

分 类 号 \_\_\_\_\_  
U D C \_\_\_\_\_

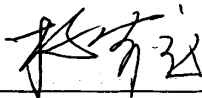
密 级 \_\_\_\_\_  
单位代码 10151 \_\_\_\_\_

集装箱堆场毗邻交叉口通行能力与配时  
优化研究

韩 凤 茹

指 导 教 师	张 赫	职 称	副教授
学位授予单位	大连海事大学		
申请学位级别	工学硕士	学 科（专业）	物流工程与管理
论文完成日期	2013.05	答 辩 日 期	2013.06

答辩委员会主席





**The Research on Traffic Capacity and Timing Optimization  
of the Intersection Adjacent to Container Yard**

**A thesis Submitted to**

**Dalian Maritime University**

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

**Master of Engineering**

**by**

**Han Fengru**

**(Logistics engineering and management)**

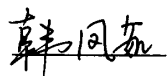
**Thesis Supervisor: Professor Zhang he**

**June 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,撰写成博/硕士学位论文“集装箱堆场毗邻交叉口通行能力与配时优化研究”。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: 2013 年 6 月 26 日

## 摘 要

近年来, 国际经济的迅速发展, 进出口商品的物流量急剧的增长, 使得我国港口的吞吐量大幅度的提高。同时为了方便装卸作业, 减少商品的损坏, 大量的商品采用集装箱运输, 所以集装箱的吞吐量也相应的急剧增加。港口作为国际贸易的主要结合点, 是经济繁荣发展的重要战略组成部分, 又是整个物流运输网络繁荣枢纽。然而快速增长的集装箱流通量, 造成了港口的集疏运系统的拥堵, 同时使得集装箱堆场系统面临严峻的问题。能否充分利用港口集装箱堆场的现有资源, 通过对堆场的优化和改进, 来减少集装箱的在港时间和运输车辆的等待时间, 提高集装箱堆场的通过能力以及集装箱的周转速度和堆场的作业效率, 为客户提供优质的服务, 是目前需要解决的问题。为此, 很多的学者和堆场的管理人员, 不断的对堆场的基本布局和相关的作业流程进行优化, 同时还不断的引进先进的管理技术, 为了就是提高集装箱堆场的通过能力。

针对上述的问题, 本文从集装箱堆场毗邻交叉口的交通控制这一角度进行分析研究, 将集装箱堆场毗邻交叉口和闸口的入口通道看作是集装箱堆场系统的一部分, 研究交叉口的通行能力与闸口的通过能力对集装箱堆场通过能力的影响, 分析他们之间的相互影响和联系, 建立配时优化模型。首先分析集装箱堆场毗邻交叉口通行能力的主要影响因素, 分析集装箱堆场与毗邻交叉口通行能力之间的关联性; 其次采用排队论的相关理论和方法, 建立闸口入口通道处的排队模型, 计算车辆在集装箱堆场闸口处的等待时间和通过能力, 以及采用 paramics 模拟仿真软件分析毗邻交叉口的通行能力; 最后在上述分析研究的基础之上, 对集装箱堆场毗邻交叉口进行配时优化, 建立一个基于车辆在交叉口的延误时间和闸口的排队等待时间之和最短的信号配时优化模型, 并采用遗传算法对优化模型进行求解, 得到最优的一组信号配时方案, 使得车辆的总的等待时间最短, 进而提高集装箱堆场的通过能力。

**关键词:** 通行能力; 交通控制; 排队论; 遗传算法

## ABSTRACT

In recent years, with the rapid development of international economy, the logistics quantity of import and export commodities grows rapidly, makes the volume of incoming and outgoing freights of our country is greatly improved. At the same time, in order to loading and unloading operation conveniently, reduce the damage to the goods, a lot of goods transport with the container, so the throughput of container has increased dramatically. Port as the main point of international trade, it is an important strategic component of economic prosperity, and prosperity hub of the whole logistics network. However, the rapid growth of container traffic, cause the port congestion of transportation system, at the same time make container yard system face a serious problem. Consequently ,make full use of existing resources of port container yard, through the optimization and improvement of yard , to reduce the time of the container in the port and the waiting time of transport vehicles, improve the operational efficiency of yard and container velocity , provide customers with quality service, above these problems are need to solve. Therefore, many scholars and yard management, the basic layout of yard and related process is optimized constantly, and continuously introduce advanced management technology, in order to improve the through capacity of container yard.

View of the above problems, this article from the intersection traffic control adjacent to container yard to analyze, and think the gate entrance channel and the intersection as a part of the container yard system, through the study of their ability on the capacity of intersection to analysis the through capacity of container yard, analyze the contact between them and contact establishment optimization model. First analysis the main factors affecting the traffic capacity of the intersection adjacent to container yard, and analysis the correlation between the container yard and the traffic capacity of the intersection adjacent to container yard. Second, using the theories and ways of queuing theory to build queuing model on the gates at the entrance channel to calculate the waiting time and through capacity of vehicle at the gate of container yard, and use the simulation software of paramics to analyze traffic capacity of adjacent intersections;

Finally, on the basis of the above analysis, to optimize the intersection adjacent to the container yard, build a signal timing optimization model based on the shortest of the delay time at the intersection and the waiting time at the gate, and using genetic algorithms to solve the optimization model, acquired the optimal signal timing plans, making the total vehicle waiting time minimum, thus improving the through capacity of the container yard .

**Key Words: Traffic Capacity; Traffic Control; Queuing Theory; Genetic Algorithm**

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.1.1 研究背景 .....	1
1.1.2 研究意义 .....	2
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.2.1 集装箱堆场通过能力研究现状 .....	3
1.2.2 交叉口交通控制以及港口交通研究现状 .....	4
1.3 本文研究内容及思路 .....	6
第 2 章 集装箱堆场毗邻交叉口通行能力分析的基础理论 .....	8
2.1 集装箱堆场毗邻交叉口概述 .....	8
2.2 毗邻交叉口通行能力定义 .....	8
2.3 毗邻交叉口通行能力影响因素分析 .....	9
2.3.1 毗邻交叉口的基础设施建设 .....	9
2.3.2 交通条件 .....	10
2.3.3 交通流的构成 .....	10
2.3.4 周边交通环境及其他因素 .....	11
2.4 毗邻交叉口交通控制的主要形式 .....	11
2.5 集装箱堆场与毗邻交叉口通行能力关联性分析 .....	12
2.5.1 集装箱堆场与毗邻交叉口的关系 .....	12
2.5.2 集装箱堆场闸口与毗邻交叉口的关系 .....	13
第 3 章 集装箱堆场毗邻交叉口通行能力分析 .....	15
3.1 排队论的原理概述 .....	15
3.1.1 排队系统的基本构成 .....	15
3.1.2 排队系统的分类与符号 .....	16

## 目 录

3.1.3 排队系统分析的特性指标 .....	17
3.1.4 采用排队论分析问题的基本步骤 .....	18
3.2 基于某港口的堆场毗邻交叉口通行能力分析 .....	18
3.2.1 集装箱堆场的排队网络 .....	18
3.2.2 毗邻交叉口的通行能力分析 .....	19
3.2.3 集装箱堆场闸口排队系统随机事件的分布规律分析 .....	20
3.2.4 建立集装箱堆场闸口排队模型 .....	23
3.3 排队论的计算方法及计算结果 .....	24
第 4 章 建立集装箱堆场毗邻交叉口配时优化模型 .....	27
4.1 毗邻交叉口配时优化问题描述 .....	27
4.2 建立集装箱堆场毗邻交叉口配时优化模型 .....	28
4.2.1 模型中参数介绍 .....	28
4.2.2 模型的建立 .....	30
4.3 利用遗传算法进行求解 .....	31
4.3.1 遗传算法原理 .....	31
4.3.2 求解信号配时目标函数的步骤设计 .....	32
4.4 模型实例应用 .....	35
4.4.1 基本参数计算 .....	35
4.4.2 模型应用 .....	38
4.4.3 结果验证并分析比较 .....	39
第 5 章 总结与展望 .....	42
5.1 全文总结 .....	42
6.2 未来展望 .....	43
参 考 文 献 .....	44
附录 程序代码 .....	48
致 谢 .....	50



## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

#### 1.1.1 研究背景

随着我国经济的快速发展，特别是对外贸易的不断增加，使我国的集装箱运输得到了迅速的发展，港口集装箱的吞吐量以惊人的速度增长。同时伴随着港口的建设也在大规模的进行着，不断的扩大港口的规模，来缓解不断增长的集装箱的吞吐量所带来的港口拥堵问题。但是只是从增加港口的建设规模并不能解决根本的问题，还会造成财力、人力、物力的浪费，所以国内外的很多学者开始从多个方面、多个角度去研究港口，以增加港口的作业效率，提高港口的通过能力。

港口通过能力是港口企业的生产能力，它是在外部环境条件为一定时港口各项生产要素和经营管理诸条件综合作用的结果<sup>[1]</sup>。港口通过能力是指泊位、库场、装卸、集疏运等各个环节的通过能力的合理组合而构成的综合能力，若某一环节的通过能力远远的低于其他部分，那该环节将成为制约港口通过能力的瓶颈因素。集装箱堆场在港口的整个运作过程中，起到了缓冲器的作用，集装箱堆场的通过能力影响着船舶的装卸效率和在港时间，提高集装箱堆场的通过能力对于提高整个港口的通过能力有很大的作用。

我国集装箱运输发展迅速，集装箱的吞吐量以每年 25% 以上的速度增长，在集装箱运输高速增长的同时，集装箱的公路集疏运也伴随着增长，引发了港口的交通问题，而毗邻交叉口的交通控制也日益成为人们关注的一个焦点。集装箱堆场的通过能力受很多因素的影响，除了与堆场的基础设施建设、堆场的软实力建设息息相关外，我们挖掘出集装箱堆场毗邻交叉口的交通控制对其通过能力的影响，本文就是研究集装箱堆场毗邻交叉口的交通控制对集装箱堆场通过能力的影响。集装箱堆场毗邻交叉口的交通控制的合理性，直接影响着堆场毗邻交叉口的通行能力，间接地影响堆场作业车辆的通行时间，即车辆在交叉口的延误时间，也就影响了港口的公路集疏运能力，车辆在交叉口的延误时间增加也会影响到集装箱堆场的作业效率和通过能力，集装箱堆场毗邻交叉口的交通控制影响到达闸口前的车流量，进而影响车辆的排队长度和等待时间。而集装箱堆场的

闸口与集装箱堆场的通过能力息息相关,所以堆场的闸口与毗邻交叉口都可能会成为集装箱堆场通过能力的瓶颈。

集装箱港口的船舶的靠泊规律以及集装箱港口的车辆调度方式直接影响着车辆的到港时间,决定了进入相应交叉口的车流特性,进而对交叉口的控制方案产生影响,反过来说,港口毗邻交叉口的交通控制配时方案影响了进入交叉口的车辆的进出港能力,主要是制约着集卡的疏港能力和通过毗邻交叉口的时间,影响着集装箱堆场的通过能力。如果毗邻交叉口的交通控制方案与集装箱堆场的生产作业系统不相匹配,那么就会导致大量的车辆在交叉口处拥堵,增加车辆的延误时间,影响了车辆、集装箱以及集装箱堆场的堆存周期。集装箱堆场毗邻交叉口的交通控制的合理性,不仅影响着集装箱堆场的通过能力,还影响着港口的安全性。

### 1.1.2 研究意义

集装箱堆场是指办理集装箱重箱或空箱装卸、转运、保管、交接的场所。它是集装箱运输体系中的重要组成部分,在运输的过程中起到重要的作用<sup>[2]</sup>。集装箱堆场是集装箱码头的重要组成部分,在集装箱物流中起着重要的作用,无论是发货人的待装集装箱还是刚刚从船舶上卸下来的待集疏运箱,都必须在这里进行交接。如何能够充分发挥集装箱堆场的优越性,关键是看集装箱堆场的作业流程以及每个节点处的效率最大化,因此要想提高集装箱堆场的通过能力,需要了解集装箱堆场的作业流程,对其运作的系统进行优化,尤其是制约堆场系统通过能力的瓶颈因素。对于集装箱堆场通过能力的研究不仅能够解决制约港口通过能力的瓶颈因素,还能够提高港口的运营效率,提高港口的竞争力。

本文基于港口研究的基础之上,选择一个大多数人忽视的角度进行研究。将集装箱堆场的通过能力与集装箱堆场毗邻交叉口的交通控制相结合,研究集装箱堆场毗邻交叉口的车辆通行能力,把集装箱堆场和其毗邻交叉口看作是一个系统,研究毗邻交叉口的通行能力就是为了提高集装箱堆场整体的通过能力,从而提高港口的通过能力和作业效率,提高港口的竞争力。

## 1.2 国内外研究现状

集装箱堆场系统是一个动态的、复杂的系统,是海陆运输工具之间衔接的需要,大部分的货物在装船前或者卸船后,都需要堆存在码头一段时间,因此,集装箱堆场是集装箱中转、管理、存放及修复地。在一定程度上,集装箱堆场的操作业务水平直接影响着整个港口的运作水平。目前,国内外对于集装箱堆场以及集装箱堆场通过能力的研究很多,但是将城市交通的交通控制方式应用到集装箱堆场,研究集装箱堆场毗邻交叉口通过能力,以提高集装箱堆场的通过能力的研究很少,本文将研究集装箱堆场毗邻交叉口以及与毗邻交叉口相连的闸口的通过能力。

### 1.2.1 集装箱堆场通过能力研究现状

近几年来研究国内外的学者从各个角度,采用各种方法对集装箱堆场进行研究,主要目的就是提高集装箱堆场的作业效率,进而提高港口的通过能力。例如张彦斌(2010)从闸口和堆场内部两方面入手,采用排队论的方法对天津港的集装箱堆场进行分析,找出影响通过能力的因素,提出改进的意见<sup>[3]</sup>;侯彤璋(2009)针对集装箱堆场的倒箱问题,建立了改进型倒箱原则模型并运用启发式算法进行求解,来提高集装箱堆场的通过能力<sup>[4]</sup>;刘翠莲(1996)通过分析香炉礁港务公司的生产现状的基础之上,采用模拟的方法对港口的通过能力进行研究,从而找出提高港口通过能力的途径<sup>[5]</sup>;张维英和林焰等人(2005)建立了出口集装箱堆场取箱作业优化模型,以场桥取箱作业中倒箱数量最少为目标,应用最小生成树和启发式算法对优化模型进行求解,获得倒箱数最少的优化装船顺序,提高装卸作业的效率,来改善集装箱堆场<sup>[6]</sup>;张艳和韩晖(2008)针对宁波集装箱码头,提出了降低集装箱码头堆场翻箱率的科学方法,通过对集装箱堆场的翻箱、倒箱的优化来提高集装箱堆场的作业效率,进而提高集装箱堆场的通过能力<sup>[7]</sup>;谢金泉(2005)在分析传统闸口弊端的基础上,提出中小集装箱码头提高闸口通过能力的措施,目的是为了改善制约堆场通过能力的瓶颈因素,从而提高闸口的通过能力<sup>[8]</sup>;Kim 和 Park(1998)通过研究数学方法和费用模型,来分析不同标准的堆放方式,寻找最优的合理的堆存方式,充分利用集装箱堆场的堆存面积,使集装箱堆场的堆存能力增大<sup>[9]</sup>;Kim(1999)通过建立一个复杂的整数规划模型,减小了集装箱堆场起重机的起动和运行时间,从而提高集装箱堆场的作业效率<sup>[10]</sup>;Ballis 和 Abacumkin(1996)建立了一个包括

由于设备不匹配而引起的交通堵塞和延迟的仿真模型。他们使用这个模型来评价一个码头的堆场设计、设备数量、集卡到达、运行规则<sup>[11]</sup>。

### 1.2.2 交叉口交通控制以及港口交通研究现状

对于交叉口交通控制的研究大多数都集中在城市交叉口,针对城市交通流的特点以及人们出行的规律,国内外很多学者进行了很多的较为详尽的研究。自 70 年代以来,英国、法国、美国等西方发达国家就积极开发各种城市交通信号控制系统,比较成功的有英国的 SCOOT 系统,澳大利亚的 SCAT 系统,美国的 OPAC 系统,QuicNet/4 系统, RHODE 系统,意大利的 SPOT/UTOPIA 系统,法国的 PROLYN 系统,以及西班牙的 ITACA 系统等。交通信号控制系统经历了从手动控制到自动控制、无感应控制到有感应控制、单点控制到干线控制再到区域控制的过程。例如陈超(2007)针对现有交通干线信号配时模型中存在的不足,提出了基于无线传感器网络环境下的新的城市交叉口控制方案,建立了交通干线相位差优化模型,缩短了交通干线的车辆延误时间<sup>[12]</sup>;李星(2008)针对交通流量急剧增加所引起的交叉口的交通拥堵问题,提出了基于模糊离散事件系统(FDES)的交叉口信号控制模型,设计了相位分配器和绿灯延迟策略,对于缓解城市交通拥堵有一定的现实意义<sup>[13]</sup>。

对于港口的交通大多集中于港口交通规划方面的研究,很少是基于港口的交叉口的交通信号控制方面的研究。港口的交通流量无论是高峰期的规律性还是车流的特性等,都和城市的交通有很大的差别,所以城市的交通控制理论不能直接的完全的应用在港口。对于港口交通的国内外研究成果如下,苗明等人(2005)以一大型集装箱港口为例,通过对港区的调查,分析港口交通现状的特点,根据集装箱的吞吐量和公路集疏运量预测了规划年集装箱卡车的出行生成量,并采用了 TransCAD 软件进行交通分配,合理地模拟了路网中实际的交通流情况,为改善港区的交通状况给出科学的建议<sup>[14]</sup>;宋科(2005)基于港口的全年吞吐量和利用不同的不均匀系数的方法预测道路的交通流量,建立了港区道路的通行能力计算模型。依托先进的交通仿真软件 Transcad 对随机用户平衡分配模型 sue 进行了研究,并且给出了科学的、符合实际情况的模型参数<sup>[15]</sup>;肖矫矫(2005)在《集装箱码头交通路网研究》一文中,提到了对于无信号灯的堆场交叉口的交通控制

问题,对交叉口的交通冲突进行分析,通过考虑优先权问题、设置专用车道和采用远引交叉的方法减少交叉口交通冲突的方法来优化、控制交叉口交通<sup>[16]</sup>;林晓丹(2011)建立了区域道路交通流模型和港口集疏运模型,通过 VISSIM 交通仿真软件和 Flexsim 系统仿真软件进行模型仿真,并验证其有效性,分析港口集疏运和区域道路交通流之间的关系<sup>[17]</sup>;James A.pope、Terry R,Rakes、Loren Pavl Rees 和 Ingrid W.M,Crouch (1995)等人在文中陈述了一个关于解决坐落在高度集中拥挤的区域的海运集装箱码头的道路交通流的影响的方法。他们通过建立模型来模拟码头周边的交通主脉或是码头本身因素的变化对港口运作和道路交通流的影响<sup>[18]</sup>;密西西比州立大学的 Zhang.Y.L (2003)通过货物流量调查得出交通流量数据构建模型,并利用传统的四阶段法对密西西比州港口区域综合交通枢纽进行规划研究,重在研究交通规划的问题<sup>[19]</sup>;Palmer Jr, J G、MCLEOD, M 和 Leue, M C (1996) 提出港口规划是一个具有挑战性的问题,因为港口运输效率的提高必须适应不断增长的货物以及并存的日益城市化。规划包括分析公路网,货物的活动和混合使用的交通。文章中建立了一种混合的旅行需求与交通运行模式的 Trucksim 模型,它能有效地评价港口进入系统,决定港口使用和道路设计变化时的影响和效益问题<sup>[20]</sup>;Zhongzhen Yang、Gang Chen 和 Douglas R.Moodie (2010) 等人通过分析港口道路交通的属性与港口区域交通与周边市区道路交通的不同,确定港口区域交通的两个主要影响因素:操作时间安排和卡车到达模式。建立了一个适合中国集装箱码头的集卡道路交通量需求模型,结合码头所给定的船舶的作业时间窗,依据历史数据进行分析,拟合得到在集港的情况下,集卡的到达分布模型,并预测相应的交通流量。此外,他们也利用统计量法和图示法对其进行拟合优度检验,并根据概率分布建立基于码头作业形态的港口道路交通专用需求预测模型<sup>[21]</sup>。

以上这些研究都主要侧重于对港区的道路交通的整体规划。根据港口的几年的吞吐量来预测港口道路的交通流量,并通过计算测定港口道路是否能够满足所产生的交通流量,对港口的道路进行规划。还有的是建立各种关于交通流量的模型和仿真模型,分析仿真结果对港口规划给出合理的建议。很少是基于港口交叉口的交通信号配置的研究,以合理优化港口的道路交通。缺少对港口道路的交通控制方面的研究。

### 1.3 本文研究内容及思路

本文对集装箱堆场毗邻交叉口通行能力与配时优化的具体研究内容如下：

首先，明确研究背景及意义，并提出所要研究的问题，在文章的第一部分通过对大量文献的阅读、收集和整理。归纳总结出集装箱堆场通过能力以及交叉口的交通控制和港口的交通问题的研究和发展现状，分析研究的结果，找出学者们研究疏忽的地方作为本文研究的重点，并针对这一问题的进行分析。

然后，在文章的第二部分主要叙述分析集装箱堆场毗邻交叉口通行能力的相关概念，以及研究过程中所需要的理论基础，简单的介绍了集装箱堆场毗邻交叉口通行能力的影响因素，并详细的描述了集装箱堆场与毗邻交叉口的关联性，分析集装箱堆场的运作流程，确定制约堆场通过能力的瓶颈因素；另外还叙述了集装箱堆场毗邻交叉口可能存在的几种控制方式。

其次，分析毗邻交叉口通行能力。在分析的过程中，将闸口的通过能力和毗邻交叉口的通行能力结合在一起进行研究。研究毗邻交叉口的通过能力，采用 paramics 对毗邻交叉口进行实时的模拟，得到现有交通控制方式下的交叉口通行能力、交叉口车辆延误时间以及平均排队长度；分析闸口的通过能力，采用排队论的理论和方法对其进行研究，首先，对通过交叉口到达集装箱堆场闸口的车辆进行分析，确定到达闸口的车流的到达方式。其次，确定闸口服务时间的分布方式。最后，建立排队论模型，计算车辆的排队长度和等待时间。

最后，针对上述分析的结果，对集装箱堆场毗邻交叉口的信号配时方案进行优化。在这一章节，对问题进行分析描述，建立一个基于车辆延误以及闸口前等待时间之和最短的信号配时优化的模型。采用遗传算法对模型进行求解，并对求解的结果用第三章中的方法进行验证，再将求得的结果与原有配时方案的结果进行比较，看总的等待时间是否减少，以确定该信号配时方案是否是最优的信号配时方案。

本文的研究结构框架如下：

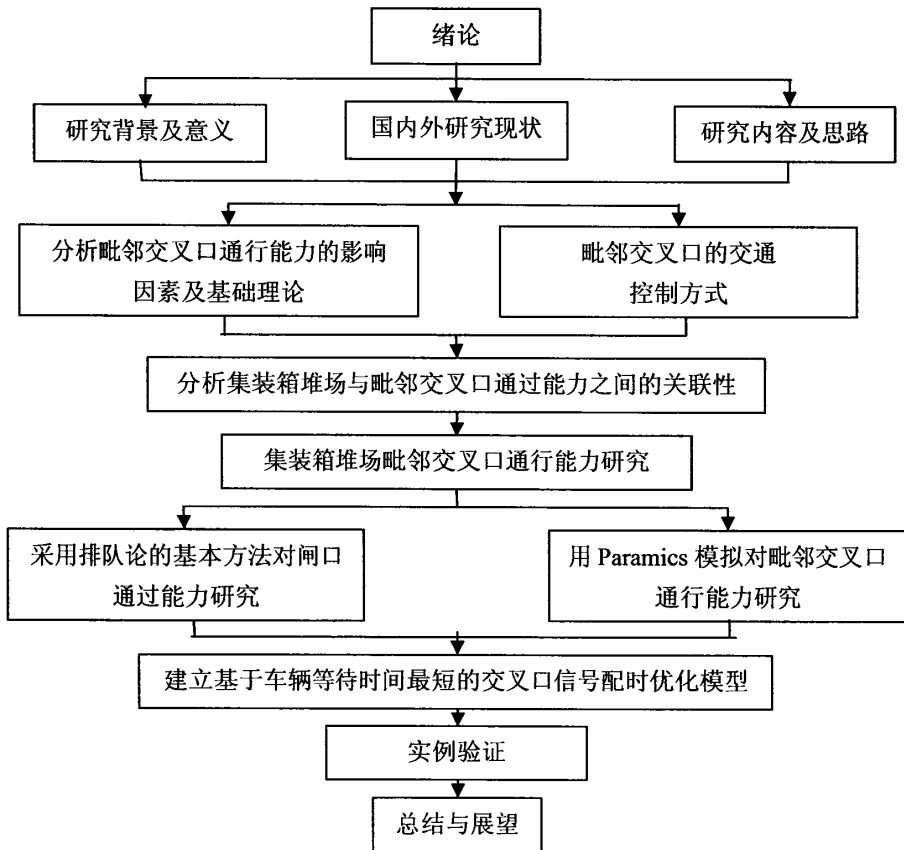


图 1.1 结构框架图

Fig.1.1 The figure of structure framework

## 第2章 集装箱堆场毗邻交叉口通行能力分析的基础理论

### 2.1 集装箱堆场毗邻交叉口概述

城市道路中的交叉口的类型很多,有平面交叉口和立体交叉口。其中平面交叉口有十字形、T形、Y形、X形、错位交叉、多路交叉口和畸形交叉等;立体交叉口有多种类型,不同的划分方式将得到不同的分类,从相交道路的条数可以分为三条路立交、四条路立交和多条路立交<sup>[22,23]</sup>。但是港口的交叉口比较简单,一般都是平面形的,形状也相对比较简单。而本文中研究的集装箱堆场毗邻交叉口是一个简单的十字交叉口。

集装箱堆场毗邻交叉口是指临近集装箱堆场的一个十字交叉口,这个交叉口是集装箱堆场进出车辆的必经之地,由于整个港口的作业比较繁忙,所以通过这个交叉口的各个方向的车辆都比较多,为了使作业车辆都能顺利安全的通过交叉口,需要对这些交叉口采取一定的信号控制方案。通过对集装箱堆场的了解和相关文献的阅读,发现毗邻交叉口的交通控制对堆场的通过能力和运营效率都有一定的影响,直接影响到堆场闸口前的车流量。

### 2.2 毗邻交叉口通行能力定义

在美国道路通行能力手册 HCM2000 中,对于通行能力的定义:在某一特定时期内,在给定的道路几何条件、交通条件、环境条件以及控制条件下,通过道路上某一点或某一截面的车辆和行人的最大流率<sup>[24]</sup>。但是对于城市信号交叉口来讲,其通行能力主要与道路和交通的基础设施、信号配时,以及交通流特性有关。与道路通行能力不同的是,信号灯控制的交叉口的通行能力受信号灯控制的影响。交通信号控制的本质是将同一时间通过同一点可能发生冲突的交通流分离,交叉口的信号配时的方式会使交叉口的通行能力产生显著影响。因此正确合理的信号配时对于交叉口通行能力至关重要。

通过上述的分析可以将城市道路交叉口的通行能力定义为<sup>[25]</sup>:交叉口的各个进口道在单位时间内可以通过的车辆数之和。因此毗邻交叉口通行能力可以定义为在单位时间内该交叉口允许通过的最大车流量。



## 2.3 毗邻交叉口通行能力影响因素分析

影响毗邻交叉口通行能力的因素有很多，道路的交叉口是各种车流的汇集、分散、相互交织的地方，交叉口的交通流具有交叉、分流、合流三种基本构成，这三种构成的车流是影响交叉口通行能力的原因所在，基于这三种车流构成的存在，交叉口的车道条件、交通条件、周边交通环境以及其他因素都会影响通行能力。车道条件是指交叉口的基础设施建设；交通条件是指交通流的组成、交通渠化、信号控制等。下面我们从以下几个小方面具体的分析一下。

### 2.3.1 毗邻交叉口的基础设施建设

毗邻交叉口的基础设施建设包括相交道路条数、车道数量、车道宽度、设计行车速度以及路面的基本状况。

(1) 相交道路条数：平面交叉路口，原则上不能五条以上道路相交叉，交叉口交通流的交叉、分流、合流所引起的冲突点的数量，随相交道路条数的增加而急剧增加。例如三条道路相交时（丁字路口），交叉点 3 个，合流点、分流点各 3 个，冲突点总数为 9 个；四条道路交汇时（十字形路口），交叉点 16 个，合流、分流点各为 8 个，冲突点总数为 32 个；五条道路交汇时，交叉点为 50 个，合流、分流点各为 15 个，冲突点总数为 80 个。平面交叉口通行能力比路段降低：三路相交时约减少 30%，四路相交时约减少 50%，五路相交时约减少 70%<sup>[26]</sup>。

(2) 车道数量、车道宽度、路肩宽度：由于车辆通过交叉口的速度低于路段上的车速，交叉口的车道数不应少于路段上的车道数。有研究资料表明，当一条车道变为两条车道时，通行能力提高 80%，两条变三条时提高 24%，三条变四条时提高 14%，四条变五条时提高 8%，再增加导向车道条数，通行能力提高得不明显。

#### (3) 车道路面状况

路面平坦没有坑洼的情况下，车辆的通行必然顺畅，反之，路面高低不平的，司机为了安全，必然会降低车速通过，从而影响了交叉口的通行能力。

### 2.3.2 交通条件

毗邻交叉口的交通条件是影响交叉口通行能力的主要因素，包括交通组成、交通渠化、信号控制等<sup>[27,28]</sup>。

(1) 交通组成：通过交叉口的车型不同，占用道路空间不同；车辆的机械性能不同，其起动、制动、转向、加减速的性能也不同。在港口集装箱堆场前大部分都是集卡、大中型货车等大型车辆，因此，在车速、起动、转向等方面相对比较慢，这也是港口交通与城市交通的不同之处，所以交叉口的交通组成影响交叉口的通行能力。

(2) 交通渠化：从空间上将不同类别的交通流进行分离，是控制平面交叉口的一个重要手段。即对于同一个平面上行驶的各个方向的车流和人流，采取路面标线、交通标志、交通岛、绿化带和扩大交叉口等多种措施予以分离，使各种不同种类、不同方向以及不同速度的车辆各行其道，互不干扰，顺序行驶。据有关研究成果表明：平交交叉口经过交通渠化后，一般可提高通行能力 20%-30%，堵车长度可减少 10%-20%。

(3) 信号控制：从时间上将不同流向的交通流加以分离，即将交叉口的时间资源按各流向交通量的大小成比例地分配给各流向。信号控制的关键在于确定最佳周期长度，信号周期过短，信号周期内的绿灯时间就相应减少，而变为绿灯后第一辆车启动并通过停止线的时间是固定不变的，周期损失时间所占比例增加，通行能力下降。理论上信号周期越长，周期损失时间所占比例就越小，交叉口的通行能力就越大，但信号周期过长，通行能力提高不明显，容易产生停车线处饱和流率的波动，因此交叉口周期时长的增大并不一定有利于提高交叉口通行的效率，为提高交叉口的通行能力，需要设计合理交通控制方案。

### 2.3.3 交通流的构成<sup>[29-31]</sup>

(1) 交叉构成：两个不同方向的交通流相互交叉后又分成两个不同方向。如直行车辆与横向车辆交叉，直行车辆与左转车辆交叉，左转车辆与左转车辆交叉。

(2) 分流构成：交通流左转或右转时，离开原来交通流向，形成转向交通流，这种转向交通流与原方向的交通流分离。

(3) 合流构成：交通流左转或右转后，驶入另一交通流向，合并在一另一流向的交通流内，这种转向的交通与另一交通流合并。

上述三种交通流构成,在道路交叉口就出现交通流冲突问题,冲突点越多,交通流之间的干扰就越大,当冲突达到一定程度,必然会引起交通流速度降低,产生道路交通拥堵,因此,影响了交叉口的通行能力。

#### 2.3.4 周边交通环境及其他因素

周边交通环境包括相邻路口间距、相邻路口的交通控制方式、相邻路口的交通条件和道路条件、相邻路口的路阻等。交叉口的通行能力,不但取决于该路口的道路条件和交通条件,很大程度上受到相邻路口条件的制约。

其他因素包括交通管理方式、交通参与者的交通意识和法律意识、天气状况等,就堆场毗邻交叉口来讲,司机不遵守交通规则,争道抢行、互不相让等交通行为会影响平面交叉口正常的交通秩序,使交叉口的通行能力大大降低<sup>[32]</sup>。

### 2.4 毗邻交叉口交通控制的主要形式

港口的交叉口的交通流量较城市交叉口的交通流量有很大的区别,最为明显的特点是车种单一,主要以大货和集卡为主,车速较慢,交通流量不稳定,变化比较大。港口的交叉口的车流量没有一定的规律性,安全视距比较大,行驶速度固定在一个较小的波动范围内,一般将车速限制在 20-35km/h 范围内。虽然它与城市交叉口有很大的不同,但是城市交叉口的交通控制方式一样适用于港口的交叉口,主要有以下几种控制形式<sup>[33]</sup>。

#### (1) 固定配时方案控制

固定配时方案控制又分为两种,即单点定周期控制和多时段定周期控制。单点定周期控制中,配时方案的确定主要是根据历史的交通数据来确定,确定的内容主要包括信号的周期长度、相位的次序、各相位的绿灯时长以及相位之间的转换时间。在固定配时方案中,这些确定的参数都是固定不变的;而多时段定周期的控制方式,是根据一天的交通流状况,将其划分成几个时段,对应的每个时段都有一个控制方案,分别在不同的时段直行不同的控制方式,但是在同一时段内的控制参数是保持不变的。

#### (2) 感应式信号控制

感应式信号的控制系统分为两中,一个是半感应式信号控制,一种是全感应式信号控制,具体介绍如下:

### ① 半感应式信号控制

半感应式信号控制主要用在主次干道相交的交叉口，而这种控制的主要特征是主干道上总是保持绿灯。在次干道上埋有检测器，当检测到有车辆到达时，经过适当信号变换间隔，信号控制发生变化，让次干道的红灯变为绿灯。该绿灯有一个最大时间的限制，即不超过交叉口规定的最大绿灯时间，当次干道的车辆通过完毕，结束绿灯时间。该种控制方式需要根据实际的需要随时的调整周期的长度和绿灯时长，主干道在次干道没有车辆的情况下，是保持常绿的，也就是说，次干道的绿灯时间是充分的利用，多余的全部分配给主干道。

### ② 全感应式信号控制

在全感应工作方式下，所有的相位配时都是由检测器检测的车流量来控制。通常，事先确定好相位顺序和每个相位的最大绿灯时长和最小绿灯时长。在这种控制方式下，根据实际的交通流状况进行实时的配时，所以信号的周期长度和每个相位的绿灯时长变化比较大。全感应式信号控制的另一大优点是可选相位的设置，在此相位中，如果没有检测到车辆的到达，那么就可以跳过该相位，继续运行其它的相位。

### （3）自适应控制

自适应交通信号控制是一种比较先进的交通信号控制理论，此理论通过对交叉口的交通流的到达以及排队延误规律的研究，将交通延误和停车次数综合为一个性能指标，不但考虑了交通延误，而且考虑了停车次数，实现对车辆延误和停车次数的同时优化，从而保证了以车队形式到达的交通流可以不间断地通过交叉路口。

## 2.5 集装箱堆场与毗邻交叉口通行能力关联性分析

在港口中，集装箱堆场毗邻交叉口的作用是不容忽视的，它与集装箱堆场之间存在着一定的联系，毗邻交叉口的通行能力的大小影响着集装箱堆场系统的通过能力，换句话说毗邻交叉口是集装箱堆场系统通过能力的瓶颈。

### 2.5.1 集装箱堆场与毗邻交叉口的关系

在道路交通系统中，衡量一个交叉口的通行能力和运行效率的指标主要有：通行能力、延误时间、饱和度、排队长度等等，而延误时间是作为评价交叉口的运营效率和服

务水平的重要指标。集装箱堆场毗邻交叉口是集装箱运输车辆的所经之地，当港口作业繁忙之时，会有大量的车辆涌入交叉口，为了保证车辆的运行效率和安全，一般在这些交叉口都设置了交通信号灯进行交通控制，这样就会产生车辆的延误时间。不同的控制方式，不同的车流量都会产生不同的延误时间，当然，车辆的延误时间越短越好，所以需要针对车流量的特性，设计一个合理的交通控制方式，使车辆的延误时间最短。

毗邻交叉口通行能力是指在单位时间内该交叉口允许通过的最大车流量。交叉口的通行能力的大小影响着集装箱堆场系统整体的通过能力，其影响具体分析如下：

#### （1）从时间的角度

交叉口通行能力的大小影响了集装箱堆场进出车辆的行程时间，可以这样说，交叉口的交通控制直接决定着车辆通过该交叉口所花费的时间，这个时间包括车辆在交叉口行驶通过的时间和车辆在交叉口等待的延误时间。除此之外，交叉口的通行能力还间接的影响着车辆通过集装箱堆场闸口的时间，如果交叉口的车辆通行能力比较小，那么单位时间到达集装箱堆场闸口前的车辆比较少，相比较多的车辆到达闸口的情况，车辆在集装箱堆场闸口前排队等待服务的时间下降；如果交叉口的通行能力比较大，那么单位时间到达集装箱堆场闸口的车辆较多，车辆在集装箱堆场闸口前等待接受服务的时间就比较长。

#### （2）从运营效率的角度

对于整个集装箱堆场来说，毗邻交叉口的通行能力影响着集装箱堆场的疏港能力和装卸作业效率，如果毗邻交叉口的通行能力比较大，这样可以减少车辆和集装箱的在港停留时间，自然也提高了车辆和集装箱的周转率，从而可以提高集装箱堆场的运营效率。集装箱堆场毗邻交叉口的通行能力也可以说是影响集装箱堆场通过能力的瓶颈，这就像是开关一样控制着车辆的通过速度，作为一个系统，任何一个节点的通过能力都影响着整个集装箱堆场系统的通过能力。

### 2.5.2 集装箱堆场闸口与毗邻交叉口的关系

分析集装箱堆场闸口与毗邻交叉口的关系时，我们需要了解集装箱堆场系统的简单作业流程<sup>[34-38]</sup>，具体介绍如下：

(1) 进出提箱业务流程: 货主首先要报提箱计划, 把提单结费作为依据, 然后将相关的小票交给检查桥, 检查桥为货主打出一个箱位小票, 并向场桥发出一个进场的提箱指令, 货主拿着手中的小票到现场提箱, 场桥根据指令为货主提箱, 结束后回复提箱确认指令, 货主再次经过检查桥, 检查桥根据提单核对箱号并进行放行。

(2) 出口集港业务流程: 货主将装箱单交予检查桥, 检查桥核对准确无误后, 开始发放指令, 场桥根据指令进行操作, 并向检查桥回复指令, 最后确认放车出场。

(3) 拖车进出港: 为货主托运货物的拖车进入堆场时, 司机需要在 CMS 房领取记录有集装箱摆放位置信息的便条纸, 到指定的位置提取符合要求的集装箱, 在出闸口的位置进行接受检验、交费, 最后放行出闸。相反, 如果载有集装箱的拖车进入集装箱堆场, 也需要在 CMS 房领取可以摆放集装箱位置信息的便条, 按照相关的信息进行操作完毕后, 将便条信息交给出闸操作间, 领回相应的交接单, 放行出闸。

简单的总结一下集装箱堆场系统的作业流程: 首先运输集装箱的运输工具在得到运输指令后, 陆续的来到集装箱堆场的进口道处, 在进闸时闸口的工作人员需要对信息进行录入并核对正确与否, 然后放行; 进入堆场后由装卸工具对其进行装卸操作; 装卸完毕后再进入出口道, 等待出闸, 在出闸的过程中, 一样需要接受工作人员的服务, 服务完毕后, 放行<sup>[39-44]</sup>。

根据以上分析的集装箱堆场系统的简单的作业流程可以看出, 到达闸口前的车流量的大小影响着闸口前车辆的排队长度和等待时间, 也影响闸口的通过能力, 而到达闸口前的车流量受毗邻交叉口交通控制的影响, 所以为了使整体达到最优的效果, 本文将闸口的通过能力和毗邻交叉口的通行能力结合在一起进行研究, 并建立使车辆在闸口和交叉口的等待时间之和最短的毗邻交叉口配时优化模型。

### 第3章 集装箱堆场毗邻交叉口通行能力分析

集装箱堆场是一个很复杂的系统,涉及很多的方面,对于其通过能力的研究是对其生产运作情况的一个反映,也是分析和改善集装箱堆场的基础。本章通过对集装箱堆场作业流程的分析,研究毗邻交叉口的交通控制对集装箱堆场通过能力的影响,确定集卡或拖车运输过程的等待时间作为通过能力的评价指标。

集装箱堆场是一个典型的排队系统，其顾客是外部要进入堆场的运输车辆，服务台是闸口系统，服务则是对其进行检验、核对信息、收费以及相关的处理等。

### 3.1 排队论的原理概述

### 3.1.1 排队系统的基本构成

各类服务系统，尽管内容和形式不同，但是其排队系统基本都是由顾客到达、队列排队和服务员服务三部分构成（或者称为输入过程、排队规则和服务规则）<sup>[45]</sup>。典型的排队系统如图 3.1 所示。

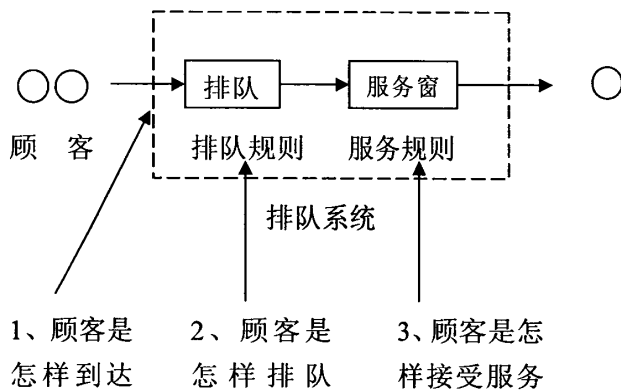


图 3.1 典型排队系统模型

**Fig.3.1 Typical model of the queuing system**

### (1) 输入过程

输入过程（或称为顾客到达）是指各类不同的“顾客”按什么规律进入系统，可以一个一个到达，也可以成批到达。但是他们都是按照一定的规律到达系统，等待服务。到达过程和到达时间间隔符合一定的分布，通常假定到达过程和到达时间间隔为相互独

立的且遵从同一分布的随机变量。输入过程可以分为定长输入、Poisson 输入、几何输入、爱尔朗输入、负二项输入与一般输入等。

### (2) 排队与服务规则

顾客进入排队系统后的排队规则通常有损失制、等待制和混合制三种。

① 损失制（无排队队列）：顾客到达时，所有服务台均被占用，则顾客离去，永不再来。例如电话系统就属于损失制，当一次呼叫不通，则作废。这次呼叫永远的消失。

② 排队制（等待制）当顾客到达时，所有的服务台均被占用，他们就排队等到服务，其服务方式主要有以下几种。

单服务台：先到先服务、后到先服务、随机服务、优先权服务。

多台服务：常见的是在每个服务台前排成一队或排成公共一队。当服务台有空时，按顺序进行服务。

### ③ 混合制

排队长度有限：当顾客到达时，当顾客到达时，若队长已等于规定长度时，顾客离去；若小于规定长度时，则排队。系统不存在超过队长的状态。如医院专家号挂号已满，就不再排队了。

等待时间有限：顾客在队中排队超过某个时间间隔时，则离去。如医院的血浆、生物制剂等

逗留时间有限，顾客在系统中的逗留时间不得超过确定的时间，如药品的有效期。

### ④ 服务机构

服务机构通常包括：服务员的个数、服务机构的结构形式（如串联、并联、混联或网络等结构形式）、服务过程等。

## 3.1.2 排队系统的分类与符号

由于各类排队现象所处环境及研究的问题不相同，其结构、排队与服务规则有很大差异，因此人们也不可能将其抽象成一个统一的模式来加以研究，只好根据各种排队现象的特征，将其分门别类后加以研究，排队系统通常由以下七个特征来决定<sup>[46-49]</sup>：

(1) 顾客的输入过程

(2) 对顾客的服务过程



- (3) 服务员的个数
- (4) 系统容量（系统内所能允许进入的最大顾客数）
- (5) 顾客源的个数
- (6) 服务规则
- (7) 服务机构的结构形式

根据这些特征来划分排队模型。目前通用的是 1953 年英国数学家肯达尔提出的“肯达尔模型”，我们称之为经典排队模型，该模型为 A/B/C/D/E/F。

- A: 顾客到达时间间隔的分布
- B: 服务窗服务时间的分布
- C: 服务窗的个数
- D: 系统中允许的最大顾客数，默认无穷
- E: 顾客源中的顾客数，默认为无穷
- F: 服务规则

### 3.1.3 排队系统分析的特性指标

对于排队系统，需要了解它的运行状况、运行效率，研究它的服务质量，以便进行调整和控制，使它处于最佳状态。因此需要建立排队系统的性能指标体系<sup>[50]</sup>。

排队系统是随机服务系统。在一个排队系统运行的初期，系统的各种性能指标都与时间  $t$  有关，这些瞬态的性能指标很难求解，即使求出来也很难在实际中应用。因此，排队系统中通常采用稳态时的性能指标。所谓稳态，就是  $t$  趋近于无穷时时极限概率分布存在，且与初始条件无关。稳态时，可以认为系统状态的概率分布不再随时间  $t$  变化。实际上，一般的排队系统都能比较快的趋于稳态，并不需要等到  $t$  趋于无穷时。而稳态时的指标，通常是指一些重要的瞬态指标在稳态时的概率分布或期望值等。下面简单的介绍四个基本的性能指标：

- (1) 平均逗留队长  $L$ : 系统中正在接受服务与排队等待服务的顾客总数的期望值。
- (2) 平均等待队长  $L_q$ : 系统中排队等待服务的顾客数的期望值。
- (3) 平均逗留时间  $W$ : 顾客在系统中排队等待服务的时间与接受服务的时间之和的期望值。

(4) 平均等待时间  $W_q$ : 顾客在系统中的排队等待服务的时间的期望值。

3.1.4 采用排队论分析问题的基本步骤

根据上述排队论的基本原理，我们可以得知采用排队论分析问题时，主要是分析三个问题：输入规则、排队规则、服务机构等，因此在研究一个实际的问题时，我们不可能事先知道这些规则，所以需要我们首先对这些问题做出判断，基本步骤如下：

(1) 收集大量的到达顾客的信息，即每隔固定时间段到达的顾客数量，应用软件对所采集的数据进行分析验证，得到顾客到达所服从的分布形式；

(2) 收集大量对顾客服务时间的信息，即每服务完一个顾客所需要的时间，应用一定的软件对数据进行分析，得出服务的分布形式；

(3) 确定排队的规则；

(4) 确定服务台的数量。

以上是采用排队论分析研究实际问题的基本步骤，下面我们将对实际问题进行研究。

3.2 基于某港口的堆场毗邻交叉口通行能力分析

3.2.1 集装箱堆场的排队网络

集装箱堆场是一个典型的多级排队系统网络，如图 3.2 所示

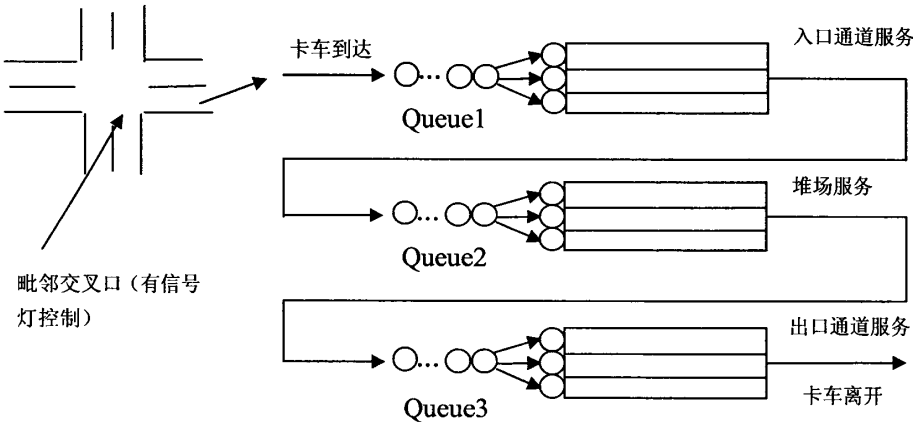


图 3.2 集装箱堆场的排队网络

Fig.3.2 Container yard queue network

从上图可以看出,当顾客(拖车或集卡)到达堆场的入口通道(服务台),如果有通道处于空闲时,则接受服务,否则按照一定的规矩进入排队等待;当服务完毕的顾客,就会进入集装箱堆场,如果堆场的装卸机械处于空闲状态,则进行装卸服务,否则就继续排队等待;在接受装卸完毕后,行进至出口通道时,如果通道处于空闲状态,则接受服务,否则进入排队等待队列中,服务完毕后,离开闸口。在车辆进入排队系统之前,会经过很多的交叉口,选择其中最邻近的交叉口进行分析,该交叉口的交通控制的方式直接影响着到达入口通道的车辆的数量。换句话说,这个毗邻交叉口的交通控制方式就像是闸门,决定着车辆进入排队系统的方式和数量,也就影响了在入口通道处的排队情况,进而影响着集装箱堆场的通过能力。

### 3.2.2 毗邻交叉口的通行能力分析

港口尤其是集装箱港区主要是进行货物的中转运输的场所,行人和非机动车非常的少,以各种的货车、集卡和运营操作设备为主,集卡主要是运输集装箱的车辆,分为内集卡和外集卡两种;货车主要是运送各种散杂货的车辆,分为大型货车和中型货车,大型货车载重 7-15 吨,长约 10 米,中型货车载重 3-6 吨,长约 7 米;除此之外,还有极少一部分的小型客车,主要是私家车和办公车辆。车辆的类型及港口的特点限制了港口车辆的车速,大部分的车辆的速度限制在 25-30km/h,要求车辆的安全视距比较大。以某个港口的交叉口为例,收集其比较繁忙时刻的交通流量,并采用 paramics 交通模拟软件进行模拟,记录每分钟从交叉口输出进入堆场入口通道的车流量。

#### (1) 该交叉口的基本信息

该交叉口是一个十字交叉口,其临近集装箱堆场,是堆场进出车辆的必经之地。此十字交叉口是双向六车道,每车道的宽度为 3.75 米,支持车辆的直行、左转和右转,其中大部分车辆是进入集装箱堆场的。

#### (2) 交叉口的配时信息

该交叉口的现有控制方案是采用常见的两相位固定配时方案,周期是 75s。如图 3.2 所示的交叉口,第一相位是放行东西的直行和左转车辆,时间为 40s;第二相位是放行南北直行的左转车辆,时间为 30s;右转车辆不受信号灯的控制,其中两相位之间黄灯闪烁为 3s,全红为 2s。配时方案如图 3.3 所示。

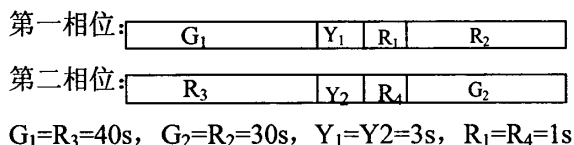


图 3.3 相位图

Fig3.3 Phase Diagram

### (3) paramics 模拟仿真

Paramics 是一个多模块多功能的交通模拟仿真软件,能够对路网进行可视化的仿真,并对在线的数据进行统计分析,可以实现交叉口的各种形式的控制方式的比较分析。能够从其他的相关软件读取有关的节点和路段的信息。本节应用该软件主要是分析在现有配时方案下的交叉口车辆的延误情况和东道口(见图 3.1)的输出流量。仿真模型建立的基本步骤如下:

- ① 在 modeller 模块中建立一个十字交叉口,设置其驾驶习惯、仿真时间以及相关的基本参数。本节的仿真设定的仿真时间为 2 小时,右侧通行。
- ② 设置道路为双向六车道和每个车道的宽度,根据实际情况来设置行驶车辆的速度和出口车道的限行车辆。
- ③ 设定模型中的车型及比例。
- ④ 根据收集的车流量数据编辑模型中的 O-D 矩阵。
- ⑤ 设定交叉口的配时方案,并运行。
- ⑥ 运行仿真结束后,将所得到的仿真数据加载到 Analyser 模块中,利用 Analyser 软件得到交叉口进口路段的平均延误时间、排队长度、通行能力和东道口的输出交通流量,如表 3.1 和表 3.2,设置每分钟记录通过的车流量。

表 3.1 Analyser 输出的参数指标

Table3.1 The indicators of Analyser output

交叉口名称	西进口	南进口	北进口	东进口	平均值
平均延误时间 (s)	29.5	21.6	57.4	33.7	35.55
平均排队长度 (veh)	6.22	7.32	21.67	7.26	10.62
通行能力 (veh/h)	413	524	461	533	482.75

表 3.2 东向出口路段的交通流量 (vehicle)  
Table3.2 The traffic flow of east road (vehicle)

3	11	18	12	10	17	8	20	9	17	5	16
5	12	7	15	13	13	12	19	8	8	12	13
3	14	12	10	10	7	9	7	17	7	13	8
11	11	14	15	10	9	9	12	15	14	11	10
3	8	12	21	13	15	5	14	9	11	8	13
12	12	10	11	9	13	10	11	10	14	13	11
9	11	10	16	11	12	10	12	8	8	9	14
12	9	7	12	22	8	9	4	8	13	18	11
9	8	4	12	9	11	11	15	12	16	8	12
11	17	13	8	9	11	13	15	11	10	8	12

3. 2. 3 集装箱堆场闸口排队系统随机事件的分布规律分析

集装箱堆场系统就是一个复杂的动态排队系统，受许多随机因素的的影响。假设上述东向出道口路段的车辆全部进入集装箱堆场，对这些数据进行统计分析，作为排队论模型中的随机变量原始模型，下面对建模中涉及的随机变量进行分析。

(1) 车辆到达入口通道的时间分布规律分析

车辆的到达规律，即到达时间间隔服从什么分布，是排队论模型中的一个重要的参数。各运输公司之间是相互独立的，因此，虽然车辆受信号灯的控制，但是到达入口通道的车辆依然是随机的，将上述模拟记录的数据交通流量进行数理统计处理。

从上述表 3.2 的样本数据大致可以看出，车辆的到达流基本符合泊松分布的特征。利用 spss 软件中的非参数检验的单样本 K-S 检验(One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test)对记录的数据进行拟合分析，检验结果如表 3.3 所示。

表 3.3 单样本 K-S 检验结果  
Table3.3 K - S single sample inspection result

单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验		
		车流量
N		120
Poisson 参数 <sup>a,b</sup>	均值	11.1417

最极端差别		绝对值	.032
		正	.032
		负	-.026
		Kolmogorov-Smirnov Z	.353
		渐近显著性(双侧)	1.000
		显著性	.947
Monte Carlo 显著性（双侧）	99% 置信区间	下限	.941
		上限	.953

a. 检验分布为 Poisson 分布。

b. 根据数据计算得到。

从上述单样本 K-S 检验的结果中可以看出，显著性概率为 0.947，在显著水平为  $\alpha=0.01$  的条件下，由于  $0.947>0.01$  则认为支持原假设，即认为检验的样本与理论的样本不存在显著差异，因此认为车辆到达闸口是服从泊松分布的，得到平均到达率  $\lambda=11.14$ ，即  $\lambda=11.14$ 。

根据指数分布与泊松分布的关系定理：如果随机变量 X 服从参数为  $\lambda$  的泊松分布，则事件两次发生的时间间隔 Y 服从参数为  $\lambda$  的指数分布<sup>[51]</sup>。基于上述这个定理，可以判定车辆到达闸口的时间间隔服从指数分布。

（2）车辆在闸口处接受服务的时间分布规律分析

闸口处的服务时间也是排队系统中的重要参数，服务效率的高低直接影响着排队的长度以及排队系统的其他各项性能指标。以某港口的车辆在闸口处接受服务的时间为例，分析服务时间的分布规律，统计的数据如表 3.4 所示。

表 3.4 车辆在入口通道接受服务的时间统计数据（min）

Table3.4 The statistics time of the vehicle in the entryway to accept service

2.3	1.2	1.7	2.0	1.6	1.7	2.0	1.1
1.8	1.6	2.1	1.1	2.2	2.6	1.6	1.6
2.6	2.6	1.7	1.6	2.3	1.2	1.6	2.7
1.6	2.7	1.4	2.3	2.0	2.6	2.1	2.9
1.6	2.9	1.5	1.9	1.9	1.8	2.2	1.0
1.8	2.9	1.6	1.7	1.1	1.5	1.9	2.7
2.4	1.3	2.2	2.0	2.0	1.0	1.8	1.3

1.2	1.4	2.1	1.1	1.2	2.2	1.8	1.7
1.8	1.4	1.4	2.9	2.7	1.5	2.0	1.2
2.0	2.0	1.7	1.2	1.0	1.0	1.7	2.5
1.5	1.1	1.2	2.9	1.1	1.1	1.0	

将采集的样本数据用spss软件中的非参数单样本K-S检验功能进行拟合分析,检验结果如下表3.5所示。

表3.5单样本K-S检验结果  
Table3.5 K - S single sample inspection result  
单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验

		服务时间
N		87
正态参数 <sup>a,b</sup>	均值	1.8011
	标准差	.54762
最极端差别	绝对值	.091
	正	.091
	负	-.077
Kolmogorov-Smirnov Z		.844
渐近显著性(双侧)		.474

a. 检验分布为正态分布。

b. 根据数据计算得到。

从检验的结果可以看出，闸口的服务时间的显著性概率为0.474，在显著性水平 $\alpha=0.01$ 时，由于 $0.474>0.01$ ，所以支持原假设，即入口道闸口的服务时间服从正态分布，相应的参数 $1/\mu=1.8$ ，方差 $\delta=0.5476$ 。

3. 2. 4 建立集装箱堆场闸口排队模型

建立模型的过程就是对实际的集装箱堆场入口通道的分析、假设、归纳的过程，做一些合理的假设把实际的因素合理化，因此建模之前我们需要做如下的假设：

（1）到达入口通道的车辆是随机的，顾客源可以看作是有限的，而且系统在运行一段时间之后会达到稳态。本文中研究的车辆可看作是单个的、随机的到来，到达的时间间隔服从指数分布。

(2) 当车辆到达时, 如果有空闲通道, 则进行服务; 如果都是满的, 则需要等待, 进入排队系统, 而且每个到达的车辆都会选择队伍最短的一列, 进行排队, 所以入口通道的服务也是先到先服务的等待服务系统。

(3) 假定每个服务通道的服务能力是相同的, 每次只能为一辆车进行服务。通道服务时间与车辆的到达时间间隔是相互独立的。

(4) 输入过程和服务的过程是相互独立的。

综上所述, 建立一个多服务台的排队模型, 即  $M/G/24/\infty/\infty/FCFS$ 。具体含义如下:

(1) 输入过程是强度为 $\lambda$ 的泊松流。

(2) 每个顾客的服务时间是相互独立的, 且服从参数 $\mu$ 的正态分布。

(3) 该系统有24个服务台, 服从先来先服务的规则。

(4) 系统容量为 $\infty$ , 为等待制系统。

(5) 顾客源数为 $\infty$ 。

### 3.3 排队论的计算方法及计算结果

排队论中的经典的排队模型  $M/G/1$ , 在相关书籍中都有详细的计算和处理方法, 根据波莱克泽克-辛钦的平均值公式可得:

(1) 系统平均队长

$$L = \frac{\lambda^2 \delta^2 + \rho^2}{2(1-\rho)} + \rho \quad (3.1)$$

(2) 系统平均等待队长

$$L_q = L - \rho \quad (3.2)$$

(3) 系统的平均等待时间

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (3.3)$$

(4) 系统的平均逗留时间

$$W = \frac{L}{\lambda} \quad (3.4)$$

其中 $\rho = \frac{\lambda}{s\mu}$ , 当 $\rho < 1$ 时, 系统将处于平稳状态, 当系统有  $s(s > 1)$  时, 假设 $\rho = \frac{\lambda}{s\mu} < 1$ , 系统处于平稳状态, 当 $\rho$ 趋近于 1 时,  $s$  个服务台出现空闲的机会将非常小,  $s$  个服务台



一直处于繁忙的工作中，从而可以将 M/G/S 排队模型近似的看作 M/G/1 排队模型进行计算<sup>[52]</sup>，相关参数服务效率为 $s\mu$ 即 $\rho' = \frac{\lambda}{s\mu}$ ，服务时间的分布方差为 $\delta'^2 = \frac{\delta^2}{s^2}$ ，所以用 $\rho'$ 以及 $\delta'$ 代入到上述的公式 3.1-3.4 的公式中，计算该排队论模型，则在原有毗邻交叉口配时方案情况下的计算结果如下表 3.6:

表 3.6 模型的计算结果  
Table3.6 The result of model

排队的衡量指标	原有配时方案情况下的计算结果
系统平均队长（veh）	3.04
系统平均等待队长（veh）	2.21
系统平均等待时间（s）	11.9
系统平均逗留时间（s）	16.38
交叉口的平均延误时间（s）	35.55
车辆的总的等待时间(s)	47.45

从上述表格的计算结果以及相关的计算公式中可以看出，车辆的总的等待时间有两部分组成，一是：车辆在交叉口的延误时间；二是：车辆在闸口处的排队等待时间。为了减少车辆的等待时间，我们可以从降低这两个等待时间的角度来对系统进行优化。

（1）车辆在交叉口的延误时间

车辆在交叉口的延误时间受交叉口的信号控制方案和交叉口的渠化等因素的影响，而交叉口的信号控制方式和配时方案起主要的影响，所以我们可以以交叉口的车辆延误时间最短为目标函数，进行交叉口的信号配时方案的优化，来降低车辆的等待时间，提高交叉口的通行能力。

（2）车辆在闸口处的排队等待时间

在不考虑其他因素，单纯的来考虑这个等待时间，它主要受服务台的数量和服务人员的服务效率的影响，因此通常情况下，都是从平均服务速率和服务台数这两个决策变量进行问题的优化。

基于以上对研究对象的分析，将毗邻交叉口和集装箱堆场的闸口看作一个整体，作为集装箱堆场的组成部分，分析配时方案对其的影响。首先，交叉口信号配时方案直接

影响着交叉口的车辆的延误时间；其次，交叉口的信号配时方案影响着交叉口的通行能力，简单的说就是影响每分钟通过交叉口到达闸口的车辆数，所以其间接的影响着车辆在闸口的等待时间；最后，组成这两部分的时间长短存在着一个矛盾的点，当单纯的考虑交叉口的延误时，可以将车辆在交叉口的延误时间降到最短，在尽可能最短的时间内通过最多的车辆，这样将会使车辆的延误时间降低，但是在当大量的车流通过时，将会造成闸口通道前的车辆的拥堵，导致车辆在闸口前的等待时间增加，反之，改变控制方式，减少通过的车流量，降低车辆在闸口的等待时间，但是会增加车辆在交叉口的延误时间。所以平衡这两个时间点，尽可能的使车辆的总的等待时间最短，是本文的研究重点内容，在下一章节中我们将研究如何得到毗邻交叉口的合理的信号配时方案。

## 第4章 建立集装箱堆场毗邻交叉口配时优化模型

本文研究的是毗邻交叉口交通控制对集装箱堆场通过能力的影响，在明确集装箱堆场与毗邻交叉口通行能力的关联性的基础之上，将堆场闸口与毗邻交叉口结合在一起，以作业车辆的等待时间为衡量标准，基于作业车辆的等待时间最短对毗邻交叉口进行信号配时优化，建立优化模型，并采用遗传算法对模型进行求解以及验证。

### 4.1 毗邻交叉口配时优化问题描述

本文把毗邻交叉口和集装箱堆场看作一个整体，是港口整个作业线的一部分，它的作业效率的高低直接影响着整个港口的运营效率。对于研究集装箱堆场通过能力这个问题，我们将其转化为车辆的等待时间问题，如果等待时间越短，则表明堆场的通过能力越大，等待时间越长，则表明堆场的通过能力越小。集装箱堆场系统可以看成是一个典型的排队系统，所以等待时间的长短与到达闸口的车辆数有关，而到达闸口的车辆数及分布规律，与它毗邻的交叉口的控制方式相关，基于这个关系建立优化模型。

我们将堆场的闸口和毗邻交叉口分别来分析，对于堆场的闸口，当车辆到达时，如果有空闲，则无需等待直接接受服务，这时的等待时间是最短的；如果无空闲，那么则需要进入排队系统进行等待服务，等待时间的长短与车辆的到达率相关。对于毗邻交叉口而言，单独考虑它，很多学者基于交叉口车辆的延误时间最短、车辆的通行能力最大而进行配时方案的研究，但是这里如果只考虑交叉口的车辆的延误时间最短，在车流量不变的情况下，那么每分钟通过交叉口进入闸口等待的车辆就会增加，将会导致车辆在闸口的等待时间增加；如果单纯的考虑闸口的等待时间，那么车辆在交叉口的延误时间就会增加，由此可以看出这是一对矛盾的变量，我们需要找到两个等待时间之和的最低点，来优化交叉口的配时方案。

## 4.2 建立集装箱堆场毗邻交叉口配时优化模型

### 4.2.1 模型中参数介绍

由于该模型的建立涉及毗邻交叉口的车辆的延误信息和闸口入口通道车辆的等待时间,下面我们简要介绍一下这两个时间的计算方法及相关信息。下面的变量中*i*代表相位数,*j*代表车道数。

#### (1) 车辆延误时间计算

对于任意的信号交叉口而言,专家学者们研究了几种计算交叉口车辆延误时间的计算方法,在这里我们采用广泛应用于交通控制领域的 Webster 算法<sup>[53,54]</sup>,其表达式如下:

$$D_{ij} = \frac{C(1-g_i)^2}{2(1-g_i y_{ij})} + \frac{y_{ij}^2}{2q_{ij}(1-y_{ij})} \quad (4.1)$$

其中,  $D_{ij}$ 表示第*i*相位第*j*车道上车辆的平均延误时间(s);

$C$ 表示信号周期的长度(s);

$g_i$ 表示第*i*相位的绿信比;

$y_{ij}$ 表示第*i*相位第*j*进口道上的车流饱和度;

$q_{ij}$ 表示第*i*相位第*j*进口道的车流量(pcu/h)。

#### (2) 闸口入口通道车辆的等待时间

该处车辆的等待时间是采用排队论的相关理论和方法进行介绍,具体的详细的介绍及应用见第四章。由第四章的理论介绍可以得到计算等待时间的基本公式为:

$$T_{\text{等待}} = \frac{\lambda^2 \sigma^2 + \lambda^2}{2 \left(1 - \frac{\lambda}{s\mu}\right) \lambda} = \frac{\mu^2 \sigma^2 + 1}{2s\mu \left(\frac{s\mu}{\lambda} - 1\right)} \quad (4.2)$$

其中,  $\lambda$ 表示单位时间到达的车辆数目;

$S$ 表示闸口的入口通道数;

$\mu$ 表示服务台对每个服务对象的平均服务时间;

$\delta$ 表示车辆接受服务的服务时间的标准差;

从上述各个变量和 $T_{\text{等待}}$ 的计算公式可以看出,  $s$ 、 $\mu$ 、 $\delta$ 这三个参数是与闸口的入口通道数的服务台有关,它的值的大小主要取决于服务的服务质量,如果想要提高服务质

量,减少服务台的服务时间,那么就需要对服务台进行改进,引进一些先进的科学技术,例如:信息管理系统、RFID、EDI 等自动识别设备,这样可以有效的节约人工,又能够有效的提高服务的效率。本文主要研究交叉口的交通控制对这个排队系统的影响,所以这里将受服务台影响的相关变量看作是不变的,固定值,来研究其他变量的变化对于等待时间的影响。

$\lambda$ 表示单位时间内到达的车流量,将其他变量看作固定值的情况下, $\lambda$ 是唯一影响车辆在闸口通道的等待时间的变量,而且 $\lambda$ 也与交叉口的控制方式有关,是联系两个点之间的桥梁,不同的控制方式影响着车辆通过交叉口的通过效率,什么样的控制方式是协调两个等待时间的最小化,是本章研究的重点。所以这里我们需要对交叉口的通过量的计算做简单的介绍。

### (3) 交叉口通行能力计算

通常所说的通行能力,主要包括路口和路段的通行能力,亦称通行量<sup>[55-57]</sup>。交叉口通行能力是指在单位时间内交叉口各个方向所能提供的最大允许通过量,单位为 pcu/h,是在设计交叉口时考虑的关键因素。这里我们想要计算的是单位时间通过交叉口的某一通道的交通流量,因此,可将第  $i$  相位第  $j$  通道的通行能力定义为:

$$Q_{ij} = S_{ij}g_i \quad i, j=1,2,3,\dots \quad (4.3)$$

其中,  $S_{ij}$ 表示为第  $i$  相位第  $j$  通道的饱和流量 (pcu/h)

在上述公式中,  $Q_{ij}$ 表示交叉口允许通过的最大交通流量;若想要计算一段时间内的某一方向上的出口通道的交通流量,先分析该出口通道的交通流量的来源,一般交叉口的某一出口通道的交通流量来源于三个方向:对向的直行车辆、相邻道口的左转与右转车辆,右转车辆不受信号灯的控制,直接按到达的车辆计算或者是按照直行车辆的相应比例计算。根据上述的通行能力计算公式,即某出口通道的单位时间交通流量计算如下:

$$M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{ij}g_i + q_{\text{右}} \quad (4.4)$$

其中,  $M$ 表示某出口通道的交通流量 (pcu/h);

$q_{ij}$ 表示第  $i$  相位第  $j$  车道的单位的实际交通流量 (pcu/h);

$q_{\text{右}}$ 表示与其相邻的车道右转进入该出口通道的车流量 (pcu/h)。

### 4.2.2 模型的建立

以车辆在交叉口的平均延误时间 $T_{\text{延误}}$ 和车辆在闸口入口通道的平均等待时间 $T_{\text{等待}}$ 之和最短为目标,那么该毗邻交叉口的配时优化模型的目标函数如下,其中变量 $X_i$ 表示第 $i$ 相位的绿灯时长, $L$ 表示相位的损失时长。

$$\begin{aligned} \min T &= T_{\text{延误}} + T_{\text{等待}} \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[ \frac{C(1-g_i)^2}{2(1-g_i y_{ij})} + \frac{y_{ij}^2}{2q_{ij}(1-y_{ij})} \right] + \frac{\mu^2 \sigma^2 + 1}{2s\mu \left( \frac{s\mu}{\lambda} - 1 \right)} \end{aligned} \quad (4.5)$$

其中,

$$g_i = \frac{X_i}{C}, \quad C = \sum_{i=1}^n X_i + L \quad (4.6)$$

$$\lambda = \frac{M}{60} = \frac{1}{60} \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{ij} g_i + q_{\text{右}} \right) \quad (4.7)$$

为了使该目标函数更加符合实际的意义,将函数的意义限定在一定的范围内,能够取得一个比较接近于实际的结果值,变量应该满足如下的约束条件。

$$\frac{s\mu}{\lambda} > 1 \quad (4.8)$$

该约束是为了避免车辆在闸口的排队系统的排队无限增长的状态,使得排队系统无法进入稳态,该约束就是为了使目标函数具有意义,也使排队系统处于稳定的状态,利于求出排队等待时间。

$$40 \leq C \leq 180 \quad (4.9)$$

在交通管理与控制中规定信号周期的时长不低于40s,不大于180s,该约束使得求解的结果符合相关的规定。

$$0 < g_i < 1, \quad 0 < y_{ij} < 1, \quad 0 < X_i < X_{\text{imax}} \quad \text{且 } X_i \text{ 为整数} \quad (4.10)$$

该约束限制相关的变量在有意义的范围内。

$$q_{ij} \geq 0, \quad q_{\text{右}} \geq 0, \quad s \geq 1 \quad \text{且为整数} \quad (4.11)$$

本节建立的信号配时优化模型是基于时间最短,以 $X_i$ 为自变量的非线性配时优化模型,绿灯时长的变化,对于车辆在交叉口的延误时间和闸口处的等待时间的影响是相矛盾的,所以一定可以求解到一个最优值使得总的时间最小,因此从等待时间的角度来衡量,该模型求解的值可以作为该交叉口的最优配时方案。

### 4.3 利用遗传算法进行求解

#### 4.3.1 遗传算法原理

##### (1) 遗传算法的介绍

遗传算法是在 20 世纪六七十年代由美国 Michigan 大学的 Holland J.H. 教授及其学生和同事在研究人工自适应系统中发展起来的一种随即搜索方法 (Holland J.H., 1975)。Holland J.H. 在 Fraser A.S. 和 Bremermann H.J. 等人工作的基础上提出了位串编码技术。这种编码技术强调在遗传操作中最主要的是杂交, 但是他不仅适用于杂交操作, 也适用于变异操作。随后, Holland J.H. 等人将该算法加以推广, 并将该算法应用到优化及机器学习等问题, 以及自然和人工系统的自适应行为的研究中, 最后, 将这种算法命名为“遗传算法”。遗传算法之所以能够得到广泛和成功的应用, 得益于他的简单有效的遗传操作, 以及通用的编码技术。Hollstein R.B. 最先尝试将遗传算法应用于函数优化问题, 用实验的方式研究了 5 种不同选择方法和 8 种交换策略<sup>[58]</sup>。

在自然界中, 适用的是适者生存的法则。在演变过程中, 每一个体都面临着为了更好地适应复杂多变的环境而搜索更好适应性的问题。换句话说, 每个个体都不得不改变其染色体组合而更好地生存下去。在遗传算法中, 一个字符串代表着一个决策 (即染色体组合) 对应着问题的一个解。每个字符串的解接近于最优解的优良程度都由适应度函数 (即目标函数) 来评价, 表现优良的个体 (适应值) 比表现差的个体更容易存活。遗传信息是通过字符串的交叉及基因突变来实现信息交换的。结果就是新一代的种群通常具有更好的生存能力。这个过程会一直重复直至字符串在新一代子中是可识别的或终止循环<sup>[59]</sup>。

遗传算法的实现涉及到五个要素: 参数编码、初始群体的设定、适应度函数的设定、遗传操作设计和控制参数的设定。

##### (2) 遗传算法的基本思想

遗传算法的基本思想就是基于达尔文的适者生存、优胜劣汰的基本原理, 按照生物的原理将求解的值表示成种群, 从而构造出一组初始的可行解, 放在一定的环境和约束

条件下,进行交叉、变异、选择、淘汰,进化生成最优的种群,按照这样的规律一代代不断的进化,收敛到最适应环境的一个最优的个体,得到所求解问题的最优解。

### (3) 遗传算法实现的基本步骤

#### ① 初始化群体

选择一个随机产生的解作为初始群体,这个初始的群体就是问题假设解的集合,问题的解将通过这个假设的解经过进化而得出。

#### ② 计算群体上每个个体的适应度值

以适者生存的原则选择下一代的个体,把适应度函数作为选择的标准。适应度准则体现了适者生存、不适者淘汰的自然法则。

#### ③ 按由个体适应度值所决定的某个规则选择将进入的下一代的个体

选择适应度值高的个体进入下一代的繁殖,值越高,下一代繁殖产生的个体也相对较多,适应度值较小的个体,下一代产生的个体数目较少,甚至被淘汰。这样就选择了能够适应环境的优良个体,而对于求解的问题,就是接近最优解的中间解。

#### ④ 按概率 $P_c$ 进行交叉操作

对于用于下一代繁殖的个体,随机选择两个个体相同的位置,按交叉概率,进行位置的变换,产生新的基因组合,即产生新的个体。交叉的方式有很多种。

#### ⑤ 按概率 $P_m$ 进行突变操作

依据生物种基因突变的原理,以一定概率进行基因突变。在变异时,对执行变异的串的对位置求反,即把1变为0,把0变为1。变异概率  $P_m$  与生物变异极小的情况一致,所以,  $P_m$  的取值较小,一般取 0.01-0.2。

#### ⑥ 没有满足某种停止条件,则转步骤②;否则进入步骤⑦。

#### ⑦ 输出种群中适应度值最优的染色体作为问题的满意解或最优解。

### 4.3.2 求解信号配时目标函数的步骤设计

采用遗传算法对交叉口的信号配时参数进行优化,主要是利用遗传算法的高效的全局寻优搜索算法<sup>[60,61]</sup>,具体的操作步骤如下。

#### (1) 染色体编码



由于变量  $X_{ij}$  表示的是交叉口信号配时的绿灯时长，是一个整数，此外为了提高算法的运行速度，这里采用实数的表示方式。以每个相位上的绿灯时长作为决策变量，染色体的基本形式为  $X=[X_1, X_2, X_3, X_4]$ ，其中  $X_i$  表示第  $i$  相位的绿灯时长，范围在  $[X_{\min}, X_{\max}]$ 。由于染色体的编码是采用实数编码，再加上一个路口的周期时长限制在 40 到 180 之间，所以这里将每个基因座设定为 4 位，基因的长度为 12 位。如： $X=[032024020018]$ ，则第 1 到 4 相位的绿灯时长为：32，24，20，18。为了避免产生无效的基因，以基因座为单位进行操作。

## (2) 适应度函数

个体对环境的适应程度叫做适应度<sup>[62]</sup>，为了体现染色体的适应能力，引入了对问题中每个染色体都进行度量的函数，即适应度函数。设  $L$  为目标函数， $L=\min T$ ，则交叉口信号配时优化的选择适应度函数为：

$$f = \begin{cases} m - L & m \geq L \\ 0 & m < L \end{cases} \quad (4.12)$$

其中  $m$  为一个足够大的正整数。

## (3) 遗传算子

进化算子主要包括选择、交叉、变异算子。下面主要对这三类算子进行解析。

### ① 选择

选择又称复制，是在群体中选择生命力强的个体产生新的群体的过程。遗传算子使用选择算子来对群体中的个体进行优胜劣汰操作；根据每个个体的适应度值大小选择，适应度值较高的个体被遗传到下一代群体中的概率较大；适应度较低的个体被遗传到下一代群体中的概率较小。这样就可以使得群体中个体的适应度值不断接近最优解。选择操作建立在对个体的适应度进行评价的基础之上。选择操作的主要目的是为了避免有用遗传信息的丢失，提高全局收敛性和计算效率。对于遗传算法的计算结果起到直接影响作用的是算子确定的好坏。如果算子确定的不当，会产生大量的相似度值相近的个体，很可能由于子代与父代个体相近，而使进化停滞不前，还要有可能由于适应度值偏大，而使群体朝着其他的方向发展，失去遗传的多样性，出现早熟的问题。

在遗传算法中最重要的操作是选择，它不仅仅是使全局的收敛性提高，还避免了有用信息的遗失问题。对于算子的选择，选择的得当与否，关系着优化的结果，选择不当，就会使结果陷入局部最优，或者出现早熟现象，使适应度值偏大的个体引导群体的发展方向。

选择遗传算子<sup>[63]</sup>主要包括轮盘赌选择、随机竞争选择、最佳保留选择、无放回随机选择、确定性选择、最优保存策略选择等。各种选择算子均有其自身的优缺点及适用范围。

本文采用的选择遗传算子是最佳保留选择，首先进行遗传算法的选择操作，采用的是轮盘赌方法，然后从当前的个体中选择出适应度最高的个体，并将该个体结构完整的复制到下一代，产生下一代群体。其主要的目的和优点在于能够得到每一代中的最高适应度的个体，保证在遗传算法终止时的最后结果是最优的。

## ② 交叉

遗传算法中产生新的下一代主要是通过交叉操作来完成的。交叉运算，是指按一定的方式对两个相互配对的染色体互相替换两者的部分基因。交叉算子的设计主要包含两个方面：一是确定在何处交叉；二是部分基因交换怎么操作。

交叉操作<sup>[64]</sup>主要包括单点交叉、两点交叉、均匀交叉、多点交叉、循环交叉等，交叉算子的设计一般与编码一起考虑，主要考虑交叉点的位置和如何交换部分基因。

本文采取的交叉操作是两点交叉，即在个体编码串中随机设置了两个交叉点，然后再进行部分基因交换。其操作流程包含随机设置两个交叉点、交换这两个交叉点的部分染色体两步。

## ③ 变异

遗传算法中的变异运算，就是将个体的编码串中的基因座上的某些基因值换成该基因座上的其他等位基因，最后形成比较新的个体。

变异<sup>[65]</sup>是一种随机运算，在与交叉算子和选择算子相结合之后，不仅仅能够使遗传算法具有有效性，还能够尽可能的避免由于交叉和选择的运算所造成的信息的丢失。变异算子仅仅是产生新个体的一种辅助的方法，而交叉算子则是主要的方法，并且他还是遗传算法的全局搜索能力的决定因素，两者结合能够使得遗传算法在寻求最优化问题过

程中,发挥他良好的搜索性,完成问题的寻优过程。当遗传搜索陷入局部最优解之中时,变异的作用就显得更为突出,因此变异算子设计的成功与否决定着搜索能否达到更好解或者最优解。

变异算子主要包括基因位突变、有效基因突变、自适应有效基因突变、均匀突变、高斯突变等。

在本文中变异采用的是高斯变异,高斯变异是指进行变异操作时用符合均值为  $A$ , 方差为  $A^2$  的正态分布的一个随机数来替换原有的基因值。由于正态分布的特征可知,高斯变异也是终点搜索元个体附近某个局部区域,以某一较小的概率来替换个体编码串中各个基因座上的原有基因数。

## 4. 4 模型实例应用

### 4. 4. 1 基本参数计算

将该建立的模型应用于某港口,以验证其实用性。在进行应用计算之前,需要对基本的参数进行计算,以使得下面的计算顺利的进行。

#### (1) 饱和流量 ( $Q'$ )

计算饱和流量的方法有很多种,每种方法都有自己特点和适用的范围,这些方法主要包括 R-金伯法、韦伯斯特法、R-阿克塞立科法等,在国家标准 GB50647-2011《城市道路交叉口规划规范》中也有相应的规定<sup>[66]</sup>。在以上的方法中,韦伯斯特法考虑的因素众多、复杂,影响因素的确定很不方便;R-金伯法只考虑了车道宽度这一个因素,不太符合实际的情况;对于国标的相关规定,对于港口的这种重车比例较大的交叉口,也并不适用;R-阿克塞立科法步骤明确,比较适用于各种交叉口,也是应用较多的一种方法,所以本小节采用这种方法来确定交叉口的饱和流量。

该交叉口是一个双向六车道的十字路口,如图 4.1 所示:

此交叉口基本上无行人和非机动车,条件一般,属于 R-阿克塞立科法中所说的第 1 类 B 条件类型的路口,即直行  $Q=1750\text{pcu/h}$ ,左转  $Q=1650\text{pcu/h}$ 。车道的宽度为 3.75 米,根据相关规定得车道宽度的修正系数  $f_w=0.83+0.05w=1.0175$ 。没有明显的坡度,即坡度修正系数  $f_g=1$ 。

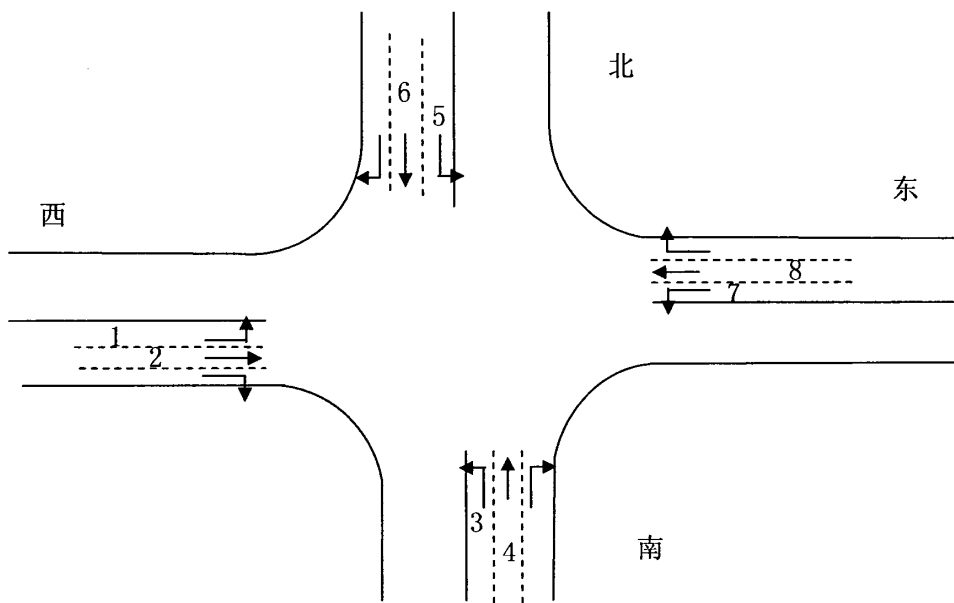


图 4.1 毗邻交叉口

Fig.4.1 Adjacent to the intersection

下面选择交通流量最大的一个小时作为计算车辆构成的修正系数，如下表 4.1：

表 4.1 车辆构成的修正系数

Table4.1 Correction factor in the composition of vehicle

车道编号	车型 $e_i$	集卡 2	大货 1.5	中货 1	小客 0.5	其他 0.8	总计	$f_e$
1	$q_i$	12	0	8	23	5	48	0.99
	$e_i q_i$	24	0	8	11.5	4	47.5	
2	$q_i$	289	37	43	9	23	398	1.76
	$e_i q_i$	578	55.5	43	4.5	18.4	699.4	
3	$q_i$	87	57	33	68	5	250	1.32
	$e_i q_i$	174	85.5	33	34	4	330.5	
4	$q_i$	138	65	23	78	27	331	1.38
	$e_i q_i$	276	97.5	23	39	21.6	457.1	
5	$q_i$	125	46	19	27	8	225	1.59
	$e_i q_i$	250	69	19	13.5	6.4	357.9	

6	$q_i$	122	59	18	83	12	294	1.37
	$e_i q_i$	244	88.5	18	41.5	9.6	401.6	
7	$q_i$	12	9	6	32	24	83	0.95
	$e_i q_i$	24	13.5	6	16	19.2	78.7	
8	$q_i$	289	37	43	9	23	398	1.76
	$e_i q_i$	578	55.5	43	4.5	18.4	699.4	

由下面的公式可以得到各车道饱和流量如表 4.2 所示。

$$Q' = Q \left( \frac{f_w f_g}{f_e} \right) \tag{4.13}$$

表 4.2 各车道的饱和流量  
Table4.2 The saturated traffic lanes

车道名称	1	2	3	4	5	6	7	8
Q	1650	1750	1650	1750	1650	1750	1650	1750
Q'	1696	1012	1272	1290	1056	1300	1769	1012

(2) 流量比 (y)

车道的流量比计算公式为：

$$y = \frac{q}{Q} \tag{4.14}$$

车道的流量比计算结果如下表 4.3 所示。

表 4.3 各车流的流量比率  
Table4.3 The ratio of the flow of traffic

车流名称	1	2	3	4	5	6	7	8
q	48	398	250	331	225	294	83	398
y	0.028	0.393	0.196	0.256	0.213	0.226	0.036	0.393

由上述表可以看出：各相位的流量比依次为：

相位 1：东西直行的流量比：0.393

相位 2：东西左转的流量比：0.036

相位 3：南北直行的流量比：0.256

相位 4：南北左转的流量比：0.213

(3) 损失时间参数

由于该交叉口的车辆多为集卡等大型车辆，车辆的启动花费的时间比较长，出于安全等因素的考虑，假定交叉口的前损失时间与后补偿时间相同，所以相位的损失时间为绿灯间隔时间。将该交叉口设置为四相位配时，每个相位包括 3S 黄灯和 2s 全红，即

$$L=4(3+2)=20s \tag{4.15}$$

4.4.2 模型应用

以上述章节中提到的交叉口的交通流量数据为基础，对该模型进行实际的应用。

采用 matlab 平台中的语言进行简单的遗传算法编写程序，对目标函数进行仿真计算。仿真过程中将相关的参数设置为：种群大小为 40，进化的最大迭代数为 30，简单的交叉率为 0.9，遗传算法的变异率为 0.01，最大的周期设置为 180s，周期的损失时间为 20s，还有目标函数中的  $\mu$  为 0.56，S 为 24，其他相关的参数见表 4.3。用遗传算法进行求解的结果如下表 4.4。

表 4.4 信号配时方案

Table 4.4 Signal timing scheme

相位	东西直行	东西左转	南北直行	南北左转
绿灯时长 (s)	32	18	28	24

在 matlab 下运行程序（见附录），可得到表 4.4 的最优信号配时方案，运行时整个迭代过程中的适应度函数的变化如下图 4.2 所示。

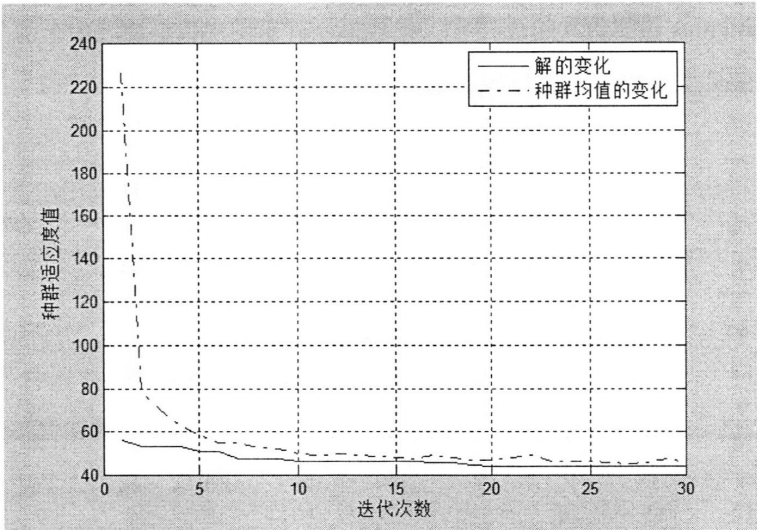


图 4.2 适应度函数的变化值

Fig4.2 changes of fitness functioun

从图中可以看到，收敛的速度较快，随着迭代次数的增加，适应度值较差的个体被替换掉，优秀的个体逐渐出现，不断的接近最优解，最后趋于稳定，得到满意的解。

4. 4. 3 结果验证并分析比较

表 4.4 的信号配时方案是利用通过遗传算法所求得等待时间最短的最优方案，现在我们需要将这个最优的方案进行验证，观察这个优化的结果是否比原有的配时方案更优，从而减少运输车辆的等待时间，从而提高集装箱堆场的通过能力。将这个优化的配时方案按照章节 3.3 和章节 3.4 的基本方法进行验证，首先，用 paramics 进行实际模拟仿真，输出相关的参数指标如表 4.5。

表 4.5 Analyser 输出的参数指标

Table4.5 The indicators of Analyser output

交叉口名称	西进口	南进口	北进口	东进口	平均值
平均延误时间（s）	27.4	26.6	35.6	36.2	31.5
平均排队长度（veh）	7.67	7.33	8.42	13.30	9.18
通行能力(veh/h)	413	524	497	526	490

在 paramics 模拟仿真的过程中，记录每分钟东向出口道通过的车流量见表 4.6，用于计算车辆在集装箱堆场入口通道闸口前的排队相关指标。

表 4.6 东向出口路段的交通流量（vehicle）

Table4.6 The traffic flow of east road（vehicle）

3	14	22	11	18	17	12	15	7	6	7	9
4	9	7	6	9	8	10	15	14	17	11	14
7	19	17	19	12	15	11	6	9	3	9	8
7	7	7	7	10	9	10	16	18	17	14	12
10	17	23	21	19	15	12	5	2	4	15	11
10	9	7	7	12	12	9	26	14	23	10	15
8	14	14	21	16	15	6	3	4	9	8	9
15	6	1	5	9	5	19	14	12	20	17	13
17	12	15	10	16	7	16	10	7	9	7	16
4	10	8	12	12	13	14	15	22	14	18	6

采用 spss 软件进行单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验可以得到显著性概率为 0.44，在显著水平为 $\alpha=0.01$ 的条件下，由于 $0.44>0.01$ 则认为支持原假设，即认为检验的样本与理论的样本不存在显著差异，因此认为车辆到达入口通道是服从泊松分布的，得到平均到达率 $\lambda=11.63$ 。

根据上述的结果可以计算相关时间指标见表 4.7 所示。

表 4.7 优化配时方案的计算结果

Table4.7 The result of optimal timing scheme

排队的衡量指标	优化配时方案下的结果
系统平均队长（veh）	3.75
系统平均等待队长（veh）	2.89
系统平均等待时间（s）	14.91
系统平均逗留时间（s）	19.35
交叉口的平均延误时间（s）	31.5
车辆的总的等待时间	46.41

将上述计算的结果与第三章中计算的结果进行比较，具体如表 4.8。



表 4.8 两种配时方案的计算结果比较

Table4.8 The comparison of calculation results on two kinds of timing scheme

两种信号配时方案的计算结果			
衡量指标		原有配时方案	优化配时方案
堆场闸口	系统平均队长（veh/min）	3.04	3.75
	系统平均等待队长（veh/min）	2.21	2.89
	系统平均等待时间（s）	11.9	14.91
	系统平均逗留时间（s）	16.38	19.35
交叉口	平均延误时间（s）	35.55	31.5
	平均排队长度（veh）	10.62	9.18
	通行能力（veh/h）	482.75	490
车辆总的等待时间（s）		47.45	46.41

从上述表格中的结果可以看出，堆场闸口前，优化配时方案后的系统排队长度以及平均逗留和等待时间都有明显的增加，根据毗邻交叉口与闸口的关系，这些数据表明毗邻交叉口的通行能力增大了。从毗邻交叉口计算的结果看，优化后的平均延误时间、平均排队长度都有所下降，这也能说明交叉口的通行能力增大了，而直接看输出的通行能力指标，优化后的通行能力增大。再看车辆的总的等待时间，虽然优化后的车辆在交叉口的延误时间明显减少，而车辆在集装箱入口通道处闸口前的排队等待时间增加，但是优化后车辆的总的等待时间稍微的有所下降，证明该优化模型得到的交叉口的配时方案是有效的、最优的解，可以提高交叉口的通行能力，从而提高集装箱堆场的通过能力。

## 第5章 总结与展望

### 5.1 全文总结

本文通过将集装箱堆场系统与港口毗邻交叉口的交通控制联系起来,研究交叉口的交通控制方式对集装箱堆场通过能力的影响,目的是在对堆场布局以相关作业流程优化的基础之上,进一步改善集装箱堆场的生产作业效率,解决在毗邻交叉口和闸口入口通道处的车辆拥挤问题,从而提高集装箱堆场的通过能力。

基于以上的研究目的,本文主要的研究内容归纳如下:

#### (1) 分析集装箱堆场与毗邻交叉口通行能力的关联性

首先在阅读大量文献和调查研究的基础之上,通过对集装箱堆场的整个作业流程的分析,找出制约集装箱堆场通过能力的瓶颈因素,认为堆场毗邻交叉口的通行能力影响堆场的闸口通过能力,也影响着堆场系统的通过能力。所以将毗邻交叉口的通行能力作为研究对象。

#### (2) 建立集装箱堆场闸口排队模型

在分析研究的基础之上,本文将车辆的等待时间作为衡量通过能力的指标。首先,收集一段时间的港口毗邻交叉口的车流量信息,并采用交通模拟仿真软件 paramics 进行实时的交通流进行模拟,得到每分钟通过某出口通道的交通流量,即到达堆场闸口的车流,采用 spss 软件分析,闸口处的车流量的到达是服从泊松分布;其次在通过收集闸口处每辆车接受服务的时间,用 spss 软件分析服务时间是服从正态分布。最后建立了排队模型,求出排队等待时间。

#### (3) 对毗邻交叉口通行能力进行分析

采用 paramics 交通模拟软件对毗邻交叉口进行模拟仿真,将仿真运行的结果加载到 paramics 的 analyser 模块,应用 analyser 输出排队长度、平均延误时间以及交叉口通行能力等相关指标。

#### (4) 建立基于车辆等待时间最短的交叉口配时优化模型

在分析研究的基础之上,认为港口毗邻交叉口与堆场入口通道的闸口之间的联系因素是车流量,交叉口的控制方式影响到达闸口的车流量,进而影响排队的等待时间。而

交叉口的信号配时方案本身对车辆也有一个延误时间,为了使总的等待时间最短,所以在这里基于车辆在交叉口的延误时间和车辆在闸口的等待时间之和最短,以时间最短为目标函数,建立一个配时优化模型,并对模型进行求解。

## 6.2 未来展望

集装箱堆场系统是一个比较复杂的系统,本文在对其研究的过程中,为了简化,做了大量的假设,与实际的运作存在着一定的差距,在充分分析大量影响因素的基础之上,选择其中的一个角度研究,忽略了其他的影响,这样也可能使结果不够真实。由于受文章篇幅和本人能力的限制,使得本文的研究存在着很大的不足之处,需要进行进一步的研究,具体的分析如下:

(1) 对于  $M/G/S/\infty/\infty/FCFS$  的排队模型,目前还没有准确和详细的研究总结,以及相关指标的计算公式,本文是将其简化,利用  $M/G/1/\infty/\infty/FCFS$  的相关理论进行求解,近似得到该模型的指标值,所以为了研究的准确和说服力,需要进一步深入的研究。

(2) 本文对于交叉口的通过的车流量的计算都是基于理论和理想化的情况下,没有考虑特殊情况的发生,也没有考虑到司机的熟练程度不同,也影响车辆通过交叉口的时间,所以对于通过交叉口的车流量的计算有待进一步的研究,以使计算的结果更加准确,更接近于实际情况。

(3) 本文建立的交叉口配时优化模型考虑的约束条件较少,相对理想化,可能无法应用到实际中,需要进一步的结合实际情况,给出合理的约束条件,将模型进行优化,以使其能够接近于实际,能够提高集装箱堆场的通过能力。

## 参考文献

- [1] 陈家源. 港口企业管理学[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2011.
- [2] 武良成, 郑宇劼等. 中国集装箱港口竞争力研究[M]. 北京: 中国经济出版社, 2009.
- [3] 张彦斌. 天津港集装箱码头堆场系统通过能力研究[D]. 大连海事大学, 2010.
- [4] 侯彤璋. 集装箱码头堆场系统通过能力研究[D]. 大连海事大学, 2009.
- [5] 刘翠莲, 肖青. 港口通过能力理论分析与生产力布局研究[J]. 大连海事大学学报. 1996, 5.
- [6] 张维英, 林焰等. 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, 2006 (2): 317-317
- [7] 张艳, 韩晖. 降低集装箱码头堆场翻箱率. 集装箱化, 2008(4): 8-9.
- [8] 谢金泉. 提高集装箱码头闸口通过能力[J]. 集装箱化, 2005 (2): 24-26
- [9] Kim K. E. , Park K. T. A dynamic space allocation method for outbound containers in carrier—direct system[J]. Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Industrial Engineering Theories, Applications and Practice, 1998: 859-867.
- [10] 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.
- [11] Ballis, A and Abacoumkin, C. A container terminal simulation model with animation capabilities[J]. Journal of Advanced Transportation, 1996. 30(1): 37-57.
- [12] 陈超. 基于 WSN 的交叉口信号控制方法研究[D]. 大连理工大学, 2007.
- [13] 李星. 基于 Matlab 的交通流及交叉口信号控制的仿真研究[D]. 华中师范大学, 2008.
- [14] 苗明, 张涛, 宋科. 集装箱港口交通规划研究[J]. 物流技术. 2005, 12.
- [15] 宋科. 大窑湾集装箱港区道路网交通规划研究[D]. 大连: 大连理工大学. 2005, 12.
- [16] 肖矫矫. 集装箱码头路网交通研究[D]. 武汉: 武汉理工大学. 2005, 11.
- [17] 林晓丹. 区域道路交通流和港口集疏运关系研究[D]. 广东: 华南理工大学. 2011, 3.
- [18] James A. pope, Terry R, Rakes, Loren Pavl Rees, Ingrid W. M. Crouch. A network simulation of high-congestion road-traffic flows in cities with marine container terminals[J]. Journal of The Operational Research Society, 1995. 46:1090-1101.
- [19] Palmer Jr, J G, MCLEOD, M, Leue, M C. Simulation modeling of traffic access for port planning[J]. Transportation Research Board Business Office. 1996, 6:180-186.
- [20] Zhang Y. L. . Intermodal Freight Transportation Planning Using Commodity Flow Data[R]. Mississippi State University, 2003.

- [21] Zhongzhen Yang, Gang Chen and Douglas R. Moodie. Modeling Road Traffic Demand of Container Consolidation in a Chinese Port Terminal[J]. Journal of Transportation Engineering, Vol. 136, No. 10, 2010, 881-886.
- [22] 廖明军. 提高平面信号交叉口通行能力的应用性研究[D]. 北京工业大学. 2003:36-37.
- [23] 中国公路学会《交通工程手册》编委会. 交通工程手册[M]. 北京, 人民交通出版社, 2003:33-34.
- [24] 张亚平, 冯桂炎. 道路通行能力理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社. 2007.
- [25] 陈宽民, 严宝杰, 任福田. 道路通行能力分析[M]. 北京, 人民交通出版社, 2003:158-159.
- [26] 姚君华. 平面交叉口通行能力的影响因素[J]. 山西建筑. 2007, 8: 274-275.
- [27] 王宏宾. 平面交叉口通行能力影响因素分析[J]. 公安大学学报, 2003 (1): 89-90.
- [28] 谢军, 严宝杰等. 城市环形交叉口通行能力理论模型[J]. 长安大学学报, 2007. 2.
- [29] 袁晶矜, 袁振洲, 信号交叉口通行能力计算方法的比较分析[J]. 公路交通科技, 2006.
- [30] Gary Long, Ph. D. A Unified Theory of Saturation Flow[C]. Transportation Research Board 85th Annual Meeting, No 1890, TRB, National Research Council, Washington, DC, 2006.
- [31] W.C.Ng.Crane .Scheduling in container yards with inter-crane interference[J]. European Journal on Operation Research, 2005 (164):64-78.
- [32] Mark R.Virkler, Murli Adury Krishna. Gap Acceptance Capacity For Right Turns At Signalized Intersections[J].Transportation Research Board 2000.
- [33] 全永桑. 城市交通控制[M]. 北京:人民交通出版社, 1989.
- [34] 高玮, 周强. 集装箱码头集卡作业模式比较及其建模与仿真[J]. 港口装卸, 2003 (2): 27-29.
- [35] 谢金泉. 提高集装箱码头闸口的通过能力[J]. 集装箱化, 2005 (2):24-26.
- [36] 张维英, 林焰等. 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 (2):317-318.
- [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] Etsuko Nishimura, Akio Imai, Stratos Papadimitriou. Yard trailer routing at a maritime container terminal. Transportation Research, Part E, 41 (2005): 53-76.
- [39] 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. 2002 (124): 89-101.
- [40] 杨静蕾, 丁以中. 集装箱码头设备配置的模拟研究[J]. 系统仿真学报, 2003.
- [41] 杜明, 张明江等. 改进港口集装箱装卸工艺提高其通过能力[J]. 中国水运(理论版), 2006, 6.

- [42] 张晓辉. 优化集装箱码头堆场计划模式初探[J]. 技术应用. 2006, 1:70-74.
- [43] Michel Beuthe. Freight transportation demand elasticity's: a geographic multimodal transpiration network analysis[J]. Transportation Research Part E, 2001, (37):253-266.
- [44] Perter Nikamp. Comparative modeling of interregional transport flows[J]. Applications to multimodal European freight transport, European Journal of Operational Research, 2004, (155):584-602.
- [45] 曾勇, 董丽华, 马建峰等. 排队现象建模、解析与模拟[M]. 西安电子科技大学出版社. 2011.
- [46] 孟玉珂. 排队论基础及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
- [47] 麦宇雄, 卢永昌, 覃杰. 随机服务系统(排队论)在集装箱码头大门设计中的应用[J]. 水运工程. 2007 (5): 39-42.
- [48] 胡列格, 何其超, 盛玉魁. 物流运筹学[M]. 桂林: 电子工业出版社, 2005.
- [49] 黄晓鸣, 徐小义. 排队论在港口规划设计中的应用[J]. 青岛大学学报, 1996. 3:59-62.
- [50] 宋德星. 排队论在集装箱码头设计中的应用[J]. 水运工程, 1995. 2:17-21.
- [51] Jenkins, I. H. The Relative Efficiency of Direct and Maximum Likelihood Estimators of Mean Waiting Time in Simple Queue M/M/1[J]. J. Appl. Prob., 9(1972), 396-403
- [52] 钱颂迪等. 运筹学[M]. 北京:清华大学出版社
- [53] 刘智勇智能交通控制理论及应用[M]. 北京:科学出版社, 2003. 8.
- [54] 顾怀申, 王伟. 交叉口交通信号配时模拟退火全局优化算法[J]. 东南大学学报. 1998, 28(3):68-72.
- [55] Jarkko Niittymä, i Matti Pursula . Signal control using Fuzzy logic [J]. Sets and Systems, 2000, 116:11-22 .
- [56] 陈群, 晏克非. 基于遗传算法的城市交叉口实时信号控制研究[J]. 交通与计算机, 2005(1): 15-18.
- [57] 栗红强. 城市交通控制信号配时参数优化方法研究[D]. 吉林大学博士学位论文, 2004.
- [58] 李瑞敏, 陆化普. 基于遗传算法的交通信号控制多目标优化[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2009, 29 (3): 85-88.
- [59] 李敏强, 寇纪松, 林丹等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- [60] Yafeng Yin. Robust optimal traffic signal timing [J]. Transportation Research Part B, 2008, 42: 911-924.
- [61] D. J. Reid. Genetic Algorithms in Constrained Optimization [J]. Mathematical and Computer Modelling, 1996, 23(5): 87-111.

- [62] 陈群, 晏克非. 基于遗传算法的城市交叉口实时信号控制研究 [J]. 交通与计算机, 2005, 1: 15-18.
- [63] 田丰, 边婷婷. 基于自适应遗传算法的交通信号配时优化[J]. 计算机仿真, 2010, 27(6): 305-308.
- [64] Carlos M. Fonseca, Peter J. Fleming. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: formulation, Discussion and Generation [C]. Proceeding of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms. California: Morgan Kauffman Publishers, 1993: 416-423.
- [65] 雷英杰. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [66] 王炜, 高海龙. 公路交叉口通行能力分析[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

## 附录 程序代码

```
% 主函数程序
function z = mintime(x)
M = 10000;
s = 24;
m = 0.56;
sig2 = 0.2999;
c = 20;
p = 98;
z = 0;
y = [0.393 0.226;0.028 0.213;0.256 0.393;0.196 0.036];
q = [398 294;48 225;331 398;250 83];
for i = 1:4
    c = c + x(i);
end
for i = 1:4
    for j = 1:2
        if c > 180
            z = M;
        else
            z = z + (c-x(i))^2/(c-x(i)*y(i,j)) + y(i,j)^2/(q(i,j)*(1-y(i,j)));
        end
    end
end
end
z = z/8 + (sig2*(m^2)+1)/(2*s*m*((60*s*m*c)/(q(1,1)*x(1)+q(4,2)*x(4)+c*p)-1));
disp(z);
end
% 遗传算法程序
NIND = 40;
MAXGEN = 30;
NVAR = 4;
PRECI = 22;
```



```

GGAP = 0.9;
FieldD = [rep([PRECI],[1,NVAR]);rep([10 10 10 10;40 40 40 40], [1,1]); rep([1;0;1;1],
[1,NVAR])];
Chrom = crtbp(NIND,NVAR*PRECI);
gen = 0;
trace = zeros(MAXGEN,2);
x = bs2rv(Chrom,FieldD);
ObjV(i,1) = mintime(x(i,:));
while gen < MAXGEN
    FitnV = ranking(ObjV);
    SelCh = select('sus',Chrom,FitnV,GGAP);
    SelCh = recomb('xovsp',SelCh,0.6);
    SelCh = mut(SelCh);
    x = bs2rv(SelCh,FieldD);
    [rows,cols] = size(x);
    ObjVSel = zeros(rows,1);
    ObjVSel(i,1) = mintime(x(i,:));
    [Chrom ObjV] = reins(Chrom,SelCh,1,1,ObjV,ObjVSel);
    gen=gen+1;
    [Y,I] = min(ObjVSel);
    Y,bs2rv(Chrom(I,:),FieldD);
    trace(gen,1)=min(ObjV);
    trace(gen,2)=sum(ObjV)/length(ObjV);
    if gen == MAXGEN
        figure(1);
        plot(ObjV); hold on;
        plot(ObjV,'b*');grid;
    end
end
figure(2);clf;
plot(trace(:,1)); hold on;
plot(trace(:,2),'-');grid;
legend('解的变化','种群均值的变化');

```

## 致 谢

时光总是在不经意间匆匆流走，两年的研究生生活已接近尾声。回想在大连海事大学的两年时光，不禁让人感慨万千，研究生的生活不仅磨练了我的心智和意志，也让我在知识上有了更深入的了解，充实了我的大脑，这些将成为我人生中的一笔宝贵的精神财富。

在即将毕业之际，首先我要衷心的感谢我的导师张赫老师。在这两年里，张老师以其诲人不倦的学术精神和渊博的学识深深的影响了我，使我在科学研究的过程中受益匪浅；另外还要感谢老师对我的论文进行认真的指导，从论文的选题、方法到内容的研究等，都离不开张老师的悉心指导，在此向我的导师致以衷心的感谢。

同时感谢我的室友和家人。感谢我的室友王晓薇、石靖以及孙小淇在校期间给予的学习和生活上的帮助，你们使我在学习上取得进步，在生活中充满快乐；尤其要感谢王晓薇同学在论文写作过程中给予我的帮助。感谢我的家人，谢谢你们在我学习和论文写作中的大力支持。

然后要感谢在校学习期间的各位任课老师，你们渊博的学识、严谨的治学态度使我受益终生。

最后衷心感谢评阅本文的各位老师，你们辛苦了！