



大连海事大学



Y2445269



WF2814619

# 硕士学位论文

集装箱码头多船混合交叉作业研究

孙 裴

指导教师 郑红星 副教授

企业导师 马全胜 高级工程师

申请学位级别 工程硕士

专业名称 交通运输工程

学位授予单位 大连海事大学

2013 年 11 月

分 类 号 \_\_\_\_\_

密 级 \_\_\_\_\_

U D C \_\_\_\_\_

单位代码 10151

# 集装箱码头多船混合交叉作业研究

孙 裴

指 导 教 师 郑红星 职 称 副教授

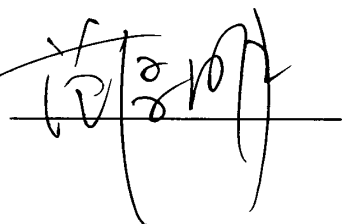
企业副导师 马全胜 职 称 高级工程师

学位授予单位 大 连 海 事 大 学

申请学位级别 工程硕士 学科（专业） 交通运输工程

论文完成日期 2013 年 9 月 答辩日期 2013 年 11 月

答辩委员会主席



**Research on the Hybrid Crossed operation for multi-ships in  
container terminal**



**A thesis Submitted to**

**Dalian Maritime University**

**In partial fulfillment of the requirements for the degree of**

**Master of Engineering**

**by**

**Sun Pei**

**(Communications and Transportation Engineering)**

**Thesis Supervisor: Associate Professor Zheng Hongxing**

**Assistant Supervisor: Senior Engineer Ma Quansheng**

**September 2013**

# 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,撰写成硕士学位论文“集装箱码头多船混合交叉作业研究”。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： 孙裴

## 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： 孙裴

导师签名： 郑江华

日期： 2013年 11月 16日

## 摘 要

港口的整体装卸效率对于水路转运货物的在途时间有很大的影响,这对于目前国际班轮运输而言尤为重要。一直以来国内外各港口都致力于改善自身的竞争力水平,影响港口竞争力的因素有很多,包括港口自身固有资源和设备配置、港口的管理运作水平、员工素质。港口的资源配置一般而言中短期内不会发生大的变化,因此各港口的能力上限是既定的,但是港口的营运者可以通过改善各环节的作业计划或优化耦合性强的作业环节间的协同调度,以便于进一步加强港口的资源利用率。通过上述分析可见,港口的整体作业模式直接影响港口的装卸水平,因此本文提出的混合交叉作业模式,此时有利于最大化港口资源的利用率。这个课题是很值得研究的重大课题。

本文给出了研究问题的背景、研究的理论与实际意义所在,还包括对目前针对集装箱码头系统的相关研究进行了汇总分析以及相应的不足之处的讨论,结尾确定研究混合交叉作业模式的调度问题很有必要。详细地对新作业模式下,即混合交叉作业模式带来的岸桥和集卡的作业工艺带来的变化的描述,不仅从文字上进行了对比分析,还采用图示法更加直观地给出示例。提出模型的假设前提、所有的符号和必须满足的约束,建立了混合交叉作业模式下岸桥同贝同步装卸船调度优化模型,同时对模型的目标函数和约束条件进行了解释说明。还设计高效的寻优算法,对岸桥调度模型进行优化求解,基于某港口的情况设计了具体的案例用于验证本章模型和求解算法的有效性;交叉作业模式下集卡循环过程中的影响因素进行确定,把其类比为多车辆的路径优化问题。混合交叉作业模式下集卡调度优化模型,同时对模型的目标函数和约束条件进行了解释说明。针对路径优化模型采用 CPLEX 进行求解,具体给出了算法的设计过程和核心点,最后基于较大规模的一个例子做了数值仿真分析。最后,针对几点假设进行分析,获知在本文研究基础上的几个未来研究方向。

**关键词: 独立装卸; 混合交叉作业; 同步装卸; 作业面; 遗传算法**

## ABSTRACT

The overall efficiency of the port for loading and unloading of goods in transit waterway transit time has a great influence, which is currently the international liner shipping is particularly important. Domestic and foreign ports have been working to improve their level of competitiveness, affecting the competitiveness of the port there are many factors, including the inherent resources and equipment port configuration, port management and operation level, quality of staff. Port of resource allocation in general is not easy to change long-term, and therefore the ability to limit the port is established, but the port operators by improving operating procedures of the program to strengthen all aspects of the quality of the staff, in order to further strengthen the port resource utilization. Through the above analysis shows that the port's overall operating mode directly affects the level of the port of loading and unloading, so the proposed hybrid crossover operation mode, then the port is conducive to maximizing resource utilization. This issue is a very important issue worthy of study.

This paper presents the background of this research question, the study's theoretical significance, practical significance, but also for the container terminal of the current system-related studies were pooled analysis and the corresponding deficiencies discussed at the end determine the mode of operation of hybrid cross the scheduling problem is necessary. The details of the new operating mode, that is a mixed mode of operation to bring cross- strait bridge and collector cards work process changes brought about by the description. Not only from the text on a comparative analysis, but also uses are more intuitive graphical methods given examples. Model first proposed the assumption that all the symbols and constraints that must be met to establish a hybrid crossover operation mode quayside sync with oyster boat handling scheduling optimization model , while the objective function and constraints for the explanation. Also designing an efficient optimization algorithm , the other side of the bridge to optimize the scheduling model solved the case of a port -based design of specific cases used to validate the model and algorithm of this chapter effectiveness ; cross-operation

mode during the cycle collector card influencing factors be determined , to its analog paths for multiple vehicles optimization problem. Hybrid cross operation mode a scheduling optimization model, while the objective function and constraints for the explanation. For route optimization model is solved using CPLEX, the specific algorithm is given in the design process and the core point, and finally an example based on large-scale numerical simulation analysis done. Finally, several assumptions were analyzed in this study on the basis of informed several future research directions.

**Key Words: Independent Handling; Hybrid Crossover Operation; Synchronous Loading and Unloading; Work Surface; Genetic Algorithm**

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 选题背景及研究意义 .....	1
1.1.1 选题背景 .....	1
1.1.2 研究意义 .....	2
1.2 针对集装箱码头的研究现状 .....	3
1.2.1 泊位作业系统研究现状 .....	3
1.2.2 场桥调度问题的研究现状 .....	4
1.2.3 集卡调度问题的研究现状 .....	5
1.2.4 场区堆存策略的研究现状 .....	6
1.3 主要研究内容 .....	8
1.4 文章思想路线 .....	9
第 2 章 集装箱码头作业系统介绍 .....	11
2.1 集装箱码头的功能布局 .....	11
2.2 集装箱码头作业流程 .....	13
2.3 集装箱码头的作业模式 .....	14
2.3.1 独立装卸作业模式 .....	14
2.3.2 混合交叉作业模式 .....	15
2.3.3 两种作业模式特点 .....	16
第 3 章 混合交叉作业模式下集卡作业及装卸船工艺 .....	19
3.1 同步装卸船舶工艺 .....	19
3.2 集卡作业系统的特点 .....	20
第 4 章 岸桥同船贝同步装卸调度优化 .....	21
4.1 问题分析 .....	21
4.2 岸桥同船贝同步装卸调度模型 .....	21
4.2.1 模型假设条件 .....	21
4.2.2 模型符号说明 .....	22
4.2.3 模型目标及约束 .....	22
4.3 遗传算法 .....	23
4.3.1 算法的概述 .....	23
4.3.2 编码方式 .....	26
4.3.3 选择算子 .....	27



---

4.3.4 交叉算子 .....	27
4.3.5 变异算子 .....	27
4.3.6 适值函数 .....	27
4.3.7 终止规则 .....	27
4.4 数值实验 .....	28
4.4.1 数据来源 .....	28
4.4.2 实验结果 .....	28
4.5 本章小结 .....	29
第 5 章 混合交叉作业模式下集卡调度优化 .....	30
5.1 问题分析 .....	30
5.2 混合交叉作业模式集卡调度模型 .....	30
5.2.1 模型假设条件 .....	31
5.2.2 模型符号说明 .....	31
5.2.3 模型目标及约束 .....	31
5.3 案例分析 .....	32
5.3.1 数据来源 .....	32
5.3.2 实验结果 .....	33
5.4 本章小结 .....	34
第 6 章 结论与展望 .....	35
6.1 结论 .....	35
6.2 展望 .....	36
参考文献 .....	37
附录：岸桥及箱区间的距离计算代码 .....	43
致 谢 .....	44

## 第1章 绪论

### 1.1 选题背景及研究意义

#### 1.1.1 选题背景

集装箱化运输凭借其高效的装卸率、能够加速集卡、集装箱船舶的周转时间、不仅节约相关费用还使得理货手续得以简化,容易实现计算机化作业信息管理、实现标作业的标准化等众多特点,在不足十年的时间内取得了飞速的发展,在实际操作中已经是普遍运用,海洋运输中最频繁。据不完全统计,约90%的国际货物都经过港口这一作业环节,并且80%的货物在全程运输中都是集装箱化包装。全球的集装箱运输总量伴随着全球经济的迅速增长,其涨幅也十分惊人。在如此活跃的市场环境下,从事航运业务的企业为了实现“与时俱进”的目标纷纷扩大各自经营规模,单只船舶的装载量越来越大。马士基集团拥有目前世界上装载量最大的船舶,其装箱量达到约1.4万个标准集装箱。船舶装载量越来越多必然导致原有班轮航线的业务更加密集,这导致码头的作业量很集中,进而出现设备、人员的高强度运作。为了保证在一定时间内尽可能多的为船舶服务,以下几方面是首要瓶颈:码头的岸线长度有限,因此可以加长码头的岸线长度,但是其成本很高且投资回收期较长;集装箱装卸和搬运设备的能力不足,特别是岸桥、场桥基本超负荷作业,此处可以提高人员的操作水平和整体的调度优化以寻求短期突破。在上述诸多瓶颈的限制下,如何才能大幅度提高集装箱港口码头的生产作业效率、减少班轮的滞港时间逐渐地成为国内外各港口必须面对的重要难题。

所以,在面对资源和资金的限制下经营者想去提高港口的服务水平可以通过管理的优化,以便于最大程度地利用现有的资源和资金。因此,在激烈的国内和国际的发展道路上绝大多数集装箱码头开始了,并不断提高标准的集装箱码头管理和物流链接水平。这是一个非常重要的方面,合理分配有限的资源和时间。相反地若是不能做到合理调度优化,使用的设施和工作人员的劳动强度将增加且设备和人员将超负荷运行,发生意外的可能性最大,导致很大的意外损失。提高有限资源配置下的调度水平对港口是十分重要,本文采用系统工程理论分析,我国集装箱码头需要充分利用码头各项设备资源,通过船舶靠泊、岸桥装卸集装箱、集卡

运载集装箱等环节,按照泊位计划、船舶配载及堆存计划,合理调度各项资源以实现船舶在港作业的物流系统的作业效率,需要将系统内的各个要素和作业环节进行综合考虑其协调,鉴于码头生产运作的复杂性及耦合性特点,实现系统的整体优化调度较大难度。所以改变传统的单独装卸作业模式是一条可行之路,特别是目前外国码头的混合交叉作业模式中的同时为到港船舶提供装卸船服务,以及混合作业模式下场内集卡的高效调度都是很重要的课题。

### 1.1.2 研究意义

受到近年经济危机全球化的影响,国内外各大集装箱码头的吞吐量有不同程度的下降。出于保证码头经济效益的目的必须采取措施,进而提高码头的整体运作效率,同时尽量降低各种码头设备资源的运营成本。目前多数集装箱码头的设备使用率都接近满负荷状态,运营者为增强码头的竞争力,除了不断提高码头的业务处理速度,还需要完善集装箱码头的管理模式,从转变码头的作业模式着手。基于混合交叉作业的岸桥同步装卸工艺中岸桥需要确定装卸箱的顺序和存放位置;集卡调度优化岸桥对其进行连续地装卸作业,为了保证船舶的船期,集卡必须及时地往返行驶于岸桥和场桥之间,同时考虑到岸桥和场桥都是大型机械设备,其购置成本和空闲浪费成本要比集卡大得多。所以岸桥在装卸船或场桥接送集装箱过程中不去等待集卡,如此集卡只有及时到达指定场桥或岸桥下方才能保证大型设备不等待。从以上分析可知混合交叉作业模式下的岸桥同步装卸问题和集卡调度问题就成为这一新的作业模式的两个核心兼难点问题。所以说,针对集装箱码头多船舶混合交叉作业研究,不仅具有很深远的理论意义,对于集装箱码头未来发展自动化码头也具有一定的现实意义。

#### (1) 理论意义

集装箱码头的整个作业系统中的各要素及环节错综复杂,考虑到他们之间的相互制约或耦合的关系,码头生产调度问题不仅具有时间优化复杂性,而且在空间优化上也相当复杂。通过对集装箱码头混合交叉作业模式的特点的分析,研究集装箱码头多船混合交叉作业模式优化问题,将混合交叉模式作业对岸桥调度和集卡寻访顺序的影响分别进行了研究,大幅度提升对集装箱码头相关调度问题的研究深度,为提高码头的作业效率奠定了初步的理论基础。

## （2）现实意义

首先，在集装箱港口竞争激烈程度日趋加剧的市场环境下，要保证码头的生产运作方式及调度模式才能够有效满足船舶的船期、提高码头服务水平和港口的竞争力。其次，在全球化的集装箱运输物流网络中，无疑集装箱港口是很重要的一类节点，港口的作业准确性、码头可靠性、相关检查文件便利性等将直接影响该类节点的通过能力，进而影响整个物流网络的流通效率、运行质量、航运企业的营运成本。目前我国绝大多数港口都采用“作业线”模式调度集卡循环运输，即某台岸桥会固定的“垄断”几台集卡，这几台集卡只能为该岸桥提高接送集装箱服务，而且都是先卸船后统一安排装船，此调度模式下所有的集卡约一半的时间是处于空车行驶状态，浪费集卡载重运输能力很多，加重了集卡的直接运作成本，造成双重浪费现象。通过对集装箱码头多船混合交叉作业模式下岸桥调度和集卡调度优化，为降低集卡空驶距离，提高集卡利用率，节约码头运营成本，提高码头运行效率提供一定的现实意义。

## 1.2 针对集装箱码头的研究现状

近年来由于经济的快速发展，各个国家的港口发展越来越快，相应的作业过程中的调度难题也越来越多。因此许多国内外学者都针对港口码头的某些模块或几个模块进行深浅不一的广泛研究，其中主要还是针对泊位和装设设备的相关研究占多数，由于其购置和使用成本都较高。当然也有一部分学者对码头的水平运输设备和匝口系统做了研究，以下进行了些许的总结。

### 1.2.1 泊位作业系统研究现状

目前国内外对集装箱港口的研究一般都是针对某一环节，对整个港口服务系统的研究还是较少，但是不少用仿真描述<sup>[5-9]</sup>。鲁子爱把整个港口系统类比为一个人工服务系统，基于计算机仿真技术把港口用一个仿真模型进行描述，仿真产生模拟港口的吞吐量、客户等待时间均值、装卸时间均值和队长均值等港口营运参数<sup>[1-3]</sup>。徐小义基于排队论理论为了确定港口泊位数量的最佳值的数学模型和模型的求解方法。在上述文献中，仿真模型中都基于“先到先服务”规则，来获得泊位分配方案，然后依据一些实际约束进行方案的选取，而不是预先根据港口管理

者或者船主的想法去很有针对性地建立实时性，通用性高的数学模型来优化泊位调度方案<sup>[10][11]</sup>。Li 等将泊位分配问题看作是单服务台系统的排队优化问题<sup>[12]</sup>。Kap Hwan Kim 等以船舶滞港成本和泊位偏离带来的额外附加成本之和最小为目标，建立起一个泊位分配优化数学模型，同时求解构建的模型采用的是模拟退火算法<sup>[13]</sup>。Imai 等认为泊位其实是一系列的不连续资源的集合，基于此思想以计划期内船舶等待总时间最小为目标建立混合整数泊位分配模型，同时设计了相应的启发式算法求解数学模型<sup>[14]</sup>。

### 1.2.2 场桥调度问题的研究现状

目前我国集装箱码头堆场的装卸设备的功能包括装卸集装箱、堆码、翻箱等。一般都会配置的机械有两种，轨道式龙门吊与橡胶轮胎式龙门吊。其中轨道式龙门吊只能在一个维度上进行，即同一个巷道的不同箱区内的各个贝位。相反地，轮胎式龙门的可移动性更加灵活些，它可以在二维平面内随便移动，理论上全场箱区都是可以到达。针对场桥的调度研究主要分为两个方向：（1）箱区内或全场龙门吊的配置问题；（2）箱区内龙门吊调度优化或箱区间转场优化问题。

针对第一个方向，韩晓龙在网络流理论的基础上，为了确定码头作业中所需的轮胎式龙门吊数量建立了一个龙门吊配置数学模型，设计了最小流算法用于求解数学模型，但该文中实验规模不够大无法保证其一般性<sup>[15]</sup>。Jurgen Bose 等为了优化船舶滞港时间和龙门吊的配置问题，建立了以船舶滞港时间最小且龙门吊使用率最高为目标的配置模型<sup>[16]</sup>。陶其钧，李冠声，丁以中等采用计算机仿真技术对轮胎式龙门吊的配置问题进行了不同程度的研究<sup>[17-19]</sup>。

针对第二个方向的研究相对较多些。其中对于箱区间场桥转场优化问题上 Chuqian Zhang 等建立了一个箱区间场桥转场调度模型，以便于解决场桥的任务分配及先后执行的顺序难题，但是文中认为场桥计划期内各台场桥只允许一次转场的假设很不合理<sup>[20]</sup>。Linn 将计划期划分为多个小的阶段后以各个阶段未按计划完成的任务量最小为目标，建立了配置既定前提下的轮胎式龙门吊的箱区调度优化数学模型<sup>[21]</sup>。李建忠等为了优化轮胎式龙门吊的箱区间调度问题，建立了一个多目标非线性规划模型，同时考虑到求解的复杂性采用线性加权法将多目标加权后使用拉格朗日松弛算法求解非线性数学模型<sup>[22]</sup>。Richard Linn 等采用混合整数规

划理论建立了一个多场桥作业量箱区间分配模型,采用两阶段松弛的拉格朗日算法进行求解模型<sup>[33][34]</sup>。Shell Ying Huang 等专注于龙门吊调度问题的最优化启发式算法研究,文中提出了结合了实际操作限制的启发式算法,根据动态不定环境下的任务情况进行了调度实验,实验结果可以表明调度方法和算法均较有效<sup>[35]</sup>。

其中对于龙门吊的在箱区内的调度优化问题上研究中十分之多。Kap Hwan Kim 等研究了针对场外客户前来接送集装箱时的单台龙门吊如何为他们进行先后装卸的序列优化问题<sup>[23]</sup>。W. C. Ng 等首先构建了一个类似于 Kap H K 提出的单场桥箱区内调度模型,之后假设任务规模很大时把模型改进为多场桥的箱区内调度优化模型,最后设计了启发式算法求解两个模型<sup>[24]</sup>。zyngiridis 为了实现集卡准时循环于海侧与堆场之间,建立了箱区内至多两台轨道式龙门吊的整数规划数学模型和相应的智能求解算法<sup>[25]</sup>。Lee 建立了两台轮胎式龙门吊的协调调度模型,并设计了基于模拟退火算法的求解方法<sup>[26]</sup>。Wenkai Li 等考虑到同一箱区相邻龙门吊之间不可互相跨越及安全距离等约束,建立了一个多台龙门吊箱区内调度优化数学模型,设计了启发式和水平滚动算法求解模型<sup>[27]</sup>。Matthew E. H. Petering 等基于计算机仿真的实时性特点,对多台龙门吊在堆场内的作业系统进行了详细的仿真分析<sup>[28]</sup>。韩晓龙对某台龙门吊在把某个箱区内的待装船集装箱的装船顺序进行了优化分析<sup>[29]</sup>。乐美龙等建立了多龙门吊的调度优化混合整数规划模型,并设计了针对性较强的求解模型的两阶段启发式算法<sup>[30]</sup>。郭茜等有别于其它学者认为集卡数量充分,创新地把各个集装箱的集卡到达时间对场桥调度的干扰纳入考虑范围,建立了同一巷道箱区内的多场桥调度数学模型<sup>[31]</sup>。郑红星和于凯考虑到混堆模式的集装箱箱区内任务对应的内外集卡到达时刻的影响,以及内外集卡优先级别的差异,构建了以所有集卡的等待和场桥的移动成本总和最小为目标的单场桥调度优化模型,并设计了遗传算法求解模型<sup>[32]</sup>。

### 1.2.3 集卡调度问题的研究现状

目前用于集装箱水平运输的设备很多,在国内传统码头都是普通集卡;而在国外的自动新型码头都采用自动导引车 (AGV),所以国外针对集装箱的水平运输设备的研究大多是对自动导航拖车的研究<sup>[36]</sup>。Bish 提出以船舶滞港时间最小为目标的多台 AGV 的动态调动模型,采用启发式算法求解模型<sup>[37]</sup>。Vis 对 AGV 的配置优

化问题进行了研究<sup>[38]</sup>。Kim 采用整数规划方法进行了定量解决装船过程中龙门吊的提箱序列问题研究<sup>[39]</sup>。Kozani 等考虑到许多影响集卡运输循环过程的多个因素后, 针对性的开发了一个启发式算法<sup>[40]</sup>。

国内方面杨静蕾等以上海某港口码头为实际算例, 针对物流集卡路径和装卸设备间的配备都进行了详细的研究<sup>[41]</sup>。吕显强等建立起一个场内集卡调度的整数规划数学模型<sup>[42]</sup>。严政和陶德馨采用动态优化组合的方法对码头集卡调度优化问题进行了剖析<sup>[43]</sup>。林艺明对集装箱码头系统的调度问题进行了初步的分析<sup>[44]</sup>。陈方鼎采用群体智能算法思想, 并将其应用到码头内集卡调度优化上<sup>[45]</sup>。任建乔对港口“无线通信传输系统”进行了分析<sup>[46]</sup>。魏众对集装箱码头无线作业系统的调度过程进行了分析<sup>[47]</sup>。李丽和刘健对 GPS 技术在港口中的运用做了研究<sup>[48-50]</sup>。江涛提出一个集卡配置优化新理念, 采用资源协作手段提高运输效率<sup>[51]</sup>。Cao Jinxin 等为了减少集卡等待时间, 采用遗传和贪婪启发式算法近似求解调度问题的优化解<sup>[52]</sup>。LI Guang-ru 等采用嵌入仿真技术的调度模型去优化集卡调度问题<sup>[53]</sup>。在之前的基础上 LI Guang-ru 等进一步放宽集卡系统容量, 实现了对整个码头的集卡的调度系统进行了动态地分析, 提出了一个自适应蚁群优化方法, 用于 MATLAB 的模拟计算, 仿真结果表明算法还算有效<sup>[54]</sup>。Zheng Xiao-juan 等建立了动态调度数学模型处理集卡运输集装箱的往返时间优化, 同时还设计了针对模型特点的改进 GA 用于求解<sup>[55]</sup>。曾庆成等建立了以岸桥的等待总时间最小化为目标的动态集卡调度数学模型, 并基于 Q 学习算法求解模型, 研究结果显示, 算法还是能够较为精确地寻到调度问题的近视最优解<sup>[56]</sup>。李东等别处心材地提出道路资源占用最小化的衡量目标, 在这一思想的指导下构建了一个用于优化时间和空间的集卡调度优化模型<sup>[57]</sup>。周松艳利用 Map Objects 组件作为开发工具, 利用该软件的空间优化特点, 设计一个用于寻求场内集卡行驶的最优路径的应用程序, 最终的目的在于提高港口内集装箱的移动效率<sup>[58]</sup>。计明军等在假设研究的港口采用混合交叉作业模式下, 所有集卡都是按照作业面的形式往返于岸桥和场桥之间, 文中建立了此运作模式下的集卡行驶路径最短化的调度优化数学模型<sup>[59]</sup>。

#### 1.2.4 场区堆存策略的研究现状

随着我国与国外各国的贸易量急剧上升, 进出码头的集装箱量十分巨大。对

于一些国内的小码头而言,堆场空间的大小是非常重要的一项资源。所以箱位是很宝贵的资源,而且箱位分配的合理与否也会影响到场桥作业过程中的倒箱量大小,间接还导致其他环节的等待甚至是延误。一直以来针对堆场堆存策略进行研究的学者较少,但是近年航运市场不断发展,堆场堆存策略的重要性逐渐显现出来而且越来越多学者开始关注此问题。关于堆存策略的研究主要的优化方法有两种:(1)定量分析法——首先结合码头作业流程和各个环节互相间的影响,然后把影响堆场策略的一些要素都考虑到构建数学优化模型,最终需求求解手段;(2)仿真优化法——部分学者认为第一种方法最大的缺陷就是不能体现实际作业系统的多变性和实时性,于是提出采用模仿现实的仿真技术来对复杂多变的集装箱堆存问题进行分析优化。

国内有些学者比较关注集装箱堆场策略研究。例如,丁以中等对港口集装箱流的研究现状情况做了总结且建设性地给出了未来的发展方向<sup>[60]</sup>。陈思云等在细致分析仓储物流系统的特性及运作流程之后,基于各种跪着衡量指标构建了整个系统的仿真模型<sup>[61-63]</sup>。周瑞等对重点或者说主旨在于码头泊位和岸桥配置优化问题,但是在其进行仿真研究过程中也相当一定程度涉及到堆场存储策略问题<sup>[64][65]</sup>。康海贵等考虑到码头箱区的堆场空间有限,提出了一种新的进出口箱混合堆存策略,针对此问题提出了两阶段法优化混堆集装箱箱区内的动态箱位分配问题<sup>[66]</sup>。

国外有关集装箱堆存策略研究较早一些。Dekker 等研究的前提是自动化码头,利用模拟仿真法对 90 多种不同的集装箱堆存策略进行了仿真实验,并把不同堆存策略的仿真运行结果进行比较分析给出一些合理的建议<sup>[67]</sup>。Duinkerken MB 等英国 Duinkerken 如使用模拟方法分类策略战略盒堆叠同意返回的比较研究,在这种情况下,涉及安娜策略的适当的战略,政策层面上,政策的核心,RSC 策略问卷,模拟结果隐私权出色的其他表演为 RSC 战略<sup>[68]</sup>。Saanen 等为了分析出在实际码头作业过程中影响场桥装卸效率的首要因素,研究中建立了堆场箱区间的轮胎式龙门吊作业仿真模型,并且改变集装箱的堆存策略和场桥转场策略去观察仿真结果中龙门吊装卸效率的化,结果显示堆场策略对轮胎式龙门吊装卸效率的影响程度没有转场操作的大<sup>[69][70]</sup>。Park 等在选取一个码头的集卡数量和堆存的集装箱量都很大时,为了寻找出使得翻箱次数最少的集卡调度和场桥翻箱时落箱存储的最优方案,



利用计算机模拟仿真法进行优化<sup>[71]</sup>。

### 1.3 主要研究内容

当挂港船舶靠泊码头后，港方就要为船舶分配岸桥为其装卸进出口集装箱、同时会指派相关的集卡配合岸桥进行装卸船作业、在堆场箱区场桥就负责集装箱的进出控制，这一系列的作业环节间存在一定的耦合性和制约性。以上各环节的协调程度会影响整体的装卸作业效率，当然各环节的具体调度计划和码头整体选用的作业模式也会对港口系统作业效率造成影响。

目前国内大部分港口码头还是采用单独装卸模式作业，即船舶到港后首先将进口的集装箱全部卸空后，再一个个地把出口集装箱全部装上船舶后离港。该种作业模式下所有参与装卸作业的岸桥不管在那个阶段每装/卸一个集装箱都会出现一般岸桥小车空行而且此种作业模式下所有集卡都按照事先划分好的“作业线”固定循环服务于某艘船舶的某岸桥和某场桥之间，各个集卡每次循环也是也只有半程是重载。这种一般码头常用的作业方式能够有效的保障码头大型设备岸桥和场桥必然有集卡源源不断前来交接集装箱提高设备使用率且调度复杂度大大降低。但是这种码头作业模式下港口的设备有效作业率是比较低的，因为基本都是一般空程运作，同时由于空程运作的那部分时间如果恰好利用到装船服务上，那船舶的离港时间必然能得到很好的保证甚至提前完成装卸任务。

本文研究的是采用混合交叉作业模式的集装箱码头，此种作业模式下的码头对到港船舶的集装箱是同时装船和卸船，而且当进出口箱量均衡时基本实现同时完成船上和堆场任务的清空任务。这种作业模式下服务于各船舶的各台岸桥在某个进行装卸作业时采用“同贝同步装卸”——同贝同步装卸时，岸桥要先卸完该船贝的一整栈腾出空位，然后岸桥开始卸下一个栈的集装箱时同贝同步装卸工艺启动，岸桥卸下一个进口集装箱后，小车不返回而且立刻从已在下方等待的集卡上提起出口集装箱放到原先空出来的栈位的某层上。这种工艺下各台岸桥单次小车循环都是带有集装箱的恰好把原来单独装卸模式下那部分空程给利用上了。在混合交叉作业模式下参与作业的所有集卡不在有自己的作业线了，它们可以被调度去为任一船舶、任一岸桥与场桥之间往返运输集装箱，集卡从堆场场桥接到一个箱子送到岸桥下装船，然后不会立刻返回，而是前往某个岸桥下继续接起一个

进口箱后再前往指定箱区接受箱区内场桥的装卸服务。集卡在循环过程中一直处于负重运行使得集卡设备和集卡驾驶员两者资源的有效生产率最大化。

很明显混合交叉作业模式在码头的调度方面要求很高难度很大，但是绝对能够大幅度提高码头系统的作业效率，减少生产运作成本进而提升码头的核心竞争力。通过以上的分析对比可知，当某个码头的资源和资金都无法改变时，改变码头的运作模式是很有必要的，可以说是必然之举。采用本文介绍的混合交叉作业模式的集装箱港口可以改善服务质量、提高资源有效利用率，该作业模式在不久的将来必然会成为主流模式。在混合交叉作业模式下，集装箱码头的泊位计划、岸桥调度计划、集卡调度计划、场桥调度计划等的优劣与否将直接影响到码头的生产作业效率和成本。考虑到该作业模式与传统作业模式相比之下，最大的不同便是岸桥作业过程和集卡作业过程，岸桥进行各个贝位的同步装卸时具体的装卸进出口箱的顺序如何、集卡应该从哪个岸桥到哪个场桥这一系列决策都直接影响混合交叉作业模式能否成功发挥其优越性，所以是研究的重点也是热点。

为了能够解决多船舶混合交叉作业过程中的一系列调度难题，本文先提出来同贝同步装卸优化调度方法，从码头所有任务最早结束装卸着手，考虑岸桥船舶积载计划运用定量的数学模型对岸桥同步装卸工艺进行描述，还设计了遗传算法求解模型；然后提出集卡“作业面”调度优化问题，以所有集卡完成任务的总行驶距离最小为目标建立集卡调度数学模型同时针对模型采用规划软件求解。以上两块研究正好可以克服新作业模式下的调度难点，进一步为混合交叉作业模式下的集装箱码头提供一定的决策支持。

#### 1.4 文章思想路线

本文对集装箱码头多船混合交叉作业模式下的相关调度问题进行了研究总结，特别的针对岸桥同贝同步装卸船调度和集卡全程重载调度问题的深入研究，多个船舶到港首先要为各船安排一定数量的岸桥为其进行装卸、确定岸桥在各个贝位的装卸箱序列、集卡每次应该在何台岸桥和场桥间往返，所以本文主要研究为两个调度优化问题。本文中分别建立了以岸桥装卸循环次数和岸桥总作业时间最小为目标的岸桥同贝同步装船调度模型；建立了以所有集卡的总行驶里程最小为目标的集卡调度优化模型，针对建立的两个数学模型分别设计了遗传算法用于

求解两个模型，采用一系列的案例优化过程对提出的混合交叉作业模式的优越性和所提出的相应优化调度方法的有效性进行了验证。

通过对混合交叉作业模式下岸桥和集卡调度的分析建模、对应的求解算法的设计和实现过程的确定，最后为了验证本文建立的两个模型及相应算法的有效性进行了案例分析。

本文的主要章节流程如下：

第一章，在此章的各节内，重点给出了本文研究问题的背景、研究的理论意义、实际意义所在，还包括对目前针对集装箱码头系统的相关研究进行了汇总分析以及相应的不足之处讨论，结尾确定研究混合交叉作业模式的调度问题很有必要。

第二章，为了让读者了解码头系统的作业现场，本章节对集装箱码头的概念、功能布局、作业流程、作业模式，不同作业模式的各自特点等进行了对比说明。。

第三章，本章两节详细地对新作业模式下，即混合交叉作业模式带来的岸桥和集卡的作业工艺带来的变化的描述。不仅从文字上进行了对比分析，还采用图示法更加直观地给出示例。

第四章，本章对混合交叉作业模式下岸桥作业过程中的相关影响因素进行限定后将其视为一个较为复杂的服务序列优化问题。接着首先提出模型的假设前提、所有的符号和必须满足的约束，建立了混合交叉作业模式下岸桥同贝同步装卸船调度优化模型，同时对模型的目标函数和约束条件进行了解释说明。还设计高效的寻优算法，对岸桥调度模型进行优化求解，基于某港口的情况设计了具体的案例用于验证本章模型和求解算法的有效性。

第五章，类似于前一章，本章对混合交叉作业模式下集卡循环过程中的影响因素进行确定，将其类比为多车辆的路径优化问题。建模一节中，提出模型的假设前提、参量和必须满足的约束条件，建立了混合交叉作业模式下集卡调度优化模型，同时对模型的目标函数和约束条件进行了解释说明。针对路径优化模型采用 CPLEX 进行求解，具体给出了算法的设计过程和核心点，最后基于较大规模的一个例子做了数值仿真分析。

第六章，文章的最后对本文的研究成果进行了总结，同时针对模型的几点假设进行分析，获知在本文研究基础上的几个未来研究方向。

## 第 2 章 集装码头作业系统介绍

### 2.1 集装箱码头的功能布局

集装箱码头目前在国际长距离运输中充当水运和陆运的交接点角色，它可以实现大量的集装箱及货物在多种运输方式之间进行换装。具体可以为集装箱船舶提供停泊服务，为船舶提供装卸服务和堆存集装箱作业，保税、检疫等。码头不仅只有集装箱码头，其他还有散货码头、矿石码头等等。但是集装箱码头相比其他码头而言具有较多不同，码头前沿的水深很好；岸边和堆场的垂直吊装设备都很大且水平运输设备也很多；有露天的较广阔的堆存场所；码头的信息化程度都很高，甚至有的发的集装箱码头进入完全的自动化。

伴随着现代物流行业高速的发展，集装箱物流的功能被持续改进。集装箱码头，可以为来港客户提供运输，包装加工，仓储和分销，以及其他的增值服务，现代物流中心和配送的材料可以用作配送中心，产品分销及加工中心。一般情况下集装箱码头有以下几点功能：（1）起到多种运输方式之间的连接作用；（2）能为多种装卸搬运设备进行任意换装；（3）对进出口货物可以起到缓冲作用，避免意外发生；（5）有一些重点码头还可能具有军事意义。

既然集装箱码头的作业如此之多，那么如何才能成功的运营一个集装箱码头成为管理难题，或者说如何做到一个集装箱码头的高效运作和安全生产是一个核心问题。通过调查国内外效益较好的集装箱码头，归纳出几点必不可少的要求：堆场的面积要求越大越好；码头要有一个很广阔的水域用于船舶进出泊位和调转操作；大型装卸设备的数量和型号都要得到保证；要为码头引入一批专业的员工用于生产作业；码头的各个部门职能必须明确，各部门负责人的能力要高；用于日常作业过程中的信息传达的信息管理系统的应用必须熟练。

集装箱码头是一个功能健全布局规范的建筑群，它不仅有自己的水域，还具有一定范围的陆地区域。其中码头水域主要包括港口的港池、航道、锚地和岸线泊位等。港池是船舶调头、拖轮作业作占用的一部分水域，港池的水深和面积都很大，港内风浪和水流一般都比较缓和以便作业的安全性，港池包括人工港池和天然港池两类。包括泉水的港湾，码头的船只给停靠站点，以方便在顶部和底部的

货运和客运码头的装卸，船卷和水船发送从周边海域旋转需要的码头，港口锚在水中上船发运的货物转运卸载、靠泊和系泊等待避风水域。航道是船舶进入码头泊位作业的必经之路，相当于上山的上路，目前航道分为单航道，多航道。单航道单次航道内只允许进入或放出一艘船舶，但是多航道就允许许多艘船舶同时进出港口码头，一般航道的水流平缓，无暗礁等障碍。泊位形象的比方就像是小区的提车线，船舶沿着泊位侧边平行于岸线落锚。泊位可分为一段段的离散型泊位，也可以是一个整的停靠区叫连续泊位。一个离散泊位同一时间只能停靠一艘船舶，无论空余多少。相比离散型，连续泊位在分配时，只需要相邻船舶留有间距即可。

陆地区域相对比较复杂，但是主要的模块有前沿、堆场箱区、集卡缓冲区、中控室、办公楼等等，具体图示如下图 2-1。码头前沿是岸边到堆场边之间的一个条状空区域，这个区域主要用于集卡的短时间排队、集卡的行驶和转弯等。具体的长度和岸线一直，但是宽度就取决于码头的规模和装卸频率。集装箱码头大门就是常说的匝口，主要用于外来车辆进出的控制和信息检索。堆场箱区是前沿和场外的过渡带，重型集装箱堆场必须满足多层堆叠和使用机轮负载要求，并根据容器的结构特点和类型，存放到不同类型的集装箱箱区，例如冷藏集装箱，干货集装箱，框架/罐式集装箱，危险货物等。集装箱堆场可分为海侧箱区和陆侧箱区，海侧堆场箱区用于装卸集装箱船舶，集装箱和集装箱装卸进口设备陈旧连接功能和设计。陆侧箱区主要用于待提取走的进口箱保管或需要转运的集装箱的暂时存储。中控室目的是为了观察整个集装箱码头作业系统的实时状况而建立的一个设在最高处的职能部门，一般会有相应的控制人员鸟瞰全码头的实时情况，为零时出现的变故发出计时的通告。办公楼和维修部的设定一般位于全场的某个角落，维修部主要用于场内的作业设备的检修和保养；办公楼则是非体力劳动人员的工作场所和休息餐饮处，如各部门的管理者，销售人员等。

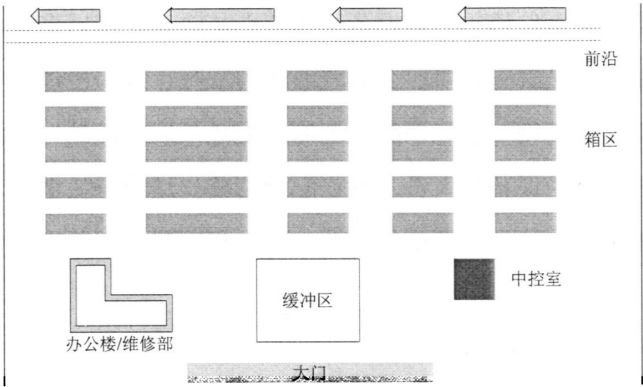


图 2-1 集装箱码头布局

Fig2-1 The layout of container terminal

2.2 集装箱码头作业流程

在集装箱码头的运作过程中可是详细的看出次码头的作业特点和各个功能模块的效率，为了详细说明岸桥、集卡、场桥等设备的集成调度方式就需要仔细分析码头作业时的流程和码头的整体作业模式，便于找出码头作业效率低下的原因，以便于针对性的加以优化。按照集装箱业务的性质来分可分为两大类：进口箱和出口箱，即卸船与装船两个相反作业流。

当有船舶载运着进口集装箱挂靠港口后，码头需要根据进口箱量的多少为各船舶配置一定数量的岸桥、集卡、场桥以及相关的操作人员，之后按照箱位堆存计划和岸桥调度计划实施箱子的卸船作业。在上述过程中具体的一些事务和手续较多，具体的进口箱装卸流程如下图 2-2 所示。

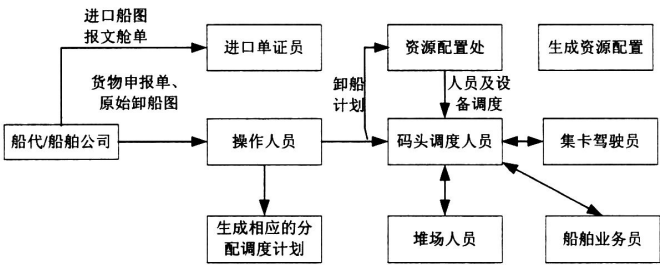


图 2-2 卸船业务流程

Fig2-2 The operation flow of unloading

与上面进口箱的卸船过程恰好相反，出口箱的装船过程是从堆场往船舶方向进行。但是码头还是必须按照计划期内已经确定的相关调度策略进行装卸，尤其

是原先配置给任务出口箱的装卸设备和作业人员数量要得以保证，否则会影响进度。码头的单证人员首先索要船公司或船代的配载计划、出口清单等，然后船舶计划员根据获得的货物信息和积载计划制作配载及装船计划，资源管理部门依据调度计划安排相应的设备和人员，并将配给情况传递给码头调度部门，最后码头安排岸桥和驾驶员开始出口箱装船作业。出口集装箱的装船事务的具体流程如图 2-3 所示。

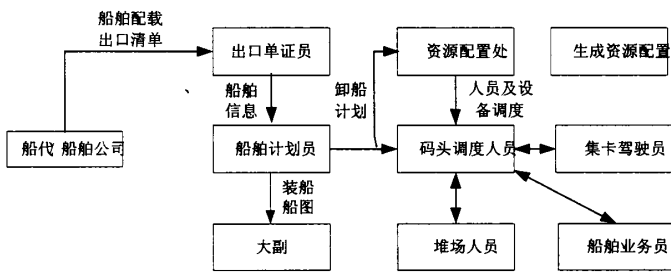


图 2-3 装船业务流程

Fig2-3 The operation flow of loading

## 2.3 集装箱码头的作业模式

集装箱码头系统的整体作业流程的顺利运行，其中系统中各个因素和作业环节的写作程度是左右元素之一，但是更加重要的还是各环节及系统中各要素的互相联系紧密度、协调码头进出口作运作过程中部门和人员职能和信息等才是真正的难点和重点。集装箱码头整个作业系统的运作模式的集成度和复杂度，能够直接反映出码头的现代化程度和管理水平的高低。具体就是指进出口作业过程中涉及的各种装卸设备、运载设备和相应额驾驶人员的安排和调度计划的合理性。码头系统的作业模式，依据各艘船舶同时作业时各自设备的共享程度的不同可以分为独立装卸作业模式和混合交叉作业模式两种，即常说的“作业线”和“作业面”两中运转模式。对于一些很小的集装箱码头其业务量不大而且船舶来港的时间分别较为均匀，这类码头多采用单独装卸作业模式以便于调度和调整设备等使用计划；相反的在一些业务量大和船舶到港密集度很高的一些国际型深水码头，都会采用混合交叉作业模式去充分利用所有人员和设备的有限资源。

### 2.3.1 独立装卸作业模式

码头有多个船舶在进行作业时，若采用独立装卸作业模式的码头都是先确定船

船前来是否有进口集装箱，当有进口集装箱时需要首先为此船舶安排固定的岸桥、场桥和集卡全部作业集中卸船，此过程中所有的设备都是存在半数的空负荷运作；当所有的进口集装箱都卸船完毕判断此船舶是否有出口集装箱位于码头，确定出口箱后和上述过程相似再次集中装船，在装船过程中也是只有一半设备行程是带有集装箱的又出现了设备低效率使用，综合这两个过程来看对于一艘既有进口箱又有出口任务的船舶来看，独立装卸作业模式下码头完成该船舶的所有装卸任务花费的设备操作往复动作中有一半的动作属于空载运作。为了更加形象的描述独立装卸模式的特点，本文结合下图 2-4 进行说明。

例如码头岸线目前有两艘船舶 A、B，船 A 未装载进口箱，而是前来接受码头的出口箱；船 B 则是满载进口箱，等待码头为其进行卸船作业。图中的 L1、L2.....均表示出口任务箱箱区，U1、U2、U3 表示进口箱的堆存箱区。带有箭头的虚线表示集卡的行驶方向，红色路径表示集卡重载，黑色则表示空载。那么对应船 A 而言，集卡到 L2 接受场桥放上一个出口箱后沿着红色路径行驶至岸桥 Q2 下方进行装船，然后空车沿着黑色路径返回 L2 继续作业。对应船 B 则是集卡首先到达岸桥 Q5 下方接受一个进口箱后重车沿着红色路线行驶至 U2 处接受场桥的装卸服务后，空车沿着黑色线路返回岸桥 Q5 下方继续作业。

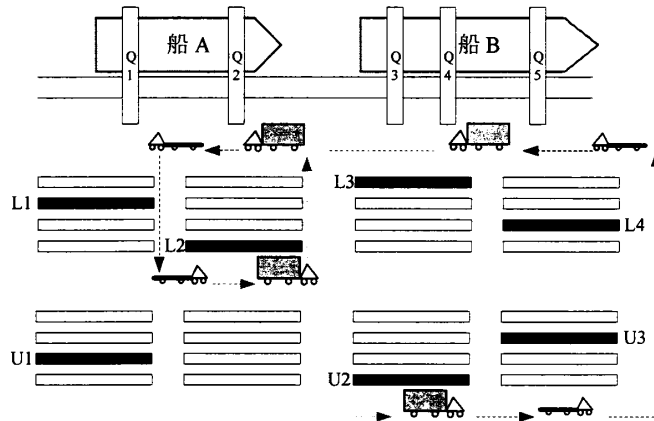


图 2-4 独立装卸作业示例

Fig2-4 The show of independent handling operation

### 2.3.2 混合交叉作业模式

码头有多个船舶在进行作业时，若采用混合交叉作业模式的码头都是先区别哪些船舶为进口贸易哪些为出口贸易，先为各船舶安排固定的岸桥，然后对任务箱



区配置一定数量的场桥和集卡；在卸载进口集装箱时集卡不会直接空返，去某个待出口箱区接受一个集装箱后重车开到出口箱船舶岸桥下，为其卸车后再去原进口船舶岸桥下继续循环上述过程。在上述过程中场桥也不固定于某船舶或某岸桥，各场桥既可以装卸进口箱也可以装卸出口箱。在混合交叉作业模式下所有的设备基本做到负重作业。为了更加形象的描述混合交叉作业模式的特点，本文结合下图 2-5 进行说明。

例如码头岸线目前有两艘船舶 A、B，船 A 未装载进口箱，而是前来接受码头的出口箱；船 B 则是满载进口箱，等待码头为其进行卸船作业。图中的 L1、L2.....均表示出口任务箱箱区，U1、U2、U3 表示进口箱的堆存箱区。带有箭头的虚线表示集卡的行驶方向，红色路径表示集卡重载，黑色则表示空载。那么混合交叉作业过程中某量集卡的运行路径特点为，集卡先从 L1 箱区从场桥处接受一个出口箱，重车沿着红色轨迹行驶到岸桥 Q2 下方接受装船服务，然后空车快速行驶到船 B 的岸桥 Q3 下方接受岸桥从船上卸下来的进口集装箱后沿着红色路径一直重车行驶到 U2 进口箱区处接受场桥装卸服务，最后返回 L1 箱区或者其他等待集卡的出口箱区处继续运输集装箱。

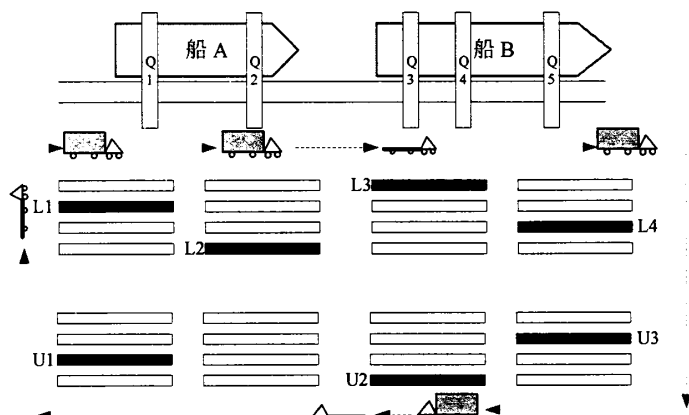


图 2-5 混合交叉作业示例

Fig2-5 The show of hybrid crossed operation

### 2.3.3 两种作业模式特点

通过上述两个不同作业模式下的实例分析可以看出，独立装卸和混合交叉两种作业模式的最大区别在于岸桥作业系统和集卡调度两方面的差异。图 2-4 中显示的独立装卸作业模式下船舶 A 和船舶 B 的作业互不干扰相当于两个独立系统，而

且岸桥装卸的集装箱流在很一阶段都是单向的，作业过程中一个吊装循环存在一半空返，而且集卡的路径比较固定并且也是完全的空车返回。图 2-5 中显示的混合交叉作业模式下船 A 和船 B 的作业是不分彼此的，两个船只可以看为同一艘船的前后节，只不过一般卸船一半装船而已，在此方式下岸桥装卸集装箱的流向是完全双向，而且一个吊装循环可以完成两个 move 任务大大降低了卷扬机的空返里程；同时对应的集卡的路径不在固定不变，且可能前一个循环后一循环的路径都完全不同，这样使得集卡的调度更加灵活、利用率更高。但是两者的调度难度也不一个层次，前者相当于两个独立调度的小系统，而后者则是把原先的两个系统集成成为一个大系统。

集装箱码头系统内的作业设备的购置成本是很高的，尤其是岸桥和龙门吊。此类购置成本很高的设备的时间成本是很高，即不产生经济收益的作业时段的浪费很大，所以决策者一般都是不允许岸桥和场桥作业过程中开机等待情况发生，那必然要求集卡的循环速度很快，在岸桥和龙门吊还未完成前一次作业循环动作之前必须新来一个或多个集卡等候在队列里准备接受岸桥或龙门吊的装卸。所有传统码头都采用独立装卸作业模式，这样以便于固定的多配置一些集卡给一条作业线上的岸桥和龙门吊，保证大型设备的连续作业，这样虽然可以保证大型设备的使用处于连续状态，但是会造成集卡配置的浪费以及大型设备的空返作业较多，还是会造成资源和时间成本的双重浪费。相比之下混合交叉作业模式下全场的集卡和龙门吊都不是固定于某船舶或岸桥的情况下，调度使用更加灵活多变，此时不仅可以保证作业循环中空返作业大大降低还能使得集卡和场桥的配置数量有所降低，同时配置的员工人数也会降低。

对所有的集装箱码头而言，首要需要保证的便是船舶的在港时间最小化。按照这一目标来直观的评价两种作业模式的显然是混合交叉作业模式花费的装卸总时间最短。因为独立装卸作业过程中首先集装卸船的话会浪费岸桥卷扬机返回的时间，其次在集装装船过程中也是同样地浪费了一大段时间；然而混合交叉作业过程中岸桥的空返时间被大大降低，或者可以理解为这部分时间被利用到同步装卸上缩短了整个装卸过程的时间长度，使得船期能够得到很好的保证。但是这种模式的缺点就是对调度人员的素质要求很高，在混合交叉作业模式下全场的集卡

运行非常不固定且集装箱任务的分配也是动态，必然很大程度上加大了调度工作的复杂程度。

独立装卸作业模式一般都是新建码头或小码头采用，但随着进出口集装箱量的逐渐增加，使得码头原先配置的设备使用率接近满负荷。码头经营者若是想提高码头业务量，可以加大对设备资源的投入扩建码头规模或者是完善对码头生成模式的管理提高码头的通过能力。前手段需要大量的资金支持不是很适合短期快速的实现，需要做中长期战略规划才能实现；第二中方法虽然会导致作业系统十分复杂，但是确实合理可行。因此，通过改进集装箱码头的实践生产环节问题是完善码头的生产管理水平所必需采取的策略。通过上文对两种作业模式的详细比较可以看出，采用混合交叉作业模式更有效地降低集装箱码头设备配置总数，并且能提高所有的设备的有效利用率，进而降低船舶入港口和码头生产经营的成本，所以混合交叉作业模式是切实可行的一种新的运作模式。建议传统集装箱码头选用此作业模式进行优化各方面的管理水平。

### 第3章 混合交叉作业模式下集卡作业及装卸船工艺

#### 3.1 同步装卸船舶工艺

上一章已经对混合交叉作业模式下岸桥的作业特点进行了说明，岸桥装卸过程中对于船舶而言属于同贝同步装卸作业，即岸桥在同一船贝上一边卸进口箱一边装出口箱的技术，在此过程中所有的集卡循环为岸桥服务，各个岸桥在船舶上是固定不动的直至该船贝的所有装卸任务完成之前，接着移动到下一个计划要装卸的船贝处继续作业。这种作业工艺可以很大程度的减少资源的浪费，从各个方面提高了码头的运行效率。

至此对于本文研究的混合交叉作业模式下的岸桥作业工艺已经了解的十分详细，其实单独从岸桥的角度来看，同步装卸于传统的模式对比改变不难，在码头前沿是很容易实现岸桥的同时装卸船舶作业。目前国内的上海港在码头前沿就是考虑到业务量太大的压力而选用了岸桥同贝同步装卸船舶，从以往的作业历史来看效益很不错。然而该模式下的另一块问题，集卡的调度是比较困难。因为堆场内进口箱区与出口箱区的总体距离还是比较远的，此时只能由集卡在各个箱区之间循环行驶接送集装箱配合同步装卸的岸桥作业，而且各台集卡不固定于某台岸桥，当有岸桥需要集卡时实时地就要求集卡前往，这时候的集卡调度是一个十分复杂且动态性很强的优化问题。所以为了从长远的较多发展混合交叉作业模式的化传统的集装箱堆场划分不仅肯定是不利于其长远发展的，因此本文给出了一些对应的建设性意见用于配合新工艺码头的顺利运作：

(1)岸桥的装卸顺序优化；

(2)不管是进口船舶还是出口船舶的积载计划应该考虑到混合交叉作业模式的影响；

(3)对应集装箱堆场箱区的堆存策略需要改善，最好采用进出口箱混合堆场策略，以便于缩短集卡的在途时间，尽快到达高效装卸的岸桥下方；

(4)最后便是场内的交通实时控制系统必须先进，因为混合交叉作业过程中所有的集卡会纵横交错的运行起来，控制不当可造成交通堵塞或安全隐患等等。

### 3.2 集卡作业系统的特点

集装箱码头卡车是码头整个作业设备中数量最多、作业最灵活、调度最困难的水平运输设备。集卡主要路线是往返于岸桥和场桥之间，集卡数量的多少和调度的合理程度直接影响到岸桥和场桥的等待与否，继而影响集装箱码头运行效率及成本。所以优化集卡作业系统是很有必要的一项工作用于提高码头竞争力。

独立装卸作业模式下，由于受到各自所属的作业线的限制，一辆集卡只能为一台岸桥和几台场桥提供接送集装箱服务。进口船舶靠泊后，集卡到达所在作业线的岸桥下方等待进口箱，重车沿着规定路径行驶到堆存箱区的场桥处进行作业，然后空车返回前沿继续作业。混合交叉作业模式下，各台集卡不固定服务于某台岸桥，集卡首先从某进口船舶的某岸桥下接收卸船集装箱，沿着路线转交给堆场箱区的场桥进行存储，然后从该箱区或者另出口集装箱所在箱区去接受新任务，运到相应船舶的某岸桥下进行装船，而且此船舶未必就是刚刚的船舶，只要是与箱子对应的船舶就可以，岸桥是原先岸桥或其它岸桥，最后集卡再从该岸桥或者进口船舶的某岸桥接起卸载集装箱进行下一轮循环。混合交叉作业模式下集卡的调度路径和匹配对象都是不固定的很复杂，但是最重要的是基本做到了全程重车运行。

在为船舶进行装卸作业中当船舶的进口集装箱量等于需要出口的集装箱量时，作业循环中所有的集卡都能够做到重进重出，所以参与作业的所有集卡都能做到以作业面方式进行装卸作业；然而当某船舶或几个船舶同时装卸时进口集装箱的总量不等于出口集装箱的总量时，会出现一头作业晚结束，此时必然有的集卡会出现半程空返的现象，参与作业的集卡有的时候按照作业面方式作业，有的时候可能会按照作业线进行循环作业。

## 第4章 岸桥同船贝同步装卸调度优化

### 4.1 问题分析

在岸桥同贝同步装卸过程中的相关影响因素还是比较复杂的，时间作业中首要得考虑船舶的积载情况、出口箱的预先安排好配载计划及堆场内的作业场桥数和集卡数等，存在一下一些问题。

(1) 岸桥的装卸集装箱的顺序，传统的方法是由船的一侧开始装卸，直至一贝的另一船侧再移动岸桥继续作业，很显然在同时装卸时不能如此，因为按照这种简单的装卸规则不能保证船舶的稳性、也不能保证满足最优的装卸顺序。

(2) 三阶段的设备之间的协同，同贝同步装卸过程中岸桥需要集卡的平率大幅被提高，且场桥的作业频率也会同时增大，所以岸桥、集卡、龙门吊三者之间的协同程度决定了岸桥同步装卸船舶的效率。

上述描述的两个问题是影响混合交叉作业模式下岸桥同贝同步装卸效率的重要因素，在研究新作业模式下岸桥的调度过程中需要考虑。所以本文致力于通过对岸桥装卸集装箱的作业序列优化着手，以便获得最优的进出口集装箱的卸装序列进而达到所有岸桥中完成最后一个装卸任务的时刻最小的目标，即船舶离港时间最早化。

### 4.2 岸桥同船贝同步装卸调度模型

#### 4.2.1 模型假设条件

为了使得建立的数学模型更加简练且合理，需要提出几点假设前提。具体的几点假设前提如下：

(1) 岸桥在对船舶进行同步装卸时，对于任一船贝的某一栈位而言，当此栈内有进口集装箱还未卸完就不允许该栈位用于出口箱的存储之处。这么做的目的在于避免出现船上倒箱的现象。

(2) 所有的岸桥只有完成了各自贝位栈内所有卸船或装船的集装箱后才能再进行下该贝内下一栈集装箱的装卸作业。

(3) 同步装卸船舶过程中不考虑船舶的稳性问题。

#### 4.2.2 模型符号说明

$S$ : 所有的存在装卸任务的栈位集合, 即把船上每个栈的装卸任务看成一个任务组也行;

$s$ : 集合  $S$  中的某一元素, 表示所有任务组中的某一个任务组;

$NU_s$ : 表示船舶中  $s$  任务组中包含的进口箱数量;

$NL_s$ : 表示船舶中  $s$  任务组中包含的出口箱数量;

$UT_s$ : 表示完成船舶中  $s$  任务组中包含的所有进口集装箱的时间;

$LT_s$ : 表示完成船舶中  $s$  任务组中包含的所有出口集装箱的时间;

$T_0$ : 为岸桥作业过程中每个装卸循环花费的时间长度;

$G$ : 一个非常大的正数;

$X_{st}$ : 0-1 变量, 当岸桥卸完任务组  $s$  的所有进口集装箱后紧接进行  $t$  任务组的进口箱的卸载作业时取值为 1, 否则取值为 0 (其中  $s, t \in S$ );

$Y_{st}$ : 0-1 变量, 当岸桥装好任务组  $s$  的所有出口集装箱后紧接进行  $t$  任务组的出口箱的装载作业时取值为 1, 否则取值为 0 (其中  $s, t \in S$ );

$f$ : 所有岸桥中完成最后一个装卸任务的时刻值。

上述所描述的符号中, 决策变量为  $X_{st}$ ,  $Y_{st}$  ( $s, t \in S$ )。

#### 4.2.3 模型目标及约束

$$\text{Min } f \quad (4-1)$$

$$f \geq LT_s \quad (4-2)$$

$$\sum_{t \in S} X_{st} \leq 1, \forall s \in S \quad (4-3)$$

$$\sum_{t \in S} Y_{st} \leq 1, \forall s \in S \quad (4-4)$$

$$\sum_{t \in S} Y_{st} \leq 1, \forall s \in S \quad (4-5)$$

$$\sum_{t \in S} Y_{st} \leq 1, \forall s \in S \quad (4-6)$$

$$LT_s - UT_s \geq T_0 * NL_s, \forall s \in S \quad (4-7)$$

$$UT_s - UT_t + G * X_{st} \geq T_0 * NU_s, \forall s, t \in S \quad (4-8)$$

$$UT_t - UT_s + G * (1 - X_{st}) \geq T_0 * NU_t, \forall s, t \in S \quad (4-9)$$

$$LT_s - LT_t + G * Y_{st} \geq T_0 * NL_s, \forall s, t \in S \quad (4-10)$$

$$X_{st}, Y_{st} = \{0, 1\}, \forall s, t \in S \quad (4-11)$$

式(4-1)为数学模型的目标函数,目的是所有岸桥中完成最后一个装卸任务的时刻最小;式(4-2)保证岸桥最晚完成作业时间不小于所有装船作业的完成时刻;式(4-3)、(4-4)、(4-5)、(4-6)四式共同保证每个任务组只能由一台岸桥仅装卸一次;式(4-7)保证船上的每一个任务组集装箱所在的栈位,只有当全部进口集装箱卸船完毕后才能开始进行对该栈进行出口箱装船作业;式(4-8)、(4-9)、(4-10)三个约束式子共同保证岸桥只有全部装卸完某任务组的集装箱才可对该任务组的栈进行卸或装船作业之后去进行下栈的卸船或装船作业;式(4-11)是决策变量的取值约束。

## 4.3 遗传算法

### 4.3.1 算法的概述

1975年美国Michigan大学教授J. H. Holland在从事机器学习时提出遗传算法的概念,他发现学习不仅能采用各个生物体适应环境来慢慢完成,也可以采用单个群体的总体进化趋势来实现。Kenneth De Jong在解决优化问题时采用了上述算法。Holland为了开发一种可以克服外界环境变化且在一些不确定环境的鲁棒性较好的系统时对遗传算法进行研究。这一类环境不定的系统自适应是从其所处环境中随时得到返回的一种函数关系,所以形成今天被我们称之为简单遗传算法的再生计划或复杂计划(Reproductive Plan)。此种简单的算法仅仅是一类具有特定的种群(Population)规模、种群中每个个体的长度相同且固定的基因链一种抽象模型。依据适应度(Fitness)随机地选择将要用于交叉的两个父体,通过交叉



操作 (Crossover operation) 与变异操作 (Mutation operation) 获得一些新的个体组成新的种群。遗传算法无需考虑待解决问题的具体属于那种形态或有什么特点。GA 通过改变基因编码的特点去实现求解问题的整体性优化, 因此属于从下而上寻优法。这种思想与生物的进化过程十分相似, 遗传算法处理的是变量集合, 而非变量的本身个体。它对个体的结构进行直接操作, 无需对函数或约束等进行求导或函数连续性的限定, 具有该算法特有的隐并行性和全局优化能力。采用随机概率优化寻找可行解的方法, 能自动获取搜索的空间。GA 通过优化问题的目标筛选去自行调整解的大体搜索方向, 当然也无需要人为确定的规则。遗传算法的这些特点被人们广泛地应用于一些组合优化问题、机械学习、信号理论处理和人工智能技术等尖端研究领域, 可以说遗传算法是现代智能计算技术的起源和重要技术之一。

遗传算法是隶属于进化算法的, 可用来解决优化问题的随机搜索最优解的算法。遗传算法的实现大多是采用计算机编程语言实现。遗传算法借鉴了“达尔文”适者生存、弱肉强食、物竞天择的自然选择和生物遗传机理, 受到大自然进化过程都是从低级、简单向高级转变规律的启迪, 从人类漫长而绝妙非凡的进化过程汲取经验和精华, 可见遗传算法是依据自然界的生物进化理论上逐渐地发展起来的, 当然生物进化过程如图 4-1 所示。相关概念在生物遗传理念中映射如下, 适者生存——目标值越大的解越容易被保留; 个体——解; 染色体——多维数组或一串或一行字符/列向量; 基因——解的每个小分量; 适应度——适应度函数的值, 个体优劣程度; 群体——被选定的许多的解的集合; 交叉操作——按特定的重组规则产生新的解过程; 变异操作——某些基因值发生突变的过程。

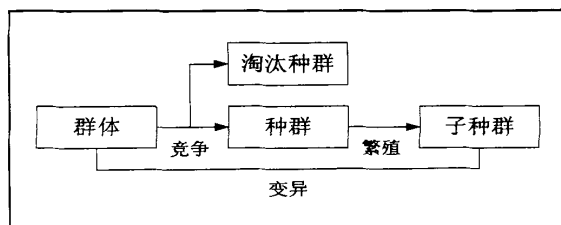


图 4-1 群体的进化过程

Fig 4-1 The process of chromosome evolution

遗传算法中的个体就表示待解决的优化问题的可行解, 具体的表现形式有:

一个变量序列或字符串，被叫做基因链或者是染色体。染色体的表现形式多为字符串或一串数字串，也不排除有根据某些问题的特殊性特点进行设置与问题相适应的染色体表示方式，即遗传算法的编码过程。总的步骤如下：

**step 1:** 随机产生种群数量大小的一个群体，特殊情况下为达到提高初始种群的质量的目的，也可以对此随机产生个体的过程进行人为的干扰。各代的每一独立种群个体都要被适值函数评价，评价指标值通过给定的适应度函数计算获得。所有个体的适应度值都能求得。

**step 2:** 按照适值大小，对种群中的个体进行初次的排序，一般而言对于适应值高的个体排序都在前面。

**step 3:** 下一代个体产生、组成新老个体混杂的个体种群，此过程可以通过选择操作、交叉操作和变异操作来实现。

选择，是根据变异后产生个体的适应值大小决定，但又个体被选择与否不是单纯的取决于其适值的大小。因为如果仅仅依赖适应值高低、那么都是好的个体进行下一步操作，渐渐地可能会使得算法以收敛到局部最优个体的速度很快，却把全局最优解区域给跳过或遗漏掉，这种现象称之为早熟。人们为了避免这种现象的频繁产生，规定了遗传算法相关的选择操作，某些规则为：适值越大，被选择到交叉池的概率越大，然而适值低的个体，被选择进行产生新个体的交叉操作的概率低了。

交叉，是对被选择的新个体进行配对交叉的操作过程。一般遗传算法都会设置固定的交叉概率，一些改进的 GA 也会有自适应变化手段。通过交叉算子，两个父个体就能产生两个全新的个体，有的学者只保留一个使用。而未被选中进行交叉操作的所有个体会被保留下来。被选定要交叉的父代个体们都是在随机产生的一个或多个交叉点间进行基因互换，产生新的个体的染色体。例如单点交叉或两点交叉：父个体 1 的所有交叉点的前部分基因链属于是遗传父个体 1 的遗传信息，交叉点之后或者中间部分遗传父个体 2 的基因链，另一个新生产的子个体的染色体构成则与上文描述的恰好相反。

变异操作，是通过基因位置的几个或者单个值得突变及交换产生新的子个体的操作过程。遗传算法同样需要提前设定一个固定的变异概率值。染色体需要根

据预先设定的变异率值大小进行随机性实施变异操作，通常变异手段就是改变染色体某些基因位置对应基因取值，例如，二进制编码中将其从 1 变到 0，或者从 0 变到 1。

最后，经过以上一系列的选择操作、交叉操作和变异操作之后，会产生不同于初始种群的新一代个体，而且不断循环上述进化过程，整个群体的会逐渐地向着适应度值比较高的趋势进化，适合环境的优异个被选择进入交叉池的可能性也是比较大，而适应度值比较低下的劣质个体则慢慢地由于不适用环境被淘汰掉。这一优胜劣汰的过程在自然中不断被重复，直到满足算法的终止条件。一般终止遗传算法的方法有以下几种：通过控制固定的计算总代数来定量计算；计算的资源耗费上限的限制；收敛到的满意解是否在下界的合理偏离区间内；人为干预和组合法等多种方式。

目前遗传算法的应用领域十分之多：遗传算法的最大特点不依赖于所待优化问题的具体领域，而且具有很强的鲁棒性。所以，GA 近些年来被广泛地应用于很多复杂的学科。其中经典的几个领域为：生产调度优化问题、复杂函数优化问题、组合优化问题、航空控制系统优化问题、空间交会控制器设计、模糊控制规则学习问题、模糊控制器的优化设计问题、人工神经网络结构优化设计问题、参数辨识问题、机器人学和图像处理、模式识别问题、图像恢复与图像边缘提取问题、人工生命等领域。但是随着研究的加深加大许多学者发现遗传算法的不少弊端，如算法求解大规模问题的计算效率比较低下，定向搜索能力很弱，有时会出现逆进化现象等缺点。

4.3.2 编码方式

考虑到本文遗传算法解决的任务组数可能较多，故染色体采用十进制方式进行多维编码，一个染色体就表示一个岸桥调度策略，染色体中各个基因值就表示船上的各个任务栈位。如图 4-2 表示一个具有 5 个栈位需要进行卸载进口箱和对应的装载出口箱，图中个体中的装卸各个栈的序列就是岸桥的同步装卸调度计划。

染色体	卸栈序列:	3	1	2	4	5
	装栈序列:	1	3	4	2	5

图 4-2 染色体编码展示

Fig 4-2 The coding of an individual

4.3.3 选择算子

为了充分地体现选择的随机性，本文采用轮盘赌选择法对种群的个体进行选择操作。

4.3.4 交叉算子

本文的个体交叉采用“并行顺序交叉”，之所称并行是因为个体是二维编码，交叉时两行共用交叉点，交叉时参与交叉的两个父体的第一行、第二行分别进行交叉，具体的交叉过程如下图 4-3 所示。

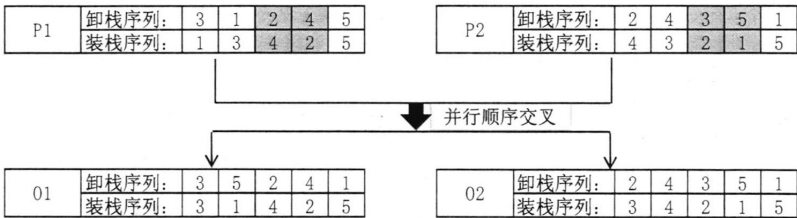


图 4-3 交叉过程

Fig 4-3 The process of crossing

4.3.5 变异算子

本文对交叉后的新群体要对一部分个体实施变异操作，且采用互换基因位的值法实施变异，不管是卸栈顺序还是装栈顺序都共有两个交叉位。其中对上一节中获得的 O2 进行实施一次变异，具体的变异如图 4-4 所示。

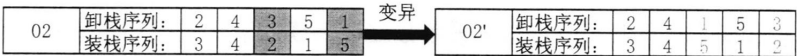


图 4-4 变异过程

Fig 4-4 The process of mutation

4.3.6 适值函数

个体的适应度值和其直接的目标函数值大小正相关，具体的适值函数如下所示：

$$Fit(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum f(x_i)}$$

4.3.7 终止规则

本文假设当算法的进化代数达到预设的上限时停止计算，输出优化结果。

## 4.4 数值实验

### 4.4.1 数据来源

本文为了验证提出的同贝同步装卸方法的效率，模拟了一个船舶贝位内的调度算例，考虑到岸桥装卸完一个贝的任务后才会移走的假设前提，即使是全船一起进行计算也只不过是多个调度过程的重复优化所以设计一个船舶贝上的优化装卸问题即可。

本文设计了一个船舶贝位上具有 20 个栈位，且每一栈的集装箱堆存层数为 12 层，即每一栈仓内存 12 个集装箱的随机算例。每栈位内的进口集装箱数量、出口集装箱数量、出口集装箱在堆场层位由程序随机产生，岸桥完成一次循环作业时间根据采用的装卸工艺取值有所不同。本文对码头进行调研分析后确定岸桥若采用独立装卸作业方式，其完成一次作业循环花费的时间约 105 秒；然而当采用混合交叉模式下同步装卸时一个循环需要约 160 秒。

### 4.4.2 实验结果

本文在基于上述案例和参数在进行数值实验时，遗传算法的交叉率、变异率、最大进化代数、种群容量取值分别设置为 0.8、0.05、100、200。在此算法参数取值下在 MATLAB R2008a 上编译算法同时在 1.8GHZ 的 PC 上进行实验。实验结果表明遗传算法可以较快地达到收敛，具有较好的收敛性具体如下图 4-5 所示。

采用相同的案例，但是岸桥采用独立装卸模式装卸进出口集装箱时花费总时间为 718 秒。然而同步装卸优化后的总时间 635 秒相比传统模式节约时间 12% 左右，显然装卸船效率提高了不少。

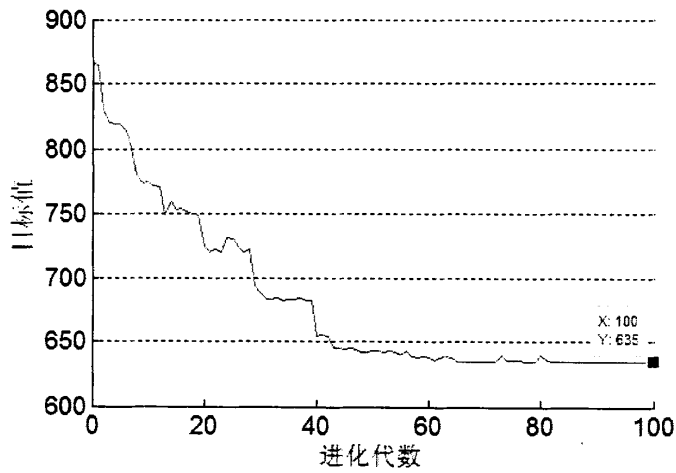


图 4-5 GA 计算过程中目标值变化曲线

Fig4-5 The objective value curve in the computing procedure

## 4.5 本章小结

本章重点对同贝同步装卸的相关问题进行了详细分析，同时把研究的规模限定在一个较多任务的船舶贝位上进行讨论，建立了岸桥同贝同步装卸优化数学模型，并设计了遗传算法用于求解。数值实验的结果表明，混合交叉作业模式下的同贝同步装卸相比独立装卸模式可节约 12% 的岸桥总时间，证明本文提出的混合交叉作业模式及该模式下的岸桥新工艺优化方法有效可行。

## 第5章 混合交叉作业模式下集卡调度优化

### 5.1 问题分析

在码头进行装卸作业过程中,集卡的作业成本或者说总的行驶路径长短受到一些因素的影响。包括集卡的数量,在装卸过程中为了避免岸桥等待现象,码头一般会为堆场配置较多的集卡和场桥用于快速配合集装箱流。但集卡如果数量过多不仅会堵塞交通还造成资源的过多浪费,所以在运营过程中如何为各艘到港作业船舶配置一定数量的集卡是一项重要决策;计划期内总的装卸任务量,如果把单只船舶的作业时段视为一个计划期,那不同的计划期内需要装卸的任务箱的总量是不相同的量,如此一来给原先船舶作业的一系列设备可能到了后一计划期会能力过剩或能力不足,作业量比较小时集卡的数量和调度工作都是比较小规模优化问题,可以容许不合理之处造成堵塞的概率也很小,但是任务量时会导致集卡不能及时完成集装箱接送,易出现道路拥堵现象,增加集卡的运输作业时间;码头前的各台为船舶作业的岸桥于堆场区域各个任务箱区之间的距离还是比较远的,且理论上可行的路径组合也很多,因此集卡的行驶路安排对作业过程中集装箱的流动速度和装卸设备的等待与否起到重要的影响;岸桥及龙门吊的数量,以及相关人员的作业水平高低也会对集卡的调度产生较多影响,若岸桥配备数量较少,那么各台岸桥的作业量和装卸频率会很高,所以集卡运转的再高效或快速也只能在装卸设备下方进行排队等候服务,此时就造成集卡队列会堵塞码头前沿;龙门吊配置的总数量与对集卡的可行路径优化也存在同上的影响;岸桥和龙门吊装卸效率和集卡的循环效率应该做到互相协同运作,才能使得集装箱的装卸船舶的任务顺利完成,否则会出现作业过程的延缓甚至中断,给港方带来了巨大的成本和信誉方面的损失。

### 5.2 混合交叉作业模式集卡调度模型

针对集卡调度优化问题目前主要的衡量指标有总的行驶里程最短、集卡运行总成本最小、总的作业时间最小、岸桥的总等待时间最小等。本文采用最为直接的路径优化,选取总的集卡行驶里程最小为模型的目标。下文将详细介绍模型的假设、目标式和约束式。

### 5.2.1 模型假设条件

- (1) 计划期内的船舶的进出口集装箱的总数量已知;
- (2) 进口箱和出口箱的在码头是采用分堆模式堆存的, 不会出现进口箱区有出口箱, 也不会出现出口箱区有进口箱; 且各个任务箱的目标箱位是已知;
- (3) 所有参与作业的集卡运载能力相同, 速度相同, 忽略重车与空车的速度之差;
- (4) 不考虑作业过程中具体的翻箱问题, 采用均箱装卸时间计量。

### 5.2.2 模型符号说明

- $I$ : 参与装卸作业的总的集车辆数;
- $J$ : 在各个任务相关的箱区内配置的总的龙门吊台数;
- $K$ : 配置给前沿船舶进行装卸作业的总的岸桥台数;
- $M$ : 堆场内可用于堆存集装箱的总的箱区数;
- $P_m$ : 表示第  $m$  个箱区目前空间状态下还能够存放的集装箱个数 ( $m=1,2,\dots,M$ );
- $d_{mn}$ : 堆场内箱区  $m$  与箱区  $n$  之间的集卡行驶的物理距离 ( $m,n=1,2,\dots,M$ );
- $UC$ : 计划期内总的进口集装箱总个数;
- $LC$ : 计划期内总的出口集装箱总个数;
- $Uq_m$ : 所有进口集装箱中堆存目标为箱区  $m$  的进口箱个数;
- $Lq_m$ : 所有出口集装箱中  $m$  箱区中占有的出口箱个数;
- $B_i$ : 集卡  $i$  在混合交叉作业模式下作业循环的总次数 ( $i=1,2,\dots,I$ );
- $X_{ibk}$ : 0-1 变量, 集卡  $i$  的第  $b$  次作业循环中接受岸桥  $k$  的装卸服务时取值为 1, 否则取值为 0;
- $Y_{ibj}$ : 0-1 变量, 集卡  $i$  的第  $b$  次作业循环中接受龙门吊  $j$  的装卸服务时取值为 1, 否则取值为 0;
- $Z_{ibmn}$ : 0-1 变量, 集卡  $i$  在第  $b$  次作业循环过程中先后巡防为箱区  $m$  和箱区  $n$  时取值 1, 否则取值 0;

### 5.2.3 模型目标及约束

$$\text{目标函数: } \min f = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K d_{0k} * X_{i1k} - \sum_{i=1}^I \sum_{b=1}^{B_i} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N d_{mn} * Z_{ibmn}$$



目标函数表示在整个作业计划中，所有的集卡行驶的总里程最小。

约束条件：

$$\sum_{k=1}^K X_{i,bk} = 1, i = 1, 2, \dots, I; b = 1, 2, \dots, B_i \quad (5-1)$$

$$\sum_{j=1}^J Y_{i,bj} = 1, i = 1, 2, \dots, I \quad (5-2)$$

$$\sum_{m=1}^M Uq_m = U, \sum_{m=1}^M Lq_m = L \quad (5-3)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{b=1}^{B_i} Y_{i,bj} \leq P_m, j = 1, 2, \dots, J; m = 1, 2, \dots, M \quad (5-4)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{b=1}^{B_i} \sum_{j=1}^J Y_{i,bj} = U - L \quad (5-5)$$

式(5-1) 保证任一车辆集卡在任意一次作业循环中只能由一台岸桥为其提供装卸服务；式(5-2) 保证每辆集卡在每次作业循环中只能将集装箱运送至唯一的箱区；式(5-3) 保证堆场区域和前沿区域的装卸作业量的守恒；式(5-4) 保证船舶上卸载到某箱区的进口箱量不能超过此箱区当时的存储空间大小；式(5-5) 保证所有的场桥装卸集装箱次数要等于总的进出口集装箱的总量。

## 5.3 案例分析

### 5.3.1 数据来源

本文采用我国某集装箱码头的某次船舶的任务情况历史数据作业实验的案例，作业时每个堆场箱区配置一台场桥，且对应的模型中的相关已知参数如下，配置集卡数  $I=45$  量；岸桥  $K=4$  台；任务箱区  $M=13$ ；场桥配置数  $J=13$ ；各个箱区的最大堆存集装箱数为 100 个；总的进口箱量为 354；总的出口箱量为 381。具体的各个目标箱区的进出口集装箱的任务量分布情况如下表 5-1 所示。

表 5-1 进出口箱量分布

Tab 5-1 The distribution of all containers

箱区编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
进口箱量	75	82	45	60	58	34	-	-	-	-	-	-	-
出口箱量	-	-	-	-	-	-	80	62	45	40	80	54	20

模型中各个箱区之间，各个箱区于岸桥之间的距离也是一直值，本文算例中未考虑集卡十分详细的绕行路径，而是利用两两之间的直线平面距离代替各箱区和岸桥间的路径长度。上述案例中 13 个堆场和 4 个岸桥间的距离矩阵见下表 5-2 所示（表中 C1, C2...表示岸桥 1,岸桥 2.....；B1,B2.....表示箱区 1，箱区 2.....）。具体的码头内的岸桥和堆场的坐标和各个岸桥及箱区间的距离计算方法的 MATLAB 代码见附录。

表 5-2 岸桥及箱区间的距离矩阵（单位：米）

Tab 5-2 The distance between quay cranes and blocks（unit: m）

	C1	C2	C3	C4	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13
C1	0	150.0	300.0	450.0	250.0	353.6	371.7	450.0	600.0	650.0	559.0	790.6	513.0	716.3	672.7	781.0	960.5
C2	150.0	0	150.0	300.0	291.5	269.3	350.9	474.3	618.5	608.3	430.1	650.0	416.1	590.0	570.1	694.6	848.5
C3	300.0	150.0	0	150.0	390.5	255.0	391.3	540.8	670.8	602.1	320.2	514.8	357.9	477.6	492.4	632.5	750.0
C4	450.0	300.0	150.0	0	514.8	320.2	477.6	636.4	750.0	632.5	255.0	390.5	357.9	391.3	452.8	602.1	670.8
B1	250.0	291.5	390.5	514.8	0	250.0	160.1	200.0	350.0	430.1	500.0	750.0	388.1	632.9	538.5	610.3	827.6
B2	353.6	269.3	255.0	320.2	250.0	0	160.1	320.2	430.1	350.0	250.0	500.0	160.1	388.1	320.2	430.1	610.3
B3	371.7	350.9	391.3	477.6	160.1	160.1	0	160.1	279.5	279.5	388.1	632.9	250.0	500.0	388.1	450.7	673.1
B4	450.0	474.3	540.8	636.4	200.0	320.2	160.1	0	150.0	291.5	538.5	776.2	388.1	632.9	500.0	522.0	764.9
B5	600.0	618.5	670.8	750.0	350.0	430.1	279.5	150.0	0	250.0	610.3	827.6	450.7	673.1	522.0	500.0	750.0
B6	650.0	608.3	602.1	632.5	430.1	350.0	279.5	291.5	250.0	0	430.1	610.3	279.5	450.7	291.5	250.0	500.0
B7	559.0	430.1	320.2	255.0	500.0	250.0	388.1	538.5	610.3	430.1	0	250.0	160.1	160.1	200.0	350.0	430.1
B8	790.6	650.0	514.8	390.5	750.0	500.0	632.9	776.2	827.6	610.3	250.0	0	388.1	160.1	320.2	430.1	350.0
B9	513.0	416.1	357.9	357.9	388.1	160.1	250.0	388.1	450.7	279.5	160.1	388.1	0	250.0	160.1	279.5	450.7
B10	716.3	590.0	477.6	391.3	632.9	388.1	500.0	632.9	673.1	450.7	160.1	160.1	250.0	0	160.1	279.5	279.5
B11	672.7	570.1	492.4	452.8	538.5	320.2	388.1	500.0	522.0	291.5	200.0	320.2	160.1	160.1	0	150.0	291.5
B12	781.0	694.6	632.5	602.1	610.3	430.1	450.7	522.0	500.0	250.0	350.0	430.1	279.5	279.5	150.0	0	250.0
B13	960.5	848.5	750.0	670.8	827.6	610.3	673.1	764.9	750.0	500.0	430.1	350.0	450.7	279.5	291.5	250.0	0

5.3.2 实验结果

通过 CPLEX 软件优化求解，将上述码头案例的各个数据带入模型的主要程序中求得按照混合交叉作业模式完成所有进出口集装箱的装卸船任务，集卡的最小

行驶总里程为  $2.184 \times 10^3$  km。该码头历史统计显示,采用独立装卸作业时集卡的

总行驶里程大约  $5.832 \times 10^3$  km,相比本文调度方法下的优化结果大出一半以上,

可见本文作业模式和集卡路径优化模型都是优于传统方式。

#### 5.4 本章小结

本章重点对混合交叉作业模式下码头堆场内的集卡调度优化相关问题进行了详细分析,同时将岸桥、箱区、场桥、集卡多个影响调度计划的因素进行协同考虑后建立一个以所有集卡总的行驶里程最小为目标的集卡调度模型,并设采用 CPLEX 优化求解。案例分析的数据来源于真实的某国内港口的作业历史,案例分析的结果表明按照混合交叉作业模式下的集卡调度方法能够有力地节约集卡资源及运行成本。

## 第 6 章 结论与展望

### 6.1 结论

针对集装箱港口码头而言,岸桥,场桥和集卡是最基本也是最为重要的作业设备。这些设备作业过程中互相之间的耦合程度十分高,所以需要做到协调调度最优才能保证资源的高效率利用,进而提高港口的通过能力。一般的港口的建设之后很难再去扩大腹地或是短时间的购买更多的设备资源,因为这些规划都属于长期战略优化,所以要想在有限的资源和资金限制下最大程度的提高码头的作业效率,同时尽量降低运营成本,码头的管理者需要从两个方面进行考虑:其一是,在原有港口作业模式的基础上进一步改进设备、人员的调度计划进而提高整体码头的作业效率;其二是,彻底地改变整个码头的作业调度模式,也就是本文提出的混合交叉作业模式,这样能够更大程度地提高岸桥装卸效率、场桥空闲率减小、集卡的浪费减少,最终使得整个作业系统内的无效运作最小化。围绕本文提出的混合交叉作业模式下岸桥同步装卸和集卡交叉作业的调度优化问题,本文的研究做出了许多的研究成果:首先详细分析了较多的传统交叉作业的码头作业的特点和缺点,和新提出的混合交叉作业模式的码头作业特点和区别。然后结合本文新作业模式下调度问题特点构建了岸桥同贝同步装卸船舶调度数学模型以及作业面方式下的集卡调度优化数学模型。经过对建立的两个模型的特点先设计了一个遗传算法用于求解岸桥同贝同步装卸调度模型,为了验证算法和模型的有效性和高效性采用一个数值案例进行了模拟计算和分析,最后利用 MATLAB 编程软件把提出的遗传算法进行准确的编译,基于案例进行了数值实验,同时把实验结果进行统计分析。针对新作业模式西下集卡的调度模型采用 CPLEX 优化软件进行优化求解,并且采用国内某港口的实际作用数据为测试案例,从优化的结果来看集卡调度模型相比传统作业线模式下的集卡调度大大提高了作业效率同时节约了集卡的总行驶里程数。

从以上众多的研究可以得知,传统的码头的作业中的调度方法必然会造成岸桥、集卡、场桥资源的无效利用,同时增加无效的运作成本。所以要想大幅度地提高码头整体的通过能力,只有彻底优化码头作业系统的作业模式,岸桥的装卸

效率直接决定着船舶的滞港时间以及其他配套设备的作业效率，同时为岸桥服务的场桥和集卡的协调调度计划的合理性也反过来影响岸桥的连续性装卸。当然详细的集卡循环作业过程中的行驶路径、岸桥装卸船舶的序列、场桥转场的合理性会是决策者始终都需要进行优化的环节。

## 6.2 展望

虽然本文对混合交叉作业模式下岸桥同步装卸船舶和作业面模式下集卡的调度问题的影响要素、作业特点、耦合程度等都做了详细的分析和比较，同时建立模型进行定量研究。但是，相比码头的实际做中的岸桥的装卸船和集卡往返于前沿和堆场的作业还是存在不全面的部分，因此需要在本文的研究基础上进行进一步的深入研究。

实际作业过程中某一船舶或几个同时装卸作业的船舶装载的集装箱的型号必然不可能唯一，因此需要对不同集装箱型号下的同贝同步岸桥装卸问题进行研究。如此本文建立的岸桥调度数学模型将更加复杂，其更具有实际指导意义。作业面模式下的集卡调度研究中没有考虑集卡重车和空车的行驶速度上的差异，这也是不合理之处，所以在将来的研究中需要区分重车路段和空车路段的行驶时间方面的准确化计量，以便于其他作业环节的准确协调调度提高支持。

本文研究成果其实是某一短时间内船舶的装卸作业的作业调度安排，及静态调度优化，但是当船舶较多或计划期较长时，很难保证没有任务的变更或者其他意外的干扰。所以静态调度计划还不能够充分体现实际作业环境，所以接下来也可以在本文静态调度研究成果的基础上进一步对带有动态性的混合交叉作业模式下的相关设备的调度问题进行深入的研究。

## 参考文献

- [1] 鲁子爱. 港口服务系统仿真与港口规模优化研究, 河海大学博士学位论文, 2002. 4.
- [2] 鲁子爱, 林民标. 港口服务系统的计算机仿真研究, 河海大学学报, 1999(3).
- [3] 何建腾. 试析码头泊位利用率的计算, 港口装卸, 1995(3).
- [4] 网王宇, 邢月华. 码头生产作业计划决策支持系统, 交通与计算机, 1997.
- [5] 杨静蕾, 丁以中. 集装箱码头设备配置的模拟研究, 系统仿真学报, 2003. (1).
- [6] 真虹. 集装箱码头生产过程动态图形仿真优化的研究, 中国图象图形学报, 1999(6).
- [7] SHI yu, YU Sheng line Optimization Based On Improved Real-coded Genetic Algorithm, Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics.
- [8] 陈红玉, 姚冠新. 物流系统建模方法的研究, 实用物流技术, 2002(6).
- [9] 鲁子爱, 港口建设规模优化研究, 河海大学学报(自然科学版), 2002(5).
- [10] 鲁子爱. 排队论在港口规划中的应用, 水运工程, 1997(8).
- [11] 汤百安. 集装箱泊位群规划中运输网络的模拟与优化研究. 系统工程理论与实践, 1990(3).
- [12] Li C-L, Cai X, Lee C-Y Scheduling with multiple-ob-on-one-processor pattern. IIE Transactions: 1998. 30.
- [13] Kap Hwan Kim. Kyung Chan Moon Berth scheduling by simulated annealing, Transportation Research Part B ,2003(37):541-560.
- [14] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S The dynamic Berth allocation for a container port. Transportation Research (Part B) ,2001(35):401-417.
- [15] 韩晓龙. 集装箱港口装卸中的龙门吊数量配置. 系统工程, 2005, 23 (10):12-16.
- [16] Jurgen Bose, Torsten Refiners, Dirk Steenken, Stefan Vob. Vehicle Dispatching at Seaport Container Terminals Using Evolutionary Algorithms [C]. Proceeding of the 33rd Hawaii International Conference on System Science. Hawaii, USA: R H Sprague (Ed.), 2000:20-25.
- [17] 陶其钧. 集装箱堆场机械选型配置研究[J]. 港口装卸, 2002, (1):1-6.
- [18] 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.

- [19] 韩晓龙, 丁以中. 集装箱港口装卸作业仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8):2366-2369.
- [20] Chuqian Zhang, Yat-wah Wan, and Jiyin Liu. Dynamic crane deployment in container storage yards[J]. Transportation Research Part B, 2002, 36(6):537-555.
- [21] Linn R J, Liu J-y, Wan Y w, et al. Rubber tired gantry crane deployment for container yard operation. Computers & Industrial Engineering, 2003, 45: 429-442.
- [22] 李建忠. 码头堆场龙门起重机动态配置优化模型. 交通运输工程学报, 2005, 5(1):70-74.
- [23] Kim K H, Lee K M, Hwan G H. Sequencing delivery and receiving operations for yard cranes in port container terminals. Int J Production Economics, 2003, 84:283-292.
- [24] Ng W C, Mak K L. An effective heuristic for scheduling a yard crane to handle jobs with different ready times. Eng Optimization, 2005. 37:867-877.
- [25] Zyngiridis I. Optimizing container movements using one and two automated stacking cranes. Monterey: Naval Postgraduate School, 2005.
- [26] Lee D H, Cao Z, Meng Q. Scheduling of two-transtainer systems for loading outbound containers in port container terminals with simulated annealing algorithm. Int J Product Econ, 2007, 107:115-124.
- [27] W K Li, Y Wu, M. E. H. Petering, Mark G, Robert S. Discrete time model and algorithms for container yard crane scheduling[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 198(1):165 - 172.
- [28] Matthew E. H. Petering, Y Wu, W K Li, Mark Goh, Robert de Souza. Development and simulation analysis of real-time yard crane control systems for seaport container Transshipment terminals[J]. OR Spectrum, 2009, 31:801 - 835.
- [29] 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.
- [30] 乐美龙, 林艳艳, 范志强. 基于两阶段启发式算法的多场桥作业调度研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(1):60-65.
- [31] Xi Guo, Shell Ying Huang, Wen Jing Hsu, Malcolm Yoke Hean Low. Dynamic yard crane dispatching in container terminals with predicted vehicle arrival information[J].

Advanced Engineering Informatics, 2011, 25(3):472-484.

[32] 郑红星, 于凯. 混堆集装箱箱区内场桥调度模型与算法[J]. 计算机工程与应用, 2012-7-3.

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

[34] Richard Linn, Ji-yin Liu, Yat-wah Wan, Chuqian Zhang, Katta G. Murty. Rubber tired gantry crane deployment for container yard operation[J]. Computers & Industrial Engineering, 2003, 45(3):429 - 442.

[35] 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.

[36] 夏鸿刚. 基于 GIS, GPS, GSM/GPRS 技术的运输车辆监控调度系统研究. [D]. (硕士学位论文). 西安:长安大学, 2008 年.

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

[38] Vis I FA, de Koster R, Roodbergen KJ, Peeters I WP. Determination of the number of automated guided vehicles required at a semi-automated container terminal. Journal of the Operation Research Society [J]. 2001, 52; 409-417.

[39] KIM K H. Sequencing delivery and receiving operations for yard cranes in port container terminals[J]. Int J Production Economics, 2003 (84):283-292.

[40] Erhan Kozan, Peter Preston. Genetic algorithms to schedule container transfers at multimodal terminals [J]. International Transactions in operational research, 1999, 6:311.

[41] 杨静蕾, 丁以中. 集装箱码头内部物流网络运作研究, 上海海运学院交通运输规划与管理, 2003, 6.

[42] 吕显强, 张宏伟. 集装箱码头分派车辆的整数规划模型[J]. 大连水产学院学报, 2004, 19:105-109.

[43] 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:



信息与管理工程版, 2006, 28(4): 26-29.

[44] 陈方鼎. 基于群体智能算法的集装箱码头集卡调度研究[D]. (硕士学位论文). 大连: 大连海事大学, 2008 年.

[45] 林艺明. 集装箱码头调度问题研究[D]. (硕士学位论文). 上海: 上海海事大学, 2007 年.

[46] 任建乔. 集装箱码头无线通信传输系统的关键技术分析与应用[D]. (硕士学位论文). 上海: 上海海事大学, 2006 年.

[47] 魏众. 集装箱码头物流作业系统集成优化调度研究[D]. (硕士学位论文). 北京: 北京交通大学, 2007 年.

[48] 李丽. 集装箱码头装卸技术中的 GPS 技术应用[J]. 中国水运(下半月)2012, 12: 216-217.

[49] 刘健. 基于定位信息的集装箱装卸控制方案[J]. 集装箱化, 2010, 10: 26-27.

[50] 胡强. 集装箱码头物流系统性能分析与仿真[D]. (硕士学位论文). 武汉: 武汉理工大学, 2005 年.

[51] 江涛. 集装箱码头集卡资源整合使用的路径优化研究[D]. (硕士学位论文). 上海: 上海交通大学, 2007 年.

[52] CAO Jinxin, SHI Qixin, Der-Horng Lee. A Decision Support Method for Truck Scheduling and Storage Allocation Problem at Container[J]. Tsinghua Science and Technology, 2008, 13(1): 211-216.

[53] Li Guang-Ru, Zhi Sun. Research on dynamic container truck scheduling based on energetic algorithm and MAS[C]. Proceedings - International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2010, 3: 532-537.

[54] Li Guang-Ru, Yang Da-Ben, Ren Da-Wei. Path optimization algorithm of dynamic scheduling for container truck[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(3): 86-91.

[55] Zheng Xiao-juan, Shu Fan, Mi Wei-jian. Research on genetic algorithm-based simulation of dynamic container truck scheduling[C]. CSAE 2012 Proceedings, 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, 2012, 2: 131-135.

[56] 曾庆成, 杨忠振. 集装箱码头集卡调度模型与 Q 学习算法[J]. 哈尔滨工程大学学报,

2008, 29(1):1-4.

[57] 李东, 汪定伟, 刘黎黎. 考虑阻塞的集装箱堆场集卡路径控制策略[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(10):1064-1068.

[58] 周松艳. MapObjects 在集卡路径优化中的应用[J]. 武汉交通职业学院学报, 2009, 11(2):78-81.

[59] 计明军, 刘丰硕, 李郭记, 靳志宏. 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, 2010, 36(1):47-50.

[60] 丁以忠, 费红英, 韩晓龙. 港口集装箱流研究现状与分析. 上海海事大学学报, 2004, 25(2):51-53.

[61] 陈思云, 刘大竹. 基于 Petri 网的仓储物流系统建模与仿真. 武汉理工大学学报, 2005, 29.

[62] 张新艳. 港口集装箱物流系统规划与仿真建模方法的研究与实现. 武汉理工大学博士学位论文, 2002.

[63] 朱耀明. 自动化立体仓库优化调度研究. 山东大学硕士学位论文, 2006.

[64] 周瑞. 港口集装箱物流系统建模及仿真相关技术研究. 武汉理工大学硕士学位论文, 2009.

[65] 靳志宏, 韩俊, 孙晓娜. 集装箱码头泊位与岸桥协调调度优化. 大连海事大学学报, 2008.

[66] 康海贵, 刘绝, 周鹏飞. 基于混堆的集装箱堆场动态箱位分配研究. 水运工程, 2009.

[67] Dekker R, Voogd P, van Asperen E. Advanced methods for container stacking. OR Spectr28:563-586, 2006.

[68] Duinkerken MB, Evers JJ, Ot. tjes JA. A simulation model for integrating quay transport and stacking policies in automated terminals. In:Proceedings of the 15<sup>th</sup> European simulation multiconference. 2001.

[69] Saanen YA, Dekker R. Intelligent stacking as way out of congested yard s. Part 1 .Port Technol Int31:87-92. 2006.

[70] Saanen YA, Dekker R. Intelligent stacking as way out of congested yard s. Part 2. Port "fechnol Int32:80-86.

[71] Park BJ, Choi HR, Kwon HK, et al. Simulation analysis on effective operation

of handling equipments in automated container terminal. In: AI 2006: Advances in artificial intelligence, Lecture notes in Computer Science, vol 4304, Springer, Berlin, pp:1231-1238, 2006.

## 附录：岸桥及箱区间的距离计算代码

```
clc
clear
x=[300 450 600 750 300 550 425 300 300 550 800 1050 675 925 800 800 1050];%横坐标
y=[150 150 150 150 400 400 500 600 750 750 400 400 500 500 600 750 750];%纵坐标
for i=1:17
    for j=1:17
        d_mn=sqrt((x(i)-x(j))^2+(y(i)-y(j))^2);
        Distance_M(i,j)=d_mn;
    end
end
Distance_M
```

## 致 谢

时光飞逝，转眼两年的研究生生活即将结束，在此，我要感谢曾经关怀和帮助过我的所有人致以诚挚的谢意。

首先，本论文是在导师郑红星副教授的精心指导下完成的。老师学识渊博、治学严谨，对论文的指导严格而认真。在这一段研究生生涯中，老师对我的学习及生活给予了无微不至的关心和帮助，使我能够顺利完成学业，同时参与了课题的研究，这些都使我受益匪浅。在此，我对老师致以最崇高的敬意和最衷心的感谢。

其次，在本论文的写作过程中，还得到了许多同学的热情帮助，在此，向你们致以真切的谢意！

另外，感谢这两年来，授予我知识、给予我帮助的交通运输管理学院的所有老师，没有你们的谆谆教导，就不会有今天的我！

感谢这么多年来与我朝夕相处的同学们，感谢你们在学习和生活中给予的关系、帮助与支持！

最后，要特别感谢我的父母，感谢他们多年来对我的养育之恩，是你们无私的爱与奉献伴我度过了漫漫的求学生涯！