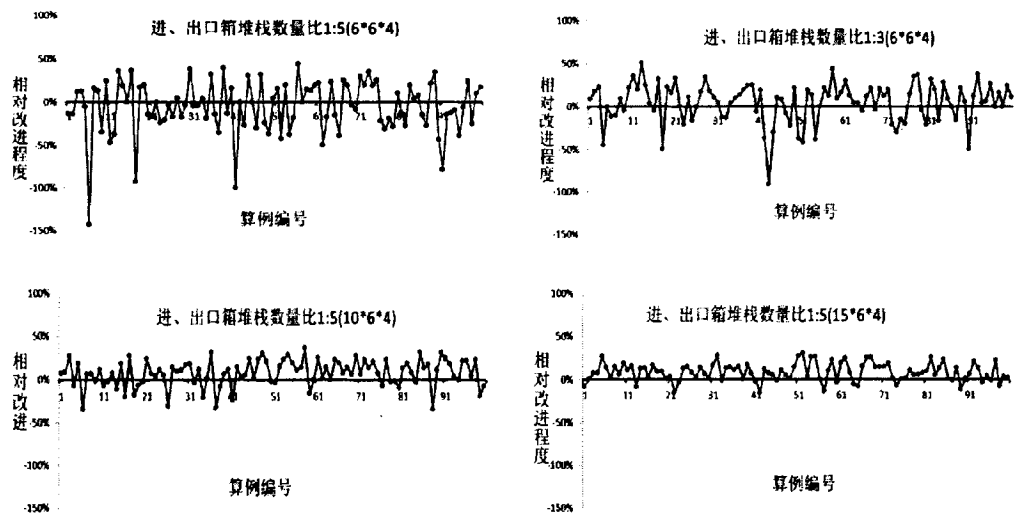


图4.5 干扰管理的改进效果图

Fig.4.5 The Relative improvement illustration of distribution management

表 4.4 不同堆场规模、进出口箱堆栈数量比、出口箱堆场饱和度的模型性能分析

Tab.4.4 The performance analysis in different application conditions

堆场规模	饱和度	进出口箱堆栈比 1:5			进出口箱堆栈比 1:2			进出口箱堆栈比 1:1		
		重调度度	干扰管理	改进程度	重调度度	干扰管理	改进程度	重调度度	干扰管理	改进程度
6×6×4	90%	27.3	30.0	-9.9%	27.6	24.9	9.8%	27.9	22.4	19.7%
	80%	20.0	20.5	-2.5%	24.1	20.1	16.6%	30.1	27.6	8.3%
	70%	18.9	17.5	7.4%	17.5	16.5	5.7%	28.4	22	22.5%
	60%	13.3	14.6	-9.8%	23.7	20.5	13.5%	16.3	12.5	23.3%
10×6×4	90%	47.5	46.1	3.0%	60.8	53.7	11.7%	85.7	71.1	17.0%

	80%	46.4	43.6	6.0%	47.6	37.2	21.9%	63.9	49.3	22.9%
	70%	41.2	38.6	6.3%	55.1	53.8	2.4%	55.4	46.9	15.4%
	60%	29.9	32.2	-7.7%	33.3	32.3	3.0%	41.6	36.2	13.0%
15×6×4	90%	112.7	101.3	10.1%	117.3	95.5	18.6%	135.2	100.4	25.8%
	80%	102.7	89.8	12.6%	107.5	84.5	21.4%	109.6	84.5	22.9%
	70%	73.7	65.2	11.5%	80.7	69.1	14.4%	108.7	90.2	17.0%
	60%	57.2	50.6	11.5%	68.7	59.6	13.3%	106.1	92.8	12.5%

4.5.4 干扰恢复启动参数

扰动大小是干扰恢复启动的重要条件。本文选取交箱次序扰动偏差 Dev 和受扰动箱数量 ΔN 作为扰动恢复算法的启动参数，下面分析 Dev 和 ΔN 选取对问题求解的影响。为了方面描述，定义 $A_1\{Dev \geq d\}$, $A_2\{\Delta N \geq n\}$, $A'_1\{Dev \leq d\}$ 和 $A'_2\{\Delta N \leq n\}$ 分别表示统计算例中满足 $Dev \geq d$, $\Delta N \geq n$, $Dev \leq d$ 和 $\Delta N \leq n$ 的所有算例的作业成本增量和； $num_1(d)$, $num_2(n)$, $num'_1(d)$ 和 $num'_2(n)$ 分别表示 $Dev \geq d$, $\Delta N \geq n$, $Dev \leq d$ 和 $\Delta N \leq n$ 的算例数；令：

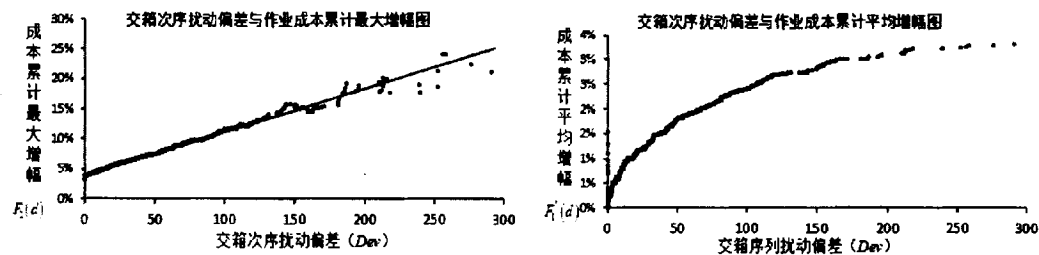
$$F_1(d)=A_1\{Dev \geq d\}/num_1(d)$$

$$F_2(n)=A_2\{\Delta N \geq n\}/num_2(n)$$

$$F'_1(d)=A'_1\{Dev \leq d\}/num'_1(d)$$

$$F'_2(n)=A'_2\{\Delta N \leq n\}/num'_2(n)$$

作为启动参数评估指标。图 4.6 给出了 1200 算例（规模 $6 \times 6 \times 4$ ）启动参数对评估指标的影响趋势图。可以看出，启动参数选取越小作业成本增加越小，当 $Dev \leq 16$ 时，作业成本的最大增幅值仅为 5.02%，平均增幅为 1.01%；当 $\Delta N \leq 6$ 时，作业成本的最大增幅为 5.01%，平均增幅为 0.99%。但过小的启动参数会造成方案频繁调整，不利于生产组织，实际中港方应根据交箱密度，求解效率等因素综合确定扰动恢复启动参数。



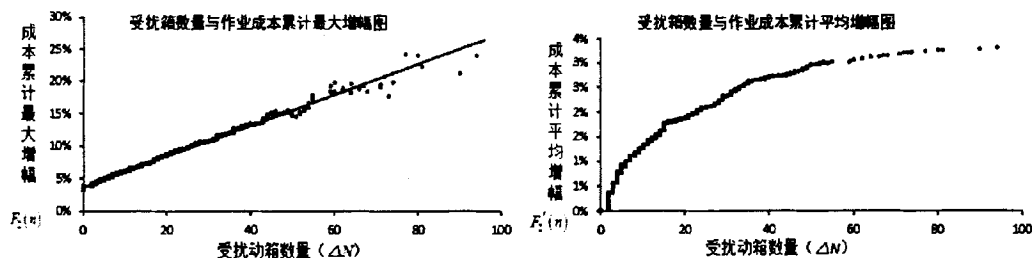


图4.6 作业成本累计最大和平均增幅随扰动偏差变化趋势图

Fig.4.6 The Average and maximum cost trend with disturbance expanding

4.6 本章小结

混堆模式可有效提高集装箱堆场通过能力，但增加了堆场作业管理的复杂度。本章针对混堆模式的出口箱位优选问题，考虑干扰事件影响，提出了基于交箱序列偏差的干扰事件识别，并构建了箱位优选扰动恢复模型，开发了基于局部加速的禁忌搜索算法。实验表明：1) 干扰管理方法能够响应干扰事件改善调度效果，试验算例较原方案节约成本 30%以上；2) 干扰管理方法有利于节约扰动恢复隐性成本和干扰影响，试验算例较重调度节约成本 10%以上；3) 基于局部加速的禁忌搜索算法有效利用扰动的局部性缩小搜索空间和优选搜索方向，在合理时间内获得模型满意解，可满足实际问题求解需要；4) 较小的干扰恢复启动参数阈值有助于改进堆场作业总成本，但过小的启动参数阈值不利于生产组织，码头可根据实际情况设定启动参数。

5 基于虚拟路径的进口箱翻箱落位启发式算法

5.1 问题描述

集装箱堆场中，若提取的目标箱位于堆栈下方，则需先将堆存在上方的箱子移动到其他堆栈中，称这一过程叫翻箱操作。在进口集装箱提箱过程中，翻箱主要取决于集装箱堆放箱位与提箱次序。提箱次序受场外多种因素影响，无法控制，造成堆场提箱过程中的翻箱，而不合理的落位置会造成二次或多次翻箱。因此通过对被翻倒箱的落箱位置进行优选，来降低二次翻箱量和总翻箱率就显得尤为重要。为表述方便，本文按照提取箱次序将贝内集装箱连续编号，数字越小，表示越早提取。图 5.1(a)表示了三个栈的贝，贝中箱子可按次序提走，无需翻箱。图 2(b)所示贝，提箱 3 时，需先将箱 5 翻倒至其他栈，若翻倒至栈 2，则提箱 4 时，箱 5 仍需翻倒，即二次翻箱；若翻倒至栈 3，则无需二次翻箱。

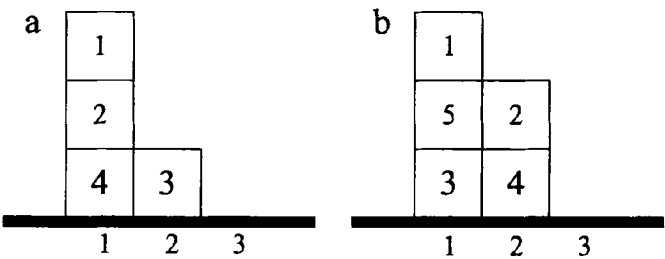


图 5.1 不同提箱操作的贝结构示意图

Fig.5.1 Bays that are retrieved with different numbers of movements

本文针对单龙门吊贝位的翻倒箱落箱位置优选问题进行研究，考虑集装箱堆场实际情况，作出如下假设：1) 为方便操作和作业安全性的考虑，通常翻箱操作只在同一贝位内进行；2) 贝位初始堆存状态为已知，即能随意获取贝位内任意集装箱的堆存位置；3) 贝中集装箱的提箱顺序已知；4) 提箱过程中不允许贝位内堆存新进场的集装箱；5) 同贝内的集装箱尺寸相同。

5.2 翻箱落位三阶段启发式算法

针对提箱阶段的翻箱落位优化问题，本文提出了翻箱落位的 3 阶段启发式算法来优化二次翻箱率。3 阶段启发式算法包括：1)初始化阶段，利用启发式规则生产翻箱落位初始可行方案；2)虚拟翻箱阶段，利用阻碍箱的虚拟翻箱构建虚拟移箱路径，构建移箱

路径冲突集合；3)移箱路径组合优选阶段，建立虚拟移箱路径的组合优化 0-1 规划模型，并开发了进化求解算法。

5.2.1 初始化阶段

为表述方便，用“操作序列”表示堆场提箱过程，其中操作序列由若干集装箱“操作指令”按顺序组成，操作指令包含操作箱编号和操作箱位，即： $(c:a,b)$ ， c 表示目标箱编号， a 是提箱栈编号， b 是落箱栈编号，栈 0 表示将箱子放置于外集卡。例如 $(1:1,0)$ ， $(2:2,0)$ ， $(5:1,2)$ ， $(3:1,0)$ ， $(5:2,3)$ ， $(4:2,0)$ ， $(5:3,0)$ 表示图 5.1 (b) 所示贝的一个操作序列，其中 $(4:2,0)$ 表示将箱 4 由 2 栈提出，放置于集卡上，此为箱 4 最后的操作指令。操作序列中针对同一箱的指令组成了该箱的“移箱路径”，例如上述序列中箱 5 的移箱路径为 $(5:1,2)$ ， $(5:2,3)$ ， $(5:3,0)$ ，可简记为：栈 1→栈 2→栈 3→栈 0，包含了 3 个操作指令，称此移箱路径长度为 3。操作序列包含的指令总数（所有箱的移箱路径长度之和）越少，翻箱次数越少，下文将此作为优化目标。

初始化阶段的目的是寻找一个可行的集装箱操作序列，按次序提取贝内所有集装箱。贝初始结构中，可根据集装箱是否阻碍其他箱的提箱操作（是否发生翻箱操作）将其分为阻碍箱（ B ）和非阻碍箱（ NB ）。如果目标箱位于栈顶层，则直接提取，否则将目标箱上方的非阻碍箱翻倒至邻近可行堆栈。如图 2(b)所示贝结构，获取初始操作序列为： $(1:1,0)$ ， $(2:2,0)$ ， $(5:1,2)$ ， $(3:1,0)$ ， $(5:2,3)$ ， $(4:2,0)$ ， $(5:3,0)$ 。可以看出，在提箱过程中，阻碍箱至少被操作两次（一次翻箱，一次提箱），非阻碍箱仅被操作一次。

5.2.2 虚拟翻箱阶段

虚拟翻箱阶段将初始操作序列作为输入，构建阻碍箱的虚拟移箱路径和移箱路径冲突集合。缩短操作序列长度，即减少阻碍箱操作指令数，可减少二次翻箱量，如图 5.1(b) 所示贝初始操作序列中，箱 3 提取之前箱 5 从栈 1 翻倒至栈 2，箱 4 提取之前又被翻倒至栈 3。若箱 5 直接从栈 1 翻倒至栈 3，则会缩短其移箱路径。初始操作序列中箱 5 的移箱路径为栈 1→栈 2→栈 3→栈 0，若用移箱路径（栈 1→栈 3→栈 0）替换原移箱路径，则操作序列得以改进。图 5.2 显式一个贝示例的操作序列及其结构变化，其初始操作序列为 $(4:2,1)$ ， $(5:2,3)$ ， $(1:2,0)$ ， $(4:1,2)$ ， $(2:1,0)$ ， $(5:3,2)$ ， $(3:3,0)$ ， $(5:2,3)$ ， $(4:2,0)$ ， $(5:3,0)$ ， $(6:4,0)$ ，箱 5 的移箱路径 $(5:2,4)$ ， $(5:4,0)$ 代替其初始路径 $(5:2,3)$ ， $(5:3,2)$ ， $(5:2,3)$ ， $(5:3,0)$ ，则路径长度可缩短 2。上述过程可扩展至多个移箱路径替换。

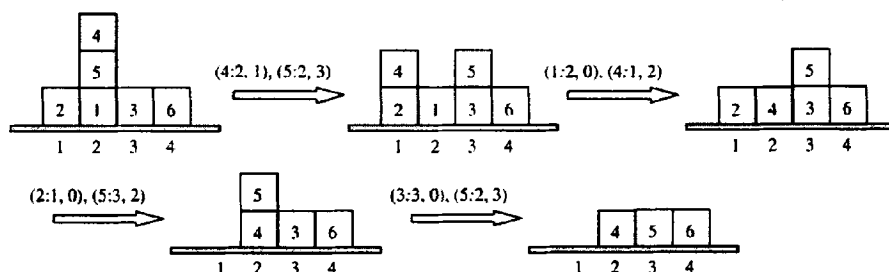


图 5.2 贝位翻箱演化图

Fig.5.2 Illustration of container reshuffle

集装箱移箱路径替换后，可能造成“移箱冲突”，比如：1)操作指令的目标箱不在当前贝结构的栈顶层，即执行该操作指令前需要翻箱，称作栈冲突；2)执行操作指令后导致落箱栈的高度超过限制，称作超高冲突。操作序列执行后能够提走贝内所有箱且不发生冲突，我们称之为可行操作序列。为了使移箱路径选择组合的操作序列具有可行性，需要对移箱路径间的冲突进行识别，构建移箱路径冲突集合，这可以通过以下过程实现。

1) 形成超级序列。针对每个阻碍箱 (B) 生成 k 个长度为 2 的虚拟移箱路径，然后组合到初始操作序列中。如图 3 所示贝结构，初始操作序列为 $(4:2,1), (5:2,3), (1:2,0), (4:1,2), (2:1,0), (5:3,2), (3:3,0), (5:2,3), (4:2,0), (5:3,0), (6:4,0)$ ，贝内有 4 个非阻碍箱和 2 个阻碍箱（箱 4 和箱 5）。分别为箱 4 和箱 5 生成虚拟移箱路径 ($k=1$)，组合出超级序列 $(4^1:2,4), (4^0:2,1), (5^1:2,4), (5^0:2,3), (1^0:2,0), (4^0:1,2), (2^0:1,0), (5^0:3,2), (3^0:3,0), (5^0:2,3), (4^0:2,0), (4^1:4,0), (5^1:4,0), (5^0:3,0), (6^0:4,0)$ ，上标表示移箱路径编号，0 表示初始操作序列中的移箱路径。

2) 形成超级堆场。将每个虚拟移箱路径视作一个新的集装箱（称作虚拟箱）放置到原集装箱的上面，称添加虚拟箱后的堆场为超级堆场，图 4 所示为上述超级序列的超级堆场。

3) 虚拟翻箱。对超级堆场执行超级序列的提箱过程，执行过程中即可识别出移箱路径冲突。图 5.3 显示了该过程，在 11 个操作指令后，第 12 个指令是 $(4^1:4,0)$ ，但虚拟箱 4^1 在虚拟箱 5^1 下面，箱 4 的路径 1 与箱 5 的路径 1 发生了栈冲突，因此在组合选择阶段不能同时选择移箱路径 4^1 和 5^1 。为了能够识别所有冲突，我们假设箱 4^1 可以从箱 5^1 下面直接抽出，继续执行超级序列，如图 5 所示。同样，该过程可识别超高冲突，即当堆栈同时存在的移箱路径超过 H 个 (H 表示栈高限制)。利用栈冲突和栈高冲突的路径组合形成移箱路径冲突集合。

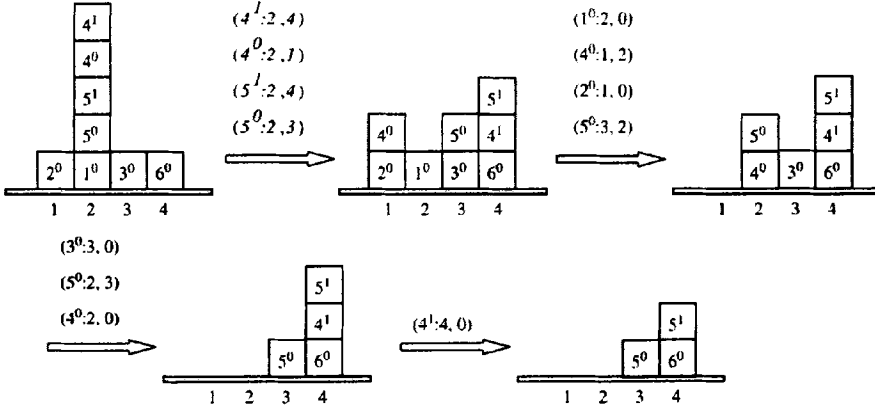


图 5.3 超级堆场虚拟翻箱演化图

Fig.5.3 Illustration of the augmented yard and the execution of a super-sequence

5.2.3 移箱路径组合优选阶段

移箱路径组合优选阶段将从超级序列中为每个集装箱选择移箱路径，组合成可行操作序列，使操作行指令数量最少。因为超级序列中包含了初始可行操作序列，所以这样的可行操作序列必定存在。本文通过下列 0-1 整数规划优选出可行的最优集装箱操作序列。

主要符号及变量说明：

C ：待提集装箱集合

P_i ：箱 i 的移箱路径集

p_{ij} ：阻碍箱 i 的第 j 条移箱路径

m_{ij} ：箱 i 的第 j 条移箱路径中的操作指令数量

R_{ij} ：与 p_{ij} 发生栈冲突的移箱路径集合

H ：额定栈高

F_a ：栈高冲突集合， $\forall F_a \in F$

x_{ij} （决策变量）： $=1$ ，若 p_{ij} 被选择； $=0$ ，否则； $\forall i \in C, j \in P_i$

目标函数：

$$f = \min \sum_{i \in C} \sum_{j \in P_i} m_{ij} \cdot x_{ij} \quad (5.1)$$

约束条件:

$$\sum_{j \in P_i} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in C \quad (5.2)$$

$$x_{ij} + x_{qr} \leq 1 \quad \forall i \in C, j \in P_i, p_{qr} \in R_{ij} \quad (5.3)$$

$$\sum_{p_{ij} \in F_a} x_{ij} \leq H \quad \forall F_a \in F \quad (5.4)$$

目标函数 (5.1) 表示最小化集装箱操作序列中操作指令总数; 约束 (5.2) 保证每个集装箱有且仅选择一条移箱路径; 约束 (5.3) 表示栈冲突的移箱路径不能同时被选择; 约束 (5.4) 表示超高冲突的移箱路径同时选择数量不超过 H 。

进化算法:

上述模型为 0-1 整数规划模型, 但由于约束多采用集合形式, 利用成熟的通用算法求解困难, 必须针对问题特点设计近似求解算法。进化算法是在种群遗传和自然选择理论的基础上, 模拟生物在进化过程中适者生存的法则, 以及种群内部染色体 DNA 随机交换的一类自适应全局搜索算法, 在工程技术、计算机科学、管理科学和社会科学等众多领域中得到广泛应用, 适用于该问题的求解。算法流程图如图 5 所示, 算法关键技术实现如下:

(1) 变量编码: 采用实数编码, $Y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_i, \dots, y_N)$, 其中 $y_i \in p_i$, 其对应操作序列包含的指令总数量 $f(Y) = \sum_{i=1}^N m_{y_i}$, 其中 N 为待提箱总数。利用阶段二构建的移箱路径冲突集合对其进行可行性检验; 用 $K(Y)=0$ 或 1 表示该操作序列的可行性。

(2) 初始种群的生成: 利用 n 组满足 $y_i \in p_i$ 的随机数生成初始个体和群体

(3) 适应值函数: $F(Y) = (2 \cdot N - f(Y)) \cdot [a_1 \cdot K(Y) + a_2 \cdot (1 - K(Y))]$, 若 $2N - f(Y) \geq 0$; $=0$, 否则; 其中 $a_1 > 1$, $0 < a_2 < 1$, 分别为可行解奖励系数和不可行解惩罚系数。

(4) 交叉运算: 采用单切点交叉策略, 从群体中选出 2 个独立个体 P_1 和 P_2 , 随机选择一个交叉点, 交叉点取值范围为 $[1, N-1]$, 将交叉点两侧分别当作 2 个子串, 将右侧的子串进行交换, 得到两个全新的个体 C_1 和 C_2 。交叉概率 P_c 取 0.85。

(5) 变异运算: 在个体中任选一个基因位, 按照变异概率 P_m 将其位值 y_i 改为 y'_i , $y'_i \in p_i$ 且 $y'_i \neq y_i$ 。变异概率 P_m 取 0.1。

(6) 选择策略: 采取正比选择策略, 即每个个体被选中进行交叉运算的概率为本身适应值和群体所有个体适应值总加和的比值。对于个体 j , 设其适应值为 F_j , 种群规

模为 M ，则该个体的选择概率为： $P_j = F_j / \sum_{z=1}^M F_z$ 。获得选择概率后，采用轮赌法来实现选择操作，令 $PP_0 = 0$ ， $PP_j = \sum_{z=1}^j P_z$ ，随机产生 $\xi \in U(0,1)$ ，当 $PP_{j-1} \leq \xi \leq PP_j$ 时，选择个体 j 。

(7) 子代种群生成：采用 (6) 中方法在种群中选择 $M/2$ 对个体按 (4)、(5) 中的方法进行交叉、变异运算，并用父代种群中 $F(Y)$ 值最大的个体替换新子代个体中 $F(Y)$ 值最小的个体，得到的新一代种群。

(8) 停止准则：迭代次数达到最大代数 NG 时，算法终止，输出当前群体中 $F(Y)$ 值最大的个体所对应的操作序列即为最终优选结果。

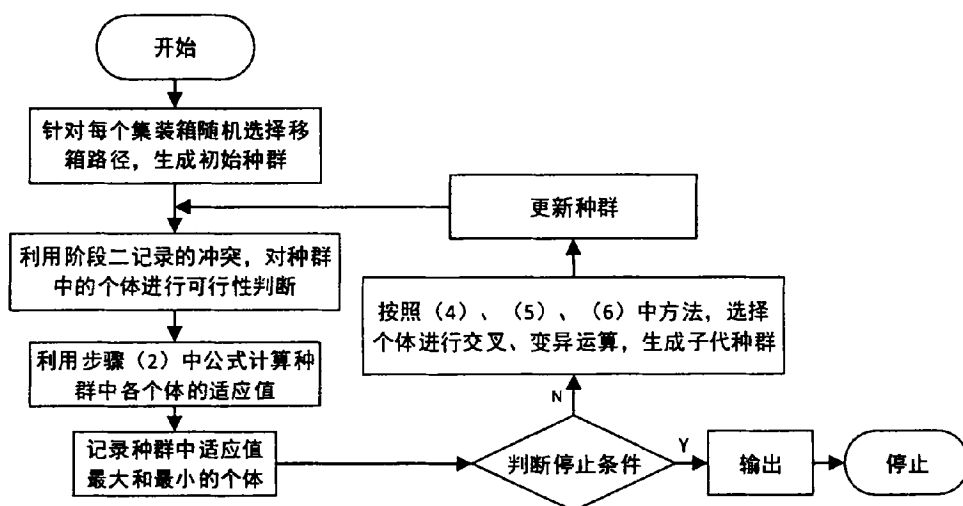


图 5.4 遗传算法流程图

Fig.5.4 The genetic algorithm flowchart

5.3 实验分析

利用模拟仿真对本论文所提出的启发式算法和文献[7]所提出的启发式 OH 算法进行对比分析。利用均匀分布生成贝内集装箱，并随机生成其提箱次序，形成实验算例。实验平台为 CPU Pentium(R)D3.19GHz/2G，算法采用 C++开发。实验对不同贝位规模，即不同栈数量×额定堆存高度（栈×层）的不同组合，随机分别生成一百个算例，对于每一个算例分别用 OH 算法和本文算法进行求解。表 1 给出了两种算法求解得到的平均

翻箱量及所需的平均 CPU 消耗时间，其中翻箱量下限=阻碍箱数+总箱量。表 2 给出了 OH 算法和本文算法相对于翻箱量下限的平均误差、最大误差以及本文算法对 OH 算法的改进程度。

从表 5.1 和表 5.2 中可以看出，本文算法虽然平均耗时略大于算法 OH，但求解效果明显优于文献[7]所提出的启发式算法 OH，随着问题规模的变大，效果越明显，当 7×5 时相对 OH 算法改进超过 20%。，表明本文算法充分利用提箱次序信息对翻倒箱可能的翻箱路径进行搜索优化，可有效避免翻箱量估计的误差影响。在算法时间消耗方面，本文算法对较大规模贝（30 个箱）的求解时耗仅为 4s，满足提箱时的实际求解要求。

表 5.1 本文算法与 OH 算法求解 100 个实例所得平均翻箱量和平均计算时间
Table.5.1 Average number of reshuffle and average calculation time of 100 instances

栈×层	箱量	翻箱量下限	OH 算法		本文算法	
			平均翻箱数	平均耗时(s)	平均翻箱数	平均耗时(s)
4×3	10	3.26	4.32	0.02	4.25	0.96
5×4	16	6.78	10.45	0.04	9.05	1.58
6×5	25	12.46	32.54	0.07	17.7	2.03
7×5	30	15.08	39.71	0.08	21.78	3.97
9×5	40	20.69	59.94	0.14	28.83	8.05
11×5	50	25.95	76.20	0.16	35.39	12.37
13×6	70	39.94	141.5	1.61	59.27	34.96

表 5.2 本文算法与 OH 算法求解 100 个实例所得平均相对误差和最大相对误差
Table.5.2 Average relative error and maximum relative error of 100 instances

栈×层	箱量	OH 算法平均 相对误差	OH 算法最大 相对误差	本文算法平均 相对误差	本文算法最 大相对误差	平均改进程度
4×3	10	32.52%	133.33%	30.37%	100.00%	1.62%
5×4	16	54.13%	125.00%	33.48%	84.71%	13.40%
6×5	25	80.90%	187.50%	42.05%	85.18%	21.47%
7×5	30	97.02%	261.54%	44.43%	91.67%	26.69%
9×5	40	91.98%	272.73%	39.34%	105.26%	27.42%
11×5	50	101.31%	285.71%	36.38%	82.35%	32.25%
13×6	70	123.91%	309.89%	48.40%	94.59%	33.72%

注：1)相对误差=(启发式算法-翻箱量下限)/翻箱量下限；2)平均改进程度=(OH 算法-本文算法)/OH 算法

为对两种启发式算法的求解效果的稳定性进行对比，图 6 和 7 给出了各种规模下，本文算法与 OH 算法对一百个算例进行求解所得翻箱量与其下限之差的分布图，其中横

坐标为算例号。可以看出，本文算法的稳定性明显优于 OH 算法，而且随着问题规模变大，优势越发显著。

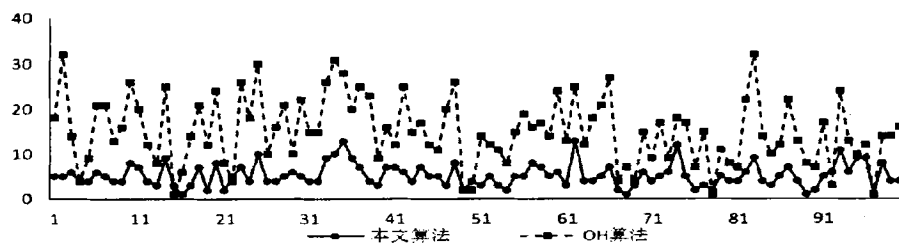


图 5.5 6×5 时算法所得翻箱量与其下限之差分布对比图

Fig.5.5 The difference of reshuffle under 6×5 distribution

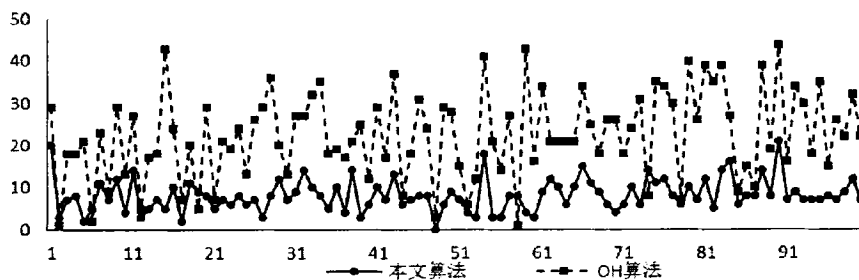


图 5.6 9×5 时算法所得翻箱量与其下限之差分布对比图

Fig.5.6 The difference of reshuffle under 9×5 distribution

5.4 本章小结

针对集装箱港口进口提箱过程的翻箱落位优化问题，本章提出了基于虚拟路径的翻箱落位优化的三阶段启发式算法，来降低二次翻箱率。算法首先通过规则产生初始可行的集装箱操作序列，然后利用阻碍箱的虚拟翻箱构建虚拟移箱路径，构建移箱路径冲突集合，在此基础上建立虚拟移箱路径的组合优化 0-1 规划模型，并开发了进化求解算法，实验结果表明：本文算法在解的效果和稳定性上均明显优于文献[7]的 OH 算法，且随着问题规模变大，优势越发明显，贝内 30 个集装箱箱时改进程度超过 20%。

结 论

随着世界经济的全球化,以集装箱形式运输货物必将成为主流趋势,各港口在增加集装箱吞吐量的同时,必须要提高服务效率,而集装箱翻箱作业对改善港口服务质量有至关重要的作用。本文对集装箱码头进出口作业过程中的翻箱问题进行了系统的分析,针对港口出口收箱作业建立了出口箱位优选模型和混堆模式下的干扰管理模型,针对进口提箱作业开发了基于虚拟路径的翻箱落位优选的启发式算法,并通过实验算例验证了本文研究的可行性与有效性,主要研究成果如下:

(1) 针对预约交箱机制下集装箱堆场箱位优选问题,提出了交箱次序与箱位分配的图表示法,基于图表示提出了压箱量和龙门吊大车行驶距离的期望的求解方法。在此基础上构建了基于图的集装箱堆场出口箱位优选模型,优化堆场龙门吊行车成本和压箱量。考虑图表示模型特点开发了禁忌搜索算法,利用图表示特性缩小搜索空间和优选搜索方向,提高了收敛速度。实验表明,提出的算法能够在合理的时间内获得满意解,较确定性模型减少堆场作业成本 20%以上。

(2) 针对集装箱混堆模式堆场出口收箱作业调度易受干扰问题,考虑不确定事件的作业干扰影响,从两个不同的角度分别提出了出口收箱序列的干扰识别与扰动度量方法;建立了考虑关联扰动影响的出口箱位优选干扰管理模型,利用箱位偏离目标优化干扰影响,利用压箱量和龙门吊行驶距离目标优化收箱作业成本;考虑干扰恢复求解的不均衡性特点,设计了基于局部加速的禁忌搜索算法,利用局部搜索邻域控制搜索方向和范围,提高收敛效率,试验算例较重调度节约成本 10%以上。

(3) 针对集装箱港口进口提箱过程的翻箱落位优选问题,本文提出了基于虚拟路径的翻箱落位优选的三阶段启发式算法,来降低二次翻箱率。算法首先通过规则产生初始可行的集装箱操作序列,然后利用阻碍箱的虚拟翻箱构建虚拟移箱路径,构建移箱路径冲突集合,在此基础上建立虚拟移箱路径的组合优化 0-1 规划模型,并开发了进化求解算法,实验结果显示本文算法在求解的精确度和稳定性上均明显优于文献[7]的 OH 算法,且随着问题规模变大,优势越发明显,贝内达到 30 个集装箱时改进程度超过 20%。

虽然本文在集装箱码头翻箱问题方面做了一定的研究,获得了一些有价值的成果,但集装箱码头堆场作业系统是一个统一的整体,涉及到箱位分配、翻箱落位、集卡调度、装船次序、船舶配载、岸桥调度等多个方面,本文研究的问题也只是其中一部分问题,由于个人时间与经历有限,无法对全部问题进行细致完善的研究,针对本课题,笔者提出几个未来的研究方向:

(1) 本文提出的进口箱位优选的图表示方法中的一些结论, 仅对其进行了定性分析, 在以后的研究中, 可以从理论上系统地分析图表示的本质, 将本文结论定量化, 从而为箱位优选的算法提供新的思路。

(2) 本文在仅针对混堆模式下出口箱位优选进行了干扰管理建模, 在今后的工作中, 可以同时考虑出口收箱作业和进口提箱作业中的扰动因素, 从而进行干扰因素的识别、度量及建模, 以丰富和完善混堆模式下堆场作业的干扰管理研究。

(3) 在针对进口提箱的翻箱落位优选启发式算法中, 本文仅添加了含两个操作指令的虚拟路径, 若添加多个操作指令的虚拟路径, 其路径的栈冲突不再限于两者之间。在今后的研究中, 可考虑添加多个操作指令的虚拟箱, 对虚拟路径间的冲突进行系统的研究, 以丰富完善翻箱落位优选的启发式算法。

参 考 文 献

- [1] 张艳, 韩晖. 降低集装箱码头堆场翻箱率[J]. 集装箱化, 2008, 19(4): 8-9.
- [2] Zhang C. Resource planning in container storage yard[M]. 2000.
- [3] 周鹏飞. 面向不确定环境的集装箱码头优化调度研究 [D]. 大连理工大学博士学位论文, 2005.
- [4] Kim K H. Evaluation of the number of rehandles in container yards[J]. Computers & Industrial Engineering, 1997, 32(4): 701-711.
- [5] Kim K H, Kim H B. Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals[J]. International Journal of Production Economics, 1999, 59(1): 415-423.
- [6] Dekker R, Voogd P, van Asperen E. Advanced methods for container stacking[M] // Container terminals and cargo systems. Springer Berlin Heidelberg, 2007: 131-154.
- [7] Kim K H, Hong G P. A heuristic rule for relocating blocks[J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(4): 940-954.
- [8] 徐亚, 陈秋双, 龙磊, 等. 集装箱倒箱问题的启发式算法研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(14): 3666-3669.
- [9] Caserta M, Voß S, Sniedovich M. Applying the corridor method to a blocks relocation problem[J]. OR spectrum, 2011, 33(4): 915-929.
- [10] Lee Y, Lee Y J. A heuristic for retrieving containers from a yard[J]. Computers & Operations Research, 2010, 37(6): 1139-1147.
- [11] 周鹏飞, 李丕安. 集装箱堆场进口箱翻箱落位仿真分析与启发式优选算法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(12): 3145-3155.
- [12] Zhao W, Goodchild A V. The impact of truck arrival information on container terminal rehandling[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010, 46(3): 327-343.
- [13] Kim K H, Park Y M, Ryu K R. Deriving decision rules to locate export containers in container yards[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 124(1): 89-101.
- [14] Zhang C, Chen W, Shi L, et al. A note on deriving decision rules to locate export containers in container yards[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 205(2): 483-485.
- [15] Kang J, Ryu K R, Kim K H. Deriving stacking strategies for export containers with uncertain weight information[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2006, 17(4): 399-410.

- [16] 杨淑芹, 张运杰. 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: 自然科学版, 2002, 28(B08): 115-117.
- [17] 陈庆伟, 王继荣. 集装箱堆场出口箱堆存模型及其算法[J]. 物流科技, 2007, 30(7): 106-108.
- [18] 谢尘, 何军良, 茆道方. 基于混堆模式的集装箱码头出口箱进场选位策略[J]. 上海海事大学学报, 2008, 29(4): 70-75.
- [19] 张艳伟, 石来德, 宓为建, 等. 集装箱码头出口箱集港堆存模型研究[J]. 中国工程机械学报, 2007, 5(1): 32-38.
- [20] 沈剑峰, 金淳, 高鹏. 基于知识的集装箱堆场箱位分配计划研究 [J][J]. 计算机应用研究, 2007, 24(9): 146-151.
- [21] Salido M A, Rodriguez-Molins M, Barber F. Integrated intelligent techniques for remarshaling and berthing in maritime terminals[J]. Advanced Engineering Informatics, 2011, 25(3): 435-451.
- [22] Park T, Choe R, Kim Y H, et al. Dynamic adjustment of container stacking policy in an automated container terminal[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 133(1): 385-392.
- [23] Kozan E, Preston P. Mathematical modelling of container transfers and storage locations at seaport terminals[J]. OR Spectrum, 2006, 28(4): 519-537.
- [24] Preston P, Kozan E. An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals[J]. Computers & Operations Research, 2001, 28(10): 983-995.
- [25] 张维英, 林焰, 纪卓尚, 等. 出口集装箱堆场取箱作业优化模型研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2006, 30(2): 314-317.
- [26] Clausen J, Larsen J, Larsen A, et al. Disruption management-operations research between planning and execution[R]. 2001.
- [27] Yu G, Qi X. Disruption management: framework, models and applications[M]. World Scientific, 2004.
- [28] Qi X, Bard J F, Yu G. Supply chain coordination with demand disruptions[J]. Omega, 2004, 32(4): 301-312.
- [29] Qi X, Bard J F, Yu G. Disruption management for machine scheduling: the case of SPT schedules[J]. International Journal of Production Economics, 2006, 103(1): 166-184.
- [30] 胡祥培, 丁秋雷, 张漪, 等. 干扰管理研究评述[J]. 管理科学, 2007, 20(2): 2-8.
- [31] 胡祥培, 张漪, 丁秋雷, 等. 干扰管理模型及其算法的研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(10): 40-46.

- [32] Ping L, Bing X, Xin-Yi G. Research on forecast model of schedule risk for project of uncertain network[C]//Engineering Management Conference, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International. IEEE, 2004, 2: 812-814.
- [33] Ehrhoff J, Grothklags S, Lorenz U. Playing the Repair Game: Disruption Management and Robust Plans[J]. Dynamically Evolving, Large2scale Information Systems, 2004.
- [34] 王旭坪, 牛君, 胡祥培, 等. 车辆路径问题的受扰救援策略[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 12(1): 104-110.
- [35] Løve M, Sørensen K R, Larsen J, et al. Disruption management for an airline—rescheduling of aircraft[M]//Applications of Evolutionary Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2002: 315-324.
- [36] 王京元, 程琳. 最短路拍卖算法在交通分配中的应用[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(6): 79-82.
- [37] Li J Q, Mirchandani P B, Borenstein D. Parallel auction algorithm for bus rescheduling[M]//Computer-aided Systems in Public Transport. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 281-299.
- [38] 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): 2026-2035.
- [39] 杨春霞, 王诺. 集装箱码头泊位分配干扰管理决策方法研究[J]. 运筹与管理, 2011 (4): 90-95.
- [40] 林庆福, 胡志华, 陶莎. 集装箱码头泊位-岸桥集成分派干扰管理的 分层调整策略[J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2014, 33(3): 133-139.
- [41] 陈智. 中小码头堆场翻箱问题优化模型及优化设计[D]. 武汉理工大学, 2010.
- [42] 张艳, 韩晖. 降低集装箱码头堆场翻箱率[J]. 集装箱化, 2008, 19(4): 8-9.
- [43] Giuliano G, O' Brien T. Reducing port-related truck emissions: The terminal gate appointment system at the Ports of Los Angeles and Long Beach[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2007, 12(7): 460-473.
- [44] Namboothiri R, Erera A L. Planning local container drayage operations given a port access appointment system[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2008, 44(2): 185-202.
- [45] Zhao W, Goodchild A V. The impact of truck arrival information on container terminal rehandling[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010, 46(3): 327-343.
- [46] 计三有, 高悦文. 集装箱堆场减少倒箱率方法研究[J]. 水运工程, 2006 (8): 53-56.
- [47] 周鹏飞, 方波. 动态环境下集装箱码头堆场出口箱箱位分配建模与算法研究[J]. 控制与决策, 2011, 26(10): 1571-1576.

攻读硕士学位期间发表学术论文情况

- 1 基于虚拟路径的进口箱翻箱落位启发式算法. **赵金秋**, 周鹏飞. 中国水运, 2016 年, 5 期: 109-112. 主办单位: 中华人民共和国交通运输部。(本硕士学位论文第五章)
- 2 集装箱混堆模式堆场的出口箱位优选干扰管理模型及算法. 周鹏飞, **赵金秋**, 尚尔进. 哈尔滨工程大学学报(已录用, 待发表). 主办单位: 哈尔滨工程大学. EI 检索期刊。(本硕士论文第 4 章)
- 3 基于预约和图表示的集装箱堆场出口箱位优选模型与禁忌搜索算法. 周鹏飞, **赵金秋**, 尚尔进. 系统工程理论与实践(审稿中). 主办单位: 中国系统工程学会. EI 检索期刊。(本硕士论文第 3 章)
- 4 干扰管理的禁忌搜索算法. 周鹏飞, **赵金秋**. 系统工程与电子技术(审稿中). 主办单位: 中国航天科工防御技术研究院、中国宇航学会、中国系统工程学会. EI 检索期刊。(本硕士论文第 4 章)

致 谢

2013年9月我满怀梦想来到大连理工大学,开始了我日思夜想的研究生求学之路,几经春秋,我真切感受到了大工浓郁的学习气氛,我觉得我是幸运的,感谢大连理工为莘莘学子提供的优雅的学习和科研氛围,这里有数不清的名家讲座,细心指导的老师教授和比较全面的文献数据库,让我终身受益。

感谢我的导师周鹏飞老师,他严谨的科研态度、严肃的治学精神、一丝不苟的工作作风深深的感染、激励这我。当科研遇到瓶颈时,老师总会停下手上的工作,耐心细致的与我一起探讨相关问题,一遍遍讲解相关知识,不断启发我,让我更深刻的理解问题。从论文的选题到研究工作的完成,老师不仅在大方向上给予悉心的知道,而且在具体问题的处理上也提出了许多实用的建议;老师对科学严谨的态度和对科研的全身心投入是我学习的榜样。在此向周老师这三年来对我科研上悉心的指导和生活上无微不至的关怀表示由衷的感谢!

感谢父亲、母亲的养育之恩和爷爷、奶奶无私的照顾,是他们辛勤的付出,培养我走上研究生的求学之路;感谢身居全国各地的王慧娟、刘迅、王千里、秦敏峰、张真波、万伟、吴猛等好友,一直摸摸地在背后支持我,关心我。他们是我最近的人,每当我遇到挫折和困难时,是他们安慰我、鼓励我,给予我巨大的精神支持,让我重新充满信心去克服困难,由衷感谢这一路他们的陪伴!

感谢师兄王开放、师姐杨云在研究生的前两年给予我的诸多帮助和启发;感谢同窗的耿璘,在迷茫的时候相互交谈,使我受益匪浅,感谢师弟尚尔进在科研中给予的编程帮助;感谢师弟刑小伟、吕梦华、李玉登、石少宝在课题研究中问题的探讨上提供的建议和启发,以及生活中的关照;感谢一个教研室的李强、史奔俊、刘崇期、于海鹏、唐玉元、李霆,他们或多或少都给了我帮助,很珍惜和他们一起学习生活的点点滴滴,他们身上都有许多优点,使我终身受益;感谢港工13级1班的全体同学,一起走过的1000多个日日夜夜都是难忘的,能够与你们相遇,是我最大的荣幸。

再次由衷的感谢我的导师及提到或因疏忽未提到的所有给予过我支持、帮助、鼓励的老师、亲人、同学、朋友,谢谢你们!

最后,要感谢评阅本论文和出席学位论文答辩会的各位专家,感谢你们给予的指导!

大连理工大学学位论文授权使用授权书

本人完全了解学校有关学位论文知识产权的规定，在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于大连理工大学，允许论文被查阅和借阅。学校有权保留论文并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印、或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文题目：集装箱码头翻箱问题建模与优化研究
作者签名：赵金秋 日期：2016 年 6 月 12 日
导师签名：周明 日期：2016 年 6 月 12 日