

学校代码: 10126
分类号: _____

学号: 31336021
编号: _____

论文题目

集卡调度下的集装箱码头场桥 调度及堆场分配问题

学 院: 数学科学学院
专 业: 数学
研究方向: 运筹学
姓 名: 吕常亮
指导教师: 曹瑾鑫 教授

2016 年 3 月 28 日

**THE YARD CRANE AND STORAGE SPACE ALLOCATION
WITH YARD TRUCK DEPLOYMENT IN MARITIME
CONTAINER TERMINALS**



Lv Chang Liang

**Supervised by
Professor Cao Jinxin**

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

March, 2016

原创性声明

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

学位论文作者签名：吕常亮

指导教师签名：张树军

日 期：2016.5.28

日 期：2016.5.28

在学期间研究成果使用承诺书

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

学位论文作者签名：吕常亮

指导教师签名：张树军

日 期：2016.5.28

日 期：2016.5.28

集卡调度下的集装箱码头场桥调度及堆场分配问题

摘 要

随着世界经济的快速发展，作为货物运输主要通道的海上运输空前繁荣。如今提高集装箱码头的运营能力已经成为各国研究的主要课题。

针对集装箱码头优化管理问题，本文在考虑集卡调度的影响下，研究堆场内部空间的分配和场桥的调度问题，将上述问题整合成一个整数线性规划模型。模型以场桥及集卡的调度费用的总和最小为目标函数。考虑堆场内交通网络承受能力的限制，避免调度方案造成交通拥堵，从而提高集装箱码头的运营效率。文中采用分而治之的策略，设计了和声搜索算法和约束满足算法。

数值实验验证了模型的有效性。在集装箱码头的优化管理问题中，整合优化虽然增加了问题的复杂性，但是考虑了各子问题之间的影响，更贴近集装箱码头的实际情况。

关键词：岸桥调度；集卡调度；堆场分配；和声搜索算法

Storage space allocation and yard crane deployment problem with the influence of yard truck deployment

ABSTRACT

With the rapid development of the world economy, maritime transport that is the main transport of cargo transportation is very prosperous. Now, the ability to improve the container terminal operators has become a major research topic

For the storage yard management optimization problem in maritime container terminals, this paper studies the storage space allocation problem and yard crane (YC) deployment under the influence of yard truck deployment. The integrated problem is formulated as an integer linear programming model with the objective of minimizing the yard crane, the yard truck operating cost and the yard crane inter block movement cost. In condition of the constraint of the transportation network's tolerance capacity in the storage yard, to avoid traffic congestion caused by the scheduling scheme, so it can improve operating efficiency of maritime container terminals. A divide-and-conquer solution is adopted to solve the problem. The harmony search algorithm and constraint satisfaction search are designed in this paper.

Numerical experiments verify the validity of the model, although the integration and optimization problems in maritime container terminals increase the complexity of the problem, but they consider the impact between the sub-problems, this can be more closer to the actual situation of container terminal.

KEYWORDS: Yard crane scheduling; Yard struck scheduling; Space allocation;
Harmony search algorithm

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
目 录.....	IV
第一章 概述.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 集装箱码头.....	1
1.1.2 集装箱码头发展态势.....	2
1.2 研究意义.....	3
1.3 国内外研究现状及综述.....	3
1.3.1 YT 和 YC 调度研究现状.....	3
1.3.2 堆场管理研究现状.....	4
1.4 主要研究内容.....	5
第二章 堆场内部场桥、集卡的调度和堆场空间分配的整合优化模型.....	6
2.1 问题描述.....	6
2.2 符号说明.....	7
2.3 建立模型.....	8
2.3.1 模型假设.....	9
2.3.2 建立模型.....	9
2.3.3 约束条件说明.....	10
第三章 算法设计.....	12
3.1 传统和声搜索算法.....	12
3.1.1 传统和声搜索算法.....	12
3.1.2 传统和声搜索算法步骤.....	12
3.2 和声搜索算法在模型的改进和应用.....	13
3.2.1 子问题(1)的算法设计.....	14
3.2.2 子问题(2)的算法设计.....	16

3.2.3 补偿更新设计和停止判定..... 16

第四章 数值实验..... 18

4.1 最低费用模型..... 18

4.2 参数设置..... 18

4.3 算例分析..... 19

4.4 本章小结..... 21

第五章 结论与展望..... 22

参考文献..... 23

致 谢..... 25

读研期间发表的论文..... 26

第一章 概述

随着世界经济、贸易的快速发展，作为货物运输主要通道的海上运输空前繁荣。集装箱码头作为海上运输的交通枢纽，迎来了极好的发展机遇，同时也面临着极大的考验。21 世纪是科学技术发展飞速，经济和市场全球化的世纪，经济发展迅猛，市场竞争日益激烈，集装箱码头之间的竞争也日益激烈，集装箱码头在寻求各种改变。扩大港口的占地面积，在现有条件下，改善港口的结构布局，优化经营组织模式，提高港口内器械的使用效率，降低使用成本，已经成为港口提高竞争力的主要手段。

集装箱码头管理优化问题是集装箱运输领域最具挑战性的问题之一。众多国内外学者对该问题进行深入研究，但是，大多研究将集装箱码头内的优化问题分为几个子问题，没有考虑子问题之间的相互影响。现在，已经有学者开始将部分相关的子问题整合优化。

1.1 研究背景

随着世界经济的不断发展，近年来全球货物整体的进出口量年增长 7 成，海运运输以其运输量大，运输成本低的特点占据了 2/3 的运输负担，货物运输量的飞速增长拉动了集装箱码头的快速发展，也对集装箱码头的作业吞吐量有了更大的要求。

1.1.1 集装箱码头

集装箱码头的设备大致可分为三类，即岸桥、水平运输设备集卡(YT)和场桥(YC)。集装箱码头的运作流程包括装集装箱和卸集装箱箱两个流程，卸集装箱流程是指货轮将集装箱运送至集装箱码头，岸桥将集装箱从货轮上卸载下来，集装箱由水平运输设备运送至堆场，YC 负责将集装箱放入堆场。装集装箱流程是指 YC 将集装箱从堆场取出交给水平运输设备，水平运输设备将集装箱运送到岸边，岸桥负责将集装箱装船，货船将集装箱运送至其他港口，有些已经到达目的港的集装箱则由水平运输设备运送给内陆运输工具，货物直接运送给内陆。

岸桥是岸线操作的主要设备，负责集装箱的装卸操作，是货船和码头的链接设备。货轮到达港口之前，航运公司会将该货轮的装卸箱计划通知停靠港口，港口工作人员根据航运公司的计划制定相应的岸桥调度方案。该方案决定各货轮分配到的岸桥数量以及岸桥的工作顺序。港口码头调度人员根据货轮计划制定合适的堆场分配计划。YC 在堆场内进行取集装箱操作和堆垛操作，进口集装箱由 YC 堆垛在分配计划制定的位置上，出口集装箱从堆场内由 YC

取出装车，水平运输设备负责堆场和岸线之间的运输。

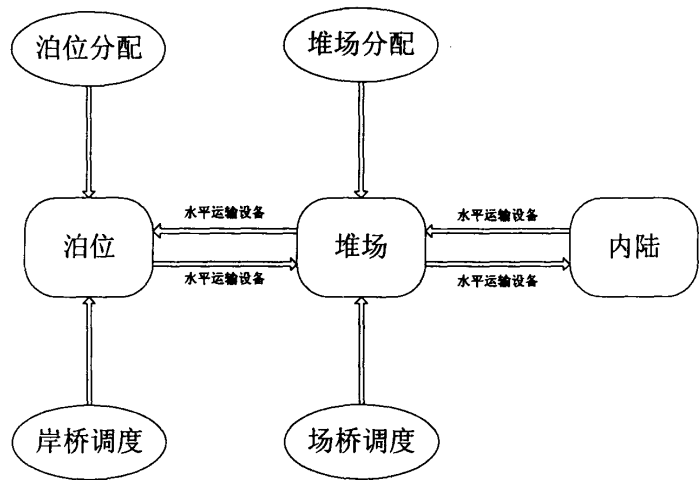


图 1 集装箱码头作业程序图

Fig. 1 Procedures of the container terminal

1.1.2 集装箱码头发展态势

随着区域经济一体化进程加快，以及近距离采购模式的推广，中小型港口涨势明显，重获领跑位置吞吐量稳定增长。虽然以亚洲为主的新兴市场国家贸易需求放缓，但国际贸易维持增长，集装箱码头之间的竞争也越来越激烈。

2014 年上半年全球前十大集装箱码头的排名情况，如表格 1 所示，集装箱航运发展呈增长态势，各港口竞争越来越激烈。

表格 1 全球前十名码头吞吐量

Table 1 Container throughput of the top ten terminals in the word

排名			2014 上半年 (万吨)	同比增 长率(%)	2013 上半年 (万吨)	同比增 长率(%)
2013 年	2014 年 上半年	港口				
1	1	宁波-舟山	44520	10.05	40454	10.06
2	2	上海	38338	0.18	38271	4.37
3	3	新加坡	28919	7.16	26987	0.29
4	4	天津	25896	3.51	25017	8.12
7	5	唐山	24269	14.58	21180	22.58
6	6	青岛	24183	4.93	23046	11.34
5	7	广州	23366	6.13	22016	5.87
8	8	鹿特丹	22115	0.64	21974	-0.91
9	9	大连	21308	3.17	20654	11.83
11	10	黑德兰	19879	30.37	15249	22.83

排名前十的集装箱码头中除鹿特丹以外的其他港口的吞吐量在不断增加，部分码头吞吐量同比增加超过 10%。仅 2014 上半年，排名第一的宁波-舟山码头的吞吐量达到 44520 万吨。同比增长 10.05%。2013 年上半年，排名第十的黑德兰码头同比增长 22.83%，2014 年上半年，黑德兰码头同比增长 30.37%，涨势明显。随着各国经济的不断增长，码头之间的竞争日益激烈，巨大的吞吐量对集装箱码头的运营效率提出了新要求。

1.2 研究意义

虽然我国集装箱码头发展迅速，但是我国集装箱码头的发展仍然面临诸多的挑战，例如，海上运输的繁荣造成集装箱码头区域竞争非常激烈，港口处理能力要求不断提高，港口运力不足导致港口缺乏竞争力，新型港口装卸设备不断涌现，集装箱码头的优化管理势在必行。所以，研究集装箱码头优化管理意义重大。

提高集装箱码头的运营效率过程中，集装箱码头堆场是提高集装箱码头运营效率的重要一环。如何分配堆场空间，调度 YC 和 YT 的运输，快速准确的完成集装箱的装卸作业，以最小成本，最短时间实现集装箱的转运任务，提高整个堆场的运营效率，从而提高码头的综合竞争力。合理安排作业流程，提高设备的利用率是缩短货物在港时间，降低货船在泊位停留时间的主要手段，集装箱码头的运营效率和码头的作业处理能力直接相关。

1.3 国内外研究现状及综述

在过去几十年，随着国际贸易的飞速发展，集装箱已经成为货物运输的主要工具。如何提高集装箱码头的工作效率、降低集装箱码头的运营费用得到中外学者的广泛关注和研究。中外学者对集装箱码头泊位分配、岸桥调度、YT 调度、堆场分配、YC 调度等方面进行研究，在优化领域已经发表大量的文章。

1.3.1 YT 和 YC 调度研究现状

Zhang 等以最小化 YC 在块与块之间的运输路径为目标函数，建立了混合整数规划模型，并用拉格朗日松弛法给出了解决方案^[1]，在后续研究中进一步讨论了集装箱码头堆场的分配问题并建立了双层数学优化模型^[2]。Vis 等提出最小流算法以计算集装箱码头的最优车队规模，其中车队的管理基于动态指派策略^{[3][4]}。Pyung 研究了集装箱码头运输问题，建立 YT 的调度模型，确定集卡的最优路径，并设计了两阶段禁忌搜索算法求解模型^[5]。Nishimura 等建

立了 YT 动态路径调度模型, 设计遗传算法验证模型的有效性^[6]。计明军等讨论了岸桥和 YT 的协调调度优化问题, 提高 YT 和岸桥的工作效率, 设计了进化计算方法对 YT 的最优路径进行求解^[7]。杨鹏等采用集中决策的建模方法, 建立了 YC 调度优化模型, 设计了蚁群算法求解模型^[8]。严伟等建立了调度 YC 和堆场的分配整数优化模型, 设计了最佳优先搜索算法求解模型^[9]。何良军等建立 YC 调度整数优化模型, 设计爬山搜索算法求解模型, 并采用系统仿真的方法分析模型^[10]。刘艳等建立以 YT 运输距离最小为优化目标的优化模型, 考虑了码头交货时间和货主提货时间不确定的因素^[11]。

1.3.2 堆场管理研究现状

Bazzazi 等提出了堆场拓展空间分配问题, 使用遗传算法求解问题^[12]。Jiang 等讨论了在繁忙的集装箱转运中心的堆场管理问题, 考虑在同一时间堆场内部有大量的集装箱装卸活动, 给出了两种不同的堆场空间共享的方法: 确定的空间共享方法和不确定的空间共享方法^[13]。Yu 等提出了在现代港口码头提高集装箱的装卸效率问题, 并且根据集装箱组的存储策略的不同, 建立了不同的模型并用遗传算法找出最优解决方案^[14]。Sharif 等提出了一个基于蚁群算法的堆场分配问题, 在不知道集装箱组到达信息的前提下, 根据集装箱到达时间的不同, 实时分配集装箱到场桥的块里^[15]。Lee 等给出了集装箱转运中心堆场管理问题的整数规划模型, 并且设计了高效的双层遗传算法^[16]。Zhang 等给出了集装箱码头集卡的优化模型并设计了估算卡车等待时间的算法, 通过遗传搜索算法找到最优解决方案^[17]。Jin 等建立了堆场管理问题的整数线性规划模型, 考虑了堆场内交通的限制, 使用和声搜索找到最优解^[18]。侯东亮、邹律龙以集装箱占用堆垛数量最少为目标函数, 建立了约束满足优化模型, 并嵌入装箱启发式原则的约束满足算法^[19]。Geem 描述了和声搜索算法理论及其应用^[20]。雍龙泉研究了和声搜索算法和遗传算法的差异, 给出了和声搜索算法的计算流程, 展望了和声搜索算法的发展和应用前景^[21]。秦进等建立了岸桥同一调度和卸箱分配任务问题的混合整数优化模型, 设计了双层模拟退火算法求解上述模型^[22]。靳志宏等视集装箱码头泊位系统为典型的排队系统, 建立了基于排队论的数学模型, 用模拟迭代算法进行求解^[23]。Meersmans 和 Wagelmans 只考虑装箱操作, 提出了集装箱码头支持决策系统的整合优化问题^[24]。Bish 等将集装箱调度问题和堆场分配问题进行整合^[25]。Chen 等对集装箱码头内各类起吊、运输设备的调度问题进行整合优化, 并且提出了禁忌搜索算法求解该问题^[26]。Murt 等基于香港国际码头的实际情况, 设计了决策支持系统, 考虑了各个决策子问题之间的相互影响^[27]。

本文从堆场系统整体优化的角度出发, 考虑在卡车调度的影响下, 对堆场管理问题进行

了研究。文章以最小化 YC 和 YT 的调度费用为优化目标，在假设 YC 和 YT 的数量充足的前提下，有效调度 YC，合理分配堆场空间，提高集装箱码头的运营效率，降低运营费用，增强码头在国际上的综合竞争力。

1.4 主要研究内容

鉴于集装箱码头整个系统的复杂性和计算能力的限制，现有的优化研究将集装箱码头整个系统分为五个不同的子系统。五个子系统为泊位分配，堆场分配，岸桥调度，YC 调度，集卡的调度。事实上，各个子系统之间存在相互影响，整合优化考虑了子系统之间相互依赖、相互影响的关系。本文主要研究集装箱码头整合优化问题。

第一章，主要阐述了文章的研究基础和背景。对国内外学者在相关领域的研究进行综述。

第二章，建立 YT、YC 调度和堆场分配模型，考虑堆场内交通能力的限制，以 YT、YC 调度费用最小为目标函数，建立整数规划模型。

第三章，介绍传统和声搜索算法，针对模型改进和声搜索算法，用约束补偿算法弥补和声搜索算法可能产生初始解失败的缺陷。

第四章，给定算例，分析算法的有效性。

第五章，对全文进行总结，展望未来的研究方向。

第二章 堆场内部场桥、集卡的调度和堆场空间分配的整合优化模型

本章在考虑 YT 调度的影响下, 研究堆场内部空间的分配和 YC 的调度问题, 将上述问题整合成一个整数线性规划模型。模型以最小化 YC 及 YT 的调度费用的总和为目标函数。考虑堆场内交通网络承受能力的限制, 避免调度方案造成交通拥堵, 从而提高集装箱码头的运营效率。文中采用分而治之的策略, 设计了和声搜索算法和约束满足算法。文章将堆场空间的分配、YC 的调度、YT 的调度整合在一起, 通过有效调度 YC、YT, 实现堆场空间的合理分配, 从而降低集装箱码头的运营成本。

2.1 问题描述

随着集装箱的广泛应用, 集装箱码头之间的竞争越来越激烈, 集装箱码头布局也在不断地创新和发展, 不同的集装箱码头布局会有不同。下面介绍本章研究的码头布局及研究假设。

本章讨论的集装箱码头堆场布局如图 2 所示, 整个堆场由一系列堆场管理部门组成, 每个堆场管理部门包括两个交通路线和四个块, 每个块根据实际情况进一步分为五个子块。集卡通过运输路线将集装箱从船上运输到堆场内, 堆场管理部门以子块为单位为进口集装箱分配存储空间。堆场内的集装箱分为进口集装箱和出口集装箱, 进口集装箱是即将进入堆场的集装箱, 这类集装箱需要相应堆场部门为其分配堆场空间; 出口集装箱是即将从堆场运出的集装箱, 这类集装箱已经存放在堆场内部, 占据了堆场的部分空间。具有同一属性的集装箱称为集装箱组, 集装箱组的属性包括集装箱的重量、大小以及它要去的下一个港口等, 同一集装箱组通常以相同的方式放入堆场。在集装箱组进入堆场前的部分影响因素, 如船只的到达时间、船只的调度以及顾客的需求等都被考虑在集装箱组内。假设堆场对进口集装箱组的空间分配进行优先决策, 剩下的任务则是堆场管理部门给出 YC 在该部门内子块之间的调度决策。例如, 对于已经分配给某堆场管理部门的进口集装箱组, 如果该进口集装箱组的存放需要三个子块空间, 那么该堆场管理部门可以为其分配任意三个可行的子块。在每个周期内, 操作人员根据集装箱组的信息和当前 YC 的工作状态, 按照工作量需求, 在整个堆场内部调度 YC, 安排其运输路线, 以使 YC 调度费用最小并且高效的完成堆场内部工作。在交通路线承受能力的限制下, 合理的 YT 调度会减少 YC 在块与块之间的运输, 从而降低堆场整体的运营费用。

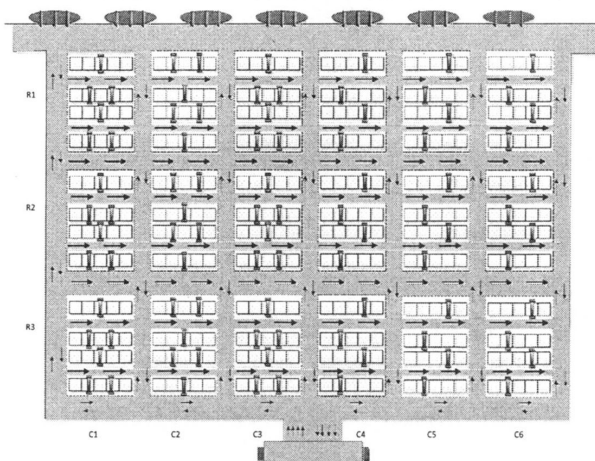


图 2 堆场布局

Fig. 2 Terminal layout

为建立 YC 调度模型, 需引入 YC 调度范围的概念, YC 调度范围表示 YC 的服务区域(子块)。由于每个块有五个子块, 因此 YC 的调度范围就有五种类型, 分别是服务一个子块、相邻的两个子块、相邻的三个子块、相邻的四个子块和五个子块。

2.2 符号说明

T	时间周期的集合, $T = \{1, 2, \dots, 12\}$;
K_1	在计划周期内到达的进口集装箱组的集合;
K_2	在计划周期内出口的集装箱组的集合;
K	$K = K_1 \cup K_2$;
I	堆场块的集合;
N	访问路线的集合;
U	堆场内集卡的集合;
Ω	YC 调度范围的集合;
M	子块的集合;
S	堆场部门的集合;
q_k	集装箱组 $k \in K$ 所需要的堆场空间的子块的数量;
f_k	集装箱组 $k \in K$ 在每一子块的检索频率;
l_k	$l_k \in S$, 集装箱组 $k \in K_1$ 所属的堆场部门;
α_{kt}	如果在时间周期 t 内, 集装箱组 $k \in K$ 在堆场内则为 1, 否则为 0;
β_{kt}	如果在时间周期 t 内, 集装箱组 $k \in K$ 检索装卸状态则为 1, 否则为 0;
\tilde{x}_{mk}	如果安排集装箱组 $k \in K_2$ 存放在子块 $m \in M$ 则为 1, 否则为 0;

c_0	每个时间周期内场桥的操作费用;
c_{ij}	YC 从块 $i \in I$ 到 $j \in J$ 的运输费用;
d_i	在块 $i \in I$ 内的 YC 的初始数量;
d_{\max}	在一个块内允许调度的 YC 的最大数量;
Q_m^1	子块 $m \in M$ 的存储能力;
Q_m^2	在场桥的调度范围内, YC 的处理能力;
Q_m^3	访问路线 $s \in S$ 的交通运输能力;
Q_ω^4	在场桥覆盖范围 $\omega \in \Omega$ 内集卡的处理能力;
γ_{is}	如果块 $i \in I$ 属于部门 $s \in S$ 管辖, 则为 1, 否则为 0;
$\theta_{i\omega}$	如果 YC 的调度范围 $\omega \in \Omega$ 与堆场块 $i \in I$ 相关, 则为 1, 否则为 0;
$\delta_{m\omega}$	YC 的调度范围覆盖子块 $m \in M$, 则为 1, 否则为 0;
σ_{mn}	路线 $n \in N$ 是子块 $m \in M$ 的访问路线则为 1, 否则为 0;
λ_{ms}	如果子块 $m \in M$ 属于堆场部门 $s \in S$ 管辖则为 1, 否则为 0;
$\mu_{s\omega}$	如果 YC 的调度范围 $\omega \in \Omega$ 内的块属于部门 $s \in S$ 管辖则为 1, 否则为 0;
φ_{sn}	如果访问运输路线 $n \in N$ 属于部门 $s \in S$ 管辖则为 1, 否则为 0;
G	给定数值较大的常数;
ρ	移动一个标准集装箱的平均系数;
$\mathcal{G}_{\eta\omega}$	如果集卡 $\eta \in U$ 在场桥的覆盖范围 $\omega \in \Omega$ 内则为 1, 否则为 0;
$\tilde{q}_{\eta k}$	如果安排集卡 $\eta \in U$ 运输集装箱组 $k \in K_2$ 则为 1, 否则为 0;
c_1	表示每辆集卡的平均操作费用;
q_{\max}	每一个部门的管辖内集卡数量的最大值。

决策变量:

$q_{\eta k}$	如果安排卡车 $\eta \in U$ 运输集装箱组 $k \in K_1$ 则为 1, 否则为 0;
e'_ω	在时间周期为 $t \in T$ 时, 如果在场桥的调度范围 $\omega \in \Omega$ 内, 用卡车 $\eta \in U$ 来运 1, 否则为 0;
$x_{mk} \in \{0,1\}$	如果把集装箱组 $k \in K_1$ 分配给子块 $m \in M$, 则为 1, 否则为 0;
$y'_\omega \in \{0,1\}$	如果在时间周期 $t \in T$ 时, YC 的调度范围 $\omega \in \Omega$ 被调度使用则为 1, 否则为 0;
$z'_{ij} \in \mathbb{Z}^+$	在时间周期 $t-1$ 到 t 内, 从块 $i \in I$ 到块 $j \in I$ 的 YC 的数量。

2.3 建立模型

本文以 2 个小时为一个时间周期将一天分为十二个时间周期, 堆场日常管理工作主要是为进口集装箱分配可行的存储子块, 调度集卡将运输集装箱运输到块内, 在 YC 数量缺乏的块与 YC 数量充足的块之间调度 YC。因决策变量的取值范围为整数, 建立集装箱码头堆场的混合整数线性规划模型。模型考虑堆场内部交通运输能力限制, 以集卡和 YC 调度费用的最

小为目标函数。

2.3.1 模型假设

本文研究的堆场管理优化问题基于以下假设：

- (1) 在计划周期内，进出口集装箱组的信息是已知的；
- (2) 任何时间周期内，集装箱组的分配须考虑每一个子块的存储能力；
- (3) 假设有足够的 YC 来完成集装箱组的装卸活动，YC 在每个周期结束没有工作延迟；
- (4) 在任何周期内，装卸工作量不应该超过 YC 的处理能力。

2.3.2 建立模型

$$\min \left\{ c_0 \sum_{t \in T} \sum_{\omega \in \Omega} y'_\omega + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} c_{ij} z'_{ij} + \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{t \in T} c_1 e'_\omega \right\} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{m \in M \setminus \lambda_{mk}=1} x_{mk} = q_k, \forall k \in K_1 \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K_1} \rho f_k \alpha_k x_{mk} + \sum_{k \in K_2} \rho f_k \alpha_k \tilde{x}_{mk} \leq Q_m^1, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K_1} \beta_k x_{mk} + \sum_{k \in K_2} \beta_k \tilde{x}_{mk} \leq \sum_{\omega \in \Omega} \delta_{m\omega} y'_\omega, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{m \in M \setminus \delta_{m\omega}=1} \left(\sum_{k \in K_1} f_k \beta_k x_{mk} + \sum_{k \in K_2} f_k \beta_k \tilde{x}_{mk} \right) \leq Q_\omega^2 + (1 - y'_\omega) G \quad (5)$$

$$\sum_{j \in I} z'_{ji} = \sum_{j \in I} z_{ij}^{t+1}, \forall i \in I, \forall t \in T \setminus \{T\} \quad (6)$$

$$\sum_{j \in I} z'_{ji} = d_i, \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{j \in I} z'_{ji} \geq \sum_{\omega \in \Omega} \theta_{i\omega} y'_\omega, \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} \theta_{i\omega} y'_\omega \leq d_{\max}, \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} \theta_{i\omega} y'_\omega \leq 1, \quad \forall m \in M, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{m \in M \setminus \sigma_{mn}=1} \left(\sum_{k \in K_1} f_k \beta_k x_{mk} + \sum_{k \in K_2} f_k \beta_k \tilde{x}_{mk} \right) \leq Q_s^3, \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} g_{\eta\omega} e'_{\omega} \leq 1 \quad \forall \omega \in \Omega, \forall t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{\eta \in U/\vartheta_{\eta\omega}=1} \left(\sum_{k \in K_1} f_k \beta_{kt} q_{\eta k} + \sum_{k \in K_2} f_k \beta_{kt} \tilde{q}_{\eta k} \right) \leq Q_{\omega}^t + (1 - e'_{\omega}) M \quad (13)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} \theta_{s\omega} e'_{\omega} \leq q_{\max} \quad \forall s \in S, \forall \omega \in \Omega \quad (14)$$

$$x_{mk} \in \{0, 1\} \quad \forall m \in M, \forall k \in K \quad (15)$$

$$y'_{\omega} \in \{0, 1\} \quad \forall \omega \in \Omega, \forall t \in T \quad (16)$$

$$Z'_{ij} \in Z^+ \quad \forall i \in I, \forall j \in I, \forall t \in T \quad (17)$$

$$q_{\eta k} \in \{0, 1\} \quad \forall \eta \in U, \forall k \in K \quad (18)$$

$$e'_{\omega} \in \{0, 1\} \quad \forall \omega \in \Omega, \forall t \in T \quad (19)$$

2.3.3 约束条件说明

表格 2 模型意义

Table 2 significance of the formulas

公式	描述
(1)	目标函数，YC 和集卡的调度费用总和最小值
(2)	保证分配给进口集装箱子块数量满足集装箱组对堆场空间的需求
(3)	任何周期，集装箱组在子块中的存储空间不超过子块的存储能力
(4)	确保了在子块中，YC 的装卸操作有准确的调度范围
(5)	已调用 YC 在其服务区域的工作量小于其调度范围内的工作总量
(6)	每周期，进入块的 YC 数量和移出块的 YC 数量保持一致
(7)	块 <i>i</i> 内 YC 调度的初始数量约束
(8)	块 <i>i</i> 内，调用的 YC 数量不少于调用的 YC 调度范围内的 YC 数量
(9)	每个周期内，调用的 YC 数量满足块内允许调度 YC 的最大数量
(10)	每个周期内，服务于一个子块的 YC 的调度范围不重叠
(11)	交通路线的约束
(12)	服务于 YC 的卡车不重复，并保证了至少有一个卡车服务 YC
(13)	已调用的集卡在其服务范围内的工作量小于调度范围的总工作量

(14) 部门 S 内部调度的卡车数量不超过部门拥有卡车数量的最大值

(15)~(19) 变量取值范围的约束

第三章 算法设计

堆场管理优化问题早已被证明是一个 NP-hard 问题，精确求解算法很难在有限时间内求解上述模型。本章基于现代启发式算法——和声搜索算法^[20]，根据上述模型的建模特点将整个模型拆分为两个子问题进行求解，针对第一个子问题设计了相应的和声搜索算法和约束满足算法；将第二个子问题转化为最小费用流问题。

3.1 传统和声搜索算法

和声搜索算法是受到乐师演奏美妙音乐过程启发得出的一种新启发式算法，在音乐演奏中，乐师凭借自己的记忆，通过反复调节乐队中各乐器的音调，最终达到一个美妙的和声状态。

3.1.1 传统和声搜索算法

和声搜索算法是受到音乐和声的启发得到的一种新算法，和声是音乐的要素之一，音乐创作者通过反复的和声，寻求最美的音乐。音高不同的音乐同时演奏所产生的声音为和声，声搜索算法是根据音乐和声的思想衍生的新的启发式算法，其模拟了演奏家们为达到最好的和声效果，反复调整音乐，不断产生新的音调的过程。

在求解最优化问题过程中，通过反复调整问题可行解，使目标函数达到最大或者最小。音乐家的目的就是创作出最美好的音乐，音乐中的各种乐器就相当于优化问题中各种变量，乐器的音调代表变量的值，音乐家通过连续调整乐器的音调产生美学上认为美好的音乐，和声搜索算法同样是通过连续调整变量的值，达到目标函数所要求的目的。

最优化问题解的形式是由变量构成的解 (x_1, x_2, \dots, x_n) ，其中每一个元素代表优化问题变量。算法初始随机产生一个记忆库(HM)，通过保留和声、调节音调及随机选择产生新解，如果得到的新解比 HM 中的最差解优，则用这个新解代替 HM 中的那个最差解。其中 HM 的数量越大，和声搜索算法越有可能找到全局最优解，但是与此同时，大规模的 HM 会加大算法的计算量，影响和声搜索算法的计算速度。所以， HM 是和声搜索算法的一个重要指标。

3.1.2 传统和声搜索算法步骤

步骤 1：根据模型给出算法参数，确定约束条件和目标函数。

- (1) 变量的个数 p ;
- (2) 各种变量的取值范围;
- (3) 设置 HM 中解的个数 P , P 应该偏小;
- (4) 设置产生新解时从 HM 中保留解分量的保留概率($HMCR$);
- (5) HM 扰动概率(PAR), 即对部分解分量进行微调的概率;
- (6) 设置最大迭代次数, 随着迭代不断进行, 和声记忆库中的解会逐渐接近最优解。

步骤 2: 和声记忆库初始化。随机生成 P 个最优化问题初始解存入 HM 。

步骤 3: 产生新的解。每次产生新解向量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 中的分量 x_i 通过以下三种机理:

- (1) 保留 HM 中的某些解分量;
- (2) 随机选择产生;
- (3) 对(1)、(2)中的某些分量进行微调扰动。

保留 HM 中的部分解分量, 以概率 $HMCR$ 随机对 HM 的部分分量进行保留, 即新产生的 x' 来源于 HM 中第 i 个解分量的集合 $x_i \in \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM_i}\}$ 的概率为 $HMCR$ 。机理(2)中生成的新解分量 x'_i 是从第 i 个解分量取值范围中以 $1-HMCR$ 的概率随机生成。两种机理生成的解分量按概率 PAR 进行微调, 得到按机理(3)产生的新解分量。微调原则为:

$$x'_i = x' + 2 \times u \times rand - u$$

其中, 等式右边的 x' 是扰动前新解的第 i 个解分量; u 为带宽; $rand$ 为 0 到 1 的随机数。

步骤 4: 更新记忆库。判断新解 x 是否优于 HM 内的最差解, 若优于最差解, 则将 x 代替最差解, 完成 HM 更新。

步骤 5: 根据步骤 3 和步骤 4 进行迭代, 直到满足停止准则或者达到最大迭代次数, 输出最优化问题的最优解。

3.2 和声搜索算法在模型的改进和应用

分析模型的所有约束条件, 约束(8)是唯一的一个决策变量 z 和决策变量 x 和 y 相关联的约束。通过引入松弛变量, 将最初的问题拆分成两个子问题:

- (1) 堆场空间分配问题和块内 YC 、 YT 调度决策问题。
- (2) YC 在块与块之间的调度问题。

3.2.1 子问题(1)的算法设计

通过模型可知,在堆场空间分配和YC在块的调度时,不同的堆场部门之间没有相互干扰,把约束(8)分解成 $|S|$ 个子问题,子问题之间的决策不会相互干扰。定义新的决策变量 u_{it} ,表示在时间周期 t 内,与块 I 内起始部署的YC数量相比,缺乏的YC的数量,堆场部门 $s \in S$ 的问题描述如下:

$$\sum_{i \in T} \sum_{\omega \in \Omega | \mu_{s\omega}=1} c_1 e'_{\omega} + \sum_{i \in T} \sum_{\omega \in \Omega | \mu_{s\omega}=1} c_0 y'_{\omega} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} p_{it} u_{it} \quad (20)$$

$$\text{s.t (2)-(5), (9)-(19)}$$

$$u_{it} \geq \sum_{\omega \in \Omega | \mu_{s\omega}=1} \theta_{i\omega} y'_{\omega} - d_i \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (21)$$

$$u_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T | \gamma_{is} = 1 \quad (22)$$

问题的解以向量 $e = \{\dots, e_k, \dots\}$ 的形式表示进口集装箱组的空间分配信息。向量 $e = \{\dots, e_k, \dots\}$ 中的每一个元素 e_k 代表将进口集装箱组 k 存放到块的第 i 个子块。当然,它需要符合堆场部门 I 的安排。在和声搜索算法的开始会随机产生一个初始的和声记忆,对于每一个进口的集装箱组 k 定义 E_k 是一个候选的堆场子块,当集装箱组 k 进入堆场时,出口集装箱组没有被占用候选子块的存储空间。这样随机的将 e_k 放入 E_k 产生初始解,此时由约束(16)和约束(11)来检查初始解的可行性,如果不可行,将重新产生初始解直到到达最大的迭代限制 SC_1^{HSA} 。

通过比对 HM 里的最差解和和声搜索算法生成的新解,决定是否更新 HM 。如果新解优于 HM 里的最差解,则用新解代替 HM 中的最差解,完成 HM 中解的更新,否则,不更新 HM 。当算法迭代次数达到设置的迭代上限 SC_2^{HSA} 或者连续 SC_3^{HSA} 次迭代 HM 没有更新,则计算停止。

将解向量 e 转化决策变量 x ,可得到问题(1)的可行候选解候。对于给定的 x ,问题(1)可以分解为四个子问题,这样,仅包含块内的YC和YT调度决策的子问题可得到有效的求解。如果因为调度的YC数量违反了约束(9),则不存在可行解,这时候选解是不可行的,我们用一个很大的量代替它,作为它的可行解。问题可行的解决方案包括YC和YT的调度费用和YC短缺的处罚。和声搜索算法的邻域内的搜索步骤产生一个新的候选解 i ,新解 e'_k 的每一个

元素就像每一个独立的音乐人在他的和声记忆 $\{e_{ki}^1, e_{ki}^2, \dots, e_{ki}^{HMS}\}$ 里随机的选择一个或者在 E_k 里产生一个新的解。约束(23)表示这个条件。新的候选解中的每一个元素都需要检验它们是否需要在 $\{e_{ki}' - HMM, e_{ki}' + HMM\}$ 内做出调整, 做出调整的解也要满足空间约束和道路承受能力约束。问题(1)的程序框架如图 3 所示。

$$e_{ki}' \leftarrow \begin{cases} \{e_{ki}^1, e_{ki}^2, \dots, e_{ki}^{HMS}\} \\ E_k \end{cases} \quad (23)$$

$$e_{ki}' \leftarrow \begin{cases} \{e_{ki}' - HMM, e_{ki}' + HMM\} \\ e_{ki}' \end{cases} \quad (24)$$

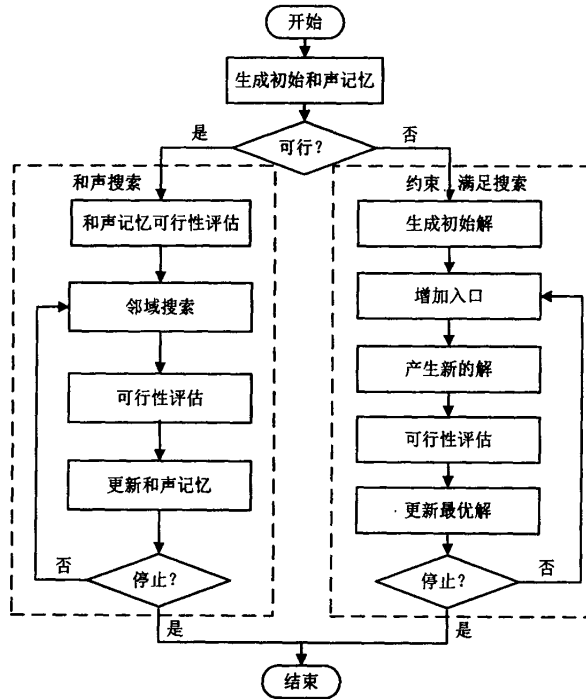


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flowchart of the algorithm

本文为避免和声搜索算法不能产生初始的和声记忆的情况, 在解决问题一时给出解决数据较大的情况时非常有效的约束满足算法。

$$\sum_{(m,k) \in \Phi_0} x_{mk} + \sum_{(m,k) \in \Phi_1} (1 - x_{mk}) \geq 1 \quad (25)$$

s.t (2)-(5), (9), (12), (14), (16)。

当和声搜索算法不能产生初始的和声记忆时, 约束满足算法非常有效。约束(25)中 Φ_0 和

Φ_1 是由 (m, k) 构成的集合, 决策变量 x_{mk} 取值为 0 或者 1。加入约束(25)后也避免了产生重复的可行解。

3.2.2 子问题(2)的算法设计

根据问题(1)输出的解中可以获得每一个块中的 YC 和 YT 的需求数量, 这样, 余下的工作就是决策 YC 在块与块之间的移动数量以满足每一个块对 YC 的需求。定义 \bar{y}'_w 是在问题(1)中获得的 YC 调度范围的决策变量的值, 则问题(2)可以建立如下模型:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{j \in I} c_{ij} z'_{ij} \quad (26)$$

$$\text{s.t. (6), (7), (14), (15).}$$

$$\sum_{j \in I} z'_{ji} \geq \sum_{w \in \Omega} \theta_{iw} \bar{y}'_w \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (27)$$

目标函数(26)只与 YC 在块与块之间的移动有关。约束(27)表示在每一个周期内 YC 的数量须满足它的需求数量。这样, 问题(26)就转化成如下的最小费用网络流问题。图 3 所示表示在两个周期内两个块之间 YC 的调度模型。

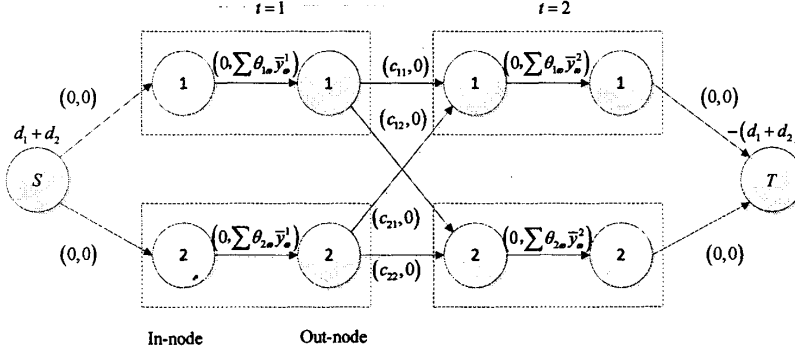


图 4 最小费用网络流图示
Fig. 4 Minimum cost network flow

3.2.3 补偿更新设计和停止判定

YC 的短缺补偿 p 初始化为 p_0 。在两个子问题求解迭代后, 补偿参数根据方程(28)进行更新, 其中参数 $\zeta > 1$, 并且 YC 在块与块之间的调度决策变量 z'_{ji} 在第二个子问题中获得。

$$p_u \leftarrow \begin{cases} p_u / \zeta & \sum_{\omega \in \Omega} \theta_{i\omega} \bar{y}_\omega^t \leq d_i (t=1) \text{ 或} \\ & \sum_{\omega \in \Omega} \theta_{i\omega} \bar{y}_\omega^t \leq \sum_{j \in I} \bar{z}_{ji}^{t-1} (t \in T \setminus \{1\}) \\ p_u \times \zeta & \text{其他} \end{cases} \quad (28)$$

算法有两种停止设置，由于算法输出值为集装箱码头堆场调度的总费用，所以当 SC_2^{HEU} 个连续的迭代输出的结果不发生变化时，停止算法，或者算法搜索达到迭代上限 SC_1^{HEU} ，算法停止。

第四章 数值实验

本章给出模型的几个算例，验证模型的有效性。集装箱码头堆场的调度费用包含集卡，YC 的调度费用，YC 作为堆场内部的重要工具，具有造价高，费用高的特点。如果块与块之间没有 YC 的调度，将大大减少堆场的调度费用。考虑到这样的理想状态，建立最低费用方程。通过计算所得费用和最低费用值进行对比，检验模型的优缺点。

4.1 最低费用模型

当 YC 的调度只涉及块内的调度时，调度费用最低，建立如下模型求解。

$$\begin{aligned} \min & c_0 \sum_{t \in T} \sum_{\omega \in \Omega} y'_{\omega} + c_1 \sum_{t \in T} \sum_{\omega \in \Omega} e'_{\omega} \\ \text{s.t} & (2)-(5), (9)-(16), (18)-(19). \end{aligned} \quad (29)$$

4.2 参数设置

根据图 2 所示的集装箱码头布局，文章给出参数设置，包括存储空间、块的数量、进口和出口的集装箱组，如表格 3 所示，空间需求参数 q_k 在 $[1,3]$ 内均匀分布和检索参数 f_k 在 $[10,40]$ 内均匀分布，对于每个集装箱组 α_k 和 β_k 在 $[1,3]$ 内随机生成。由于出口的集装箱组随机的分配在堆场的子块内，所以 \tilde{x}_{mk} 是随机给定的已知量，本文只考虑 YC 在相邻的子块之间的调度，并且每个周期内 YC 的调度数量不超过 15，如果调度的 YC 数量超过 15，则用一个很大的数代替费用参数 c_j 以避免上述情况。 c_0 设置为 30 每个周期， c_1 设置为 10 每个周期。YC 的处理能力为每周期 $[30,50]$ 次装卸活动。考虑到 YC 初始数值和布局对计算结果的影响，本文设置两种情形的 YC 数量和布局：A 代表 YC 数量较多时的情形，布局如图 1 中的 C1-C3 所示，B 代表 YC 数量较少时的情况，每周期布局如图(1)中的 C4-C6 所示。所有交通路线的承受能力设置为每周期为 300 次运输流。

表格 3 算例参数

Table 3 instance parameters

	存储空间	$ I $	$ K_1 $	$ K_2 $
1	R1,C1-C2	8	4	6
2	R1-R2, C1-C3	24	15	30
3	R1-R3, C1-C4	48	30	50
4	R1-R3, C2-C6	72	50	80

(1) 启发式算法的参数设置:

$$SC_1^{HEU} = 50, SC_2^{HEU} = 10.$$

(2) 子问题(1)的和声搜索算法参数设置:

$$HMS = 5, SC_1^{HSA} = 100, HMCR = 0.9, PAR = 0.1, HMM = 2, SC_2^{HSA} = 50, SC_3^{HSA} = 15.$$

(3) 子问题(2)的约束补偿算法设置:

$$SC_1^{CSS} = 100, SC_2^{CSS} = 15.$$

(4) 处罚更新计划参数:

$$p_{it}^0 = 10, \forall i \in I, \forall t \in T, \xi = 1.2.$$

4.3 算例分析

表格 4-7 表示模型的计算结果, (3)表示调度费用的最低值, (4)表示和声搜索算法求解的最优解, (5)表示计算时间, (6)表示增加了 YC 调度后, 所需调度费用的增长率。

表格 4 数据 1 的计算结果

Table 4 Computational results of data 1

算例	YC	下	启发式算法		Gap(%)
	初始值	界	求解值	时间(s)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1-I1	A	550	550	9.5	0.00
1-I2	A	760	760	6.6	0.00
1-I3	A	520	520	6.0	0.00
1-I4	A	640	640	8.1	0.00
1-I5	A	400	400	5.9	0.00
1-II	B	550	550	11.2	0.00
1-I2	B	760	760	7.5	0.00
1-I3	B	520	520	6.8	0.00

1-I4	B	640	640	8.1	0.00
1-I5	B	400	400	6.8	0.00

表格 5 数据 2 的计算结果
Table 5 Computational results of data 2

算例	YC 初始值	下 界	启发式算法		Gap (%)
			求解值	时间(s)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
2-I1	A	2750	2768	38.1	0.65
2-I2	A	2630	2640	27.9	0.38
2-I3	A	3620	3640	30.8	0.55
2-I4	A	3380	3485	19.7	3.10
2-I5	A	2840	2915	22.9	2.64
2-II	B	2750	2808	44.1	2.11
2-I2	B	2630	2657	32.2	1.02
2-I3	B	3620	3699	33.2	2.18
2-I4	B	3380	3486	39.1	3.14
2-I5	B	2840	2945	30.4	4.04

表格 6 数据 3 的计算结果
Table 6 Computational results of data 3

算例	YC 初始值	下 界	启发式算法		Gap (%)
			求解值	时间(s)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
3-I1	A	5060	5121	74.9	1.21
3-I2	A	5670	5827	58	2.77
3-I3	A	4970	5037	93.2	1.35
3-I4	A	4490	4598	50.3	2.41
3-I5	A	5300	5327	72	0.51
3-II	B	5060	5157	80.3	1.91
3-I2	B	5670	5871	72.1	3.54
3-I3	B	4970	5083	86	2.27
3-I4	B	4490	4628	71	3.07
3-I5	B	5300	5334	82	0.64

表格 7 数据 4 的计算结果
Table 7 Computational results of data 4

算例	YC 初始值	下 界	启发式算法		Gap (%)
			求解值	时间(s)	

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
4-I1	A	7840	7961	86	1.54
4-I2	A	8140	8222	106	1.00
4-I3	A	8800	9000	127.6	2.27
4-I4	A	8530	8571	119.5	0.48
4-I5	A	7390	7433	121.7	0.58
4-II	B	7840	8024	87	2.37
4-I2	B	8140	8269	109.2	1.59
4-I3	B	8800	9035	130.7	2.67
4-I4	B	8530	8644	113.8	1.33
4-I5	B	7390	7466	125	1.03

4.4 本章小结

当进口集装箱和出口集装箱较少，而且涉及堆场部门较少时，理想调度的最低费用和求解得到的最低费用一样，表示这种情况下，集装箱码头内堆场不需要在块与块之间调度 YC，随着进口集装箱数量和出口集装箱数量的增加，合理的堆场空间分配尤为重要，YC 在块与块之间的调度就会增加。理想的最低费用值和求解得到的值增长不会超过 4%，所以，根据 YC 初始数量和布局进行合理的堆场空间分配可以减少 YC 在块与块之间的运输，从而降低集装箱码头的运营费用。

第五章 结论与展望

本文研究了集装箱码头的优化管理问题，将 YC 和堆场分配问题整合在一起，考虑了 YT 调度对堆场空间分配的影响。堆场内的交通路线承受能力有限，合理的调度 YT 和 YC 可避免交通拥堵造成的运营效率降低。将 YT 调度、YC 调度和堆场的空间分配整合在一起，提高了模型建立的实际意义。将复杂的模型分为两个子问题，设计了和声搜索算法和最小网络费用流解决该问题。

集装箱码头整合优化问题越来越得到学者们的关注，将集装箱码头的各个子问题整合在一起，提高模型的实际意义。本文中的模型进一步可以将文章涉及的几个子问题都整合在一起，或者以集装箱为线索，将不相邻的子问题之间建立合理的整合优化模型，文章中算法设计时将完整的整合优化问题分为两个子问题，还可以进一步探索高效的算法。在集卡和 YC 调度的过程中，有多种参数的不确定性，建立不确定整合优化模型可以成为一个思考方向。

参考文献

- [1] Zhang C, Wan Y W, Liu J Y, Linn R J. Dynamic crane deployment in container storage yards[J]. Transportation Research Part B. 2002, 36(6), 537-555.
- [2] Zhang C, Liu J, Wan Y W, Murty K G, Linn R J. Storage space allocation in container terminals[J]. Transportation Research Part B, 2003, 37(10): 883-903.
- [3] Vis, I.F.A., de Koster, R., Roodbergen, K.J., Peeters, L.W.P., Determination of the number of automated guided vehicles required at a semi-automated container terminal[J]. Journal of the Operational Research Society, 2001, 52: 409-417.
- [4] Vis, I.F.A., de Koster, R., Savelsbergh, M.W. P. Minimum vehicle fleet size under time-window constraints at a container terminal[J]. Transportation Science, 2005, 39: 249-260.
- [5] Pyung, H.K., Woon, S.L. Dong, W.J., Fleet sizing and routing for container transportation in a static environment[M]. OR Spectrum , 2004, 26: 193-209.
- [6] Nishimura E, Imai A, Papadimitriou S. Yard trailer routing at a maritime container terminal[J]. Transportation Research Part E, 2005, 41:53-76.
- [7] 计明军, 靳志宏. 集装箱码头集卡调度和岸桥协调调度优化[J]. 复旦学报, 2007, 46: 476-480.
- [8] 杨鹏, 柴小燕, 孙俊清. 集装箱码头场桥协同调度研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(1): 231-233.
- [9] 严伟, 宓为建, 茆道方, 何良军. 一种基于最佳优先算法的集装箱堆场场桥调度策略[J]. 中国工程机械学报, 2008, 6(1): 95-100.
- [10] 何良军, 严伟, 宓为建. 基于爬山算法的集装箱堆场场桥调度[J]. 计算机工程与应用, 2011, 46(22): 17-25.
- [11] 刘艳, 周鹏飞, 康海贵. 集装箱堆场箱位分配模糊优化研究[J]. 水运工程, 2009(11): 1-5.
- [12] Bazzazi M, Safaei N, Javadian N. A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal[J]. Computers and Industrial Engineering, 2009, 56(1): 44-52.
- [13] Jiang X, Lee L H, Chew E P, et al. A container yard storage strategy for improving land utilization and operation efficiency in a transshipment hub port[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 221(1): 64-73.
- [14] Yu M Z, Qi X T. Storage space allocation models for in bound containers in an automatic container terminal[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 226(1): 32-45.

- [15] Sharif O, Huynh N. Storage space allocation at marine container terminal using ant-based control[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(6): 2323-2330.
- [16] Lee D H, Jin J G, Chen J H. Terminal and yard allocation problem for a container transshipment hub with multiple terminals[J]. *Transportation Research Part E*, 2012, 48(2): 516-528.
- [17] Zhang X J, Zeng Q C, Chen W H. Optimization model for truck appointment in container terminals[C]. 13th COTA international conference of transportation professionals (CICTP2013), 2013, 96: 1938-1947.
- [18] Jin J G, Lee D H, Cao J X. Storage yard management in maritime container terminals[J]. *Transportation Science*, 2014.
- [19] 侯东亮, 邹律龙. 求解集装箱堆场堆垛问题的约束满足算法[J]. *工业工程与管理*, 2012, 17(4): 84-88.
- [20] Geem Z W. Music-Inspired harmony search algorithm: theory and applications, Springer, 2009.
- [21] 雍龙泉. 和声搜索算法研究进展[J]. *计算机系统应用*, 2011, 20(7): 244-249.
- [22] 秦进, 倪玲霖, 王承娜. 集装箱码头岸桥调度模型及算法[J]. *西南交通大学学报*, 2013, 48(1): 184-192.
- [23] 靳志宏, 邱波, 赵芳. 集装箱码头泊位动态配置优化[J]. *中国航海*, 2011, 34(3): 89-92.
- [24] Meersmans, P.J.M., Wagelmans, A.P.M. Effective algorithms for integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals. Technical Report EI, 2001-19.2001, Econometric Institute, Erasmus University, Rotterdam.
- [25] Bish, E.K. A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal[J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 144: 83-107.
- [26] Chen, L., Bostel, N., Dejax, P., Cai, J., Xi, L. A tabu search algorithm for the integrated scheduling problem of container handling systems in a maritime terminal[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 181: 40-58.
- [27] Murty, K.G., Liu, J., Wan, Y.-W., Zhang, C., Tsang, M.C.L., Linn, R. A decision support system for operations in a container terminal[J]. *Decision Support Systems*, 2005, 39: 309-332.

致 谢

时光流逝，三年的研究生学习生涯转眼之间已经接近尾声。感谢给予我帮助、关心和支持的每一个人。

“经师易得，人师难求”。曹瑾鑫老师作为我论文的导师，给予了我很大的帮助，他不知疲倦的工作精神和丰富的专业知识帮助我度过了各种各样的难关，在导师的指导下，我才能顺利的完成整篇论文。在研究生学习的三年时间里，导师在学习精神、工作态度以及做人处事方面，都给了我深刻的影响，让我受益匪浅。在学习上，他教会我如何去高效学习，在生活中，教会我很多做人做事的道理。在此，我由衷的向曹老师致以诚挚的敬意！

感谢同学们，感谢三年研究生生活中给予我帮助的同学刘慧莲、刘越、李岩、张宝、毛志强、谷海波等，感谢师兄王日栋和师妹任洁、商晓婷。感谢你们在生活学习中给予我无私的帮助。

最后，衷心感谢在百忙之中审阅本论文的专家、教授们，谢谢！

读研期间发表的论文

- [1] 吕常亮, 曹瑾鑫*, 集装箱码头的堆场管理优化问题[J]. 内蒙古大学学报(已接收).