

分类号 _____

密 级 _____

U D C _____

单位代码 10151

大 连 海 事 大 学

硕士学位论文

某集装箱码头堆场场桥资源配置优化研究

(学位论文形式：应用研究)

刘 鑫

指 导 教 师

曾庆成

职 称

教授

学位授予单位

大 连 海 事 大 学

申请学位类别

硕士（专业学位）

学科（专业）

工商管理（MBA）

论文完成日期

2015 年 1 月

答辩日期

2015 年 6 月

答辩委员会主席



**The Research of Optimizing the Deployment of RTGs in
TPG's Certain Container Terminal**



**A thesis Submitted to
Dalian Maritime University
In partial fulfillment of the requirements for the degree of
Master of Business Administration**

**by
Liu Xin
(Business Administration)**

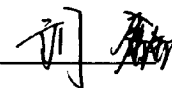
Thesis Supervisor: Professor Zeng Qingcheng

January 2015

大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：本论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，撰写成博/硕士学位论文 “某集装箱码头堆场场桥资源配置优化研究”。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表或未公开发表的成果。本声明的法律责任由本人承担。


学位论文作者签名： 

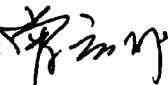
学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解大连海事大学有关保留、使用研究生学位论文的规定，即：大连海事大学有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连海事大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。同意将本学位论文收录到《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》（中国学术期刊（光盘版）电子杂志社）、《中国学位论文全文数据库》（中国科学技术信息研究所）等数据库中，并以电子出版物形式出版发行和提供信息服务。保密的论文在解密后遵守此规定。

本学位论文属于： 保 密 ☐ 在 _____ 年解密后适用本授权书。

不保密 ☒ （请在以上方框内打“√”）

论文作者签名： 

导师签名： 

日期： 2015 年 5 月 8 日

摘 要

随着集装箱码头专业化程度的不断提高,衡量其综合作业水平高低的标准,也已由过去的单一注重码头船舶作业效率,进一步深化为注重直接影响船舶装卸速度的码头堆场作业。同时,成熟的集装箱码头运营理念也已由以往通过粗放式作业资源配置来单纯追求效率,逐步转变为如何通过对作业资源进行集约式管理,来实现在作业效率不受影响的同时降低单箱现金成本的目标。因此,探索如何结合实际生产情况对码头作业资源,尤其是堆场的场桥作业资源进行优化配置,将对促进码头企业整体运营效益的不断提升起到十分积极的借鉴作用。

本文在对相关研究现状及研究方法进行分析和总结的基础上,结合集装箱码头及其堆场的作业计划、装卸工艺等方面的理论与实践,从对堆场场桥作业状况展开分析出发,对如何提高堆场场桥作业资源利用率,减少作业资源的限制展开研究,以期实现对场桥作业资源进行优化配置的目标。通过根据集装箱码头不同时段堆场箱区的作业量在各箱区间分配场桥,在考虑码头前沿船舶装卸作业情况的同时,综合平衡岸桥及堆场场桥的作业量,减少岸桥的等待时间,通过建立场桥多目标的混合整数规划模型,来计算对场桥资源配置优化后所场桥跑位时间及最小作业完成时间的变化。针对本模型的双目标规划特点,通过对常用智能优化算法的比选,设计出基于遗传算法的启发式算法并求解,得到最优场桥配置方案的帕累托最优解集。最后结合天津港某集装箱码头的实际作业数据进行实证分析,验证了本文算法和模型的有效性,并结合实际生产情况,为码头作业提供了场桥资源在不同条件下的优化配置方案。

对天津港某集装箱码头实际作业数据的实证分析,验证了本文所设计的遗传算法及多目标混合整数规划模型的有效性,并通过帕累托最优解集,得出等效的不同优化方案,不仅为码头生产计划及调度指挥提供了在不同作业需求条件下进行资源优化配置的方案,更为码头企业实现整体运营效益的进一步提升提供了重要的理论依据和实践参考。

关键词: 集装箱码头; 场桥配置; 智能优化算法; 帕累托最优法

ABSTRACT

With the unceasing enhancement of container terminal professional level, the measurement criterion has deepening into the yard operation, which directly influences the vessel operation efficiency. Meanwhile, the operation idea of mature container terminal has also changed from the extensive resources allocation, which in order to pursuit the efficiency only, to the operation of resource intensive management, which focus on keeping current operation efficiency together with the reduction of currency cost per box(CCPB). Therefore, to explore how to optimize the resources of RTG allocation optimization, will play a very positive role to continuously promote the overall operating efficiency for port enterprises.

Based on the analysis of the relevant researching, and combining the practice of container terminal yard operation process, the paper starts from the analysis of RTG operation condition, researching how to improve the utilization rate of RTG, in order to achieve the goal of optimizing the allocation of the RTG resources. The distribution of RTG is based on the orders amount in different time period; a good balance of the quay crane and RTG could reduce the vessel waiting time. By establish a mixed integer programming model, the calculation of the RTG changes both in moving time and minimum operation time could be make to optimize the allocation of resources. According to the characteristics of the double goal programming model, the heuristic algorithm is designed on the genetic algorithm basis by comparison of the common intelligent optimization algorithms, in order to obtain the optimal solution set of Pareto optimal allocation scheme of the RTG. At last, through the empirical analysis by combining with the actual operation data of a certain terminal of Tianjin port, the effectiveness of this model and algorithm has been verified, meanwhile, combine with the actual production situation under different conditions, the RTG resource configuration optimization scheme also has been provided.

By the empirical analysis of the actual data from Tianjin port, the model effectiveness which designed by this paper has been verified, and according to the Pareto optimal allocation scheme, the various plans with same effect have been obtained, which not only provides the optimized resources allocation plans for terminal in different conditions, but also provides a essential theory and reference for port

enterprises to improve the overall operation effectiveness.

Key Words: Container terminal; RTG configuration; Intelligent optimization algorithm; Pareto optimal method

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的及意义	1
1.2.1 研究目的	1
1.2.2 研究意义	2
1.3 国内外研究综述	3
1.3.1 堆场资源配置的研究现状	3
1.3.2 多环节混合调度研究现状	5
1.4 研究的内容及思路	6
1.4.1 研究内容	6
1.4.2 研究思路	7
第 2 章 集装箱码头堆场概述	8
2.1 集装箱码头概述	8
2.1.1 集装箱码头功能	8
2.1.2 集装箱码头布局	9
2.1.3 集装箱码头作业计划分析	10
2.2 集装箱堆场概述	13
2.2.1 集装箱堆场功能	13
2.2.2 集装箱堆场布局	14
2.2.3 集装箱堆场作业资源	14
2.2.4 集装箱堆场装卸工艺	15
第 3 章 集装箱码头场桥资源配置问题分析	17
3.1 集装箱码头场桥资源优化配置概述	17
3.1.1 资源优化配置的内涵	17
3.1.2 集装箱码头场桥资源优化配置的内涵	17
3.2 集装箱码头场桥资源配置信息技术现状	18
3.3 集装箱码头场桥资源配置问题的关键	19
3.3.1 堆场场桥的配置	19
3.3.2 堆场岸桥的协同调度	19
3.4 集装箱码头场桥资源优化配置方法理论介绍	19
3.4.1 智能优化算法综述	20
3.4.2 优化算法的比较分析	21

3.4.3 遗传算法概述	23
3.4.4 研究方法确定	25
第4章 集装箱码头场桥资源优化配置模型	27
4.1 问题描述	27
4.2 优化模型	28
4.2.1 变量定义	28
4.2.2 模型假设	28
4.2.3 模型构建	29
4.3 模型求解	30
4.3.1 染色体编码	30
4.3.2 种群初始化	31
4.3.3 适应度函数	31
4.3.4 选择交叉变异	32
4.3.5 非支配及拥挤度	33
第5章 基于天津港的码头场桥资源优化配置实证分析	35
5.1 天津港概况	35
5.2 某码头堆场现状分析	35
5.3 数据搜集	36
5.3.1 场桥在箱区间的移动时间	36
5.3.2 各箱区作业量分析	38
5.3.3 场桥初始位置图	39
5.4 优化结果分析	39
5.4.1 帕累托最优集	39
5.4.2 场桥的配置状况	42
5.4.3 场桥的移动时间分析	42
5.4.4 作业完成时间分析	43
5.5 优化结果在场桥资源配置实践中的应用	43
5.5.1 帕累托最优集的实际应用	43
5.5.2 实际作业情况下对最优集的取舍	44
第6章 结论	45
参考文献	46
致 谢	50

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

随着集装箱航运的飞速发展、专用集装箱船舶的不断超大型化演变以及船公司趋于联盟化的运营模式，在整合挂靠港口后，停靠大型腹地型或中转型港口的集装箱船舶，其单航次卸船及装船口作业总量由较早的 1000TEU 左右激增至 8000-10000TEU，为进一步压缩船舶的在港停时，降低运营成本，船公司相应对码头作业效率尽快提升的需求也日益迫切。集装箱船舶的在港停时和集装箱码头的吞吐量大小直接取决于码头岸桥的作业效率，而堆场作业机械的科学配置与调配又直接影响着最终装船的岸桥作业能力能否得以充分发挥，因此对堆场场桥的配置与调度方案进行优化具有非常重要的现实意义。

集装箱码头整体作业过程中最为复杂的环节即为堆场作业，堆场资源调配能力的高低可以说直接决定了码头岸边作业的效率，而码头岸边作业效率的高低，又从根本上决定了通过码头的集装箱物流能否实现更科学、更经济的目标^[1]。对于新建集装箱码头，若想对码头作业工艺系统进行有效的优化，关键在于选择与码头实际作业情况相适应的工艺系统。我国目前的绝大部分集装箱码头，基本全部采取轮胎式场桥作业，同时部分配合正面吊、空箱叉等设备，对于水平运输作业则选择半挂式集卡拖车和底盘车^[2]。对于已投产的专业集装箱码头，则只能通过对有限的既定场桥作业资源进行科学的优化配置里来实现提升码头整体作业工艺系统效能的目标。

然而，现今的集装箱码头作业过程中，人员岗位技能、岗位经历甚至个人偏好等主观因素对生产资源配置决策仍起着关键的作用，而诸如场桥等各类设备资源的配置、调配方案以及路径优化等方面几乎均停留在经验管理的阶段。同时，与集装箱码头生产调配相关的学术研究中专门涉及场桥资源优化配置的研究的还不多见。

1.2 研究目的及意义

1.2.1 研究目的

堆场资源优化是集装箱码头十分难以解决的问题，随着双 40 尺双小车岸桥乃

至三 40 尺双小车岸桥在码头的应用，船舶装卸效率得以大幅提高，与此同时，堆场作业就成了影响船舶装卸作业效率的关键瓶颈^[3-6]。通过堆场资源优化可以提高场桥装卸效率^[7]、减少场地内的翻捣量^[8-11]、减少集卡运行距离^[12-15]，最终实现码头的综合作业效率的大幅提升。

对于码头纷繁的决策优化问题，往往难以面面俱到，本文则以集装箱码头堆场作业机械配置的优化策略为主要对象进行深入的理论研究。本文的研究目的为：从集装箱码头的堆场资源配置需求出发，应用如计算机仿真、多目标决策理论以及智能优化等诸多方法，对集装箱码头堆场作业机械的配置策略优化进行深入研究，以充分发挥岸边装卸效率为目标，建立综合多个作业节点的集装箱码头堆场机械配置及调度模型，同时设计了相应的求解计算方法，以力争为集装箱码作业资源配置优化策略的制定提供合理、科学的手段，进而提高码头资源配置水平和提升生产效率，进一步降低运营成本。

1.2.2 研究意义

超大型集装箱船舶的相继投入使用，使码头装卸效率成为集装箱运输链条中的最大瓶颈，怎样提高集装箱码头的堆场装卸效率以满足集装箱运输高效率的需求已经成为许多港口乃至国家的重要研究项目。我国码头的综合管理水平相比发达国家仍存在较大差距，同等规模的码头，其吞吐能力尚远低于国外，而仅靠加大设备投入并不是最优选择，因此码头如想在现有技术和设备的基础上达到更高的装卸作业速度，则务必通过对目前资源(如堆场、场桥、拖车和工人等)的合理搭配来进一步提升码头的综合作业能力^[16-20]。

堆场管理是现代化集装箱整体码头生产链条中的关键环节，在整体作业中的作用十分重要。当一个码头的规模大小、设施配置等条件基本落实后，如何提高堆场的作业水平则成为目前集装箱码头最必要研究的项目之一。合理设计堆场作业，出了可以有效减少场地翻捣率，直接提升岸边作业速度，还能极大促进码头堆场利用率的提升，对码头综合管理水平的提高具有重大的实际意义。通常码头在实现堆场管理进一步完善的同时，总会面临如翻捣、场地作业冲突、缺乏高技能管理和技术方面人才等问题，这都严重影响着堆场管控水平。

对集装箱码头资源进行优化的相关研究不仅需用到运筹科学与管理科学，更

与人工智能的优化技术等诸多相关学术领域相关，虽然该领域的研究历时较长，同时也有部分应用于实践，但怎样做到充分利用码头各种既有资源，不断适应船舶的超大型化趋势，提供船舶在泊期间的快速装卸服务以及应对生产调度过程中的大量不确定因素，始终是研究人员所面临的一项艰巨且长远的任务。集装箱码头中关于机械配置的相关研究涉及多个下属子问题，每个下属子问题又都综合了码头相关作业的诸多环节，其复杂及多变程度往往不是单单一种优化方法所能有效应对的。本文在研究中联合运用了诸如多目标决策理论、相关的运筹学经典算法、计算机仿真模拟、启发式算法、遗传算法、强化学习等多种方法，同时对不同下属子问题的求解特点进行了相应的优化。本文对集装箱码头作业资源配置优化方面的探索具有一定程度的理论指导意义。

当前我国部分大型集装箱码头在配套的信息化生产管理方面达到了一定的水平，也采用了很多方法，如码头生产操作系统软件的自主研发或采购、电子智能通关系统和区域 4G 无线网络的搭建等，但在码头场桥资源的合理配置及任务充分安排及既定场桥资源的运行路径完善等诸多方面还大多停留在经验管理的阶段。

由于码头生产由下属各个子系统综合构成，包括泊位分配系统，堆场管控系统等，因此集装箱码头的综合效率是由下属各个子系统中最低的效率决定的，堆场作为码头生产环节中的一个关键子系统，其能否高效完成既定计划任务则直接决定了整个码头的综合效率，而堆场作业能否高效实现又取决于场桥资源的合理配置，因此有必要对场桥作业资源的合理配置进行深入研究。通过本文的研究方法和相关结论，可以尝试与集装箱码头中的相关管理信息系统相融合，从而开发出嵌入式的资源配置优化决策支持工具，并结合生产系统数据库中海量数据生成调配优化方案，进而为管理者的决策提供数据依据，具有很高的实践应用价值。

1.3 国内外研究综述

1.3.1 堆场资源配置的研究现状

堆场资源通常包含空间及设备资源。空间及设备资源共同影响着集装箱码头的堆场作业成本及作业效率，因此，对于集装箱码头堆场的相关研究一直是业界及学者们高度关注的问题。

目前国内外学者就如何利用既定的堆场空间来码箱, 在提高堆场利用率的同时减少翻捣等问题开展了大量研究。受船舶各航次载箱量与集港时间的影响, 堆场的堆存计划直接影响集装箱的翻捣次数, 过多的翻捣直接降低了堆场的装卸效率, 进而影响船舶装卸时间。De Castihno and Dagano 等^[21]研究了如何堆放进口箱, 其中的一种方法是按船舶的先后进港时间堆码, 另一种是按照箱型大小堆码。Kim 等^[22]研究了堆场进口箱区的集装箱堆存问题, 通过建立模型得出了堆存高度对翻箱量的影响, 并分析了不同集卡到达模式下, 如何堆放集装箱减少翻箱次数, 最后用拉格朗日松弛方法求解模型。Kap Hk 等^[23]建立模型, 优化了集装箱码头堆场箱位分配问题, 以减少翻箱次数及场桥移动距离为目标。Kim 等^[24]研究了如何对出口箱进行堆码的问题, 减少堆场翻捣。李建忠等^[25]用动态分配的方法研究了堆场箱位分配问题, 并将整个时间分成三个阶段进行分配, 每一个阶段均有决策目标, 对不同的堆场堆存集装箱问题具有普遍适用性。

上述国内外学者的研究主要是针对如何高效使用堆场空间资源方面而展开的, 除此之外, 堆场场桥作业资源的配置情况也直接影响堆场的装卸效率。集装箱堆场的作业资源配置主要指场桥的配置, 场桥在堆场装卸集装箱, 根据作业需要在堆场箱区间移动。通过有效的配置场桥的数量以及在不同箱区间有效合理地调度场桥, 可以减少场桥的闲置, 增加码头作业效率。Gambardel et al 等^[26]利用整数规划模型建立了场桥配置的网络流模型, 在船舶到达时间及每个堆场箱区的作业量已知的情况下, 用仿真分析的方法对结果进行优化, 讨论了仿真模型在码头资源配置中的应用。Richard Linn 等^[27]建立了整数规划模型, 以减少场桥在堆场中的剩余作业量为目标, 优化了场桥在堆场箱区的配置及作业顺序, 并将每天按照工班划分成六个时间段。Zhang C Q 等^[28]利用整数规划模型优化了堆场场桥的配置, 以最小化场桥的作业延迟时间为目标, 最后利用拉格朗日松弛算法进行求解。李建忠等^[29]以场桥在堆场中的剩余工作量及场桥的作业空闲时间最小为目标, 优化了堆场场桥的配置, 最后采用拉格朗日松弛算法进行了求解。韩晓龙等^[30,31]建立两阶段模型优化了场桥的配置及在不同箱区间的分配问题, 首先利用网络流模型优化了场桥的数量, 以最小化任务完成时间为目标, 得到最优场桥配置数, 其次将场桥在堆场内的各箱区中进行分配, 旨在实现场桥在不同箱区间行走距离最

小的目标,最后设计了算法进行求解。Murty 等^[32]建立了优化模型,优化了场桥的配置问题,为了减少场桥的移动时间,规定了场桥的移动次数不能大于 1,最后用仿真分析的方法得到了场桥的配备数量。

一些学者针对场桥在同一个箱区不同贝位间的调度进行了研究,优化了场桥的作业顺序,减少场桥的移动时间并减少堆场翻箱。Kim 等^[33]利用整数规划模型优化了场桥作业路径问题,减少场桥在不同贝位之间的移动。贺茂英等^[34]建立了场桥作业路径优化模型,对一台及两台场桥的作业路径进行模拟优化,并通过设计模拟退火算法进行了求解,最后用实证分析的方法证明了文中模型的有效性 & 算法的合理性。另外,谈超凤等^[36]在已知场桥配置的基础上,优化了场桥的作业序列问题,最后设计遗传算法进行求解。

1.3.2 多环节混合调度研究现状

集装箱码头作业系统是一个复杂的系统,包括众多作业环节,如泊位计划,场桥调度计划、配载计划等,各个作业环节之间相互联系、相互影响,任何单一环节的最优不能达到整体最优,因此,对集装箱码头作业进行优化时,要充分考虑各环节间的联系,协调调度作业中的各个环节,才能真正提高码头整体生产效率。集装箱在堆场堆存,经过集卡的水平运输到达船舶,进行装卸作业,整个环节需要场桥、集卡、岸桥的合理配合才能保证装船时间最短及集装箱在堆场的翻箱次数最少。

Kozan Erha 等^[37]建立了码头多岸桥、场桥多环节作业调度模型,优化了集卡在堆场取箱顺序及岸桥的作业顺序,以最小化船舶在港时间为目标,并设计算法进行求解。Bish Ebra K 等^[38]以船舶装船时间最短为目标,集成集卡、岸桥、场桥的协调调度,优化了集装箱在堆场的堆存位置及岸桥的作业序列,最后设计启发式算法进行求解。康海贵等^[39]考虑了岸桥装船作业顺序的影响,在装船作业顺序已知的前提下,建立优化模型,优化了场桥的作业顺序,使场桥的限制时间及岸桥的等待时间最短,最后提出了改进的遗传算法对模型进行求解。曾庆成等^[40]建立了码头各环节的协同调度模型,提高码头作业效率,并通过优化算法及强化学习法对模型进行求解,为码头协同作业优化提供了理论依据。曾庆成等^[41,42]建立集装箱堆场堆存位置及集卡调度的两阶段模型,第一阶段搜索集装箱在堆场的最

优堆存位置，第二阶段对最优的堆存位置，搜索集卡的最优作业次序，两阶段的模型结果互相反馈，最终得到装船时间最短的堆存位置及集卡调度方案。

陈超等^[43]提出了多阶段混合作业的同步优化方法，对码头目前的作业成本及作业效率进行了分析，以最小化码头运营成本为目标，对集卡拖车的行进路线及泊位分配等方面进行了优化，并通过设计双层遗传算法予以求解。上层算法搜索码头装卸资源的配置，并使用下层遗传算法在此基础上对集卡拖车的行进路线进行了优化。

Ng.W.C 等^[44]考虑场桥作业过程中的阻塞情况，建立多场桥调度模型，以最小化作业完成时间为目标函数，并设计基于启发式算法的动态规划算法进行求解。

通过以上研究结果得出，相比国外在该领域的起步时间，我国则较晚一些，特别是对于目前堆场场桥方面的研究，通常以完成作业量最多，或者场桥闲置时间最短为目标来决定场桥的配置数量及其作业路径，而对综合前沿岸桥装卸要求，具体作业中场桥的作业队列等研究较少。目前对场地资源分配方面的研究，基本均是对不同类型箱区位置所进行的配置，而对混堆模式下的场地分配方法研究较少，而当前国内诸多码头采用的就是混堆模式，如宁波北仑港以及香港国际货柜码头等码头，且通常采用的是对单一目标予以优化，如此则很难确保箱位分配的整体优化性。

除此之外，堆场作业作为整个码头系统运作的关键节点之一，务必是以提高码头综合运作效率为首要前提。在现有场地作业资源优化的诸多研究中，大部分问题的处理都以局部目标为最优，反而忽略了码头综合优化的目标。

1.4 研究的内容及思路

1.4.1 研究内容

本文分析了堆场场桥的作业状况，对如何提高堆场作业资源的利用率，减少作业资源的限制展开研究。根据不同时段堆场箱区的作业量在各箱区间分配场桥，考虑了码头前沿船舶的装卸作业情况，平衡岸桥及堆场场桥的作业量，减少岸桥的等待时间，建立场桥多目标的混合整数规划模型，减少场桥的跑位时间及最小作业完成时间。针对本模型的双目标规划特点，设计出基于遗传算法的启发式算

法并求解，得到最优场桥配置方案。最后结合天津港某集装箱码头的实际情况进行分析，验证了本文算法和模型的有效性。

1.4.2 研究思路

本文主要分为六大部分，详情如下：

第一章对本文进行研究的目的是与意义进行简要介绍，对与本文研究相关的研究现状进行分析，对研究方法进行总结。

第二章主要介绍集装箱码头及堆场，分别从码头的作业计划、堆场装卸工艺等方面进行分析，为本文内容做理论基础。

第三章主要介绍堆场作业资源配置相关问题，提出本问题的关键问题，以及解决这些关键问题拟用的研究方法。

第四章为场地作业资源配置优化模型的建立，提出通过启发式算法对模型进行求解。

第五章通过对天津港某集装箱码头的实际作业情况的分析，验证了本文模型和算法的有效性并结合实际生产情况对场桥资源优化配置提出对策。

第六章为本文结论。

第2章 集装箱码头堆场概述

2.1 集装箱码头概述

集装箱码头是水、陆联运的中继点，是集装箱在转换运输方式时的中转站，也是集装箱货物的交接地，因此，集装箱码头在集装箱运输各环节中所占的地位十分关键。

2.1.1 集装箱码头功能

作为集装箱水、陆运输的中继点，码头外延至国外的近洋及远洋运输航线，内延为国内的陆路及内河等路线，是用以设计停靠及装卸集装箱船舶的专用场所，通常具有以下功能：

(1)衔接多种运输方式以实现不同运输方式间的转换，并为船舶提供停靠泊位，船舶只有靠泊在相应泊位上，才能通过岸桥进行相应的装卸作业，才能将集装箱运输到码头及后方堆场，进而实现后续环节操作，因此，供船舶靠泊也是集装箱码头最基本的功能。

(2)集装箱码头堆场为进出口集装箱提供了装卸、中转、堆存及仓储所需的物理空间，并作为集装箱集、疏运的缓冲区域，有效承载并容纳大量不同贸易性质的集装箱，保证了港口的有序生产。

(3)进出口集装箱通关、检验检疫以及电子信息的传递与处理功能；

(4)集装箱的拆装箱、拼箱以及其他相关服务功能；

不难看出，集装箱码头所具有的关键作用取决于其自身具备的多种功能，其中运输方式的转换需要靠泊作业来完成；集装箱中转、堆存等的实现需要装卸作业来完成；而集装箱的集、疏港环节则需要集卡拖车来完成，因此，只有最大程度发挥集装箱码头的各项特色功能，有效连接码头各生产环节，才能实现码头高效率与高效益运作的目标。

与其他类型的码头相比，集装箱码头体现有如下特点：码头前沿承重能力强；均配置有重型岸边装卸机械；相邻建有大规模码头堆场；附近辅以用来堆存集装箱的专业场站；信息与组织等方面的现代化管理。

2.1.2 集装箱码头布局

集装箱码头采用高机械化和高作业效率的超大规模作业方式，不仅使集装箱码头与集装箱船舶形成一个统一的有机整体，同时使装卸工艺高效化，从而确保高度严谨有序的高效作业，最大限度发挥出集装箱码头主要功能，进而以缩短各环节的在港停时，提高周转速率，实现最优的经济效益。为更好的认识集装箱码头作业环节中堆场的重要性，以下首先对集装箱码头布局的基本构成进行介绍，如图所示。

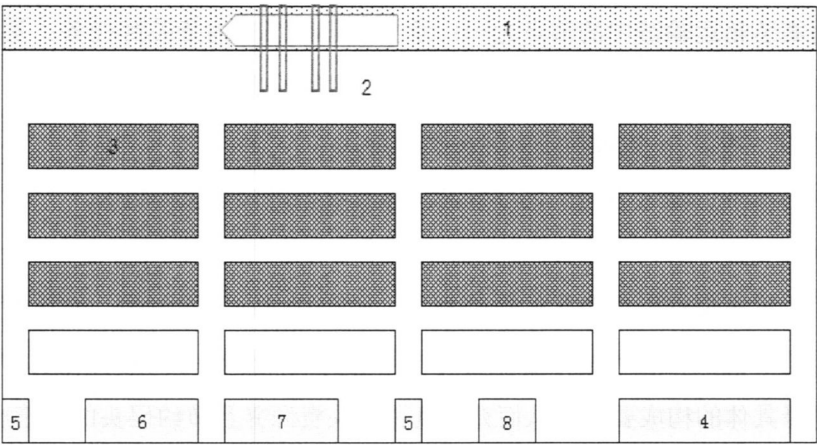


图 2.1 常规集装箱码头布置方案
Fig.2.1 Layout of normal container terminal

图 2.1 中 1 表示码头泊位，2 表示码头前沿，3 表示堆场箱区，4 表示冷箱箱区，5 表示进出闸口，6 表示 CFS 货运站，7 表示维修区域，8 表示调度指挥中心。

(1)泊位：泊位是指在码头前沿港池内供船舶停靠的前沿水域。码头岸线长度和前沿水深是确定其所能停靠集装箱船吨位及大小的基本条件，各泊位前沿水深应满足所靠船舶的最大吃水要求。

(2)码头前沿：是岸桥进行船舶装卸作业的专用场地。根据所配置的岸桥类型及大小不同，其宽度也不尽相同，但码头前沿宽度必须满足所岸桥和水平运输机械在码头前沿作业时对岸桥轨距、车辆转弯半径等相关要求。

(3)集装箱堆场：是出口箱等待装船或进口箱卸船后等待疏运的专用场地，同

时也是短期保管待与货主交接箱的场所。堆场内根据集装箱的箱型尺寸和堆场作业机械的类型设计有相应堆存区域，并标有箱位线和通道线，通常均设有冷藏箱专用插座，不同类型集装箱在堆场中按照既定箱区分类堆存。

(4)装卸机械，搬运机械和堆码机械：常规集装箱码头主要有集装箱装卸桥、半挂式拖车、不同吨位的叉车、轮胎式或轨道式场桥、正面吊、空箱堆高机等。这些机械设备主要承担码头前沿船舶装卸、水平运输、堆场内部装卸车等作业

(5)集装箱 CFS 货运站：主要为拼箱货拆装集装箱等业务提供增值服务的场所，同时也兼顾是托运人与承运船公司进行集装箱交接的场所。CFS 货运站的主要功能为：是集装箱运输链中的节点之一；承担着集装箱的内货装卸任务；是集装箱不同运输方式或形式的转换场所；是码头堆场附属的作业缓冲地点。

(6)道口（闸口）：集装箱进出码头的通道。

(7)维修车间：通常为码头内部各种机械及设备进行维保的场所。

(8)调度指挥中心：是指挥码头航陆运生产作业的中枢所在地。

除了上述集装箱码头布局的构成要素，还有变电站，控制站，照明设施等。其中有的是必要的，有的是可选择的。不同的港口可根据码头的资源成本和经营模式来选择具体的构成要素，从而充分利用码头资源并且节约码头的经营成本。

2.1.3 集装箱码头作业计划分析

作业计划是现代集装箱码头生产运作管理系统的核心，作业计划的质量高低直接影响到码头的效益，所以如何做好作业前期的计划工作已成为码头生产作业是否有序、高效的关键。集装箱码头作业计划依据不同环节，可以分为船舶装卸计划、堆场计划以及集疏港计划。

(1)船舶装卸计划

船舶装卸计划涉及泊位计划、岸桥计划以及配载计划三部分内容。

泊位计划是指提前若干时间为后续到港船舶预留靠泊位置并预先安排作业机械。其目的主要有：一是为了在船舶到港之前向作业相关方预报船舶的到港时间、靠泊位置，以便相关各方提前做好作业准备工作；二是由于船舶在码头可用的停泊位置即受船舶本身大小的限制，同时也受码头等客观条件限制，不可随意停放，其与船本身长度、泊位岸线长度、船上货物的积载位置以及需在本港装船箱在场

地内的堆存位置有关。例如 2 号泊位仅为 300m，则对于 360m 长的船而言便不可以停靠于此。又例如，如果本港待装船的集装箱均堆码在与 4 号泊位相对的位置，则不可轻易将对应来港船舶安排与 4 号泊位相距甚远的 1 号泊位，这是因为堆场到岸边的距离过远，势必占用较多的水平运输时间而使作业效率受到影响。因此，泊位计划是一项非常重要的计划工作，泊位计划的全面与否，直接影响船舶的在港停时和装卸效率的高低，并最终影响整体运输环节的生产效率。

岸桥的主要功能是将集装箱从船上吊起并放置于水平运输设备上，或将集装箱从水平运输设备上吊起并放置于到船上。岸桥作业计划通常由生产控制中心的计划人员制定并在昼夜作业计划中体现。为在港停靠的船舶，安排下昼夜岸桥、场桥、拖车作业资源，同时确定作业线数量、配置的工人数及相应机械台数。

配载计划是对装船位置的策划，即对集装箱吊装上船的具体积载安排。在集装箱船舶的装卸作业中，调度的指挥、控制通常是针对箱位进行的，即具体哪个位置积载哪个箱子，或卸船时作业顺序的安排等，都需提前做好计划，以便确保整个装卸作业的流畅、确保船舶航行安全以及合理利用船舶舱位等。在船舶装卸船相关单据准备完成后，码头计划员需根据装船预配图、装船清单、集港情况等，将在场等待装船箱按照相应规则在船上预留的具体箱位。

全面的泊位计划是决定集装箱码头船舶装卸作业能否顺利进行的前提，岸桥计划则是直接影响船舶装卸效率高低的关键因素，配载计划则是确保作业计划合理性和安全性的重要依据，三者相互影响又相互制约，并共同构成船舶的整体作业计划。因此，不仅要求码头的泊位计划员必须具备良好的沟通能力、协调与应变技巧，以便充分利用码头相关泊位及机械资源来满足不同船舶的作业需要，还要求中控室计划人员能结合实际装卸需求，制定出科学合理的岸桥配置计划并严格执行，更要求码头计划人员能结合船方提供的预配图，综合考虑码头整体计划安排、在堆场箱堆存情况以及可能影响船舶作业的各种因素，在确保船舶航行安全和运输经济性等各种要求的基础上，编制船舶出口配载图，进而确保船舶作业计划的安全、高效。

(2)堆场作业计划

堆场计划是待作业集装箱进行上下车作业、预捣及保存的计划。其目的是

为更科学、经济的使用空间和有针对性的搬移目标集装箱。堆场计划主要包括装船的集装箱应按不同卸货港、箱型尺寸、重量予以分别堆码；相同港口箱应尽量堆放在一起；以及场桥资源的配置计划等。

集装箱码头堆场是堆存集装箱的专用场地，是集装箱码头主要的作业区域之一，由于场地面积巨大，堆存的箱数及种类繁多。通常按箱类型分为空箱、重箱、冷藏箱、超限箱等，同时又可按贸易属性分进口箱、出口箱，同时箱型尺寸也有诸多差异，这直接加大了堆场管理的难度。

场桥调度计划是在堆场面积和管理水平有限的情况下，通过调度场桥来提高堆场作业效率的一种手段，也是堆场作业计划的一部分。场桥调度计划，就是在堆场上安排一定数量的场桥，配合拖车和岸桥对在泊的船舶进行装卸作业。目前大部分集装箱码头的出口箱和进口箱是分开堆码的，同一台场桥在一段时间内通常仅负责进口或出口集装箱的装卸作业，但受资源总量的限制，场桥必须在出口场地和进口场地间进行转场或过场，所以必须制定科学的调配方案，以保障场桥工班时间内的高效作业和任务目标的实现。

堆场计划的终极目标就是对有限的场地进行最大限度的利用，通过合理规划，给各个箱子均安排相对便捷的场位，安排适当的场桥及设计调配计划，提高堆场的利用率和码头的整体作业效率。堆场计划通常需对堆场内的集装箱进行堆存位置的设定及策划，场地计划员结合作业实际情况及集疏运计划需求对堆场计划进行编制及调整，在船期抵港预报、场地集疏运计划确定后，根据现场作业进度及船舶的实际抵港窗口、集疏运窗口编制堆场计划。依据船名、航次、卸货港、箱型尺寸等要素安排计划场地位置，以便在集港、装卸船、场内捣运、疏港作业中，由生产操作系统快速识别和定位，进而而自动分配具体场地位置，确保实际码放与计划相一致，实现促进场地利用率提升、降低翻倒率的目标。在此基础上，结合场地位置及设定的计划作业效率，合理安排相应数量的场桥，确保整体作业的高效运行。

(3)集疏港计划

集装箱疏港计划是指对出口箱进行集港作业以便等待集中装船；对进口箱进行短时集中规划以便快捷疏运，以及对在场箱进行场地整理的过程。

在集装箱码头，将集装箱从岸边或堆场运至堆场岸边的水平工具主要为集卡

拖车。集疏港计划主要围绕集卡制定，集卡拖车的作业任务和计划思路由中控调度室的昼夜作业计划表中得以体现，包括为船舶作业配置的相应数量航运集卡拖车等，并结合资源总量对各班次的集卡拖车数进行限制。

集疏港计划是船舶装卸计划与堆场作业计划的有机衔接与协调配合，是集装箱装卸资源能力得到充分利用的前提条件。集疏港计划的科学制定和有效实施可以提高集装箱在码头的周转速度。相反，集疏港计划若与岸桥、场桥的作业计划脱节，则会直接造成船舶作业效率的下降，不仅使堆场作业效率下降，更会最终影响整体码头的全局效率。

2.2 集装箱堆场概述

集装箱堆场是集装箱进出码头的重要缓冲地带，其装卸和堆存功能在集装箱的船舶装卸和集疏运中起到重要衔接作用。

2.2.1 集装箱堆场功能

集装箱堆场是为装卸船舶而提供的堆放集装箱的专用场地，同时也是暂时存储和与收、发货人交接集装箱的场所。集装箱堆场主要有集装箱的堆存、交接、检验和修理三大功能。

(1)集装箱的堆存功能

堆存是集装箱堆场最基本也是最主要的功能。常规的集装箱在卸船后和装船前都需要在其进行堆存，且是从船舶或车辆转移至收、发货人以及承运人所必须的中继场所。

(2)集装箱的交接功能

交接是集装箱运输环节中的关键节点之一，而几乎全部集装箱的交接是在集装箱堆场得以实现的。

(3)集装箱的检验和修理功能

集装箱堆场的另一项主要工作是：为了进一步保障货物和船舶航行安全，必须确保集装箱的完好程度和机械性能，所以要定期对集装箱进行性能检验和内外外部修缮。对集装箱的官方检验结果直接决定着修理的必要性，因此集装箱堆场通常均提供合格的集装箱验箱员和修理技工，同时也必备一套完善的修箱的设备以

保障维修质量。

2.2.2 集装箱堆场布局

集装箱堆场按位置可分为前方场院和后方场院两部分。

前方场院(Front Yard)是指在集装箱码头靠近岸边的区域,为提高船舶作业效率,用以暂时堆码待作业集装箱的场地。它紧邻码头前沿,通常要求能够存放对应泊位所靠船舶载箱量的最少2倍箱量。

后方场院(Back Yard)是集装箱码头前方场院以外的部分,同时兼有堆存中转箱、进口箱、空箱、冷藏箱、超限箱等的功能。后方场院是码头装卸体系的后备资源,对码头集疏港作业、集中转运输、拆、装箱业务的开展发挥着不容忽视的重要作用。实际操作中,后方场院同前方场院并没有明确的界限,仅仅是从距离岸边远近来看的相对概念。有些地区或国家统称为集装箱堆场,而没有前方场院或后方场院的概念。

集装箱堆场通常包括重箱堆场、空箱堆场、冷藏箱堆场及特种箱堆场等。此外还有分别用于各型流动机械行走的通道。冷藏箱堆场通常在集装箱堆场中仅占很小的比例,场地内设有冷藏箱专用插座设备及供专用线路。特种箱堆场则是根据超限箱、大件货等特殊需要灵活设置的,一般安排在集装箱堆场角落处或后方的空箱堆场附近,基本均为一层堆码,荷载需求小但灵活性较强。

集装箱堆场码头重要的的作业阵地,是集装箱运输链条中不可或缺的重要构成,且起着十分关键的作用。它是为船舶正常作业提供集装箱堆码的场所,同时也是短期堆存和与提货人进行集装箱的场所。集装箱码头的堆场,不仅为待出口的集装箱提供暂存地点,以便完成出口全部手续后得以迅速装船,同时也为卸船的进口箱提供了暂存区域,以便收货人在办理完清关手续后尽快提箱。此外,也是承载所有进出码头集装箱货物作业调度的必备平台。

2.2.3 集装箱堆场作业资源

集装箱码头的堆场作业资源主要用于装卸和码放。按照码头堆场的作业类型,其可分为用于处理重箱或处理空箱的机械。

(1)重箱机械

当前国际上普遍采用轮胎式场桥(RTG)、轨道式场桥(RMG)和集装箱拖挂

车（简称集卡拖车），而空箱堆高机和正面吊则多用于配合上述主要作业机械，从事倒箱、拆装箱或车量装卸作业的辅助工作。

轮胎式场桥具有转场灵活、作业效率高、便于操作、场地利用率高等诸多特点。其缺点在于轮压较大而导致的场地建设及维护费用高，堆码层数高时捣箱量较大，加之通常采用柴油发动机进行水平驱动，机械的维修保养能力要求较高。目前国内及亚洲其他区域和中东的大部分码头更青睐于此类机械的使用。

(2)空箱机械

一般采用空箱堆高机和轮式正面吊。

国内港口目前普遍采用空箱堆高机进行空箱作业。其堆码高度一般为 5 至 6 层，最大可达 9 层。随着集装箱专业化作业水平的提升，近年来国内码头对轮胎式正面吊的使用比例也明显提升。它对空箱堆高的灵活性更强，不仅堆码高度不受影响，同时还可进行跨箱作业，极大增加了堆场额利用率，在使用上更加便捷。

2.2.4 集装箱堆场装卸工艺

根据作业资源类别，可以将装卸工艺分为跨运车系统、底盘车系统、轮胎式场桥系统、轨道式场桥系统、空箱堆高机系统、正面吊系统以及混合系统。前四种机械系统在目前的集装箱堆场中较为常见，而混合系统则是结合码头各方面的环境特点而采取以上几种系统的混合应用方式。

(1)跨运车系统

跨运车的特点堆场前期投资小，场地利用率大，岸桥着箱上车时无需对位，十分利于现场的生产管理，因此装卸速度较快，同时还可自主堆码 2-3 层高，但缺点是构造十分复杂，易损部件较多，且技术要求相对较高。

(2)底盘车系统

此系统的流程是：由岸桥完成岸边装卸作业，集卡拖车负责水平运输。突出特色是底盘车 and 其所载箱将同时停放于堆场指定位置，且除牵引车车头外不需要额外辅助机械，这就使水平运输与堆码作业简化成为一体。但这种工艺系统占用较大场地，适用于吞吐量较小却有土地资源廉价且丰富的区域。

(3)轮胎式场桥系统

轮胎式场桥负责集卡装卸及场地堆码任务，正常情况下水平运输则由集卡拖

车完成。其最大的优势在于机械性能可靠性高，设备保障相对完善，不仅可以较为充分的利用场地，更主要的在场地内使自动化作业成为可能。但其缺点在于灵活性较差，需频繁进行翻捣作业，对作业效率影响较大。

(4)轨道式场桥系统

轨道式场桥系统与上述轮胎系统的作业相似，此系统的最大优点能够充分利用场地空间，相比轮胎式场桥而言构造简单，作业安全可靠，其常见的电力驱动模式不仅节约能源，更能有效减少污染。但最大的缺点也在于只能在有轨道的区域作业，且不能转场，作业范围受到很大限制，机动性较差且受供电电缆影响。

(5)空箱堆高机系统

水平运输、堆场堆码和装卸均可由空箱堆高机承担。其显著优点在于机动灵活且通用性好，不仅可以广泛应用，同时性能相对可靠且造价低廉。但是其缺点在于单机作业效率偏低，因回转半径大而受制于场地空间、无法充分利用场地，此外由于轮压相对较大，复杂部件多且不易维修。因此，主要用在空箱堆场上。

(6)正面吊系统

与空箱堆高机相比，正面吊具有机动性强，稳定性好，可以有效降低箱损及货损的概率；同时由于可以多层码箱且可以隔着箱子作业，能够有效提升场地利用水平。但其缺点在于作业范围相对小，对路面参数要求高，同时也存在单机作业效率低的劣势，且由于多台机械同时作业相互干扰而无法发挥最佳效果。此外，正面吊造价普遍较高，在进行水平运输过程中发生故障的几率较大。

(7)混合系统

部分码头出于经济性和装卸效能的考虑，针对上述各系统各自的优缺点，结合自身情况采用了混合机械系统。此系统最大的优势在于可以充分发挥各类系统优点，使整个码头作业系统不断趋于合理和持续优化，但客观限制在于必须具备高质量且高效运作的码头生产操作系统和信息系统进行支持。

综合各系统装卸工艺的优缺点，结合现代化集装箱码头日趋大型化和智能化的发展趋势，不难看出场桥系统在相当长的时期内仍然是集装箱堆场作业的整体趋势，而场桥资源的优化配置是场桥系统充分发挥功效的关键，因此本文将重点对场桥资源的优化配置问题进行研究。

第3章 集装箱码头场桥资源配置问题分析

3.1 集装箱码头场桥资源优化配置概述

场桥资源配置是集装箱码头高效作业的重要环节，其作为资源配置问题的一个分支，符合资源配置的一般特点，也具有其自身的特殊性。为此，从资源配置的一般概念入手，分析集装箱码头场桥资源优化配置的内涵。

3.1.1 资源优化配置的内涵

资源的限定性和供需关系不平衡性造成有必要对资源进行深度的优化配置。资源配置相关问题通常分为两个方面：一方面是在产出水平既定的前提下，通过某些的方式和方法将成本降至最少；另一方面是在成本既定的条件下，力争得到最大化的产出。概括的讲就是力争以最小的成本投入来获取最大效益，从而实现资源的最大化利用。

通常可对从两个层次对资源进行优化配置：一是通过内部科学管理方法与生产技术的提升，让既定资源在生产部门合理利用的过程中不产生浪费，最终获取最多的产出，进而实现资源运用效率最大化；二是通过有针对性的安排，提前调配资源配置的方向，从而在出现多个生产部门均对有限资源提出需求时，选择最适宜的方向进行配置和资源倾斜，即实现资源配置效率最大化^[46]。

码头作业资源的优化配置问题，是指把码头既定的作业资源，通过科学、合理的调度方法分配到码头生产的各个环节中去，以努力使码头作业资源实现最大程度的利用。目前码头作业资源中，相对稀缺的是岸桥、场桥以及集卡拖车，只有通过科学、合理的计划，才能使既定的资源得到最为高效的使用，最终提升码头的作业效率和经济效益^[47]。

3.1.2 集装箱码头场桥资源优化配置的内涵

根据资源配置的内涵以及集装箱码头装卸作业特点，可以看出集装箱码头作业资源优化配置的核心主要是岸桥和场桥的优化配置，而岸桥由于其位置的固定性和活动范围的有限性，在码头作业资源优化配置中主要起协同作用，可以说码头作业资源的优化配置主要取决于场桥的优化配置^[48]。

集装箱码头场桥资源的优化配置，是指根据码头的装卸和堆存需要，将既定

的场桥资源,通过科学、合理的分配方法布置到堆场作业中去,力争实现场桥资源的最大化利用和装卸的高效化。其主要涉及场桥的数量和作业效率、集装箱的数量和区位分布以及岸吊的数量及作业能力等,是一个动态系统优化配置问题^[49]。

根据资源优化配置的两个层次并结合场桥作业特点,可以看出集装箱码头场桥资源的优化配置可以从两个方面着手,一是通过信息技术手段,利用诸如 GSI^[50]、GPS 及其他先进电子自动管理系统,实现到场桥、集装箱的准确定位和自动存取。二是通过采用合理的调度方法和制定合理的调度计划,充分有效的利用场桥装卸能力,以期与岸桥作业相协同达到资源的有效利用和作业效率的有效提高。

3.2 集装箱码头场桥资源配置信息技术现状

集装箱码头场桥资源配置的手段之一,即是利用信息技术对堆场集装箱及场桥、集卡等装卸资源的精准定位和自动调配来完成对场桥资源的有效配置。目前国际上主要用到的信息技术有电子管理系统、自动化集装箱堆栈系统以及 GPS、GSI 技术等^[51]。

集装箱堆的场电子控管系统。为场桥实现自动化提供支持,并且同时用于场桥定位。堆场内每个箱位的使用情况均与码头在场箱清单的主机通过无线通讯网络相连,以自动的方式引导机械按半埋于地表且具有自动纠偏装置的反光板移动,即便切换为手工操作也同样不会跑偏^[52-54]。

自动化集装箱堆栈系统。近期由德国 Manneesmann Dmeatic AC 推出了一种名为 ACS 的自动化集装箱堆栈系统。该系统安装有一个高架式轨道,专用场桥则在其上高速运行,由于专用场桥与自动导向车的运行路线并在互不影响的不同高度,因此可以实现各行其道的效果。该系统中的起重机轨距为 28m²,跨度为 9 列重箱或 10 列空箱;起升高度为堆 4 过 5;可堆存最大为 40 吨的 20 尺-45 尺集装箱^[55-57]。

用 GSI 及 GPS 技术实现到场桥的可视化跟踪与实时控制。随着控制技术的兴起和发展,与场桥匹配的自动作业和箱位定位系统,通过 GPS 定位技术得以实现并广泛用于实际生产作业。采用 GSI 与 GPS 技术,可以确保目标箱的实时轨迹查询与监控,以及为集卡拖车规划最佳的行进路线,进而达到最佳的调配效果。在目前在国外多个集装箱码头投入实际应用的诸如 SMAR TRAIL 等箱体定位系统,其原理为在码头指定地点内设置的全球定位基站及流动机械车载定位接收器之间

的无线通信，引导机械的行驶和场内集装箱作业，其中位置控制精度误差为 5cm 左右的 SMAR TRAIL 系统当前已在比利时、爱尔兰、哥伦比亚等地区投入实际使用^[58]。

以上的场桥资源配置信息技术主要在国外一些大型先进集装箱码头应用，对于一般的集装箱码头来说，这些信息技术手段不论从引入成本还是适用性方面都存在问题，短时间内无法成为优化集装箱码头场桥资源配置的有效手段。故对于一般的集装箱码头而言，应主要从场桥调度方法和计划方面进行优化配置。

3.3 集装箱码头场桥资源配置问题的关键

集装箱码头场桥资源配置问题的关键是堆场场桥的配置，以及场桥与岸桥的协同调度。

3.3.1 堆场场桥的配置

堆场内场桥的配置即是场桥的调度问题，其原理是结合集装箱堆场内同一场桥的实际作业能力，以及其在堆场内各箱区之间位移所需的耗时，分配一定场桥去完成指定任务，旨在实现场桥在最短的时间内将全部指令作业完毕，即确定某个任务配置和任务安排方案，以使所需完成作业任务耗时最多的场桥实现以最少时间完成既定任务的目标。

3.3.2 堆场岸桥的协同调度

岸桥是集装箱码头专用的作业机械，通常价格很高，所配置的岸桥总数也会直接影响码头效率。但绝不会存在给在泊船舶分配越多岸桥就越好的情况，是由于投入数量和投入成本间的博弈是影响决策的重要因素。从成本来看，岸桥数量的配置问题就是在成本最小的前提下确定最合理的配置；而从效率来看，岸桥数量的配置问题又是在保证作业时间的前提下，实现与场桥作业的有效衔接；不管是从效率还是成本角度出发，都需要辅以完善的辅助决策系统来帮助码头管理者进行决策。

3.4 集装箱码头场桥资源优化配置方法理论介绍

集装箱码头场桥资源的优化配置，往往需使用智能优化的算法进行求解。为此，本文通过对智能优化算法的介绍，常用算法的比较分析，选择遗传算法作为

本文的求解方法。

3.4.1 智能优化算法综述

对集装箱码头场桥资源的优化需要安排智能优化的算法来予以求解。它是通过数学理论来进行研究的一种用于对诸多工程境况找寻出最佳解决办法的应用技术。作为一个关键的细分科学内容,如何实现最优化始终受到学者们的高度重视,它对诸多学科都产生了意义深远影响,充分应用于各种领域,并已成为多个领域中各项工作中必备的工具。

优化算法也是一种以特定思路或规则为基础而进行搜索的过程或依据,通过一定的要求或方法来使能够实现用户需要的结果得以获得。其中诸如对设备进行合理布局的问题,至今还未找到有效解法。这时对于大范围问题,受计算时间的约束,通常无法获取问题的最优解,而采取近似算法求解来得到的近似解质量又较差,且最差条件下的时间复杂性还是无法预知的。因此,从数学的观点看,现有的近似算法不能求出大范围组合优化问题中高质量的近似解。智能优化算法作为一种新型的事物,已成为更多研究者重点关注的计算技术。与其它优化方面理论相同的是,智能优化理论也是在数学理论的基础上,对各种工程问题进行最佳方案求解的理论。

与很多基于梯度的应用优化算法相区分的是,智能优化更主要是依靠概率搜索算法。与梯度方法及传统的演化算法相比,虽然概率搜索算法一般要采用相比较多的评价函数,但其具有十分的显著优点:

(1)不受中心控制的约束,确保系统具备更强的鲁棒性,并不会受个体故障而影响整个问题的求解。

(2)实现个体协作的途径为间接信息交流,使系统扩充性得以保障。

(3)并行分布式算法模型,可充分利用多处理器。

(4)对问题定义的连续性也有特殊要求。

(5)算法实现比较简单。

智能方法比较容易实现,其算法中只涉及若干基本的数学操作,因此计算也相对简单。另外,其数据在处理过程中对 CPU 和内存的要求也较低。而且此方法仅需目标函数的输出值,而无需其梯度信息。所以,不管是从理论的研究还是应

用研究的角度来看，进行智能算法理论及其应用研究都是具有重要学术意义和现实价值的。

依照行为与优化机制区分，当前工程中常用的优化算法基本可化为：经典算法、构造型算法、改进型算法、基于系统动态演化的算法和混合型算法等。

(1)经典算法。包括有线形规划、整数规划、动态规划和分枝定界等运筹学中的传统算法，其计算方法的复杂性通常很高，仅适于对小规模问题求解，在工程中基本不实用。

(2)构造型算法。用构造的方法快速建立问题的解，一般来说由于算法的优化质量差而无法满工程需要。例如，调度问题中的典型算法有 Johnson 法、Gupta 法、Palmer 法、Daunenbring 的快速接近法、CDS 法以及 NEH 法等。

(3)改进型算法，亦称为邻域搜索算法。从任一解出发，通过对其邻域的不断搜索以及当前解的替换来实现优化。根据其搜索行为，又可以分为局部搜索法和指导性搜索法。

(4)基于系统动态演化的方法。将优化过程转化为系统动态的演化过程，基于系统动态的演化来实现优化，如神经网络和混沌搜索等。

(5)混合型算法。指上述各种算法从结构或操作上相混合而产生的各类算法。

3.4.2 优化算法的比较分析

目前应用范围比较广，效果比较好的优化算法有“蚁群算法”、“模拟退火法”和“遗传算法”。

(1)蚁群算法

人工蚁群算法是人类根据自然界中真实的蚁群集体行为的启发而提出的一种基于蚁群的模拟进化算法，属于随机搜索算法。研究结果充分表明，蚂蚁个体间开展信息交流的途径是名为“外激素”的化学物质，进而促使分工与配合得以实现，甚至可以完成十分复杂的工作。其个体间的沟通与信息传递，对蚁群所体现出的复杂却有规律的行为具有十分关键的作用。大量蚂蚁组成的蚁群的集体行为通常受其在行进路径上留下的化学物质引导，而表现出一种信息正反馈现象，某一路径上走过的蚂蚁越多，则后来者选择该路径的概率就越大。蚂蚁个体之间就是通过这种信息的交流达到搜索食物的目的。蚁群算法正是模拟了这样的优化机

制,即通过个体之间的信息交流与相互协作最终找到最优解。蚁群算法中参数的设置对最终解的质量影响很大,实验证明事先无法找到参数的一个最优选择,使得它对于任何问题都能达到最优性能,一般只能分析了具体问题后,在实验过程中凭借经验不断调整参数,以期得到最优解。且蚁群算法适合在图上搜索路径问题,计算开销会大。

(2)模拟退火法

模拟退火法(Simulated Annealing, SA)是模拟热力学中经典粒子系统的降温过程,来求解优化问题的极值。模拟退火技术消除了爬山法的许多缺点,解不再依赖初始点,而且通常靠近最优点。这主要是通过引入接受概率 p 完成的,如果新点的目标函数值更好,则 $p=1$, 否则 $p>0$ 。对后一种情况,接受概率 p 是当前点、新点的目标函数及另一个控制函数/温度 $0T$ 的函数。总的来说,低的温度 T 表示新点的接受概率较小。在算法执行过程中,系统的温度 T 随着算法的进行而降低。最后终止于不再有可接受变化发生的低的 T 值。尽管理论上只要计算时间足够长模拟退火法就可以保证以概率 1 收敛于全局最优点。但是在实际算法的实现过程中,由于计算速度和时间的限制,在优化效果和计算时间二者之间存在矛盾,因而难以保证计算结果为全局最优点,优化效果不甚理想。

(3)遗传算法

遗传算法在解决复杂优化问题上有其不可比拟的优越性。遗传算法通过保持一个潜在解的群体执行了多方向的搜索并支持这些方向上的信息构成和交换。群体经过模拟进化的过程,在每一代,相对“好”的解产生,相对“差”的解死亡。遗传算法属于概率算法一类,尽管使用了直接、随机的搜索方法,但是遗传算法和随机算法是不同的。遗传算法利用概率转移规则,可以在一个具有不确定性的空间上寻优。与一般的随机优化方法相比,遗传算法不是从一点出发沿一条线寻优,而是在整个解空间同时开始寻优搜索,因此可以有效地避免陷入局部极小点,具备全局最优搜索性。

通过比较,鉴于遗传算法在组合优化问题求解上的优势,论文选择运用遗传算法来求解集装箱码头场桥资源配置问题。

3.4.3 遗传算法概述

主要介绍遗传算法的基本概念、设计方法以及求解步骤。

(1) 遗传算法基本概念

第一, 种群(Population)和个体(individual)。遗传算法在求解问题时是从初始给定的多个解开始搜索的, 这初始给定的多个解的集合称为一个种群, 种群是问题的解空间的一个子集。种群中的每个解称为个体。

第二, 染色体(Chromosome)与基因(Gene)、基因组(Gene Group)。对种群中每个个体进行映射变换得到的编码串叫做所谓的染色体, 染色体上的每一位叫做基因, 染色体上一个有效信息段叫做基因组。

第三, 适应度函数(Fitness Function)。适应度函数是种群中各个个体对各自适应环境的程度的一种量度, 它通常是用户所提供的目标函数的一个合理的数学变换, 而目标函数用能反映个体在种群中优劣程度的数学表达式来担任。

第四, 编码(Coding)与解码(Decoding)。许多应用问题的结构很复杂, 但可以化为染色体形式表示, 这个变换的过程叫做编码。相反地将染色体形式变换为原问题结构的过程称为解码。

第五, 选择(Selection)。选择是决定以一定的概率从种群中选取若干对个体的操作。选择的目的是从种群中按一定的标准来选定适合作父代(Parents)的个体, 通过杂交后复制(Reproduction)出子代(Child)来。

第六, 交叉(Crossover)。交叉是指把两个染色体换组的操作, 其用意是将两个个体的染色体的基因进行互换以产生新的后代。

第七, 变异(Mutation)。变异是指让遗传因子以一定的概率变化的操作。

(2) 遗传算法设计方法

用遗传算法解决问题的基本内容包括编码设计、初始种群产生、适应度函数设计、遗传操作设计、算法参数设计。

第一, 编码设计。编码问题是从问题空间到表达空间的映射问题。在进行编码设计时要考虑编码的完备性、健全性、非冗余性。编码方法主要包括二进制编码、Gray 编码、实数编码、浮点数编码、有序串编码、多参数映射编码、可变长编码等。

第二，初始种群产生。产生一定数目的个体组成种群。常用的方法有两种：一是完全随机的产生，适合于问题的解无任何先验知识的情况；二是利用先验知识对问题的解过滤再随机地选择。

第三，适应度函数设计。适应度函数可用目标函数表示，也可以用目标函数变换的方式来定义。适应度函数的设计与遗传算法中的选择操作直接相关，适应度函数设计不当将会导致。在设计适应度函数时应该满足以下条件：单值、连续、非负。最大化：合理。一致性：计算量小、通用性强。由于实际问题的目标函数通常不能满足以上条件，因此需要对目标函数进行转化，另外需要对目标函数的值域作某种映射变化，即适应度的尺度变换，变换方法通常有线性变换、幂函数变换、指数函数变换等。

第四，遗传操作设计。遗传操作包括：选择、交叉和变异三种。一是选择，选择策略对算法性能的影响起到举足轻重的作用，不同的选择策略将导致不同的选择压力，即下一代中父代个体的复制数目的不同分配关系。较大的选择压力使最优个体具有较高的复制数目，从而使得算法的收敛速度较快，但容易出现过早收敛的现象。相对而言，较小的选择压力一般能使群体保持足够的多样性，从而增加了算法收敛到全局最优的概率，但算法的收敛速度较慢。常用的选择策略有：基于适应值比例的选择（轮盘选择法）、基于排序的选择、基于局部竞争机制的选择、精华保存选择等。二是交叉，交叉是为了能够在下一代产生新的个体，是遗传算法获取新优良个体的最重要的手段。一方面，它使得原来群体中的优良个体的特性能在一定程度上保持，另一方面，它使得算法能探索新的基因空间，从而使新的群体中的个体具有多样性。交叉是遗传算法全局搜索能力的主要算子。交叉通常包括单点交叉、两点交叉、多点交叉、离散交叉、算术交叉。

三是变异，变异是对群体中的个体串的某些基因座上的基因值作变动。变异本身是一种局部随机搜索，与选择和交叉结合在一起，保证了遗传算法的有效性，使遗传算法具有局部随机搜索的能力，同时使遗传算法保持种群的多样性，以防止出现非成熟的收敛。变异的方法通常有均匀变异、非一致性变异、自适应变异。

第五，算法参数设计。基本遗传算法运行参数包括：种群大小、染色体长度、进化最大代数、总运行次数、交叉率、变异率等。

(3)遗传算法求解步骤

遗传算法的基本求解步骤为：

- ①初始化群体；
- ②计算群体上每个个体的适应度值；
- ③按由个体适应度值所决定的某个规则，选择将进行下一代的个体；
- ④按概率进行交叉操作；
- ⑤按概率进行变异操作；
- ⑥若没有满足某种停止条件，则转步骤②，否则进入下一步；
- ⑦输出群体中适应度值最优的染色体作为问题的满意解或最优解。

最简单的停止条件算法有如下两种：一是完成了预先给定进化代数；二是群体中的个体，在连续若干代没有得到改进，或平均适应度在连续若干代均基本没有改进。

3.4.4 研究方法确定

根据本文确定的关键优化问题，本文优化的目标为保证场桥最快完成任务的同时，场桥移动时间最短，为多目标优化问题，区别于一般的场桥路径优化问题，本文除了把场桥移动时间考虑到目标函数外，还规定了场桥尽早完成作业任务，不同于单目标场桥优化问题，本文不仅对场桥进行路径优化，而且对场桥数量进行配置，因此本问题的求解方法更复杂。目前能够解决多目标问题的研究方法通常有：效用函数法、分层序列法、帕累托最优法、目标规划法和交互法等等。其中的帕累托最优法能够给出所有的帕累托最优解，可以供决策者根据实际情况选择，而最终路线选择体现出的是决策者对优化目标的偏好，这对实际问题实际分析较为有利。因此，本文将会采用帕累托最优法来完成多目标的路径优化的实现。

(1)基本定义

帕累托最优的概念由法国经济学家 Pareto 于 1896 年提出^[59]，它是建立在集合论基础上对多目标求解的一种向量评估方式。该优化方法主要涉及以下几个基本定义。设路径优化目标函数有 m 个，集合为 $\{f_1, f_2, \dots, f_k, \dots, f_m\}$ ，设 p 和 q 是两条可行路径，路径属性分别为 $(f_1(p), f_2(p), \dots, f_m(p))$ 和 $(f_1(q), f_2(q), \dots, f_m(q))$ 。

定义 1 Pareto 占优 (Pareto Dominance)：当且仅当 $\forall 1 \leq k \leq m, f_k(p) \leq f_k(q)$ 且

$\exists k|f_k(p) < f_k(q)$ 时, 路径 p 占优路径 q ($p < q$)。这表示路径 p 总是优于或等价于路径 q , 且至少有一个属性严格最优。

定义 2 Pareto 最优 (Pareto Optimal): 设 x 为可行配送路径, 属性为 $(f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$, 如果不存在 x 为可行路线, 使得 $f_k(x) \leq f_k(q)$ 或 $f_k(x) < f_k(q)$, 则称路径 p 为 Pareto 最优解 (或弱有效解)。

定义 3 Pareto 最优集 (Pareto Optimal Set): Pareto 最优解的集合。

定义 4 Pareto 前沿 (Pareto Front): 可行域边界的点集。

(2) 优化思想

在求解思路上, 多目标优化相比单目标优化问题存在很大的差异, 单目标问题往往寻找的是全局方面的最优解, 该解的特点是优于任何其他的可行解, 而多目标优化问题往往由于目标之间彼此存在冲突, 因此通常对一个目标而言是最优解, 而对于另一个目标而言就不是最优的, 因此基本可以说不能够找到一个能让所有目标函数同时最优的解。而帕累托最优恰恰可以根据多目标优化的特点, 采取设置一个最优解集的方法, 该解集内所有点对于既定的所有目标函数而言是没办法比较优劣的, 也就是不能在改进任何目标函数的同时保证至少一个其他目标函数不会得到削弱, 将所有最优解集都储存在 Pareto 前沿面当中。对于本文致力研究的问题来讲, 我们希望通过 Pareto 方法找到类似的一个由运输成本和事故风险两者组合形成的 Pareto 前沿面, 进而为决策者依据个人偏好来为确定最优路径而赋予相应的权重。

第 4 章 集装箱码头场桥资源配置优化配置模型

4.1 问题描述

集装箱码头作为现代化多式联运模式的重要节点之一，在世界物流体系和国际贸易行为中扮演着关键的作用。在码头堆场中，集装箱作业基本都是由场桥完成的，因此场桥在码头集装箱作业流程中起着决定性的作用。然而也正式由于场桥的作业，对其配置的不合理往往成为是整个集装箱作业链条中的瓶颈所在。如果没有一个科学可行的场桥配置优化管理方案(包括资源科学配置以及及对作业的优化思路)，集卡拖车很可能会在堆场中长时间等待或空耗，岸桥因此而处于等钩状态。这种等待将会之间降低岸桥的作业效率，造成船舶在港停时的延长，因此科学、合理的安排场桥配置计划是十分重要和必要的。

为确保船舶的进出港动态，在合理的计划时间内完成相应区的工作量是十分关键的。而这一目标的实现，不仅要综合的考虑到堆存区域的远近，码头堆场机械配比等因素，且由于场桥是总数既定的有限资源，码头也不可能为每个场区都固定配置足够数量的场桥。因此，本文将建立场桥配置模型以优化场桥在堆场的分配方案。

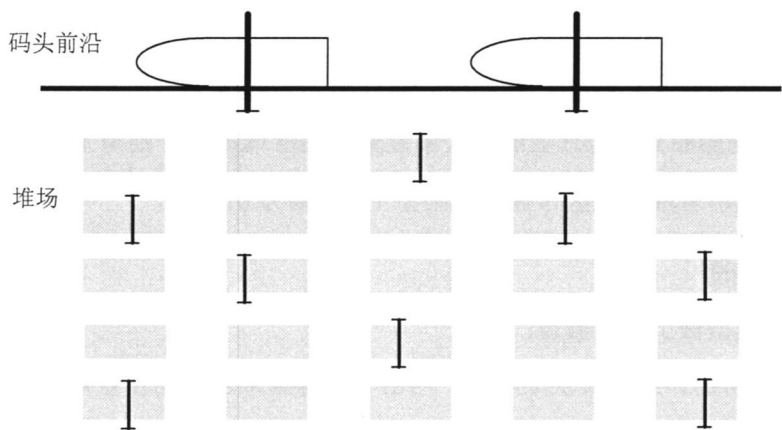


图 4.1 堆场作业示意图

Fig.4.4 Diagram of the yard operation

4.2 优化模型

本文建立的码头场桥作业资源配置优化模型主要考虑场桥在堆场各箱区间的配置，问题的关键是如何依据各箱区的作业量合理的配备场桥，减少场桥的移动时间，减少作业完成时间。此外，模型还要考虑船舶岸边作业情况，对于堆放在堆场不同箱区但是装在船舶同一个贝位的集装箱，要保证堆场的作业能力与岸桥的作业能力相平衡，尽量减少岸桥的等待时间。

4.2.1 变量定义

模型中的集合及变量定义如下：

R ：堆场场桥的集合；

S ：堆场箱区的集合；

K ：船舶贝位的集合；

T ：作业计划期；

X_{ijt} ： t 时刻场桥 i 作业的集装箱对应船舶 j 贝位则为 1，否则为 0；

Y_{jk} ：场桥 k 作业堆场箱区 i 后紧接着作业堆场箱区 j 则为 1，否则为 0；

Z_{ijt} ： t 时刻场桥 i 在堆场箱区 j 则为 1，否则为 0；

Q_i ：堆场箱区 i 需要作业的集装箱数量；

t_{ij} ：场桥从堆场箱区 i 到堆场箱区 j 的行驶时间；

τ ：场桥作业一个集装箱的时间；

w_{it} ： t 时刻船舶 i 贝位作业的最大集装箱量在堆场箱区 j 则为 1，否则为 0；

h_t ： t 时刻所有堆场箱区作业完成则为 1，否则为 0；

4.2.2 模型假设

本文对模型做了如下假设：

- (1) 将场桥的作业量转换成时间，均由平均箱量乘以平均作业效率得到，平均作业效率设为一个定值，假设每台场桥的效率相同，寻找总完成时间最短的场桥配置方案。
- (2) 不考虑场桥在每个箱区具体的作业状况，不考虑由于跨贝作业引起的场桥移动时间。

- (3) 计算场桥在不同箱区间的移动时间时, 假设场桥的起始位置及终点位置均为箱区的中间位置, 由此计算场桥的移动时间。
- (4) 根据港口作业 12 小时为一个工班, 本文将每天划分成了六个时间段, 每四小时为一个时间段。
- (5) 场桥在每个时间段内只允许移动一次, 不能频繁转换作业场地。
- (6) 为了避免太多场桥在同一个箱区间进行作业互相干扰, 本文假设每个箱区最多有两台场桥进行装卸作业。
- (7) 假设每台场桥有初始位置, 将在实证分析中详细介绍。

4.2.3 模型构建

堆场场桥的配置需要考虑多种因素的影响, 不仅要考虑堆场实际作业任务, 还需要考虑岸边船舶的装卸状况, 因此, 本文建立堆场场桥作业资源配置优化模型, 优化堆场场桥在箱区间的配置, 模型表示如下:

$$f_1 = \min \sum_j \sum_i \sum_k Y_{ijk} \cdot t_{ij} \quad \text{式(4.1)}$$

$$f_2 = \min(\sum_i h_i) \quad \text{式(4.2)}$$

$$\sum_i Y_{ijk} = 1 \quad \text{式(4.3)}$$

$$\sum_j Y_{ijk} = 1 \quad \text{式(4.4)}$$

$$\sum_i H_{ijt} \leq 2 \quad \text{式(4.5)}$$

$$\sum_i X_{ijt} \leq w_{jt} \quad \text{式(4.6)}$$

$$\sum_i \sum_j H_{ijt} = \tau \cdot Q_j \quad \text{式(4.7)}$$

$$h_t \leq \frac{\sum_{i=1}^t \sum_j H_{ijt}}{\tau \cdot Q_j} \quad \text{式(4.8)}$$

$$X_{ijt}, Z_{ijt}, w_{jt}, h_t, Y_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \text{式(4.9)}$$

式(4.1)为目标函数一, 保证场桥的转场时间最短; 式(4.2)为目标函数二, 保证场桥的作业完成时间最短; 式(4.3)为约束条件, 保证场桥 k 只有一个紧前作业; 式

(4.4)为约束条件, 保证场桥 k 只有一个紧后作业; 式(4.5)为约束条件, 保证每个堆场箱区最多有两台场桥进行作业; 式(4.6)为约束条件, 保证堆场场桥作业的集装箱的速度不能超过岸桥作业能力; 式(4.7)为约束条件, 保证堆场所有装卸任务都被完成; 式(4.8)规定了场桥作业完成时间的标志; 式(4.9)为约束条件, 约束了变量的取值范围。

4.3 模型求解

本文求解的堆场场桥作业资源配置优化问题, 是以完成作业时间最短及场桥移动距离最短的多目标优化方案。不同于单目标规划的是, 多目标优化通常不存在唯一的最优解, 大多数情况下, 得出的优化结果为 Pareto 最优解集。本文此次采用的是 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) 算法进行求解, NSGA-II 又称改进非劣解排序遗传算法, 基本思想是平衡各目标函数, 进而得出使整体最优的解集。该算法采取运用附带精英策略的非支配快速排序方法来寻求问题的 Pareto 最优解, 是当前较为常用的多目标求解算法之一, 其可以通过独特的非支配排序以及拥挤度计算方法得出 Pareto 前沿面, 即最优解集, 从而供决策者采纳^[60]。

4.3.1 染色体编码

为确保所设计出的染色体可以按照基因编码的形式来表达研究问题的可行解, 从而设计出染色体编码。本文研究的是场桥的配置问题, 则问题可行解为每台场桥在各箱区的分配情况, 因此采用整数编码的形式构造染色体结构。假设共有 N 台场桥, 为了避免场桥频繁的转场, 在每个作业工班为 12 小时的基础上, 将研究的一天时间划分为 6 个决策时间段, 则每台场桥有 6 个箱区分配的可能性, 且分配位置可以重复, 因此将染色体表示成 $(A_1, A_2, \dots, A_6, B_1, B_2, \dots, B_6, \dots, N_1, \dots, N_6)$ 的形式, 其中 (a, b, \dots, N) 代表 N 台场桥, (a_1, a_2, \dots, a_6) 代表每台场桥每个时段的位置, 则染色体长度为 $6N$ 。假设共有 14 台场桥, 堆场箱区数为 20, 染色体编码如图 4.2 所示, 则其染色体长度应为 84, 生成的实际染色体之一为 020401030506.....141611131512, 则 1 号场桥的行驶路径为箱区 02-04-01-03-05-06, 14 号场桥的行驶路径为箱区 14-16-12-13-15-12, 场桥的移动时

間可以由此得出。

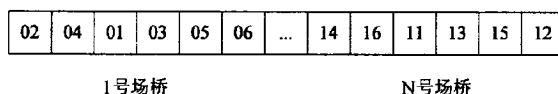


图 4.2 染色体编码

Fig.4.2 chromosome code

4.3.2 种群初始化

初始种群包含大量染色体,通过对这些染色体的交叉遗传变异等操作,产生新的染色体,寻找目标函数最优的染色体。在初始种群中,种群数量是影响优化结果的一个重要因素,种群规模越大,遗传的效果越好,但是收敛速度较低,种群规模越小,则影响子代的遗传,因此,选择合适规模的种群非常重要。在生产初始种群时,必须为问题的可行解,这样才能够保证种群遗传的优良性。本问题是堆场场桥的优化配置研究,在上一小节中已给出染色体的基本结构,根据此前设计的染色体编码方式,其随机生成的自然数序列或许不能全部够满足本文。初始种群中染色体代表着堆场箱区,为了避免场桥的移动距离过长,本文将每台场桥的可移动限制在一个以初始位置为中心的一个小范围内,且每台场桥不同时段的位置可以相同,也就是说移动距离为零。根据上述约束及文中的约束条件,依据染色体编码形式所随机生成初始种群,继而根据约束条件来判断每条染色体是否可行,如结果可行则保留到初始种群中,之后再继续往里补充新的染色体,直到加入的染色体的数量满足初始种群的数量要求。

4.3.3 适应度函数

适应度值是衡量一个染色体是否能继续保留的标准，通常适应度值的计算与目标函数相关。在遗传算法中，通常将保留适应度值高的染色体，留作父代进行交叉，以生成适应度值更高的子代个体。在问题的求解过程中，正是利用了优胜劣汰这一物种遗传的原理，寻找最优的个体，得到最优解。本文为多目标求解问题，适应度值也为两部分。本文将目标函数转化成适应度值函数，如下：

$$Z_1 = \frac{1}{1 + f_1} \quad \text{式(3.10)}$$

$$Z_2 = \frac{1}{1+f_2} \quad \text{式(3.11)}$$

4.3.4 选择交叉变异

(1) 选择

遗传算法中的选择操作，其不会改变染色体基因，是为了从种群中选择适应度值较高的染色体进行保留，淘汰适应度值较差的染色体，符合优胜劣汰的生存法则。本文采用轮盘赌选择方法选择父代个体，假设种群数量为 N ，以 $z(i)$ 表示个体 i 的适应度值，则个体 i 被选中的概率为：

$$P_i = \frac{z(i)}{\sum_{i=1}^N z(i)} \quad \text{式(3.12)}$$

然后计算每个个体的选中概率的累加值，按照个体标号进行排列。随机生成 $(0,1)$ 之间任意随机数，找出比此随机数小且最相近的个体，将其保留下来。

(2) 交叉

遗传算法中为了交换两个父代个体的部分基因而采取交叉操作，以生成新的子代个体，既保留了父代个体的部分基因，同时又改变了原有的一些基因，生成了新的个体，保证种群的多样性。本文采用多点交叉方式进行染色体交叉，从每个基因中随机选择一个基因交叉，则使得每台场桥的箱区分配都与父代不同。染色体交叉的位置随机选择，从 $(1,6)$ 中生成一系列随机数，随机数的个数与场桥数量相同。找到交换的基因后，交换父代两个个体的基因，则生成了新的子代个体。若场桥数量为 14，则首先生成一系列随机数 2-4-1-3-5-3-6-2-1-3-5-2-1-4，则代表着每个基因中的交叉点，如第一天场桥的六个基因中，选择第二个进行交叉，第二天场桥的基因中，选择第四个基因进行交叉，以此类推，交换两个父代个体所对应的基因。

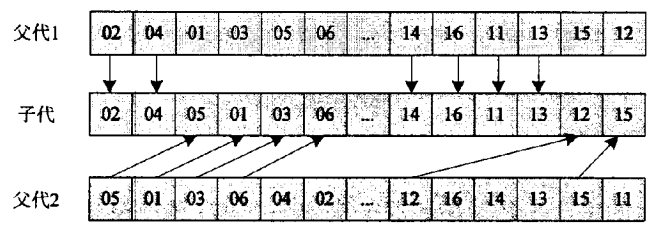


图 4.3 交叉操作示意图

Fig.4.3 The crossover operation

交叉率的设定是在交叉操作中至关重要，相比大一些的交叉概率虽然可以增强遗传算法用以开辟新搜索区域的能力，但同时高性能的模式会遭到破坏的可能性也随之增大；如果交叉概率获取太低，则遗传算法搜索速度又会随之降低。本章中交叉率设为 0.6。

(3) 变异

变异使染色体快速表现出新的性状。变异操作是用其它等位基因来替换染色体上的某个基因，并以此来产生新的子代个体。鉴于本文所研究问题的约束条件相对较多，因此在变异过程中需要对变异后是否满足约束进行充分考虑，进而降低求解的规模。在遗传算法中，变异率的大小是影响变异操作的重要因素之一，低频度变异能够降低群体中重要的、单一基因丢失的可能性，而高频度的变异则影响算法的收敛速度。同交叉操作类似，每六个基因中随机生成 12 个变异点进行变异，两个变异点基因相互交换位置，如图 4.4 所示，前两个变异点为 2 和 5，则交换第 2 个和第 5 个基因信息，以此类推，变异后的染色体要满足模型中的约束条件，本章中变异率设为 0.05。

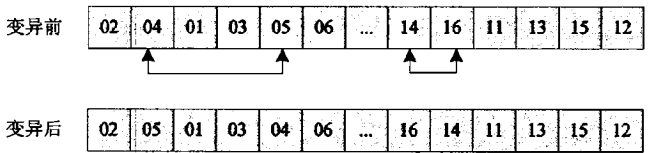


图 4.4 变异操作示意图

Fig.4.4 The mutate operation

4.3.5 非支配及拥挤度

多目标遗传算法的典型算法为 NSGA-II 算法，其基本思想是定义了非支配排

序和拥挤度两个操作步骤，能够平衡各个子目标函数的关系，得到整体最优的集合，这两个步骤则是用来寻找最优解^[61]。

(1) 非支配排序

对种群内的每个个体 i 都计算一次支配个体 i 的个体数 n_i 和被个体 i 支配的个体集合 S_i 。找到 $n_i = 0$ 的个体，将他们存入 F_1 集合中，针对 F_1 集合中的每个个体 j ，考察其支配的个体集 S_j ，将 S_j 内的每个个体 k 的 n_k 减 1（由于支配个体 k 的 i 个体已经存入 F_1 ）。找出所有 $n_k = 0$ 的个体，将他们放入新的集合 H 中。依此类推，将所有的个体都存入相应的集合中，并赋予相应的非支配序。

当两个不同的染色体属于不同的支配层时，选择处于支配层较低的染色体，若是两个染色体处于相同的支配层时，则依据拥挤度进行选择。

(2) 拥挤度的计算

对种群中单个个体周围其它个体密集程度的衡量指标为拥挤度。拥挤度越大，则与其相似的个体越多，种群物种多样性越弱，可见拥挤度值越小越好。通过对拥挤距离进行排序，优先选择周边个体较少的个体，将使最终得到的个体具有更加均匀的分布性。

此算子所具有的含义是，若两个解属于不同非支配排序层级时，则选择非支配层级较低的解了；当两个解均属同一个非支配层级的时，则选择拥挤度较大的解，即该解周围的个体相对较少，其所在区域解的分布也相对稀疏。

第 5 章 基于天津港的码头场桥资源优化配置实证分析

5.1 天津港概况

作为华北地区体量最为庞大的综合性人工港口，天津港的水陆域面积现有约 326 平方公里，陆域面积约为 121 平方公里。主要由东疆港区、北疆港区、南疆港区、南港港区东部区域、临港经济区南部区域等组成。其中东疆港区、北疆港区的大部以集装箱作业为主。天津港的区域整体服务功能较为完善、其辐射带动能力相对较强，并天然拥有三条亚欧大陆桥的过境通道，是我国目前大陆桥国际通道运输总量最大的人工港口，目前已经建成并投入使用的天津国际贸易与航运服务中心，是全国最大的“一站式”航运服务中心和电子口岸，其在内陆腹地设立的 21 个“无水港”，更进一步完善了天津港覆盖内陆腹地的物流网络体系。

5.2 某码头堆场现状分析

天津港码头较多，现选择某一个下属码头进行研究。该码头系天津港最新建成的大型现代化专业集装箱码头，岸线长度及码头纵深均位于中国北方诸多单体集装箱码头的前列。该码头堆场共设置重箱场区 80 个，其中实现油改电改造，可提供电力供场桥作业的场区为 56 个，并按照传统模式分整体为进口箱区和出口箱区，共配备 58 台场桥。鉴于该码头成立时间相对较短，目前吞吐量完成情况尚未达到设计能力，存在各类作业资源暂未得到充分利用的情况。为进一步降低设备折旧及损耗，目前对主要作业资源，尤其是场桥的出勤数量进行了较为严格的限制，这同时也使码头的计划调度面临在相对丰富的场地资源条件下，如何合理配置既定数量的资源，从而在节约成本投入的前提下，确保作业效率不受影响，甚至提升整体作业水平的问题。因此，为本文着重选取该码头进行实证分析，以期为该码头的实际生产运营提供具有实践意义的理论指导和启示。

本文主要研究出口箱区，因此，选择其中常用的 25 个箱区为研究对象，配备场桥数量为 20 台。由于本文主要研究堆场资源中的场桥配置，则不考虑空箱叉车、正面吊等其他装卸资源。

堆场箱区数量为 25 个，布局图如图 5.1 所示。堆场箱区的标号用字母加数字的方式表示，其中纵排用字母 ABCDE 表示，分别表示第 1、2、3、4、5 列堆场箱

区，横排分别用 01、02、03、04、05 表示，如 A05 表示堆场第一列第五排的箱区。每个箱区长 249 米，宽 16.6 米，共有 32 个 20 尺集装箱贝位，每个贝位可以堆放 6 列集装箱，每列堆码 4-5 层集装箱，通过对实际堆码情况的统计分析，堆场利用率为 65%左右。

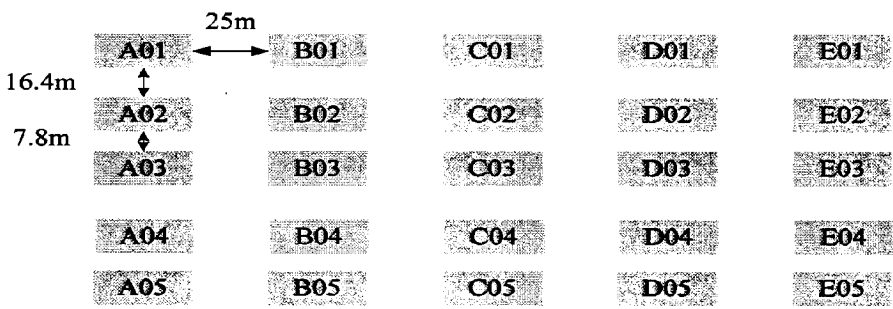


图 5.1 某码头堆场布局图

Fig.5.1 The layout of a certain terminal

5.3 数据搜集

5.3.1 场桥在箱区间的移动时间

根据堆场的布局图以及场桥的移动速度，得到场桥在个箱区间的移动时间表如表 5.1 所示：

表 5.1 各箱区场桥移动时间表

Tab.5.1 The time table of the RTGs moving in each block

单位：分钟
Unit: Minute

箱区	A01	A02	A03	A04	A05	B01	B02	B03	B04	B05	C01	C02	C03	C04	C05	D01	D02	D03	D04	D05	E01	E02	E03	E04	E05
A01	0	16.5	17	17.5	18	12	17.5	18	18.5	19	13	18.5	19	19.5	20	14	19.5	20	20.5	21	15	20.5	21	21.5	22
A02	16.5	0	16.5	17	17.5	17.5	12	17.5	18	18.5	18.5	13	18.5	19	19.5	19.5	14	19.5	20	20.5	20.5	15	20.5	21	21.5
A03	17	16.5	0	16.5	17	18	17.5	12	17.5	18	19	18.5	13	18.5	19	29	19.5	14	19.5	20	21	20.5	15	20.5	21
A04	17.5	17	16.5	0	16.5	17.5	18	17.5	12	17.5	18.5	19	18.5	13	18.5	19.5	20	19.5	13	19.5	20.5	21	20.5	13	20.5
A05	18	17.5	17	16.5	0	18	18.5	18	17.5	12	19	19.5	19	18.5	13	20	20.5	20	19.5	14	21	21.5	21	20.5	15
B01	12	17.5	18	17.5	18	0	16.5	17	17.5	18	12	17.5	18	18.5	19	13	18.5	19	19.5	20	14	19.5	20	20.5	21
B02	17.5	12	17.5	18	18.5	16.5	0	16.5	17	17.5	17.5	12	17.5	18	18.5	18.5	13	18.5	19	19.5	19.5	14	19.5	20	20.5
B03	18	17.5	12	17.5	18	17	16.5	0	16.5	17	18	17.5	12	17.5	18	19	18.5	13	18.5	19	29	19.5	14	19.5	20
B04	18.5	18	17.5	12	17.5	17.5	17	16.5	0	16.5	17.5	18	17.5	12	17.5	18.5	19	18.5	13	18.5	19.5	20	19.5	13	19.5
B05	19	18.5	18	17.5	12	18	17.5	17	16.5	0	18	18.5	18	17.5	12	19	19.5	19	18.5	13	20	20.5	20	19.5	14
C01	13	18.5	19	18.5	19	12	17.5	18	17.5	18	0	16.5	17	17.5	18	12	17.5	18	18.5	19	13	18.5	19	19.5	20
C02	18.5	13	18.5	19	19.5	17.5	12	17.5	18	18.5	16.5	0	16.5	17	17.5	17.5	12	17.5	18	18.5	18.5	13	18.5	19	19.5
C03	19	18.5	13	18.5	19	18	17.5	12	17.5	18	17	16.5	0	16.5	17	18	17.5	12	17.5	18	19	18.5	13	18.5	19
C04	19.5	19	18.5	13	18.5	18.5	18	17.5	12	17.5	17.5	17	16.5	0	16.5	17.5	18	17.5	12	17.5	18.5	19	18.5	13	18.5
C05	20	19.5	19	18.5	13	19	18.5	18	17.5	12	18	17.5	17	16.5	0	18	18.5	18	17.5	12	19	19.5	19	18.5	13
D01	14	19.5	29	19.5	20	13	18.5	19	18.5	19	12	17.5	18	17.5	18	0	16.5	17	17.5	18	12	17.5	18	18.5	19
D02	19.5	14	19.5	20	20.5	18.5	13	18.5	19	19.5	17.5	12	17.5	18	18.5	16.5	0	16.5	17	17.5	17.5	12	17.5	18	18.5
D03	20	19.5	14	19.5	20	19	18.5	13	18.5	19	18	17.5	12	17.5	18	17	16.5	0	16.5	17	18	17.5	12	17.5	18
D04	20.5	20	19.5	13	19.5	19.5	19	18.5	13	18.5	18.5	18	17.5	12	17.5	17.5	17	16.5	0	16.5	17.5	18	17.5	12	17.5
D05	21	20.5	20	19.5	14	20	19.5	19	18.5	13	19	18.5	18	17.5	12	18	17.5	17	16.5	0	18	18.5	18	17.5	12
E01	15	20.5	21	20.5	21	14	19.5	29	19.5	20	13	18.5	19	18.5	19	12	17.5	18	17.5	18	0	16.5	17	17.5	18
E02	20.5	15	20.5	21	21.5	19.5	14	19.5	20	20.5	18.5	13	18.5	19	19.5	17.5	12	17.5	18	18.5	16.5	0	16.5	17	17.5
E03	21	20.5	15	20.5	21	20	19.5	14	19.5	20	19	18.5	13	18.5	19	18	17.5	12	17.5	18	17	16.5	0	16.5	17
E04	21.5	21	20.5	13	20.5	20.5	20	19.5	13	19.5	19.5	19	18.5	13	18.5	18.5	18	17.5	12	17.5	17.5	17	16.5	0	16.5
E05	22	21.5	21	20.5	15	21	20.5	20	19.5	14	20	19.5	19	18.5	13	19	18.5	18	17.5	12	18	17.5	17	16.5	0

场桥的移动时间是由行驶距离及转弯时间的和共同决定的。场桥在各箱区间的移动路线如图 5.2 所示：

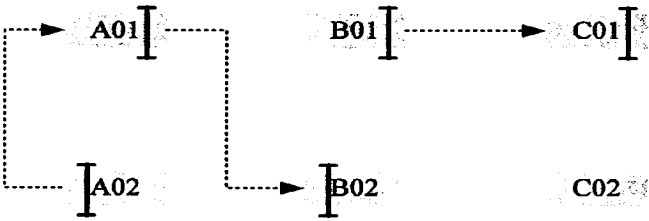


图 5.2 场桥移动路径示意图

Fig.5.2 The diagram of the movement of RTGs

如从箱区 A01 到 B01 的时间的计算方法为：

收受电弓+启动柴油发动机+过场+放受电弓=0.5+10+1+0.5=12 min

从箱区 A01 到箱区 B02 的时间的计算方法为：

收受电弓+启动柴油发动机+至主干道+顶升轮胎+轮胎 90 度转向+轮胎着地+至主干道+顶升轮胎+轮胎 90 度转向+轮胎着地+跑大车至低位+放受电弓=0.5+10+0.5+1+0.5+1+0.5+1+0.5+1+0.5+0.5=17.5 min

以此类推，假设每台场桥各步骤耗时相同，则得到场桥在任意两箱区间移动所需要的时间。

5.3.2 各箱区作业量分析

选择天津港某集装箱码头的堆场场桥作业数据进行实证分析，堆场场桥的平均作业效率为 3min/集装箱，各箱区的作业箱量如表 5.2 所示：

表 5.2 各箱区各时段作业量（TEU）
Tab.5.2 The task of different block in different time period

箱区/时段	1	2	3	4	5	6
A01	40	46	55	48	50	44
A02	62	58	47	60	61	56
A03	38	27	36	49	57	46
A04	41	36	24	37	48	64
A05	51	32	31	54	43	37
B01	47	25	26	32	51	47
B02	52	26	25	36	49	40
B03	37	48	37	32	46	31
B04	41	51	42	29	32	46
B05	54	41	36	27	42	51
C01	55	46	38	40	36	58
C02	36	27	32	43	35	57
C03	27	38	31	47	39	45
C04	15	24	36	42	36	42
C05	35	51	38	36	43	57
D01	40	46	46	39	45	53
D02	14	46	39	46	38	46
D03	37	38	41	37	53	42
D04	52	48	37	42	57	43
D05	46	42	27	41	60	46
E01	43	37	41	38	47	34
E02	37	26	39	48	60	57
E03	31	47	32	42	60	52
E04	30	34	41	37	54	47
E05	25	30	45	36	52	48

5.3.3 场桥初始位置图

本文假设场桥的数量为 20 台，现给每一台场桥分配一个初始位置，初始位置的设定比较随机，优化时可根据优化结果安排初始位置，此外还要考虑作业的方便程度等原则，场桥的初始位置如图 5.3 所示：

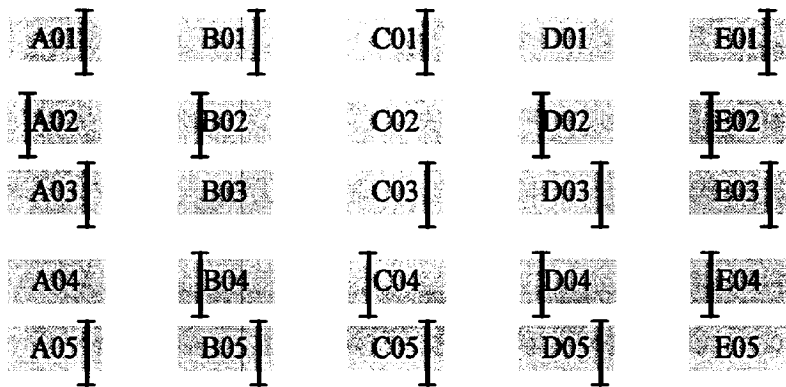


图 5.3 场桥初始位置图

Fig.5.3 The initial position of RTGs

5.4 优化结果分析

本文是多目标函数优化问题，用 NSGA-II 算法进行求解，算法的初始种群规模设为 60，迭代次数设为 120，交叉概率设为 0.6，变异率设为 0.05。

5.4.1 帕累托最优集

将初始参数代入NSGA-II算法中，得到运行结果如图5.4所示，总运行时间为 584.9350分钟。可以看出，在Pareto前沿面上，场桥总移动时间在964.5-1429.5分钟间浮动，完工时间在1235-1416分钟之间浮动。

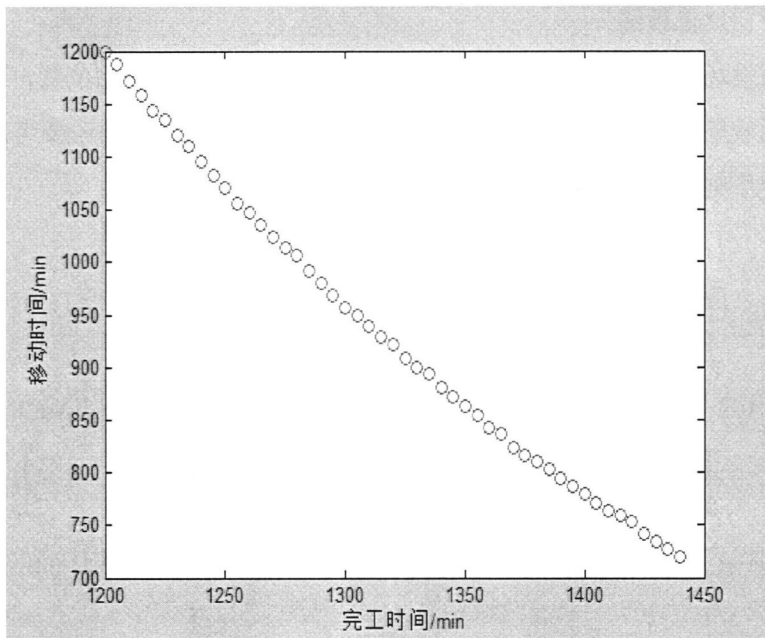


图 5.4 帕累托前沿面

Fig.5.4 The Pareto frontier

图 5.4 中 Pareto 前沿面上共包含 50 个最优解，即 50 个最优场桥配置方案，方案之间无优劣之分，均为可行的等效优化方案。各个解的场桥总移动时间与最小完工时间如表 5.3 所示。

表 5.3 最优解解析
Tab.5.3 The optimal analytical solution

	龙门吊移动时间	最小完工时间
1	1200	1200
2	1205	1188
3	1210	1172
4	1215	1159
5	1220	1143
6	1225	1135
7	1230	1120
8	1235	1110
9	1240	1095
10	1245	1082
11	1250	1070
12	1255	1056
13	1260	1047
14	1265	1035
15	1270	1024
16	1275	1013
17	1280	1007
18	1285	991
19	1290	980
20	1295	969
21	1300	956
22	1305	949
23	1310	939
24	1315	929
25	1320	922
26	1325	909
27	1330	900
28	1335	893
29	1340	881
30	1345	872
31	1350	863
32	1355	854
33	1360	843
34	1365	836
35	1370	823
36	1375	816
37	1380	811
38	1385	803
39	1390	795
40	1395	787
41	1400	779
42	1405	771
43	1410	764
44	1415	759
45	1420	753
46	1425	741
47	1430	734
48	1435	727
49	1440	720
50	1445	716

5.4.2 场桥的配置状况

从多目标优化得出的结果看，存在多组最优解使得目标函数达到最优，现选择其中一个解进行场桥配置的具体分析。每一个解中包含任意一台场桥在每个时间段所在的箱区编号，得到场桥的位置图如图 5.5 所示。

龙门吊序号	1	A01	A01	B01	B01	B01	B01
	2	B01	B03	B03	A04	A04	A04
	3	C01	C01	C01	C01	B03	C03
	4	E01	E01	E01	E01	E05	E05
	5	A02	A02	A02	A02	A02	D02
	6	B02	B04	B04	B05	B05	B05
	7	C02	C02	C02	C02	D03	D03
	8	E02	E05	E05	E03	E03	E03
	9	A03	A03	A03	A03	A03	A03
	10	B03	B03	B03	B03	C05	C05
	11	D01	D01	D01	D01	D01	E01
	12	E03	E03	E02	E02	E02	E02
	13	A04	A04	A01	A01	A01	C01
	14	B04	D04	C04	C04	C04	C04
	15	C04	E04	E04	E04	E04	A05
	16	D03	D03	D03	D04	D04	D04
	17	A05	A05	A05	A05	B04	B04
	18	B05	B05	B02	B02	B02	B02
	19	C05	C05	C05	D05	D05	D05
	20	D05	D05	C02	C02	C02	C02
		1	2	3	4	5	6
		时段					

图 5.5 场桥配置图

Fig.5.5 Deployment of the RTGs

5.4.3 场桥的移动时间分析

分析得到的帕累托最优集，从中选取一种解，将每台场桥的移动时间取平均值，得到优化前后每台场桥的平均移动时间的对比图，如图 5.6 所示：

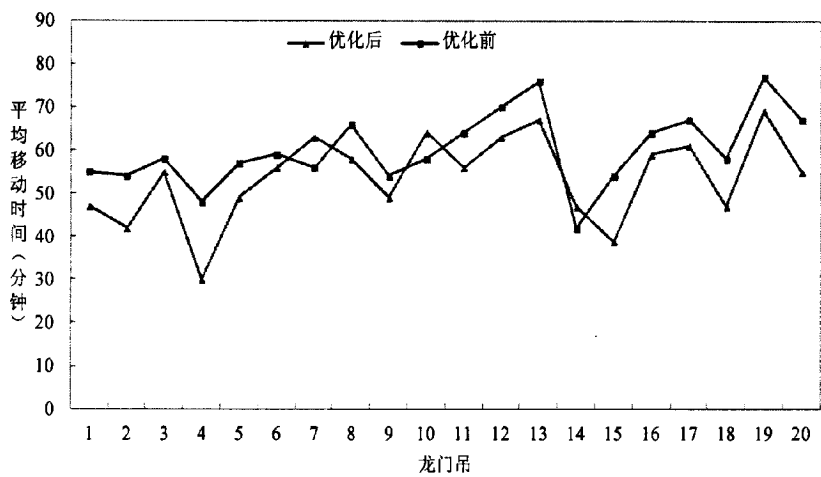


图 5.6 优化前后场桥的移动时间对比图

Fig.5.6 The moving time comparison of RTG before and after optimization

从图中可以看出，大多数场桥的平均移动比优化前减少，少数场桥的平均移动时间比优化前增加，这是由于在场桥的配置中，为了满足约束条件及工作量的要求，一些场桥的移动更加频繁，但是总体而言，优化后场桥的平均移动时间比优化前减少了 7 分钟。

5.4.4 作业完成时间分析

分析得到的帕累托最优集，从中选取上述分析场桥移动时间的最优解，分析优化前后作业最小完成时间。从结果中可以看出，最小完成时间比优化前减少了 38.6 分钟。

5.5 优化结果在场桥资源配置实践中的应用

本次分析得到的帕累托最优集中，虽然理论上的 50 个最优解组合均可实现场桥平均移动时间与最小作业完成时间的减少，但在实践过程中，码头生产调度人员通常更倾向于减少场桥的转场次数，以降低生产指挥中的难度和出现机械故障等各种突发情况的机率，因此本次得出的帕累托最优集在实践应用中还需结合实际情况进一步的筛选与取舍，进而实现优化场桥资源配置的目标。

5.5.1 帕累托最优集的实际应用

鉴于在实践中，不仅场桥司机倾向于在工班时间内完成更多的作业量以增加

个人收入，调度人员也更乐于减少场桥转场或过场的次数，从而降低指挥强度。因此，本次所得出的帕累托最优解集中，虽然各组最优解均能使目标函数达到最优，但相对需使场桥花费更多时间进行场地间移动的方案，显然是不适用于实际生产作业的，因此通常情况下在进行场桥资源配置时，则需尽量避免作业中场桥的频繁转场或过场。

5.5.2 实际作业情况下对最优集的取舍

以往在进行场桥资源配置的过程中，通常根据计划人员经验来决定在哪些场地中配置 1 部场桥、哪些场地中配置 2 部场桥，不仅缺乏理论依据，更易导致实际作业期间场桥的频繁转场与过场，极大影响作业效率。结合本次结算所得出的最优解集以及实际生产作业特点，可以在如下配置方案中进行优化取舍：

(1)在工班作业任务总量较少的情况下，应采取在纵向各场地平均安排场桥的配置方案，如此即可以减少因转场所带来的场桥总体移动时间，又可以确保工班总体任务量的及时完成。

(2)在工班作业任务总量较多的情况下，应采取在横向各场地密集安排场桥的配置方案，如此虽需场桥多次进行转场以参与其他横向场地的作业，但可以通过相对较少的总体完工时间，来确保工班总体任务量的按时完成。

第 6 章 结论

针对为集装箱码头场桥作业资源配置进行优化的问题，本文在综合分析了相关调配优化理论与现有技术的基础上，提出了一些新的思路和方法。通过对天津港某集装箱码头实际作业数据的实证分析，验证了本文所设计的遗传算法及多目标混合整数规划模型的有效性，并通过帕累托最优解集，得出了等效的不同优化方案。同时结合本次的实证分析及实际作业中可能面临的情况，就场桥资源配置提出了相应优化解决方案。

通过本文经验证的场桥作业资源优化配置模型，以及经过比选所采用的启发式求解算法，不仅为码头生产计划及调度指挥提供了在不同作业需求条件下进行场桥资源优化配置的方案，更为集装箱码头对如何最大限度发挥有限场桥资源的最大效用提供了理论依据。在确保码头整体作业任务在规定时间内顺利完成的基础上，有效均衡了作业量与作业时间之间的关系，进而实现了减少整体成本投入的目标，对促进码头企业整体作业效率及运营效益的不断提升起到了十分积极的借鉴作用。

参 考 文 献

- [1] 李斌. 基于哈佛体系结构的集装箱码头物流系统建模仿真研究[D]. 武汉理工大学.2009
- [2] 孙立启. 沿海集装箱中小码头装卸设备配置和工艺研究[J].中国水运.2007(10)
- [3] 杨会军; 齐二石; 田润良. 集装箱港口装卸机械配置优化研究[J]. 起重运输机械 2008(12)
- [4] 李丽丽. 集装箱堆场布局与场桥调度优化研究[D]. 大连:大连海事大学.2011
- [5] 王兴秋. 集装箱码头后方堆场系统设备配比仿真研究[D]. 山东: 山东大学, 2011
- [6] Shell Ying Huang, Xi Guo. An Improved Least Cost Heuristic for Dynamic Yard Crane Deployment in Container Terminals[C]. IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2011: 84-89.
- [7] 林志树. 轮胎式集装箱龙门起重机节能项目的发展及应用[J]. 起重运输机械, 2008,(10): 14-18
- [8] De Castillo B, Daganzo C F. Handling strategies for import containers at marine terminals[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1993, 27(2): 151-166.
- [9] Hwan Kim K, Bae Kim H. Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals [J]. International Journal of Production Economics, 1999, 59(1): 415-423.
- [10] Vidovic, Kim E. H. Stimating the cycle time of three-stage material handling systems[J]. Ann Operres, 2006, (144): 181-200
- [11] 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.
- [12] Wong JCF, Leung JMY. On a vehicle routing problem with time windows and Stochastic travel times[J]. Hong Kong: Chinese University of Hong Kong, 2002
- [13] 李东, 汪定伟. 基于欧拉方法的集装箱堆场集卡路径控制策略, 东北大学学报, 2009, 23(5): 23-26
- [14] 魏宏磊, 朱瑾. 基于“作业面”优先策略的集装箱港口集卡路径优化研究[J]. 中国水运, 2012(1): 70-72
- [15] 刘丰硕. 基于装卸协调作业的集装箱码头集卡路径优化研究[D]. 大连:大连海事大学.2010
- [16] 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. 计算机应用研究. 2007,24(9): 146-151
- [17] 计明军, 刘丰硕, 李郭记等. 基于装卸协同作业的集装箱码头集卡调度及配置优化[J]. 大连海事大学学报: 自然科学版, 2010, 36(1): 47-50.
- [18] 张哲. 集装箱码头混合交叉作业集成调度模型[D]. 大连: 大连海事大学.2012
- [19] 申海静, 韩晓龙. 基于动态规划算法的集装箱码头集卡优化调度模型[J]. 集装箱化, 2011,

(6): 34-37

[20] 吴名建. 港口集装箱拖车调度优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学.2010

[21] Daganzo CF. The crane scheduling Problem of transportation[J]. Research PartB, 1989, 23(B): 159-175

[22] 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.

[23] Kap HK, Jong WB. UnMarshalling ExPort Containers in Port Container terminal. Computers and industrial engineering. 1998(a), 35(3-4):655-658.

[24] Kim K H. Evaluation of the number of rehandles in container yards[J]. Computers & Industrial Engineering, 1997, 32(4): 701-711.

[25] 李建忠. 码头堆场龙门起重机动态配置优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(1): 70-74.

[26] Gambardella L M, Rizzoli A E, Zaffalon M. Simulation and planning of an intermodal container terminal[J]. Simulation, 1998, 71(2): 107-116.

[27] Richard Linn, Chuqian Zhang. A Heuristic for Dynamic Yard Crane Deployment in a Container Terminal[J]. IIE Transactions, 2003, 35(2): 161-174.

[28] Zhang C, Wan Y, Liu J, et al. Dynamic crane deployment in container storage yards[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2002, 36(6): 537-555.

[29] 李建忠. 集装箱港口堆场起重机的配置确定[J]. 上海海事大学学报, 2005, 26(1): 22-25.

[30] 韩晓龙. 集装箱港口装卸作业资源配置研究[D]. 上海: 上海海事大学. 2005.

[31] 韩晓龙. 集装箱港口龙门吊的最优路径问题[J]. 上海海事大学学报, 2005, 26(2): 39-41.

[32] Murty, K.G, Liu, J., Wan, Y-W., Zhang, C., et al.(2000), DSS for operation in container shipping terminal, working paper, University of Michigan, Ann Arbor.

[33] Kim K H, Kim K Y. An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals[J]. Transportation Science, 1999, 33(1): 17-33.

[34] 贺茂英. 集装箱堆场龙门吊路径优化问题研究 [D]. 大连:大连海事大学.2010.

[35] 谈超凤. 集装箱码头堆场资源管理优化研究[D]. 大连:大连海事大学, 2010.

[36] 梁亮. 集装箱码头装卸系统集成调度优化研究[D]. 上海: 上海交通大学.2010

[37] Kozan E, Preston P. Genetic algorithms to schedule container transfers at multimodal terminals[J]. International Transactions in Operational Research, 1999, 6(3): 311-329.

[38] Bish E K. A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 144(1): 83-107.

[39] 康海贵, 周鹏飞. 集装箱船舶装卸作业时起吊设备-车辆的规划研究[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(3): 372-379.

[40] 曾庆成, 杨忠振. 集装箱码头卸船作业调度方案的两阶段禁忌搜索算法[J]. 交通运输工程

学报 2007,7(2):109-122

[41] 曾庆成, 杨忠振. 集装箱码头作业调度双层规划模型及求解算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(3): 277. 281

[42] 曾庆成. 集装箱码头装卸作业集成调度模型与方法[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.

[43] 陈超, 张哲, 曾庆成. 集装箱码头混合交叉作业集成调度模型[J]. 交通运输工程学报, 2012, 03:92-100.

[44] W.C.Ng. Crane scheduling in container yards with inter-crane interference[J]. European Journal of Operational Research. 2005(164):64-78.

[45] 严政, 陶德馨. 基于动态优化组合的集装箱码头集卡调度技术[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(4): 26-29

[46] 李冠声, 丁以中等. 上海港集装箱码头吞吐能力与设备配置优化[J]. 中国港口, 2002, (8): 25-26.

[47] 郝旭. 集装箱码头装卸机械优化配置研究[D]. 大连:大连海事大学.2003

[48] 李艳. 基于敏捷性的集装箱码头装卸资源配置优化研究[D]. 江苏大学.2010

[49] Wenkai Li, Yong Wu, M.E.H. Petering Discrete time model and algorithms for container yard crane scheduling[J].European Journal of Operational Research. 2009,198:165-172.

[50] 周松艳. 基于 GIS 的集装箱运输设备优化调度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学.2005

[51] 关秀光. 基于 BPR 思想的集装箱码头集卡作业系统模拟及优化分析[D]. 上海: 上海海事大学.2004

[52] 邱跃龙. 集装箱自动化码头物流系统规划与仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学.2005

[53] Bae JW, Kim KH. A dispatching method for automated guided vehicles to minimize delays of container ship[J]. International Journal of Management Science, 1999, 5(1): 1-25

[54] Duinkerken M B, Evers J J M, Os J A. A case study on container terminal automation[A]. In: Proceedings of the 1999 Summer Computer Simulation Conference[C]. SCS, San Diego, CA, USA. 1999: 461-465

[55] 王佳溶, 楼佩煌, 王晓勇. 基于改进的两阶段控制策略的 AGV 路径优化调度研究[J]. 机械科学与技术, 2007, 23(11): 24-28

[56] Duinkerken M B, Evers J J M, Ottjes J A. A simulation model for integrating quay transport and stacking policies on automated container terminals[A]. In: Modeling and Simulation 2001, 15th European Simulation Multiconference 2001[CJESM2001, SCS San Diego, CA, USA. 2001:909-916

[57] Hans Otto Gunthe, Martin Grunow, Matthias Lehmann. AGV Dispatching Strategies at Automated Seaport Container Terminal[J]. International Symposium on OR and Its Application. 2005: 48-64

- [58] Iris F. A. Vis, Rende Koster. Determination of the number of automated guided vehicles required at a semiautomated container terminal[J]. 2000(10)
- [59] Pareto, V.. Course of Political Economy, Lausanne. 1896.
- [60] Deb, K., A. Pratap, et al.. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on ,2002,6(2): 182-197.
- [61] 杨路燕. 基于风险分析的成品油二次配送路径优化研究[D]. 大连海事大学, 2014.

致 谢

首先，感谢大连海事大学能够给我重返教室学习知识的机会，在参加大连海事大学 MBA 课程期间，无论是课程的细致安排海事各位老师的悉心授业，都在我的人生旅途中留下了十分美好的回忆。

更要感谢我的论文导师曾庆成教授，正是曾教授渊博的知识、严谨的治学理念及热情坦诚的为人，不仅及彻底决了我在从事码头计划工作时所遇到的各种问题与困惑，更在本次论文创作期间于百忙之中，甚至在大洋彼岸，给予了我极大的启发与帮助，无论从题目的选定、开题报告的形成，还是论文初稿的修改及最终定稿环节，无不凝聚了曾教授的汗水与殷切希望。借此机会，再次向曾教授致以崇高的敬意和由衷的感谢！

同时还要衷心感谢在论文撰写期间给予我无私帮助的大连海事大学的老师和同学，正是他们在论文开题过程中的耐心指导和在论文撰写过程中的极大支持，让我最终顺利完成本次论文的创作。

在此还要感谢我的家人，能够在工作近七年后得以重返教室的机会，我倍感幸运，正是因为拥有在身旁倾力支持和理解我的家人，才让我能够获得这份幸运及一路前行的勇气和力量！

最后，特别感谢各位专家教授在百忙之中对本文的审阅，并恳请提出宝贵的意见和批评。